

# 目 录

前言

译者序

<b>第 1 章 直流电</b> .....	1
1.1 直流电的性质 .....	1
1.2 欧姆定律 .....	3
1.3 电阻性网络 .....	5
1.4 直流磁场 .....	11
<b>第 2 章 交流电</b> .....	15
2.1 频率和波形 .....	15
2.2 度、弧度和幅度 .....	19
2.3 相位关系 .....	22
2.4 电力传输 .....	25
<b>第 3 章 阻抗</b> .....	28
3.1 感抗 .....	28
3.2 $RL$ 电路中的电流和电压 .....	30
3.3 容抗 .....	32
3.4 $RC$ 电路中的电流和电压 .....	34
3.5 虚数 .....	36
3.6 特性阻抗 .....	39
3.7 导纳 .....	41
<b>第 4 章 数字基础</b> .....	44
4.1 计数系统 .....	44
4.2 逻辑 .....	46
4.3 二进制逻辑门电路 .....	47

---

4.4	数字电路 .....	48
4.5	二进制数字通信 .....	50
4.6	数据类型与转换 .....	51
4.7	数据压缩 .....	53
4.8	分组通信 .....	54
4.9	红绿蓝(RGB)色彩模型 .....	55
4.10	数字信号处理 .....	56
<b>第5章 金属导线与电缆 .....</b>		<b>58</b>
5.1	金属导线 .....	58
5.2	导线的绞接 .....	61
5.3	电缆 .....	63
5.4	光纤光缆 .....	66
5.5	连接器 .....	67
<b>第6章 电源 .....</b>		<b>71</b>
6.1	电源的组成 .....	71
6.2	电源变压器 .....	71
6.3	整流器 .....	73
6.4	滤波器 .....	76
6.5	稳压 .....	78
6.6	设备保护 .....	78
6.7	电化学电源 .....	80
6.8	专用电源系统 .....	85
6.9	人身安全 .....	87
<b>第7章 二极管 .....</b>		<b>88</b>
7.1	PN结 .....	88
7.2	电源应用 .....	89
7.3	信号应用 .....	91
7.4	振荡和放大 .....	96
7.5	光(电)发射 .....	97
7.6	光敏二极管 .....	98

---

<b>第 8 章 晶体管与集成电路</b> .....	100
8.1 双极型晶体管 .....	100
8.2 电流放大 .....	103
8.3 双极型晶体管的基本电路 .....	104
8.4 场效应晶体管 .....	105
8.5 电压放大 .....	108
8.6 金属-氧化物-半导体场效应晶体管 .....	109
8.7 场效应晶体管的基本电路 .....	111
8.8 集成电路 .....	113
8.9 线性集成电路 .....	115
8.10 数字集成电路 .....	116
8.11 元件密度 .....	117
8.12 集成电路存储器 .....	118
<b>第 9 章 变送器和传感器</b> .....	120
9.1 声变送器 .....	120
9.2 电磁变送器 .....	122
9.3 机电变送器 .....	123
9.4 传感器 .....	128
<b>第 10 章 电子管</b> .....	134
10.1 电子管的类型 .....	134
10.2 三极管 .....	136
10.3 多栅管 .....	137
10.4 基本电路 .....	138
10.5 阴极射线管 .....	140
10.6 摄像管 .....	141
10.7 行波管 .....	143
<b>第 11 章 振荡器</b> .....	145
11.1 射频振荡器 .....	145
11.2 振荡器稳定性 .....	149
11.3 晶体控制振荡器 .....	150

---

11.4 音频振荡器 .....	153
<b>第 12 章 放大器 .....</b>	<b>155</b>
12.1 放大系数 .....	155
12.2 基本放大器 .....	156
12.3 放大器分类 .....	157
12.4 效率和驱动 .....	159
12.5 音频放大 .....	161
12.6 射频放大 .....	163
<b>第 13 章 滤波器和衰减器 .....</b>	<b>166</b>
13.1 选择性曲线 .....	166
13.2 选择性滤波器的特性 .....	170
13.3 特种滤波器 .....	172
13.4 电网滤波器 .....	175
13.5 衰减器 .....	176
<b>第 14 章 通信 .....</b>	<b>178</b>
14.1 网络 .....	178
14.2 卫星 .....	181
14.3 个人通信系统 .....	182
14.4 业余通信 .....	185
14.5 闪电 .....	187
14.6 安全性和保密性 .....	189
<b>第 15 章 无线电接收机 .....</b>	<b>196</b>
15.1 简单接收机 .....	196
15.2 现代接收机 .....	198
15.3 检波前各级 .....	199
15.4 检波器 .....	201
15.5 音频级 .....	203
15.6 电视接收 .....	204
15.7 特殊无线电技术 .....	207

---

<b>第 16 章 无线电发射机</b> .....	211
16.1 振荡与放大 .....	211
16.2 调制 .....	211
16.3 模拟数字转换 .....	219
16.4 图像传输 .....	219
<b>第 17 章 定位、导航和控制系统</b> .....	224
17.1 雷达 .....	224
17.2 声纳 .....	225
17.3 测向 .....	226
17.4 测距 .....	227
17.5 外延极坐标导航和对数极坐标导航 .....	228
17.6 机器人制导 .....	230
17.7 机器视觉 .....	233
17.8 遥控 .....	234
<b>第 18 章 天线系统</b> .....	238
18.1 辐射电阻 .....	238
18.2 半波天线 .....	239
18.3 $1/4$ 波长天线 .....	241
18.4 环形天线 .....	242
18.5 接地系统 .....	243
18.6 增益和方向性 .....	245
18.7 相控阵天线 .....	247
18.8 无源阵列 .....	248
18.9 特高频和微波天线 .....	250
18.10 馈线 .....	252
18.11 安全 .....	253
<b>第 19 章 电磁频谱</b> .....	255
19.1 基本性质 .....	255
19.2 电波极化 .....	258
19.3 地表面和电离层传播 .....	259

---

19.4	对流层传播 .....	263
19.5	传播特性与频率的关系 .....	264
<b>第 20 章</b>	<b>噪声和干扰 .....</b>	<b>269</b>
20.1	外部噪声 .....	269
20.2	内部噪声 .....	272
20.3	降低噪声 .....	273
20.4	无线干扰 .....	277
20.5	电磁干扰 .....	277
20.6	邻频道干扰 .....	278
20.7	非射频系统 .....	281
<b>第 21 章</b>	<b>测量和监控系统 .....</b>	<b>283</b>
21.1	电流表 .....	283
21.2	特种仪表 .....	286
21.3	监控系统 .....	290
21.4	财产保护装置 .....	295
<b>第 22 章</b>	<b>物理数据 .....</b>	<b>297</b>
22.1	国际单位制 .....	297
22.2	电单位 .....	298
22.3	磁单位 .....	301
22.4	其他单位 .....	301
22.5	前缀乘子 .....	302
22.6	其他单位制 .....	303
22.7	国际单位制的转换 .....	303
22.8	电单位的转换 .....	305
22.9	磁单位的转换 .....	307
22.10	其他单位的转换 .....	307
22.11	常数 .....	309
<b>第 23 章</b>	<b>数学数据 .....</b>	<b>311</b>
23.1	希腊字母 .....	311
23.2	常用数学符号 .....	312

---

23.3	上标和下标 .....	315
23.4	科学计数法 .....	315
23.5	有效数字 .....	317
23.6	代数定理 .....	318
23.7	坐标系 .....	319
23.8	三角学 .....	323
23.9	对数 .....	325
<b>第 24 章</b>	<b>化学数据 .....</b>	<b>327</b>
24.1	原子和分子 .....	327
24.2	元素 .....	329
24.3	化合物和混合物 .....	337
<b>第 25 章</b>	<b>电子学缩写词 .....</b>	<b>342</b>
<b>第 26 章</b>	<b>其他数据 .....</b>	<b>389</b>
26.1	图形符号 .....	389
26.2	莫尔斯电码 .....	397
26.3	Q 信号 .....	398
26.4	十字码 .....	402
26.5	语音字母表 .....	410
26.6	协调世界时间 .....	410
26.7	焊接和去除焊料 .....	412
26.8	机器人时代 .....	416
26.9	湿件 .....	417
索引	.....	419

# 第1章 直流电

直流电 (dc) 是始终沿着同一方向流动的电荷载流子流。这是直流电与交流电 (ac) 的区别所在。电流的大小不需要永远保持不变, 但既然定义为直流电, 其载流子流的方向就一定不能逆转。

## 1.1 直流电的性质

图 1-1 给出电流对时间的四种波形图。图 1-1a、b、c 描绘的是直流电, 因为即使电流的幅度是随时间变化的, 但电流始终是沿同一个方向流动。图 1-1d 不是直流电, 因为电流流动的方向在不断地变化。

### 1.1.1 电流

电流是电荷载流子(通常是电子)流动速率的度量。1安培(1A)的电流代表每秒钟有1库仑(1C)的电荷载流子( $6.24 \times 10^{18}$ 个电子)流过给定点。电流也常常用毫安来表示, 简写作 mA,  $1\text{mA} = 0.001\text{A}$ 。有时也用微安( $\mu\text{A}$ )表示,  $1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A} = 0.001\text{mA}$ 。现在也越来越常用到纳安(nA),  $1\text{nA} = 0.001\mu\text{A} = 10^{-9}\text{A}$ 。

几毫安的电流就会打你一下, 50mA 的电流就会将你严重击伤, 100mA 的电流如果流过胸腔就会致

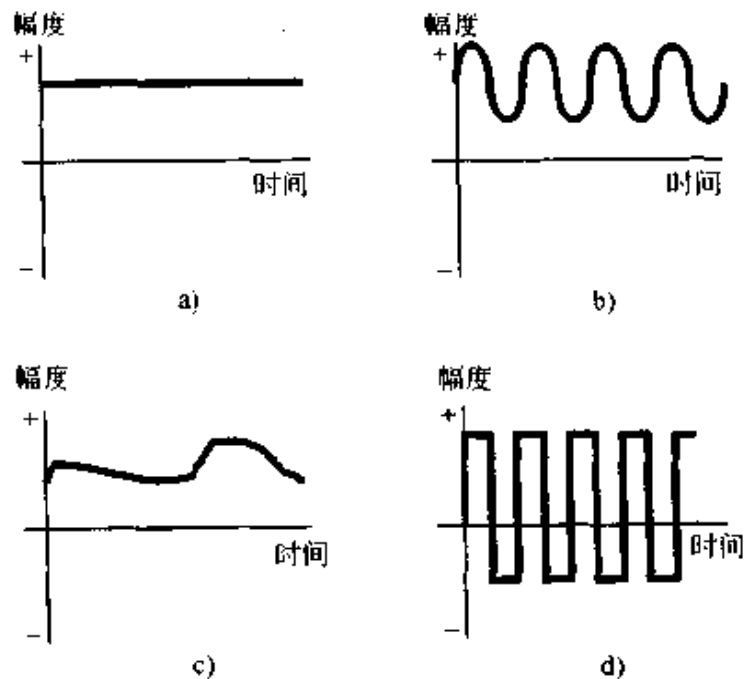


图 1-1 波形示例

a)、b)、c) 直流电波形 d) 非直流电波形



命。在某些线路中会有极大的电流流过,如通过大型发电机输出端金属电极的电流就是如此。在这种情形下,电阻非常小,同时发电机也能产生出大量的电荷来。

在某些半导体电子设备(如微电脑)中,几纳安的电流就足以完成复杂的电子过程。某些电子钟支取的电流也极少,在电池的有效期内,钟能够一直工作。

### 1.1.2 电阻

**电阻**是电路对电流流动的对抗。电阻的标准单位是**欧姆**( $\Omega$ )。其他常用的单位还有**千欧**( $k\Omega$ ),  $1k\Omega = 1000\Omega$ , 以及**兆欧**( $M\Omega$ ),  $1M\Omega = 1000k\Omega = 10^6\Omega$ 。

当电流流过电阻性材料时,在电阻性物体的两端就一定会产生电位差(电压)。流过电阻的电流越大,两端的电位差就越大。一般来说,倘若电阻不变,电压是同电流成正比的。

电路总有一定的电阻。当某些金属冷却到极低的温度时,它们实际上会失去全部电阻,但永远不会变成理论上的纯导体。同样也没有理论上无穷大的电阻,尽管在实际意义上可以是无穷大的。空气在某种程度上也是导电的,尽管其影响通常小到可以忽略不计。在一些电子应用中,是根据它们的电阻在多大程度上接近无穷大来选用材料的,这些材料被用作良好的绝缘器材和电容器的电介质材料。

在实用的电子电路中,某个特定元件的电阻会随着其工作条件的变化而变化,例如,晶体管在某些时候会有极高的电阻,在另一些时候又会有很低的电阻。这种高低波动可每秒发生几千次、几百万次甚至几十亿次。

### 1.1.3 电动势

在  $1\Omega$  电阻两端加上  $1V$  的**电动势**将在电阻中产生  $1A$  的电流。通常就是这样来定义**伏特**的。但是在没有电流流动时也可能存在电动势,例如在雷击发生前就是如此。没有连接上任何东西的电池也是如此。只有在存在导电通道时电荷载流子才会运动。

大的电动势未必产生大的电流。有一个很好的例子就是当你在地毯上来来回回走过之后,你身体上会形成几千伏的电动势,这听起来似乎很危险,但其实没有多少库仑的电子。因此当你去触摸一个接地物体

时,相对而言并没有多少电子流过你的手指,你只是被轻微地打了一下。

如果存在许多库仑的有效电荷载流子,像 100V 这样中等大小的电动势就可以产生通过人体的致命电流。这就是为什么在带电情况下去维修某些电子设备,尤其是使用真空管的电子设备,是非常危险的。这类系统的电源能释放出大量的电荷通过人的身体,如果导电通道经过心脏,就造成了触电致死。

#### 1.1.4 直流电源

典型的直流电源有整流电源、电化学电池、光电池和光电池。直流电流的大小或幅度可以随时间而波动,这种波动也许是周期性的。其中某些情形是直流电上叠加有交流成分,如图 1-1b。接收调制光通信信号的光电池的输出就是这样一个例子。直流电源有时也称为*直流电发生器*。

电池和各种其他的直流电源产生一个恒定的电压,它们称作*纯直流*,在电压对时间的图上可以用一根直的水平线来表示,如图 1-1a。在这种情形,峰值与有效值相同,而峰-峰值等于零,因为瞬时幅度从不变化。在某些情况下,直流电压值随着时间迅速地脉动或振荡,就像交流电波的变化。例如,半波或全波整流器未经滤波的输出就是*脉动直流*。

## 1.2 欧姆定律

大多数直流电路都可以简化为三个主要的元件:一个电压源,一组导线和一个电阻。电压或电动势源以  $E$  表示,导线中的电流和电阻分别用  $I$  和  $R$  表示。电流、电压和电阻之间的相互关系是电路的最基本的法则之一,它称为*欧姆定律*,是用第一个表述这个关系的科学家欧姆的名字命名的。该定律由如下三个公式来表示:

$$E = IR$$

$$I = \frac{E}{R}$$

$$R = \frac{E}{I}$$

你只需要记住第一个方程就可以推导出另外两个来。最容易的记忆方法是记住  $E$  代表电动势或电压,  $I$  代表电流,  $R$  代表电阻, 再记住它们是按字母顺序出现的, 而等号是在  $E$  的后面。你也可以想像一个如图 1-2 所示的三角形, 字母  $E, I, R$  也是以字母顺序出现的, 自上而下, 自左至右。

假如给出的初始量不是以伏特、安培和欧姆为单位, 那么必须先转换成这些单位再行计算。此后你还可以把结果的单位再转回到你喜欢用的单位去。例如, 如果你计算得到的电阻为  $13\,500\,000\Omega$ , 你也许更喜欢写成  $13.5\text{M}\Omega$ 。

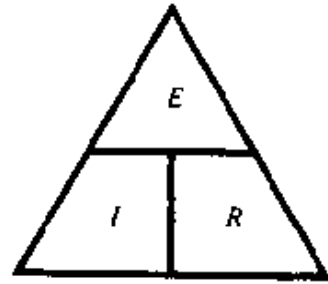


图 1-2 用于帮助记忆的  
欧姆定律三角形

### 1.2.1 电流计算

欧姆定律的第一个用途是用来计算直流电路中的电流值。要求得电流就必须知道电压和电阻或能推导出它们来。

参照图 1-3 的原理图, 它由一个可调节的直流电源, 一个电压表, 若干导线, 一个电流表和一个带刻度的宽量程电位器所组成。若直流电源给出  $10\text{V}$  电压, 电位器调在  $10\Omega$  的值, 则用公式  $I = E/R$  就能求得电流值。把  $E$  和  $R$  的值代入公式, 它们都等于 10, 因为所用的单位是伏特和欧姆, 于是  $I = (10/10)\text{A} = 1\text{A}$ 。

### 1.2.2 电压计算

欧姆定律的第二个用途是知道了电流和电阻后求未知的电压。设图 1-3 中的电位器调在  $100\Omega$ , 所测得的电流为  $10\text{mA}$ , 用公式  $E = IR$  来求电压。首先, 把电流的单位换成安培:  $10\text{mA} = 0.01\text{A}$ , 然后与电阻值相乘:  $E = 0.01 \times 100\text{V} = 1\text{V}$ 。

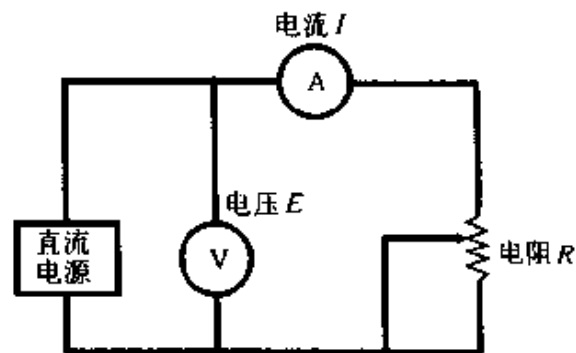


图 1-3 验证欧姆定律的电路

若电位器调在  $157\text{k}\Omega$ , 电流表的读数是  $17\text{mA}$ , 那么就要把电阻和电流值都换算成合适的单位:  $157\text{k}\Omega = 157\,000\Omega$ ,  $17\text{mA} = 0.017\text{A}$ , 然后两者相乘:  $E = IR = 0.017 \times 157\,000\text{V} = 2669\text{V} = 2.669\text{kV}$ , 你也可以四舍五入为  $2.67\text{kV}$ 。

### 1.2.3 电阻计算

欧姆定律的第三个用途是知道了电压和电流后求知直流电路中两点之间的电阻。设图 1-3 中电压表和电流表的刻度均可读出,而电位器是未经校准刻度的。若电压表的读数为 24V,电流表的读数为 3.0A,则可由公式  $R=E/I$  求得电位器的数值为: $R=(24/3.0)\Omega=8.0\Omega$ 。

若电流为 18mA,电压为 229mV,则先要把单位换成安培和伏特: $I=0.018A$ , $E=0.229V$ ,然后代入方程  $R=E/I=(0.229/0.018)\Omega=13\Omega$ 。

### 1.2.4 功率计算

你可以用公式  $P=EI$  来计算图 1-3 所示的直流电路中的功率,即电压(以伏特为单位)和电流(以安培为单位)的乘积。如果没有直接给出电压值,知道了电流和电阻就可计算出它来。在给出  $I$  和  $R$  而没有给出  $E$  的情况下,可以用公式  $P=(IR)I=I^2R$  来计算功率。在给出电压和电阻而没有直接给出电流的情形,因为  $I=E/R$ ,所以用公式  $P=E(E/R)=E^2/R$  也可以求得功率。把上面的几个式子放在一起,则计算功率的公式为:

$$P=EI=I^2R=\frac{E^2}{R}$$

设图 1-3 中电压表的读数为 12V,电流表的读数为 50mA,用公式  $P=EI$  来求电阻器所消耗的功率。先要把电流的单位换成安培: $I=0.050A$ ,则代入公式得出  $P=EI=12\times 0.050W=0.60W$ 。

若电阻是  $999\Omega$ ,电压是 3V,则从公式求得  $P=E^2/R=(3\times 3/999)W=0.009W=9mW$ 。

若电阻是  $0.47\Omega$ ,电流是 680mA,把单位换成欧姆和安培后,用公式  $P=I^2R$  可求得  $P=0.680\times 0.680\times 0.47W=0.22W$ 。

## 1.3 电阻性网络

在直流电路中常利用电阻组合来调节电流、控制电压和把工作参数设定成所需要的值。

### 1.3.1 电阻串联

当把电阻串联起来时,将它们的欧姆值简单相加就得到总电阻,

这一点很直观也很好记。

设电阻值分别为  $112\Omega$ 、 $470\Omega$  和  $680\Omega$  的三个电阻串联在一起, 则串联组合的总电阻就是  $(112+470+680)\Omega=1262\Omega$ 。

### 1.3.2 电阻并联

当电阻并联连接时, 其性能与串联不同。一般来说, 一个一定阻值的电阻器在并上另外的电阻器之后, 总的阻值将会减小。

研究电阻并联的一种方法是把它们看作电导。在并联时, 电导相加, 就同串联时电阻相加一样。电导的标准单位是西门子, 用  $S$  表示, 计算时先将所有的欧姆值变换为西门子, 然后把那些数字相加, 再把最终结果转回到欧姆值。

代表电导的符号是  $G$ , 它与电阻  $R$  的关系为

$$G = \frac{1}{R}$$

$$R = \frac{1}{G}$$

其中,  $G$  的单位为西门子,  $R$  的单位为欧姆。

要求三个或三个以上的电阻器并联时的总电阻, 可按如下的步骤进行:

- (1) 把所有的电阻值都转换成以欧姆为单位。
- (2) 取每个电阻值的倒数, 得到以西门子为单位的相对应的电导值。
- (3) 把各电导值相加, 得到并联组合的总电导。
- (4) 取总电导的倒数, 就得到以欧姆为单位的并联组合的总电阻。

我们来考虑 5 个电阻器并联的情况。如图 1-4 所示, 它们是从  $R_1$  到  $R_5$ , 总电阻称之为  $R$ 。设

$R_1=100\Omega$ ,  $R_2=200\Omega$ ,  $R_3=300\Omega$ ,  $R_4=400\Omega$ ,  $R_5=500\Omega$ 。把电阻值转换成电导值后得到  $G_1=(1/100)S$

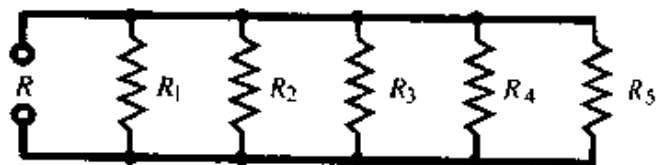


图 1-4 5 个电阻并联后的总电阻  $R$

$= 0.01\text{S}$ ,  $G_2 = (1/200)\text{S} = 0.005\text{S}$ ,  $G_3 = (1/300)\text{S} = 0.00333\text{S}$ ,  $G_4 = (1/400)\text{S} = 0.0025\text{S}$ ,  $G_5 = (1/500)\text{S} = 0.002\text{S}$ 。把这些值相加, 得到  $G = (0.01 + 0.005 + 0.00333 + 0.0025 + 0.002)\text{S} = 0.0228\text{S}$ , 于是得出总电阻  $R = 1/G = (1/0.0228)\Omega = 43.8\Omega$ 。

当几个阻值相等的电阻并联时, 总电阻就等于单个电阻的阻值除以并联电阻的数目。

### 1.3.3 功率分配

当电阻组合连到电压源上时, 它们会支取电流。你可以先计算出组合的总电阻, 然后把网络看成一个单个的电阻器, 就可以知道它支取了多少电流了。

如果网络中的电阻都具有相等的欧姆值, 则从电源支取的功率将在这些电阻之间平均分配, 而不管它们是串联连接还是并联连接的。如果网络中的电阻并不具有相等的欧姆值, 那么它们的功率分配就是不均匀的。在这种情况下, 就要先求出流过每只电阻器的电流或者求出每只电阻器两端的电压, 然后利用直流功率的公式  $P = I^2 R$  或  $P = E^2/R$  来计算功率。

### 1.3.4 电阻串并联

具有相等欧姆值的一组电阻器, 可以连成串联网的并联组, 也可以连成并联网的串联组。这样一来, 电阻总的承载功率的能力比起单个的电阻器来要增大了许多。

有时, 串并联网络的总电阻与其中任何一个电阻器的阻值是一样的。如果用相同的元件组成一个  $n \times n$  矩阵的网络时就是这种情况。也就是说, 当  $n$  是整数时, 有  $n$  个电阻器串联起来, 再组成  $n$  个并联组, 见图 1-5a, 或者有  $n$  个电阻器并联起来, 再组成  $n$  个串联组, 见图 1-5b。实际上这两种配置得到的结果是完全一样的。工程师和技术人员

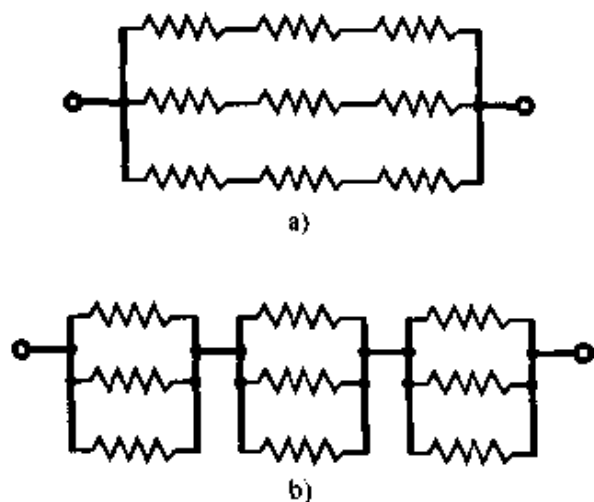


图 1-5 电阻器串并联

a) 串联电阻器的并联连接

b) 并联电阻器的串联连接

有时就用这种方法来得到能承载大功率的电阻器。每个电阻器应当具有同样的额定功率,比如说 1W,那么  $n \times n$  电阻器组合的功率承载能力将是单个电阻器的  $n^2$  倍。例如 2W 电阻器的  $3 \times 3$  串并联矩阵可以承载  $3^2 \times 2W = 18W$  的功率,1W 电阻器的  $10 \times 10$  矩阵就可以承载 100W 的功率。

由同样的电阻器组成的非对称串并网络也可以增加功率承载能力。但在这种情形下,总电阻与单个电阻器的阻值不相等。然而只要所有的电阻器都是相同的,那么总的功率承载能力所增大的倍数就相当于电阻器的总数,而不管其网络是对称的还是非对称的。<sup>①</sup>在工程应用中,有时就有用到非对称网络的情形。

### 1.3.5 串联电阻中的电流

在直流串联电路中,任一点的电流与其他任意点的电流是一样的。不管实际的元件是什么,也不管它们是否具有相同的电阻,这一点总是对的。

如果直流串联电路中的元件具有不同的电阻值,那么有些元件就要比另一些元件消耗更多的功率。要是其中的一个元件发生短路,通过整个电路的电流会增大,因为电路的总电阻减小了。要是有一个元件开路,那么任何地方的电流都为零。

### 1.3.6 串联电阻两端的电压

在串联电路中,电压是分配在各元件上的,每个电阻上的电位差的总和等于电源电压。不管电阻多大或多小,也不管它们是否全都具有相同的阻值,这一点总是对的。60Hz 的实际交流电路也总是如此。

串联电路中任何电阻器两端的电压等于电流和电阻的乘积,注意在计算时要用伏特、欧姆和安培作单位。要知道电路中的电流  $I$ ,就需要知道总电阻和电源电压:  $I = E/R$ 。先求出整个电路中的电流,然后就可算出任何一个电阻器两端的电压了。

### 1.3.7 并联电阻两端的电压

在并联电路中,每个元件两端的电压都是相同的,而且总是等于电

① 原文如此,实际并非如此。在此情形下,功率承载能力所增大的倍数并不等于电阻器的总数。——译者注

源或电池电压。每个元件支取的电流只与该元件的电阻有关。从这个意义上说,并联电路中的元件是独立地工作的,而串联电路中的元件则是互相影响的。

如果拿走并联电路中的任一支路,其他支路中的情况将维持不变。如果加进新的支路,只要电源能够承载,原有支路中的情况也不受影响。

### 1.3.8 并联电阻中的电流

参照图 1-6 的原理图,电阻器为  $R_n$ , 电路总的并联电阻是  $R$ , 电池电压为  $E$ 。含有电阻  $R_n$  的支路中的电流用电流表来测量,称作  $I_n$ 。

电路中所有支路中的电流  $I_n$  的和等于从电源支取的总电流  $I$ 。这就是说,并联电路中的电流是被分割开的,正如串联电路中的电压被分割开的一样。

### 1.3.9 串联电路中的功率分布

要计算一个由  $n$  个电阻器串联而成的电路中某个特定的电阻器  $R_n$  所消耗的功率,需先找出该电路所通过的电流  $I$ 。根据公式  $P_n = I^2 R_n$  就很容易算得该功率  $P_n$  的值了。

串联电路中消耗的总功率等于每个电阻器所消耗的功率之和。

在这方面,串联电路中的功率分布类似于电压的分布。

### 1.3.10 并联电路中的功率分布

当电阻并联连接时,每个电阻也是按同一公式  $P = I^2 R$  消耗功率的,不过各电阻中的电流是不同的。计算电阻器  $R_n$  所消耗的功率  $P_n$  的比较简易的方法是采用公式  $P_n = E^2 / R_n$ , 其中  $E$  是电源电压。在并联电路中,每个电阻器两端的电压都是这个电压。

在并联电路中所消耗的总功率等于各个电阻上消耗的功率之和。在这一点上,并联电路和串联电路是一样的。所有的功率都必须有来龙

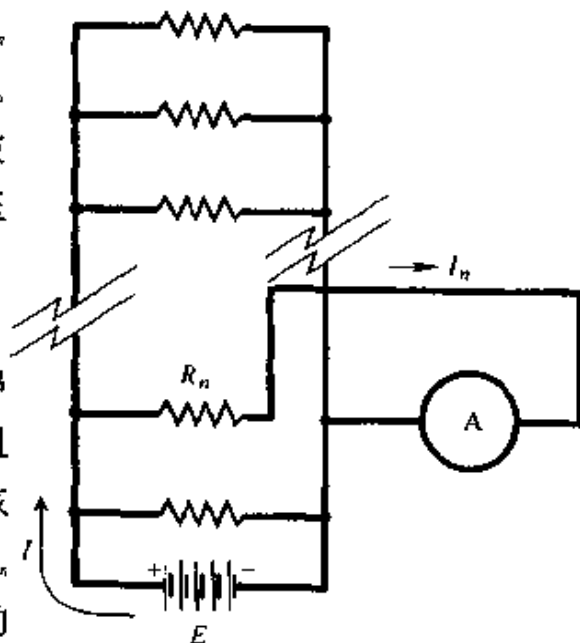


图 1-6 直流并联电路中的电流分析



去脉,功率决不会来无影去无踪。

### 1.3.11 基尔霍夫定律

**基尔霍夫第一定律:**流入直流电路中任一节点的电流总等于流出该节点的电流。不管有多少支路进到那个节点或有多少支路离开那个节点,见图 1-7a。一个定性的说法就是,电流决不会来无影去无踪。

**基尔霍夫第二定律:**从某个固定点出发,绕直流电路一周,以另一个方向回到该点,把电压的极性考虑在内,则所有电压之和总等于零,见图 1-7b。换句话说,电压决不会来无影去无踪。

### 1.3.12 分压器

电阻串联产生电压的配比,这种配比可满足某些需要。在设计分压器网络时,电阻值应尽量小,但又不能让电源消耗过多的电流。实际上,电阻的最佳值取决于所设计电路的性质。分压器阻值越小(最小值取决于电源承载电流的能力),调节中间电压越有效。

图 1-8 表示分压的原理。各电阻分别为  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ ; 总电阻  $R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$ 。电源电压为  $E$ , 所以电路中的电流  $I = E/R$ 。在图中  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$  各点上的电压分别为  $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ ; 最后一个电压  $E_n$  就等于电源电压  $E$ 。所有其他的电压都小于  $E$ , 即  $E_1 < E_2 < E_3 < \dots < E_n = E$ 。

电压在各点间的增长是按照到达每个点的电阻之和与总电阻之比乘上电源电压这种方式进行的。因此,  $E_1 = E(R_1/R)$ ,  $E_2 = E(R_1 + R_2)/R$ ,  $E_3 = E(R_1 + R_2 + R_3)/R$ , 如此等等。

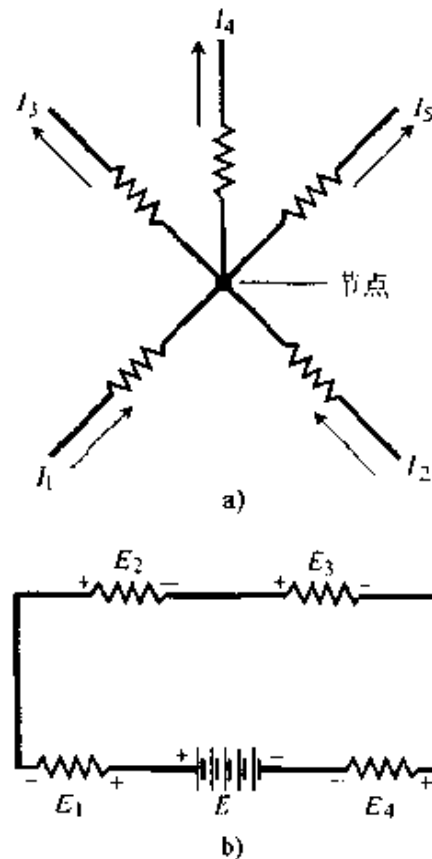


图 1-7 基尔霍夫定律

a) 基尔霍夫第一定律

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$$

b) 基尔霍夫第二定律

$$E + E_1 + E_2 + E_3 + E_4 = 0$$

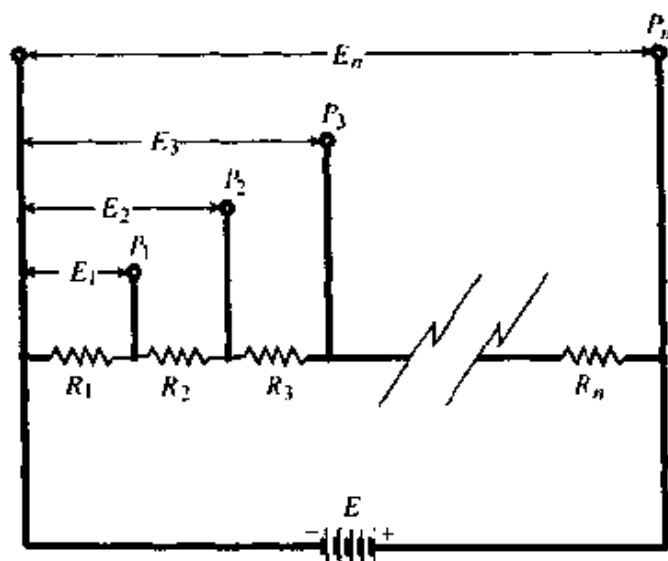


图 1-8 分压器电路原理

## 1.4 直流磁场

当物质中的原子整齐排列时磁场就产生了。电荷载流子在导线中或在自由空间中的运动也会产生磁场。

### 1.4.1 磁通量

物理学家把磁场看作是由磁通(量)线构成的。磁通的大小是由穿过一定横截面积(如  $1\text{cm}^2$  或  $1\text{m}^2$ )的磁通(量)线数目来决定的。

磁场被认为起始于北磁极并终止于南磁极,磁场中的磁通(量)线总是连接着这两极。磁铁棒周围最大的磁通(量)密度或磁场强度是在磁通(量)线会聚的磁极附近。在载流导线周围,最大的磁场强度是在靠近导线处。

### 1.4.2 磁场强度

磁通的大小用韦伯来度量,记作  $\text{Wb}$ 。在磁场较弱时则用一个较小的单位麦克斯韦 ( $\text{Mx}$ )<sup>①</sup>。  $1\text{Wb}=10^8\text{Mx}$ ,反之  $1\text{Mx}=10^{-8}\text{Wb}$ 。

比起总体的磁通量来,磁通(量)密度在表达磁效应时更有用。1 特斯拉 ( $1\text{T}$ )的磁通量密度等于  $1\text{Wb}/\text{m}^2$ ,1 高斯 ( $1\text{G}$ )的磁通(量)密度等于  $1\text{Mx}/\text{cm}^2$ 。所以,  $1\text{G}=10^{-4}\text{T}$  或  $1\text{T}=10^4\text{G}$ 。磁动势的单位为安匝 ( $\text{A}$ )。弯成一个圆圈并流过  $1\text{A}$  电流的导线将产生  $1\text{A}$  的磁动势。磁动

① 在 CGS 制中,磁通的单位用麦克斯韦 ( $\text{Mx}$ )。——译者著

势有时也用吉伯(Gb)<sup>①</sup>作单位。 $1A=1.26Gb$ 。

### 1.4.3 安培定律

导体周围的磁场强度与导体中的电流成正比。对于一根直导线,磁通量采取以导线为轴心的同心圆柱体的形式。图 1-9 就是这种情况的横截面视图,由于导线垂直于页面,故其轴表现为一个点。

物理学家定义电流是以正极向负极流动的,请记住这一点。假设图中的电流是从纸面向着你流过来的,按照安培定律,这时的磁通量是逆时针方向。

安培定律有时也称为右手法则。如果伸出你的右手,拇指伸直,其余手指弯曲,把你的拇指指向直导线中电流流动的方向,其余弯曲的手指就指示磁通量的方向。同样,如果让你右手的四个手指沿着磁通量的方向弯曲,那么拇指所指示的就是电流的方向。

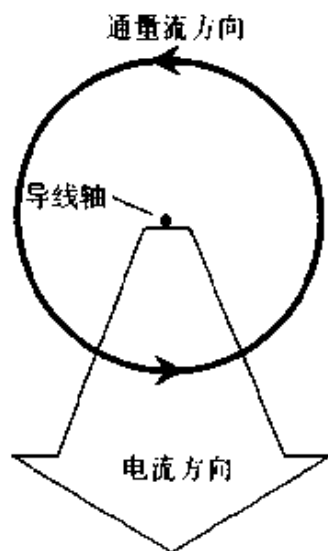


图 1-9 载流导体的安培定律

### 1.4.4 磁导率

磁导率是材料聚合磁通量程度的度量。增加磁通量密度的材料称作铁磁性材料,这些物质是可以被“磁化”的。铁和镍就是这类材料。某些合金比纯铁或纯镍有更强的铁磁性。扩张或稀释磁通量的材料称为抗磁性材料。石蜡、干木材、铋和银与空气或真空相比,是减少磁通量密度的材料。

磁导率是在相对于真空或自由空间的尺度上来度量的。赋予自由空间的磁导率为 1,纯空气的磁导率差不多等于 1。如果你把一块铁心放进一只线圈,磁通量密度将增大 60~8000 倍,大小与铁的纯度有关。因此,铁的磁导率大体上是以 60(不纯的铁)直至 8000(高度提纯的铁)。如果你使用某些合金作电磁铁的芯子材料,也可以增大磁通量密度,使局部场强提高 1 000 000 倍之多。一些常用材料的磁导率列在表 1-1 中。

① 国标中不用这个单位。——译者著

表 1-1 一些常用材料的磁导率

材 料	磁导率(近似值)	材 料	磁导率(近似值)
铝	略大于 1	镍	50~60
铋	略小于 1	坡莫合金	3000~30 000
钴	60~70	银	略小于 1
铁氧体	100~3000	铜	300~600
自由空间	1	超坡莫合金	100 000~1 000 000
铁	60~100	石蜡	略小于 1
提纯的铁	3000~8000	干木材	略小于 1

通常,抗磁性材料是用来把磁性物体隔离开以尽量减小它们之间的相互影响。非铁磁性金属如铜和铝等,它们传导电流的性能很好,传导磁流的性能则很差,可用作**静电屏蔽**。这是允许磁场透过而阻断电场的一种方法。

#### 1.4.5 继电器

**继电器**,见图 1-10,是利用电磁铁来作遥控开关。在没有电流流过电磁铁时,称作**衔铁**的活动臂被弹簧顶在一边,此时 X 端与 Y 端相通,但与 Z 端不通。当有足够的电流流过电磁铁时,衔铁被拉向另一边,这时 X 端就与 Y 端断开而与 Z 端相通了。

**常闭继电器**是当电磁铁中没有电流流过时电路是闭合的,而当有电流流过时电路就被断开了。**常开继电器**则刚好相反。有些继电器具有好几组触点。有些被设计成长时间保持一种状态(有电流或没有电流),也有一些则 1s 要开关许多次。

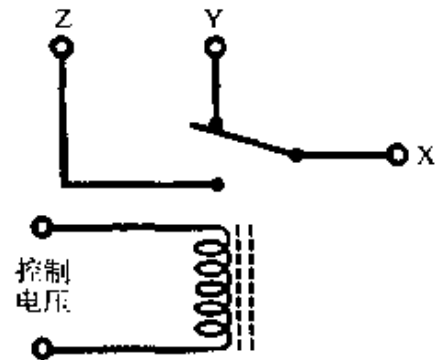


图 1-10 简单继电器的工作原理

#### 1.4.6 磁带

**磁带**被用于家庭娱乐设备,尤其是高保真(hi-fi)音响和视频。磁带是由无数氧化铁颗粒附着在柔软的非磁性带子上构成的。由录音(像)头产生的波动的磁场使这些颗粒极化。当录音(像)头附近的磁场强度变化时,磁带则以恒定、可控的速度从磁头前通过。这样就形成了氧化铁颗粒朝前、后方向的极化。

在放音(像)的模式,磁带以同样的速度通过录音(像)机,各颗粒处

的磁场形成一个波动的磁场,该磁场被拾音(像)头所检测到。这个磁场的变化与来自录音(像)头原先磁场的变化是一样的。

磁带上的数据能被外来磁场畸变或抹去。过热也会导致数据的丢失,甚至有可能导致磁带本身被损坏。

#### 1.4.7 磁盘

从微观上说,磁盘的原理和磁带是一样的。信息是以数字形式储存的,也就是说,颗粒的磁化只取两种不同的方式。这就形成几近完美的无差错的储存。

从大的方面说,由于两者的几何结构不同,磁盘和磁带的工作方式是不同的。在磁带上,信息的分布有很长的跨度,数据的一些数位与其他数位离开得很远;而在磁盘上,两个数位间的距离不会超过盘的直径。所以,与磁带相比,数据在磁盘上的存储和检索都要快得很多。

在操作和存放磁盘时,也有与对待磁带同样的注意事项。

## 第2章 交流电

在交流电中,电流的方向或电压的极性是以一定的时间间隔逆转的。由于极性的逆转,所以*瞬时绝对值*一般是变化着的,只有理论上完美的交流方波是例外,这种波即使在极性改变时其瞬时绝对值也保持不变。

### 2.1 频率和波形

在*周期性交流波*中,幅度对时间的函数不断地重复着。一个重复或一个循环之间的时间长度称

作波的*周期*。图 2-1 画出了一个简单的交流波形。从理论上说,周期大致上可从千百万分之一秒直至许多个世纪。射频电流可以每秒钟变换极性几百万甚至几十亿次,而被太阳磁场俘获的带电粒子要几年才改变一次方向。周期用秒来度量时记作  $T$ 。

波的*频率*  $f$  是周期的倒数,即  $f = 1/T$  和  $T = 1/f$ 。频率的单位是*赫兹* (Hz),代表每秒钟完成一个完整的交变循环。较高的频率则用*千赫* (kHz)、*兆赫* (MHz)或*吉赫* (GHz)来表示,它们之间的关系为:

$$1\text{kHz} = 1000\text{Hz}$$

$$1\text{MHz} = 1000\text{kHz} = 10^6\text{Hz}$$

$$1\text{GHz} = 1000\text{MHz} = 10^9\text{Hz}$$

有时也用到一个更大的单位*太赫* (THz),它等于  $10^{12}\text{Hz}$ 。虽然电磁辐射可以达到如此高的频率,但电流通常达不到。

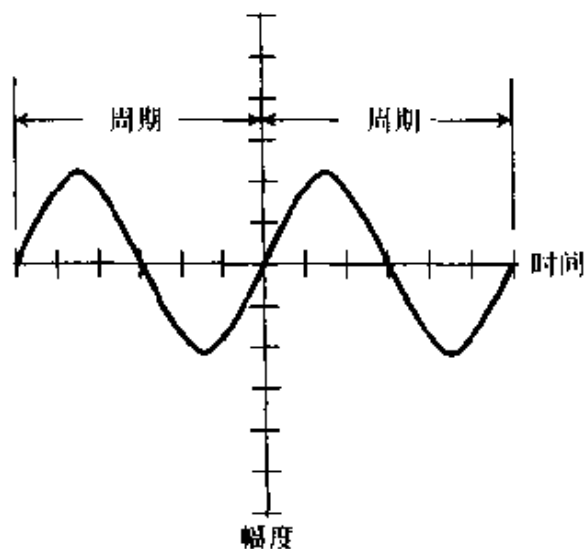


图 2-1 正弦波(周期是完成一个循环所需要的时间长度)

某些交流波只有一个频率,它们是**纯正弦波**。通常存在着称作**谐波**的分量,它们的频率是**基频**的整数倍,有时也许还有不相关频率的分量。有些波极为复杂,它们是由几百、几千甚至无数多个不同的频率分量组成的。

### 2.1.1 正弦波

有时交流电具有**正弦波**或正弦曲线的性质。图 2-1 的波形就是一个正弦波。任何由单一频率所组成的交变波都具有完美的正弦波形状;同样,任何完美的正弦波电流只包含一个频率分量。

实际上,一个波也许非常接近正弦波以至于在示波器上看起来完全像正弦函数,而事实上却存在着微量的其他频率成分。不足处常常小得难以察觉。在美国,实际使用的交流电就具有频率为 60Hz 的几近完美的正弦波波形。

### 2.1.2 方波

在示波器上,完美的**方波**看起来像一对平行的虚线,一条具有正的极性,另一条具有负的极性,如图 2-2a。事实上常可看到像垂直线的过渡,如图 2-2b。

方波可能有相等的正负峰值,这时波的绝对幅度恒定在某个电压、电流或功率的电平上,有一半时间其幅度为  $+x$  伏、安或瓦,另一半时间则为  $-x$  伏、安或瓦。

有些方波是非对称的,正与负的幅度不相等。如果幅度为正的时间长度与幅度为负的时间长度不等,这样的波不是真正的方波,而是称之为一个更一般的术语:**矩形波**。

### 2.1.3 锯齿波

有些交流波是以恒定的速率而非瞬时地转换它们的极性。幅度对时间直线的斜率反映了幅度变化的快慢。由于它们的形状像锯齿,因此

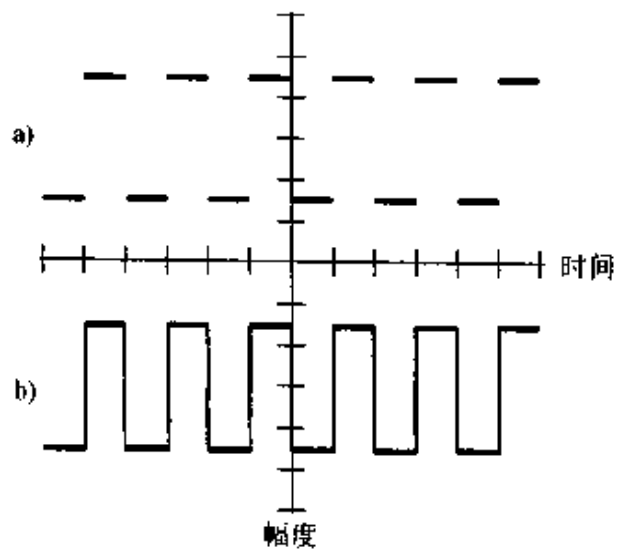


图 2-2 理论方波和常见的波形

a) 理论上完美的方波 b) 常见的波形

称作锯齿波。

锯齿波由某些电子测试设备来产生,它们提供了用于控制的理想信号。也可以利用集成电路来产生符合所需形状的锯齿波。

图 2-3 是锯齿波的一种形式。正向斜率(上升)极陡,就和方波一样;但负向斜率(下降或衰减)则是逐渐变化的。两个相邻脉冲上处于同样位置的两点之间的时间长度就是波的周期。

另一种形式的锯齿波正好相反,具有正向的渐变斜率和负向的垂直过渡。这种类型的波有时称之为斜波,见图 2-4,它常用于电视机和示波器中的扫描。

锯齿波的上升和衰减斜率

可以有无数个不同的组合。图 2-5 是其中的一个例子。这时,正向的斜率与负向的斜率相同,这种波称为三角波。

#### 2.1.4 复合波和不规则波

图 2-6 是一个复合波的例子,它有一个明确的周期,所以也就有一个特定的可以测量的频率。周期就是相邻的两个波的循环上处于同样位置的两点之间的时间长度。

对某些波来说,很难或几乎不可能确定它的周期,因为这种波具有两个或两个以上近乎同样大小的分量。在这种情况下,波的频谱是多重性的,能量分散在两个或两个以上的频率上。

一个交流正弦波在频谱分析仪上显示出来的是一个单个

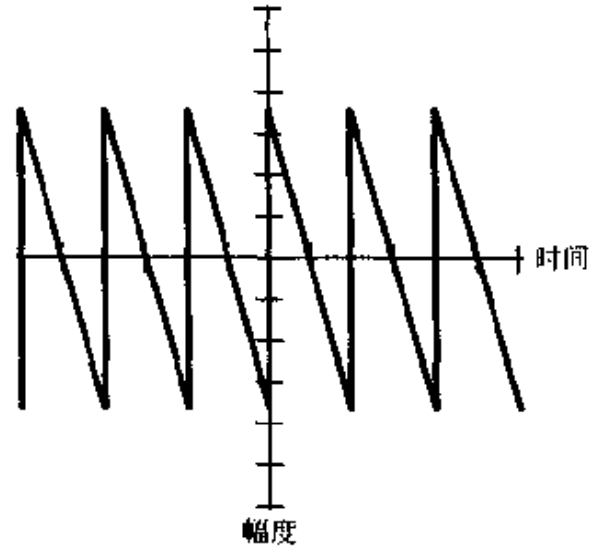


图 2-3 一种快速上升缓慢衰减的锯齿波

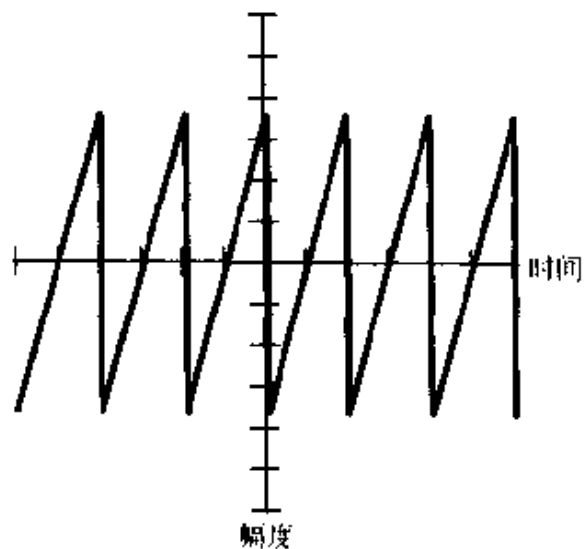


图 2-4 一种缓慢上升快速衰减的锯齿波



的尖峰脉冲,见图 2-7a。这意味着波中所有的能量全都集中在一个频率上。许多交流波除基频外还有某些谐波。通常如果一个波的频率等于基频的  $n$  倍,那么它就是  $n$  次谐波。图 2-7b 画出了一个带有几个谐波的波,这是在频谱分析仪的显示屏上所看到的样子。方波和锯齿波的频谱除基频外还含有谐波能量。波的形状与谐波所含的能量大小以及能量在各谐波频率间的分布方式有关。

不规则波实际上可以有任何的频率分布,图 2-8 就是一个例子。这是一个调幅无线电信号的频谱显示。大部分能量集中在谱样的中心,处

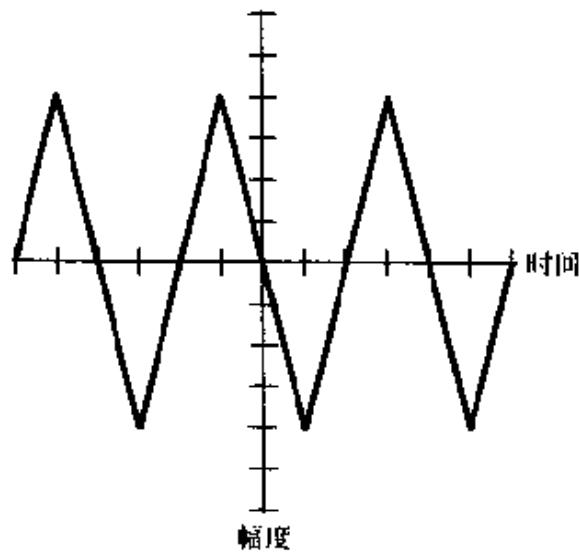


图 2-5 三角波

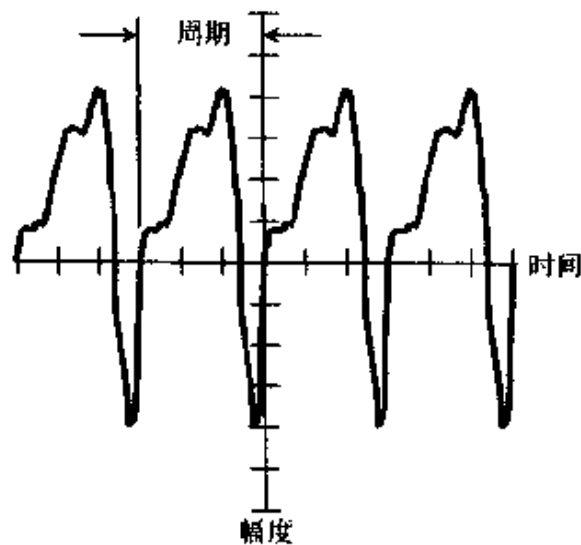


图 2-6 复合波

于垂直线所示的频率上。也有相当多的能量是在中心频率附近但不是恰好在中心频率上。在示波器上,该信号看起来像一个失真的正弦波。

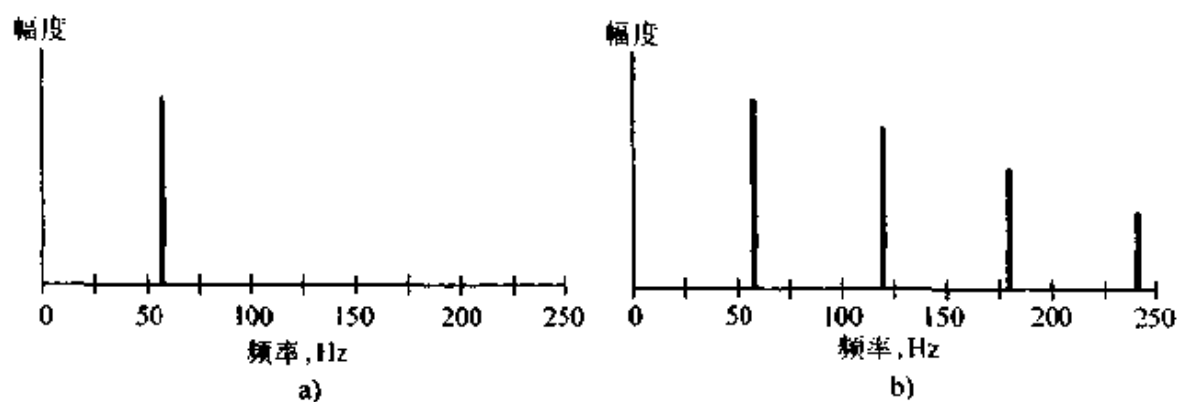


图 2-7 正弦波与谐波

a) 60Hz 纯正弦波在频谱分析仪上的显示 b) 60Hz 含有谐波能量的波

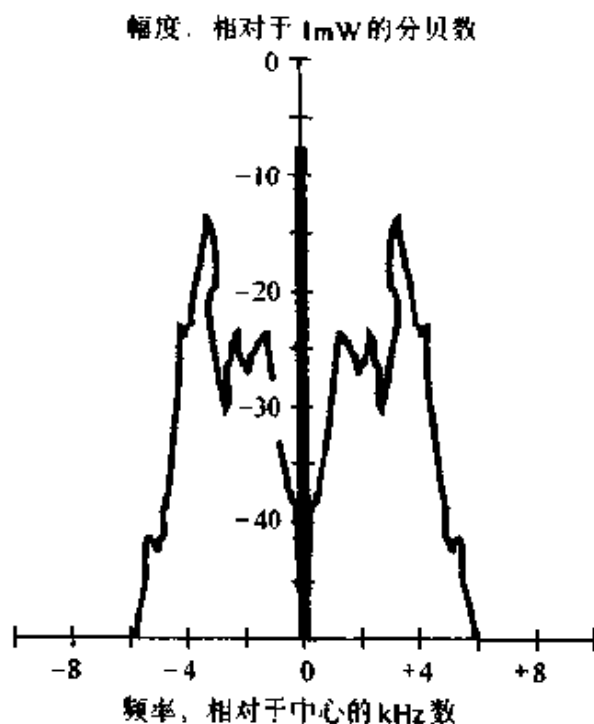


图 2-8 在频谱分析仪上所看到的  
调幅无线电信号

## 2.2 度、弧度和幅度

工程师常将交流循环分解成小的分量以作分析和参照。一个完整的循环对应于矢量终端在坐标面上绕圆旋转一周。对正弦波来说,矢量

的大小是恒定的,同时旋转的瞬时速率(角速度)也是恒定的。对其他波形来说,大小和(或)角速度在循环的不同点上是不同的。

### 2.2.1 度与弧度

详细说明交流循环细节的一种方法是把该循环分解成 360 个相等的相位度。把循环中幅度为 0 且朝正向变化的那一点规定为  $0^\circ$ ,把下一个循环中同样的点规定为  $360^\circ$ ,所以半个循环处是  $180^\circ$ ,1/4 循环处是  $90^\circ$ ,如此等等。

详细说明相位的另一种方法是把循环划分成  $2\pi$ ( $\approx 6.28$ ) 个相等的相位弧度,它相当于把圆的半径首尾相连地放在圆周上时所能安放的数目。 $1\text{rad} \approx 57.3^\circ$ ,这是物理学家常用的相位单位。

有时交流波的频率不用赫兹作单位,而用弧度每秒来度量。由于一个完整的  $360^\circ$  的循环中包含  $2\pi$ (约 6.28) 个弧度,因此波的角频率在以每秒弧度数为单位时的值大致上等于以赫兹为单位的频率值的 6.28 倍。

### 2.2.2 幅度

幅度指的是一个交流波的大小、电平或强度,它可以是针对某个特定的时间瞬间而言的,或常常是针对一个时间跨度而言的。按照所测量的量的不同,幅度可以用安培(对电流)、伏特(对电压)或瓦特(对功率)作单位,也可以用对数表示为分贝。

瞬时幅度是指某个准确的时间瞬间的幅度,它是不断地变化着的,变化的方式与波形有关。瞬时幅度用波的曲线上的各点来表示。

峰值幅度是指瞬时幅度达到正的最大值或负的最大值时的幅度。在许多波中,正的峰值幅度与负的峰值幅度是相等的,但有时它们是不等的。图 2-9 给出了一个正峰值幅度与负峰值幅度相等的波。图 2-10 则画出了一个正负峰值幅度不相等的波。

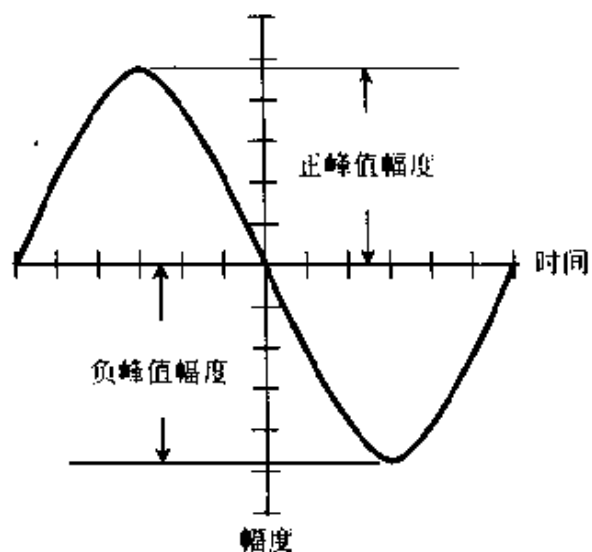


图 2-9 正负峰值幅度相等的波

波的峰-峰幅度是正负峰值幅度之间总的差额,见图 2-11。换一种说法是,峰-峰幅度等于正峰值幅度加上负峰值幅度。在许多波中,峰-峰幅度是峰值幅度的两倍,但并不都是如此。

常常需要用到交流波的有效值,它相当于为产生同样的总效应时直流电源所需要的电压、电流或功率值。最常用的量是方均根幅度。对完美的正弦波,其方均根值等于峰值的 0.707 倍或峰-峰值的 0.354 倍。对完美的方波,其方均根值就等于峰值。对锯齿波和不规则波,方均根值与峰值之间的关系与波的形状有关,但方均根幅度永远不会大于峰值幅度。

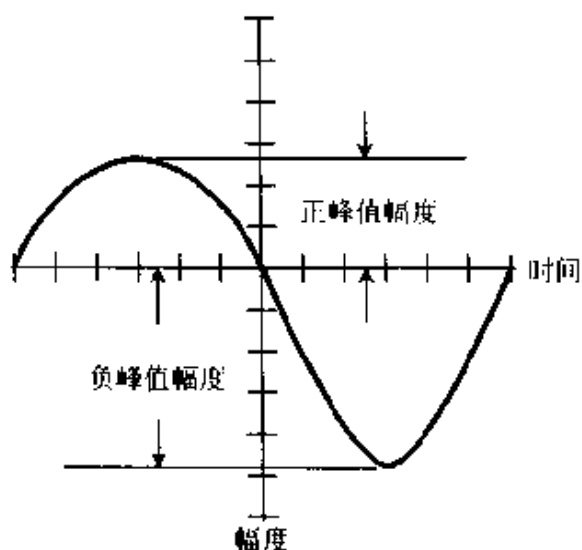


图 2-10 正负峰值幅度不等的波

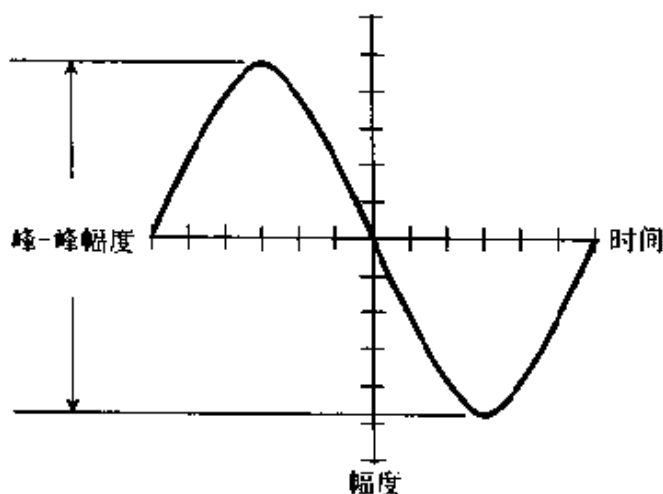


图 2-11 波的峰-峰幅度

### 2.2.3 复合交直流

在交流波上可以叠加有直流分量。如果直流分量超过了交流波的峰值,这就变成了波动或脉动的直流。例如,如果把一个 200V 的直流电源串联连接到由标准市电电源插座上得到的 117V 的交流电源上时就会发生这种情况。这时出现了一个平均值为 200V 的脉动直流,但其瞬时值则要比平均值高出不少或低下不少,其波形画在了图 2-12 上。

复合交直流常常不是有意产生的,但在电子电路的某些点有时就可看到这类波形。

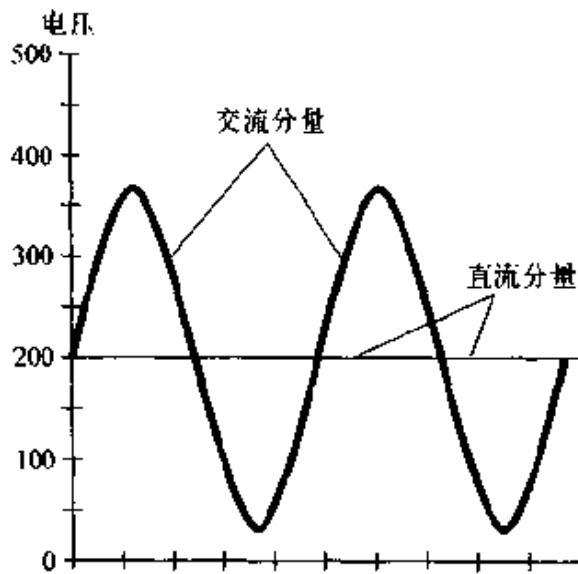


图 2-12 由 117V 交流与 200V 直流  
串联形成的复合交直流波

## 2.3 相位关系

当两个正弦波具有相同的频率时,如果它们的循环是在不同的时间开始的,那么它们的表现可以是很不一样的。不管怎么说,相位差(通常称为相移角并用度来度量)是和电路的性质有关的。

### 2.3.1 同相

当两个波具有相同的频率时相位角才有意义。如果频率不同,那么两个波相对的相位就在不断地变化着。因此在后面讨论到相位角时,我们假设两个波总是具有相同的频率。

同相意味着两个波是在完全相同的瞬间开始的。图 2-13 上就画出了这样的两个波,它们具有不同的幅度。这种情形的相位差

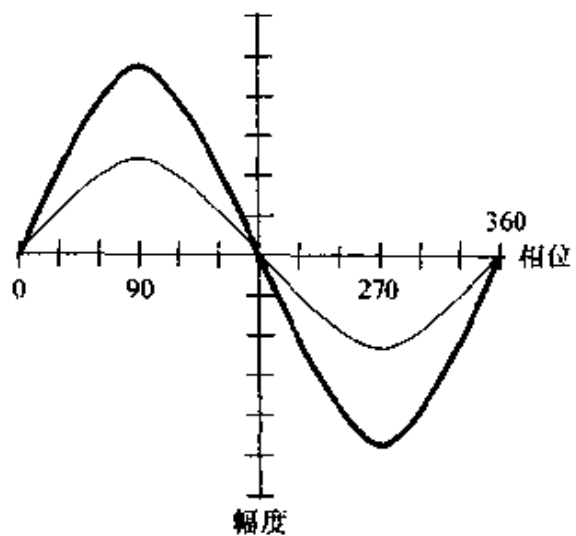


图 2-13 两个同相的正弦波

是  $0^\circ$ 。如果两个正弦波同相,合成后的波也是正弦波,其峰值幅度等于两个组分波的峰值幅度之和。合成波的相位与组分波的相位相同。

### 2.3.2 反相

当两个波的起始点相隔刚好  $1/2$  个循环或  $180^\circ$  时,它们处于反相。图 2-14 画出了两个反相的波。工程师有时把这种情况说成是两波  $180^\circ$  异相。

如果两个正弦波具有同样的幅度并且处于反相,它们相互间完全抵消,因为两个波的瞬时幅度在每一个瞬间都是相等且相反。如果两个不同幅度的正弦波处于反相,合成后的波也是正弦波,其峰值等于两个组分波的峰值幅度之差。合成波的相位与两个组分波中较强的那个波的相位相同。

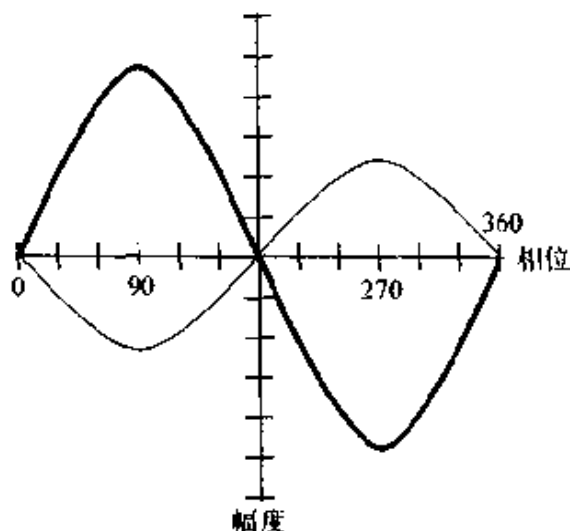


图 2-14 两个反相的正弦波

正弦波具有一种特性,如果其相位偏移  $180^\circ$ ,那么所产生的波就相当于把原来的波上下倒过来。并非所有的波形都有此性质。

### 2.3.3 超前相位

两个波的相位之差可以从  $0^\circ$  (同相) 到  $180^\circ$  (反相) 到  $360^\circ$  (再同相) 之间的任何值。

设具有同样频率的两个正弦波 X 和 Y。若 X 波要比 Y 波早一些开始,可以说 X 波在相位上超前 Y 波。但只有 X 波在 Y 波之前开始其循环的提前量小于  $180^\circ$  时才可以这么说。图 2-15 表示 X 波在相位上超前 Y 波  $90^\circ$  的情形。两者的相位差可以是大于  $0^\circ$ 、小于  $180^\circ$  的任何值。

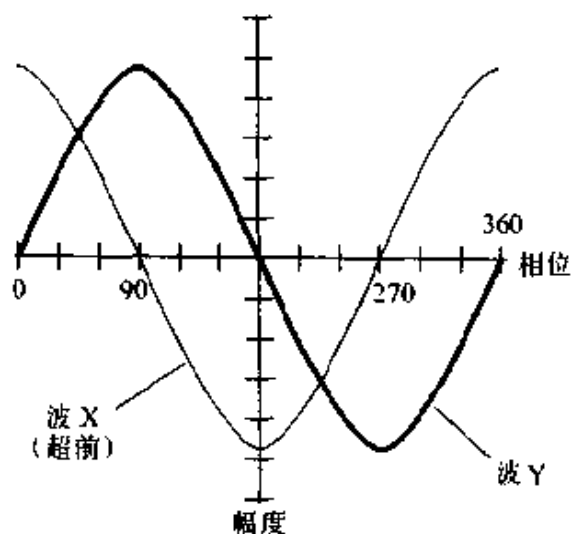


图 2-15 X 波超前 Y 波  $90^\circ$

注意,若 X 波(细的曲线)超

前 Y 波(粗的曲线),则 X 波是在 Y 波的左边一些。在时间轴上,左边为早,右边为迟。

### 2.3.4 滞后相位

设 X 波开始它的循环比 Y 波早  $180^\circ$  以上  $360^\circ$  以下,这时很容易想象,X 波开始它的循环相当于比 Y 波晚了  $0^\circ$  以上  $180^\circ$  以下。于是 X 波不是超前反而是滞后于 Y 波了。

图 2-16 表示 X 波滞后 Y 波  $90^\circ$  的情形。

如果两个波具有相同的频率和不同的相位,你怎么知道是一个波超前于另一个波一个周期的一小部分,还是滞后于一个周期的一大部分,或滞后了几百、几千、几百万、几十亿个周期再加一个周期的一大部分呢?按照惯例,相位差不管是滞后还是超前,都是用  $0^\circ \sim 180^\circ$  之间的值来表示的。有时也用  $-180^\circ \sim +180^\circ$  之间的值来表示(负表示滞后,正表示超前)。

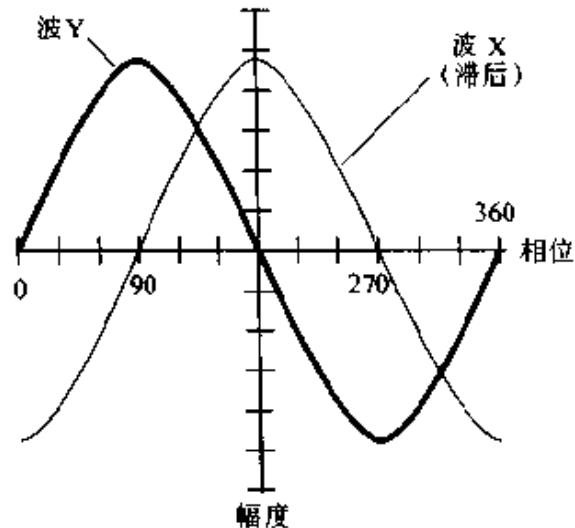


图 2-16 X 波滞后 Y 波  $90^\circ$

注意,若 X 波(图 2-16 上的细线)滞后 Y 波(图上的粗线),则 X 波是在 Y 波的右边。

### 2.3.5 矢量图

若正弦波 X 超前正弦波 Y 若干度,这两个波可以画成矢量,矢量 X 是从矢量 Y 逆时针转过那么多度数。若 X 波滞后 Y 波若干度,矢量 X 则是从矢量 Y 顺时针转过那么多度数。

若两波同相,则它们的矢量重叠。若两波反相,则它们的矢量恰好指向相反的方向。

图 2-17 表示 X 波和 Y 波之间的四种相位关系。X 波的幅度总是 Y 波的两倍,所以矢量 X 的长度总是矢量 Y 的两倍。图 2-17a 上 X 与 Y 同相;图 2-17b 上 X 超前 Y  $90^\circ$ ;图 2-17c 上 X 与 Y 反相;图 2-17d 上 X 滞后 Y  $90^\circ$ 。在所有的情形下,矢量均是反时针方向以每个波周期一整圈的比例旋转。

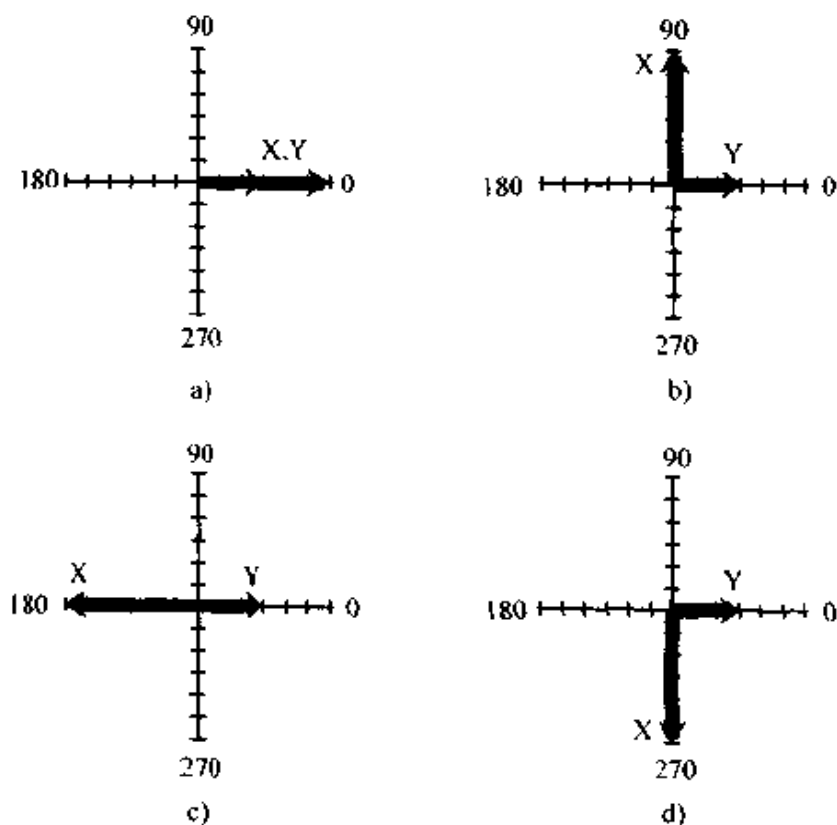


图 2-17 相位的矢量表示

- a) X 波与 Y 波同相    b) X 波超前 Y 波  $90^\circ$   
 c) X 波与 Y 波反相    d) X 波滞后 Y 波  $90^\circ$

## 2.4 电力传输

电能从起始处到最终用户经过了各种转换。最初的能源是由某种非电形式的势能或动能构成的,例如下落或流动的水(水动能),煤或油(矿物燃料能),放射性物质(核能),运动的空气(风能),太阳的光和热(太阳能),从地球内部来的热(地热能)等等。

### 2.4.1 发电厂

在矿物燃料、核能、地热和某些太阳能发电系统中,是用热来煮沸水,产生高压蒸汽去驱动**涡轮机**。涡轮机产生驱动大型**发电机**所需要的旋转力(转矩)。想得到的电力愈多,则以一定的速度转动发电机的轴所需的转矩也愈大。

在**光电能量发生系统**中,半导体器件把太阳光转换成直流电。这种直流电再经电力变换器变换成电气用具所使用的交流电。如果**独立应用的光电系统**要在夜间提供有用的能量,就必须采用电化学电池。光



电系统产生不了太多的电力,因此主要用于家庭和小企业。这些系统除了化学物质外不产生废料,当蓄电池寿命终止后必须把化学物质处理掉。不用蓄电池,光电系统也可以同现有的供电设施联在一起,向电网的全体用户补充总的能量供应。这是一种*互动式的光电系统*。

在*水电站*,水的运动(瀑布,潮汐,水流)驱动涡轮机,后者又转动发电机的轴。在*风力发电站*,运动的空气驱动类似于风车的装置,产生能转动发电机轴的转矩。这些电站并不直接造成污染,但大坝也会破坏生态系统,对下游的农业和经济产生负面影响,也会因蓄水淹没了土地而需迁移上游的居民。许多人认为一排排风车状的结构十分刺眼,但为了产生出充足的电力,就必须安上几百、几千座这样的装置。

在大型电厂(站)中不论用何种能源产生出电来,它输出的是几百千伏,有时甚至是超过 1000kV 的交流电。

#### 2.4.2 高压线

当电通过导线长距离传输时,由于导线的电阻会造成功率的损耗。可以用两种方法把这种损耗减到最小。第一种是设法把导线的电阻降到最低,包括使用由良好导电性的金属制成粗直径导线,同时在架设输电线时使其长度尽可能短。第二种是使用尽可能高的电压。长距离、高电压的输电线称为*高压线*。

分析一下表述功率、电流、电压和电阻间关系的公式,就能明白高电压能减小电力传输线损耗的道理。公式之一可表述为

$$P_{\text{损耗}} = I^2 R$$

其中  $P_{\text{损耗}}$  是传输线上以热的形式表现的功率损耗(瓦), $I$  是传输线的电流(安), $R$  是传输线的电阻(欧姆)。对给定长度的传输线而言, $R$  的值是一定的。因此  $P_{\text{损耗}}$  的值取决于传输线中的电流,而电流又取决于负荷,即最终用户的总体需求。

电力传输线的电流也与传输线电压有关。在确定的功率负荷下,电流与电压成反比,即

$$I = \frac{P_{\text{负载}}}{E}$$

其中  $I$  是传输线电流(安), $P_{\text{负载}}$  是最终用户所需求的总功率(瓦), $E$  是传输线电压(伏)。把这个公式代入前一个公式则得到

$$P_{\text{损耗}} = \left( \frac{P_{\text{负载}}}{E} \right)^2 R = (P_{\text{负载}})^2 \frac{R}{E^2}$$

所以对于给定的  $P_{\text{负载}}$  和  $R$  值,若把传输线电压  $E$  提高一倍就可以将功率损耗  $P_{\text{损耗}}$  降低到原有值的  $1/4(25\%)$ 。若把传输线电压提高为原有值的  $10$  倍,从理论上说功率损耗将降低到原有值的  $1/100(1\%)$ 。因此,为了有效地进行远距离的电力输送,理所当然要尽可能提高电压了。

如果用直流电而不是用交流电来作远距离的电力传输,那么传输线的功率损耗还能进一步降低。直流电不像交流电那样会产生辐射电磁场,因此使用直流电可以消除电力线低效的第二位根源——*电磁辐射损耗*。可是远距离直流输电是一个很困难也很费钱的方案,不但在发电厂(站)要有大功率高电压的整流器,在高压线分路成低电压的局域电网的配电站也要有电力变换器。

### 2.4.3 变压器

市电电源电压是  $117\text{V}$  和  $234\text{V}^{\text{①}}$ ,这些较低的电压是通过*变压器*从较高的电压得到的。

*降压变压器*把高压线电压( $100\ 000\text{V}$ 或更高)降低到几千伏供市区配电。这些变压器体积都很大,因为它们要承载巨大的功率。有些变压器要放在房子里或用围栏围起来。它们的输出供给那些沿着城市街道布设的输电线路。

通常装在供电杆上或埋在地下的较小的变压器把市网电压降低到  $234\text{V}$  再配送给家庭和企事业单位。 $234\text{V}$  的电力是以三相形式送到每栋住房、公寓或单位的配电箱上。有些电源插座是直接由这种*三相交流电*供电,大的设施如电炉、烤箱、洗衣机等用的就是三相电。较小的墙上插座和灯具等则是由单相  $117\text{V}$  的交流电供电。

①  $117\text{V}$  和  $234\text{V}$  是美国采用的电源电压。——译者著

## 第 3 章 阻 抗

*阻抗* 是元件或电路对交流电的阻碍或对抗。阻抗是一个二维量,包括*电阻* 和*电抗* 两个独立的分量。交流电路中的电阻和直流电路中是一样的,可表示为一个正的欧姆量。电抗则可以是电感性的(非负欧姆量)或电容性的(非正欧姆量)。

### 3.1 感抗

电阻是一个*标量*,因为它可以用一维标度来表示。给定了直流电压,电阻增加电流就减小,符合欧姆定律。当交流电通过电阻时也符合该定律。但对于电感或电容,情况就比较复杂了。

#### 3.1.1 线圈与电流

如果你把一段导线绕成一个线圈并联到直流电源上,则导线支取的电流为  $I=E/R$ , 其中  $I$  是电流,  $E$  是直流电压,  $R$  是导线的电阻。当能量耗散在导线电阻上时,线圈就会发热。如果增加电源电压,线圈的导线将变得更热。

假设你改变电源,把线圈两端从直流电源改接到了交流电源上。把频率从几赫兹调到若干兆赫。由于线圈有一定的*感抗* ( $X_L$ ),所以在线圈中建立起电流来就要花一点时间。当增加交流频率时,就会到达这样的一点,这时在电压的极性逆转之前线圈中的电流尚未能完全建立起来。当继续升高频率时,这一效应就变得更加明显。最后,如果不断地升高频率,那么在每个循环中线圈几乎建立不起电流来了,几乎没有有效电流流经线圈。

电感线圈的感抗  $X_L$  可以从零(短路电路)到几欧姆(小线圈)到几千欧或几兆欧(大线圈)。像纯电阻一样,感抗影响到交流电路中的电流,但与纯电阻不同,感抗随频率而变化。这就会影响到电流相对于电压的流动方式。

### 3.1.2 $X_L$ 与频率的关系

如果交流电源的频率记作  $f$  (单位为赫兹), 线圈的电感记作  $L$  (单位为亨利), 则感抗  $X_L$  (单位为欧姆) 为

$$X_L = 2\pi fL \approx 6.28fL$$

若  $f$  的单位用千赫 (kHz),  $L$  的单位用毫亨 (mH), 或  $f$  的单位用兆赫 (MHz),  $L$  的单位用微亨 ( $\mu\text{H}$ ), 也可用同样的公式。

感抗随着交流电频率的增加而线性地增大, 也随着电感的增加而线性地增大,  $X_L$  的值是正比于  $f$  的, 也是正比于  $L$  的。这种关系以相对形式画在图 3-1 上。

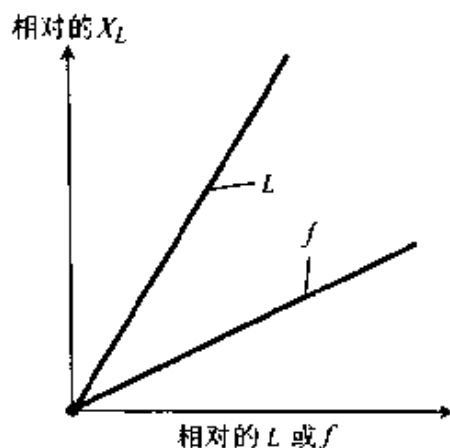


图 3-1 感抗正比于电感  $L$  和频率  $f$

### 3.1.3 $RL$ 平面上的点

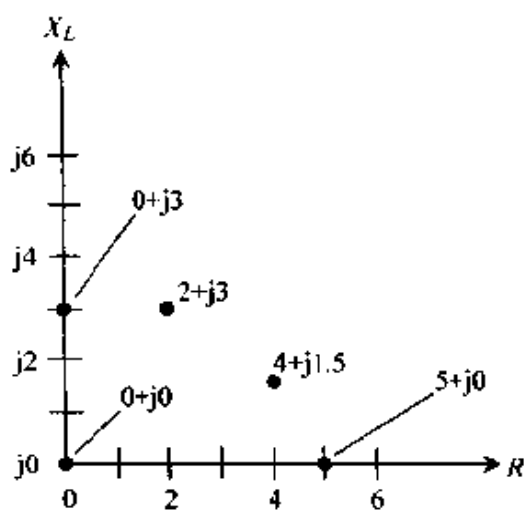
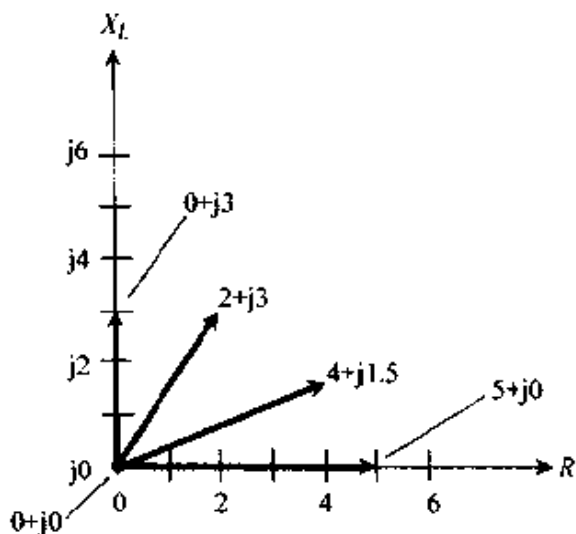
感抗可以像电阻一样沿着一条半直线标记。在既有电阻又有电感的电路中, 其特性变成了二维的。让电阻和电抗的两条半直线互相垂直构成一个  $1/4$  平面的坐标系统。在这个平面图上,  $RL$  的组合形成了复数阻抗。图上每一个点对应一个唯一的阻抗值, 每一个  $RL$  阻抗值对应一个唯一的点。这个  $RL$  平面上的阻抗可写成  $R + jX_L$ , 其中  $R$  是电阻,  $X_L$  是感抗,  $j$  是虚数单位。

若仅有一个电阻  $R = 5\Omega$ , 其复数阻抗为  $5 + j0$ , 在平面上是  $(5, 0)$  点。若是一个纯感抗如  $X_L = 3\Omega$ , 其复数阻抗为  $0 + j3$ , 在  $RL$  平面上是  $(0, 3)$  点。电阻和感抗常常是同时存在的, 有诸如  $2 + j3$  或  $4 + j1.5$  这样的阻抗值, 其对应的点画在了图 3-2 上。

### 3.1.4 $RL$ 平面上的矢量

工程师通常把  $RL$  平面上的点表示成矢量, 这就赋予了每个点一个特定的而且是唯一的大小和方向。

图 3-2 上画的是不同的点, 另一种思考办法是从原点向这些点引直线。于是这些点就变成了射线, 每条射线都有一定的大小和方向 (即从  $R$  轴逆时针转过的角度) 这些从原点到各点的射线就是复数阻抗矢量, 见图 3-3。

图 3-2  $RL$  阻抗平面上的一些点图 3-3  $RL$  阻抗平面上的一些矢量

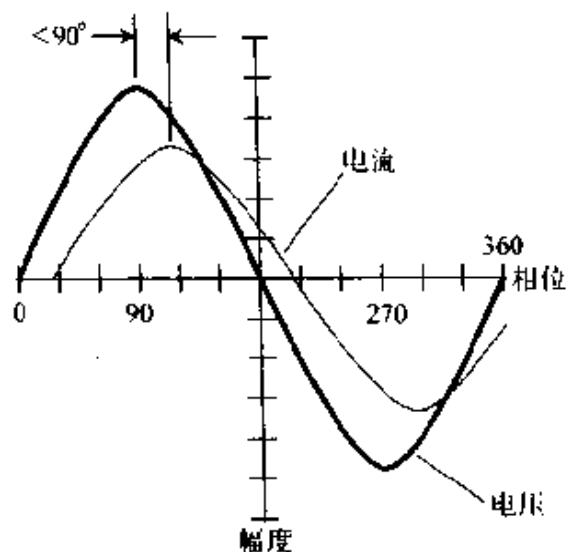
## 3.2 $RL$ 电路中的电流和电压

电感以磁场形式贮存电能。当线圈两端加上电压时，需要稍等一下让电流建立至其足值。因此，当交流电加在线圈上时，电流在相位上要滞后于电压。

### 3.2.1 电感和电阻

假设在一个低损耗线圈上加上了交流电压，其频率足够高以至于感抗  $X_L$  要远大于直流电阻  $R$ 。在这种情况下，电流滞后于电压差不多  $90^\circ$  (1/4 周期)。当电路中的  $X_L$  值远大于  $R$  值时，则  $RL$  平面中的矢量差不多是沿着  $X_L$  轴直指向上的。其角度差不多是从  $R$  轴转过  $90^\circ$ 。

当  $RL$  电路中的电阻与感抗明显可比时，电流滞后于电压小于  $90^\circ$ ，如图 3-4 所示。若  $R$  远小于  $X_L$ ，电流滞后接近  $90^\circ$ 。当  $R$  相对地增大时，滞后量就减少。当  $R$  远大于  $X_L$  时，矢量差不多就落在  $R$  轴上，直指向右，这时  $RL$  相移角

图 3-4 在  $RL$  电路中，电流滞后于电压小于  $90^\circ$

$\phi_{RL}$  接近于零。当复数阻抗变为纯电阻时，电流就与电压同相了。

### 3.2.2 计算 $RL$ 相移角

可以用一把标有厘米和毫米刻度的直尺和一个量角器来计算  $RL$  相移角。先从左向右画一根略长于 100mm 的水平线，再从这根线的左端向上画一根不短于 100mm 的垂直线。水平线为  $R$  轴，垂直线为  $X_L$  轴。

如果已知  $X_L$  和  $R$  的值，将它们除上一个数或乘上一个数使两者之值落在 0~100 之间。例如，若  $X_L = 680\Omega$ ,  $R = 840\Omega$ ，使两者均除以 10，得到  $X_L = 68$ ,  $R = 84$ 。在轴上画上这两个点的标记： $R$  的标记在 origin 向右 84mm 处， $X_L$  的标记在 origin 向上 68mm 处。

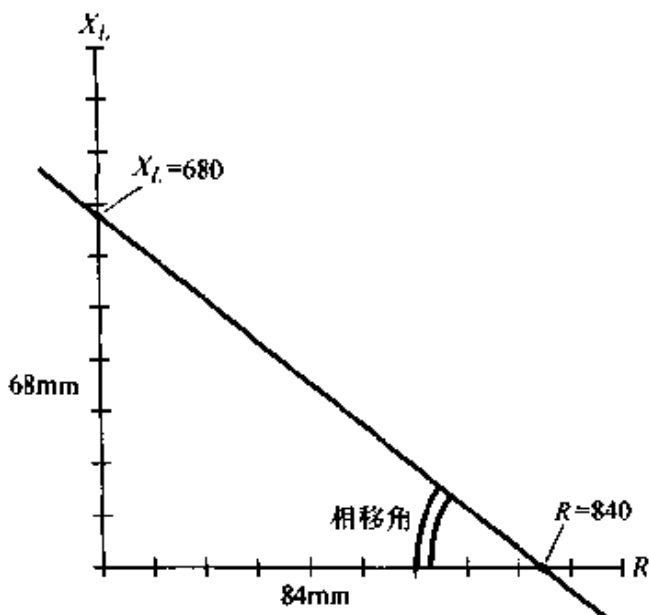


图 3-5 求  $RL$  相移角的图解法

如图 3-5 所示，把这两个标记用线连起来，这根线与两根轴构成一个直角三角形。测量斜线与  $R$  轴之间的角度，它就是相移角  $\phi_{RL}$ 。

实际的矢量  $R + jX_L$  可以这样得到：把原点和两根轴上的标记点当成一个矩形的四个顶点中的三个点，画上水平线和垂直线来完成一个矩形。如图 3-6 所示，矢量就是这个矩形的对角线。相移角  $\phi_{RL}$  就是该矢量与  $R$  轴之间的夹角。

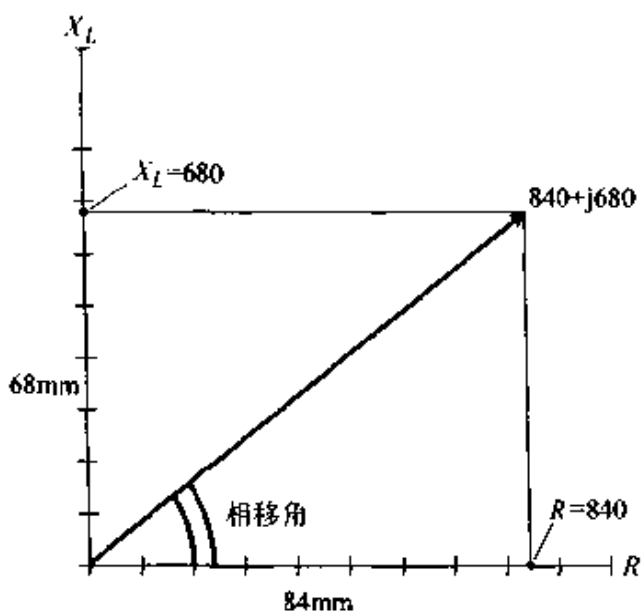


图 3-6  $RL$  阻抗矢量的图解

更准确的  $\phi_{RL}$  值，尤其在接近  $0^\circ$  或  $90^\circ$  时，很难用图解法来求得，这时可以用求解

及三角函数的计算器来计算。相移角等于  $X_L$  与  $R$  之比的反正切值：

$$\phi_{RL} = \arctan \frac{X_L}{R}$$

### 3.3 容抗

与感抗相对应的是容抗。容抗也可用一条射线来表示，它从与感抗相同的零点起始，但却是向着具有负欧姆值的反方向延伸的。

#### 3.3.1 电容器与电流

设想有两块巨大的平行金属板，它们都是良导体。当接上直流电源后，金属板将充上电荷并形成等于直流电源电压的电位差。一旦充电结束电流就等于零。如果在金属板之间放进绝缘材料如玻璃，虽然充电时间会增加，但它们相互之间的电压并不变。

假设把电源从直流换成交流，并设想可将交流电的频率从几赫兹调到若干兆赫。开始时两极间的电压几乎完全随着交流电极性的变化而变化，这一对金属板看起来同断路一样。当频率升高时，在每个周期中板上的电荷来不及充分地建立起来。当频率升到极高时，这一对金属板看起来如同短路一样。

这对金属板对交流电的抵抗属于容抗 ( $X_C$ )，它随着频率而变化。容抗与感抗  $X_L$  和电阻  $R$  一样，度量单位为欧姆。但按照惯例，赋予  $X_C$  的是负值而非正值。频率降低， $X_C$  的值向负方向增大。

有时也只讲  $X_C$  的绝对值而不管其前面的负号。但在复数阻抗计算中，总把  $X_C$  看成是一个非正量，这样以避免与永远是非负量的感抗  $X_L$  发生混淆。

#### 3.3.2 $X_C$ 与频率的关系

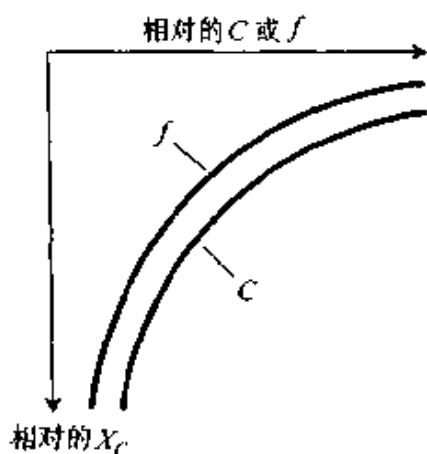
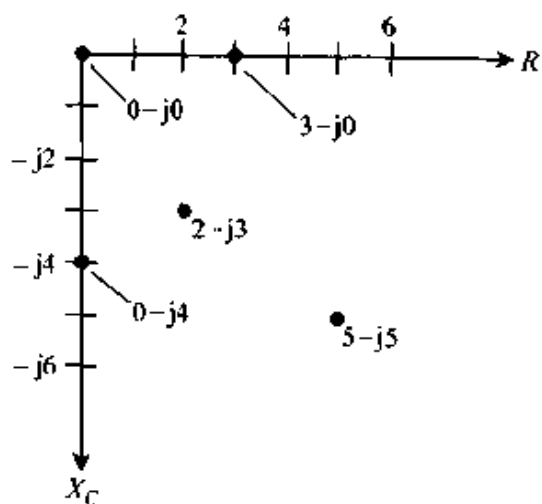
容抗在许多方面像是感抗的镜像。从另一个角度说， $X_C$  是  $X_L$  向负值方向的延伸。

若交流电源的频率记作  $f$  (赫兹)，电容记作  $C$  (法拉)，则容抗  $X_C$  (欧姆) 可表示为

$$X_C = -\frac{1}{2\pi fC} \approx -\frac{1}{6.28fC}$$

若  $f$  以兆赫为单位， $C$  以微法为单位，上式依然成立。

容抗与频率成反比。当用图形来表示  $X_C$  与  $f$  的函数关系时,则在  $f$  趋近于零时曲线发生“暴涨”。在给定的频率下,容抗也与实际的电容值成反比。因此在  $C$  趋近于零时  $X_C$  与  $C$  的函数曲线也出现“暴涨”。这些函数的相对图形见图 3-7。

图 3-7 容抗反比于频率  $f$  和电容  $C$ 图 3-8  $RC$  阻抗平面上的一些点

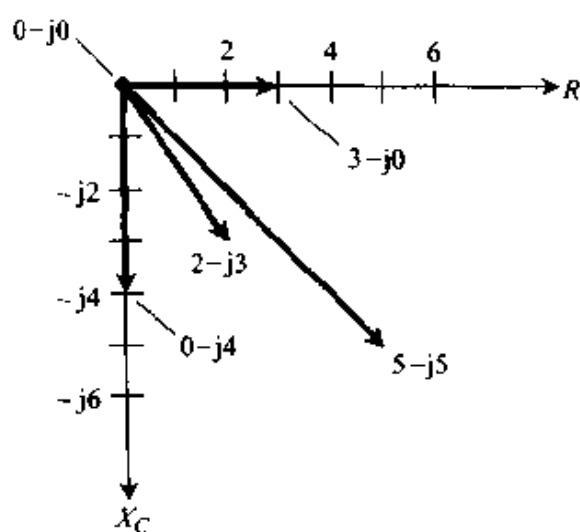
### 3.3.3 $RC$ 平面上的点

含有电阻和容抗的电路,其特性是二维的,这里的情形与  $RL$  平面的情形相类似。电阻半直线与容抗半直线端点相连互成正交构成  $RC$  平面,见图 3-8。电阻线是水平的,向右时其值增加;容抗线是垂直的,向下时其负值增加。平面上的一个点对应一个、且是唯一的一个阻抗;反之,每个特定的阻抗对应平面上一个、且是唯一的一个点。

包含电阻和电容的阻抗可以写成  $R - jX_C$  的形式。若是纯电阻,如  $R = 3\Omega$ ,则复数阻抗为  $3 - j0$ ,它对应于  $RC$  平面上的  $(3, 0)$  点。若是纯容抗,如  $X_C = -4\Omega$ ,则复数阻抗为  $0 - j4$ ,对应于  $RC$  平面上的  $(0, -4)$  点。通常电阻和容抗同时存在,就会形成如  $2 - j3$  和  $5 - j5$  这样的复数阻抗。

### 3.3.4 $RC$ 平面上的矢量

图 3-8 表示几个不同的阻抗

图 3-9  $RC$  阻抗平面上的一些矢量



点,每个点都是用从原点向右某一个距离和向下某一个距离来表示的。

$RC$  平面上的阻抗点,可以像前面已在  $RL$  平面上做的那样,表现成矢量。矢量的大小是从原点到该点的距离;矢量的方向以从电阻( $R$ )线顺时针转过的角度来度量,并以负的度数来标记。图 3-8 上那些点的矢量画在了图 3-9 上。

### 3.4 $RC$ 电路中的电流和电压

电容以电场的形式贮存能量。当一个交流电压源加在  $RC$  电路上时,电压在相位上滞后于电流,相位差可在  $0^\circ \sim 90^\circ$  ( $1/4$  个周期)之间。

#### 3.4.1 电容与电阻

当  $RC$  电路中的电阻与容抗明显可比时,电流超前电压的相位要小于  $90^\circ$ ,见图 3-10。若  $R$  比  $X_c$  小很多,相位差差不多是  $1/4$  周期。当  $R$  变大或  $X_c$  变小时,相位差减小。由于电阻是有意放进电路中的,所以  $R$  是可以相对于  $X_c$  增大的。还有一种情况,即当频率变得相当低,以至于  $X_c$  增大到与电容器的漏电阻可相比的值。上述这两种情况都可表示成一个电阻器与一个电容器相串联。

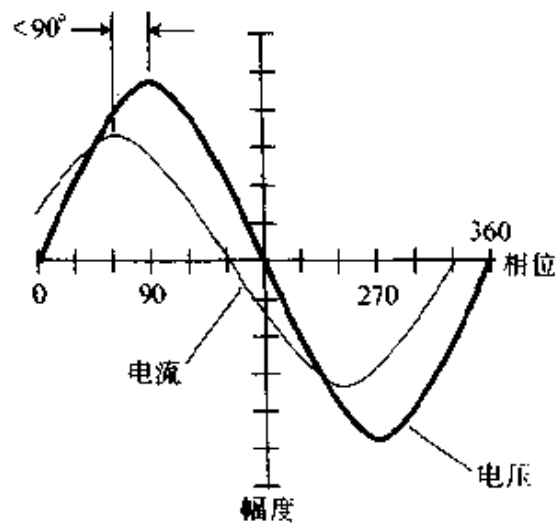


图 3-10 在  $RC$  电路中,电流超前于电压小于  $90^\circ$

当  $RC$  电路中的电阻变得比容抗大时, $RC$  相移角变小;若  $X_c$  的值变得比  $R$  的值小时,情形也一样。注意这里说的  $X_c$  “大”,是指负得大;说  $X_c$  “小”,是指接近于零或负得小。

当  $R$  比  $X_c$  大许多倍时, $RC$  平面上的矢量差不多是沿着  $R$  轴,故  $RC$  相移角接近于零。若容抗变得足够小,电路就像一个纯电阻电路,电流则将与电压同相。

#### 3.4.2 计算 $RC$ 相移角

若知道了  $RC$  电路的  $X_c/R$ ,就可求出  $RC$  相移角。只要相移角不

过于接近  $0^\circ$  或  $90^\circ$ , 就可以像  $RL$  电路那样, 用一把直尺和一个量角器来求  $RC$  电路的相移角。

首先, 在纸上从左向右画一条略长于  $100\text{mm}$  的直线; 然后, 用量角器从水平线的左端起垂直向下画一条略长于  $100\text{mm}$  的直线。水平线是  $RC$  平面的  $R$  轴, 垂直向下的线是  $X_C$  轴。

若已知  $X_C$  和  $R$  的值, 除以或乘上一个常数使两者的值落在  $-100$  与  $100$  之间。例如, 若  $X_C = -3800\Omega$ ,  $R = 7400\Omega$ , 各除以  $100$  后得到  $-38$  和  $74$ 。在两条轴线上做上标记:  $X_C$  的标记是在原点向下  $38\text{mm}$  处,  $R$  的标记是在原点向右  $74\text{mm}$  处。把这两个标记用直线连起来, 如图 3-11 所示。

测量斜线与  $R$  轴之间的夹角, 它介于  $0^\circ$  与  $90^\circ$  之间, 将该夹角乘以  $-1$  就是  $RC$  相移角。

复数阻抗矢量的作图求解方法是: 用原点和两个标记点作为一个矩形的三个顶点, 画上水平线和垂直线来构成这个矩形。复数阻抗矢量就是从原点出发的该矩形的对角线, 见图 3-12。相移角就是  $R$  轴与该矢量间的夹角再乘以  $-1$ 。

求  $RC$  相移角更准确的方法是利用三角学。先确定  $X_C/R$  的值并输入计算

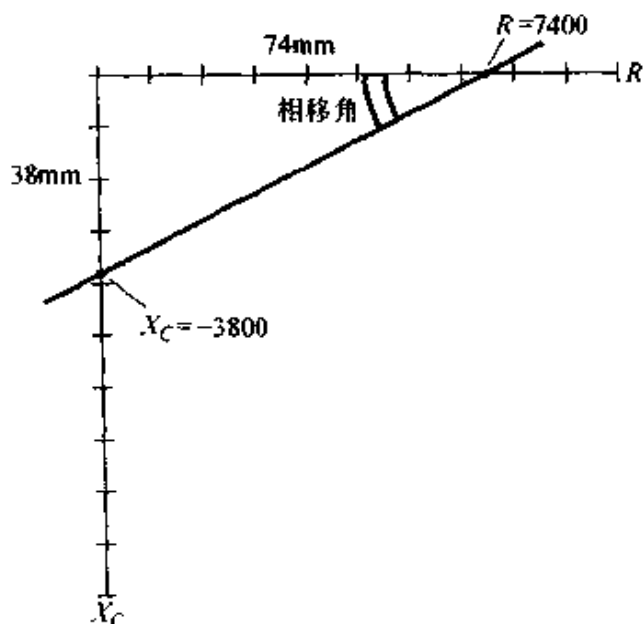


图 3-11 求  $RC$  相移角的图解法

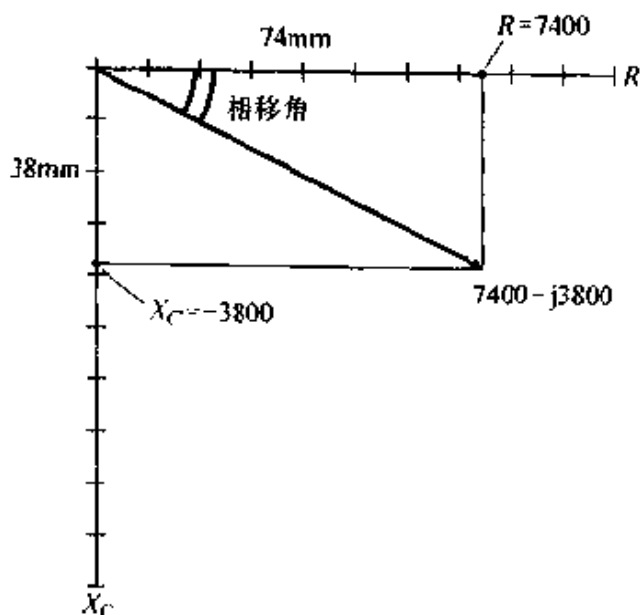


图 3-12  $RC$  阻抗 (矢量) 的图解

器。由于  $X_C$  总是负值或零， $R$  总是正值，所以两者的比值也将是负值或零。求出它的反正切值，就是  $RC$  相移角  $\phi_{RC}$ 。数学上的表达式为

$$\phi_{RC} = \arctan \frac{X_C}{R}$$

### 3.5 虚数

在阻抗表达式如  $4+j7$  和  $45-j83$  中，小写字母  $j$  代表  $-1$  的平方根。整个虚数集就是从这一单位导出的。

虚数单位  $j$  可以和任何实数相乘，得到无穷多个虚数，形成一条虚数线。它是实数线的复制品，通常让它与实数线相垂直，构成一个复数平面，见图 3-13。

#### 3.5.1 复数

一个实数加上一个虚数就得到一个复数。实数是一维的，虚数也是一维的，复数则要由二维来确定。

复数相加要把实部和虚部分开相加，所以  $4+j7$  与  $45-j83$  之和为  $(4+45) + j(7-83) = 49 + j(-76) = 49-j76$ 。

复数相减与之类似。 $(4+j7) - (45-j83)$  可以把第二个复数乘  $-1$  然后与第一个复数相加，即  $(4+j7) + [-1(45-j83)] = (4+j7) + (-45+j83) = -41+j90$ 。记住减法总可以用加法来做，这样可不会将符号弄混。

求两个复数  $(a+jb)$  和  $(c+jd)$  之和的通用公式为

$$(a+jb) + (c+jd) = (a+c) + j(b+d)$$

以上两个复数的乘积为

$$(a+jb)(c+jd) = (ac-bd) + j(ad+bc)$$

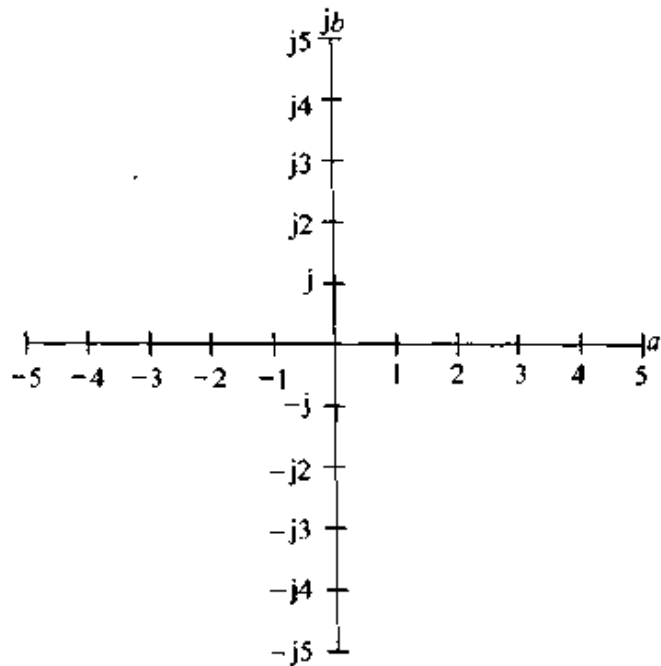


图 3-13 复数平面

### 3.5.2 复数矢量

复数可以用复数平面上的矢量来表示。这使每一个复数有一个唯一的大小和方向。大小就是从原点  $0+j0$  到点  $a+jb$  的距离，方向就是从  $+a$  轴反时针方向到达矢量的角度，如图 3-14 所示。

复数  $a+jb$  的绝对值就是复数平面上从原点  $(0, 0)$  到点  $(a, b)$  的矢量的长度或大小。对于纯实数  $a+j0$ ，若  $a$  为正则绝对值就是  $a$ ；若  $a$  为负则绝对值就是  $-a$ 。对于纯虚数  $0+jb$ ，若  $b$  为正则绝对值就是  $b$ ；若  $b$  为负则绝对值就是  $-b$ 。

若复数既非纯实数又非纯虚数，其绝对值可用平面几何的勾股定理来求得。它等于  $a^2$  与  $b^2$  之和再取其平方根。如图 3-15 所示，它就是矢量  $a+jb$  的长度。

### 3.5.3 RX 平面

*RX 平面* 即复数阻抗平面。还记得  $R$  与  $X_L$  的平面吧，它与图 3-13 所示的复数平面的右上象限相同。同样， $R$  与  $X_C$  的平面则与复数平面的右下象限相同。电阻由非负实数来表示。电抗，不论是感抗（正）还是容抗

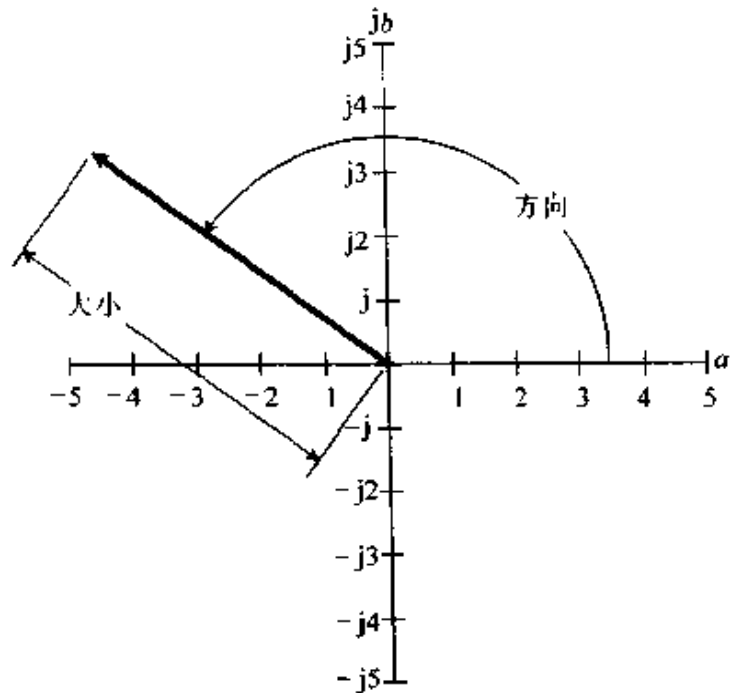


图 3-14 复数平面上矢量的大小和方向

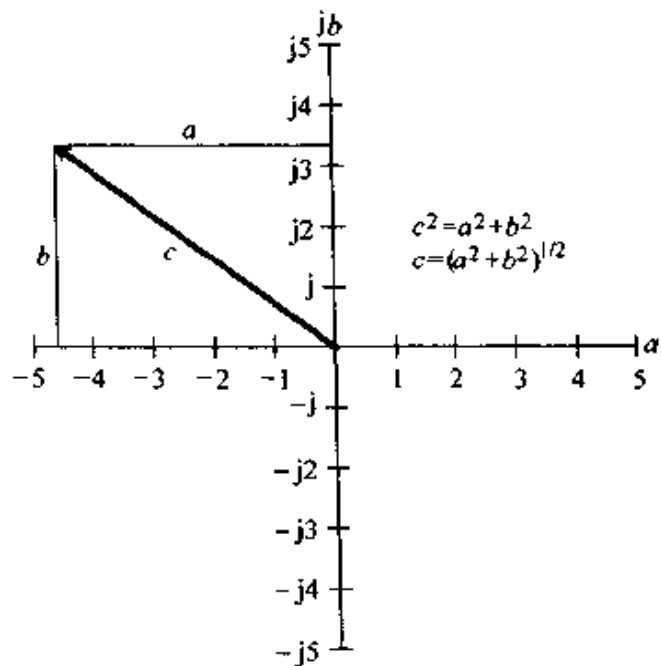


图 3-15 绝对值或矢量长度的计算

(负), 都对应于虚数。

要构建  $RX$  平面, 只需去掉复数平面的左上与左下象限, 这样就得到一个如图 3-16 所示的半平面。

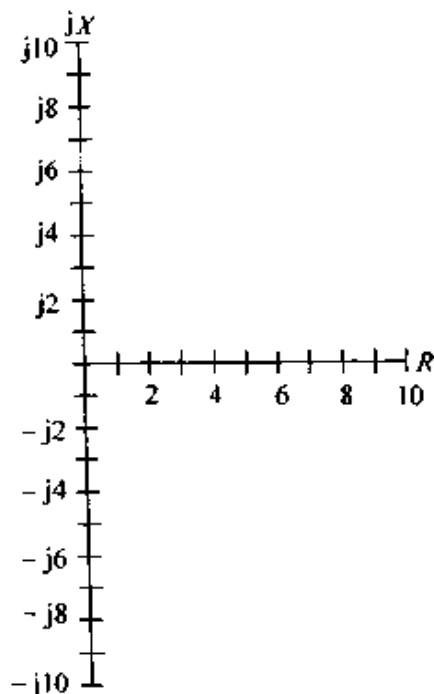


图 3-16 复数阻抗  
( $RX$ ) 平面

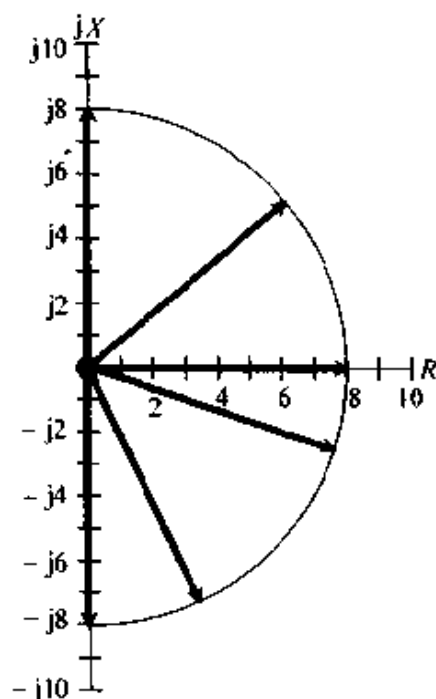


图 3-17 代表绝对值阻抗  
为  $8\Omega$  的一些矢量

### 3.5.4 阻抗矢量

任何阻抗  $R+jX$  都可以用  $a+jb$  这种形式的复数来表示 (令  $R=a$ ,  $X=b$ )。当  $R$  和 (或)  $X$  变化时, 阻抗矢量的大小和方向就发生变化。

有时在一般性的讨论中, 在有阻抗一词的地方也会用到大写字母  $Z$ , 如  $Z=8\Omega$ 。要是没有给出某个特定的复数阻抗的话, 那么这样的表达式可以指  $8+j0$ ,  $0+j8$ ,  $0-j8$ , 或在  $RX$  平面上离开原点  $0+j0$  的距离为 8 个单位的半圆上的任意点之值, 如图 3-17 所示。从理论上说, 可以有无穷多个  $Z=8\Omega$  的复数阻抗。

如果只告诉你阻抗的欧姆数而没有特别告诉你复数阻抗是什么, 那么这个数通常指的是非电抗性阻抗或无抗阻抗。也就是说, 阻抗的虚数项或电抗项为零, 这也叫做电阻性阻抗或纯电阻。

### 3.5.5 阻抗串联

两个阻抗  $Z_1=R_1+jX_1$  和  $Z_2=R_2+jX_2$  相串联, 其总阻抗  $Z$  为它

们的矢量和，即

$$Z = (R_1 + R_2) + j(X_1 + X_2)$$

若复数阻抗相并联，求其总阻抗就较为复杂，这在本章的后面将会讲述。

### 3.6 特性阻抗

有一种特性通常被称作“阻抗”，即**特性阻抗**或**波阻抗**。它简称为 $Z_0$ ，反映传输线的特性。它总是表示为一个正实数。

#### 3.6.1 传输线

当需要把能量或信号从一个地方送往另一个地方时就要用到**传输线**。传输线的形式大体有两种：同轴线和并行线。传输线的例子包括从电视天线到电视机的“扁带线”或“双心线”，从高保真放大器到扬声器的电缆，以及远距离输送电力的高压线等。

并行线的 $Z_0$ 与导线的直径、两线间的间距及隔离两线的绝缘材料的性质有关。一般说来，导线直径变细则 $Z_0$ 增大，导线直径加粗则 $Z_0$ 减小，当然是指其他条件相同的情况而言。

对同轴线，若屏蔽管的尺寸相同，则中心导线越粗 $Z_0$ 越小。若中心导线的尺寸相同，则屏蔽管的直径增大时 $Z_0$ 也增大。一般说来，当两根导线间的间距增加或中心导线与屏蔽管之间的间距增加时， $Z_0$ 将增大。与空气介质相比，固体介质如聚乙烯会降低传输线的 $Z_0$ 。

#### 3.6.2 驻波

**驻波**常存在于**天线辐射体**上。图3-18a表示由中心馈电的半波谐振辐射体上的驻波图形。图3-18b表示由中心馈电的全波谐振辐射体上的

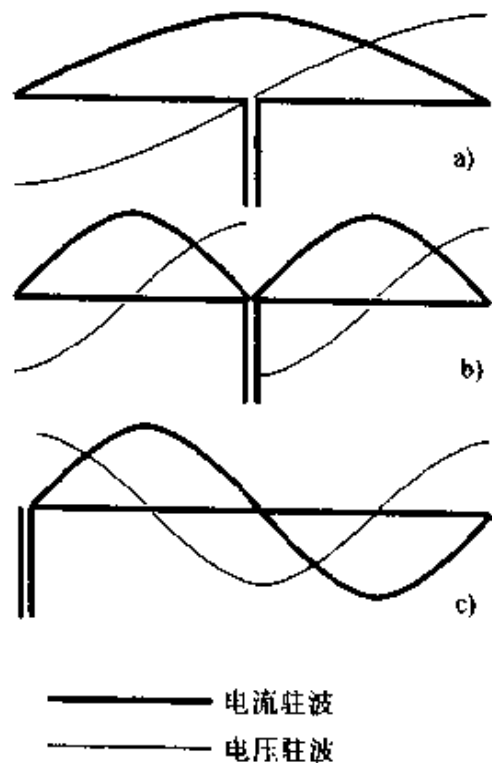


图 3-18 驻波

a) 中心馈电半波天线上的驻波 b) 中心馈电全波天线上的驻波 c) 端部馈电全波天线上的驻波

驻波图形。图 3-18c 表示由一端馈电的全波谐振辐射体上的驻波图形。

某些天线辐射体上并不呈现驻波，电流和电压沿着辐射构件的整个长度是均匀分布的。装有阻值等于辐射体特性阻抗  $Z_0$ （约为  $600\Omega$ ）的终端电阻器的天线就是如此。有些长线天线和菱形天线就使用这种电阻器来获得均向性的图形。

在终端阻抗与传输线特性阻抗  $Z_0$  不同的射频传输线上，存在着电流和电压的不均匀分布。阻抗失配越大，不均匀性也越显著。最大电压与最小电压之比或最大电流与最小电流之比称之为线上的驻波比（SWR）。当传输线各处的电流和电压都是同样大小时，SWR 为 1:1。只有当传输线终端接一无抗负载（纯电阻性负载），而且其阻值与传输线特性阻抗  $Z_0$  的欧姆数相等时，其 SWR 才可以是 1:1。

在传输线负载端为短路、开路、纯电感或纯电容的情形，SWR 的理论值为无穷大，因为电流和电压在某些点处降为零，而在另一些点处又升至很高。实际上，线的损耗使 SWR 不会变成无穷大，但可以达到 40:1 或更大。

非常大的 SWR 会造成传输线上很大的损耗。在任何传输线上，SWR 等于 1:1 时损耗是最小的。若 SWR 不是 1:1，传输线的损耗就增大。这种附加的损耗称为 *SWR 损耗*，或 *阻抗失配损耗*，或 *馈线失配损耗*。图 3-19 表示不同的匹配传输线损耗

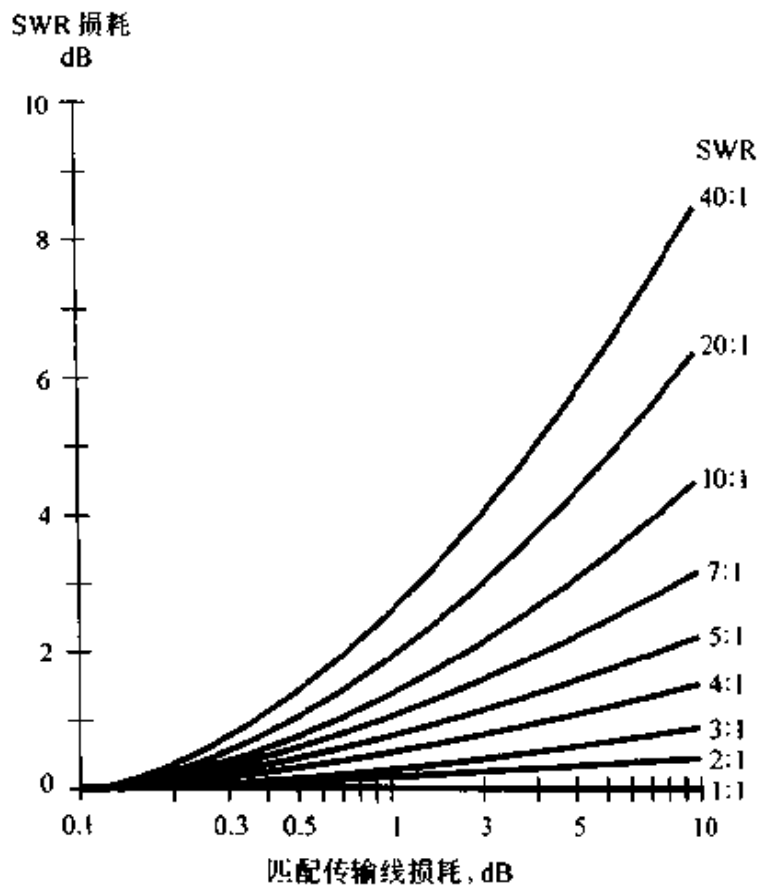


图 3-19 射频传输线上由于阻抗失配产生的附加损耗

值和不同的 SWR 值时产生的馈线失配损耗。这些关系与传输线的物理构造无关。

### 3.7 导纳

*导纳*是介质传导交流电难易程度的度量。它是直流电导的交流对应参数。导纳与阻抗一样是一个复数量。

#### 3.7.1 交流电导

在交流电路中，电导的作用方式是和直流电路中一样的。电导的符号记作大写字母  $G$ 。它与电阻之间的关系很简单：

$$G = \frac{1}{R}$$

电导的单位是西门子，过去曾叫*姆欧*。电导值越大，电阻值就越小，电路中有更多的电流流过。反之， $G$  值越小， $R$  值就越大，电路中有较少的电流流过。

#### 3.7.2 电纳

*电纳*的符号记作大写字母  $B$ ，它是交流电抗的倒数

$$B = \frac{1}{X}$$

电纳可以是容性的，也可以是感性的，它们分别记作  $B_C$  和  $B_L$ 。因此，

$$B_C = \frac{1}{X_C}$$

$$B_L = \frac{1}{X_L}$$

与电抗的表示式一样，电纳的表示式也需要有  $j$  算符。 $j$  算符在商数上的性质很奇特。 $j$  的乘法逆量（倒数）也是它的加法逆量（负数），即  $1/j = -j$ 。因此，当用电抗计算电纳时符号会改变。

*容性电纳*的公式为

$$B_C = 2\pi fC \approx 6.28fC$$

这类似于感抗的公式。同样，*感性电纳*的公式则类似于容抗的公式

$$B_L = -\frac{1}{2\pi fL} \approx -\frac{1}{6.28fL}$$

复数电导和复数电纳结合成*复数导纳*，记作大写字母  $Y$ 。



### 3.7.3 复数导纳

导纳是电导与电纳的复数复合量

$$Y = G + jB$$

$j$  的系数也可以是负的，所以有时可以写成  $Y = G - jB$ 。

不是阻抗，而是导纳最适合于处理并联交流电路的问题。在并联电路中，合成电阻和电抗显得零乱，但电导 ( $G$ ) 和电纳 ( $B$ ) 只要简单相加就得到导纳 ( $Y$ )。这与直流电路中电阻并联的情形相类似。

### 3.7.4 GB 平面

*GB 平面* 即导纳平面。导纳可以在一个看起来像复数阻抗 ( $RX$ ) 平面的平面上来表述。实际上这是一个半平面，因为通常没有负电导存在。电导在这个坐标半平面上沿着水平轴 ( $G$  轴) 标绘，电纳则沿着垂直轴 ( $B$  轴) 标绘，见图 3-20。

*GB 平面* 的中心或原点代表的是这样的一点，此时在电路中没有直流电或交流电的传导。在  $RX$  平面上，原点代表完全短路；在  $GB$  平面上，它对应于完全开路。在  $RX$  平面上，离开原点无穷远的各个方向上的点都表示开路，而在  $GB$  平面上，这些点表示短路。

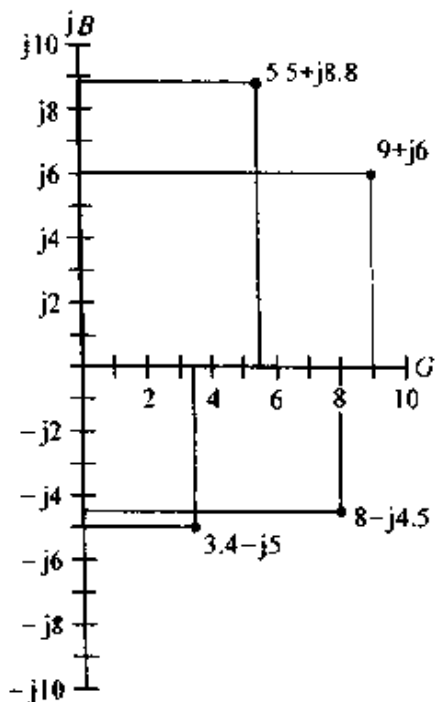


图 3-20 *GB* 平面上的一些点以及它们在  $G$  轴和  $B$  轴上的分量

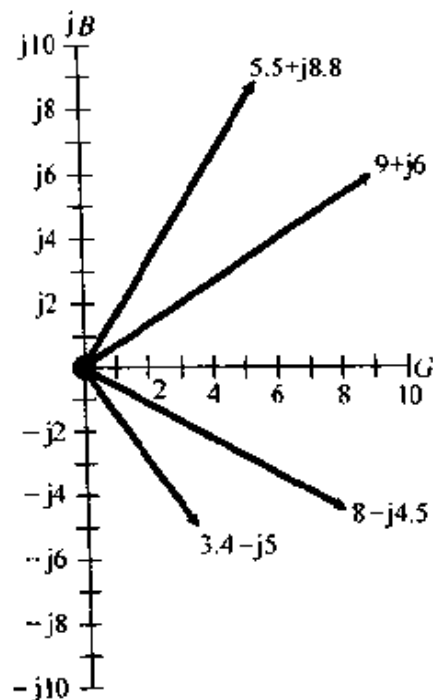


图 3-21 *GB* 平面上的一些矢量

### 3.7.5 导纳的矢量表示

与复数阻抗一样,复数导纳也可以用矢量来表示。在图 3-21 上,把图 3-20 上的点画成了矢量。一般说来,较长的矢量对应较大的电流,较短的矢量对应较小的电流。

总体上看指向“东北”方向或右上方的矢量代表电导和电容的并联;或多或少指向“东南”方向或右下方的矢量则代表电导和电感的并联。

### 3.7.6 导纳并联

两个以并联方式连接的导纳  $Y_1 = G_1 + jB_1$  和  $Y_2 = G_2 + jB_2$ , 其总导纳  $Y$  为两者的矢量和

$$Y = (G_1 + G_2) + j(B_1 + B_2)$$

当需要求以阻抗表示的两个并联支路的合成阻抗时,可先将每个支路的阻抗变换成导纳

$$Y_1 = 1/Z_1, Y_2 = 1/Z_2$$

注意这里是复数运算。再用上面的公式求得并联后的合成导纳

$$Y = Y_1 + Y_2$$

然后把合成导纳变换成合成阻抗

$$Z = 1/Y$$

其实部是合成阻抗的电阻分量,虚部是合成阻抗的电抗分量。

## 第4章 数字基础

当一个信号或物理量只能取有限的电平或数值时,它就是数字的。这是相对于模拟信号或模拟量而言,后者可在一定的电平或数值范围内连续地变化。图 4-1a 表示一个简单的模拟波形,其幅度从一个瞬间到另一个瞬间连续地变化。图 4-1b 是图 4-1a 上的模拟波形的数字近似。

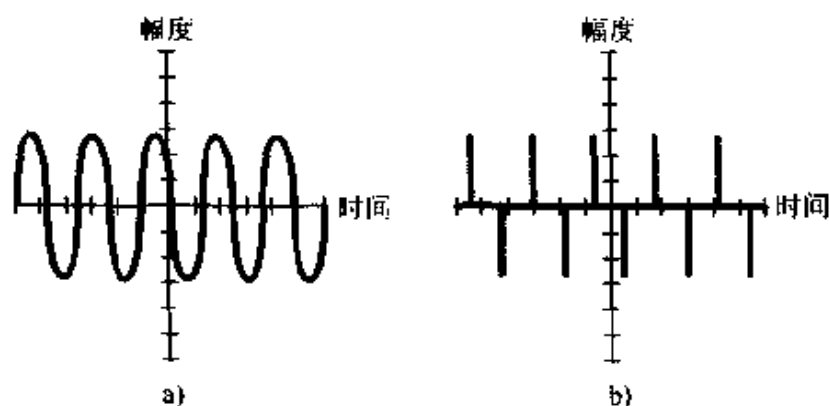


图 4-1 模拟波及其近似波  
a) 模拟波 b) 该波的数字近似

### 4.1 计数系统

人们习惯于使用由 10 个特定数字构成的十进制数字系统,但机器常使用由 2 的几次幂的特定数字构成的系统,最常用的是 2 ( $2^1$ ), 8 ( $2^3$ ) 或 16 ( $2^4$ )。

#### 4.1.1 十进制

*十进制数字系统*也叫以 10 为模、以 10 为底或以 10 为基的系统。数字是用数组  $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$  来表示的。紧接小数点左边的数字乘以  $10^0$  或 1,再往左一位的数字乘以  $10^1$  或 10。数字继续向左移时所乘的 10 的幂次跟着增加。小数点右边第一位数字乘上  $10^{-1}$  或  $1/10$ ,右边第二位数字乘上  $10^{-2}$  或  $1/100$ 。数字继续向右,所乘幂次继续下降。一旦完成了对每位数字的乘法,把所得之值相加。当

你写下一个十进制数时，它就代表这样的意思。例如

$$2704.53816 = 2 \times 10^3 + 7 \times 10^2 + 0 \times 10^1 + 4 \times 10^0 + 5 \times 10^{-1} \\ + 3 \times 10^{-2} + 8 \times 10^{-3} + 1 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-5}$$

#### 4.1.2 二进制

**二进制数字系统**是仅用数字 0 和 1 来计数的方法，有时也叫以 2 为底、以 2 为基或以 2 为模。紧接基点左边的数字是指有几个“1”，左边第二位数字是指有几个“2”，再往左是指有几个“4”，然后是代表有几个 8，16，32，64 等等，每左移一位就加一倍。在基点右边，每个数字依次代表有几个  $1/2$ ， $1/4$ ， $1/8$ ， $1/16$ ， $1/32$ ， $1/64$  等等，每右移一位就减一半。

以十进制数 94 为例： $94 = (4 \times 10^0) + (9 \times 10^1)$ 。在二进制数字系统中，它变为

$$1011110 = (0 \times 2^0) + (1 \times 2^1) + (1 \times 2^2) + (1 \times 2^3) \\ + (1 \times 2^4) + (0 \times 2^5) + (1 \times 2^6)$$

当你用计算机或计算器工作时，你给它一个十进制数，它被转成二进制形式。计算机或计算器用 0 和 1 进行运算。过程完成以后，机器再把运算结果转成十进制形式显示出来。

在通信系统中，二进制数可代表字母数字字符、颜色的明暗、声音的频率以及其他的可变量。

#### 4.1.3 八进制

在计算机编程中有时会用到的另一种系统是**八进制数字系统**，这么叫是因为它有八个符号，每个数字是数组 {0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} 的一个元素。

#### 4.1.4 十六进制

在计算机工作中还用到的另一种计数系统是**十六进制数字系统**，这么叫是因为它有 16 个符号。这些符号是 0 到 9 加上字母表中的前 6 个字母 A~F，即其数组为 {0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F}。

颜色可以用 6 位 16 进制数来表示，如 005CFF。在红绿蓝 (RGB) 色彩模式中，前两位数代表从 00 到 FF 的 256 色阶中红色 (R) 的强度，中间两位数代表绿色 (G) 的强度，最后两位数代表蓝色

(B) 的强度。

## 4.2 逻辑

逻辑是指人和电子机器所用的推理方法。该术语有时也用来指组成许多数字装置和系统的电路。

### 4.2.1 布尔代数

布尔代数是使用数字 0 和 1 以及运算 AND (与)、OR (或)、NOT (非) 的数理逻辑系统。这些运算还可组合为 NAND (与非) 和 NOR (或非)。布尔函数用在数字逻辑电路的设计中。

在布尔代数中,  $X$  AND  $Y$  写成  $XY$  或  $X * Y$ 。NOT  $X$  是在  $X$  上加一横线或否定号“ $\sim$ ”, 或在前面加一负号。 $X$  OR  $Y$  写成  $X + Y$ 。表 4-1 列出了这些函数的值, 其中 0 表示“假”, 1 表示“真”。等号两边的式子在逻辑上相等。

表 4-1 布尔运算

$X$	$Y$	$\sim X$	$X * Y$	$X + Y$
0	0	1	0	0
0	1	1	0	1
1	0	0	0	1
1	1	0	1	1

表 4-2 给出若干个逻辑方程, 它们是论据或定理。布尔定理可以用来分析复杂的逻辑功能。

表 4-2 布尔代数中常用的定理

方 程	名 称	方 程	名 称
$X + 0 = X$	OR 的同一律	$X + Y = Y + X$	OR 的交换律
$X * 1 = X$	AND 的同一律	$X * Y = Y * X$	AND 的交换律
$X + 1 = 1$		$X + (X * Y) = X$	
$X * 0 = 0$		$X * (\sim Y) + Y = X + Y$	
$X + X = X$		$X + Y + Z = (X + Y) + Z$ $= X + (Y + Z)$	OR 的结合律
$X * X = X$		$X * Y * Z = (X * Y) * Z$ $= X * (Y * Z)$	AND 的结合律
$\sim(\sim X) = X$	否定之否定	$X * (Y + Z) = (X * Y) + (X * Z)$	分配律
$X + (\sim X) = 1$		$\sim(X + Y) = (\sim X) * (\sim Y)$	摩根定理
$X * (\sim X) = 0$	矛盾律	$\sim(X * Y) = (\sim X) + (\sim Y)$	摩根定理

### 4.2.2 三元逻辑

三元逻辑除了通常的真/假（高/低）状态以外，还允许有一个非真非假的中间状态。这三个值由逻辑 $-1$ （假）， $0$ （中性）和 $+1$ （真）来表示。

三元逻辑在电子电路中很容易由正、零和负的电流或电压来表示。

### 4.2.3 模糊逻辑

在模糊逻辑中，数值涵盖从“全假”到中性到“全真”的一个连续的范围。模糊逻辑非常适用于某些过程的控制。随着计算机与机器人之间关系日益紧密，它的应用也许会变得更加广泛。模糊逻辑在数字上可用不连续的阶跃来表示，对于平稳的数值范围则使用模拟系统。

## 4.3 二进制逻辑门电路

所有二进制数字器件和系统都使用履行各种布尔功能的开关，这些开关称为逻辑门电路。

### 4.3.1 正逻辑与负逻辑

通常，二进制数字 $1$ 代表真，并用大约 $+5\text{V}$ 的电压来表示；二进制数字 $0$ 代表假，并用大约 $0\text{V}$ 的电压来表示。这是正逻辑。还有其他的逻辑形式，其中最常用的是负逻辑（这里数字 $1$ 是用比数字 $0$ 更负的电压来表示）。后面的讨论都指正逻辑。

### 4.3.2 基本门电路

反相器或非门(NOT)有一个输入和一个输出，它使输入的状态逆转。或门(OR)可以有两个或两个以上的输入。若两者或所有的输入都为 $0$ ，则输出亦为 $0$ ；只要有一个输入为 $1$ ，则输出就为 $1$ 。与门(AND)可以有两个或两个以上的输入。若两者或所有的输入为 $1$ ，则输出亦为 $1$ ；不然的话输出就为 $0$ 。

### 4.3.3 其他门电路

有时一个反相器和一个或门(OR)结合在一起，形成一个或非门(NOR)。若一个反相器和一个与门(AND)结合在一起，则产生一个与非门(NAND)。

有一种异或门，也叫XOR门，有两个输入和一个输出。若两个输入相同（都是 $1$ 或都是 $0$ ），输出为 $0$ ；若两个输入不同则输出为 $1$ 。

逻辑门电路的功能概括于表 4-3，它们的图示符号列于图 4-2。

表 4-3 逻辑门电路及其特性

门类型	输入数	特性说明
非门(NOT)	1	改变输入的状态
或门(OR)	2个或2个以上	只要有一个输入高输出就高,所有的输入低时输出才低
与门(AND)	2个或2个以上	只要有一个输入低输出就低,所有的输入高时输出才高
或非门(NOR)	2个或2个以上	只要有一个输入高输出就低,所有的输入低时输出才高
与非门(NAND)	2个或2个以上	只要有一个输入低输出就高,所有的输入高时输出才低
异或门(XOR)	2	输入不同时输出高,输入相同时输出低

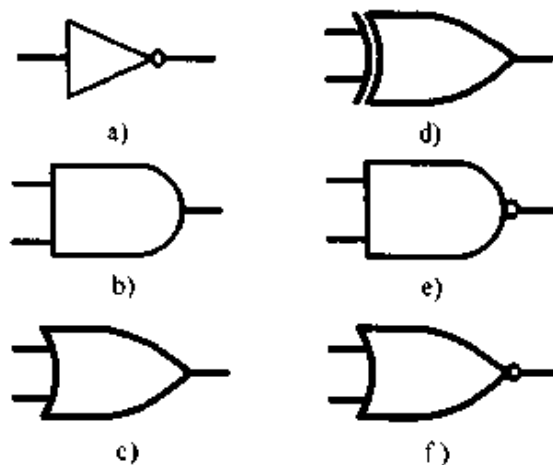


图 4-2 逻辑门电路的图示符号

a) 反相器或非门 b) 与门 c) 或门 d) 异或门  
e) 与非门 f) 或非门

## 4.4 数字电路

数字电路被设计用于处理具有离散的、界限明确的电平的信号。许多数字电路不过是高级的电子开关。

### 4.4.1 二进制数据

二进制(二电平)信号用在许多通信系统中。二进制数据对噪声和其他干扰的敏感性要比模拟数据或多电平数字数据小。

莫尔斯电码是发送和接收电报的最早的二进制方式。它是二进制码,因为它仅有两种可能的状态:开(键按下)和关(键抬起)。

博多电码也叫莫雷电码,是一种5位数字码,除了有些业余无线

电通信尚在使用外，在现今的数字设备中已较少使用。

美国国家标准信息交换码(ASCII)是传输文本和某些程序用的一种7位码，用来表示字母、数字、符号和控制操作码。ASCII主要是为计算机应用设计的，有 $2^7$ 或128个可能的表示法，能表示大写、小写字母及一些符号。

#### 4.4.2 触发器

触发器是顺序逻辑门电路的一种型式。在顺序逻辑门电路中，输出状态与输入和输出都有关。触发器有两种状态叫做置位和复位。通常，置位状态是逻辑1(高)，复位状态是逻辑0(低)。

RS触发器的输入标记为R(复位)和S(置位)，输出标记为Q和 $\bar{Q}$ (也常用Q'或 $\bar{Q}$ 而不用 $-Q$ )。输出端在逻辑上总处于相反状态。RS触发器(也叫异步触发器)的图形符号及其真值表示于图4-3a和表4-4。

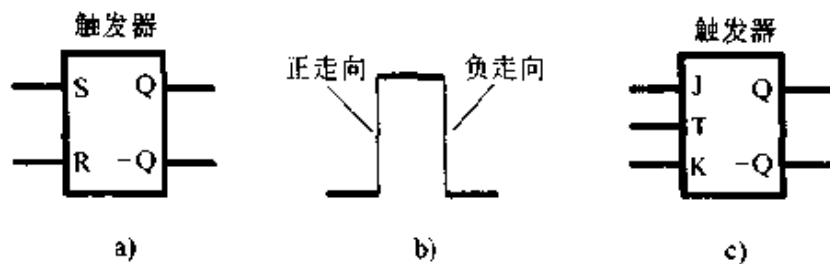


图4-3 触发器图形符号

- a) RS触发器的图形符号 b) 脉冲边沿正走向或负走向  
c) JK触发器的图形符号

表4-4 触发器状态

a) RS 触发器				b) JK 触发器			
R	S	Q	$\bar{Q}$	J	K	Q	$\bar{Q}$
0	0	Q	$\bar{Q}$	0	0	Q	$\bar{Q}$
0	1	1	0	0	1	1	0
1	0	0	1	1	0	0	1
1	1	?	?	1	1	$\bar{Q}$	Q

同步触发器只在受到来自时钟的信号触发时状态发生改变。在静态触发中，只有当时钟信号要么是高要么是低时才能使输出改变状态。这种类型的电路有时也叫栅控触发器。在正边沿触发中，输出在时钟



脉冲上升（向正）的瞬间改变状态。所以用“*边沿触发*”这个词，是由于脉冲的急剧上升或急剧下降看起来就像悬崖的边沿，见图 4-3b。在*负边沿触发*中，输出在时钟脉冲下降（向负）的瞬间改变状态。

*主从 (M/S) 触发器* 在输出被允许改变状态前其输入被贮存着。这种器件实质上是由两个 RS 触发器串联而成。第一个触发器叫*主触发器*，第二个触发器叫*从触发器*。当时钟输出为高电平时主触发器运作，在时钟输出接下来的低电平期间从触发器工作。这种时间延迟可防止输入与输出之间的干扰。

*JK 触发器* 的工作与 RS 触发器类似，但 JK 触发器在 J、K 两输入端均为 1 时其输出状态是可预期的。表 4-4 表示这类触发器的输入和输出状态。只有在收到触发脉冲时输出才会改变。JK 触发器的图形符号见图 4-3c。

*RST 触发器* 的工作与 RS 触发器类似，但 T 输入端的高脉冲可使电路改变状态。

*T 触发器* 只用一个输入端，每次在 T 输入端有高脉冲出现时，输出状态就逆转。

#### 4.4.3 时钟

在电子学中，*时钟* 一词是指以高的速率和精确的间隔产生脉冲的电路。它为某些类型的数字器件的工作设定节拍。在计算机中，时钟就如同*微处理器*的节拍器。时钟的速率最典型的度量单位是兆赫或千兆赫。

#### 4.4.4 计数器

*计数器* 是由一组触发器或等效电路组成的。每次接收到一个脉冲时，计数器储存的二进制数就增加 1。

*频率计数器* 是由计数给定时间间隔的循环数来测量波的频率。其电路中有一个门电路，它在给定时间间隔内对每个计数循环启闭一次。计数器的准确度是门电路*选通时间*长度的函数；选通时间越长准确度越高。计数器的读数是以 10 为底的数字数码。

### 4.5 二进制数字通信

使用二进制数据能达到最佳的通信效率。如果需要多电平的信号

传输,所有的电平均可以用成组的二进制数字来表示。例如,一组  $n$  个二进制数字可以表示  $2^n$  个电平。

#### 4.5.1 比特 (bit) 与字节 (byte)

*比特*是数字数据的基本单元,由逻辑0或逻辑1来表示。一组8bit组成一个字节。在通信中,字节有时也叫*八位位组*。

$1\text{Kb} = 1024\text{bit}$ ,  $1\text{Mb} = 1024\text{Kb} = 1048576\text{bit}$ ,  $1\text{Gb} = 1024\text{Mb} = 1073741824\text{bit}$

数据量通常用KB( $2^{10} = 1024\text{byte}$ )、MB( $2^{20} = 1048576\text{byte}$ )、GB( $2^{30} = 1073741824\text{byte}$ )来标记,有时也缩写为K、M和G。

还有更大的数据单位:TB( $2^{40}\text{byte} = 1024\text{GB}$ ),PB( $2^{50}\text{byte} = 1024\text{TB}$ ),EB( $2^{60}\text{byte} = 1024\text{PB}$ )。

#### 4.5.2 波特(baud)与每秒比特数(bps)

度量数据速率最常用的参数是*每秒比特数*(bps)。*波特*指的是信号每秒钟改变状态的次数。尽管人们常把它们看成是等效的,实际上这两个参数并不等效。

当计算机联网时,每台计算机有一个*调制解调器*(modem)把它连接到通信线路上。其中最慢的modem决定了计算机通信的速率。表4-5表示常用的数据速率和每个速率下传送1页、10页和100页隔行打印的文本所需要的时间。

表 4-5 在不同速率下传送数据所需的时间

bps	1 页	10 页	100 页	bps	1 页	10 页	100 页
1200	9.00s	1min30s	15min	28800	0.38s	3.8s	38s
2400	4.50s	45.0s	7min30s	38400	0.28s	2.8s	28s
4800	2.25s	22.5s	3min45s	57600	0.19s	1.9s	19s
9600	1.13s	11.3s	1min53s	115200	0.09s	0.94s	9.4s
14400	0.75s	7.5s	1min15s	230400	0.05s	0.47s	4.7s
19200	0.56s	5.6s	56s	460800	0.03s	0.24s	2.4s

## 4.6 数据类型与转换

许多通信系统在起始处将模拟信号“数字化”并在目的地将信号“去数字化”。数字数据可以一个bit一个bit地传输(串行),也可以成

簇地传输（并行）。

#### 4.6.1 模拟转换到数字

任何模拟信号或连续可变的信号都可以转换成一串脉冲，脉冲的幅度具有有限个状态数，通常是 2 的几次方数。这就是模拟-数字转换（A/D 转换）。

A/D 转换器对模拟信号的瞬间幅度取样并输出具有离散电平的脉冲，如图 4-4 所示。电平数称作取样分辨率，通常是 2 的整幂次。每秒的样本数称作取样率。在本例子中，有 8 个电平，它们由从 000 到 111 的三位二进制数来表示。

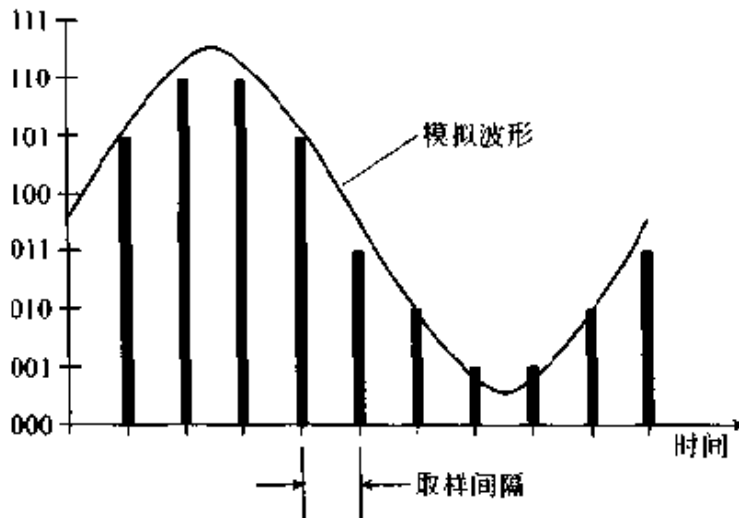


图 4-4 一模拟波形及其 8 电平的数字表示

一般来说，数字取样率大约是最高的模拟数据频率的一倍。如对具有高达 3kHz 分量的信号，最小的取样率是 6kHz。商品化的语音标准是 8kHz。对于高保真音乐传输来说，标准取样率为 44.1kHz。

#### 4.6.2 数字转换到模拟

数字-模拟转换（D/A 转换）的方法与信号是二进制的还是多电平的有关。

对二进制信号，微处理器把记录或传输时的 A/D 过程倒过来。那时高音调音被转换为一种逻辑状态，低音调音被转换成了另一种逻辑状态。

多电平数字信号转回其模拟形式是靠使脉冲“平滑化”。从图 4-4 就能直观地看出这一点：试设想那一连串的脉冲被平滑成了连续的

曲线。

### 4.6.3 串行与并行

二进制数据可以沿着一条单一的传输线或信道一次一个 bit 地发送和接收，这是*串行数据传输*。利用多条传输线或宽带信道，沿着每条线路或支信道发送独立的 bit 序列，这样可得到较高的数据速率，这是*并行数据传输*。

*并行-串行 (P/S) 转换*是从多条线路或信道接收 bit 数再沿着单一的线路或信道一次一个 bit 地传送它们。*缓冲寄存装置*把从平行线路或信道传来的 bit 数储存起来，同时它们等待着沿串行线路或信道传出去。

*串行-并行 (S/P) 转换*是从串行线路或信道接收 bit 数再沿着几条线路或信道成批发送它们。S/P 转换器的输出不会比输入更快，但在串行数据装置与并行数据装置之间需要有接口时，这种电路则是很有用的。

图 4-5 是一个示意图，在源处用了一个 P/S 转换器，在目的地用了一个 S/P 转换器。在本例中，字是 8bit。当然，字也可以有 16、32 甚至 64bit 的。

## 4.7 数据压缩

*数据压缩*是一种使在给定空间储存的数字信息量或在一定的时段发送的数字信息量达到最大的方法。

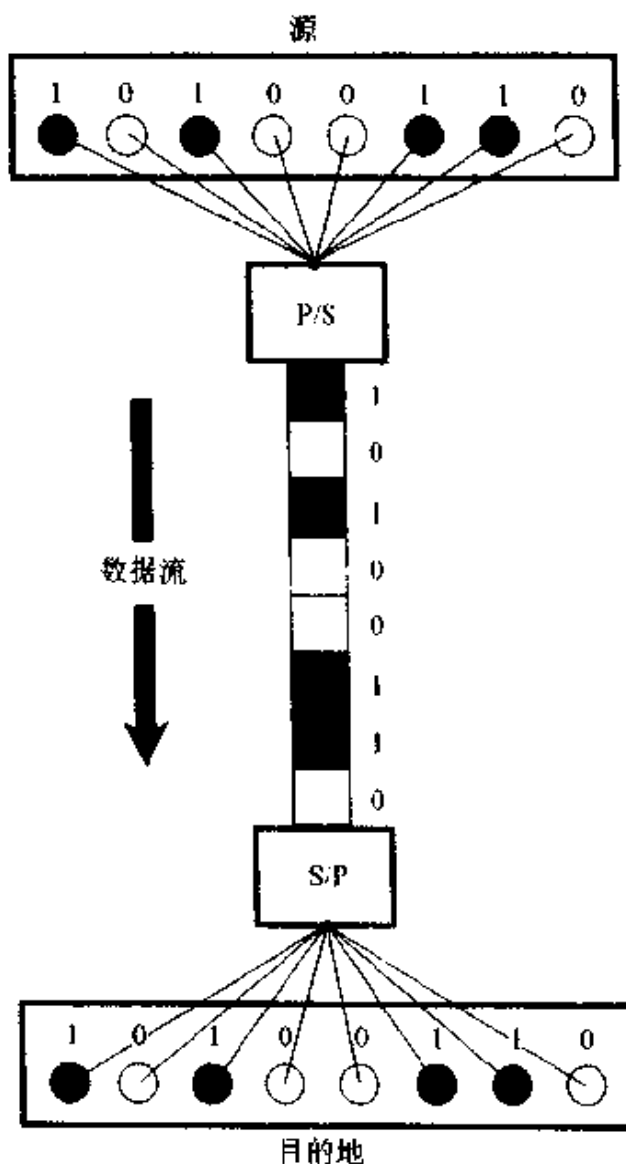


图 4-5 在源处使用 P/S 转换，在目的地使用 S/P 转换的通信电路

把常用词和短语用诸如=, #, &, @等符号来代替就能压缩文本文件, 只要在未压缩的文件中没有这些符号。在收到数据后, 用原来的词和短语代替这些符号就解压缩了。

数字图像可以用以下两种方法之一来压缩。*无损图像压缩*仅仅消除冗余的 bit, 并不牺牲图像细节。*有损图像压缩*会损失一些细节, 尽管这种损失一般并不大。

文本和程序的大小一般可以减少约 50%, 图像压缩的程度要大得多。有些先进的图像压缩系统所输出的文件只及原文件大小的百分之几。

## 4.8 分组通信

*分组通信*是计算机彼此间发送和接收信号的最常用的方法。

### 4.8.1 分组网络

分组是指从一台源计算机发送向一台或多台目的计算机的一组数字数据。数据速率很高, 使得长长的电文能在短短的信号猝发中被发出。各个分组不一定都沿着从源到目的地的同一条路线走, 但目的计算机知道如何正确重组各分组以得到原来的电文。

分组通信是自校正的。目的计算机能检测出差错并让源计算机重发出错的分组。

### 4.8.2 协议

在分组网络中, 所有的计算机都采用一种数据格式或叫做*协议*。通用的标准是“*开放系统互连参考模型*”, 缩写成 OSI-RM, 它有 7 级功能或者说有 7 个层次。

当发送一个分组时, 一旦源计算机知道了所要去的目的地*本地节点*, 计算机就自动完成所有的路线选定工作。操作员只需输入目的地信息以建立路由。在沿着给定的路线走不通的情况下, 协议会通过重新选定路线来使得连接不受到影响。

### 4.8.3 分组无线通信

在*分组无线通信*中, 计算机用一个*终端节点控制器* (TNC) 连接到无线电收发机上, 见图 4-6a。计算机有一个电话调制解调器和一个 TNC, 这样电文可以通过普通的联机服务发送和接收, 也可以通过无

线电发送和接收。

图 4-6b 画出了分组无线电文是如何按规定路线传送的。黑色圆点代表用户，矩形代表本地节点，每个本地节点通过甚高频 (VHF)、特高频 (UHF) 和微波频率下的短程连接服务于用户。如果节点之间离得较近的话，则通过地面的 VHF、UHF 和微波连接把它们互相连接起来。如果节点间离开得很远，则要用卫星连接。

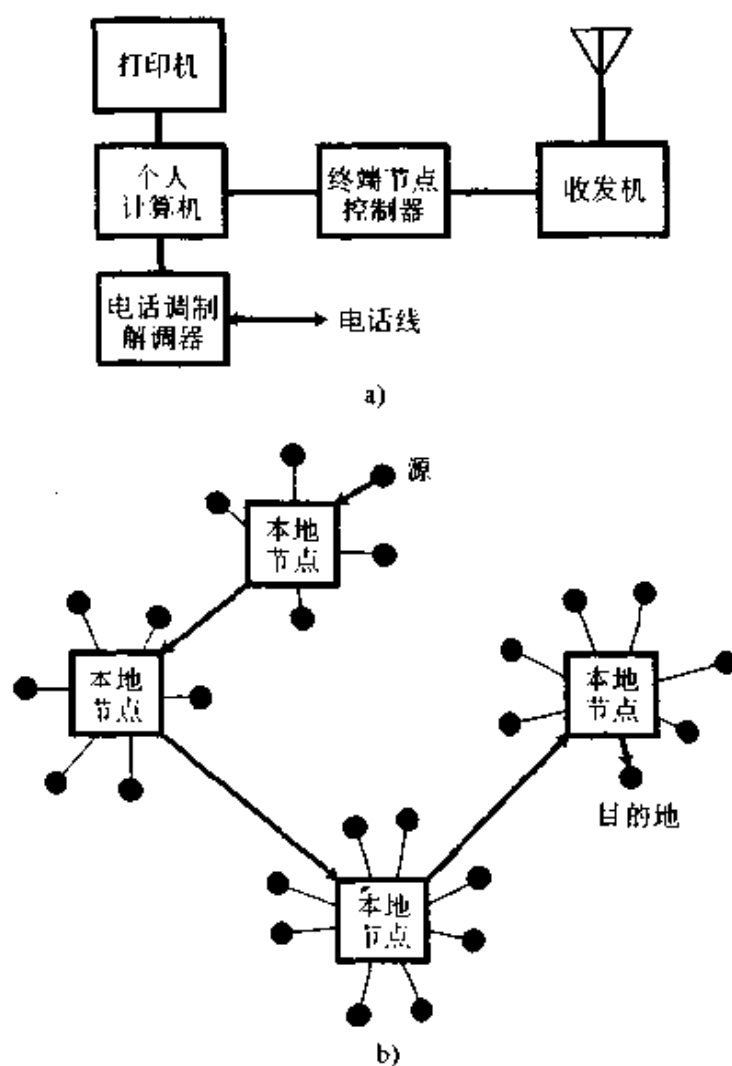


图 4-6 分组无线通信

a) 分组无线通信站 b) 无线通信线路中分组通过节点的通道

## 4.9 红绿蓝 (RGB) 色彩模型

所有视觉可见的颜色都可由红、绿、蓝三种光组合而成。红绿蓝 (RGB) 色彩模型就是利用这一点来作数字视频成像的方案。

### 4.9.1 色调、饱和度和亮度

颜色是波长的函数。当能量集中于单一波长附近时，你可见到很浓的色调。色调的鲜艳性就是饱和度。色彩的亮度则与光包含有多少能量有关。在大多数视频显示中，都有一个调节亮度的控制器。

### 4.9.2 三维色彩

把纯红、纯绿、纯蓝以各种不同的比例组合起来就形成了调色板。使每个原色对应三维空间的一根（坐标）轴，如图 4-7 所示。这三根轴分别为 R（红）、G（绿）、B（蓝）。颜色的亮度可以从 0 到 255，或以二进制表示：从 00000000 到 11111111。这样就产生出 16777216 ( $256^3$ ) 种可能的颜色。在立方体中的任何一点就代表一种独特的颜色。

有些 RGB 系统对每一种原色只分成 16 级（二进制从 0000 到 1111），这就产生出 4096 种可能的颜色。

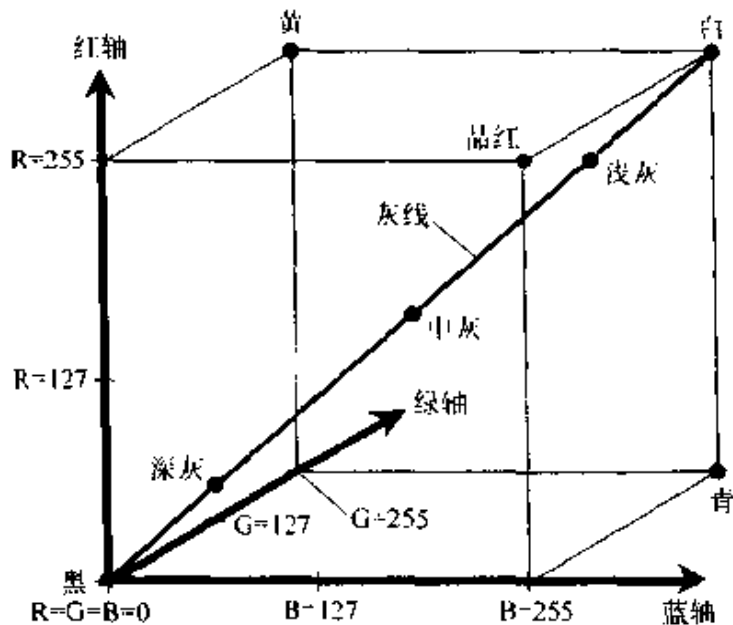


图 4-7 以三维空间的立方体描绘的 RGB 色彩模型

## 4.10 数字信号处理

数字信号处理 (DSP) 是改善数字数据精度的一种系统，它可用于提纯或增强各种类型的信号。

### 4.10.1 模拟数据提纯

当 DSP 用于模拟信号时，先要通过模/数转换把信号变成数字形式。然后对数字信号加以“整理”使得脉冲的时限与幅度均严格遵守

协议的规定。最后通过数/模转换再将数字信号变回模拟形式。

数字信号处理能扩展通信线路的有效工作范围，因为它允许在比原先的情况更差的条件下接收信号。数字信号处理也能改善较明晰的信号的质量，这样接收设备或操作员就能少出错。

#### 4.10.2 数字数据提纯

在只用数字模式的电路中，与 A/D 和 D/A 转换不相干，但 DSP 照样可以“整理”信号。它改善系统的精度，也使得有可能多次地拷贝数据（就是说可以产生好多代的拷贝）。

DSP 电路可以将数字状态间的混乱减至最小，见图 4-8。图的上部画出了一个假想的信号在处理之前的情形，图的下部则是经处理后的信号。如果在一个时间间隔中输入的幅度高于某个电平，则输出为高（逻辑 1）；如果在一个时间间隔中输入的幅度低于临界点，则输出为低（逻辑 0）。一个强的噪声猝发也许会让电路把实际上是

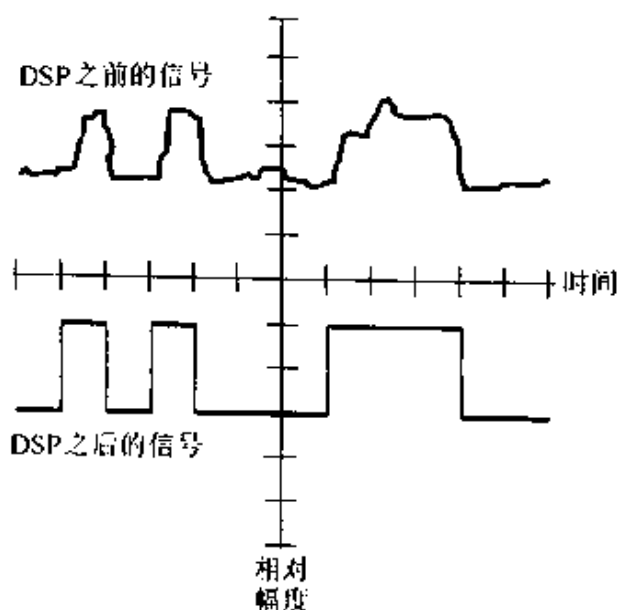


图 4-8 带有噪声的数字信号(上)和经过 DSP 后的信号

是低的信号误作为高信号，但总起来说，有了 DSP 使出错变少了。

#### 4.10.3 计算机中的 DSP

DSP 系统可以蚀刻在单个的集成电路上，大小类似于一个微处理器芯片。有些 DSP 在计算机系统中发挥着多重功能，就像是微处理器的助手，这样就让计算机集中注意力去完成它的主要工作，而不必去操心那些额外的事情。

DSP 芯片可以像传真机、调制解调器或终端节点控制器那样工作。它可以压缩与解压缩数据，帮助计算机识别和生成语音，把一种口语翻译成另一种口语（如把英语译为汉语或把汉语译为英语），甚至可识别和比较图样。



## 第 5 章 金属导线与电缆

金属导线是将电能从一处传送到另一处的最通用的载体。在某些场合金属导线也用作机械加固。有些金属丝用来制造灯泡、电阻和加热元件。

电缆是一种特殊的软（电）线，用来传递功率和信号。在连接电子设备和计算机外围设备时，选用正确型号的电缆和连接头是十分重要的。

### 5.1 金属导线

对于给定的金属和结构，线规号码越大对应的电阻率越高，载流容量就越低。金属种类也很重要。银是已知的最好的导体，其次是铜和铝。

对于直流和低频交流电，实芯线比相同线规的多芯绞线能输送更大的电流。高频情况下则相反，因为有集肤效应。按这种效应，电流趋向于沿导体的最外表层流动。

线规与抗拉强度或抗机械应力的能力相对应。对于给定金属和导线结构，线规号越高，线的抗拉强度越弱。钢是中等价格材料中强度最高的材料。铜和铝的导电性虽比钢好，但机械强度较差。多芯绞线的抗断裂性比同线规的实芯线要好。

#### 5.1.1 美国线规

美国线规用一串数字来表示，数字越大，线径越小。表 5-1 表示从美国线规 1 号到 40 号的导线的直径，分别以毫米和英寸表示。表中的直径不包括导线的任何绝缘物或漆皮。

#### 5.1.2 英国标准线规

在某些国家采用英国标准线规。线规号越大，线越细。表 5-2 表示英国标准线规从 1 号到 40 号的导线的尺寸。

英国标准线规的设计者不考虑导线外面的涂层，如漆、橡胶或塑

料绝缘物。

表 5-1 美国线规直径

美国线规号	直径/mm	直径/in <sup>①</sup>	美国线规号	直径/mm	直径/in <sup>①</sup>
1	7.35	0.289	21	0.723	0.0285
2	6.54	0.257	22	0.644	0.0254
3	5.83	0.230	23	0.573	0.0226
4	5.19	0.204	24	0.511	0.0201
5	4.62	0.182	25	0.455	0.0179
6	4.12	0.163	26	0.405	0.0159
7	3.67	0.144	27	0.361	0.0142
8	3.26	0.128	28	0.321	0.0126
9	2.91	0.115	29	0.286	0.0113
10	2.59	0.102	30	0.255	0.0100
11	2.31	0.0909	31	0.227	0.00894
12	2.05	0.0807	32	0.202	0.00795
13	1.83	0.0720	33	0.180	0.00709
14	1.63	0.0642	34	0.160	0.00630
15	1.45	0.0571	35	0.143	0.00563
16	1.29	0.0508	36	0.127	0.00500
17	1.15	0.0453	37	0.113	0.00445
18	1.02	0.0402	38	0.101	0.00398
19	0.912	0.0359	39	0.090	0.00354
20	0.812	0.0320	40	0.080	0.00315

① in 为英寸, 1in=25.4mm。

表 5-2 英国标准线规直径

英国标准线规号	直径/mm	直径/in	英国标准线规号	直径/mm	直径/in
1	7.62	0.300	21	0.81	0.032
2	7.01	0.276	22	0.71	0.028
3	6.40	0.252	23	0.61	0.024
4	5.89	0.232	24	0.56	0.022
5	5.38	0.212	25	0.51	0.020
6	4.88	0.192	26	0.46	0.018
7	4.47	0.176	27	0.42	0.0164
8	4.06	0.160	28	0.38	0.0148
9	3.66	0.144	29	0.345	0.0136
10	3.25	0.128	30	0.315	0.0124
11	2.95	0.116	31	0.295	0.0116
12	2.64	0.104	32	0.274	0.0108
13	2.34	0.092	33	0.254	0.0100
14	2.03	0.080	34	0.234	0.0092
15	1.83	0.072	35	0.213	0.0084
16	1.63	0.064	36	0.193	0.0076
17	1.42	0.056	37	0.173	0.0068
18	1.22	0.048	38	0.152	0.0060
19	1.02	0.040	39	0.132	0.0052
20	0.91	0.036	40	0.122	0.0048

### 5.1.3 伯明翰线规

伯明翰线规不同于美国线规和英国标准线规,但尺寸与之接近。线规号越大,线越细。表 5-3 表示伯明翰线规从 1 号到 20 号的线径。伯明翰线规的设计者不考虑线外的任何涂层或绝缘物。

表 5-3 伯明翰线规直径

伯明翰线规号	直径/mm	直径/in	伯明翰线规号	直径/mm	直径/in
1	7.62	0.300	11	3.05	0.120
2	7.21	0.284	12	2.77	0.109
3	6.58	0.259	13	2.41	0.095
4	6.05	0.238	14	2.11	0.083
5	5.59	0.220	15	1.83	0.072
6	5.16	0.203	16	1.65	0.064
7	4.57	0.180	17	1.47	0.058
8	4.19	0.165	18	1.25	0.049
9	3.76	0.148	19	1.07	0.042
10	3.40	0.134	20	0.889	0.035

### 5.1.4 电阻率

导线传输电流的难易以电阻率或单位长度的电阻表示。常用单位是微欧每米( $\mu\Omega/m$ )。对于给定金属,线规越大(直径越小)电阻率越大,线规越小(直径越大)电阻率越小。对于实芯铜线在室温下传输直流电,表 5-4 给出美国线规从 2 号到 30 号的实芯铜线的近似电阻率( $\mu\Omega/m$ )。

表 5-4 不同线规号实芯铜线的电阻率

美国线规号	电阻率/( $\mu\Omega/m$ )	美国线规号	电阻率/( $\mu\Omega/m$ )	美国线规号	电阻率/( $\mu\Omega/m$ )
2	523	12	5320	22	54000
4	831	14	8450	24	85900
6	1320	16	13400	26	137000
8	2100	18	21400	28	217000
10	3340	20	34000	30	345000

### 5.1.5 载流容量

导线能够安全传输电流的能力叫做载流容量,这个指标常用安培来表示。表 5-5 表示美国线规 8 号到 20 号的实芯铜线在室温下、空气中传输直流电的载流容量。导线可以断续地传输比表中所示更大的电

流。但随着电流增加到超过表中的数值后，导线将变软或熔化，随之断裂的危险性很快上升。

表 5-5 空气中不同线规号导线的载流容量

美国线规号	电流/A	美国线规号	电流/A
8	73	16	22
10	55	18	16
12	41	20	11
14	32		

当导线在其他电子设备旁使用时，表中的数值要适当降低。当导线绑扎成线缆或接近易燃材料使用，或外面敷以绝缘材料时，表中数值也要降低。

## 5.2 导线的绞接

在电子线路和天线配线时，常常需要绞接两根导线。有许多不同的绞接方法，在这里仅讨论两种。

### 5.2.1 缠绕绞接

最简单的绞接导线的方法是将裸线的末端平行放在一起，相互缠绕起来捻搓几次，见图 5-1。这叫缠绕绞接，可用于实芯线或多芯绞线。如果导线的直径不一样粗，则细线就缠绕在粗线上，见图 5-2。如果绝缘是重要的，可以用胶布把接合处粘住。这类绞接机械强度较差。即使将缠绕绞接处焊住，接合处也承受不了很大力量。

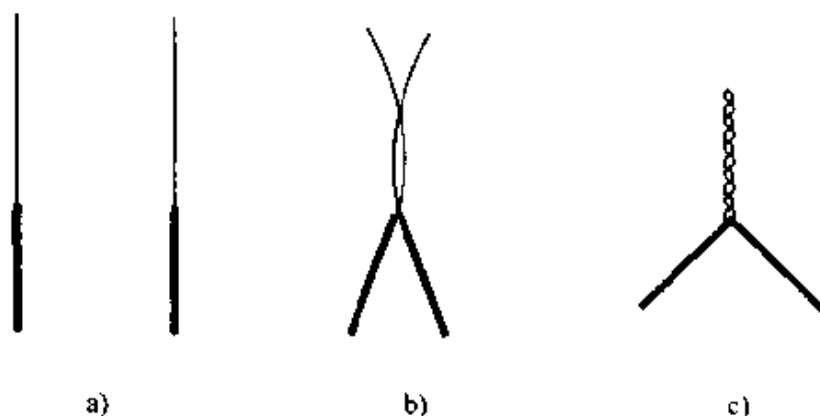


图 5-1 相同直径导线的缠绕绞接

a) 导线平行地放在一起 b) 相互缠绕

c) 相互搓捻几次

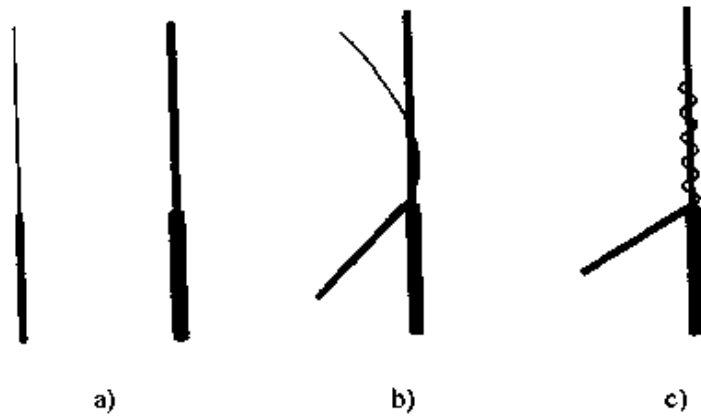


图 5-2 不同直径导线的缠绕绞接  
a) 导线平行地放在一起 b) 细线绕在粗线上 c) 细线绕着粗线捻几次

### 5.2.2 直接绞接

当需要绞接具有良好的抗张强度时，必须将两根导线的端部搭接在一起约  $2in$ 。导线相互勾住然后再缠绕几次，见图 5-3，这叫做直接绞接。

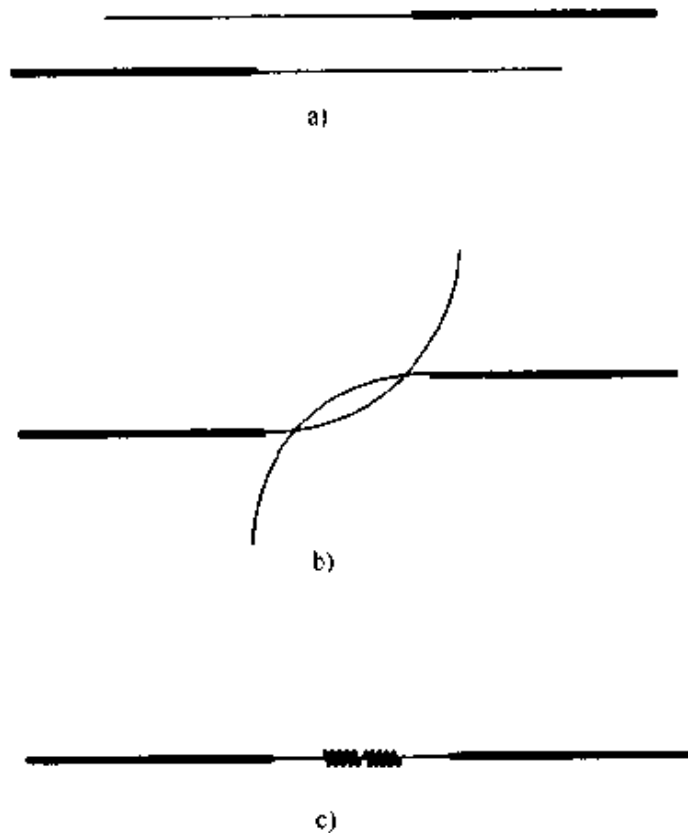


图 5-3 直接绞接  
a) 导线平行地放在一起 b) 相互环绕 c) 最终相互缠绕在一起

对于钢丝，尽可能不要绞接，如果真需要绞接，则推荐用直接绞接法。每一端必须缠绕10~12次。光头钳可以用来夹紧端部，伸出的末端可用斜嘴钳剪掉。

如果需要好的电连接，绞接处必须焊接并用胶布或其它绝缘材料缠上。对于大直径导线，在绞接处进行良好的电连接前可以先将接头变细并焊接。为了得到最大的强度，两根导线必须是相同尺寸和相同类型（两根都是实芯线或都是多芯绞线）。

### 5.3 电缆

最简单的电缆就是家用电器用的软电线，橡胶或塑料绝缘物内有两根或三根金属线。图5-4a是常用的双芯电缆。单根导线通常都是多芯绞线，这使得导线在反复弯曲时不易折断。

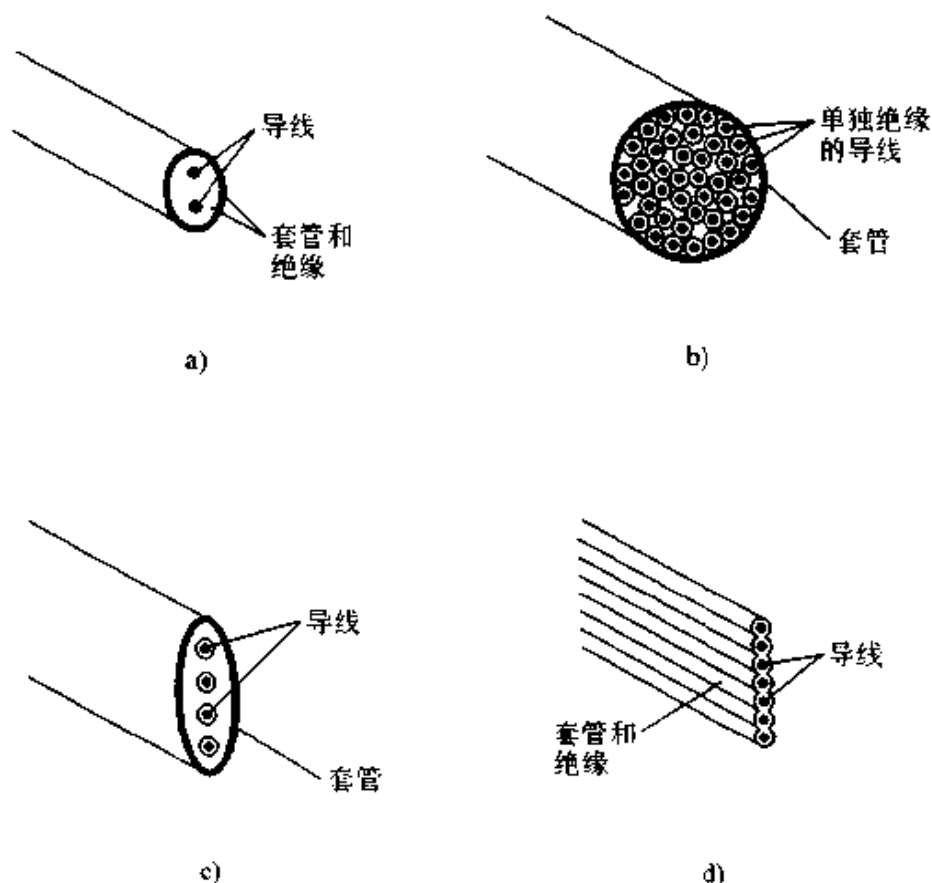


图5-4 电缆

a) 双芯电缆 b) 多芯电缆 c) 平面电缆 d) 带状电缆

#### 5.3.1 多芯电缆

电缆可以有多根导线，它们相互间是绝缘的，把它们捆扎在一起

封装在绝缘套筒内就是图 5-4b 所示的**多芯电缆**。如果电缆需要是柔性的，则导线必须是多芯绞线。这种电缆内部有几十根导线。

如果只有几根导线，则可以将它们平行放置在一个平面结构中，即图 5-4c 所示的**平面电缆**。

有时候，若干根导线模压进一个总的绝缘套中，如图 5-4d 所示。这样的**带状电缆**常用在商用电子设备中，特别是用在计算机中。这种电缆是很坚固的，对节省空间很理想，散热也很有效。

### 5.3.2 屏蔽

上述各类电缆都是没加**屏蔽**的。对于直流或低速数据传输可以用无屏蔽电缆。但是射频信号、视频和其他高速数据建立的电磁场能够在电缆导线间，甚至在电缆和周围环境间传递。在这种情况下电缆就必须**电磁屏蔽**。

一根导线或一组导线要屏蔽时，就是把它封装在金属导电圆筒、金属编织网（一般是铜的）或金属箔内。利用介质材料，如聚乙烯将导线与屏蔽层隔开。

在某些多芯电缆中，所有导线共用一个外围的屏蔽。另一些电缆中，每一根导线都有自己的屏蔽。除了每根导线自己的屏蔽外，整个电缆可以再包裹金属编织网。**双屏蔽电缆**其导线被由介质隔开的两层同心金属编织网所包围。

### 5.3.3 同轴电缆

**同轴电缆**也叫共心电缆，是专门为高频信号传输设计的。它主要用于共用天线电视网络，也被选用作为计算机局域网的电缆。无线广播机务员用同轴电缆将无线电收发两用机、无线电发射机和接收机与天线连接起来。它还用于高保真音频系统中各部件的相互连接。

同轴电缆中，中心的单根导体周围用空心管屏蔽。有些情况下，实心的或泡沫状聚乙烯介质使芯线保持在电缆的轴心，见图 5-5a。另外一种电缆有一根裸的中心导线和一层紧贴在金属编织网里面的薄聚乙烯，见图 5-5b，大部分介质是空气。从技术上讲，这不是真正的同轴电缆，虽然已经习惯这么称呼了。

有一种同轴电缆在中心导线的外围有金属导管，这叫**硬线**。这类电缆的直径比同轴电缆大，所以单位长度的损耗较小。它用在大功率、

固定发送设备上，特别适于甚高频和超高频设备。

在同轴电缆中，信号由芯线传送。屏蔽接地，以防止信号泄漏出去。屏蔽也阻止不需要的信号或噪声侵入。

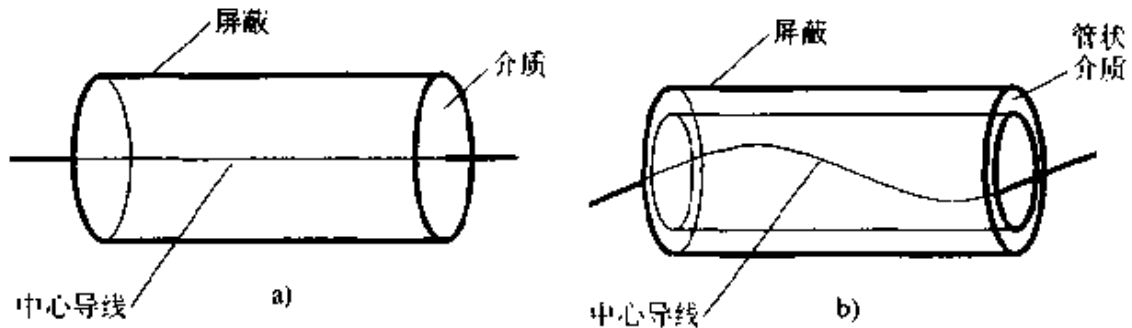


图 5-5 同轴电缆

a) 实心介质或泡沫状介质同轴电缆 b) 大部分介质是空气的同轴电缆

### 5.3.4 串行和并行电缆

沿着一根线传输数据的电缆叫**串行电缆**。沿着若干根线同时传输数据的叫**并行电缆**。

串行电缆通常比并行电缆长，因为并行电缆易于产生**串音**，这时在不同芯线内的信号会相互干扰或彼此组合。在并行电缆内，将每一根导线分别屏蔽起来就可以防止串音。但是这样会增加电缆的体积和单位长度的价格。

共用天线电视网络中用来传输电视信号的同轴线就是串行电缆。这种电缆可以有几英里长。个人计算机系统的主机和打印机之间的连接软线是并行电缆。这样的电缆只有几码长。

### 5.3.5 电缆连接

当连接电线、多芯电缆或扁平电缆时，推荐用直接绞接。绝缘是重要的，所有连接处都必须用电绝缘胶布包扎，然后整体再包扎。为增加绝缘性，连接处可选在沿电线的不同点处。

对于双芯电线或扁平电缆，如果

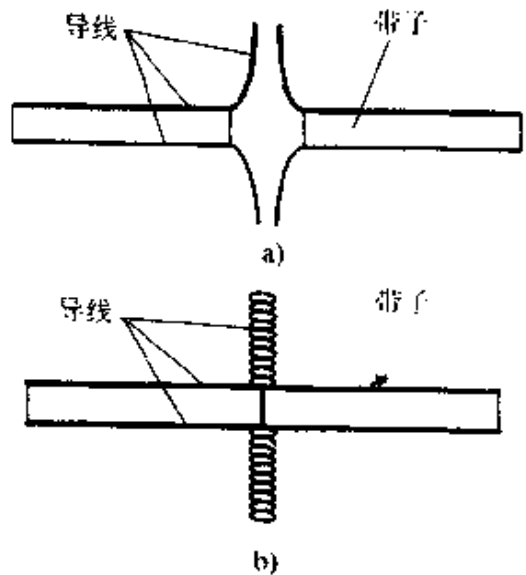


图 5-6 双芯电线或电缆的  
绞接连接

a) 末端放在一起，导线向右方向绞接

b) 绞接后焊牢、剪齐、

折回和绝缘



需要的话可以拧绞连接,如图 5-6。拧绞后再焊接,连接处在剪齐到约  $1/2$ in,折回与电缆轴线平行然后绝缘,整个接合处再仔细用绝缘胶布包扎或涂以密封胶。

当需要保持同轴电缆和其他电缆的特性阻抗  $Z_0$  为常数时,一般要用专用的连接器来连接。连接器的插头焊到连接处两端的每一端,它们之间再用插座连接装置来连接。整个接合点用绝缘胶布缠上或涂以密封胶。

## 5.4 光纤光缆

光纤光缆是一捆透明的、用来传输调制光或红外信号的实心导光线束。这类光缆在很宽的带宽下能传输上百万个信号。

### 5.4.1 制造

光纤由添加了杂质的玻璃制成。杂质改变了玻璃的折射率。光纤有一个芯,外面有管状的包层,如图 5-7 所示。包层的折射率比芯的折射率低。

在阶跃折射率光纤中,如图 5-7a,芯具有均匀的折射率,包层具有较低的、但也是均匀的折射率。在边界处折射率突变。在梯度折射率光纤中,如图 5-7b,芯的折射率在轴心部分最大,从芯向外折射率逐步降低。在边界处折射率有一个陡峭的跌落。

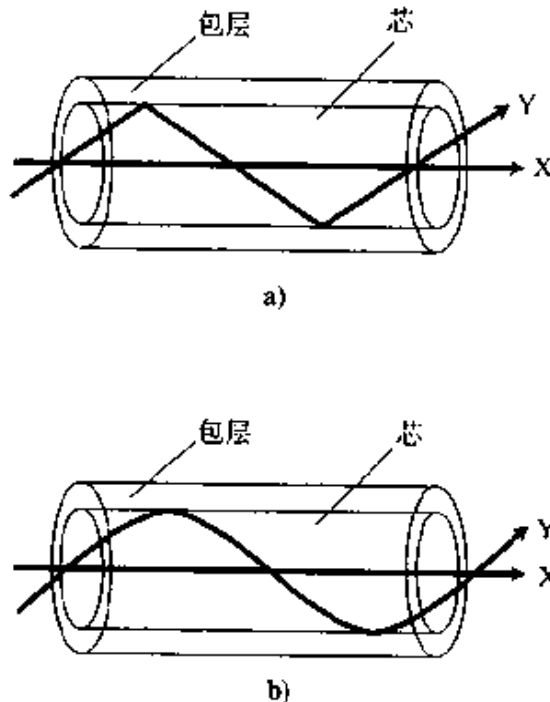


图 5-7 不同折射率的光纤

a) 阶跃折射率光纤 b) 梯度折射率光纤

### 5.4.2 工作

图 5-7a 所示的阶跃折射率光纤中,光束 X 平行于光纤轴进入芯,它一直前进不与边界碰撞除非光纤有弯曲。如果光纤有弯曲,光束 X 就从中心线偏转,像光束 Y 似的。光束 Y 多次重复地碰撞边界。每次光束 Y 碰撞到边界就产生全内反射,所以光束 Y 停驻在芯内。

图 5-7b 所示的梯度折射率光纤中,光束 X 平行于光纤轴进入芯

线，与边界无碰撞地通过，除非光纤有弯曲。如果有弯曲，光束 X 就像光束 Y 那样偏离中心线。随着光束运动得离芯中心远了，折射率降低使光束偏回中心。如果光束以很尖锐的角进入，它与边界产生碰撞，这种情况下发生全内反射，因此光束 Y 停驻在芯内。

### 5.4.3 捆扎

多根光纤可以像金属导线一样捆扎成光缆。单根光纤可用塑料套包起来以防损坏。常用的外包装是聚乙烯和聚胺脂。钢丝或其他高强度材料常用来增加光缆强度。外包装也可以用金属丝或坚固的塑料化合物加固。

*成捆光纤* 中的每根光纤可以传输若干个可见光或红外光的光束，每个光束具有不同的波长。每一光束又可以包含大量的信号。因为可见光和红外光的频率比射频电流的频率高很多，光或红外光缆传输线能达到的带宽比任何射频电缆传输线的带宽要宽得多。它可以更高的速度传输数据。

## 5.5 连接器

*连接器* 是用来保持电线或电缆具有良好电连接的器件。对于特定的应用，选用合适的连接器是很重要的。通常，连接器的选用受习惯的影响。

单导线连接器是简单的。多导线电缆的连接器就比较复杂。对高频电缆必须用特殊的连接器以保持*阻抗连续性*。本节讨论电子学中最通用的若干种电线和电缆连接器。

### 5.5.1 导线夹

*导线夹* 用于短的软线，夹子装在一端或两端作为简单的临时连接器。导线夹不适用于永久设备，特别是在户外，因为在户外夹子很容易发生腐蚀，这时夹子就会滑脱。这种连接器的电流传输能力有限。导线夹主要用于直流或低频交流场合，它们不适用于高频。

在测试和实验时需要临时性连接，这时常常采用*鳄鱼夹*。它不要求线路在测试时有改变。这种连接器的名字来源于夹子有齿状的边缘，类似于鳄鱼的嘴。鳄鱼夹的尺寸可以从小于 1/2in 到几英寸长。它们能夹在裸线的一端或一段。

### 5.5.2 香蕉插头

香蕉插头是一种普通的单导线连接器，它很容易从插座上插入或拔出。香蕉插头有点象香蕉的外形并由此而得名，见图 5-8。

香蕉插座常常被接在低压直流电源的输出端上。如果要经常更换接线，香蕉插座引起的麻烦最小。香蕉插头具有相当低的直流损耗和高的电流传输容量。但是一般它们不用在高电压下，因为裸露的导线可能引起触电。

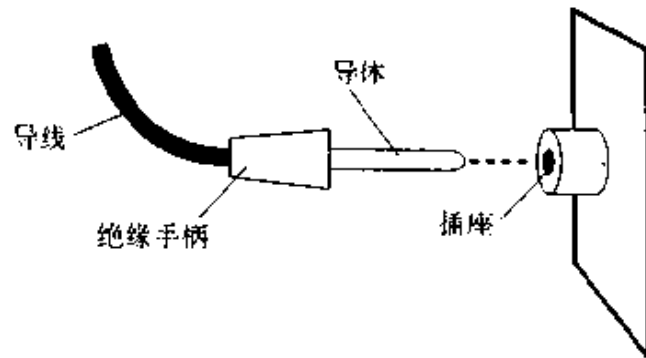


图 5-8 香蕉插头用于低压直流场合

### 5.5.3 鸳鸯插头

鸳鸯插头是一种电插头/插座，与它配合的另一个插头/插座形状与它一样。这种连接器具有相同数量的阴、阳接触点。

鸳鸯插头配有专门的针和孔，因此它们能够以同一方式相互插入。它们用于具有极性的电路如直流电源，而在高频线路中很少采用。

### 5.5.4 BNC 连接器

BNC 连接器由一个小插头和小插孔组成，常用于高频实验室，见图 5-9。插头和插孔设计得对同轴电缆连接能提供不变的阻抗。这能够减小由于阻抗突变造成的损耗。

BNC 连接器具有连接快，脱开快的特点。这类连接器不用于高频大功率或户外固定设备，但当需要频繁地改变连线时用它很方便。

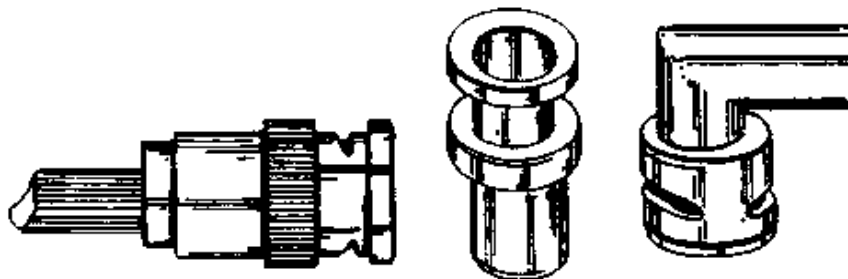


图 5-9 特别用于射频测试仪器的 BNC 连接器

### 5.5.5 特高频连接器

特高频连接器广泛用于同轴电缆，在业余无线电人员中使用的非

常普遍。所说特高频一词是不明确的，因为这类连接器有被设计用于低、中、高无线电频率的电路。特高频连接器中心有一个针、插孔及一个带螺纹的外套管，两者用固体介质隔开。尺寸设计得使它具有特性阻抗  $Z_0$  为  $50\Omega$ 。如果线上的驻波比合适的话，特高频连接器能够输送数千瓦的高频功率。

图 5-10a 表示同轴电缆末端的特高频凸接头，凸接头有时叫 PL-259，这是由阿姆菲诺尔制造的插头的目录号。图 5-10b 表示特高频凹接头，它有时叫 SO-239，这是由阿姆菲诺尔制造的机壳装配插座的目录号。此外，还有其他的特高频连接器，如凸对凸、凹对凹，直角形和 T 形转换器。

当特高频连接器要用在室外时，必须采取措施以防止水从导体进入电缆。可以用电绝缘带在连接处缠绕。特殊的绝缘带和密封剂可以从商店购买。

### 5.5.6 N 型连接器

*N 型连接器* 类似于特高频连接器，它适用于高频同轴电缆。*N 型* 连接器具有低的损耗和常数特性阻抗  $Z_0$ 。这一特点在高频和特高频时是非常重要的，因此 *N 型* 连接器适用于这一频段。

*N 型* 连接器具有凸的或凹的结构，也有凸对凸，凹对凹的转接器结构。转接器也适于将 *N 型* 连接器接到有不同类型连接器的电缆或机壳。

### 5.5.7 电话用插头和插座

*电话用插头和插座* 如图 5-11，是用来接通电话线路的一对连接器，现在它被广泛地用于从直流到音频的电子工程和仪器中。

一般形式中，插头（见图 5-11a）有一个带颈部的棒作为一接触端，

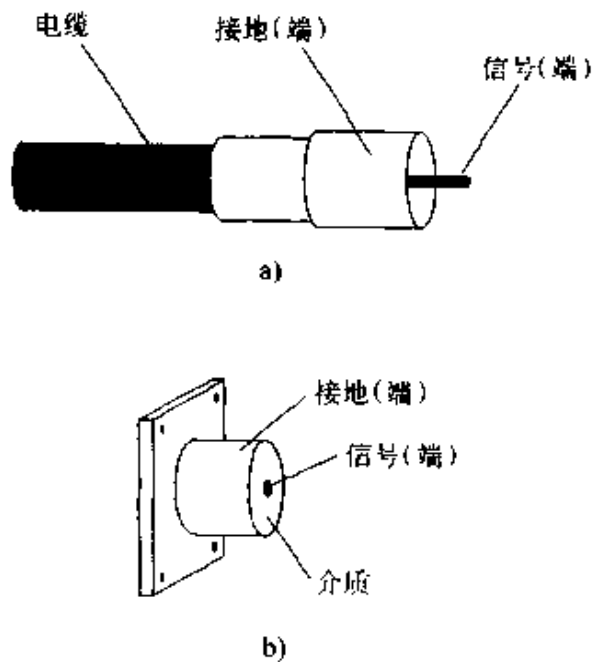


图 5-10 特高频连接器

a) 凸接头 b) 凹接头

在颈的端部有一个球状物作为另一接触端，不过球与棒是绝缘的。典型的尺寸为  $1/8\text{in}$  和  $1/4\text{in}$ 。插座（孔）也装有接触片，当插头插入插孔时，接触片与插头配合得很牢固。

最早的电话用插头和插座装有两个导体。但是近十年来，三导体连接器变得普遍起来了，它们被用在高保真立体环绕声系统、录音机和多媒体计算机音频电路、无线接收机、发射机和收发机中。

### 5.5.8 音频插头和插座

音频插头和插座类似于同轴连接器，不过它们更小些。插头设计得便于连接和分开，它只需要推进和拉出而不需要旋进和旋出。

音频连接器主要用于音频廉价同轴电缆。所以叫音频电缆，是因为它不适用于高频，屏蔽的连续性不足使它难以在高频下应用。

### 5.5.9 D形壳式连接器

用于计算机系统的数据电缆中往往有多根导线。如果电缆中有多于三根或四根导线，则在每一端常用D形壳式连接器。D形壳式连接器有不同尺寸，大小取决于电缆内导线的数目。

这种连接器有特殊的外形，见图5-12，这种形状便于使用者正确地将插头插入。插座上有孔，针状插头可以插入孔中。插头一旦插入就可以将它拧紧或夹紧。

某些D形壳式连接器有金属外壳，它有助于防止灰尘和湿气，同时需要在需要时可以保持屏蔽的连续。

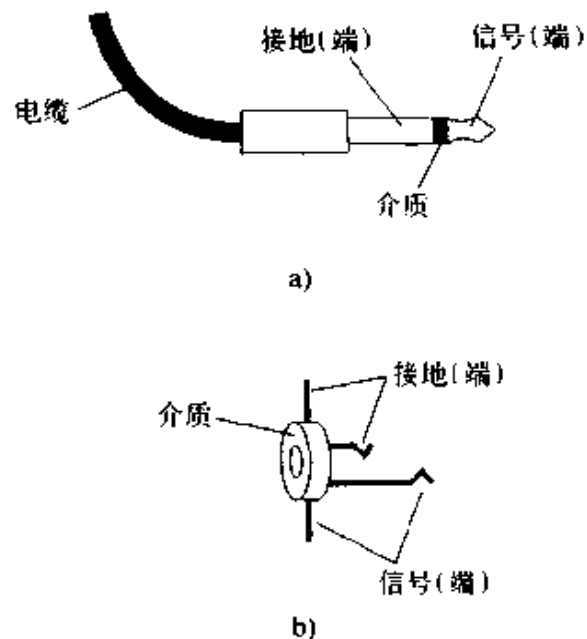


图 5-11 电话用插头和插座

a) 插头 b) 插座

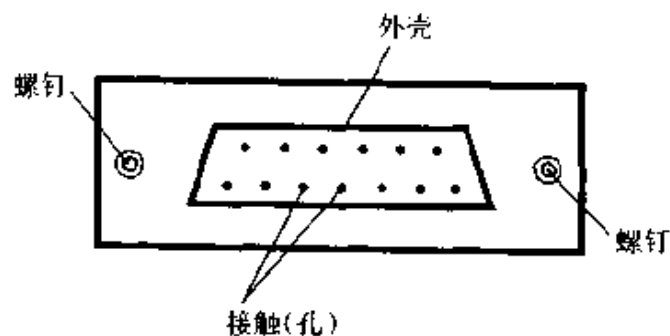


图 5-12 D形壳式连接器

## 第 6 章 电 源

大多数电子设备都要求直流电源。在美国，从电力公司供给的是 60Hz 交流电，电压有效值为 117V 或 234V。交流电一般要转换成直流并调节到适用于电子设备的合适的电压值。

### 6.1 电源的组成

大多数电源由若干部分组成。图 6-1 是典型直流电源的框图。

首先交流电接到**变压器**使电压降低或升高。电压的高低，由电子线路的需要来决定。然后电流通过**整流器**变成脉动的直流电。接着脉动直流经

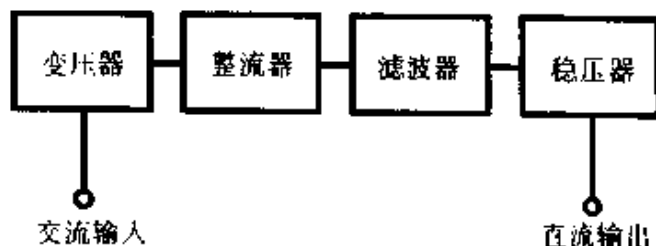


图 6-1 典型直流电源的方框图

过**滤波器**变成连续电压，其对地的极性可正可负。最后，如果电子设备对电压波动很敏感的话，直流电可以经过稳压处理。有些电源还有**限流装置**，以防止电路短路时的破坏。

能够提供几十伏以上的电源必须有安全装置，以防止使用者被电击。所有电源都需要有**熔丝**和/或**电路断路器**以减少设备短路时发生火灾的危险。

### 6.2 电源变压器

**电源变压器**有两种类型：**降压变压器**，它将交流电压变低；**升压变压器**，它将交流电压升高。

#### 6.2.1 降压变压器

大多数固态电子器件，如收音机，只需要几伏电压，用于这些设备的电源就要用**降压变压器**，见图 6-2a。变压器的尺寸大小取决于电流。输入与输出电压之比直接正比于一次和二次绕组圈数之比。即

$$\frac{V_{\text{入}}}{V_{\text{出}}} = \frac{N_1}{N_2}$$

式中  $V_{\text{入}}$  是输入电压的方均根值,  $V_{\text{出}}$  是输出电压的方均根值,  $N_1$  是一次绕组的圈数,  $N_2$  是二次绕组的圈数。

某些器件只需要很低的电流和很低的电压。无线电接收机中的变压器体积就较小。业余无线电发射机和高保真放大器需要较大的电流。这就是说, 变压器的二次绕组必须用较粗的线, 同时铁心较大以容纳所必需的磁通。

### 6.2.2 升压变压器

某些电路要求高电压 (大于 117V, 直流)。电视机中的显像管要求几百伏电压。某些采用真空管的业余无线电功率放大器的工作直流电压为几千伏。在这些应用中就要用升压变压器, 见图 6-2b。

对于升压变压器的电压转换公式与前面所给的降压变压器的公式一样。

如果一个升压变压器只需供应小的电流, 则不需要很大体积。但大多数升压变压器用于真空管设备中, 它消耗相当的功率, 例如电视机和无线电发送放大器。为此, 升压变压器都比降压变压器大。降压变压器是用在像计算机和无线电接收机这样的低压系统中的。

### 6.2.3 变压器的额定功率

变压器常用输出电压和电流来标定。对于给定变压器, 常用伏安容量来表征它的额定功率, 即电压和电流的乘积。一个变压器有 12V 输出, 能支取 10A 电流, 它的容量就是  $12\text{V} \times 10\text{A} = 120\text{VA}$ 。

由于下面将要讨论的电源滤波的性质, 变压器所必需的额定伏安值应当大于负载上实际消耗的瓦数。

一个能够连续提供所需电流和/或电压的可靠的变压器在任何电源中都是十分重要的。在电源发生故障时所需更换的元件中最贵的是

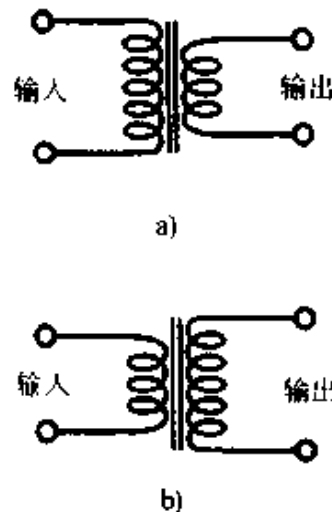


图 6-2 变压器  
a) 降压变压器 b) 升压变压器

变压器。

### 6.3 整流器

**整流器**将交流电转变为脉动的直流电。通常在变压器后面接一个或多个半导体二极管来实现这一转变。

#### 6.3.1 半波整流器

最简单的整流电路是**半波整流器**，见图 6-3a，它是用一个二极管来“去掉”交流输入周期的半波。输出电压的有效值或方均根值接近交流输入电压方均根值的 45%，见图 6-4a。但跨接在二极管上的**峰值反向电压**能够大到交流输入电压方均根值的 2.8 倍。建议选用二极管时，它的峰值反向电压的额定值至少应该是预期峰值反向电压值的 1.5 倍。因此对于半波整流，二极管的额定值至少是交流输入电压方均根值的 4.2 倍。

半波整流有若干缺

点。首先输出很难滤波。其次，当电源接上负载后输出电压会显著降低。第三，半波整流使变压器和二极管上的电压和电流不成比例，严重畸变。

半波整流用于支取电流不太大或对稳定性要求不高的电源中。半波电路的主要优点是它比复杂电路的成本低。

#### 6.3.2 具有中心抽头的全波整流器

将交流电变为直流电的较好途径是利用交流周期的两个半波。**带中心抽头的全波整流器**的变压器的二次侧有一个抽头，如图 6-3b 所示。中心抽头接地，这在绕组两端产生反相波。这两个波经过各自半

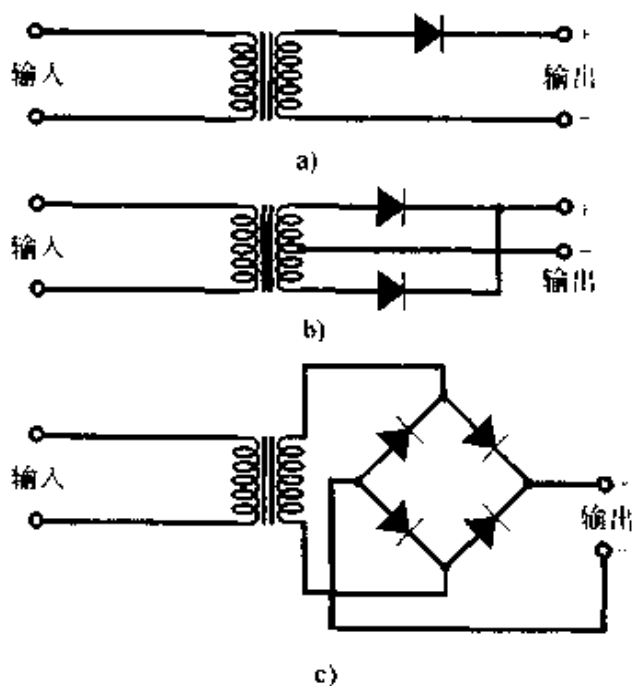


图 6-3 整流器

a) 半波整流器 b) 具有中心抽头的全波整流器 c) 全波桥式整流器



波整流，去掉周期中的各一半。

在这种整流电路中，平均直流输出电压大约是交流输入电压方均根值的 90%，见图 6-4b。跨接在二极管上的峰值反向电压是输入电压方均根值的 2.8 倍。因此，二极管峰值反向电压的额定值至少是交流输入电压方均根值的 4.2 倍。

全波整流器的输出比半波整流器更容易进行滤波。全波整流器变压器和二极管上电压和电流变形比半波整流器要小。若在全波整流电路输出端接上负载，则电压的降落比半波整流电路的要小。

### 6.3.3 全波桥式整流器

全波整流的另一个途径是采用全波桥式整流器，通常简称“桥”。

这种电路如图 6-3c 所示。输出波形类似于带中心抽头的全波整流电路的波形，如图 6-4b。

桥式电路的平均直流输出电压是输入电压方均根值的 90%，与带中心抽头的整流电路一样。跨接在二极管上的峰值反向电压是交流输入电压方均根值的 1.4 倍。因此，每一个二极管的峰值反向电压的额定值至少是交流输入电压方均根值的 2.1 倍。

桥式电路不需要二次侧带中心抽头的变压器。电学上，桥式电路利用了全部二次侧的两个半波；而带中心抽头的电路在半个周期利用二次侧的一端，而在另外半个周期利用二次侧的另一端。因此，桥式

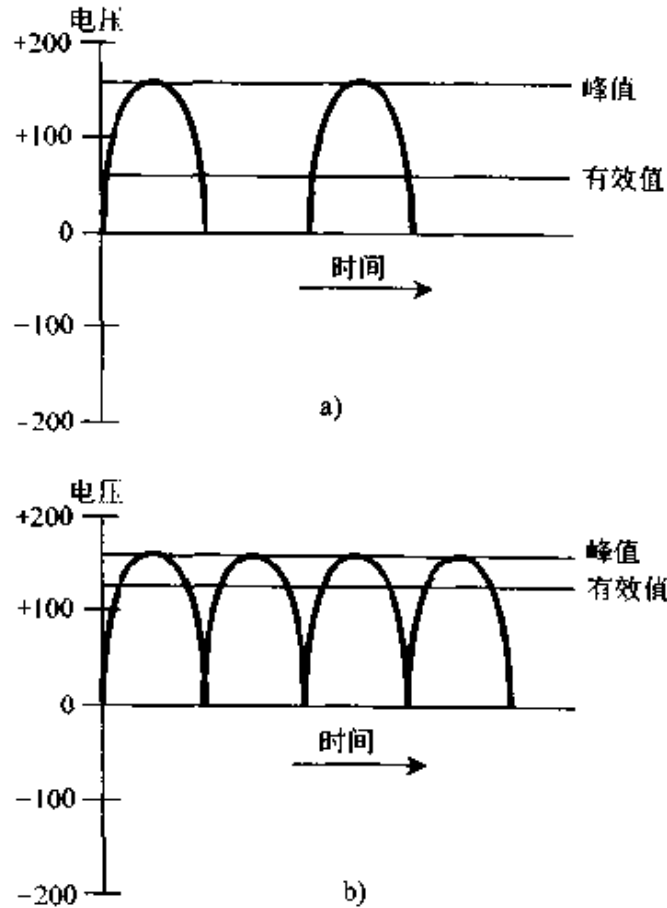


图 6-4 整流器的输出

a) 半波整流器的输出 b) 全波整流器的输出，  
输入电压的有效值为 117V (峰值电压 165V)

电路更有效地利用了变压器。桥式电路比半波整流电路和带中心抽头的全波整流电路变压器和二极管的利用更合理。

桥式电路的主要缺点是需要四个二极管而不是两个。不仅是从成本上考虑，当电源必须提供大电流时这也很重要。电流通过二极管（每半个周期通过两个而不是一个二极管）要放出大量的热能。当电流消耗变成热量时，它就不能够被用到负载上去了。

#### 6.3.4 电压倍增器

用二极管和电容器按某种方式连接起来时，可以做成能够提供两倍峰值交流输入电压的电源。从理论上讲，更大的整数倍增都是可能的，但很少看到使用倍增系数大于2的电源。

实际上，电压倍增器只有当负载支取小电流时才现实，否则稳定性很差。在大电流、高电压的功率应用中，最好的方法是电源采用大的升压变压器，而不用电压倍增器。

一种非稳压电压倍增器电路如图6-5所示。该电路工作在整个交流周期，所以叫做全波电压倍增整流器。在支取小电流时，它的直流输出电压大约是交流输入电压峰值的2倍，或者是交流输入电压方均根值的2.8倍。电路加在二极管上的峰值反向电压是输入交流电压方均根值的2.8倍。因此，

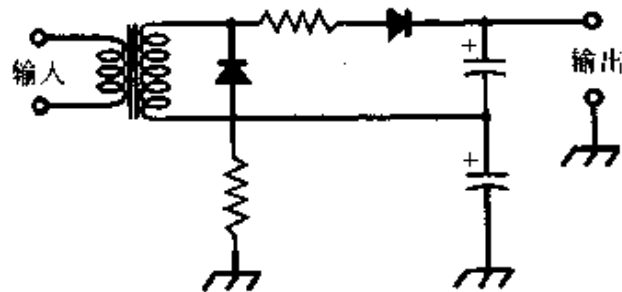


图 6-5 一种非稳压全波电压倍增器电源

二极管的峰值反向电压的额定值至少应当是交流输入电压方均根值的4.2倍。

再说一下电路中的电容器。电路的正常工作取决于在最大负载条件下电容器能够储存电荷的能力。因此，电容器必须有足够大的电容量。电容器有两个作用：提升电压和输出滤波。至于电阻器，它具有低的阻值，当二极管并联时也有对电阻的要求。当电源接通时，电容器流过一个很大的初始浪涌电流。若电路中没有电阻的话，浪涌电流就会损坏二极管。

## 6.4 滤波器

大多数电子设备直接使用从整流器输出的脉动直流电源时不能很好工作。可以用滤波器将整流器输出中的波动减小或消除。

### 6.4.1 电容器滤波

最简单的滤波器是用一个或多个大电容值的电容器，将它并联于整流器的输出端，见图 6-6。滤波器几乎都采用电解电容器。它们是有极性的，必须按正确方向连接。电容器的典型数值为几百或几千微法拉。

支取电流越大，为了有效滤波需要的电容量就越大，因为电流增加时负载电阻减小了。负载电阻越低，滤波电容器放电越快。对于给定负载，与小电容相比，电容量越大，维持电荷流动的时间就越长。

滤波电容器的功能就是试图将直流电压维持在它的峰值，见图 6-7，而用全波整流器输出（图 6-7a）比半波整流器输出（图 6-7b）更容易实现。全波整流器脉动频率是 120Hz，而用半波整流器是 60Hz。全波整流器与半波整流器相比，滤波电容器要

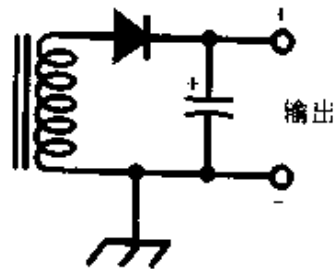


图 6-6 简单的电容滤波器

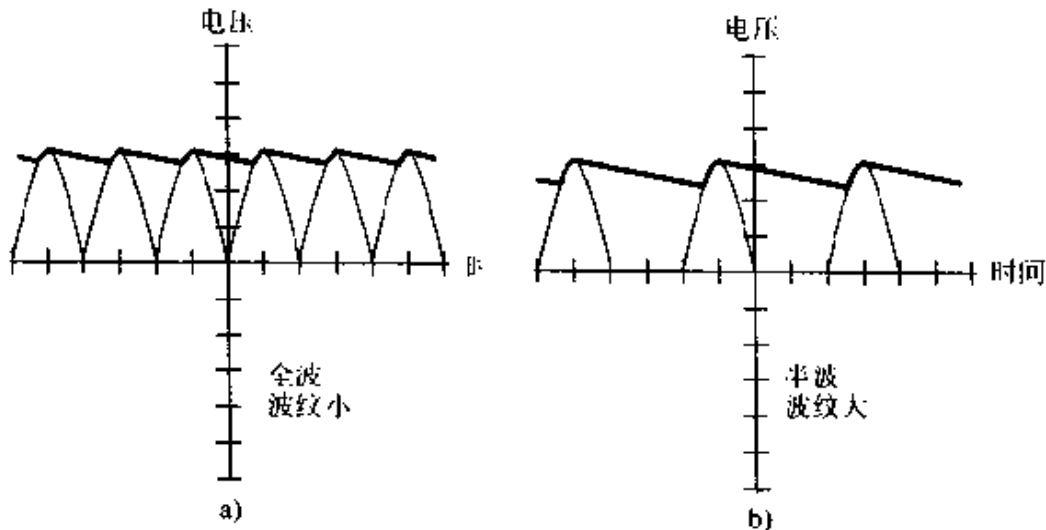


图 6-7 滤波后的脉冲输出

a) 全波整流器的输出 b) 半波整流器的输出

充电两次，所以在给定电容值的情况下，全波整流的脉动不严重。

### 6.4.2 电容器和扼流圈

使得整流器的直流输出变平滑的另一种方法是在输出回路中串联一个大电感和并联一个大电容。所用的电感器叫**滤波扼流圈**，其电感值约几个亨利。

有时候将电容器放在扼流圈的整流器一侧，这种电路叫**电容器输入滤波器**，见图 6-8a。如果滤波扼流圈放在电容器的整流器一侧，这种电路叫**扼流圈输入滤波器**，见图 6-8b。当负载不是很大时可以采用电容器输入滤波。电容器输入电路的输出电压比扼流圈输入的高。如果需要从电源支取大的或可变的电流，最好选择扼流圈滤波器，因为它的输出电压更稳定。

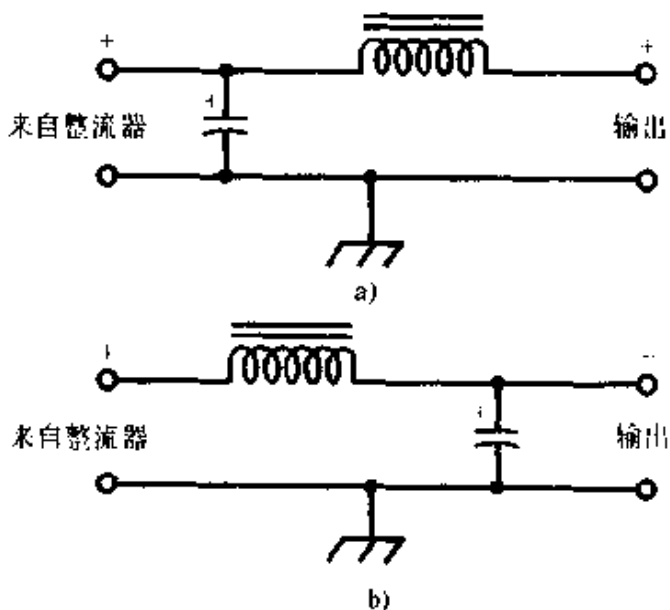


图 6-8 滤波器

a) 电容器输入滤波器 b) 扼流圈输入滤波器

如果直流电源输出的脉动必须非常小，可

以采用两对或三对电容器/扼流圈级联起来，见图 6-9，每一对组成一段。多段滤波器可以由电容器输入或扼流圈输入段组成，但两种类型不要混起来。

在图 6-9 的例子中，电容器和扼流圈对叫做 L 形滤波器，因为它们在原理图中的排列呈 L 形。如果去掉第二个电容器则变为 T 形。

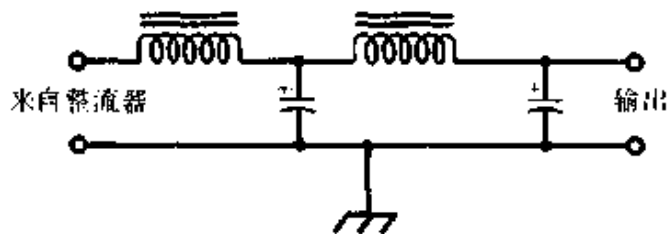


图 6-9 两段级联的扼流圈输入滤波器

如果第二个电容器移到输入端而将第二个扼流圈去掉，滤波器就变成  $\pi$  形。

## 6.5 稳压

如果电源输出端并联一只齐纳二极管，齐纳二极管限制电源的输出电压，只要它有足够高的额定功率。限制电压的大小取决于实际所用的齐纳二极管。已有的齐纳二极管能够满足所有合理的电源电压。图6-10表示用齐纳二极管来稳定电压的全波带中心抽头的直流电源示意图。齐纳二极管必须反向偏置，负极应当接到电源的正端。

当电源用在支取大电流的设备中时，齐纳二极管稳压器不是很有效。当电源要支取大电流时，常用晶体管与齐纳二极管一起来稳压。这种结构的电路见图6-11。

也可以用集成电路做成稳压器。有时一块集成电路与几个外置元件一起放在电源电路滤波器的输出端，在低电压和中等电压范围能提供非常好的稳定性。

在高压电源中，有时用电子管稳压器。这些管子常常是充气的冷阴极器件。在半导体器件会被损坏的条件下，使用它们仍能工作。

## 6.6 设备保护

电源输出会发生突然的变化而损坏设备或元件，或干扰它们的正常工作。两个最常见的问题是浪涌电流和瞬变。

### 6.6.1 浪涌电流

在接通电源的瞬间发生电流的剧增（浪涌），即使输出端没有负载也会发生。这是因为滤波电容器需要初始充电，为此在一个短时间内通过很大的电流。浪涌电流远比工作电流大，可造成整流器的二极管损坏。这一现象在高压电源和倍压电路中非常严重。至少可以有四种

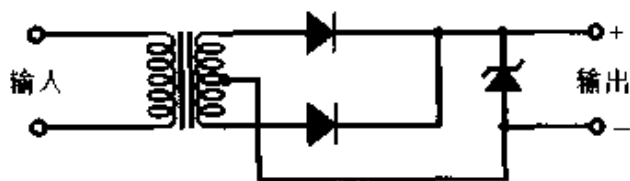


图 6-10 用齐纳二极管稳压的全波带中心抽头的直流电源

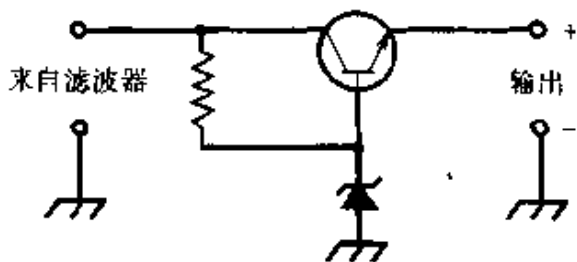


图 6-11 采用齐纳二极管和 NPN 晶体管的稳压电路

方法来防止二极管损坏：

(1) 选用额定电流比工作电流大许多倍的二极管。这样做的缺点是成本高，因为耐高压、大电流的二极管价格昂贵。

(2) 在电路中需要二极管的地方并联上若干个二极管，并需要电流均衡电阻，见图 6-12。电阻器具有小的阻值，二极管必须完全一样。

(3) 采用逐渐提高输入电压的办法。为此可以采用被称作*自耦调压器*的可调变压器。起始输入为零，旋转旋钮以达到满电压。

(4) 在变压器一次侧采用自动转换电路。在 1~2s 内用降低了的交流电压，然后用总的输入电压。

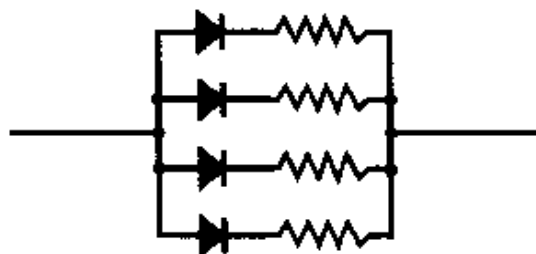


图 6-12 并联有电流均衡电阻的二极管组

### 6.6.2 瞬变过程

通用线路上的交流电是正弦波形，电压的方均根值约 117V 或 234V。但常常有电压尖峰，叫做瞬变过程。它的峰值电压可以达到几千伏。瞬变过程是由线路负载突然变化造成的。闪电也产生瞬变过程。除非它被抑制，否则它会损坏电源中的二极管。瞬变过程也会干扰像电脑这样的敏感设备。

消除瞬变过程的最简单的办法是在变压器一次绕组的每一端与地之间接一个  $0.01\mu\text{F}$  耐压 600V 或更高的电容器，见图 6-13。市场上已有瞬变过程抑制器（通常误称为浪涌保护器）。将它用于所用的敏感电子设备，包括电脑、高保真立体声系统、电视机和磁带录像机等是很好的办法。在发生局域雷电时，保护设备的最好办法是将插头从墙上的插座上拔掉，直

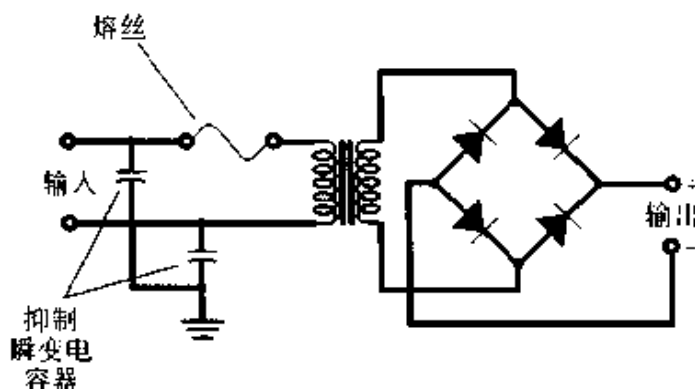


图 6-13 有瞬变过程抑制电容和变压器一次侧有熔丝的桥式电源

至雷电结束。

### 6.6.3 熔丝

*熔丝* 是一根软的金属丝，在电流超过某一数值时能够熔化、断开电路。熔丝与变压器一次侧串联（如图 6-13 所示，图中还加了*瞬变过程抑制电容器*）。任何一个元件损坏、短路或过载都将使熔丝烧断。熔丝很容易更换，虽然熔丝不在手边时很不方便。如果它烧断了，必须换上同样额定值的熔丝。

熔丝有两类：*快速熔断熔丝* 和 *慢熔断熔丝*。快速熔断熔丝是一段直的金属丝或金属带，慢熔断熔丝通常在内部与丝和带一起还有一个弹簧。快速熔断熔丝在慢熔断状态下不用说可以烧断，慢熔断熔丝在快速熔断环境下不能提供足够安全的保护。

### 6.6.4 电路断路器

*电路断路器* 具有像熔丝一样的功能，除此之外，在断开电源后，过一会儿再按开关，可以将断路器重新接通。某些电路断路器在设备关断一段时间后能够自动接通。

如果熔丝或电路断路器连续烧断或断开，或者在更换熔丝或断路器重新接入后马上烧断或断开，那么电源或者电源与设备的连接可能有问题。电源中烧坏的二极管、有毛病的变压器和短路的滤波电容均能造成上述现象。连接到电源的设备中有短路，或者器件连接的方向（极性）不对会重复造成熔丝烧断或断路器断开。

绝对不能用更换更大容量的熔丝或断路器来处理重复烧断熔丝和断路器断开的问题。必须找到问题的原因和修理故障设备。认为“毛病总是出在熔丝盒内”的想法是不对的，这会造成设备的严重损坏和引起火灾。

## 6.7 电化学电源

*电池* 是一种电化学直流电源。把两个或多个电池串接起来就构成了*电池组*。电池和蓄电池广泛用于便携式电子设备以及通信卫星中，也可作为事故应急电源。

### 6.7.1 电化学能

图 6-14 给出一种*铅酸电池* 的实例。铅电极和二氧化铅电极浸入硫

酸溶液中,在它们之间就会有一个电位差。此电压可以产生通过负载的电流。最大的可用电流取决于电池的体积和质量,而电压与此无关。

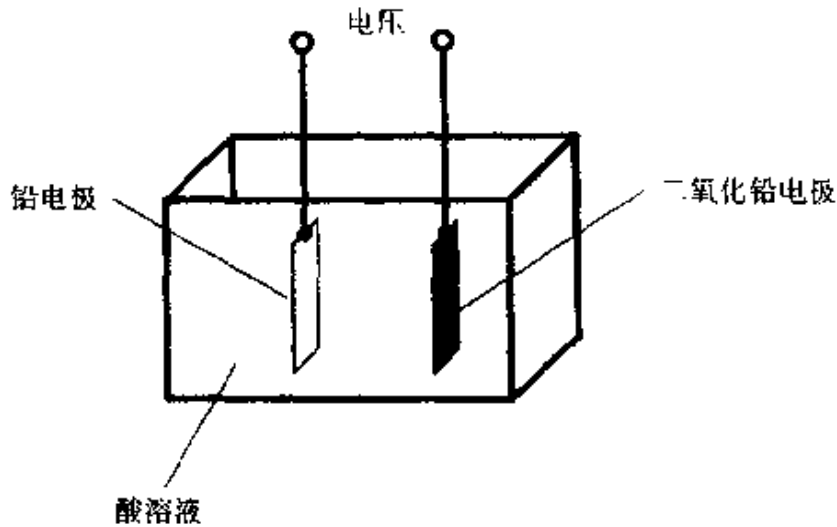


图 6-14 铅酸电池

电池接上负载后,经过一段时间,电流将逐渐降低,电极上会覆盖上一层东西。酸的本质也将改变,酸中的电势能转换为电能,最终变为热、可见光、无线电波、声音、机械运动等。

### 6.7.2 一次电池和二次电池

有些电池,一旦它们的化学能已经转变为电能且消耗得差不多了,就只能扔掉。这叫*一次电池*,也叫原电池。另一类电池,像上面讨论过的铅酸电池,能够靠再充电而重新得到化学能。这类电池叫做*二次电池*。

一次电池包含有干的电介质糊以及金属电极。所以它们的名字又叫*干电池*、*锌-碳精电池*和*碱性电池*,可以在超市和商店里买到它们。某些二次电池也能在商店中买到。*镍镉电池*就是最普通的一类。二次电池的价格比一次电池高,充电器也要几美元。但是可充电电池的使用时间要比干电池长好几百倍,这足以抵偿电池本身和充电器的价格。

*汽车电池*是用二次电池串联而成的。这些电池用发电机或外部充电器充电。这种电池类似于图 6-14 所示的电池。这种电池的终端短路是非常危险的,这时酸可能沸腾而出。实际上任何干电池或蓄电池的短路都是不允许的,因为这会使电池损坏或造成火灾。



### 6.7.3 标准电池

大多数电池产生 1.0~1.8V 之间的直流电压。某些类型的电池产生预定的精确电压。这种电池叫做**标准电池**，**惠斯顿电池**就是一例。室温下它产生 1.018V 电压。该电池用的是硫酸镉溶液。正电极是硫酸汞，负电极是汞和镉，见图 6-15。

当惠斯顿电池一经制造好并在室温下使用时，它的电压就始终保持不变，为此它可以用作直流电压标准。

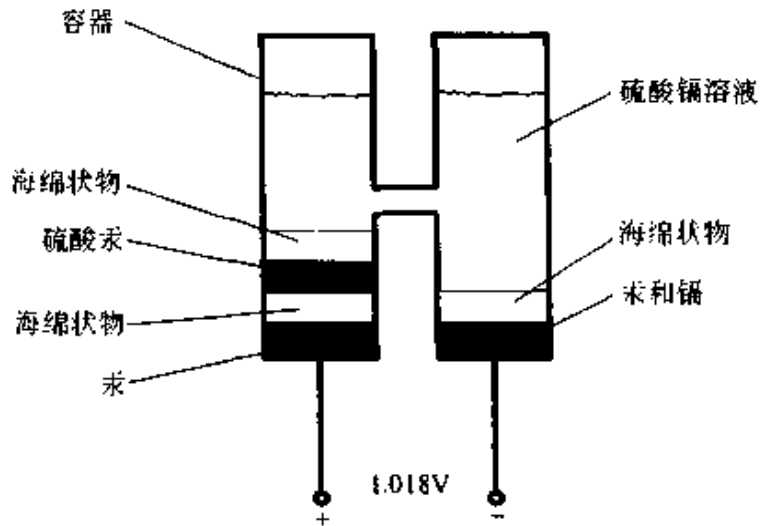


图 6-15 惠斯顿标准电池

### 6.7.4 存储容量

电能的常用单位是**瓦特小时** ( $W \cdot h$ )

或**千瓦小时** ( $kW \cdot h$ )。任何一个电池或蓄电池都有一定的电能总量，它用瓦特小时或千瓦小时来表示。通常给出支取电流随时间的数学积分，单位为**安培小时** ( $A \cdot h$ )。瓦特小时的能量容量就是安培小时的容量乘以电池电压。

额定值为  $20A \cdot h$  的蓄电池能提供 20A 电流 1h，或 1A 电流 20h，或 100mA 电流 200h。有两个极限条件，一是储存寿命，另一是最大可支取电流。**储存寿命** 就是电池在不连接负载情况下能够保持可用的时间长短，它可以是几个月或几年；**最大可支取电流** 就是电池接上负载后，不因为电池自身内阻而产生显著压降时通过负载的最大电流。

小电池的**存储容量** 只有几个毫安小时或  $100 \sim 200mA \cdot h$ 。中等规模的电池可以供应  $500 \sim 1000mA \cdot h$  ( $1A \cdot h$ )。大的汽车用铅酸蓄电池能提供高达  $100A \cdot h$  的容量。

### 6.7.5 放电曲线

当使用一个**理想电池**或蓄电池时，一段时间内可以支取不变的电流，以后电流就开始下降。某些类型的电池和蓄电池接近这一理想特性，表现为**平坦放电曲线**，见图 6-16a。其他有些电池在使用一开始电

流就是逐渐降落的，这种电池具有下降放电曲线，见图 6-16b。

当电池能够提供的电流降到约为初始值的一半时，就说这个电池或蓄电池变“弱”了或变“低”了。这时，电池就必须更换或重新充电。

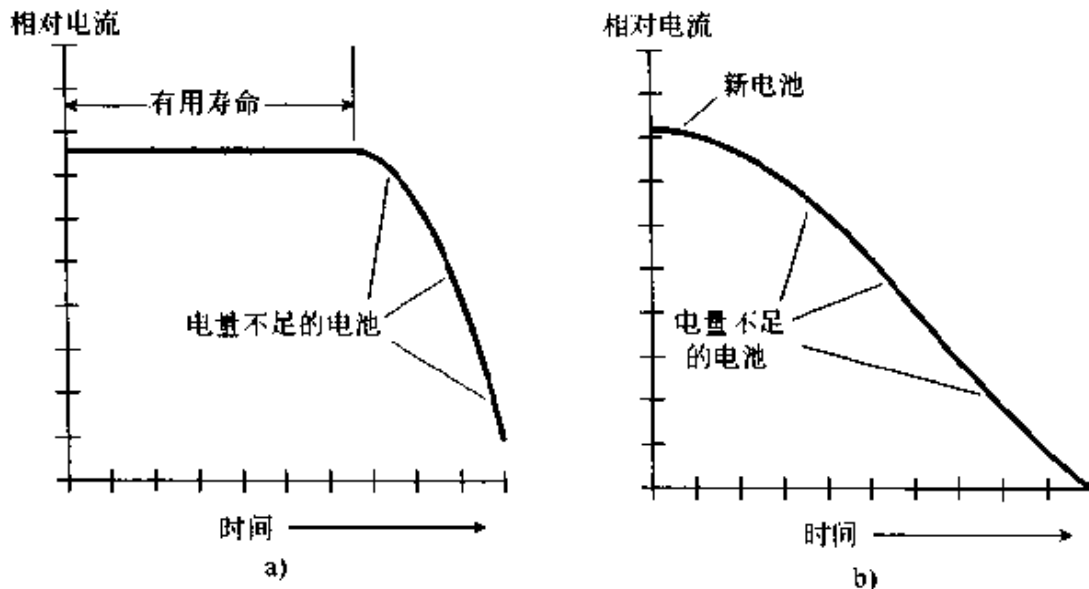


图 6-16 电池放电曲线

a) 平坦放电曲线 b) 下降放电曲线

### 6.7.6 通用电池和蓄电池

商店出售的用于像闪光灯和晶体管收音机等一般用途的电池，通常是锌-碳精或碱性电池类型的。它们的电压是 1.5V，按尺寸可分为 AAA（很小的）、AA（小的）、C（中等的）和 D（大的）。用这些电池做成的电池组通常的额定值为 6V 或 9V。

**锌-碳精电池** 有相当长的储存寿命。锌构成的外壳是负电极，碳精棒作为正电极。电介质是二氧化锰和碳的糊状物。锌-碳精电池不贵，用于适中的温度和支取中等大小电流的负载，但在特别冷的环境下它不能正常工作。

**碱性电池** 用锌颗粒作负电极，氢氧化钾作电介质，极化材料作正电极。碱性电池与锌-碳精电池相比可以在更低的温度下工作。在大多数电子设备中能工作更长时间，所以它很适于用在晶体管收音机、计算器和便携式收音机中。它的储存寿命也比锌-碳精电池长得多。

**晶体管用积层电池** 是小体积、9V、盒状的电池，顶上带有按扣形

接头。它由 6 个薄锌-碳精或碱性电池串联而成。每个电池电压为 1.5V。这种电池组用于小电流电子设备中，如袖珍收音机、无线车库、开门器、电视机和立体声音响的遥控器和电子计算器。

**手灯电池**组是较笨重的、能支取相当大电流的电池。一种电池在顶上有弹簧接触点。另一种有蝶形螺丝的接线端。手灯电池通常的额定电压为 6V，由 4 个锌-碳精或碱性电池组成，它除了能维持白炽灯点亮一段时间外，还能提供足够的能量使低功率通信设备工作。

**氧化银电池**通常做成纽扣状，能够装入手表的内部。它有不同的尺寸和厚度，但都具有相同的外貌。该电池电压为 1.5V，按重量衡量它有特别好的能量储存，具有平的放电曲线。氧化银电池可以叠加起来做成电池组，其尺寸类似于 AAA 圆柱形电池。

**汞电池**，也叫**氧化汞电池**，具有类似于氧化银电池的优点。它们被做成与一般电池相同的形式。主要的区别是每个电池的电压较低，只有 1.35V。近几年，汞电池应用的广泛性在降低，因为汞是有毒的且容易造成污染。

**锂电池**提供 1.5~3.5V 电压，电压的高低取决于所用的化学原料。这类电池与氧化银电池一样也能制成叠层电池组。锂电池和蓄电池具有特别优越的储存寿命。在极低电流下应用，它能持续用几年。单位体积内，它的能量容量特别高。

**铅酸电池**和蓄电池有硫酸溶液或糊状物以及铅电极（负）和二氧化铅电极（正）。用糊状物的铅酸蓄电池可用于需要中等电流的商用设备，如计算机和便携式视频录放机。它们还可以用作不间断电源。

#### 6.7.7 镍基电池和蓄电池

**镍基电池**有若干种类型。**圆柱形电池**看起来像干电池。**纽扣电池**用于照相机、手表、存储器的后备电池和要求体积小的地方。**叠层电池**可提供较大的电流，其储能容量可以大到 1000A·h。**空间飞船用电池**有一个特殊的封装，使它能承受地球外的温度和压力。

**镍基蓄电池**能够将若干个电池包装起来，它可以直接插进设备形成机壳的一部分。手持无线收发机用的电池就是一例。

镍基电池和蓄电池组使用到电流下降到零以后就应该与负载脱离。否则会造成电池的极化，或者蓄电池中一个或多个电池反向。一

旦发生这种情况，电池或蓄电池就不能再用了。当电池用完以后，必须立即尽早充电。

镍-金属-氢电池和蓄电池在很多应用中可直接代替镍基电池。

## 6.8 专用电源系统

许多种电子设备使用包括电源逆变器，不间断电源和太阳能-电能系统在内的专用电源。

### 6.8.1 电源逆变器

电源逆变器有时又叫变流电源，是一个将直流电源变为高压交流电的电路。典型的输入为 12V 直流，输出通常是交流方均根值 117V。

图 6-17 是表示电源逆变器的简单框图。变流器由低频振荡器组成，它使大电流开关晶体管接通和关闭，这样间断蓄电池电流，并产生脉动的直流电。变压器将脉动的直流电变为交流电，并提升电压。

价格低的电源逆变器的输出不是正弦波而是锯齿波或矩形波。频率也可以比标准 60Hz 更高或更低。更复杂的逆变器形成很好的正弦波输出，频率也接近 60Hz。虽然这类逆变器价格较高，但是如果将它用于像计算机那样灵敏的设备则是很好的投资。

如果在图 6-17 中所示的变压器后面再接一个整流器或滤波器，这个设备就变为一个直流变压器，也叫做直流-直流变换器。这样的电路能将蓄电池电源的 12V 变到直流数百伏。

### 6.8.2 不间断电源

当一台电子设备接在市电电源上工作时，由于电源断电或电压降低，有可能使系统出问题。如果计算机的电源断电，则存储器的全部数据就会丢失。为防止这种事故就必须采用不间断电源。

图 6-18 是不间断电源的示意图。在正常条件下，设备从变压器和

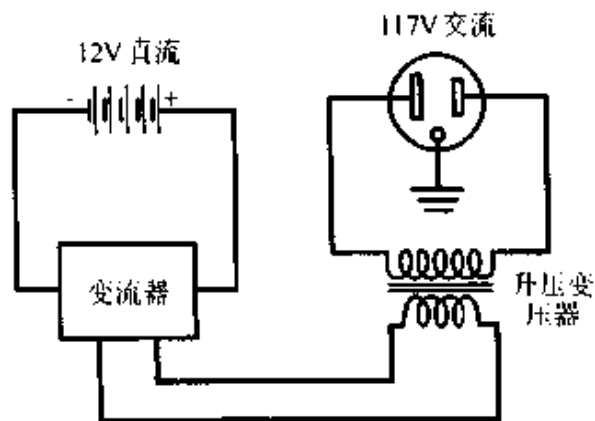


图 6-17 由直流低压变到交流高压的电源逆变器

稳压器得到电能。稳压器抑制了市电电流的瞬态变化、浪涌和电压降落，同时通过整流器和滤波器以小电流保持铅酸蓄电池充电。如果发生断电，断电信号使开关将设备与稳压器断开而接到电源逆变器上，逆变器将蓄电池的直流输出转换成交流。当市电恢复供电时，开关使设备与蓄电池断开而重新接到稳压器上。

如果计算机电源断电了而你有不间断电源，你可将全部数据直接保留在硬盘上，也可保存在像软盘这样的外部存储器上。然后关掉整个系统，包括不间断电源，直到市电恢复供电。

### 6.8.3 太阳能-电能系统

#### 用太阳能电池

可以直接从太阳光得到电能。大多数太阳能电池暴露在强阳光下，每平方英寸面积产生约0.1W的电能。太阳能电池产生直流电，而大多数家庭需要60Hz, 117V交流电。因此为普通家庭和办公用的大多数太阳能-电能系统都要使用电源逆变器。

某些情况下可以不需要电源逆变器。例如你计划用一个电池组让笔记本电脑工作，就可以用太阳能电池板保持电池充电，这就不需要电源逆变器。但必须仔细设计充电电路，以免在电池充电过程中损坏电池。

有两类太阳电能系统适于作为家庭和小的办公电源：独立应用系统和交互式系统。

独立应用系统用铅酸类的可充电蓄电池来储存电能，这些电能来自强光照时的光伏电池。在晚上或阴暗的白天，蓄电池就释放能量。这

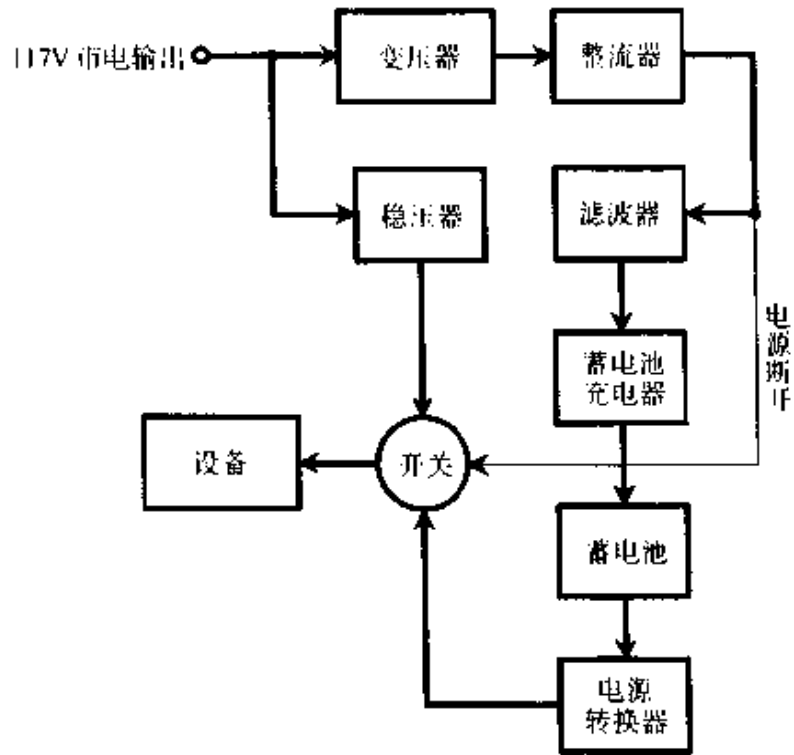


图 6-18 不间断电源示意图

一系统独立于市电电源网或高压输电网。

交互式系统是与电网相连接的。这类系统一般不用储能蓄电池。白天或当用电量少时可将过剩的电能卖给电力公司。夜晚、阴暗的白天或用电量多时再从电力公司买进电能。

## 6.9 人身安全

电源是有危险的，特别是对高压线路而言。超过 12V 被认为是存在潜在危险。对于使用危险电压的设备，大多数制造商都会给出安全说明书和注意事项。不要麻痹大意，因为危险性并不都在说明书中指出。如果你对电源的安全工作有任何怀疑之处，还是把它留给专业人员处理。

## 第7章 二极管

大多数二极管都用半导体材料制造。半导体主要有两类：*N*型半导体，其中带电载流子主要是电子；*P*型半导体，其中带电载流子主要是空穴（电子数不足额的原子）。

### 7.1 PN 结

当 *N* 型和 *P* 型半导体材料晶片直接物理接触时，就形成具有一定特性的 *PN* 结。图 7-1 表示半导体二极管的符号。图中 *N* 型材料用一根短的直线表示，它是阴极。*P* 型材料用箭头表示，它是阳极。

在二极管内，正常情况下电子反着箭头方向流动，而不是沿箭头方向流动。如果将一个电池和一个电阻与二极管串接，且电池的负端接阴极、正端接阳极，则将有电流流通，见图 7-2a。如果将电池反接，实际上就没有电流流通，见图 7-2b。

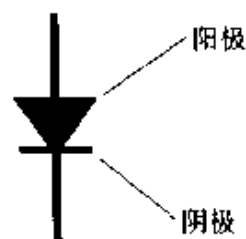


图 7-1 二极管的阳极和阴极

#### 7.1.1 正向导通

二极管导通时的最小电压叫**正向导通电压**。它在 0.3~1V 之间变化，与材料的类型有关。如果加在结上的电压比正向导通值小，二极管就不导通、这一效应可以用于限幅器、削波器和阈值检波器。

#### 7.1.2 偏置

当 *N* 型材料相对于 *P* 型材料为负时，电子很容易从 *N* 流向 *P*。这叫**正向偏置**，二极管很容易导通。

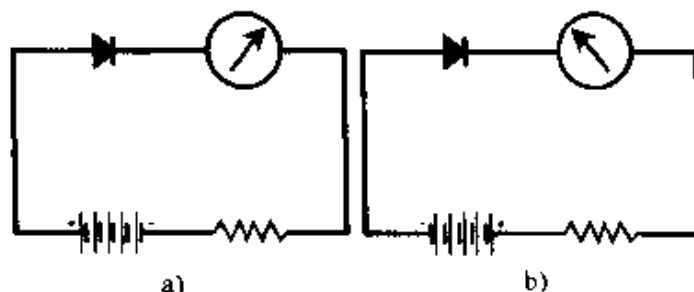


图 7-2 二极管的偏置

- a) 二极管正向偏置，电流流过
- b) 二极管反向偏置，电流接近于零

当极性转换时, N 型材料相对于 P 型为正, 这就是**反向偏置**, 二极管不导电。N 型材料中的电子被正电荷吸引离开结。P 型材料中的空穴被负电荷吸引离开结。电子(N 型材料中)和空穴(P 型材料中)在结区附近开始耗尽。它妨碍导电, 使得**耗尽区**的性质有如电介质或绝缘体。

### 7.1.3 结电容

在反向偏置条件下, PN 结的作用像一个电容器, **变容二极管**就是利用这一性质做成的。变化反向偏置电压可以改变**结电容**, 因为电压能影响耗尽区的宽度。反向偏置电压越大, 耗尽区变得越宽, 电容就变得越小。

### 7.1.4 雪崩

如果二极管反向偏置且电压足够高, PN 结将导电。这就叫**雪崩效应**。在较低电压时, 反向电流接近零, 然后急剧上升。对于不同类型的二极管, **雪崩电压**是不同的。图 7-3 是对于典型的半导体二极管的电流-电压特性曲线图, 上面标出了**雪崩点**。雪崩电压要比相反极性时的正向导通电压高很多。

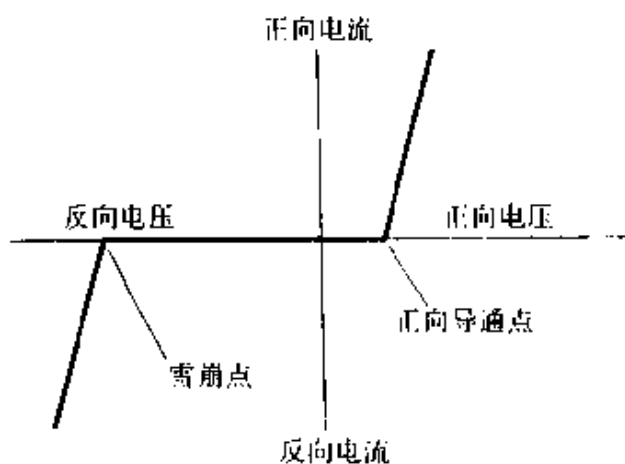


图 7-3 半导体二极管的特性曲线

雪崩效应在整流器中是不希望的, 因为它使电源性能变坏。只要选择二极管的雪崩电压比电源电路产生的

峰值反向电压高就可以防止这一现象。对于电压特别高的电源, 二极管必须串联组合应用以防止雪崩效应。

利用雪崩效应可做成**齐纳二极管**。齐纳二极管是特别制造、具有准确的雪崩电压的二极管。在许多电源中这种器件是稳压的基础。

## 7.2 电源应用

在电源中, 二极管用作整流、稳压、开关和某种控制功能。

### 7.2.1 整流

在正常工作条件下, **整流二极管**只能一个方向通过电流。这就使



它能将交流电变为直流电。

一般说来，当阴极相对于阳极为负时，电流流通；当阴极相对于阳极为正时，电流不流通。制约这一行为的是正向导通电压和雪崩电压。在周期的一半，二极管导通，而在周期的另一半，二极管就不导通。每一个周期都被切掉一半。按二极管在电路中连接方式的不同，交流周期的正半周或负半周会被去掉。

常见的整流电路在第 6 章中已经讨论。

### 7.2.2 稳压

许多二极管的雪崩电压比所加的反向偏压要高很多。雪崩电压的数值取决于二极管是如何制造的。齐纳二极管就做成具有确定不变的雪崩电压。

假设某种齐纳二极管的雪崩电压，也叫齐纳电压，为 50V。如果 PN 结上加反向偏置，则在电压低于 50V 时二极管开路。当电压达到 50V 时，二极管开始导通。反向偏置电压增加，就有更多的电流流过 PN 结。它有效地阻止反向电压超过 50V。

除了用齐纳二极管以外，还可以有其他方法进行稳压，但是采用齐纳二极管是最简单和最便宜的方案。齐纳二极管适应很宽的电压变化范围和功率范围。设备用的电源通常都采用齐纳二极管稳压器。可参考第 6 章对电源的讨论。

### 7.2.3 瞬态保护

可变电阻硅二极管是由两个二极管反向连接而构成的半导体器件。可变电阻硅二极管是用来保护设备不受电源电压瞬变的影响。

可变电阻硅二极管接在电子设备的交流电源一端和接地端之间，如图 7-4。在电压达到某一数值以前器件不导通。如果跨在可变电阻硅二极管上的电压超过临界值，即使是很短一瞬间，器件也会导通。实际上这就能钳制瞬态，大大降低峰值电

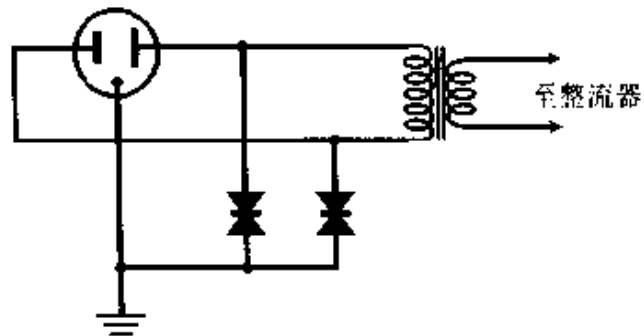


图 7-4 可变电阻硅  
二极管可用于瞬态抑制保护

压，并消除它们对设备的有害影响。导通电压与极性无关。

可变电阻硅二极管能有效防止大多数，但不是全部的瞬态变化。由附近闪电产生的电磁脉冲会使可变电阻硅二极管损坏，并使使用这种二极管的设备也损坏。遇到雷电时，保护设备的最好方法是将电源插头从墙上的插孔中拔出来。

### 7.3 信号应用

二极管还用于不同类型的音频和高频电路。下面概述某些常见的应用。

#### 7.3.1 包络检波

甚至比真空管还要早的早期二极管是用半导体制做的，被称作触须式二极管，它是由一根很细的金属丝与一小块天然方铅矿石接触而成。它对高频小电流起整流器的作用。当触须二极管如图 7-5 那样接入电路时，就组成了一个矿石无线电接收机，它能够检出调幅无线电信号。采用一个高频二极管，这种电路直到今天仍可使用。

二极管可用来从高频信号中恢复声音。这就是简单的包络检波。如果要使检波器很有效，则必须采用正确型号的二极管。它要具有低的电容，这样才能作为高频整流器工作，它只能在一个方向通过电流，而另一个方向则不通。某些现代高频二极管实际上是早期触须式二极管的微型化，封装在一个玻璃外壳内，具有同轴引线。这就是人们熟知的点接触二极管，它被设计得尽量减小结电容。

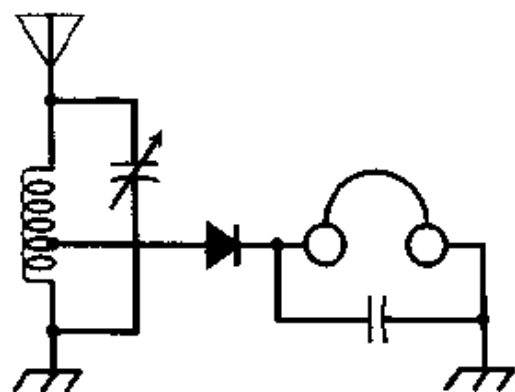


图 7-5 二极管在矿石无线电接收机中作为包络检波器

#### 7.3.2 电子开关

二极管具有正向偏置导通、反向偏置关断的能力，因此可以将它们用作电子开关。二极管能够以极高的速率开关，比任何机械器件要快很多。

有一种用作高频开关的二极管，在 P 型材料和 N 型材料之间有一

个特殊的半导体夹层。这一夹层叫做**本征半导体**，它能减小二极管的电容。这种二极管与原始的二极管不一样，它能在更高频率下工作。这种本征材料叫做**I型半导体**。具有I型半导体的二极管叫**PIN二极管**，见图7-6。

给一个或多个PIN二极管加直流偏置，就能使高频电流有效地通过，而不需要采用复杂的中继和电缆。一个PIN二极管还能作为良好的高频检波器，特别当频率高于30MHz时。

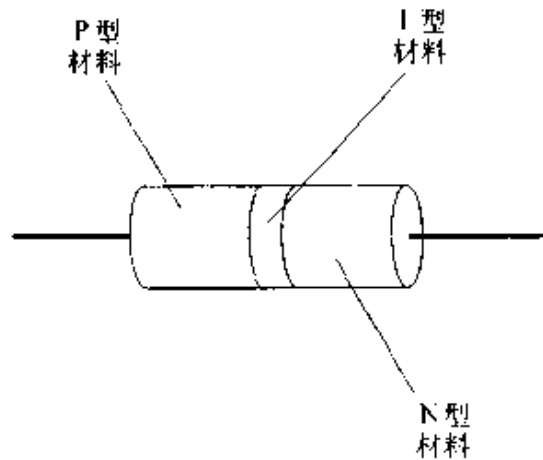


图7-6 在P型和N型半导体之间有一薄本征层材料的PIN二极管

### 7.3.3 频率倍增

当电流通过二极管时，周期中的一半要被截去。输出波形与输入波形有很大不同。这就产生了**非线性**，使得在输出波形中含有丰富的**谐波**，这对于**频率倍增**十分理想。

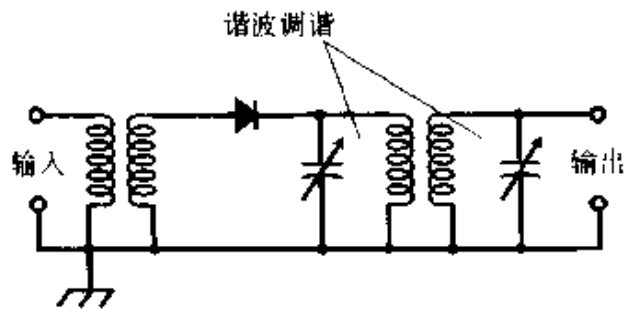


图7-7 简单的二极管倍频器电路

一个简单的倍频器电路如

图7-7所示。输出RC回路调谐到所需要的 **$n$ 次谐波频率 $nf_0$** ，而不是输入频率或基频 $f_0$ 。

作为倍频器工作的二极管，它必须也能在相同频率下作为检波器而很好工作。这就是说，这个元件的特性必须像整流器而不是电容器。点接触二极管和PIN二极管也能很好用于这一目的。电源用的整流二极管一般不适宜用作高频倍频器，因为它们的结电容太大。

### 7.3.4 阶跃恢复二极管

**阶跃恢复二极管**又叫**电荷储存二极管**或**急变二极管**，它是一种特殊半导体器件，主要用作**谐波振荡器**。当信号通过阶跃恢复二极管时，在它的输出端会产生许多谐波。将这种器件接入无线电发射机的输出回路时，用它与谐振器一起能得到频率高达几千兆赫的信号。阶跃恢

复二极管还能用来使数字脉冲的上升和衰减的顶部变成平顶。

阶跃恢复二极管的制造与PIN二极管类似。电荷存储在P型和N型材料之间极薄的本征半导体材料内。带电载流子积聚在很靠近结区。

当阶跃恢复二极管正向偏置时，电流流动像在任何一个正向偏置PN结内一样。但是，当反向偏置时，导电并不立即停止。阶跃恢复二极管在正向偏置时存储了大量带电载流子，要在很短时间内把这些带电载流子泄放掉。直到带电载流子从PN结去除为止，电流一直在反方向流动并很快消失。从电流最大值到零的过渡时间小于0.1ns。电流的快速变化引发了谐波输出。

### 7.3.5 热载流子二极管

热载流子二极管用在各种不同的电路中，特别是用作甚高频和特高频的混频器和检波器。热载流子二极管比许多其他半导体二极管工作的频率更高。

热载流子二极管产生较小的噪声和具有高的击穿电压或雪崩电压。它的反向电流非常小，内部电容很小，因为二极管是由微小的点接触构成的，如图7-8。丝是镀金的，以减小腐蚀，一般采用N型硅晶片。

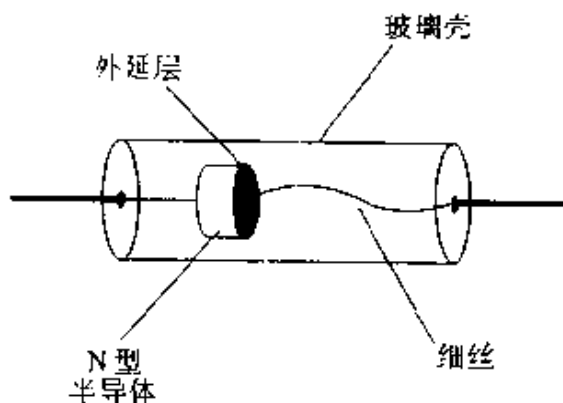


图 7-8 热载流子二极管的结构

### 7.3.6 单平衡混频器

单平衡混频器是一个混频电路，用很低的成本很容易制造。它的输入和输出端并不完全隔离，某些输入信号可以漏到输出端。如果需要隔离，就选用双平衡混频器。

典型的单平衡混频器电路如图7-9所示。其中的二

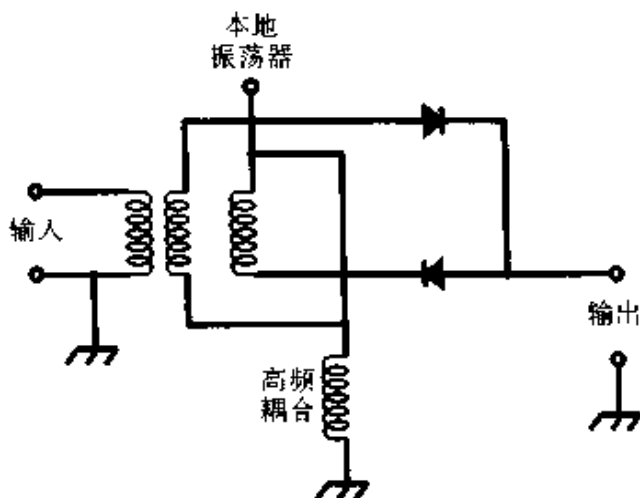


图 7-9 单平衡混频器

极管通常就是热载流子型的。这一电路的工作频率可高达几千兆赫。图中所示电路是一个无源电路，因此将有若干损耗。但是，可以用混频器后的放大器来补偿这个损耗。

### 7.3.7 双平衡混频器

双平衡混频器中输入端能量不泄漏到输出端，见图 7-10。所有输出端和输入端是完全隔离的，所以输入振荡器之间的耦合可以忽略，输入端与输出端之间的耦合也可以忽略。

如同单平衡混频器一样，热载流子二极管也用在双平衡混频器电路中。它们能支持大的信号幅度而没有失真，它们产生的噪声非常小。这个电路是无源的而不是有源的，因此它有将近 6dB 的转换损耗。

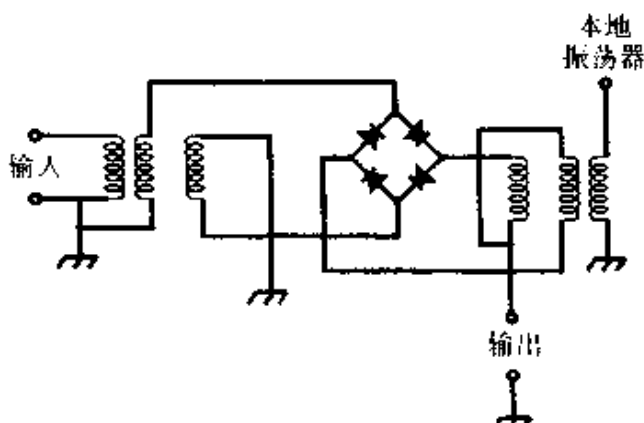


图 7-10 双平衡混频器

### 7.3.8 幅度限制

锗二极管的正向导通电压约 0.3V，硅二极管的导通电压则为 0.6V 左右。在正向偏置电压比正向导通电压小之前，二极管是不导电的。必然地，当正向偏置电压超过导通电压时，二极管就一直导通，跨在二极管两端的电压将恒定：对于锗二极管为 0.3V，对于硅二极管则为 0.6V。

当有必要限止信号幅度时可以利用这一特性，如图 7-11 所示。在信号传输的途径上将两个一样的二极管反向并联相接，见图 7-11a，这时最大峰值幅度受到限制或被削平了，它被限制在二极管导通电压的大小。被限幅的信号的输出和输入波形示于图 7-11b。这个电路有时用于音频通信接收机中，以防止输入很强的信号时产生“震声”（失真）。

二极管限幅器的主要缺点是发生限幅时会产生失真。如果用模拟的两个单音实现数字信号（例如无线电电传打字机）或用很少能达到限制电压值的模拟语音或视频信号，就不会有失真的问题。但是对于模拟语音或视频信号，它的幅度峰值上升到足以超过限制电压时，它

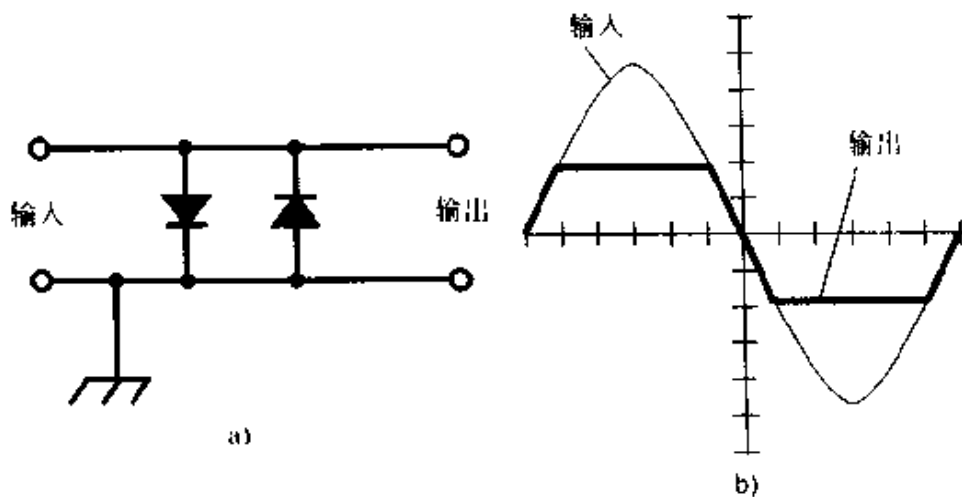


图 7-11 限幅器

a) 简单的二极管限幅器 b) 信号通过限幅器后的波形

能够严重的使接收变坏。

### 7.3.9 噪声限制

无线电接收机中，**噪声限制器**由一对限幅二极管组成，二极管的偏置可调，以便控制限幅电平，见图 7-12。偏置调节到在信号幅值时才发生限幅作用。这样噪声脉冲就不可能超过信号幅值。不这样做就会被噪声淹没掉信号。

噪声限幅器通常放在超外差接收机的两个中频级之间。在直接变换接收机中，噪声限幅器的最佳位置是直接放在检波器级前。

### 7.3.10 频率控制

当二极管反向偏置时，在 PN 结附近有一个**耗尽区**，它具有介质的性质。耗尽区宽度与若干因素有关，包括反向偏置电压。

只要反向偏置电压还低于雪崩电压，耗尽区宽度就会随偏压的变化而改变，这导致结电容的变化。这个电容的大小约为皮法量级，它的数值大小与反向偏置电压的平方根成反比。

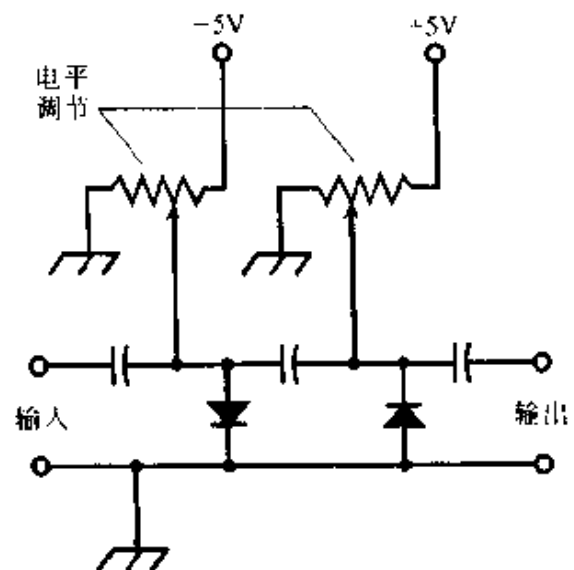


图 7-12 可调阈值噪声限幅器电路

某些专门生产的二极管可像可变电容器那样使用。这就是**变容二极管**，也叫**变容管**或**压控变容管**。这类管子用硅或砷化镓制成。

变容二极管通常用于**电压控制振荡器**。采用变容管的并联电压调谐 LC 电路见图 7-13。固定电容器的容量比变容二极管的大，以防

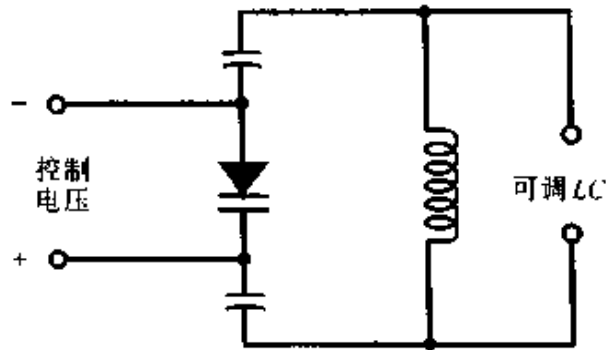


图 7-13 采用变容管的可变 LC 调谐电路

止线圈把加到变容管上的控制电压短路。还需指出，变容管的符号在阴极一侧是两条线，而不是一条线。

## 7.4 振荡和放大

在某种条件下，二极管能够产生或放大微波无线电信号。为此目的专门制造了若干种二极管。

### 7.4.1 耿氏二极管

**耿氏二极管**能产生高达 1W 的高频输出功率，但通常更多的是工作在约 0.1W 的水平。耿氏二极管一般用砷化镓 (GaAs) 制造。因为耿氏效应的作用，二极管才会振荡。1960 年国际商用机器公司的 J. 耿发现了这一效应，所以以他的名字命名这一效应。耿氏二极管的功能不像整流器、检波器、调制器、混频器或限幅器。由于它具有**负阻特性**而产生振荡。负阻特性表现在特性曲线上是有一段电流随电压增加而降低。

耿氏二极管振荡器常常用变容二极管来调谐。耿氏二极管振荡器直接与微波喇叭形天线连接就叫做**耿振发射器**。此器件在业余无线电设备中很普通。

### 7.4.2 碰撞雪崩渡越时间 (IMPATT) 二极管

缩写词 IMPATT 来源于 impact avalanche transit time 几个字的字头，意思是**碰撞雪崩渡越时间**。这一效应类似于负阻。像耿氏二极管一样，**碰撞雪崩渡越时间二极管**也是一种微波振荡器件，不过它不是用砷化镓，而是用硅制成。

碰撞雪崩渡越时间二极管能够在用耿氏二极管振荡器做的微波发射机中作为放大器。碰撞雪崩渡越时间二极管用作振荡器时，其产生的输出功率和工作频率与耿氏二极管相当。

### 7.4.3 隧道二极管

另一类能够在微波频率下产生振荡的二极管是隧道二极管，又叫江崎二极管。它只能产生很小的功率，但是它能够用作微波无线接收机中的本地振荡器。

在微波接收机中，隧道二极管能够用作放大器，因为它只产生很小的噪声。这是一种特别的砷化镓器件。

## 7.5 光（电）发射

某些半导体二极管在PN结正方向通过电流时能够发射光辐射能量。这种现象叫光（电）发射，它就像原子内部电子从高能量状态跌落到低能量状态能够发光一样。

### 7.5.1 发光二极管和红外发光二极管

随着制造二极管所用半导体准确组分的不同，能够得到几乎任何颜色的可见光发光二极管。同样也能得到红外发光器件。发光二极管发出的最普通的颜色是亮红。红外发光二极管发出的光的波长比可见光波长长。

从发光二极管或红外发光二极管发射的能量密度与正向偏置电流的大小有关。电流增加时，亮度增加，当达到某一值时，如果电流继续增加，亮度不再增加。这时，发光二极管和红外发光二极管处于饱和了。

### 7.5.2 注入型激光器

注入型激光器也叫激光二极管，它是发光二极管或红外发光二极管的一种，不过具有更大和更平的PN结。当所加电流足够大时，注入型激光器发射相干电磁波。如果电流低于某值，则注入型激光器就像一只发光二极管或红外发光二极管，但当达到阈值电流时，带电载流子产生复合并发生激射。

大多数注入型激光器用砷化镓制造，初始发射波长约905nm左右，处在光的红外区。其他类型的注入型激光器能够发射不同波长，有



些在可见光范围。最大脉冲峰值功率能够大到 100W，但脉冲持续时间很短。注入型激光器的发射具有特别窄的线宽。这就是激光器件的特性。典型的注入型激光二极管的结构见图 7-14。

注入型激光器主要用于光通信系统。注入型激光器发出的相干光输出通过大气时，其衰减比非相干光要小很多。

### 7.5.3 通信

#### 发光二极管和红外发光

二极管能够用于通信，因为它们的发光强度能被调制以传递信息。当通过器件的电流足以产生光输出但还不致于饱和时，发光二极管和红外发光二极管的输出能够跟随快速的电流变化。声音、音乐、图像和数字信号就能够通过光束在路径上传输。有些现代的电话系统也利用调制光通过纯净的光纤传输。这就是所谓的光纤技术。

## 7.6 光敏二极管

实际上，所有的 PN 结在受到电磁射线辐照时，其特性都要改变。普通二极管一般不受电磁射线的影响是因为 PN 结被封装在一个不透光的外壳内的缘故。

某些光敏二极管由于受到的辐照强度不同，它的电阻会改变。另外一些光敏二极管在存在电磁辐射时能够产生直流电压。

### 7.6.1 硅光电二极管

将硅二极管安装在透明的外壳内，结构上使得可见光能够照射到 P 型和 N 型材料间的势垒，这就构成了光电二极管。给其加上反向偏置电压，当光照射到结上就有电流流通。在一定的极限范围内，电流正比于光的强度。硅光电二极管在某些波长下比其他波长更灵敏，最大灵敏度处在光谱的接近红外部分，对应的波长比可见红光稍长一些。

当强度变化的光照射反向偏置硅光电二极管的 PN 结时，输出电流也随之变化。这就使硅光电二极管能被用来接收调制光信号和用于

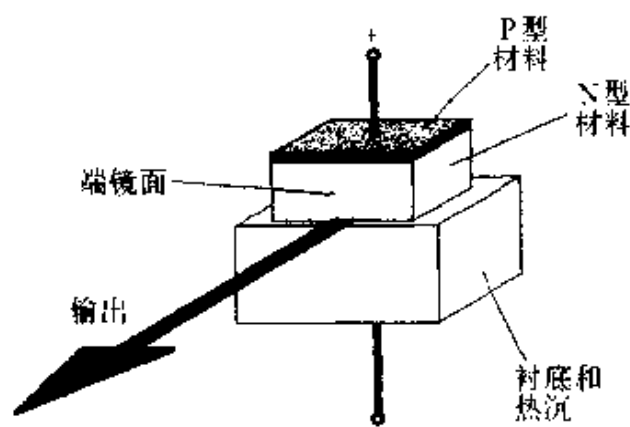


图 7-14 注入型激光器

光纤系统。

### 7.6.2 光隔离器

发光二极管或红外发光二极管能够与光电二极管组成单一封装的**光隔离器**，也叫**光耦合器**。随着电信号输入，发光二极管或红外发光二极管产生一个调制光束，经过一个小的、无遮挡的缝隙进入光电二极管，将可见光或红外光能量转变回电信号。

令工程师们烦恼的事实是，当信号从一个电路耦合到另一个电路时，两级之间的阻抗就相互作用。这能够产生非线性、不希望的振荡、效率的损失或者其他问题。光隔离器能够克服这些影响，因为在电的方面没有耦合。如果第二级电路的输入阻抗改变，第一级电路的阻抗不受影响。

### 7.6.3 光伏电池

硅二极管，若不加偏置电压而有足够的电磁能量照射它的PN结，它自己就会产生直流电压。这就是**光伏效应**，它是太阳能电池的工作原理。

**光伏电池**有大的PN结表面积，见图7-15。这是为了最大限度地增加照射到结上的可见光和红外光的能量。单个硅光伏电池在太阳光直射和没有负载的情况下产生约0.6V的直流电压。能够输出的总电流取决于结的表面

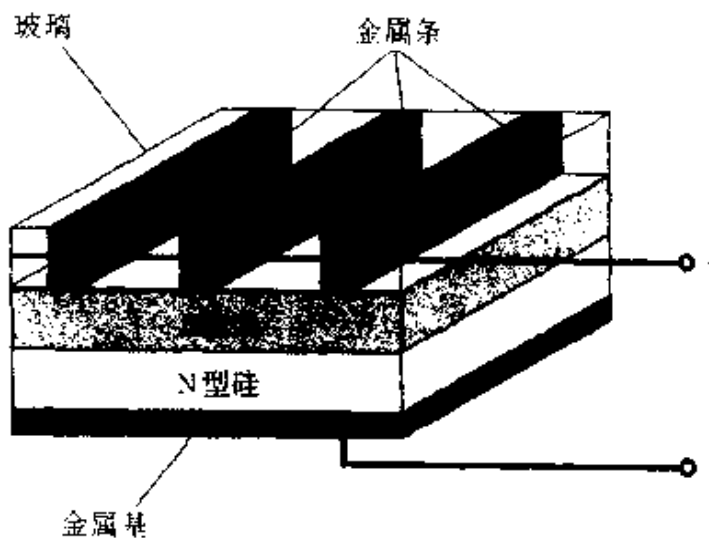


图7-15 光伏电池的结构

积。对每平方英寸的结面积，在灿烂的阳光下能产生150~200mA电流。

硅光伏电池串-并联连接为电子装置，如便携式收音机，提供太阳能电源。许多电池组合起来可装成一个**太阳能电池板**。串联时电池的直流电压就相加。典型的**太阳能电池组**可供给6、9或者12V直流电压。光伏电池能用来使蓄电池充电。如果住户需要117V交流电，电源可进行转换。关于更多的太阳电能系统论述可见第6章。

## 第 8 章 晶体管与集成电路

分立器件——*晶体管*的最通常的应用是产生信号、将弱信号或小功率信号转变为强信号或大功率信号、信号混合和用作电子开关。*集成电路*具有多种用途。在半导体材料单个芯片上，一块集成电路含有许多晶体管以及其他元件。

### 8.1 双极型晶体管

*双极型晶体管*有两个 PN 结连接在一起。有两种方法可以实现这一点：两个 N 型之间有一个 P 型层或者两个 P 型层之间有一个 N 型层。

#### 8.1.1 NPN 和 PNP

*NPN 晶体管*的简单结构图形和符号见图 8-1a 和 b。P 型层或中心层是*基极*，薄的 N 型半导体是*发射极*，较厚的 N 型层是*集电极*。有时在图中标以字母 B、E 和 C 并与晶体管符号中一一对应（箭头表示发射极）。*PNP 晶体管*见图 8-1c 和 d，它有两个 P 型层，分别在薄 N 型层的两侧。在 NPN 符号中箭头指向外，在 PNP 符号中箭头指向内。

通常 PNP 和 NPN 晶体管能完成同样的工作。差别只是电压极性和电流方向不同。在大多数应用中，NPN 晶体管可以用 PNP 晶体管替换，反之亦然，不过电源的极性要反过来。如

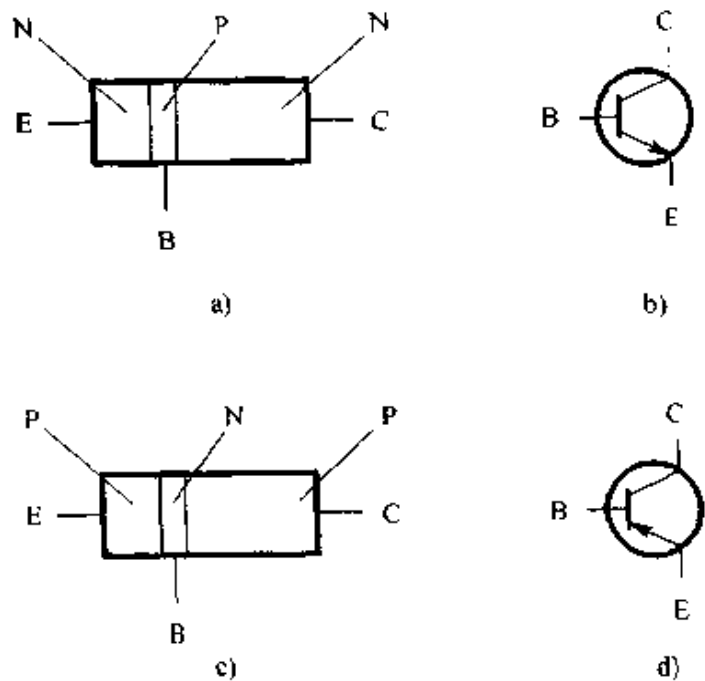


图 8-1 晶体管

- a) NPN 晶体管结构图形    b) NPN 晶体管符号  
c) PNP 晶体管结构图形    d) PNP 晶体管符号

果新器件有相同的特性的话，电路仍能工作。

双极型晶体管有许多类型。有些用于高频放大器和振荡器，另外一些则用于音频放大器和振荡器；有些用在大功率电路中，另外一些则是在弱信号下工作；有些用作开关，另外一些则用作信号处理。

### 8.1.2 NPN 偏置

NPN 晶体管的正常偏置是发射极接负和集电极接正。图 8-2 表示它与电池的连接。典型的电压范围从 3V 到接近 50V。

基极起控制作用，因为流过晶体管的电流取决于基极偏置电压，它表示为  $E_B$  或  $V_B$ ，相对于发射极-集电极的偏置电压表示为  $E_C$  或  $V_C$ 。

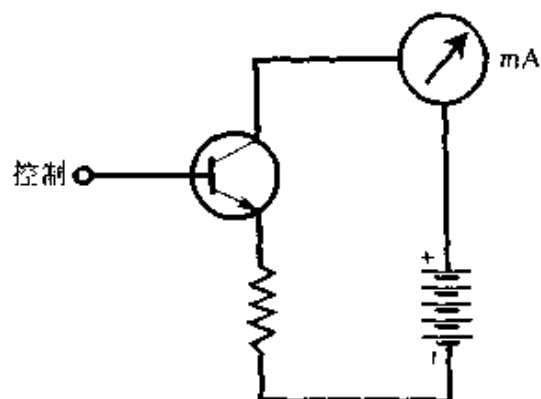


图 8-2 NPN 晶体管的典型偏置

### 8.1.3 零偏置

当基极什么都不连接，或当它与发射极同电位时，双极型晶体管就处在零偏置状态。在这种状态下，没有明显的电流通过 PN 结，除非正向偏置电压至少等于正向导通电压。对于硅管，该电压是 0.6V，对于锗管是 0.3V。

零偏置时，发射极-基极电流  $I_B$  是零，发射极-基极结（E-B 结）不导通。这能阻止电流在集电极电路中流通，除非有信号注入基极改变这种状态。这一信号必须是正极性而且对于输入信号周期的部分时间内，它们峰值电压必须是以克服 E-B 结的正向导通电压。

### 8.1.4 反向偏置

假设 NPN 晶体管标有“控制”的基极与电池连接，则基极相对于发射极为负。接上新电池后就使 E-B 结处于反向偏置状态。新电池的电压不能太高，以免 E-B 结发生雪崩击穿。

可以在反向偏置条件下注入信号以达到 E-B 结正向导通电压，但信号的正向电压峰值必须足够大，使得在输入信号周期的部分时间内 E-B 结能导通。否则晶体管在整个周期内将保持截止状态。

### 8.1.5 正向偏置

如果 NPN 晶体管的基极偏置相对于发射极为正，且从小逐渐增

加，这就是**正向偏置**。如果偏置电压小于正向导通电压，则没有电流流通。但是只要一达到导通电压，E-B 结就开始导通。

尽管基极-集电极结反向偏置，只要 E-B 结导通，发射极-集电极电流，通常叫**集电极电流**（以  $I_C$  表示），仍然流通。基极上正极性信号的很小增加引起基极电流  $I_B$  的少量增加，将造成  $I_C$  的较大增加。这就是用双极型晶体管放大信号的原理。

### 8.1.6 饱和

如果  $I_B$  继续增加，最后将达到某一点，从此之后  $I_C$  增加不那么快了。最终  $I_C$  与  $I_B$  的关系，在**特性曲线**上就趋平了。图 8-3 表示双极型晶体管的特性曲线族。实际电流值取决于器件的特定类型。对于功率晶体管电流值较大，对于弱信号晶体管此电流较小。当曲线变平时就是晶体管处于**饱和**状态。在饱和状态下，晶体管作为弱信号放大器就不是很有效。

在模拟电路中，双极型晶体管不工作在饱和状态，而在数字开关系统中有时却要偏置到饱和的状态。

### 8.1.7 PNP 偏置

对于 PNP 晶体管，其偏置状态正是 NPN 晶体管偏置状况的“镜像”，如图 8-4 所示，其电源极性正好相反。为了实现发射极-基极结的正向导通，所加信号必须足够的负。

不管是 PNP 还是 NPN 晶体管都能够作为“电流的阀

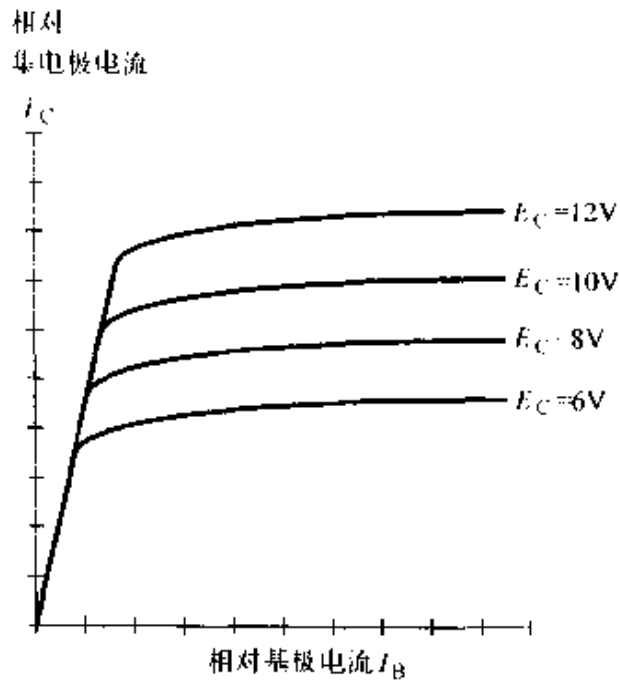


图 8-3 双极型晶体管的特性曲线族

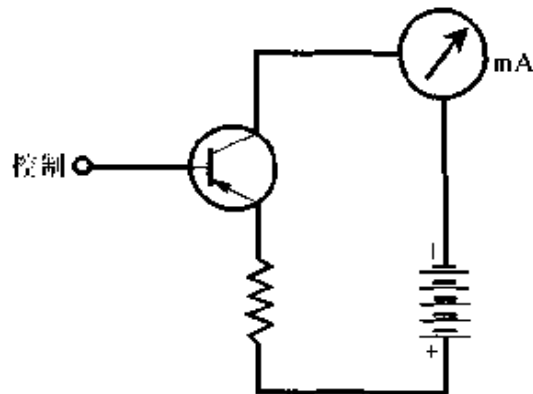


图 8-4 PNP 晶体管的典型偏置

门”。当其工作在特性曲线斜率陡峭区时，基极电流  $I_B$  的微小变化能导致集电极电流  $I_C$  的很大改变。虽然 PNP 晶体管与 NPN 晶体管相比，内部原子的活动是不同的，但在大多数情况下，对于实际应用其外电路的功能是相同的。

## 8.2 电流放大

偏置正确时，微小的  $I_B$  变化能产生大的  $I_C$  变化，因此晶体管能够作为*电流放大器*工作。

### 8.2.1 静态电流放大

双极型晶体的最大可达到的电流放大系数称为  $\beta$ ，它的大小范围从几倍到几百倍。晶体管  $\beta$  的表示方法之一是采用*静态正向电流转换比*，以符号  $h_{FE}$  表示。数学表达式为：

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$$

因此，如果基极电流 1mA 产生集电极电流  $I_C$  为 35mA，则  $h_{FE} = 35/1 = 35$ 。如果  $I_B = 0.5\text{mA}$ ， $I_C = 35\text{mA}$ ，则  $h_{FE} = 35/0.5 = 70$ 。

### 8.2.2 动态电流放大

另一种表征电流放大的办法是用  $I_C$  的增量与产生  $I_C$  变化的  $I_B$  的增量之比来表示。这就是*动态电流放大*，也叫*电流增益*。增量这个词用希腊字母  $\Delta$  来表示。因此按照上述定义：

$$\text{电流增益} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

特性曲线的斜率越陡， $\Delta I_C/\Delta I_B$  比值越大。从几何上来看，给定点的  $\Delta I_C/\Delta I_B$  就是直线的斜率，该点曲线的正切。

当晶体管的工作点在特性曲线上陡峭部分时，它能提供最大可能的  $\Delta I_C/\Delta I_B$ ，只要输入是小信号。这个值接近  $h_{FE}$ 。因为特性曲线在这一区域是直线，如果输入信号不太强的话，则晶体管能够作为*线性放大器*。

当工作点往特性曲线的非线性区移动时，电流增益降低，放大器变为非线性的。如果输入信号足够强，能将晶体管驱动到曲线的非线性区，也会发生同样的情况。

### 8.2.3 增益与频率的关系

对于双极型晶体管，随着信号频率增加增益要降低。增益与频率的关系有两种表示法。

一种是以  $f_T$  表示的增益带宽积，这是发射极接地时电流增益等于 1 时对应的频率。另一个是  $\alpha$  截止频率，它对应于增益是 1kHz 时的增益的 0.707 倍时的频率。在高于  $\alpha$  截止频率时晶体管可以有增益，但在高于  $f_T$  的频率下晶体管不产生增益。

## 8.3 双极型晶体管的基本电路

晶体管连接成的电路有三种形式，分别是发射极、基极或集电极对于信号接地。

### 8.3.1 共发射极电路

大概最常用的电路就是共发射极电路。其基本电路如图 8-5 所示。

电容器  $C_1$  对交流信号短路，所以发射极接在信号的地端。但是  $R_1$  使得发射极相对于地有一定的正直流电压（如果用的是 PNP 管，则为负电压）。发射极上确切的直流电压取决于  $R_1$  的大小和所加偏置，偏置由电阻  $R_2$  和  $R_3$  之比确定。它可以从零、地电位直到电源电压，它通常为几伏。

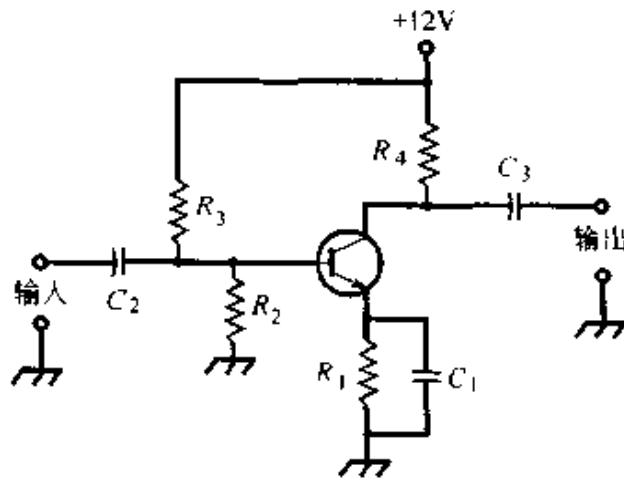


图 8-5 共发射极电路

电容器  $C_2$  和  $C_3$  用作输入或输出回路的隔直流而让

交流信号通过。电阻  $R_4$  使得输出信号免于通过电源而短路。

通过电容器  $C_2$  将信号电压加进共发射极回路，它使基极电流  $I_B$  变化。 $I_B$  的微小变化造成集电极电流  $I_C$  的大的变化。此电流通过  $R_4$ ，造成电阻两端直流电压的变化。其中的交流部分通过  $C_3$  到达输出端。

共发射极电路能产生最大增益。输出相位和输入相位差  $180^\circ$ 。

### 8.3.2 共基极电路

如同它的名称，共基极电路是基极对信号接地，如图 8-6。晶体管

的直流偏置与共发射极电路一样。输入信号加在发射极，这造成  $R_1$  上电压的变化并造成  $I_B$  的变化。这一小的电流变化使通过  $R_1$  的电流有大的变化，因此产生放大作用。在共基极电路中，输出信号与输入信号同相位。

信号通过  $C_1$  加入，电阻  $R_1$  防止输入信号与地短路，通过  $R_2$  和  $R_3$  提供偏置。电容器  $C_2$  使得基极对信号接地，电阻  $R_4$  使得信号不能通过电源而短路，输出通过电容器  $C_3$ 。

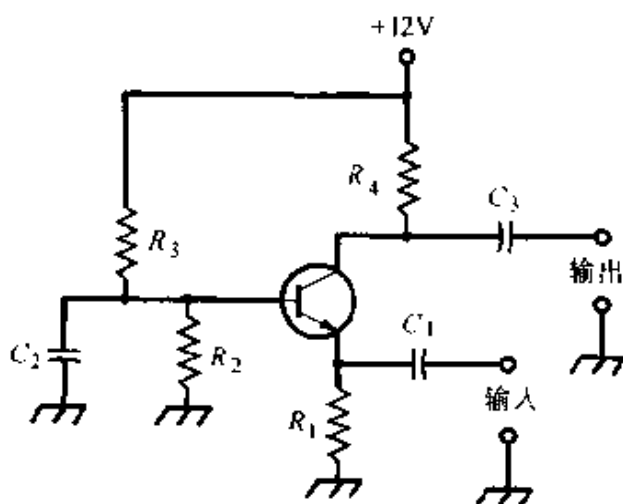


图 8-6 共基极电路

共基极电路提供的增益比共发射极电路的小，但不容易产生振荡。

### 8.3.3 共集电极电路

共集电极电路是集电极对信号接地，如（图 8-7）。基极用作输入端，信号通过  $C_2$  加到晶体管基极上。电阻  $R_2$  和  $R_3$  提供偏置，电阻  $R_4$  限制通过晶体管的电流，电容器  $C_3$  保持集电极对信号接地。流过  $R_1$  的电流变化在电阻上产生电压变化，交流分量通过  $C_1$  到达输出端。因为输出跟随着发射极电流而变化，所以这种电路有时叫做发射极跟随器。

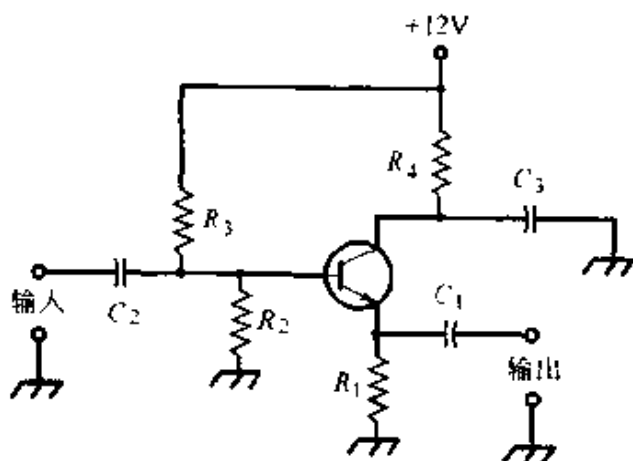


图 8-7 共集电极电路

输出信号与输入信号是同相位的，输入阻抗高而输出阻抗低。当设计得很好时，发射极跟随器可以在很宽的频率范围内工作，它是一个低价格的宽带阻抗匹配转换器。

## 8.4 场效应晶体管

除了双极型晶体管外，另外一类重要的晶体管就是场效应晶体



管,英文缩写 FET。场效应晶体管有两类:结型场效应晶体管 (JFET) 和金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (MOSFET)。

#### 8.4.1 结型场效应晶体管的原理

在结型场效应晶体管中,因为内部电场的影晌而电流发生改变。电子或空穴沿着沟道从源极(S)流到漏极(D)。这就产生一个漏电流  $I_D$ ,通常它与源电流  $I_S$  一样大小。电流取决于栅极(G)电压。栅极电压  $E_G$  的变化引起通过沟道的电流变化。微小的  $E_G$  变化会引起通过结型场效应晶体管的荷电载流子流的变化。它转换成交流电路中的电压放大。

#### 8.4.2 N 沟道和 P 沟道结型场效应晶体管

N 沟道结型场效应晶体管的简化截面和符号见图 8-8a、b。N 型材料构成了电流的路径,多数载流子是电子。漏极相对于源电极是正电位。栅极由 P 型材料构成。另一个更大截面的 P 型材料是衬底,与栅极对面沟道的一侧形成一个边界。栅极电压产生的电场控制着通过沟道的荷电载流子流。

$E_G$  越负,电场抑制通过沟道的电流越厉害,  $I_D$  就变得越小。

P 沟道结型场效应晶体管如图 8-8c 和 d, P 型半导体作沟道,大部分荷电载流子是空穴。漏极相对于源极是负电位,栅极和衬底是 N 型材料。 $E_G$  越正,电场抑制通过沟道的电流就越厉害,  $I_D$  就变得更小。

N 沟道器件可以用箭头指向栅极来表

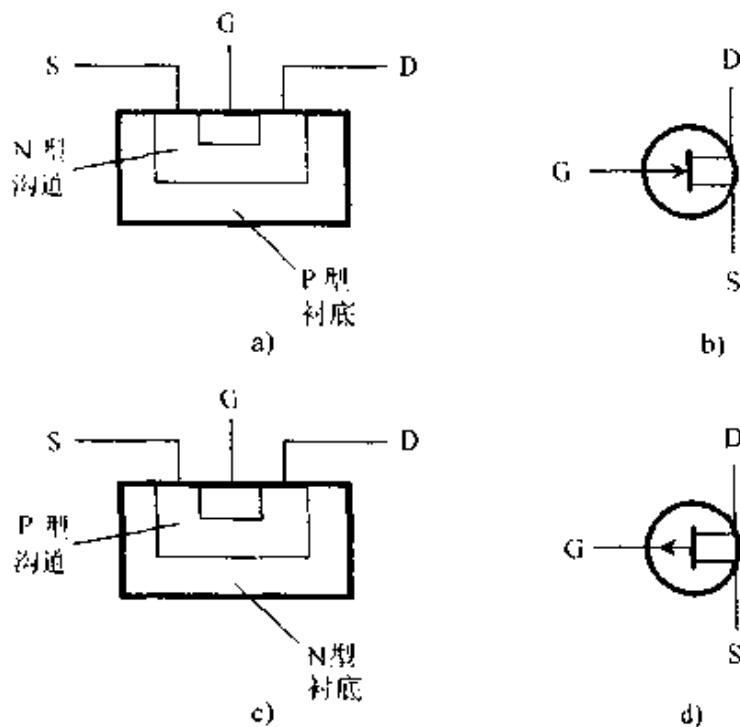


图 8-8 场效应晶体管

- a) N 沟道结型场效应晶体管的截面 b) N 沟道结型场效应晶体管的符号  
c) P 沟道结型场效应晶体管的截面  
d) P 沟道结型场效应晶体管的符号

示, P 沟道结型场效应晶体管则用箭头指向外表示。每一类器件的电源极性怎么用也已给出。漏极是正电位表示 N 沟道器件, 而漏极是负电位则是 P 沟道器件。

N 沟道结型场效应晶体管通常都可以用 P 沟道结型场效应晶体管来代替, 不过电极的极性要反过来, 如果新器件的特性合适, 电路照常工作。

### 8.4.3 耗尽和夹断

结型场效应晶体管的工作原理是因为栅极电压形成的电场程度不同地抑制着荷电载流子沿沟道的流通。

随着漏电压  $E_D$  的增加, 漏电流  $I_D$  也增加, 直到某一个值开始变平, 这只是在栅极电压  $E_G$  保持不变且不是负得很厉害时才正确。当  $E_G$  增加时 (N 沟道为负, P 沟道为正), 在沟道内就开始形成耗尽区。在这个区内荷电载流子不能流动, 它们只能通过一个很窄的沟道。  $E_G$  越大耗尽区越宽。如果  $E_G$  足够大, 耗尽区完全阻止载流子流通。这就是夹断。

### 8.4.4 结型场效应晶体管的偏置

N 沟道结型场效应晶体管的两种偏置方法 (固定栅极偏置和可变栅极偏置) 如图 8-9 所示。在图 8-9a 中, 栅极通过电阻  $R_2$  接地。源电阻  $R_1$  限制通过结型场效应晶体管的电流。电阻  $R_1$  和  $R_2$  共同决定栅极偏置电压。

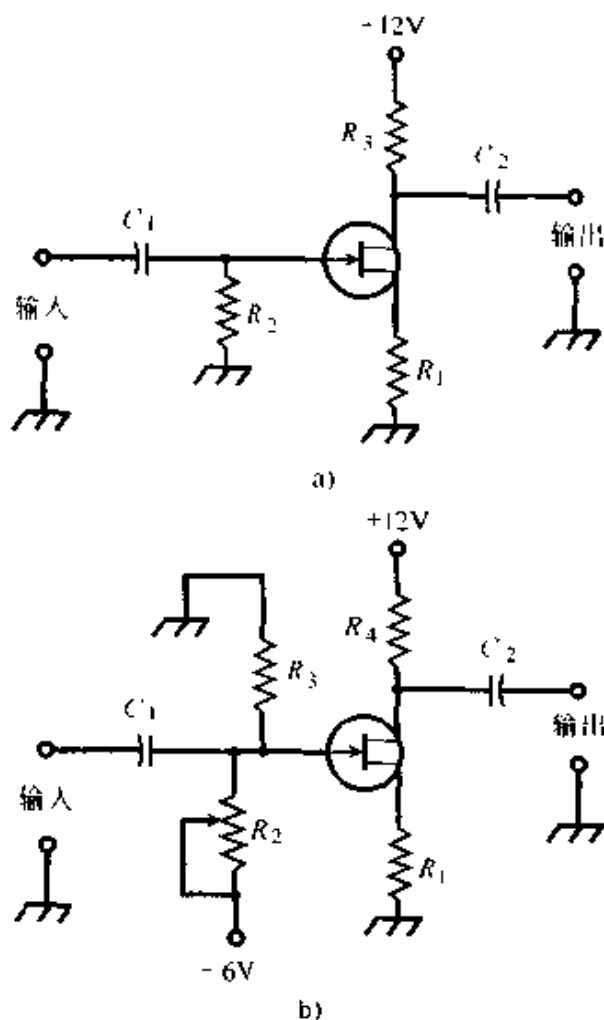


图 8-9 N 沟道结型场效应晶体管的两种偏置方法  
a) 固定栅极偏置 b) 可变栅极偏置

漏电流  $I_D$  通过  $R_3$ ，在它上面产生一个电压。交流信号通过  $C_2$  输出。

在图 8-9b 中，通过电位器  $R_2$  将栅极接到电源的负端。调节电位器使得在  $R_2$  和  $R_3$  之间产生可变的负  $E_G$ 。电阻  $R_1$  限制通过结型场效应晶体管的电流。漏电流  $I_D$  通过  $R_3$ ，在它上面产生一个电压，交流信号通过  $C_2$  输出。

在这两种电路中，漏极相对于地都是正电位。对于 P 沟道结型场效应晶体管，极性相反。

图 8-9a 中的偏置电路通常用于弱信号放大器、低电平放大器和振荡器。图 8-9b 的电路用于 C 类高频功率放大器，它有较强的输入信号。典型的结型场效应晶体管的电源电压与双极型晶体管的差不多。源漏之间的电压  $E_D$  在 3~50V 之间，大多数情况为 6~12V。

## 8.5 电压放大

图 8-10 表示某一 N 沟道结型场效应晶体管的漏电流  $I_D$  与栅极偏置电压  $E_G$  的关系，假设漏极电压为常数。

当  $E_G$  相当大并为负时，结型场效应晶体管就夹断，没有电流通过沟道。如果  $E_G$  负得少一点，沟道就开通，就有电流流通。当  $E_G$  负得再少一点，沟道就变得更宽，电流  $I_D$  就增加。当  $E_G$  接近使源-栅结正向导通时，沟道就全部导通。如果  $E_G$  变正且足以使源-栅结导通，则结型场效应晶体管不再正常工作，沟道内的部分电流将被栅极旁路。

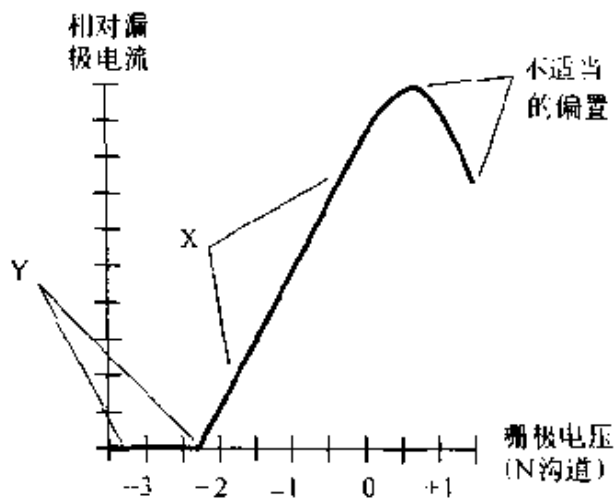


图 8-10 N 沟道结型场效应晶体管的相对漏极电流与栅极电压的关系

对应于图 8-10 中曲线斜率最陡的范围内的  $E_G$  时可以得到最佳的弱信号放大。图中对应这一范围用符号 X 表示。当结型场效应晶体管偏置在截止点或截止点以外时能得到最佳的功率放大，这一范围用 Y 表示。

如图 8-9 所示，电流  $I_D$  通过漏极电阻。小的  $E_G$  变化造成大的  $I_D$

改变, 这一变化又在  $R_3$  (图 8-9a) 或  $R_4$  (图 8-9b) 上产生直流电压的变动。这一电压的交流部分通过电容器  $C_2$  作为信号输出。这一交流输出信号比栅极上的信号要大许多, 这就产生了电压放大。

### 8.5.1 漏极电流与漏极电压的关系

可以做出在不同栅极电压  $E_G$  下漏极电流  $I_D$  与漏极电压  $E_D$  的关系。所得一系列曲线叫做器件的**特性曲线族**。图 8-11 表示 N 沟道结型场效应晶体管的特性曲线族。 $I_D$  与  $E_G$  的关系曲线也很重要, 图 8-10 所给的就是此类曲线的一例。

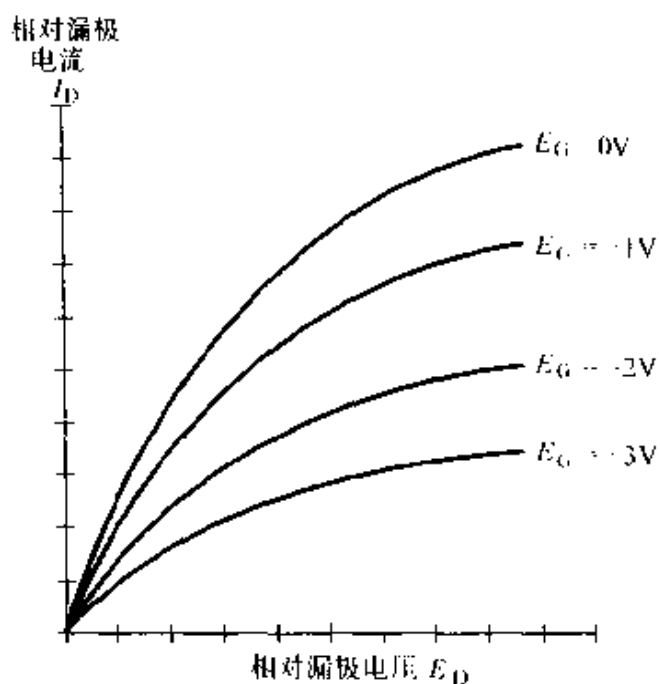


图 8-11 N 沟道结型场效应晶体管的特性曲线族

### 8.5.2 跨导

回顾前一章对双极型晶体管动态电流放大的讨论, 对结型场效应晶体管来说, 类似的特性叫做**动态互电导**, 或称**跨导**。

参考图 8-10, 假设  $E_G$  取某一数值, 就产生相应的漏电流  $I_D$ 。如果栅极电压变化一个小量  $\Delta E_G$ , 漏电流将变化某一个增量  $\Delta I_D$ , 跨导就是  $\Delta I_D / \Delta E_G$ 。几何上这是图 8-10 中曲线的正切, 直线的斜率。

$\Delta I_D / \Delta E_G$  的数值沿曲线每处是不一样的。当结型场效应晶体管偏置在夹断点以外, 即图中用符号 Y 表示的区域时, 曲线斜率为零。在这一区域, 即使栅极电压变化也没有漏电流流过。只有当沟道导通时,  $E_G$  的变化才能使  $I_D$  变化。用符号 X 表示的区域是跨导最大的区域, 曲线在这一区域的斜率最陡。在这一区域能得到最大的增益。

## 8.6 金属-氧化物-半导体场效应晶体管

缩写词 MOSFET 的中文译名是**金属-氧化物-半导体场效应晶体管**。N 沟道 MOSFET 的简化截面见图 8-12a, 它的符号见图 8-12b。

P沟道 MOSFET 的简化截面和符号见图 8-12c 和 d。

### 8.6.1 超高输入阻抗

在首次制成 MOSFET 时曾把它叫做绝缘栅场效应晶体管，缩写为 IGFET。这一名称可能比目前采用的名称更能说明器件。实际上是用一薄层介质将栅电极与沟道绝缘隔离的，结果输入阻抗就比结型场效应晶体管的高。典型的 MOSFET 的栅极到源极的电阻与电容器的阻抗可比拟。

### 8.6.2 主要问题

MOSFET 的问题之一是它们极易被静电放电损坏。在组装含有 MOS 器件的电路时，技术人员必须使用特殊的工具保证他们的手上不携带静电电荷，否则就会使器件损坏。

如果通过 MOS 器件的介质发生静电放电，器件就会永久损坏。潮湿的天气无助于防止此危险。

### 8.6.3 适应性

在实际电路中，有时候 N 沟道结型场效应晶体管 (JFET) 可以用 N 沟道 MOSFET 来置换；P 沟道器件类似地也可以置换。但是 MOSFET 的特性曲线与 JFET 不同。在 MOSFET 中，源极-栅极的结不是 PN 结，因此不发生正向导通。N 沟道 MOSFET 的特性曲线见图 8-13。

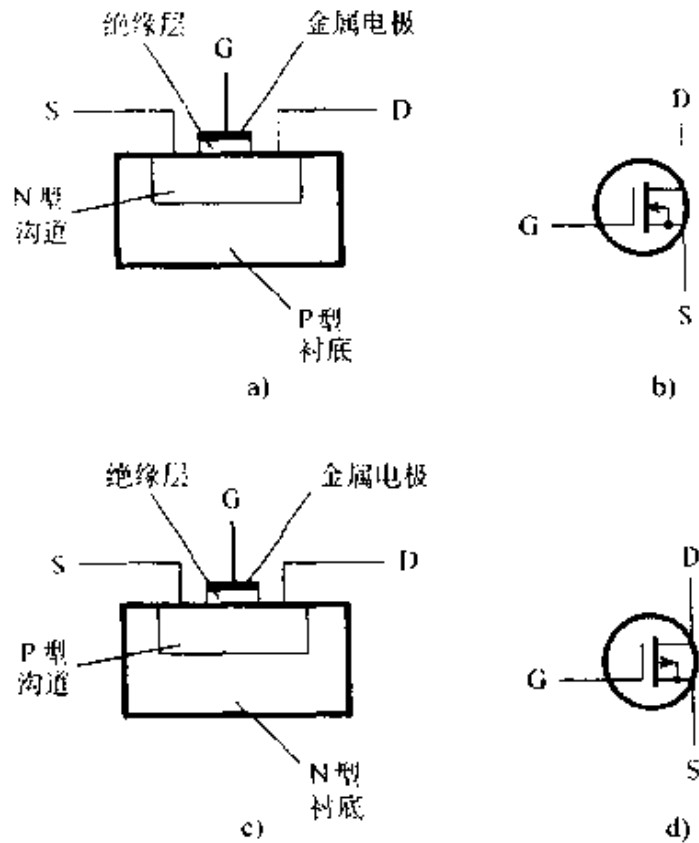


图 8-12 MOSFET

- a) N 沟道 MOSFET 的截面 b) N 沟道 MOSFET 的符号 c) P 沟道 MOSFET 的截面 d) P 沟道 MOSFET 的符号

### 8.6.4 耗尽型和增强型

在结型场效应晶体管中，零偏压下沟道即导通。随着耗尽区增加，荷电载流子通过窄的沟道，这叫耗尽型。金属-氧化物-半导体场效应晶体管也可以做成耗尽型的。图 8-12 表示耗尽型 MOSFET 的截面简图和符号。

金属-氧化物-半导体技术还可以有第二种工作型式。增强型 MOSFET 在零偏压下沟道截止。必须应用栅极偏置电压来建立沟道。如果  $E_G = 0$ ，当没有输入信号时，漏电流  $I_D$  等于零。

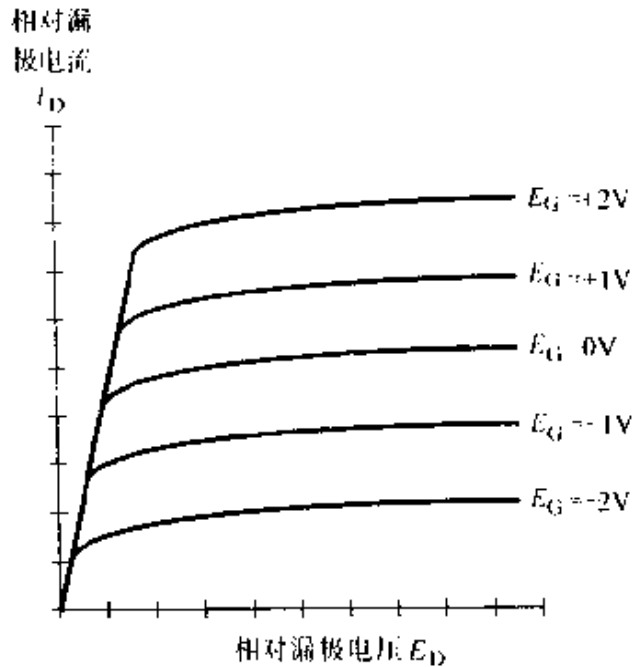


图 8-13 N 沟道 MOSFET 的特性曲线族

N 沟道和 P 沟道增强型器件的符号见图 8-14。

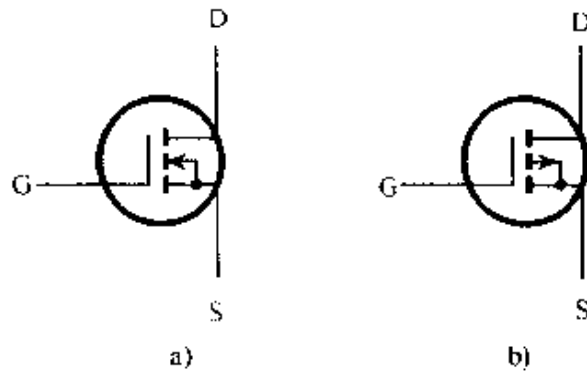


图 8-14 增强型 MOSFET 的符号

a) N 沟道增强型 MOSFET

b) P 沟道增强型 MOSFET

## 8.7 场效应晶体管的基本电路

场效应晶体管 (FET) 有三种常用的电路结构，这三种结构是源极、栅极或漏极对信号接地。

### 8.7.1 共源极电路

在共源极电路中，信号加在基极，如图 8-15。图中给出的是 N 沟道结型场效应晶体管，但是，器件也可以是 N 沟道耗尽型 MOSFET，电路图不变。对于 N 沟道增强型器件，需要一个外接电阻，使栅极运行在电源的正端。对于 P 沟道器件，电源必须提供负电压，而不是正电压。

电容器  $C_1$  和电阻  $R_1$  使源极对信号接地，从直流上看提高了源对地的电位。交流信号通过  $C_2$  输入；电阻  $R_2$  调节输入阻抗并提供栅极偏置。交流信号通过  $C_3$  到电路的输出端。电阻  $R_3$  使输出信号免于通过电源而短路。

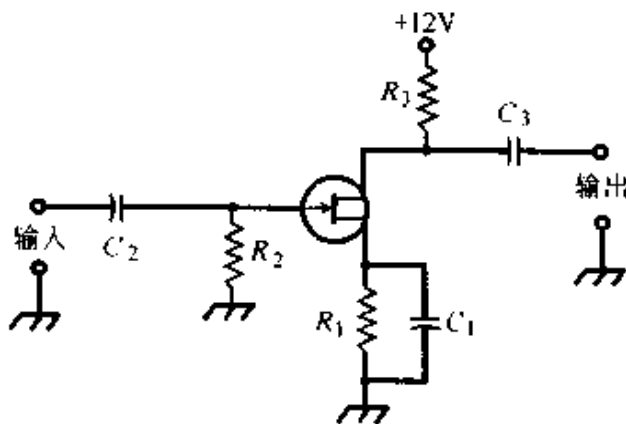


图 8-15 共源极电路

图 8-15 中的电路是用于放大器和振荡器的偏置电路，特别是在高频下。在场效应晶体管的三种电路结构中，共源极电路能提供最大的增益，其输出信号与输入信号的相位差  $180^\circ$ 。

### 8.7.2 共栅极电路

共栅极电路是栅极对信号接地，输入加在源极，如图 8-16。图中给出的是 N 沟道结型场效应晶体管。对其他类型的场效应晶体管，可以采用如同上面讨论共源极电路的思考方法。增强型器件要求在栅极和电源正端之间有一个电阻（如果是 P 沟道 MOSFET 就要在栅极和电源负端之间有一个电阻）。

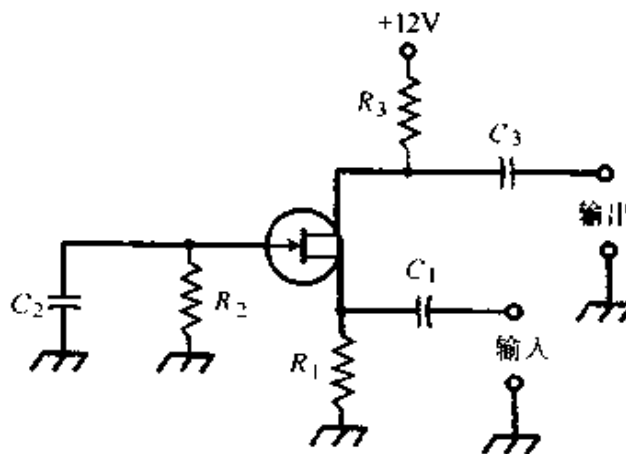


图 8-16 共栅极电路

共栅极电路的直流偏置基本上与共源极电路一样，但是信号从不

同路径流过。交流输入信号通过  $C_1$  进入，电阻  $R_1$  使输入端不要与地短路。 $R_1$  和  $R_2$  为栅极提供偏置，电容器  $C_2$  使栅极对信号接地。在某些共栅极电路中，栅电极直接接地而不用元件  $R_2$  和  $C_2$ 。通过  $C_3$  信号从电路输出。 $R_3$  使输出信号免于通过电源而短路。

与共源极电路相比，共栅极电路的增益较低。但是共栅极放大器不容易产生不希望的振荡。其输出信号与输入信号同相位。

### 8.7.3 共漏极电路

**共漏极电路** 如图 8-17 所示。该电路是漏极对信号接地。有时把它叫做**源极跟随器**。

场效应晶体管的偏置如同共源极电路和共栅极电路。图中表示的是 N 沟道结型场效应晶体管，也可采用其他类型的场效应晶体管，对于 P 沟道器件极性要反过来。增强型 MOSFET 要求在栅极和电源正端之间接

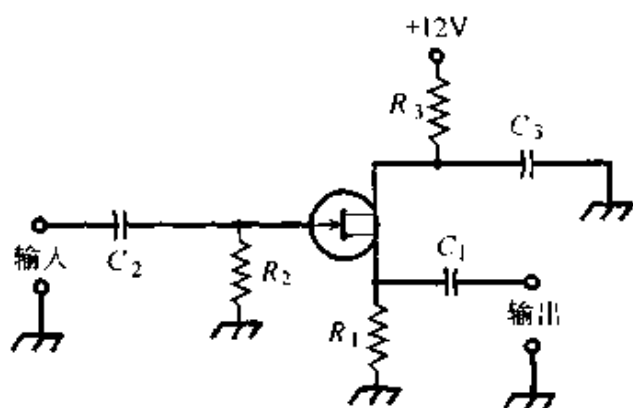


图 8-17 共漏极电路

一个电阻（如果是 P 沟道 MOSFET，则接在栅极和电源负端之间）。

通过  $C_2$  输入信号加到栅极上，电阻  $R_1$  和  $R_2$  提供栅极偏置，电阻  $R_3$  限制电流。电容器  $C_3$  使漏极对信号接地。直流沟道电流的变化流过  $R_1$  形成输入信号，它形成电阻上直流电压的变化。信号的交流分量通过  $C_1$  从源极输出。

共漏极电路的输出信号与输入信号同相位。该电路常用作宽带阻抗匹配。

## 8.8 集成电路

很多集成电路看起来像带有一些金属针的塑料块。基本结构有**单列直插式封装**、**双列直插式封装**和**平面封装**。另一类封装看起来像有很多引出线的晶体管，这是**金属壳封装**，有时候也叫**TO 封装**。集成电路的符号是一个三角形或者四方形，内部标有元件设计者。集成电路具有如下特点。



1. 体积小 集成电路器件和系统与由分立元件制成的等效电路相比要紧凑得多。它可以做成很多复杂的电路而保持较小的尺寸，因此，人们更愿用集成电路而不用分立元件。例如一台笔记本电脑的存储容量比过去占一间屋子的早期电脑要大得多。

2. 速度快 集成电路中，各元件之间的内部连接是很微细的，可以实现很快的开关速率。电流运动得很快，但不是瞬时的。荷电载流子从一个元件到另一个元件移动得越快，单位时间内就能完成更多的运算，完成复杂运算所需的时间就越少。

3. 功率小 与等效的分立元件电路相比，集成电路通常所用功率较小。如果要用电池的话，这是很重要的。由于集成电路支取很小的电流，因此比分立元件的等效电路产生更少的热量。这就能得到更好的效率，减少设备变热产生的各种问题，例如频率漂移和产生内部噪声。

4. 可靠性高 使用集成电路的系统不易出故障，其失效率比由分立元件制成的系统要低。这主要是因为所有的内部连接都被密封在集成电路的壳内，防止了腐蚀或灰尘的落入。失效率降低就等效于减少了停机时间。

5. 容易维护 集成电路技术降低了维护成本，因为一旦它坏了维修过程很简单。许多系统采用集成电路插座，只要找到损坏的集成电路，拔下来，再插上一个新的即可。当修理的集成电路是直接焊在电路板上时，要用一种专门的工具。

6. 模块结构 现代集成电路系统采用模块结构。单个集成电路在电路板中具有确定的功能，电路板又固定到插座上，并具有专门的用途。技术人员采用装有软件程序的计算机，找出系统内损坏的电路板。拔掉这块板并更换一块，在很短时间内又使系统回到完好状态。

7. 没有电感（器） 集成电路中通常设计得没有电感（器），因为在硅芯片上是不容易制造电感的。电阻-电容回路能起电感-电容回路的作用。因此有些电感就被电阻替代了，因为在硅片上很容易制造电阻。

8. 不可能做成大功率放大器 通常在半导体芯片上不可能做成大功率放大器。大功率放大器需要一定的体积和质量去传导和释放过

剩的热能。在大功率放大中常用功率晶体管，有些系统中采用真空管。

## 8.9 线性集成电路

*线性集成电路* 用来处理像声音、音乐和大多数无线电发送的模拟信号。线性一词来源于这一事实，瞬时的输出与瞬时的输入是线性关系。

### 8.9.1 运算放大器

一个*运算放大器* 由若干个晶体管、电阻、二极管和电容器组成，能在很宽的频率范围内产生高的增益。一个运算放大器有两个输入和一个输出。

当一个信号用作*非倒相输入*时，输出与输入同相；当信号用作*倒相输入*时，输出信号与输入信号的相位差 $180^\circ$ 。运算放大器与两个电源相接，一个接晶体管的发射极( $V_{ee}$ )，一个接集电极( $V_{cc}$ )。运算放大器的符号是一个三角形，一些从三角形出来的线表示输入、输出和电源的连接。

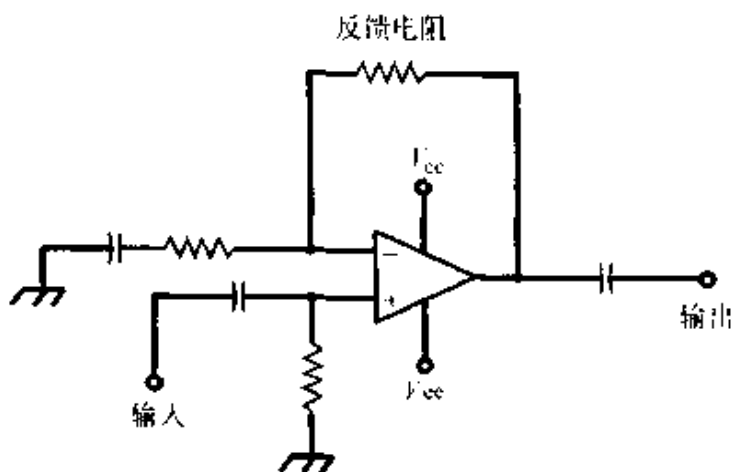


图 8-18 闭环运算放大器电路

运算放大器的增益特性由外电阻决定。通常电阻接在输出和倒相输入之间。这是*闭环结构*，这种反馈是负反馈，它的增益比没有反馈(*开环结构*)时要小。闭环运算放大器如图 8-18 所示。

运算放大器的增益特性由外电阻决定。通常电阻接在输出和倒相输入之间。这是*闭环结构*，这种反馈是负反馈，它的增益比没有反馈(*开环结构*)时要小。闭环运算放大器如图 8-18 所示。

当运算放大器的反馈环中用  $RC$  组合时，则放大系数随频率而变。采用运算放大器和不同的  $RC$  反馈时可得到低通响应、高通响应、谐振峰或者谐振凹口。

### 8.9.2 稳压器

*稳压器集成电路* 用来控制电源的输出电压，这对于精密电子设备是非常重要的。这种集成电路有各种不同的电压和电流额定值。典型的稳压器集成电路有三端。它们看起来像一个功率晶体管。

### 8.9.3 定时器

**定时器集成电路**是振荡器的一种形式。它产生一个延时输出，且此延时是可变的，以满足特定器件的需要。延迟是由计算振荡的脉冲数来实现。延时的长短用外接电阻和电容器来调节。

### 8.9.4 复用器/解复用器

**复用器集成电路**能够将不同信号按时分复用而组合加进单一信道，它类似于使用脉冲调制。模拟信号复用器能够反过来作为**解复用器**工作。

### 8.9.5 比较器

与运算放大器类似，**比较器集成电路**有两个输入端。器件比较两个输入端(A和B)的电压。如果A端的输入比B端的输入足够高，输出就接近+5V。这就是逻辑状态1，或高态。如果A端输入不如B端输入高，输出电压约+2V。这就表示为逻辑状态0，或低态。

比较器用于驱动或触发其他器件，如延迟和电子开关。有些能够在低态和高态间作高速开关，另外一些则是低速开关。有些具有低输入阻抗，另一些则有高输入阻抗。有些适于音频或低频应用，另一些则适于视频或高频应用。

## 8.10 数字集成电路

**数字集成电路**由一些门电路组成，它能完成高速逻辑运算。它有若干种不同的逻辑电路，每一种各有各的特性。数字逻辑电路可以采用双极型或金属-氧化物-半导体型器件。

### 8.10.1 晶体管-晶体管逻辑电路

在**晶体管-晶体管逻辑电路**(TTL)中，双极晶体管列阵，有些具有多发射极，工作在直流脉冲下。TTL门电路如图8-19，晶体管或是截

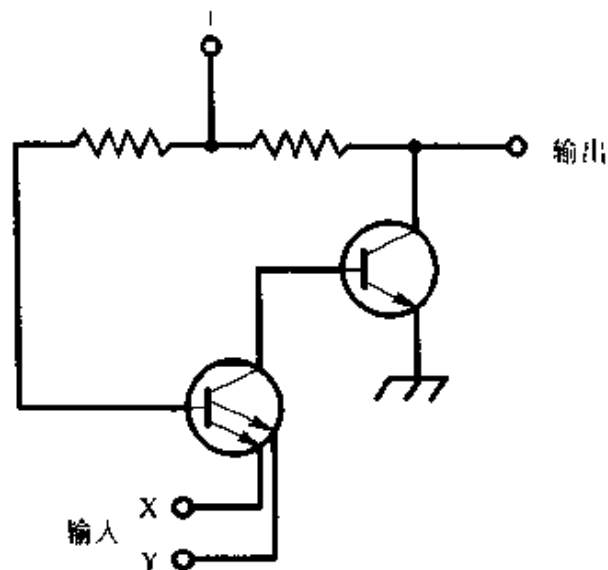


图 8-19 晶体管-晶体管逻辑门电路

止或是饱和，不存在两者之间的状态。为此，TTL 门电路可以较好地免除外来噪声。

### 8.10.2 发射极耦合逻辑电路

另一类双极型晶体管逻辑电路是发射极耦合逻辑电路 (ECL)。在发射极耦合逻辑电路中，晶体管不像在 TTL 电路中那样工作在饱和状态。与 TTL 电路相比，这就增加了 ECL 电路的运算速度。但是噪声脉冲对 ECL 电路的影响很大，因为非饱和状态下工作的晶体管也同样放大开关信号。图 8-20 表示简单的 ECL 门电路。

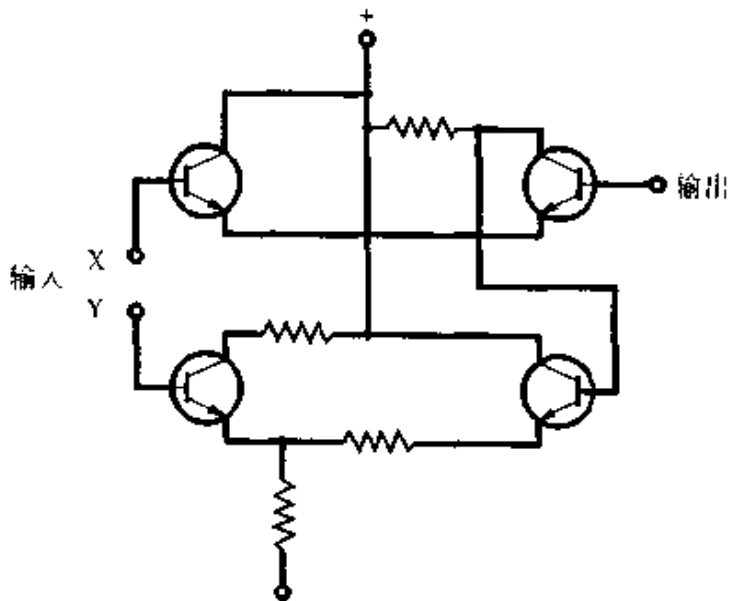


图 8-20 发射极耦合逻辑门电路

### 8.10.3 金属-氧化物-半导体逻辑电路

*N* 沟道金属-氧化物-半导体逻辑电路 (NMOS) 设计简单并具

有很高的运算速度。*P* 沟道金属-氧化物-半导体逻辑电路 (PMOS) 与 NMOS 类似，但是运算速度较慢。NMOS 或 PMOS 数字集成电路就像只用 *N* 沟道场效应晶体管或只用 *P* 沟道场效应晶体管的电路。

*互补金属-氧化物-半导体逻辑电路* (CMOS) 在单一芯片上采用了 *N* 型和 *P* 型硅。这就类似于在电路中采用了 *N* 沟道和 *P* 沟道场效应晶体管。CMOS 的主要优点是特别低的漏电流，高的运算速度和对噪声的抗干扰性。

## 8.11 元件密度

集成电路中每个芯片内的元件数叫做元件密度。它受半导体材料原子结构的影响，因此，元件密度实际上是有限制的。

### 8.11.1 中规模集成电路

相对而言，中规模集成电路 (MSI) 的元件密度不是很高。中规模

集成电路的优点(在少数应用中)是栅极能够传送较大电流。双极型晶体管和 MOS 技术都适宜于中规模集成电路。

### 8.11.2 大规模集成电路

*大规模集成电路* (LSI) 的元件密度比中规模集成电路高一个数量级。电子手表、单(芯)片计算器和微型计算机都是采用大规模集成电路的实例。

### 8.11.3 超大规模集成电路

*超大规模集成电路* (VLSI) 的元件密度比大规模集成电路又高一个数量级。复杂的微型计算机和周边电路,如*记忆存储集成电路*都是用超大规模集成电路制造的。

### 8.11.4 更高的密度

有些集成电路每个芯片所含有的元件比上述任何电路都多。基于越来越大的存储器和功能更强的处理器,这些技术主要用于个人计算机和商用计算机的硬件设备。

## 8.12 集成电路存储器

以高电平和低电平(逻辑状态 1 和 0)形成的二进制数据可以存储在*存储器*的集成电路中。在集成电路中,存储器可以有不同的形式。

### 8.12.1 随机存取存储器

*随机存取存储器* (RAM) 将二进制数据储存在阵列中。在矩阵中,数据能从任何地方寻址,数据很容易转换和储存回 RAM。有两类 RAM:*动态随机存取存储器* (DRAM) 和*静态随机存取存储器* (SRAM)。

DRAM 采用晶体管和电容器的集成电路,数据作为电荷储存在电容器上。电荷必须不断地填满否则会因放电而消失。充电以每秒几百次的速度自动地进行。SRAM 利用触发器电路储存数据。它不需要电荷的不断填充,但是 SRAM 对给定存储数据量需要更多的元件。

对于任何 RAM,在断电时数据会消失,除非采取某些措施备份数据。当除去电源时,存储器的内容会消失,这种存储器叫*易失存储器*。当除去电源时数据能保存,这种存储器是*非易失存储器*。

### 8.12.2 只读存储器

*只读存储器* (ROM) 能够整个或部分地寻址,但在正常运作过程中不能写入。标准的ROM芯片是在工厂里编程的。这种永久编程叫做*固化*。但是也有的ROM可以自己编程或再编程。

### 8.12.3 可擦除的可编程只读存储器

*可擦除的可编程只读存储器* (EPROM) 是一种只读型的存储器集成电路。但是可以用曝露于紫外光的办法再编程。集成电路必须从使用它的电路中拿出来,在紫外光中曝光几分钟,然后用特殊的方法再编程。

有的 EPROM 可以用电的方法擦除。这种集成电路叫 EEPROM,即*电可擦除可编程只读存储器*,不必为了再编程而将它从电路中拿出来。

## 第9章 变送器和传感器

变送器是将一种能量形式转换为另一种能量形式的器件。在电子学中，变送器将交流或直流电能转变为声音、超声波、可见光、红外光、高频电磁波、机械运动或其他形式。变送器也可以将非电能量转变为交流或直流电能。

### 9.1 声变送器

声变送器将声音或超声波变换成交流电信号或反过来将交流电信号变为声音或超声波。声能和交流信号能量的波形是相同或接近相同的。话筒和扬声器是两种最常用的声变送器。其他的变送器包括耳机、头戴式耳机、接触式话筒、水下扬声器和麦克风、超声发射器和拾音器。

#### 9.1.1 动态变送器

动态变送器是由线圈和磁铁做成的器件，它将机械振动转变为电流，或反过来将电流变为机械振动。最常用的实例就是动态话筒和动态扬声器。

图 9-1 表示动态变送器的工作原理。膜片装在永久磁铁一端，磁铁安装得能沿轴线前后迅速移动，磁铁外面绕有金属导线线圈。声音振动使得膜片移动，也使得磁铁移动，这造成线圈内磁场的变动。结果从线圈就有交流信号输出，它具有与撞击膜片的声音一样的波形。

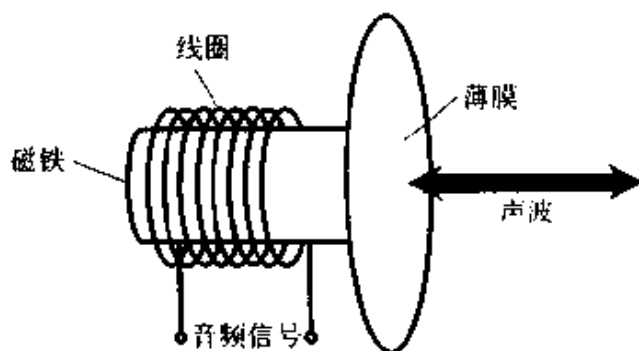


图 9-1 动态变送器的工作原理

如果一个音频信号加到金属导线线圈上，它产生一个磁场，这个磁场产生作用在永久磁铁上的力，使得磁铁移动，推动膜片前后运动，

并在周围介质中产生声波。

### 9.1.2 静电变送器

**静电变送器**取静电力的优点，其工作原理如图9-2。

在**静电拾音器**中，进入的声波使柔性板产生振动，这就产生很快的（虽然很小）间隙变化，因此两板之间的电容发生变化。当板上加直流电压时，随着两板之间电容的变化，它们之间的电场随之改变，使得通过变压器

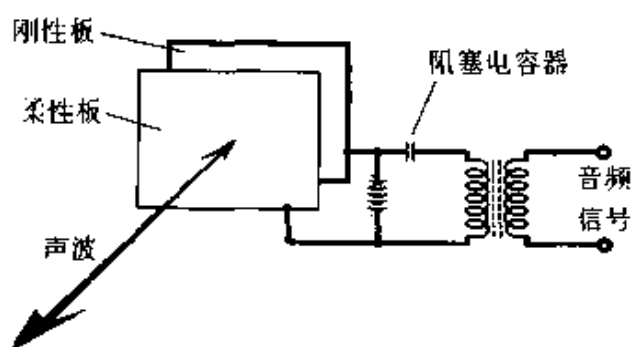


图 9-2 静电变送器的工作原理

一次绕组内的电流变化，音频信号就出现在二次绕组内。

**静电发射器**的工作原理正好相反。变压器内的电流使两板之间的电压发生变化。这导致静电力的变化，将柔性板推进或拉出。柔性板的运动就产生声波。

静电变送器能够用于采用动态变送器的大多数场合。静电变送器的优点是重量轻和灵敏度高，同时工作电流也很小。

### 9.1.3 压电变送器

图9-3表示**压电变送器**的工作原理。该器件由夹在两个金属片之间的晶体（石英或陶瓷材料）所组成。

当声波撞击金属片时，金属片就振动，这一振动传到压电晶体。当压电晶体受到机械应力时会产生弱电流。因此，在两个金属片之间产生一个交流电压，其波形类似于声波。

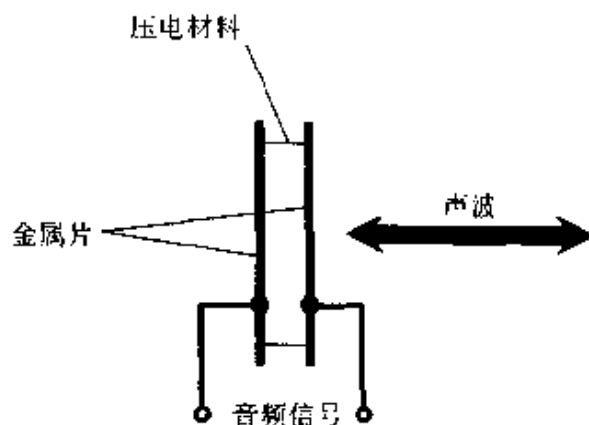


图 9-3 压电变送器的工作原理

如果金属片上加一个交流信号，这就使晶体与电流同步振动。结果金属片也振动，产生声音扰动。

压电变送器常见于超声波装置，如干涉检测器和警报器。



## 9.2 电磁变送器

电磁变送器将电磁场转变为电能或反过来将电能变为电磁场。它有多种不同形式。

### 9.2.1 射频天线

射频天线可以分为接收型和发射型。接收天线是将电磁场转变为交流信号。而发射天线则是将交流信号转变为电磁场。大多数发射天线可以有效地用来接收信号。一些接收天线可以有效地用作发射天线，其他一些则不能这样。天线将在第 18 章中讨论。

### 9.2.2 可见光、红外光和紫外光变送器

大多数可见光、红外光和紫外光变送器是半导体二极管，这些二极管的 PN 结能够产生一定波长范围的电磁场或对电磁场敏感。有些器件只对电磁场的强度变化有响应，另外一些则在受到光照时产生直流信号。细节可见第 7 章。

### 9.2.3 磁介质

电磁变送器常采用磁介质来存储或恢复模拟和数字信号，例如磁带录音机中的录音头、放音头和擦除头。整个磁带录音（像）机就是声音、数字和视频信号与可变磁场之间的变送器。磁带录音机的录音/放音部件的简化说明如图 9-4 所示。

在录音状态，磁带在录入任何东西之前通过擦除头。如果磁带不是空白的（即

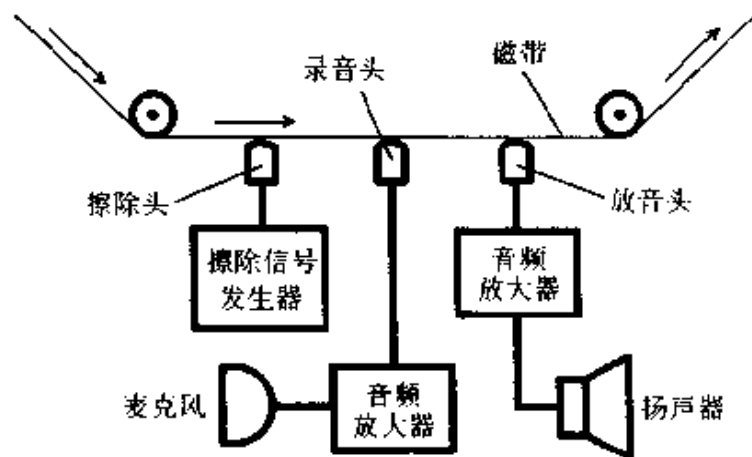


图 9-4 磁带录音机的方框图

上面已经存有磁脉冲)，在录入任何信息之前擦除头将那些磁脉冲去掉。这可以避免双重作用，或在磁带上同时存在两个节目。录音头是电磁铁，它产生变化的磁场。磁场的瞬时磁通密度正比于输入音频信号的强弱，它使磁带磁化的方式能够重复信号的波形。

在放音状态时,擦除头和录音头都不工作,放音头作为磁场检测器。随着磁带移动,放音头受到变化磁场的作用,这个变化磁场的波形与原始声音录在磁带上时在磁头中产生的波形一样。这一磁场在放音头中产生交流信号。交流信号被放大并被传送到扬声器、耳机或其他输出设备。

## 9.3 机电变送器

机电变送器能将移动的机械能变换为电能或反过来将电能变为机械能。

### 9.3.1 位移变送器

位移变送器度量移动的距离或角度,或者两点之间的距离或角度。反之,它也能够将一个信号转变为有一定距离或角度的移动。能测量或产生直线移动的器件叫线位移变送器。如果是测量或产生角度移动的,这就是角位移变送器。

假定机器人的手臂在水平面内要旋转 $28^\circ$ 。指令发给机器人控制器,例如BR28(基轴旋转 $28^\circ$ )。机器人控制器(计算机)给终端执行器发出信号,终端执行器就顺时针旋转。角度距离变送器记录下旋转的角度,并给控制器发回信号。这一信号使终端执行器已经旋转的角度以线性比例增加。

当机器人控制器接收到BR28指令后,就使终端执行器开始旋转。数字28为进入机器人控制器的旋转信号设定了一个阈值。随着从位移变送器给出的信号增加,终端执行器达到旋转 $28^\circ$ 的阈值,控制器检测到这一信号并给终端执行器发出停止信号。

### 9.3.2 指示和控制器件

操纵杆是能够产生运动,或者能在二维或三维方向上控制变化量的控制器件。图9-5表示具有两个方向运动的操纵杆,两个方向标以 $+x/-x$ 和 $+y/-y$ 。该装置由一个可移动的杆或手柄及放入控制盒内的球轴承组成。杆用手来移动。操纵杆常用在计算机游戏中,用于向计算机和遥控机器人输入坐标。有些操纵杆可以顺时针或反时针转动,除了一般用的两个坐标外还可以加一个第三个方向的控制,标以 $+z/-z$ 。

**鼠标**是常用于个人计算机的外围设备。在一个平面上来回滑动鼠标，在显示屏上就会出现一个光标或箭头。按下鼠标上面的开关，计算机就可以完成箭头所指的某种功能。这种动作叫“单击”和“双击”。

**跟踪球**很像倒置的鼠标或者一个没有杆的二维操纵器。它不像鼠标那样需要在平面上来回推，计算机使用者只要移动球轴承，就能使显示的光标垂直和水平移动。按下键盘上的开关（跟踪球装在键盘上）就能使计算机去完成各种功能。

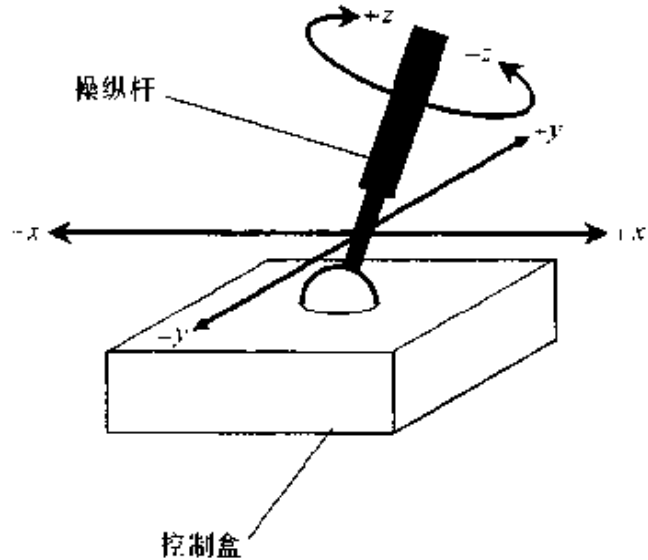


图 9-5 操纵杆装置控制二维  $(x, y)$  或三维  $(x, y, z)$  运动

**擦除头指示器**是直径约 5mm 的橡皮钮，通常装在计算机键盘中心，例如，在 G、H 和 B 键之间。计算机使用者按下橡皮钮就可以移动显示屏上的光标。垂直压按钮（朝键盘的背面方向）使光标往上移动；朝键盘的前方拉按钮使得光标向下移动。朝其他方向压均产生直观的光标移动，单击或双击键盘上的开关以完成各种功能。

**触摸板**是一块大小约 4cm × 6cm 的灵敏平板。使用者把手指放在板上来回移动，这就会造成显示屏上光标的直观移动。与跟踪球和擦除头指示器一样，用同样的方法单击和双击。

### 9.3.3 电动机

**电动机**将电能转变为机械能。电动机可以由交流电供电或由直流电供电，其尺寸范围，小的可以装进手表，大的电动机可以拉动旅客列车。

所有电动机都由于磁效应而工作。电流通过线圈绕组产生磁场，磁力产生转矩。通过线圈的电流越大，旋转力矩越大。**电枢线圈**与电动机的轴一起旋转。在直流电动机中，每半圈**换向器**就改变电流的方向，因此转矩一直是相同方向的。

当电动机接上负载后，要求使轴转动的转矩增加。电动机的功率越大，产生的转矩也越大。

### 9.3.4 步进电动机

*步进电动机*不是连续转动，而是只转动一个小增量角。*步进角*或每一次转动的范围随所用电动机的不同而不同。转动的范围可以从小于 $1^\circ$ 到 $1/4$ 圈( $90^\circ$ )。即使电流还维持着，步进电动机转过它的步进角后就停止。实际上，当步进电动机停止转动、线圈内还有电流流动时，转轴还承受着所加的转矩。

普通电动机每分钟要旋转几百甚至几千转。步进电动机的转速通常小于 $180\text{r}/\text{min}$ ，甚至还要低很多。对于普通电动机，电动机转得越快转矩就要增加。但是对于步进电动机，转得越快，转矩是降低的。步进电动机在慢速旋转时有最大的转动功率。

最常用的步进电动机有两种：两相步进电动机和四相步进电动机。*两相步进电动机*有两个线圈，即两相，被四根导线控制。*四相步进电动机*有四个相，八根导线。用往各相顺序依次加电流的办法使电动机步进。图9-6表示两相（图9-6a）和四相（图9-6b）步进电动机的示意图。表9-1表示对两相电动机的控制电流顺序，表9-2是对四相电动机的控制电流顺序。

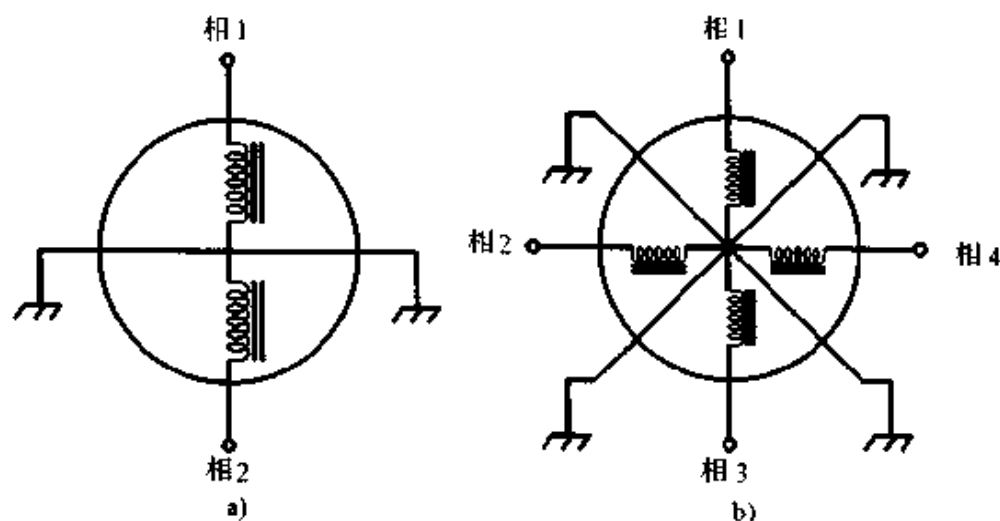


图 9-6 步进电动机

a) 两相步进电动机 b) 四相步进电动机

表 9-1 两相步进器控制

步	相 1	相 2	步	相 1	相 2
1	关断	关断	3	开通	开通
2	开通	关断	4	关断	开通

俯视读顺时针旋转

仰视读逆时针旋转

表 9-2 四相步进器控制

步	相 1	相 2	相 3	相 4
1	开通	关断	开通	关断
2	关断	开通	开通	关断
3	关断	开通	关断	开通
4	开通	关断	关断	开通

俯视读顺时针旋转

仰视读逆时针旋转

当步进电动机加上脉冲电流时，按表中所示电流旋转着通过各相，电动机将按每个脉冲旋转一步的方式转动，这样能够保持精确的速度。因为制动效应，在很宽的机械转动阻力范围内，速度将保持不变。

步进电动机可以用微型计算机控制。几个步进电动机都在单片微机控制下，用于全方位机器人的手臂中是很典型的。步进电动机特别适合于点到点的运动。采用步进电动机、用计算机控制的机器人和终端执行器可以完成复杂的、交错的任务。

### 9.3.5 自动同步机

*自动同步机* 是表明物体定位方向的指示装置。它由发射单元和指示单元所组成。随着发射单元的轴的旋转，指示单元的轴准确地跟随。最常见的应用是作为旋转天线方位指示器，见图 9-7。当天线旋转时，指示单元的轴跟随发射单元的轴转动同一个角度。自动同步机的水平方位范围从  $0^\circ$  到  $360^\circ$ ；上升方向从  $0^\circ$  到  $90^\circ$ 。

*同步机* 是用于机械装置控制的一种自动同步机。同步机适用于机器人的遥控（远程操纵）。某些同步机是可编程的，程序员向振荡器输

入一个数值，接收机照此改变位置。计算机使所执行的复杂移动顺序能准确无误。

### 9.3.6 发电机

发电机的结构基本上与普通电动机相似，不过它们的功能是相反的。有些发电机实际上可以当作电动机使用，它们叫做电动机/发电机。一个典型的发电机是靠强磁场中旋转的线圈来产生交流电。此外，也可以是一个永久磁铁在金属导线绕组内旋转。旋转轴由内燃机、汽轮机或其他机械动力来驱动。发电机也可以采用换向器来产生脉动直流输出，再经过滤波得到纯的直流电以供电子设备使用。

小型移动式柴油发电机能够提供几千瓦电能，它可以在商店内买到。较大的发电机可安装在家里或楼内，在发生市电电网断电事故时继续供给电能。大型发电机安装在电站，它产生的电能功率超过兆瓦级。

小的发电机通常用于同步系统，特殊发电机可用于遥控机器人装置。发电机可以用来测量正在运动的车辆和机器人的速度。发电机的轴与一个轮子相连，则发电机的输出电压和频率就直接随轮子的角速度而变化。

### 9.3.7 光编码器

在数字无线电中，频率调节是分步进行的。在高频通信设备中，一般每步是10Hz。在甚高频和特高频时，对于无线电报、无线传真和单边带，每步10或100Hz；对于频率调制，每步一般为5kHz。大多数高保真接收机用数字调谐。在标准的调幅广播频段，通常的间隔为10kHz，在调频广播频段，间隔为200kHz。

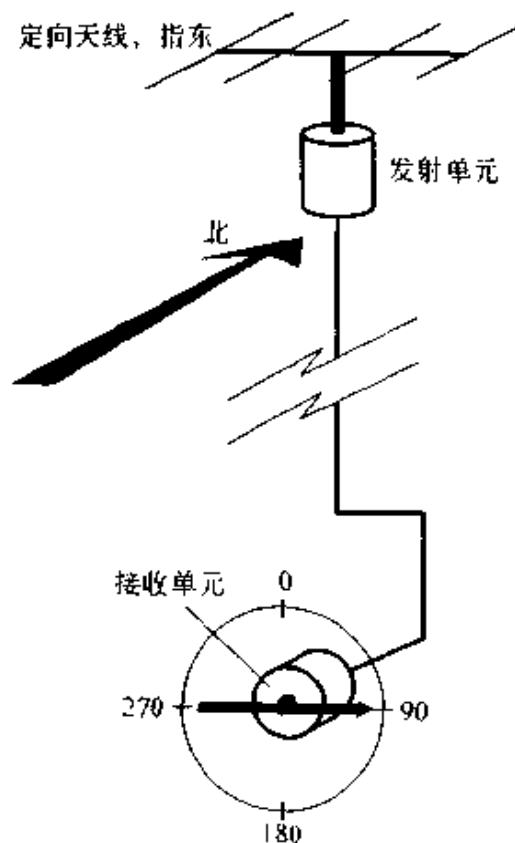


图9-7 用作旋转天线方位指示器的自动同步机

调谐用的机械开关会受腐蚀和随时间而磨损，有一种**光编码器**可以替代机械开关。它由发光二极管、光电探测器和一个叫**斩波轮**的器件所组成。发光二极管通过斩波轮照在光电探测器上，轮子上有透明和不透明区交替的辐射状带，见图 9-8。轮子连接在调谐旋钮上，当旋钮转动时光束被遮断，每一次遮挡使频率改变一个特定的增量。“频率升高”和“频率降低”（分别对应于轴的顺时针和逆时针转动）之间的差由所用的两个发光二极管和两个光电探测器来决定。两个器件是紧挨着放的，转动的检测可以由光电探测器检测到的第一次光束遮挡来决定。

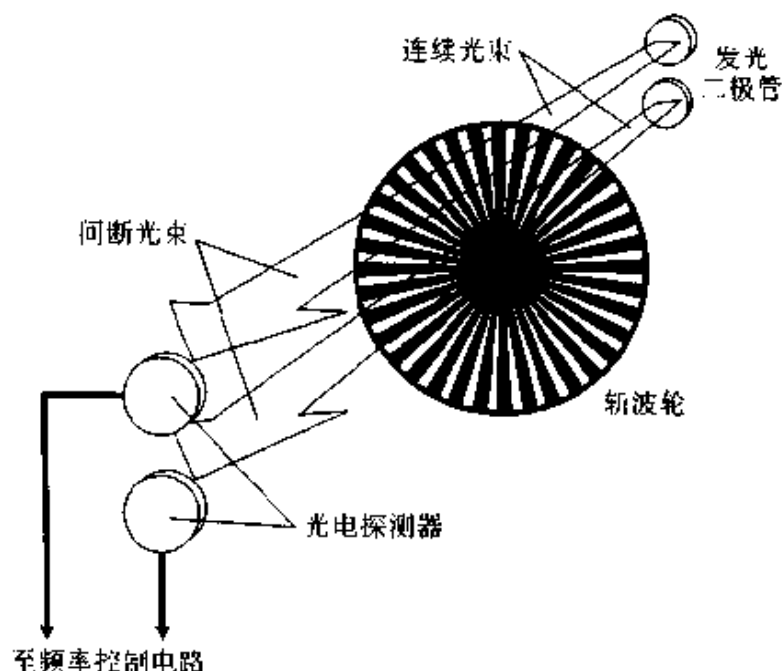


图 9-8 采用发光二极管和光电探测器来检测转动方向和程度的光学编码器

## 9.4 传感器

**传感器**是用一个或多个变送器来探测或测量某种现象，如温度、表面结构、接近程度和某种物质的存在。

### 9.4.1 电容（式）压力传感器

**电容（式）压力传感器**如图 9-9 所示，两个金属板之间夹一层非导体海绵构成一个电容器。将它与一个电感并联，组成的  $LC$  电路决定了

振荡器的频率。如果一个物体碰了一下传感器，板之间的距离瞬间减小。这就增加了电容量，使振荡频率有一个跌落。当物体离开传感器后，海绵体弹回，两板之间恢复到原来的距离，振荡频率就恢复到正常。

采用模拟-数字转换器可以把电容式压力传感器的输出转变为数字信号。这一信号可以输入微型计算机，例如机器人控制器。压力传感器可以

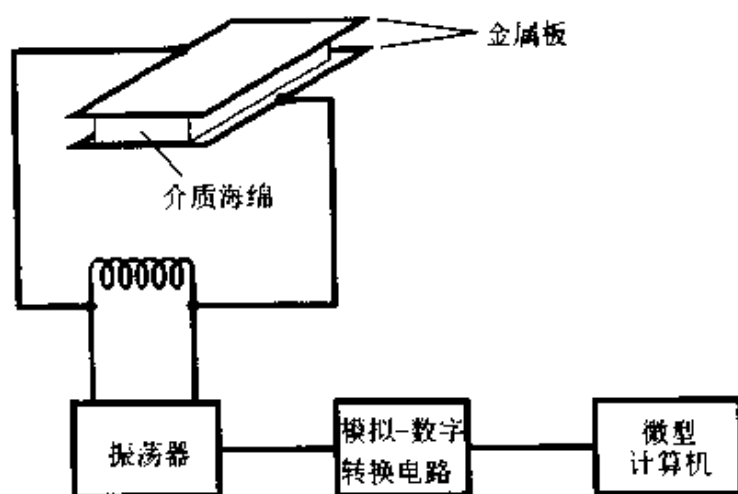


图 9-9 电容(式)压力传感器检测所加外力

以装在移动机器人的不同地方，如前面、背面和侧面。然后在机器人前面的传感器上加一压力就会发出一个信号给控制器，它告诉机器人向后运动。

电容(式)压力传感器能够被自己附近的大块导体或半导体物体所影响。如果这些东西接近变送器时，尽管没有与它直接接触，电容也会变化。这种现象是由于体电容造成的。当需要避免这种影响时可以采用弹性器件。

#### 9.4.2 弹性体

弹性体是像橡胶或塑料那样的柔性物质，它可以用来检测机械压力的存在与否。图 9-10 表示弹性体是如何能够用来检测和确定压力点的。弹性体能够导电，但不是特别好，其密度类似于海绵，因此能够被压缩，它的两侧装有导电板。

当弹性体的某一点上出现压力时，材料受到压缩，降低了电阻，就可以检测出来两板之间的电流增加。压力越大，弹性体压缩得越厉害，电流就增加得越大。电流变化的数据可以输入像机器人控制器那样的微型计算机。

#### 9.4.3 背压力传感器

任何一个电动机都产生可测压力，这取决于电动机的转矩。背压



力传感器能够检出和测量在任何给定时间内所用电动机的转矩。传感器通常产生一个可变电压信号，随着转矩增加此信号也增加，见图 9-11。

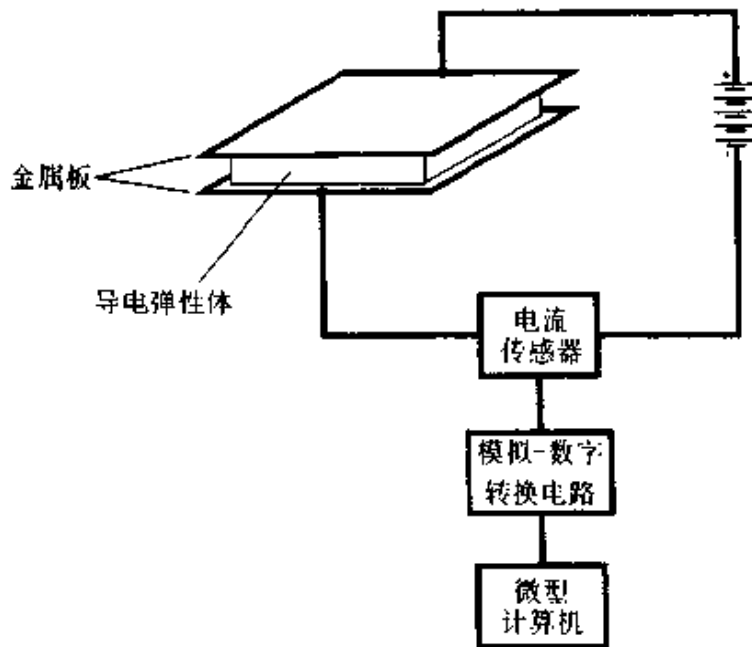


图 9-10 没有电容效应的弹性体型压力传感器检测所加外力

背压力传感器被用来限制机器人夹持器、臂、钻、锤或其他装置所用的力。传感器产生的背压电压信号能减小所用电动机的转矩。这能防止由机器人操纵的物体的危险，也有助于保证工作在机器人周围的人员的安全。

#### 9.4.4 电容（式）接近传感器

电容（式）接近传感器由一个高频振荡器、一个频率检测器和与振荡电路相连的金属板组成，见图 9-12。振荡

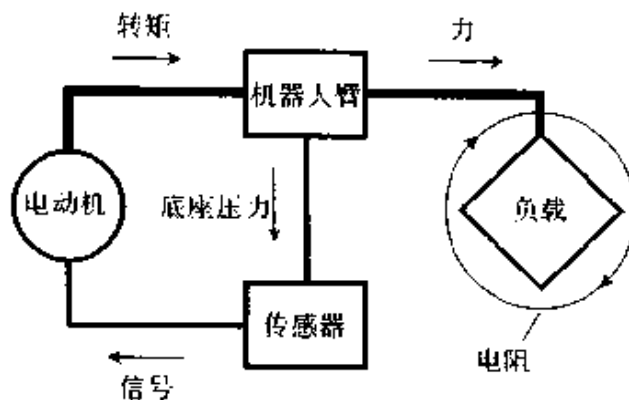


图 9-11 背压力传感器用来控制加在机器人手臂或其他机械装置上的力

器是这样设计的，当平板电容相对于周围环境发生变化，振荡器频率就发生变化。这一变化被检频器接收并传送信号给微型计算机。

具有某种导电能力的物体，如室内电线、人、汽车或冰箱比不导电的物体，如木头或塑料家具更容易被电容(式)传感器感受，因此常常需要其他类型的接近传感器，使机器人能够在房间或办公室的复杂环境下很好运动。

### 9.4.5 光电接近传感器

如果机器人接近某个物体了，反射光会告诉它并提供一条路径。*光电接近传感器*由一个光束发生器、一个光电探测器、一个频率灵敏放大器和一个微型计算机组成，如图 9-13。

光束从物体反射被光电探测器接收。光束被调制在某一频率例如 1000Hz，放大器只对调制在这个频率的光有响应，这样就可以防止由灯光或阳光造成的虚假图像。如果机器人快要接近某一物体时，它的控制器(微型计算机)接收到的反射光束更强，这样机器人就能够避开这个物体。

这种接近传感的方法对某些不反射光的物体或者很斜的接近窗户、镜子的物体不起作用。这种情况下光束不反射进光电探测器。

### 9.4.6 饱和式磁力仪

当在特殊环境中，其他的位置传感器不能工作时，

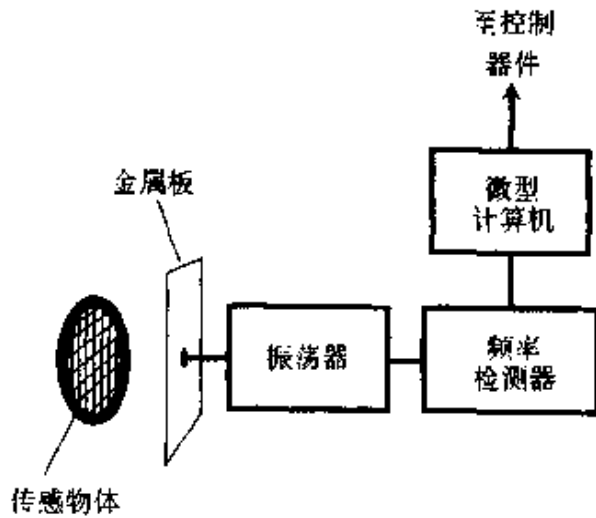


图 9-12 电容(式)接近传感器能够检测出附近导电或半导电的物体

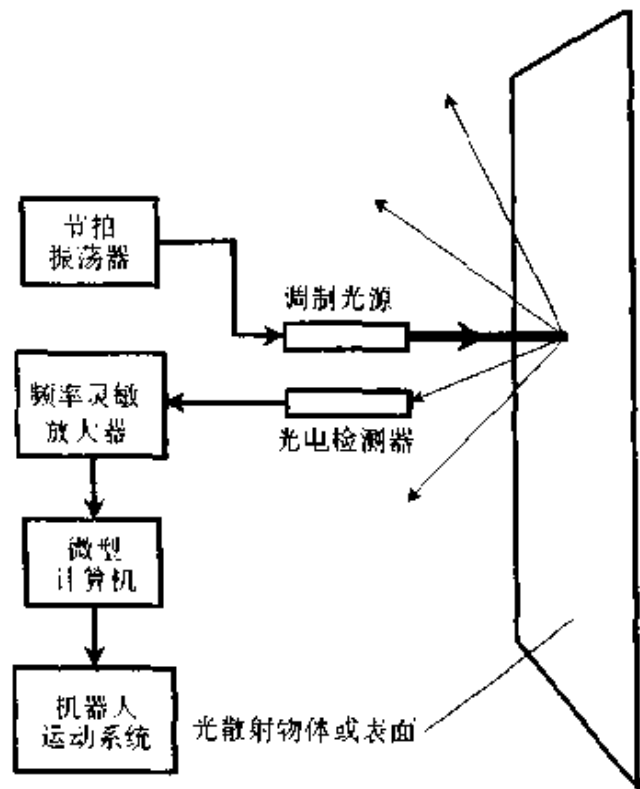


图 9-13 光电接近传感器检测散射光

可以用**饱和式磁力仪**。这一系统应用了灵敏的磁感受器和微型计算机来感受人工产生磁场的存在和检测磁场的变化。

通过确定电磁铁产生的磁力线的方向可以在一定面积内进行导引，这些电磁铁装在房间的墙内、地板内和/或天花板内。对于房间内的每一点，磁力线都有一定的方向和强度。在机器人工作环境的每一点和磁力线强度和方向性之间存在同一性，或点到点的对应关系。为机器人控制器设计这种程序，使其知道这一对应关系。这就有可能使机器很准确地确定它的位置。

#### 9.4.7 表面结构传感器

**表面结构传感器**有能力确定一个表面是“光滑”的还是“粗糙”的。表面结构传感器的基本部分包括一个激光器和若干个光敏传感器。

图 9-14 表示利用一个激光器 (L) 和传感器 (S) 如何能够区别光滑表面 (图 9-14a) 和粗糙表面 (图 9-14b)。光滑表面，如抛光的汽车盖，反射光与人射光同一角度。但是对于粗糙表面，例如一张纸，反射光是散射光。从光滑表面反射的光束在沿反射角等于入射角的路径上进入传感器。而从粗糙表面反射的光进入所有的传感器。

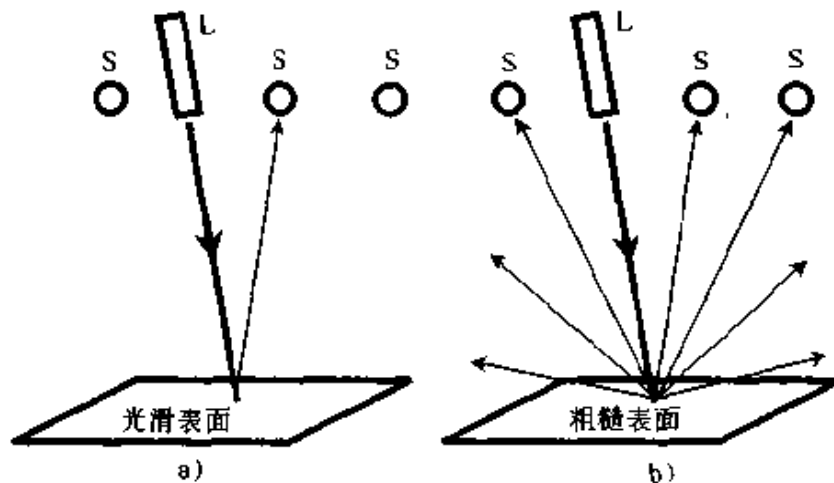


图 9-14 表面结构传感器的原理

a) 所测表面为光滑表面 b) 所测表面为粗糙表面

#### 9.4.8 烟雾检测器

正常的空气有特有的**介电常数**，它是空气能够维持电荷程度的度量。空气也有一个**离化电位**，它是从原子释放电子所需的能量。许多因素能影响这些性质。通常有影响的因素是相对湿度、气压、有无烟

雾和气体相对浓度的变化。

**烟雾检测器**是通过感受空气的介电常数和/或离化电位的变化而工作的。两块带电荷的板相隔一固定距离而放置，如图 9-15，如果空气的性质改变了，板就要充电或放电，这就要产生瞬时电流。烟雾检测器可以用来报警，通知消防部门和使喷水系统工作。

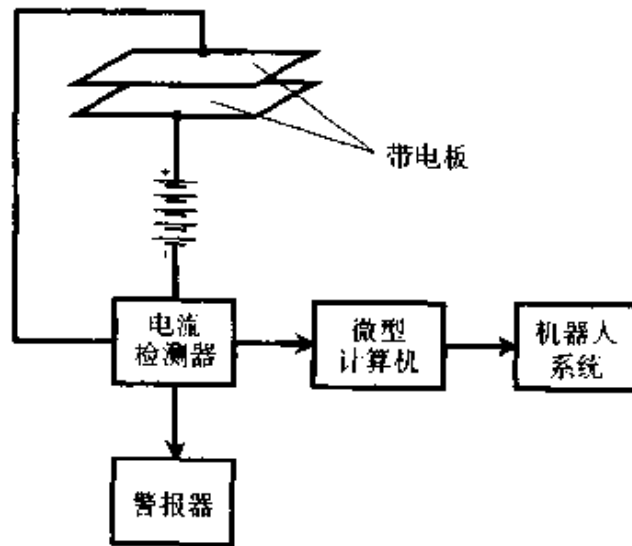


图 9-15 简单的烟雾检测器感受空气特征的变化

# 第 10 章 电 子 管

电子管也称管子，用于电子设备中。在电子管中荷电载流子是自由电子，它们在器件内电极间渡越。这一点使得电子管与半导体器件有根本的不同，后者中的荷电载流子是在固体介质中的原子间运动的。

## 10.1 电子管的类型

有两种不同类型的电子管：真空管和充气管。由其名称可知真空管的外壳内气体全部被排除，充气管内则含有低压强的元素蒸气。

### 10.1.1 真空管

真空管将电子加速到高速，从而形成大电流。可以将该电流聚焦成束，并引导到指定方向。束的强度和（或）方向可以被非常快速地改变，由此产生出各种有用的效应，例如整流、检波、振荡、放大、混频、波形显示、波谱显示以及视频成像等。电子管先于双极型和场效应晶体管问世。

### 10.1.2 充气管

充气管具有不随电流大小变化的稳压特性，因此可用作高电压、大电流功率源的稳压器。充气管能承受导致半导体调整器件毁坏的工作条件。充气管能发射红外光、可见光和（或）紫外光，这种特性使它能用作装饰。用一个小氖管可设计成一个音频张弛振荡器，见图 10-1。

### 10.1.3 二极管

20 世纪前，科学家已经知道电子能使电流通过真空而传输，他们

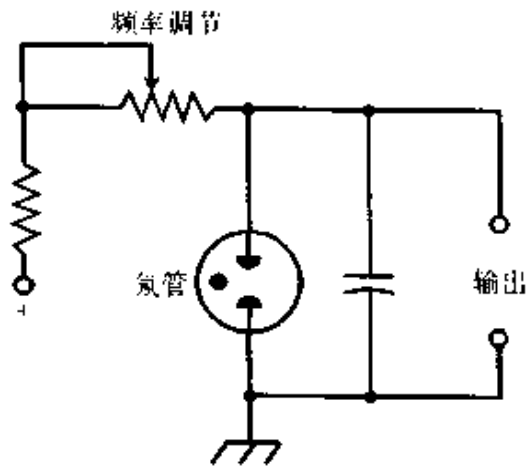


图 10-1 张弛振荡器

还知道热电极比冷电极更容易发射电子。利用这些现象制成了第一种电子管，即**二极管**。它可用于整流。

真空二极管现在已很少应用，但在一些长周期占空比为100%、需要提供几千伏的电源中还可发现它的存在。

#### 10.1.4 电极

在任何电子管中，发射电子的电极是**阴极**。阴极通常采用类似于白炽灯中的金属丝，即**灯丝**。加热驱使电子从阴极出来。收集电子的电极称为**阳极**，也称**板极**。居中的**栅极**控制从阴极流向阳极的电子流。在阴极射线管中用磁**偏转线圈**或静电**偏转板**控制电子束。

#### 10.1.5 直热式阴极

在一些管子中，灯丝本身用作阴极，这类电极称为**直热式阴极**，电源负电压直接加在灯丝上。对于大多数管子，灯丝电压为直流6V或12V。采用直热式阴极的二极管符号见图10-2a。

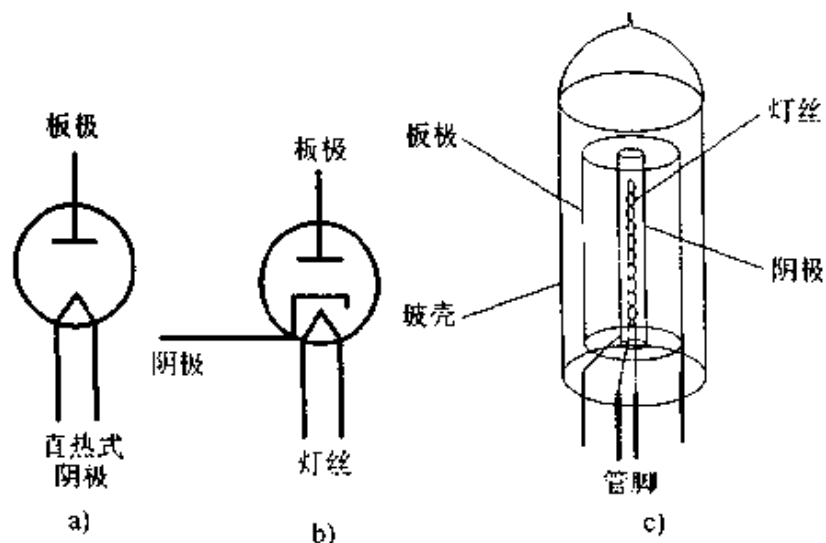


图10-2 二极管

a) 直热式阴极二极管的符号 b) 间热式阴极二极管的符号

c) 二极管结构简图

#### 10.1.6 间热式阴极

通常将灯丝封装在圆筒型阴极中，靠红外辐射将阴极加热。阴极本身通常是接地的，灯丝电压通常是交流6V或12V。采用**间热式阴极**

的二极管的符号见图 10-2b。

不管是直热式还是间热式阴极，电子都是被灯丝产生的热从元素中驱动出来的。电子管中的阴极类似于场效应晶体管（FET）中的源极或双极型晶体管中的发射极。

因为电子管中的电子发射依赖于灯丝或“热子”，所以管子需要一定的升温时间。升温时间是不同的，对于直热式阴极小电子管为几秒钟，对于间热式阴极大功率放大管为几分钟。

### 10.1.7 冷阴极

在充气管中，阴极不带加热灯丝，称这类阴极为冷阴极。各种化学元素被用在充气管中。在辉光器件中常用氖气、氩气和氙气，在充气电压调整管（VR）中使用水银蒸气。水银在室温下是液体，将其加热成蒸气约需两分钟，这就是水银蒸气电压调整管所需的升温时间。

### 10.1.8 板极

电子管的板极或阳极是一个与阴极和灯丝同轴的圆筒，见图 10-2c。板极与直流电源的正极相连，板极的工作电压范围从 50V 至大于 3kV。这类电压对人体有潜在危险，因此对真空管不熟悉的技术人员不应从事带有真空管的设备的维护工作。

电子管型放大电路的输出几乎总是在板极回路。从板极输出的信号具有高的输出阻抗，与结型场效应晶体管回路相似。

## 10.2 三极管

在二极管中，从阴极到板极的电子流取决于直流供电电压，该电压越大，而其他参数保持恒定时，流过器件的电流越大。

也可通过阴极和板极之间的一个电极来控制电流，称这个电极为控制栅极，或简称为栅极，它是一个能让电子通过的丝网或屏。如果在栅极上加上相对阴极为负的电压，它将阻止电子流过。栅极偏置越大，栅极阻止电子流过管子的效应就越大。

具有一个栅极的管子称为三极管，其符号见图 10-3a。对间热式阴极，符号中将灯丝略去；对于直热式阴极，将灯丝画成阴极符号，以上约定是标准的。

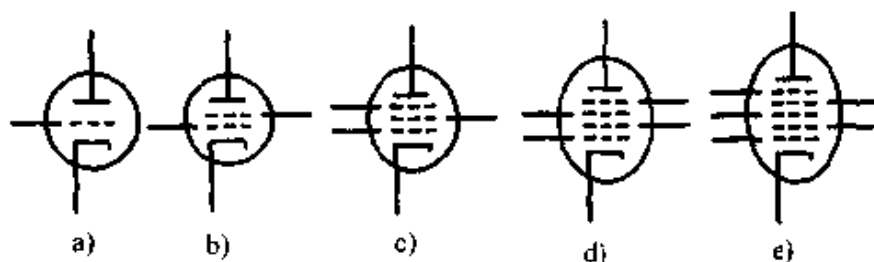


图 10-3 具有栅极的真空管的符号

a) 三极管 b) 四极管 c) 五极管 d) 六极管 e) 七极管

### 10.3 多栅管

有些管子具有不只一个栅极，附加的这些栅极用来改善电子管放大器的增益和稳定性。

#### 10.3.1 四极管

可以将第二个栅极加在控制栅和板极之间。它是一个螺旋线或一个稀疏的屏，称为**屏栅**。该栅极上的电压通常为板极电压的 25%~35%。

屏栅减少控制栅和板极间的电容，因此可以将放大器的振荡几率降低至最小。屏栅也可用作第二控制栅，这样在一个管子上可以注入两个信号。这类管子具有 4 个极，称为**四极管**，它的符号见图 10-3b。

#### 10.3.2 五极管

在四极管中电子轰击板极，部分电子反弹回来或从板极打出其他电子。这些二次电子中的一部分通过屏栅回路而不是通过板极回路离开管子，结果是板流减少，屏流增加。这种所谓二次发射会使管子性能变坏，在高功率情况下会使屏流高到使电极烧坏的程度。

在屏栅与板极间加入另一个栅极可以控制过分的屏流，称这个栅极为**抑制栅**。抑制栅将从板极发射的二次电子排斥回去，使其中大部分不能到达屏栅。加了抑制栅后，控制栅与板极间的电容比只有屏栅时降得更多。

具有 5 个极的**五极管**比起四极管或三极管的稳定性和增益都更高。五极管的符号见图 10-3c。抑制栅通常与阴极相连。相对于屏栅和板极，它带负电荷。



### 10.3.3 六极管和七极管

在一些较老的收音机和电视机中，有时使用具有4个或5个栅极的管子，这些管子具有6个或7个电极，相应地称为六极管和七极管，它们的主要功能是混频。六极管与七极管的符号分别见图10-3d、e。

在现代电子学中，由于使用固体器件混合信号，所以将不会遇见六极管和七极管。但是如果你喜欢玩古老的收音机，则应该熟悉它们。六极管和七极管已是古董，坏了的话不易找到替换件。

### 10.3.4 极间电容

在真空管中，阴极、各栅极和板极互相间存在电容。极间电容是器件还能产生增益的频率范围的第一限制因素。在一个典型管子中，极间电容为几个皮法拉。在低频时，它是可以忽略的，但在超高频和特高频情况下，它变成一个重要的考虑因素。用于超高频和特高频的真空管，设计时必须将极间电容减至最小。

## 10.4 基本电路

真空管的最普通应用是放大器，特别是用在功率超过1kW的超高频和特高频无线电和电视发射机中。在一些高保真音响系统中也应用真空管。近年来，它们又受到了某些流行音乐队伍的青睐。真空管电路接法有两种：阴极接地和栅极接地。

### 10.4.1 阴极接地

图10-4是阴极接地三极管电路原理图。这个电路是多管型射频功率放大器和音频放大器的基础，其输入阻抗中等，输出阻抗高。在输出回路加一个带抽头线圈或使用一个变压器可使放大器与负载之间得到匹配。

### 10.4.2 栅极接地

栅极接地方式比之阴极接地需要更多的驱动功率。对于阴极接地放

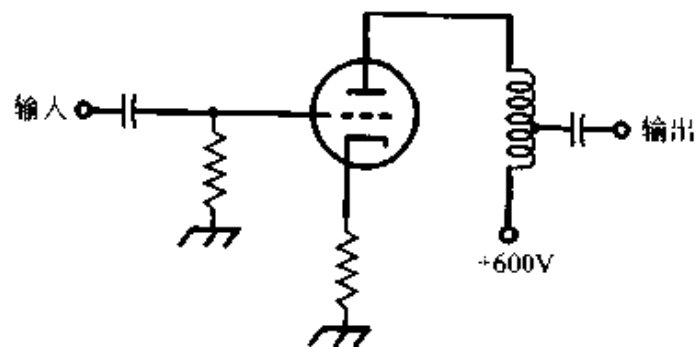


图10-4 阴极接地电路

大器，10W 输入可产生 1kW 射频功率输出，而对于栅极接地放大器，产生 1kW 射频功率输出需要 50~100W 输入功率驱动。

基本的栅极接地电路见图 10-5。阴极输入阻抗低，板极输出阻抗高，输出阻抗的匹配可采用与阴极接地方式中相类似的方法。

作为举例，图 10-4 与 10-5 电路中板极电压为 +600V。如果这个放大器的驱动功率足够，且偏压正确，则可产生 70~150W 的信号输出。对于一个额定输出功率 1kW 的放大器将需要 2~5kV 板极电压，后者取决于管子的特性曲线与放大器运行在什么类型。

#### 10.4.3 束射功率管

束射功率管是采用了一个能将电子限制在一定方向的电极的真空管。其结果是产生一个密集的电子束。特别对于像射频发送设备这种需要大功率输出的场合，束射功率管比普通真空管更有效。束射功率管中各栅极是相互对准的，这样做可进一步有助于有效工作。束射功率管可以是三极管、四极管和五极管。人们更愿意使用五极束射管，因为其中的抑制栅可以阻止由于高电子速率而引起的过分的屏栅电流。

#### 10.4.4 冷却

在功率放大器中，必须对真空管采取某种冷却措施，否则管子将

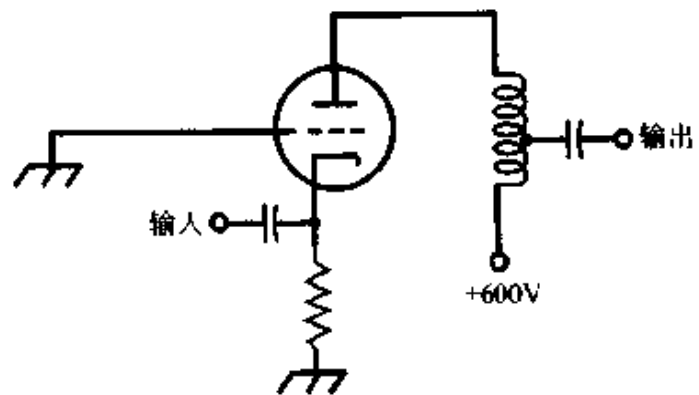


图 10-5 栅极接地电路

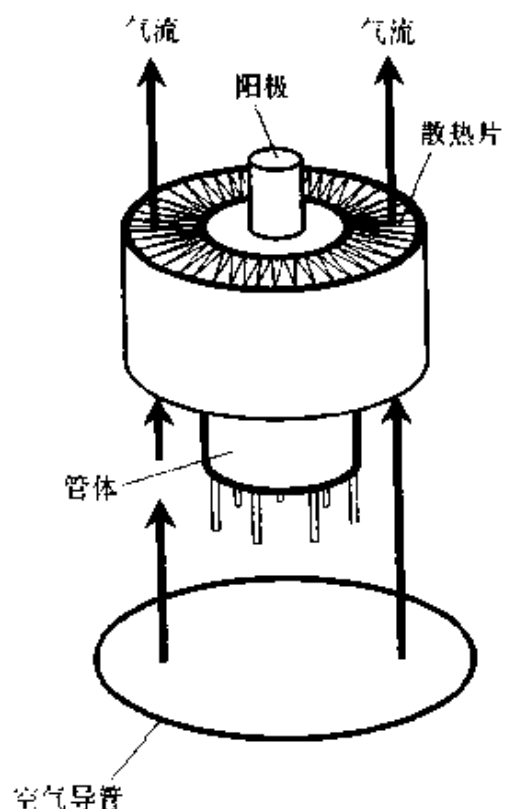


图 10-6 对流型气冷

被烧毁。为达到此目的的常用方法是风冷。采用风扇（也称鼓风机）强迫空气吹过管子或通过散热器，见图 10-6。

有时用传导冷却代替风冷，由大量金属组成的散热器直接与管子外壳相接触，管子的阳极与外壳是热接触的，散热器将过剩的热从阳极导走。

## 10.5 阴极射线管

每个人都见到过电视屏幕和桌上计算机显示器。大多数人已见过示波器或谱线分析显示器。这些设备一般都使用阴极射线管。

### 10.5.1 电子束

在阴极射线管中，电子枪发射电子并将它们会聚成束，加速流过带正电荷的阳极，然后电子束打到内表面涂敷有荧光粉的玻璃上。从阴极射线管的正面可以看到荧光粉发光，用磁场或静电场控制电子束，使它扫描出图形。

### 10.5.2 电磁阴极射线管

电磁阴极射线管的示意图见图 10-7。有两组偏转线圈，一组用于水平，另一组用于垂直（在图中为了清晰，只画出水平偏转线圈）。线圈中电流越大，磁场强度越强，电子束偏转越大。电子束的偏转方向与磁力线成直角。

在示波器中，水平偏转线圈接收锯齿波。于是电子束以精密可调节的速率从左向右（从屏前方看）扫描。每次从左向右扫描完后，束从屏的右边跳回到左边，为下一次扫描做好准备。垂直偏转线圈接收要分析的波形。这个波形使电子束波浪似的上、下起伏，垂直和水平电子束运动的组合产生作为时间函数的输入波形的显示。

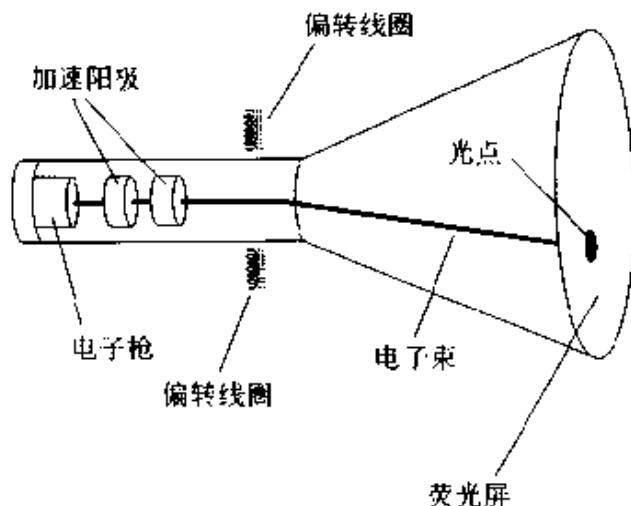


图 10-7 电磁阴极射线管示意图

### 10.5.3 静电阴极射线管

在静电阴极射线管中，荷电金属板用于电子束的偏转。当电压加在这些偏转板上时，电子束沿电力线方向弯曲。加在偏转板上的电压越高，电场越强，电子束的偏转量就越大。静电阴极射线管与电磁阴极射线管相比，其主要优点是前者消耗的功率要少得多。

## 10.6 摄像管

能将可见光转变为变化电流的电子管可用作摄像管。两种最常用的摄像管是视像管与超正析像管。

### 10.6.1 视像管

实际上每个盒式录像机都使用一个视像管，闭路电视也应用视像管。视像管的主要优点是体积小，重量轻。

在视像管中，透镜将入射的像聚焦到光电导屏上，电子枪产生电子束，用类似于电磁阴极射线管中运行的方法，借助于偏转线圈将电子束在屏上扫描。视像管中的扫描与任何显示图像用的阴极射线管中的扫描同步。

当电子束扫描光电导表面时，屏面上带有电荷。屏面上在一定区域内的放电速率取决于落在该区域内可见光的强度。图 10-8 是视像管的简化工作原理图。

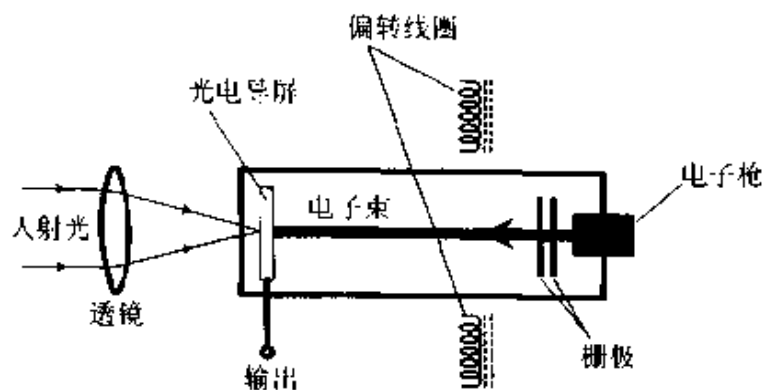


图 10-8 视像管的工作原理图

视像管是灵敏的，但在低光照下它的响应缓慢，这造成图像会维持一个短时间，使运动景色显示得很差。

### 10.6.2 超正析像管

另一类摄像管也十分灵敏，并对图像变化有较快的响应，这就是**超正析像管**。其结构与视像管十分类似，但在**光阴极**后面多了一个**靶电极**，如图10-9。当从**光阴极**上发出的电子打击**靶电极**时，产生了若干二次电子发射。因此超正析像管的作用如同摄像机中的视频信号放大器。

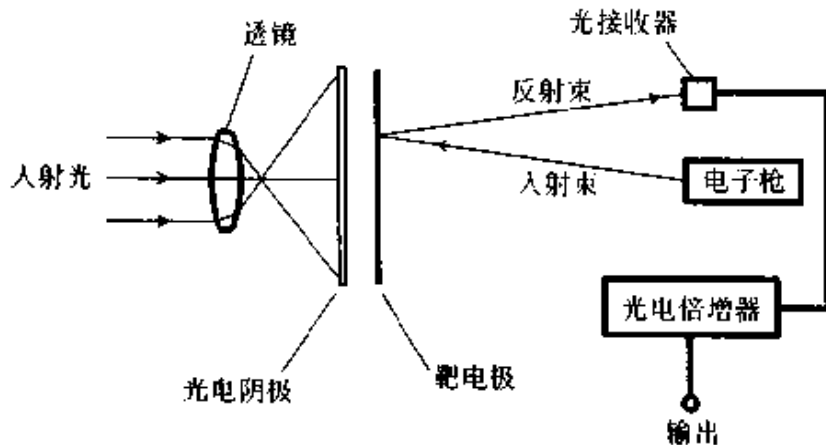


图 10-9 超正析像管的工作原理图

从电子枪发出的细电子束扫描靶电极。二次电子引起电子束中部分电子反射回电子枪。二次电子发射最大的那块靶电极面积产生最高的返回束强度，具有最小发射的区域产生最低的返回束强度。最大返回束强度对应于视频图像的最亮部分。电子束扫描靶电极时，返回束被调制，并被接收电极采集。

超正析像管的主要缺点是产生显著的噪声附加到输出信号上。但是当需要快速响应，且照明是从不亮到非常亮的范围时，最好选择超正析像管作为摄像管。在商业广播中它是很常见的。

### 10.6.3 光电倍增管

**光电倍增管**是一种真空管器件，它产生的可变电流取决于入射光的光强。其名称来源于它是真正自己放大它的输出，因此获得极高的灵敏度这个事实。光电倍增管用于低光强时的测量。

光电倍增管中有一个**光阴极**，它发射的电子正比于入射光的光强。这些电子被聚焦成束，并打在一个被称为**打拿极**的电极上。对于每个打上的电子，打拿极产生若干个二次电子，最后所得到的电子被阳极收集。

一个光电倍增管有数个打拿极，因此增益很高。级联打拿极可以增加灵敏度，但是光阴极的背景电子发射或暗噪声限制了级联的程度。

#### 10.6.4 析像管

析像管具有光电倍增管的形式，用透镜将光会聚到半透明光阴极上，该表面发射正比于光强的电子。从光阴极发出的电子指向一块带有一个小孔的档板，加有同步扫描电压的垂直和水平偏转板将从光阴极来的电子束扫过小孔。经过小孔的电子流是与图像的明暗性质有关，即是被调制了的。

析像管的图像分辨率取决于小孔大小，孔越小，图像越清晰，但是有一个极限点，这个限制是孔小到什么程度仍能有足够的电子通过，并且避免产生衍射花纹。析像管的暗电流噪声十分小，因此具有很好的信噪比。

### 10.7 行波管

行波管主要用于超高频和微波频率。还有几种管子，例如磁控管和速调管。

#### 10.7.1 磁控管

如图 10-10 所示，磁控管由阴极和环绕的阳极组成。阳极用径向隔片成分区或腔体（图中为了便于叙述只画出两个腔体，通常有若干个）。从阳极中的窗口输出，并进入用作射频能量传输线的波导。将阴极、阳极分别与高压源的负极、正极相连接，因此电子流是径向向外的。施加穿过腔体的纵向磁场，结果电子轨迹弯曲成螺旋线。高压产生的电场与纵向磁场的互相作用和腔体效应引起电子群聚

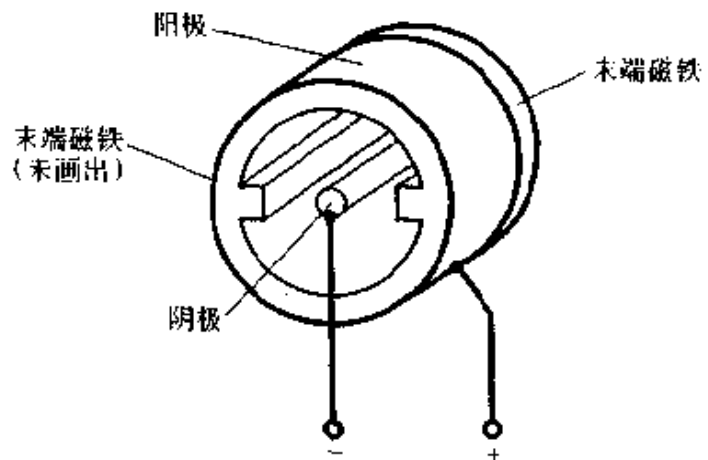


图 10-10 磁控管（为了便于说明只画出两个腔体，一般有若干个腔体）

成“云”。电子云的旋涡运动在阳极中引起波动电流，频率取决于腔体的形状和尺寸。小腔体引起最高的振荡频率，较大的腔体产生相对较低的频率。

磁控管在 1GHz 频率下能产生大于 1kW 的射频功率。当频率增加时，可实现的功率输出减小。在 10GHz 下，典型磁控管产生约 20W 的射频功率输出。

### 10.7.2 速调管

速调管是直线束电子管。它有一个电子枪、一个或数个腔体和一个调制电子束的器件。它具有几种不同型式，最常用的是多腔速调管和反射速调管。

图 10-11 是多腔速调管的工作原理图。在第一个腔体中，电子束的速度受到调制，当电子束经过下一个腔体时，电子束中的电子密度改变，中间腔增大了电子束调制的幅度，结果产生了放大作用，从最后一个腔体输出。在某些多腔速调管中，峰值功率超过 1MW ( $10^6$ W)，虽然平均功率小得多。

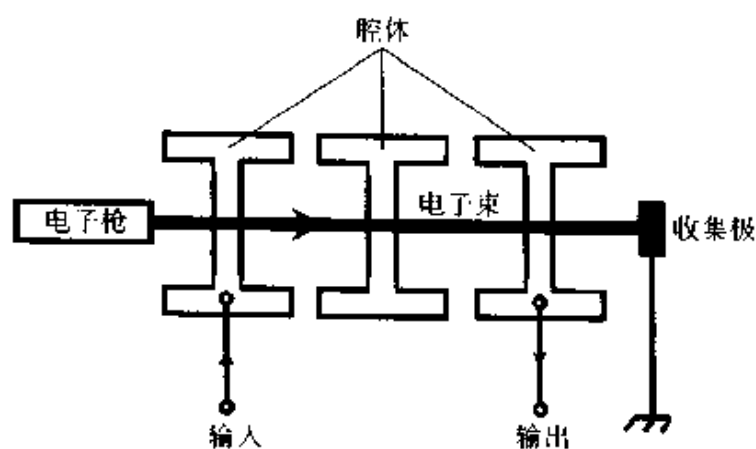


图 10-11 多腔速调管的工作原理图

反射速调管只有一个腔体，一个拒斥场引起电子束周期性地变换方向，这产生能从电子束中汲取大量能量的相位逆向。典型的反射速调管产生几瓦量级的超高频和微波信号。

# 第 11 章 振 荡 器

有些振荡器工作于音频，另一些用于产生射频信号。它们大多数形成正弦波，然而有一些则形成方波、锯齿波或别的波形。

在无线电通信中，振荡器产生最终要发送到空中的信号。为了发送数据，从振荡器发出的信号必须经过调制。在无线电和电视接收机中射频振荡器被用于频率控制、检波和混频。音频振荡器在音乐合成器、传真调制解调器、门铃、信号发送装置、警报器、警铃和电子玩具中都有应用。

## 11.1 射频振荡器

对于振荡电路，必须是增益高、正反馈和从输出到输入的耦合良好。在振荡器设计中，人们多喜欢用共发射极与共源极电路，也可用共基极和共栅极电路产生振荡，但是这些电路更常用于射频功率放大器。

### 11.1.1 反馈

用调谐方法可以控制射频振荡器的频率。这些振荡器常用电感电容 ( $LC$ ) 组合或电阻电容 ( $RC$ ) 组合。 $LC$  电路通常用于射频、 $RC$  电路常用于音频振荡器。

调谐电路对一个单频为低损耗，而对其他频率为高损耗，见图 11-1。结果是振荡发生在可预先设定、稳定的且由电感和电容或电阻和电容决定的频率上。

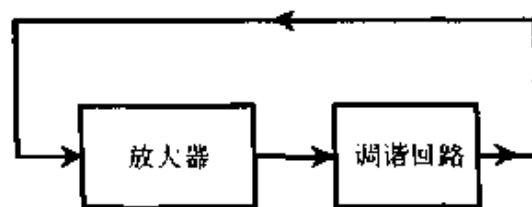


图 11-1 振荡器的基本概念

### 11.1.2 阿姆斯特朗电路

通过变压器将反馈信号反相后，将输出信号反馈到输入端，这是共发射极或共源极放大器能成为振荡器的原理。将二次绕组两端倒一下就能将变压器输出的相位反相。图 11-2a 采用一个共发射极 NPN 双



极型晶体管放大器,其中集电极回路通过变压器耦合到发射极回路。在图 11-2b 中给出了采用 N 沟道结型场效应晶体管 (JFET) 电路。这些电路是阿穆斯特朗振荡器。

振荡器的频率由变压器一次或二次绕组上并联的电容控制,绕组的电感和与之并联的电容形成一个谐振电路。振荡器的基频由下式决定:

$$f = \frac{1}{2\pi (LC)^{1/2}}$$

式中  $f$  是频率,以兆赫计;  
 $L$  是变压器绕组的电感,以微亨计;  
 $C$  是并联电容,以微法计。此外,对于低频应用, $f$  可以以赫兹计, $L$  以亨计, $C$  以法拉计。

### 11.1.3 哈脱莱电路

图 11-3 表示获得工作于射频的反馈可控的方法。在图 11-3a 中用的是一个 NPN 双极型晶体管,在 11-3b 中用的是一个 N 沟道结型场效应晶体管(同样可用 PNP 和 P 沟道电路,只是供电由正改为负)。该电路使用一个单线圈,其上带抽头以提供反馈,一个与线圈并联的可变电容确定了振荡频率。这是一种哈脱莱振荡器。

哈脱莱电路将其放大的功率的约 25% 用作反馈,剩下的功率才用于输出。振荡器产生的输出功率一般不超过几分之一瓦。如果需要更多功率,可使用一级或多级放大器将信号放大。重要的是只使用为获

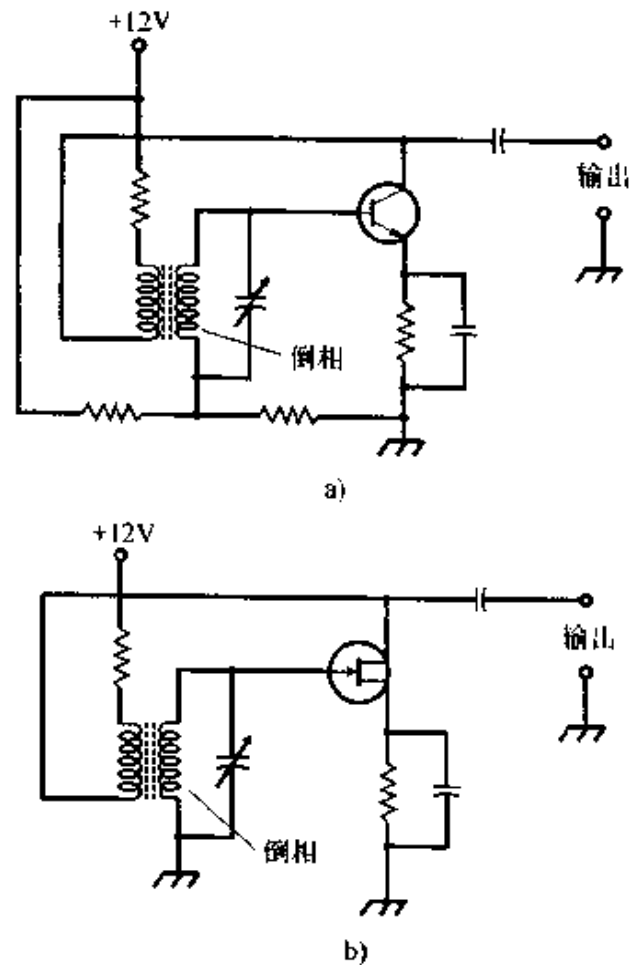


图 11-2 阿穆斯特朗振荡器

a) 采用 NPN 双极型晶体管 b) 采用 N 沟道结型场效应晶体管

得振荡所必须的最小反馈量，抽头位置决定反馈量。

#### 11.1.4 考比兹电路

提供射频反馈的另一个方法是在调谐电路中不用电感抽头而用电容。在图 11-4 中是采用 NPN 双极型晶体管 (图 11-4a) 和 N 沟道结型场效应晶体管 (图 11-4b) 的考比兹振荡器电路。

反馈量决定于电容比，振荡频率取决于总电容  $C$  和电感  $L$ 。上述诸振频率的通用公式仍可用。若串联电容值为  $C_1$  和  $C_2$ ，则总电容是

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

在考比兹电路中，比之电容，宁可使电感可变，这是为了方便。为了特殊应用，在两段之间寻找有正确电容比的双可变电容器是困难的，但是用一对固定电容器很容易调节比值。

在射频振荡器中使用可变电感是较复杂的。可以使用可变磁导率线圈，但铁磁心不利于高频下振荡器的稳定性。可以采用滚筒电感，但其体积大而成本高。可以使用带数个开关选择端的电感，但不能连续调节频率。尽管有这些复杂因素，考比特电路在正确设计下具有非常好的稳定性和可靠性。与哈脱莱电路相同，应使反馈量保持在维持振荡所需的最小值。

#### 11.1.5 克拉泼电路

考比兹振荡器的一种变型是应用一个串联谐振电路。在图 11-5a

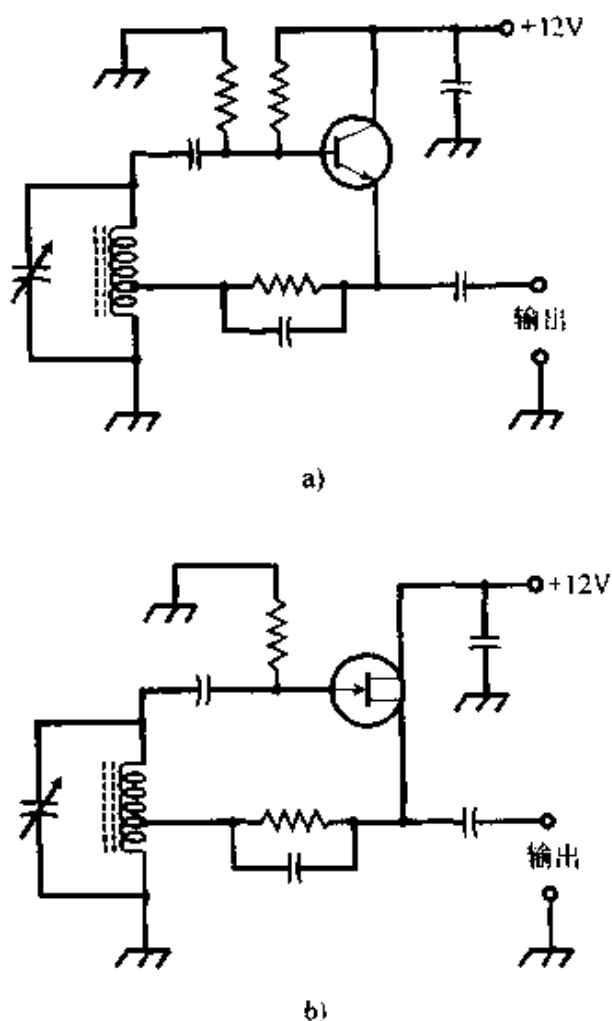


图 11-3 哈脱莱振荡器

a) 采用 NPN 双极型晶体管 b) 采用 N 沟道结型场效应晶体管

中给出了采用NPN双极型晶体管克拉泼振荡器的原理图，采用N沟道结型场效应晶体的电路见图11-5b。

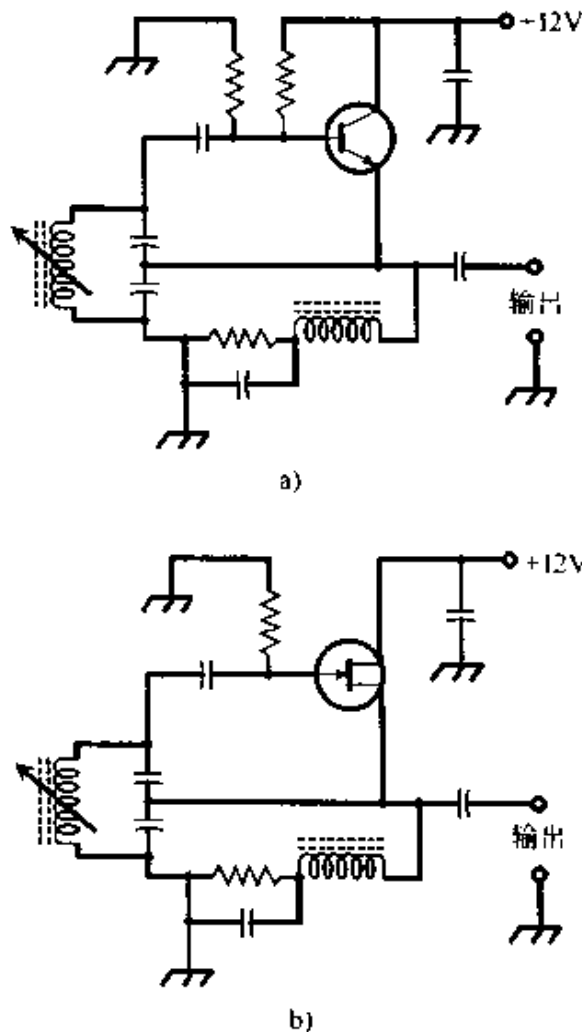


图 11-4 考比兹振荡器

a) 采用NPN双极型晶体管 b) 采用  
N沟道结型场效应晶体管

克拉泼振荡器在射频下具有很好的稳定性，当使用高质量的元件时，它的频率不会显著漂移。克拉泼电路是一种可靠的电路，容易使其振荡。另一个优点是它可使用可变电容器来控制频率，而反馈是通过电容分压器实现的。

在哈脱莱、考比兹和克拉泼电路中，为了使稳定性最佳，通常从发射极或源极输出。为了防止输出信号被地短路，在考比兹和克拉泼电路中用一个射频扼流圈与发射极或源极串联。对于如15MHz这类高频，射频扼流圈的典型值是 $100\mu\text{H}$ ，而对于如150kHz这类低频，

则为  $10\text{mH}$ 。

### 11.1.6 二极管振荡器

在极高频和微波频率下，可使用二极管振荡器。该元件在第七章中已讨论过。

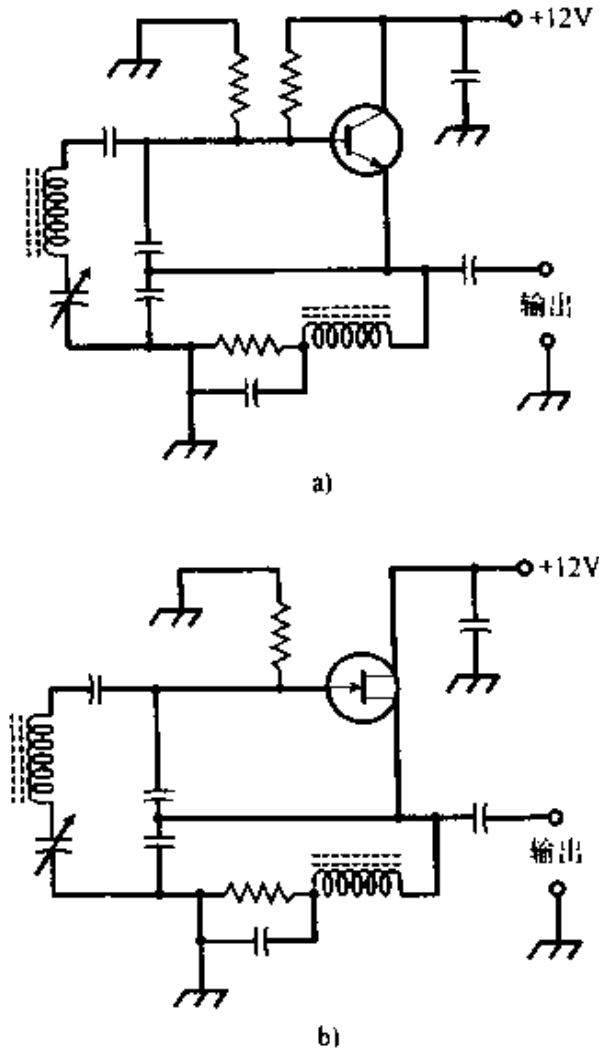


图 11-5 克拉泼振荡器

a) 采用 NPN 双极型晶体管 b) 采用 N 沟道结型场效应晶体管

## 11.2 振荡器稳定性

**振荡器稳定性** 这个术语有两方面含义：频率恒定和性能可靠。

### 11.2.1 频率稳定性

在上面叙述的几种类型的振荡器中，为了调节频率使用了可变电容器或可变电感。温度，有时还有湿度会影响元件值。在可变频率振荡

器中，在所有可预计条件下，应尽可能保持元件值恒定。

当温度升降时，有些型号的电容器比别的型号能更好地保持它们的数值。聚苯乙烯电容在这方面是最好的。当找不到聚苯乙烯元件时，可选用银云母电容。

空心电感的温度稳定性最好。如有可能应该用硬导线绕制电感，并且用塑料支架固定绕组的位置。有些空心线圈是绕制在由陶瓷或酚醛材料制成的空心柱体上。在射频振荡器中不常使用铁磁心，因为它的磁导率受温度影响。电感改变了，也就影响到振荡器的频率。

### 11.2.2 可靠性

电源开关一合上，振荡器就应该开始工作。若负载变化或温度突变时，在所有正常条件下，振荡器都应该保持振荡而不停振。一个振荡器失效能引起整个通信站停止工作。

在本章中所列举的几种振荡电路，都是工程师们经过多年试验与失败后才找到的性能良好的电路。然而，当做好一个振荡器并投入使用时，经常需要调试。若两个振荡器采用相同电路，采用相同型号元件和数值，并且几何排列也相同，一个电路可能稳定，另一个可能不稳定。常见的原因是一个或数个元件的质量存在差异。

大多数振荡器被设计在高负载阻抗下工作。若是低负载阻抗，负载将从振荡器汲取功率。在这种条件下，即使一个设计良好的振荡器也能变得不稳定。应该从振荡器后面的放大器，而不是从振荡器自身汲取功率。

## 11.3 晶体控制振荡器

若不需要经常改变频率，石英晶体（也称为压电晶体）可用于射频振荡器的调谐 LC 回路中。晶体控制振荡器的频率稳定性优于 LC 调谐频率可变振荡器。有数种途径将晶体连到双极型或场效应晶体管电路中以产生振荡。

### 11.3.1 皮尔斯电路

一种普通的晶体控制电路是皮尔斯振荡器。有源放大器件和石英晶体的连接见图 11-6。图 11-6a 中采用一个 NPN 双极型晶体管；图 11-6b 中采用一个 N 沟道结型场效应晶体管。

通过与晶体串联的电感器或与晶体并联的电容器可将皮尔斯振荡器的频率改变约  $\pm 0.1\%$ 。但确定频率的因素主要是晶体的厚度及其切割角。

当温度变化时，晶体的频率变化，但大多数情况下，它们比  $LC$  回路更稳定。有些晶体振荡器被放在可温控的小箱（被称为晶体恒温箱）中。它们的频率保持得如此稳定，以致可以经常作为其他要校准的振荡器的标准。在几兆赫工作频率下，其准确度可达几个赫兹。

### 11.3.2 莱纳尔兹电路

莱纳尔兹晶体振荡器的特点是高效和谐波频率的输出极小。莱纳尔兹电路可以使用场效应晶体管或双极型晶体管，图 11-7 是一个使用 N 沟道场效应晶体管的莱纳尔兹振荡器的原理图。一个  $LC$  回路插入到源极电路中，该谐振回路被调谐在接近晶体频率的一半，结果是提高了正反馈，使得该电路可在比其他电路能达到的更低的晶体电流下振荡。漏极电路中的  $LC$  回路被调谐在比晶体频率稍高处。

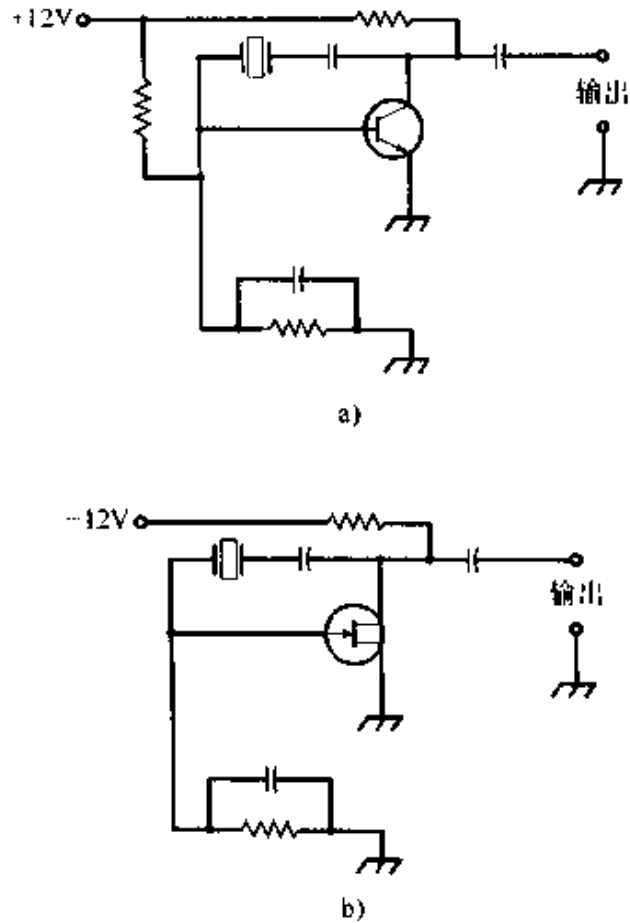


图 11-6 皮尔斯振荡器

a) 采用 NPN 双极型晶体管 b) 采用 N 沟道结型场效应晶体管

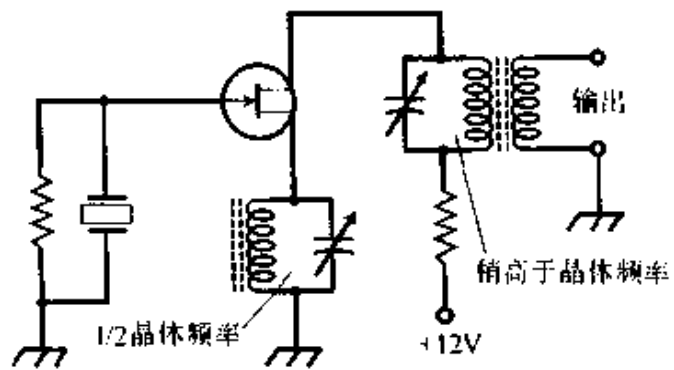


图 11-7 使用 N 沟道场效应晶体管的莱纳尔兹晶体振荡器

### 11.3.3 可变频率晶体电路

用附加一个与晶体串联或并联的阻抗便可调整可变频率晶体振荡器的频率。有时将这种振荡器用于发射机或收发两用机，可以运行在一个小频段中。

双极型晶体管可变频率晶体振荡器电路的例子见图 11-8。在图 11-8a 中，一个可变电感与晶体串联，在图 11-8b 中，一个可变电容器与晶体并联。

可变频率晶体振荡器较之普通可变频率振荡器的主要优点是有很好的频率稳定性。在大多数情况下，在不丧失稳定性的前提下，频率的变化在运行频率的  $\pm 0.1\%$  范围内。

### 11.3.4 压控振荡器

在调谐 LC 回路中，变容二极管可以调节可变频率振荡器的频率。哈特莱和克拉泼振荡电路很容易采用变容二极管来控制频率。用一个隔离电容将变容二极管与直流隔开，用加在变容二极管上的可变直流电压调节频率。

图 11-9 是一个结型场效应晶体管哈特莱压控振荡器的原理图，其中用变容二极管代替了可变电容器。

### 11.3.5 锁相环频率合成器

一个既具有可变频率振荡器的灵活性，又具有晶体振荡器稳定性的振荡器就是锁相环频率合成器。这个电路广泛地用在无线电发射机和接收机中。

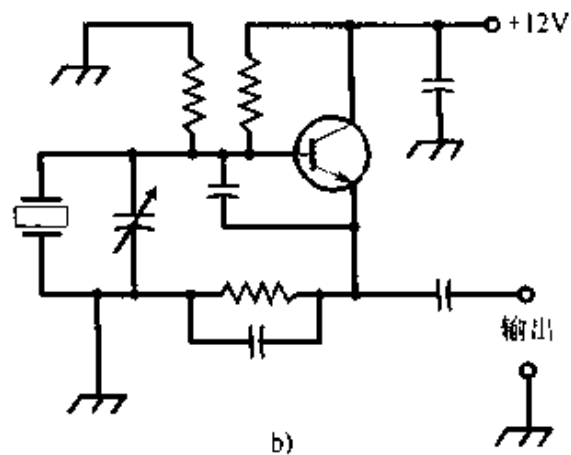
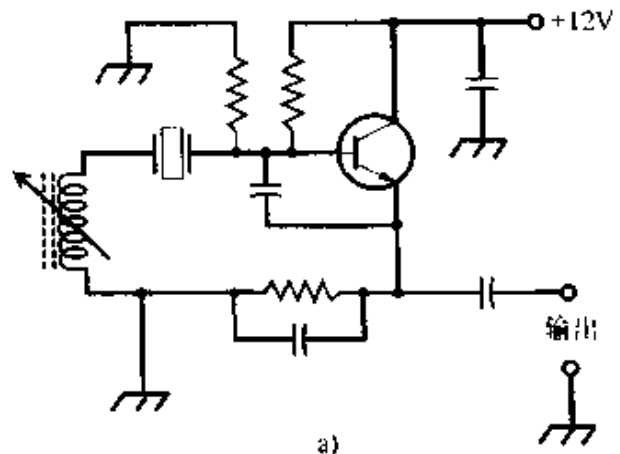


图 11-8 双极型晶体管可变频率晶体振荡器电路

a) 电感调整频率 b) 电容调整频率

在频率合成器中，压控振荡器的输出是经过可编程分配器的，后者是一个数字电路，通过运算器的选择，它能由几千个数值中的任何一个分配出压控振荡器的频率。使用相位比较器，将可编程分配器的输出频率锁定在一个晶体可控参考振荡器的信号上。

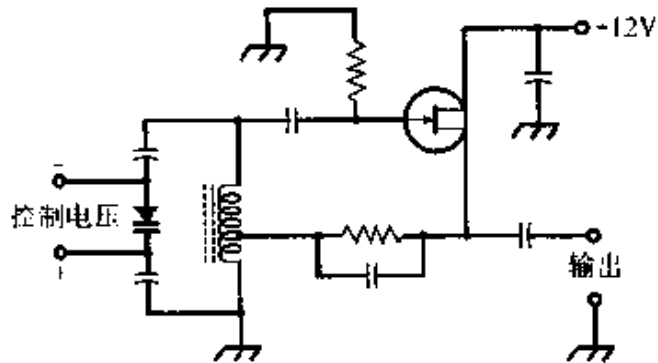


图 11-9 采用 N 沟道结型场效应晶体管的哈特莱压控振荡器

只要可编程分配器的输出是严格地处于参考振荡器的频率上，两个信号相位一致，比较器的输出是直流零伏。若压控振荡器频率开始漂移，可编程分配器的输出频率也漂移（虽然变化率有差别），但是即使是最微小的频率变化都会使相位比较器产生一个直流误差电压。这个电压是正还是负决定于压控振荡器频率是向更高还是向更低漂移。误差电压加到压控振荡器中的变容二极管上，使压控振荡器频率向漂移的反方向变化。这就形成了维持压控振荡器频率精确地等于参考振荡器频率的倍数的直流反馈，而这个倍数是编程分配器曾经选定的。

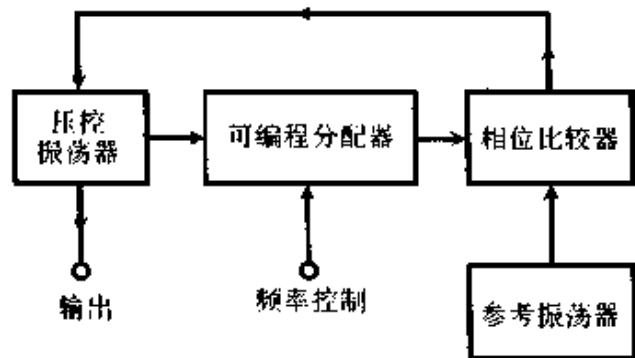


图 11-10 锁相环频率合成器的框图

由于参考振荡器是晶体控制的，所以锁相环频率合成器是稳定的。图 11-10 中给出了这种合成器的框图。美国国家标准局通过 WWV 站发射短波 5MHz、10MHz 或 15MHz 信号，将这信号放大后直接用作参考振荡器，可提高频率的稳定性。

### 11.4 音频振荡器

音频振荡器常用于门铃、救护车警报器、电子游戏机、个人电脑和表演音乐曲调的玩具。所有音频振荡器由正反馈的放大器组成。工



作于音频的振荡器可使用  $RC$  或  $LC$  组合来确定频率。

#### 11.4.1 波形

无线电频率振荡器常设计成能产生一个接近完全正弦波的输出，这表明能量是在一个十分确定的频率上。但是音频振荡器并不需要一定将能量集中在单一频率上。

不同的乐器即使演奏同一音符，发声也是不同的，因为每种乐器有它们自己唯一的波形。用音频振荡器产生与某乐器波形相符的输出波形，从而复制出该乐器唯一的聲音。多媒体计算机可以有乐器数字界面演奏器，后者使用音频振荡器能够模拟大量乐器或一个大乐队的声音。

#### 11.4.2 双 T 振荡器

通用的且很普及的一种音频振荡器形式是双 T 振荡器，见图 11-11。其频率由电阻  $R$  和电容  $C$  的数值决定。该电路使用 NPN 双极型晶体管，也可用两个结型场效应晶体管。

#### 11.4.3 多谐振荡器

多谐振荡器使用两个放大回路，互相连接使信号在它们之间循环。图 11-12 中用的是 N 沟道结型场效应晶体管，每个结型场效应晶体管以 A 类放大信号，并将相位后转  $180^\circ$ ，由  $LC$  组合确定频率。通常电感采用环状或罐状铁磁心，电感值的范围约为  $10\mu\text{H}\sim 1\text{H}$ 。电容的数值

则根据所要获得的音调频率来选择。

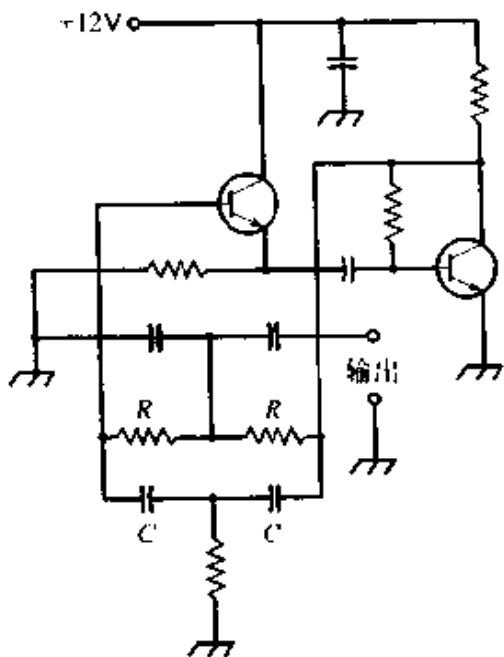


图 11-11 双 T 音频振荡器

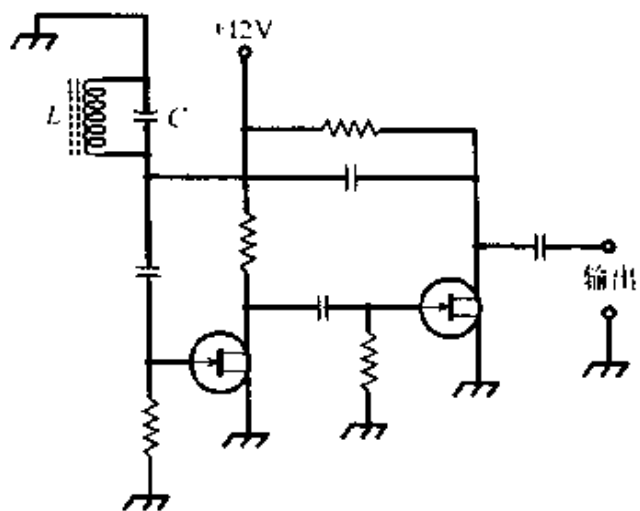


图 11-12 多谐放大器型音频振荡器

## 第 12 章 放 大 器

放大器是一种使信号的电流、电压或功率增加的电路或系统。

### 12.1 放大系数

一个电路放大的程度是以分贝表示的放大系数来衡量。对于一个给定的电路，电压、电流和功率的放大系数可以很不相同。

#### 12.1.1 分贝

人们感受大部分的变量是以对数形式。于是科学家们发明了分贝系统，即将幅度的变化表示成实际值与某个相对信号强度比值的对数。增益用正分贝值表示；损耗用负分贝值表示。

1dB 的幅度变化约等于一个听众或观众对于可预期信号所能检测到的最小变化。若变化是不可预期的，则一个听众或观众能感受到的最小差别约为 3dB。

#### 12.1.2 电压放大

设有一个电路，交流方均根输入电压为  $E_{in}$ ，交流方均根输出电压为  $E_{out}$ ，两者的单位相同，则电路电压增益的分贝值由下式表示

$$G = 20 \log_{10} \frac{E_{out}}{E_{in}}$$

#### 12.1.3 电流放大

电路电流增益的计算同于电压增益。若  $I_{in}$  是方均根交流输入电流， $I_{out}$  是方均根交流输出电流，两者单位相同，则

$$G = 20 \log_{10} \frac{I_{out}}{I_{in}}$$

通常，产生电压放大的电路，电流是衰减的，反之亦然。交流变压器就是例子。

有些电路对电流和电压均能放大，但两者分贝值不相同。产生差别的原因在于输出阻抗高于或低于输入阻抗，从而改变了电压与电流

之比。

#### 12.1.4 功率放大

一个电路功率增益的分贝值由下式计算

$$G = 10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

式中  $P_{out}$  是信号输出功率； $P_{in}$  是信号输入功率，两者单位相同。

## 12.2 基本放大器

一般地，放大器必须使用有源元件，例如晶体管或集成电路。虽然一个变压器能增加可使用的电流或电压，但它不能产生比输入信号功率更大的输出信号功率。

### 12.2.1 通用双极型晶体管放大器

通用双极型 NPN 晶体管放大器见图 12-1。通过电容将输入信号送到基极，电阻提供偏置。在这个放大器中，电容必须足够大，以使交流信号能容易地通过。但是

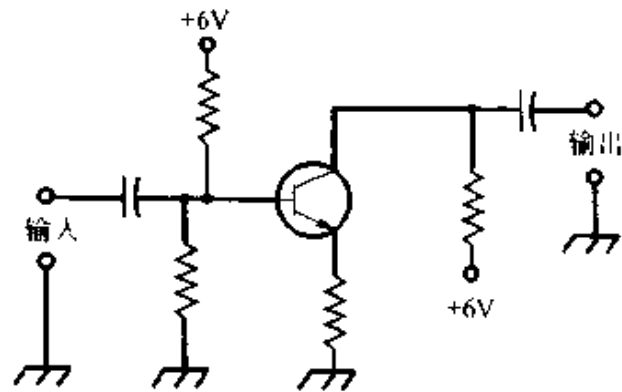


图 12-1 通用双极型晶体管放大器电路

电容值也不能比实现这个目的的最小电容值大得很多。理想的电容值取决于放大器的设计频率，也就是输入和输出阻抗。一般地，随频率和（或）回路阻抗增加，则需要的电容值可以小一些。电阻值取决于输入和输出阻抗。

### 12.2.2 通用场效应晶体管放大器

通用 N 沟道结型场效应晶体管放大器见图 12-2。在这个放大器中，电容值的考虑与双极型回路中相同。结

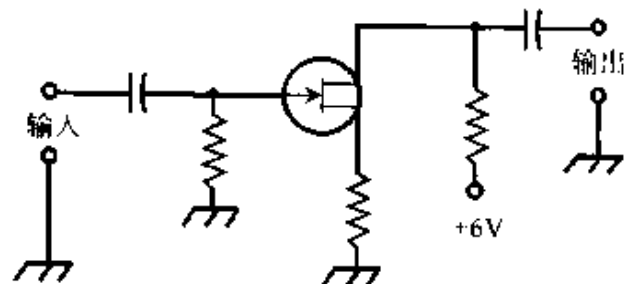


图 12-2 通用场效应晶体管放大器电路

型场效应晶体管 (JFET) 的输入阻抗高，因此输入电容的值小。若为金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (MOSFET) 器件，它的输入阻抗非

常高,输入电容将较小,有时甚至小于 $1\text{pF}$ 。电阻也取决于输入和输出阻抗。

### 12.2.3 通用集成电路放大器

简单的集成电路放大器见图12-3,这个电路采用了一个运算放大器。运算放大器具有多种功能,例如振荡、放大和滤波。图中的放大器

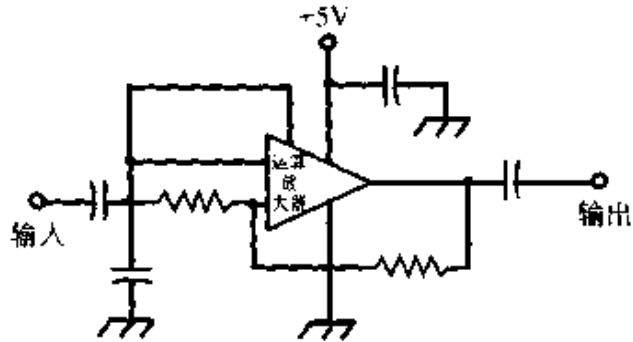


图 12-3 通用运算放大器电路

是一个反相放大器,即输出与输入相位相差 $180^\circ$ 。增益和频率响应取决于电阻和电容值。运算放大器常用于音频,用于射频的则很稀少。

## 12.3 放大器分类

放大器电路可以分成A、AB、B和C四类,每类都有各自独特的特性。

### 12.3.1 A类放大器

弱信号放大器,例如在高灵敏度无线电接收机的第一级总是使用A类放大器,这类放大器是线性的。对于采用双极型晶体管的A类放大器,偏置选择在没有信号输入时,器件工作在集电极电流( $I_C$ )对基极电流( $I_B$ )曲线直线部分的中点附近。图12-4是NPN晶体管放大器的曲线图,对于PNP晶体管,极性符号相反。

采用JFET或MOSFET时,偏置必须选择在没有信号输入时,器件工作在漏极电流( $I_D$ )对栅极电压( $E_G$ )曲线直线部分的中点附近。图12-5是N沟道器件的曲线图,对于P沟道器件,极性符号相反。

### 12.3.2 AB类放大器

当一个双极型晶体管被偏置在没有信号接近截止时,见图12-4,或一个场效应晶体管(FET)被偏置在没有信号接近夹断时,输入信号将驱动器件进入工作曲线的非线性部分,这就是AB类放大器的运用。输入信号可以引起器件在一个周期的一小部分进入截止或夹断,这种情况是否发生,取决于实际偏置点和输入信号的强度,若双极型晶体管或FET在信号周期的任一部分都不进入截止或夹断,称这种电路为

$AB_1$ 类放大器。若器件在周期某一部分进入截止或夹断,则称这种电路为 $AB_2$ 类放大器。

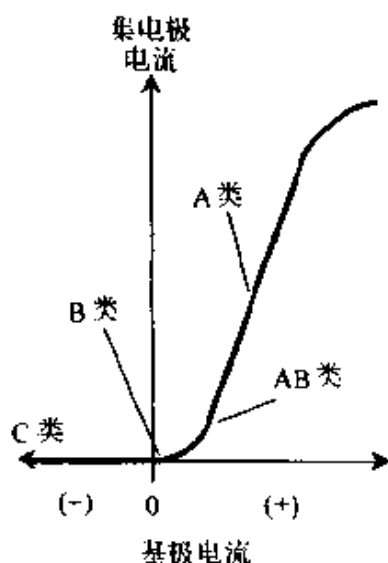


图 12-4 采用双极型晶体管的各类放大器

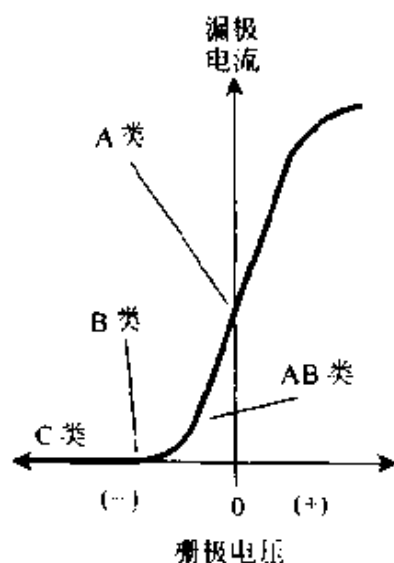


图 12-5 采用N沟道结型场效应晶体管的各类放大器

在任何AB类放大器中,输出波形与输入波形不同。但是若信号是被调制的,例如在声音的射频发射机中,调制包络将无畸变地呈现出来。因此,AB类运行在射频功率放大系统中是很有用的。

### 12.3.3 B类放大器

当双极型晶体管在无输入信号条件下被严格地偏置在截止或场效应晶体管处于夹断,这个放大器就是工作于B类,其工作点在图12-4和图12-5的曲线中已经标出。在B类放大器中,当无信号时,将没有集电极或漏极电流。与A类和AB类电路相比较,B类电路节省能量。当存在输入信号时,流过器件的电流严格地出现在半个周期中。

有时在一个B类电路中,使用两个双极型晶体管,一个工作于正半周,另一个工作于负半周,用这种方法消灭畸变,这是一种B类推挽放大器,见图12-6,它常用于音响系统。

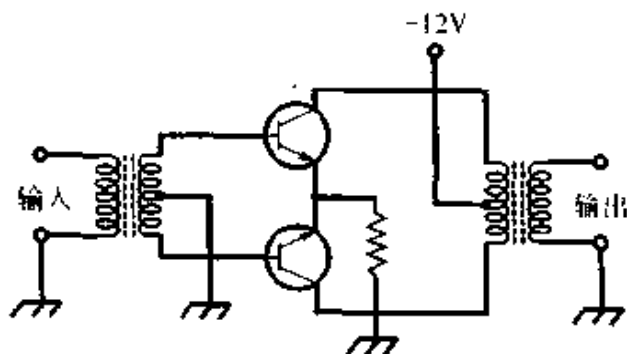


图 12-6 B类推挽放大器

B 类放大器可用于射频功率放大。虽然输出波形由于谐波能量发生畸变,但在输出回路中加一个 LC 谐振回路可以克服这个问题。若信号是被调制的,调制包络将不会畸变。

#### 12.3.4 C 类放大器

双极型晶体管或场效应晶体管可偏置在超过截止或夹断点,若驱动在周期的一部分中足以克服偏置,则电路将工作于功率放大状态。C 类放大器的运行工作点在图 12-4 和图 12-5 中已标出。

C 类射频功率放大器对于幅度调制包络是非线性的。因此,C 类电路只用于信号是恒幅的,或只有两种状态(通和断或有标记和无标记)。这类信号的例子有连续波无线电报、无线电传打印和频率调制。C 类射频功率放大器,需要相当大的驱动功率。

### 12.4 效率和驱动

在功率放大器中,效率是有用输出功率与总输入功率之比。高效率意味着最低的成本,最佳的设备尺寸和重量及最长的元件寿命。

#### 12.4.1 直流功率输入

对于双极型晶体管放大器电路,直流功率输入(单位为瓦)是集电极电流( $I_c$ ,单位为安培)与集电极电压( $E_c$ ,单位为伏特)的乘积。对于场效应晶体管,直流输入功率是漏极电流( $I_D$ )与漏极电压( $E_D$ )的乘积。对于双极型晶体管功率放大器可表示为

$$P_m = E_c I_c$$

对于场效应晶体管功率放大器可表示为

$$P_m = E_D I_D$$

在某些电路中无信号输入时,输入的直流功率受到关注。在 A 类中,不管是否有输入信号,平均输入直流功率是常数;在 AB<sub>1</sub> 或 AB<sub>2</sub> 类中,无输入信号时,直流输入功率小,当加上信号时,直流输入功率显著增加;在 B 和 C 类中,无输入信号时,直流输入功率为零,而当加上信号时,直流输入功率显著增加。

#### 12.4.2 信号输出功率

当无输入信号加到放大器上时,在输出端无信号,因此信号输出功率( $P_{out}$ )为零,不管是哪一类放大都是这样。一般地,输入信号越

大，功率放大器的输出功率也越大，直至某个确定值。

放大器的信号输出功率不能用直流仪表直接测量，而需要使用专门的交流瓦特计。

### 12.4.3 效率的定义

功率放大器的效率  $E_{\text{eff}}$  是信号输出功率与直流输入功率之比

$$E_{\text{eff}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}$$

这个比值总是在 0 和 1 之间。通常将效率表示成百分数，于是公式变成

$$E_{\text{eff}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100\%$$

### 12.4.4 各类放大器的效率

通常 A 类放大器效率不高，为 25%~40%（取决于输入信号的性质和所采用的双极型或场效应晶体管的型号）。若输入信号微弱，例如无线电接收机中的无线输入信号，A 类电路的效率接近于零。但是在这种应用中，效率不是最重要的，高增益和回路本身的低噪声系数往往更加重要。

AB<sub>1</sub> 类射频功率放大器的效率是 35%~45%，AB<sub>2</sub> 类射频功率放大器可达 60%。B 类放大器是 55%~65%，而 C 类射频功率放大器能高达 75%。

### 12.4.5 驱动和过驱动

从理论上讲，为了产生有用输出功率，A 类和 AB<sub>1</sub> 类功率放大器不从信号源汲取功率，AB<sub>2</sub> 类放大器需要一些驱动功率以产生输出，B 类放大器需要比 AB<sub>2</sub> 类更多的驱动功率，而 C 类放大器需要比 B 类还要多的驱动功率。不管采用哪一类功率放大器，重要的是驱动信号不要太强。若发生过度驱动，将产生问题。

图 12-7 给出了不同状态下的功率放大器输出信号的波形。在图 12-7a 和 b 中，放大器运用在 A 类或 B 类推挽。图 12-7a 中的波形为正常驱动下放大器的信号输出，而图 12-7b 中的波形为过驱动放大器的信号输出，图 12-7c 和 d 相应地为 B 类射频功率放大器正常驱动和过驱动下输出信号的波形，图 12-7e 和 f 相应地为 C 类射频功率放大器

正常驱动和过驱动下的输出信号的波形。注意当发生过驱动时，会出现平顶，这将引起过量的谐波发射，调制包络畸变和效率降低。

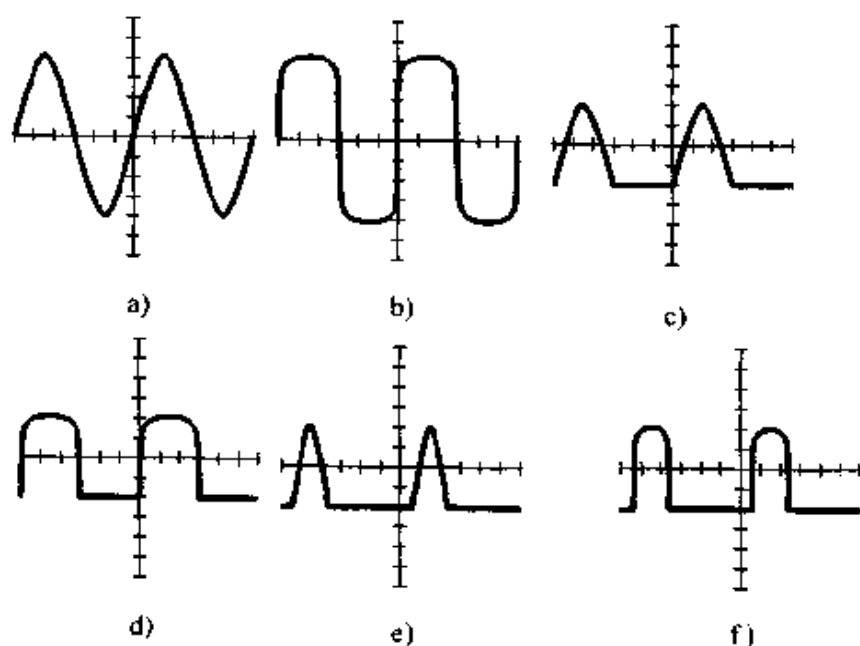


图 12-7 功率放大器的输出波形

a) A 类正常驱动 b) A 类过驱动 c) B 类正常驱动 d) B 类过驱动  
e) C 类正常驱动 f) C 类过驱动

## 12.5 音频放大

音频放大器用于低于 100kHz 的场合。性能要求包括增益可调、频率响应可调和很小失真。

### 12.5.1 频率响应

高保真音频放大器工作在几赫兹到接近 100kHz。用于语音通信的音频放大器频率约覆盖 300Hz 到 3kHz。在数字通信中，音频放大器工作在一个窄的频带范围，有时频宽小于 100Hz。

高频放大器装有可调整频率响应的 *RC 音调控制*。最简单的放大器使用一个旋钮控制音调。更先进的系统具有两个旋钮，一个用于低音，另一个用于高音。最先进的系统具有 *图形均衡器*，一组旋钮分别控制不同频段放大器的增益。

图 12-8 给出三个实用的 *音频放大器频率响应曲线*。图 12-8a 中是一条宽带的平坦曲线，这是典型的高保真系统放大器。图 12-8b 中是一



条语音通信响应曲线。在图 12-8c 中是一条典型的数字无线接收机中音频放大器的窄带响应曲线。

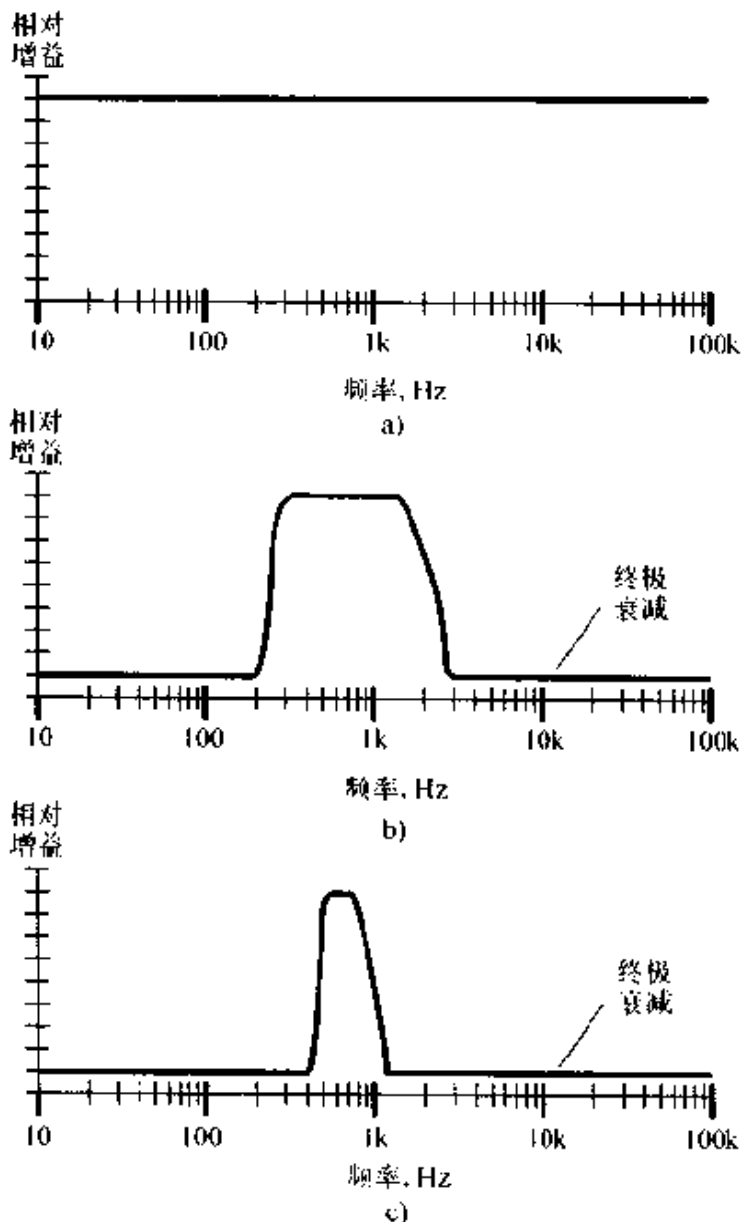


图 12-8 音频放大器频率响应曲线

a) 典型的高保真 b) 语音通信 c) 数字通信

### 12.5.2 音量控制

音频放大器系统通常由几级组成，在前级使用一个音量控制，图 12-9 是一个例子。交流输出信号经过  $C_1$  加在电位器  $R_1$  上，箭头所示的电位器上的动端或多或少取出交流输出信号。电容  $C_2$  把电位器与下一级的直流偏置隔离开。

音量控制通常选在音频功率电平低的级中，这就允许使用额定功

率为 1W 的电位器。

### 12.5.3 变压器和调谐回路耦合

变压器耦合的例子见图 12-10。电容  $C_1$  和  $C_2$  各使变压器一次侧和二次侧的一端信号接地， $R_1$  限制流过第一只晶体管  $Q_1$  的电流， $R_2$  和  $R_3$  提供晶体管  $Q_2$  基极正确的偏置。由于变压器的阻抗匹配能力，这个方案对放大器级间信号传递是最佳的，损失最小。 $Q_1$  的输出阻抗能完全与  $Q_2$  的输入阻抗相匹配。

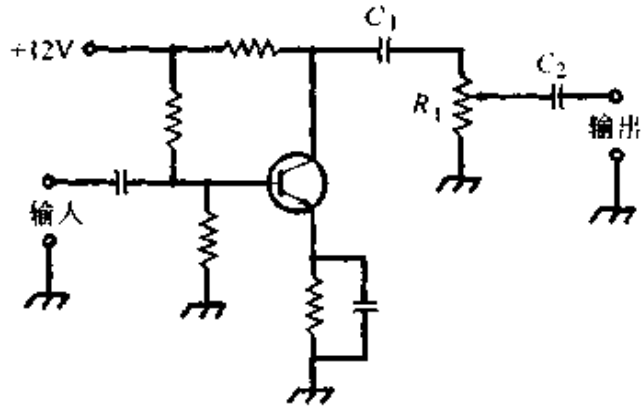


图 12-9 简单的音频放大器音量控制  
(增益用  $R_1$  调节)

在某些放大器系统中，在变压器的一次侧和(或)二次侧并联有电容，结果产生振荡，其频率由电容和变压器绕组的电感决定。若放大器组是工作于单频，则调谐回路耦合可提高效率。但是必须仔细从事，以使多级放大器在谐振频率处不发生振荡。

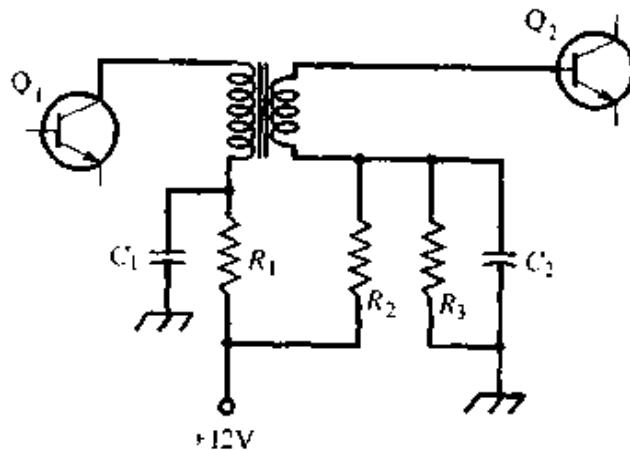


图 12-10 变压器耦合的例子

## 12.6 射频放大

射频谱始于约 9kHz，延伸到 300GHz。在这个范围的低频端，射频放大器与音频放大器类似，随着频率的增加，放大器的设计和特性都发生变化。

### 12.6.1 弱信号放大器

无线电接收机的前端或第一放大级需要最灵敏而又可实现的放大器。增益和噪声指数是决定灵敏度的两大因素。增益以分贝度量，噪声指数是一个电路能放大所期望的信号而不加入不需要的噪声的好坏测量。所有双极型晶体管或场效应晶体管由于荷电载流子的运动，都会产生一些噪声。一般地，场效应晶体管产生的噪声低于双极型晶体管。

由于自然噪声中，较高的无线电频率的噪声低于较低频率的噪声，弱信号放大器工作的频率越高，则噪声指数变得越加重要。

微弱信号放大器几乎都使用谐振回路。最佳方案是放大所希望的频率，抑制掉不需要的频率。图 12-11 是一个可调谐的 GaAsFET 弱信号射频放大器，它被设计在接近 10MHz。在较高频率下，电感和电容将较小；在较低频率下，这些值将较大。

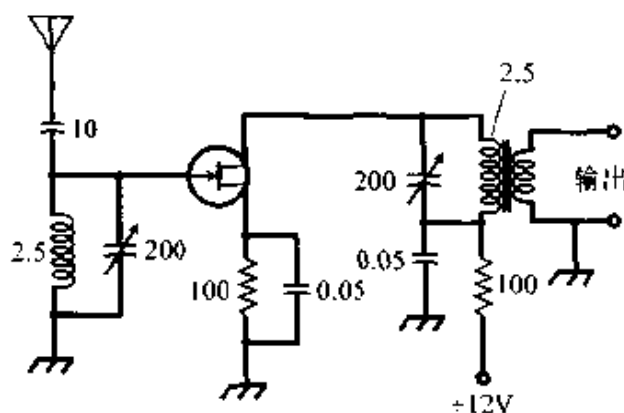


图 12-11 用于约 10MHz 的可调谐的弱信号射频放大器（电阻以欧姆计；电容若小于 1 以微法计，若大于 1 以皮法计；电感以微亨计）

### 12.6.2 宽带射频功率放大器

**宽带射频功率放大器**由

于电路不需调谐，其主要优点是使用方便。操作者不必为临界调节，或在一定范围内改变频率时为变化设置而烦恼。然而，宽带射频功率放大器的效率比调谐放大器要稍低些。

一个宽带功率放大器对处于设计范围内的任何频率的信号都将放大，而不管这些信号是否是计划中要传输的。如果在一个发射机中某一级发生振荡，而其频率并不是计划中的信号频率，如果这个并非所愿的信号落入宽带功率放大器设计频率范围内，则该信号将被放大，结果是在发射机产生寄生发射。

图 12-12 是一个典型的宽带功率放大器电路。NPN 双极型晶体管是功率晶体管，变压器是这个回路中至关重要的部分，它们必须被设

计得能在一个宽的频率范围内有效地工作,电压比为 10:1 或更大。这个电路适用于波长在 160m 和 20m 之间的业余无线电频段。

### 12.6.3 调谐射频功率放大器

与宽带设计相比较,调谐射频功率放大器的效率得到改善,也就是调谐有助于减少寄生信号被放大和被发射到太空中去的机会。调谐射频功率放大器能工作于一个宽范围的负载阻抗下。除了能将放大器的输出调节到工作频率的调谐控制或谐振回路外,还能将放大器和负载(通常是一个天线系统)间的信号传输调节到最佳的负载控制。

调谐功率放大器的主要缺点是调节费时,且调节不正确时会造成损坏放大器件(双极型晶体管或场效应晶体管)的后果。如果调谐和(或)负载控制设置不正确,则放大器的效率将接近于零,而直流集电极或漏极功率输入相当高。

图 12-13 是一个在接近 10MHz 可提供有用功率输出的调谐射频功率放大器。必须调节调谐回路和负载控制使串联在负载馈线上的瓦特计的射频功率输出达到最大。

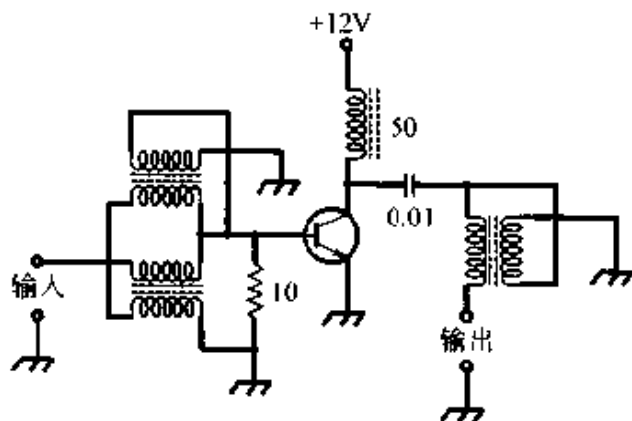


图 12-12 能产生几瓦输出的宽带射频功率放大器(电阻以欧姆计;电容若小于 1 以微法计,若大于 1 以皮法计;电感以微亨计)

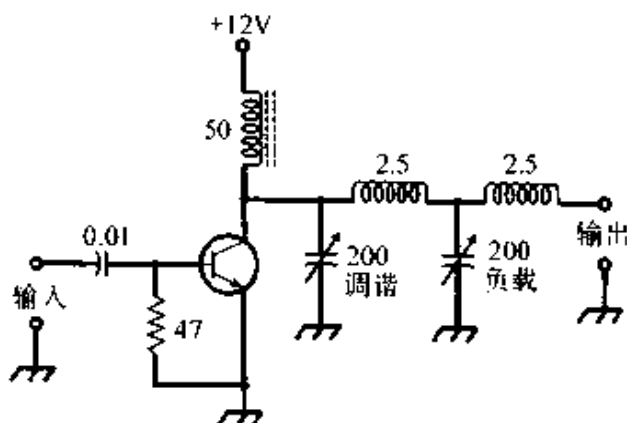


图 12-13 能产生几瓦输出的调谐射频功率放大器(电阻以欧姆计,电容若小于 1 以微法计,若大于 1 以皮法计;电感以微亨计)

## 第 13 章 滤波器和衰减器

**滤波器**调整电子电路或系统对不同频率能量的响应。**衰减器**将信号的幅度在一个频率范围内减少到一个指定的程度。

### 13.1 选择性曲线

在电子电路中，有若干种**选择性曲线**或响应特性曲线。最常见的滤波器包括带通滤波器、带阻滤波器、陷波滤波器、高通滤波器、低通滤波器和图形均衡器件。

#### 13.1.1 带通滤波器

除了一个特定频率  $f_0$  或在两个极限频率  $f_0$  和  $f_1$  之间的频带外，阻止所有频率的电路称为**带通滤波器**。在并联的调谐  $LC$  回路中，见图 13-1a，带通滤波器对所希望的频率呈现高阻抗，而对不需要的频率呈现低阻抗；在串联  $LC$  回路中，见图 13-1b，滤波器对所希望的频率呈现低阻抗，对不需要的频率呈现高阻抗。

带通滤波器不总是由线圈和电容器组成，也可以使用石英晶体。在较高的无线电频率下，一定长度

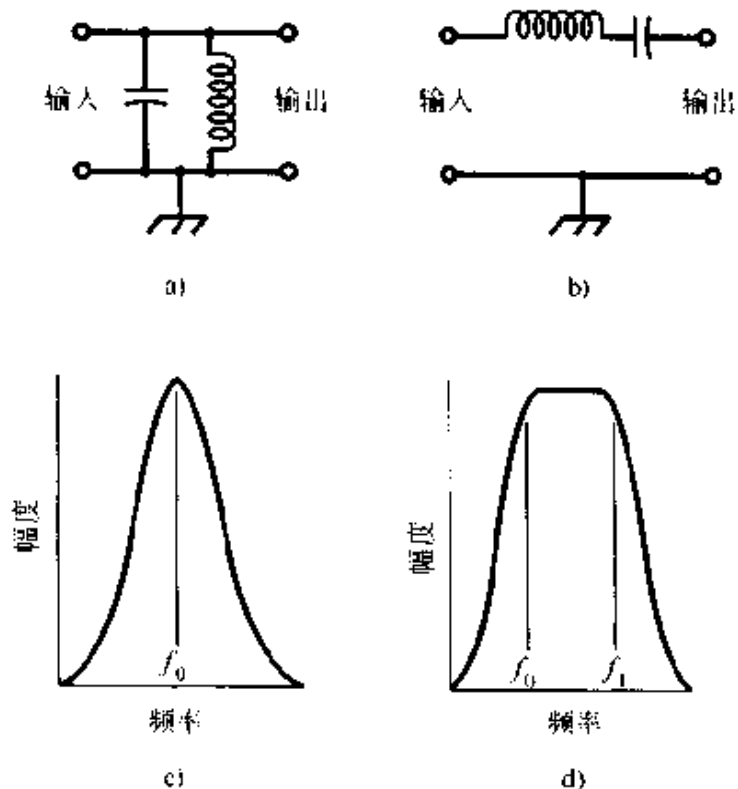


图 13-1 带通滤波器

- a) 并联谐振带通滤波器    b) 串联谐振带通滤波器  
c) 锐带通响应    d) 宽带通响应

的传输线当短路或开路时都可用作带通滤波器。

带通滤波器可以有一个明确的谐振频率  $f_0$ ，见图 13-1c，或在通带中为平坦响应，并具有两个截止频率，见图 13-1d。带通可以窄到只有几十赫兹，例如设计用于接收移频键控 (FSK) 的音频滤波器；或者是几兆赫兹的宽带，例如设计用于一个特高频或超高频无线电接收机前端的螺旋滤波器。

### 13.1.2 带阻滤波器

带阻滤波器也称为带止滤波器，它被设计成除了一定范围，可以让所有频率的能量通过。在谐振频率  $f_0$  或在两个极限频率  $f_0$  和  $f_1$  之间衰减最大。图 13-2a 是简单的并联谐振电感-电容带阻滤波器；图 13-2b 是简单的串联电感-电容带阻滤波器。带阻滤波器的一个普通例子是多带天线中的陷波器，另一个是功率放大器中的寄生阻尼器。

如同带通滤波器那样，带阻滤波器不一定由线圈和电容器组成，石英晶体或一段传输线也常在一定无线电频率下用作滤波器。

所有带阻滤波器都具有衰减频率响应曲线，其特征为除了在一个预置的频率范围内，对所有频率都是低损耗。图 13-2c 和 d 中给出两种类型带阻响应曲线，锐带阻或峰值响应（图 13-2c）发生在接近于一个单谐振频率处。矩形响应（图 13-2d）在极限  $f_0$  之下和极限  $f_1$  之上呈现低衰减，而在这两个极限频率之间呈现高衰减。

### 13.1.3 陷波滤波器

陷波滤波器是一种窄带阻滤波器，它可以减少由于接收机带通内

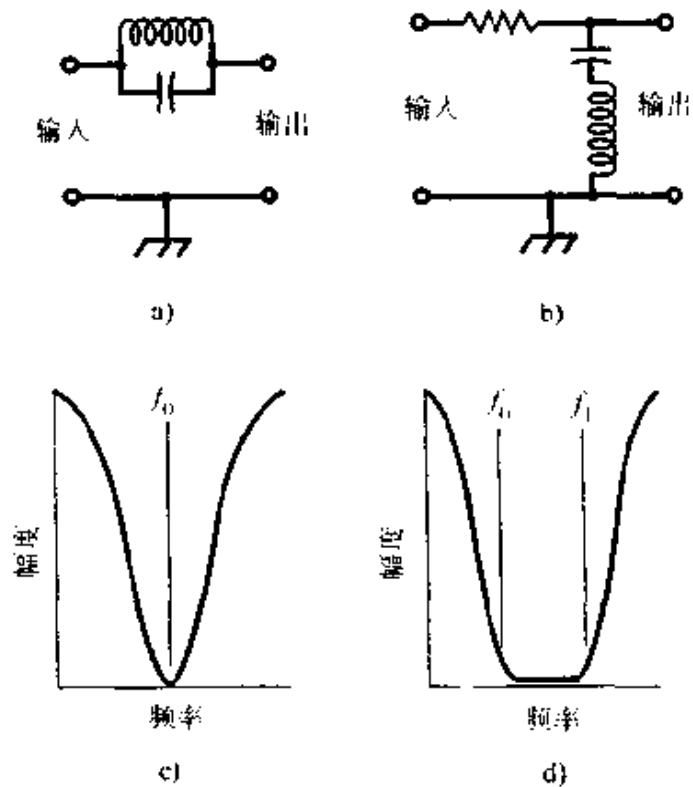


图 13-2 带阻滤波器

- a) 并联谐振带阻滤波器    b) 串联谐振带阻滤波器  
c) 锐带阻响应曲线    d) 宽带阻响应曲线

强的未调制载波引起的干扰。陷波滤波器回路一般被插入在具有恒定带通的超外差接收机的中频级中。一共有几种不同类型的陷波滤波器回路，最简单的一种是串接在信号路径中的一个并联调谐带阻电感电容回路，如图 13-2a。更精密的滤波器采用多重调谐  $LC$  回路或采用陶瓷、石英晶体的压电材料。

#### 13.1.4 高通滤波器

**高通滤波器**的特性是在其截止频率之下为高衰减，在截止频率之上为无衰减或很少衰减。在截止频率处的功率衰减与在频率高很多处的衰减相比是 3dB（假定阻抗恒定，电压衰减为 6dB）。

如图 13-3 中所示，基本  $LC$  高通滤波器由并联的电感和串联的电容组成，在图 13-3a 中的滤波器是 **L 型高通滤波器**，而在图 13-3b 中是 **T 型高通滤波器**。在音频电路中当采用有源器件，例如运算放大器时，可用电阻代替电感。**高通响应曲线**指出在较低频率下的衰减大于在较高频率下，图 13-3c 给出了一个例子。

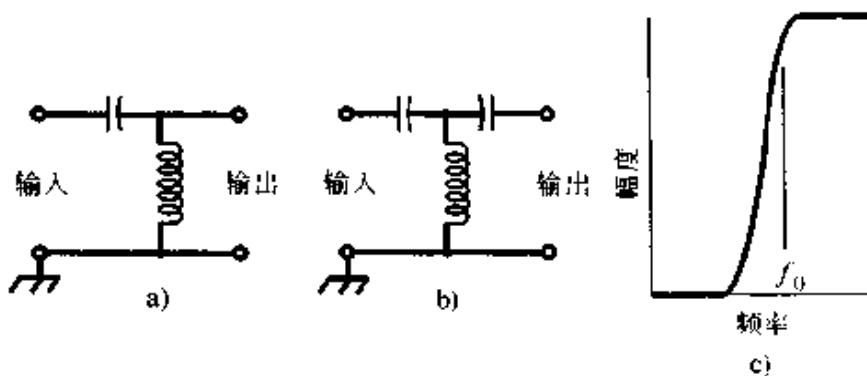


图 13-3 高通滤波器

a) L 型高通滤波器 b) T 型高通滤波器 c) 典型的高通响应曲线

射频高通滤波器通常用在电视或调频广播接收机的输入处，滤波器的截止频率大致为 40MHz。滤波器降低了接收机在较低频率处对来自射频源电磁干扰的敏感度，而让比 40MHz 高得多的电视信号无阻碍地通过。

#### 13.1.5 低通滤波器

**低通滤波器**在其截止频率之上呈现高衰减，而在此频率之下呈现低衰减或无衰减。在截止频率处的功率衰减与在低得多频率处的衰减相比为 3dB（若阻抗恒定，电压衰减为 6dB）。

基本的 LC 低通滤波器由串联的电感和并联的电容组成，如图 13-4 所示。图 13-4a 中的滤波器是 L 型低通滤波器，而图 13-4b 中是  $\pi$  型低通滤波器。在音频电路中当采用有源器件，例如运算放大器时，则可用电阻代替电感。低通滤波器在较高频率下显示出比在较低频率下更大的衰减。典型的低通响应曲线见图 13-4c。

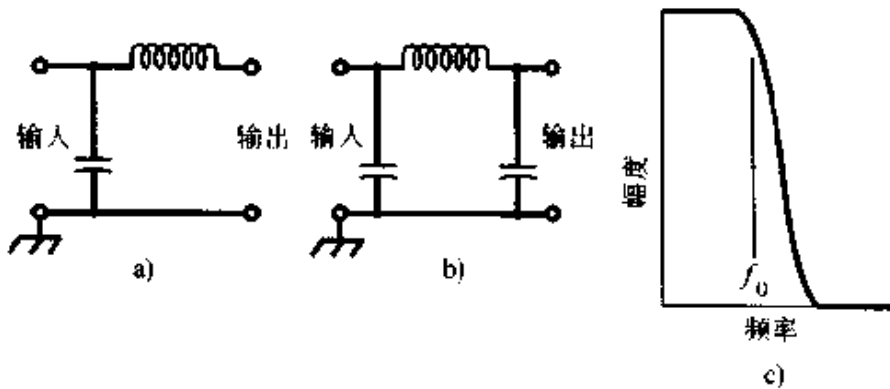


图 13 4 低通滤波器

a) L 型低通滤波器 b)  $\pi$  型低通滤波器 c) 典型的低通响应曲线

可以将低通滤波器插入频率低于 30MHz 短波段射频发射器的天线馈线中，截止频率约为 40MHz。滤波器减少了附近使用独立天线（更确切地说是电缆）的电视和调频广播接收机的电磁干扰。

### 13.1.6 图形均衡器

图形均衡器可调整高保真音响设备的音频输出。有若干个独立的音调控制，每一个控制音频频谱的一段，具体采用滑动片式电位器，它们在控制面板上提供

输出响应曲线的直观图。图 13-5 是具有 7 段控制的图形均衡器的框图。输入信号送到音频分路器，后者将信号分离成数路，每路具有相同的但互相独立的阻抗，以阻止回路间相互干扰。各路信号加到各自的

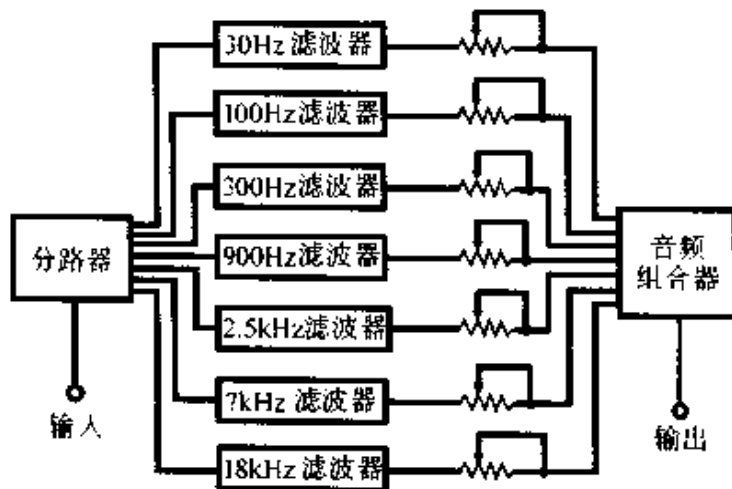


图 13-5 用于音响的图形均衡器实例



音频带通滤波器，每个都有自己的增益控制。在这个例子中滤波器的中心频率是 30Hz，100Hz，300Hz 和 900Hz 以及 2.5kHz、7kHz 和 18kHz。这些频率不是标准频率，在这儿给出只是为了举例。

## 13.2 选择性滤波器的特性

所有选择性滤波器具有一些对设计工程师来说非常重要的特性，他们常考虑以下几点。

### 13.2.1 插入增益

插入增益是当线路上有无有源滤波器时输出信号幅度的比较。如果线路上无滤波器时器件的信号输出电压是  $E_1$ ，有滤波器时为  $E_2$ ，假定输入和输出阻抗相同且恒定，则插入增益  $G$  是

$$G = 20 \log_{10} \frac{E_2}{E_1}$$

如果  $I_1$  是线路上无滤波器时的信号输出电流， $I_2$  是有滤波器时的信号输出电流，假定输入和输出阻抗相同且恒定，则插入增益  $G$  是

$$G = 20 \log_{10} \frac{I_2}{I_1}$$

如果  $P_1$  是线路上无滤波器时的信号输出功率， $P_2$  是有滤波器时的信号输出功率，插入增益  $G$  是

$$G = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1}$$

### 13.2.2 插入损耗

插入损耗是线路上有无无源滤波器或衰减器时输出信号幅度的比较。

如果系统的信号输出电压在线路中没有中间网络时是  $E_1$ ，存在中间网络时是  $E_2$ ，假定输入和输出阻抗相同且恒定，则插入损耗  $L$  是

$$L = 20 \log_{10} \frac{E_1}{E_2}$$

如果  $I_1$  是线路中不存在专门器件时的信号输出电流， $I_2$  是线路中存在该器件时的信号输出电流，假定输入和输出阻抗相同且恒定，则插入损耗  $L$  是

$$L = 20 \log_{10} \frac{I_1}{I_2}$$

如果  $P_1$  是线路中不存在器件时的信号输出功率,  $P_2$  是存在该器件时的信号输出功率, 则插入损耗  $L$  是

$$L = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2}$$

### 13.2.3 带宽

带宽是信号占用频谱空间的定量计量。在接收机中, 选择性滤波器应具有与被接收信号带宽相适应的通带。带宽越大, 单位时间中能传输的数据越多; 带宽越小, 对数据传输速度的限制越严重。不管是模拟信号还是数字信号, 也不管调制模式, 上述都是正确的。

当在频谱仪上显示一个稳定的未受调制的载波时, 表现为一条单垂直脉冲, 见图 13-6 上的 a。对于受到调制的载波, 它的带宽为某个有限值, 见图 13-6 上的 b 和 c。一般将信号 3dB 功率衰减点对应的频率差定义为信号带宽(当输入和输出阻抗相同且恒定时, 也可采用 6dB 电压衰减点)。滤波器带宽是接收系统中这些点之间的频率差。

### 13.2.4 半功率点

图 13-7 是一条假想的带通滤波器响应曲线, 在这种情况下, 用半功率点标出带宽。对于带通滤波器, 半功率点是指在该点频率下滤波器的功率比通带中最高功率输出电平降低 3dB。半功率点适用于所有

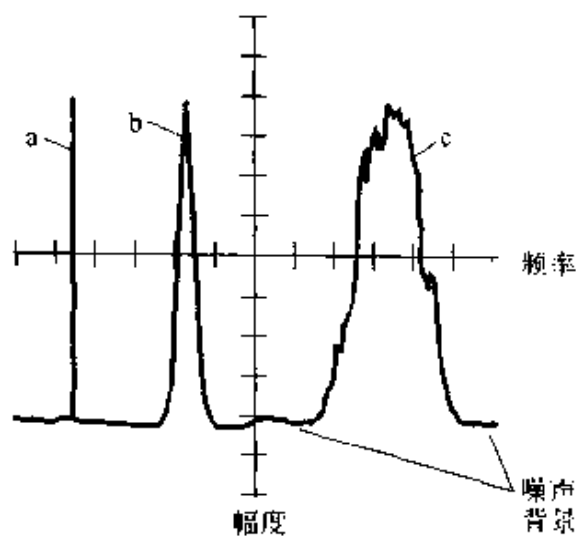


图 13-6  
a—未调制载波 b—窄带信号  
c—带宽较宽的信号

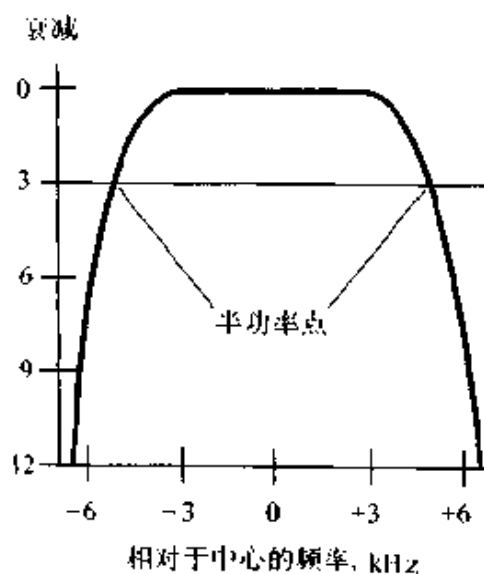


图 13-7 带通滤波器的半功率点

型式的选择性滤波器：如图中所示的带通滤波器、高通滤波器、低通滤波器和带阻滤波器。

可以用半功率点和 30dB 功率衰减点来描述带通滤波器的响应特性，这组综合数据说明了边缘的选择性或截止的陡度和实际带宽。例如一个给定的滤波器半功率点带宽为 2.700kHz，而 30dB 功率衰减点在 3.325Hz，这将适合于单边带接收。

### 13.2.5 算术对称

**算术对称**这个术语是指带通或带阻滤波器信号谱的形状，大多数数字信号呈现这种性质（许多模拟信号也是这样）。但有些模拟信号（如单边带）是不对称的。

图 13-8 是一个带通响应算术对称的理论上的例子。曲线相对于中心频率是严格对称的，中心频率下方的左边带是中心上方右边带的镜像。在滤波器设计中，算术对称代表一种理论上的理想情况。

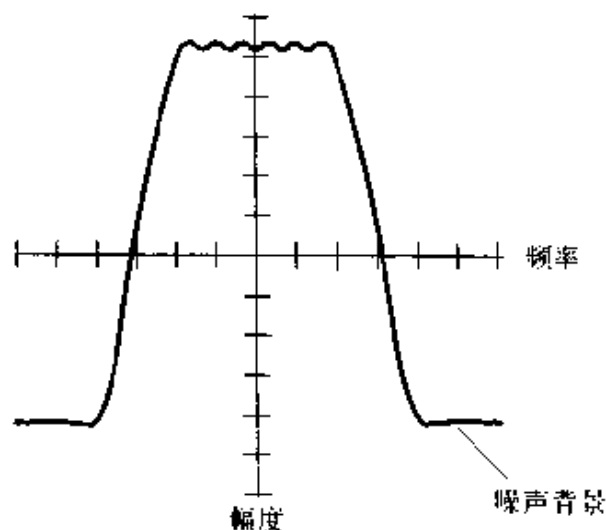


图 13-8 一个带通滤波器算术对称的例子（响应曲线的左半边与右半边是严格的镜像）

### 13.2.6 矩形度

带通或带阻滤波器通常设计成接近**矩形响应**。理论上完全矩形的带通响应在截止频率点之间衰减为零，而在带通之外衰减为无限大。理论上完全矩形的带阻响应在截止频率点之间具有无限大衰减，而在所有其他频率处为零衰减。

在无线电接收机中，矩形带通响应提供可能是最好的**信噪比**。单个谐振回路具有**峰值响应**，而一组调谐回路或调谐器件，且每个都具有稍为不同的自然频率，可以连在一起产生一个接近矩形的响应。

## 13.3 特种滤波器

通常在电子设备中遇到的几种特殊滤波器在下文和插图中讲述。

### 13.3.1 $m$ 派生 LC 滤波器

$m$  派生 LC 滤波器的名称源于其电感和电容的值被乘上一个记为  $m$  的共同系数。图 13-9a 是一个典型的用于非平衡传输线的 T 形低通滤波器，图 13-9b 是元件值改变了  $m$  倍的  $m$  派生滤波器。在  $m$  派生滤波器中，一个附加电感与电容串联。

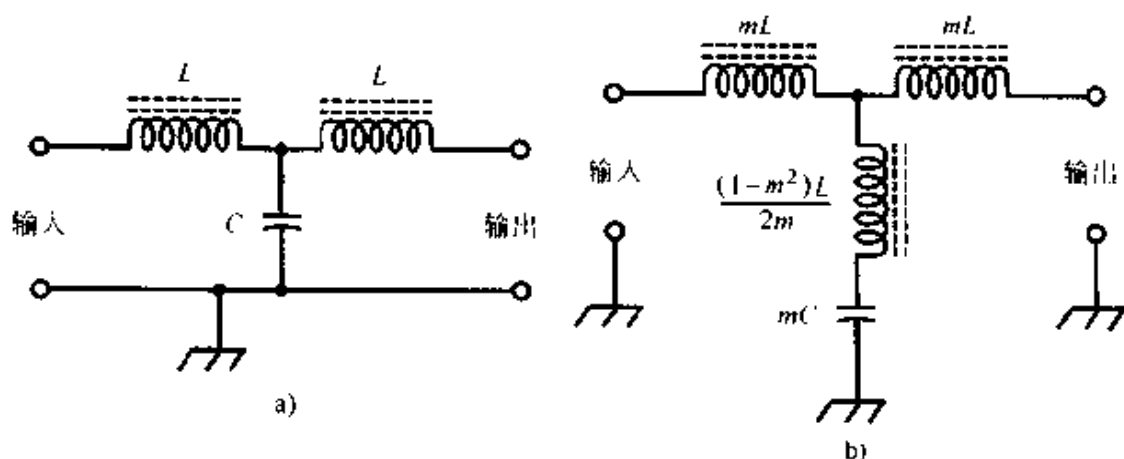


图 13-9 两种低通滤波器

a) 普通 T 形低通滤波器 b)  $m$  派生 T 形低通滤波器

系数  $m$  的数值总是在 0 与 1 之间，对于给定的状态， $m$  的最佳值决定于响应型式和设定的截止频率。正确设计的  $m$  派生滤波器在给定频率下具有比简单 LC 滤波器更加尖锐的截止特性。

### 13.3.2 巴特沃兹滤波器

巴特沃兹滤波器被设计成在通带内为平坦响应、边缘处为平滑下降的特性。这种形式的滤波器可以设计成呈现低通、高通、带通和带阻响应。

图 13-10 中给出了用于低通、高通和带通的理想巴特沃兹滤波器响应。低通、高通和带通巴特沃兹滤波器的例子见图 13-11。为了正确运行，输入和输出阻抗必须正确选择，各元件的值取决于这些阻抗。

### 13.3.3 契比雪夫滤波器

契比雪夫滤波器与巴特沃兹滤波器类似，在通带内具有近似于平坦的响应，在通带外接近完全衰减，即具有锐截止响应。它较之其他各类滤波器的主要优点是下降很尖锐，因此其特性接近理论上的矩形理想特性。

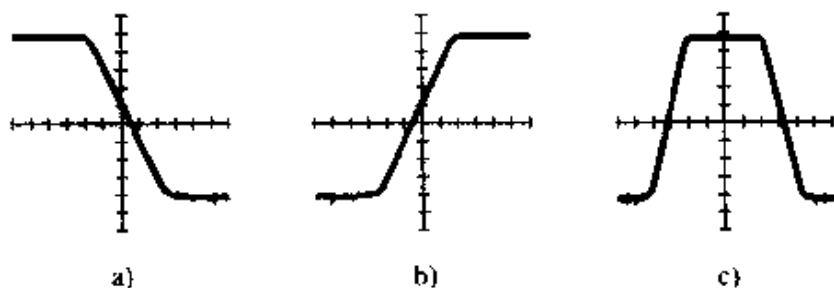


图 13-10 巴特沃兹响应曲线

a) 低通 b) 高通 c) 带通 (水平坐标为频率, 垂直坐标为幅度)

契比雪夫滤波器的响应特性与图 13-10 中所示曲线相似, 但边缘处更陡。电路组成与图 13-11 中所示相同, 只是这儿不用电阻。为了获得最好的滤波器响应, 必须正确选择输入与输出阻抗。电感与电容值决定于输入和输出阻抗, 也与所选的频率响应有关。

### 13.3.4 机械滤波器

*机械滤波器*有时也称*超声滤波器*, 它具有带通响应。借助于类似于小型喇叭的机电变送器将输入信号转变为声振动, 通过一组谐振金属盘将振动传到类似于小型拾音器的输出变送器中, 输出变送器将振动又转变成电信号。在中频和低频段中, 机械滤波器比电滤波器有若干优点。由于谐振盘的尺寸是固定的, 所以不需要 (不可能)

调节。可将机械滤波器设计成在通带内具有接近平的响应, 而边缘处很陡, 即衰减非常快。机械滤波器对物理敲击敏感, 必须十分注意不要让它过度振动。

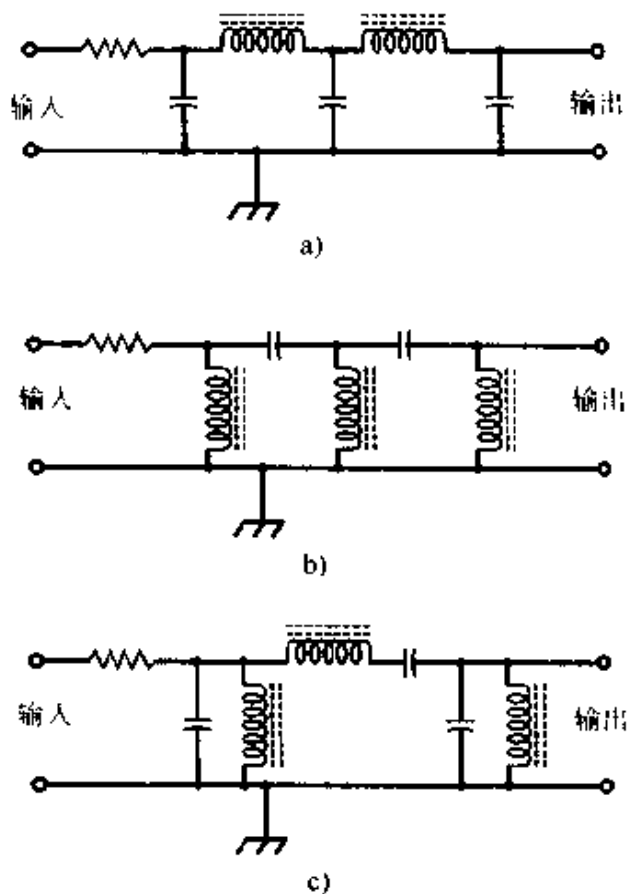


图 13-11 巴特沃兹电感-电容滤波器

a) 低通 b) 高通 c) 带通

### 13.3.5 压电滤波器

采用压电材料的**陶瓷滤波器**可制成带通滤波器，陶瓷盘谐振在滤波器频率。陶瓷滤波器在结构上基本与机械滤波器相同，只是在盘材料组成上有差别。

结构上与陶瓷滤波器相类似的**晶体滤波器**由几片压电晶体组成，每片的谐振频率稍有不同，以获得所期望的带宽和选择特性。

陶瓷和晶体滤波器在发射机和接收机的中频段提供选择性，当其输入和输出部分连接正确时，滤波器的响应接近矩形。

## 13.4 电网滤波器

**电网滤波器**是一种能插入交流供电电子系统的器件。电网滤波器一般由串联的电感和（或）并联的电容器组成。

### 13.4.1 基本电网滤波器设计

图 13-12 是一个简单的交流电网滤波器。电容为  $0.1\mu\text{F}$  左右且耐压数百伏，电感器能满足负载电流通过要求的粗导线绕制而成。环形铁磁心具有高磁导率，并使电感结构紧凑。电感-电容组合的作用如同一个低通滤波器，其截止点比  $60\text{Hz}$  线路频率稍高。

电网滤波器适用于市电电源。这些滤波器具有几个插座，额定参数为交流  $127\text{V}$ 、 $10\sim 20\text{A}$ 。**电路断路器**

可以保护设备在发生严重的瞬态过程，例如从附近雷击感应到电压时不损坏。电路断路器也可保护滤波器中各元件在设备部分短路的情况下不损坏。

### 13.4.2 电网滤波器的使用

电网滤波器对市电电网**抑制瞬态**过程是有用的。瞬态又称尖峰脉冲，能引起一些电子设备，特别是计算机的误操作。

电网滤波器有助于减少有时沿交流传输线传导过来的电磁干扰。

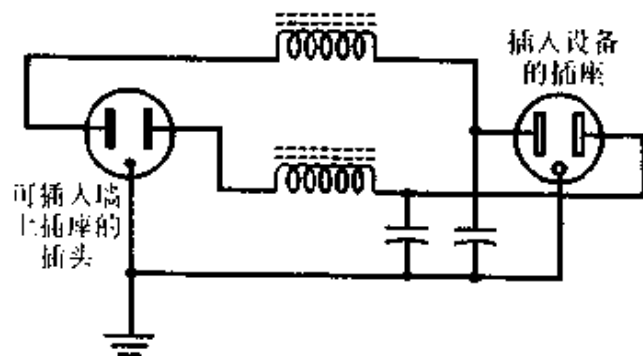


图 13-12 减少瞬态和电磁干扰影响的交流电网滤波器

在通信发射机和市电电网之间插入这样一种滤波器能扼止住射频电流，使电网传输线不起类似天线的作用。在家庭娱乐设备（例如立体声高保真放大器）的功率馈线中，电网滤波器能使残余的射频能量不会从它的电源进入设备。

### 13.5 衰减器

**衰减器**是一种能将信号强度减少一定量的元件、电路或器件。一些衰减器是为音频工作设计的，另一些则是用于射频。

#### 13.5.1 基本衰减器设计

大多数衰减器由无感电阻构成，因此可用于宽的频率范围。图 13-13 是两个简单的例子。图 13-13a 的电路用于具有对称输入和对称输出的系统；图 13-13b 的电路用于非对称输入和非对称输出系统。电阻值决定于输入阻抗、输出阻抗和衰减量。

图中所示的电路是**固定衰减器**。若衰减量必须可调，同时又需维持恒定输入阻抗和输出阻抗，设计将变得很复杂。

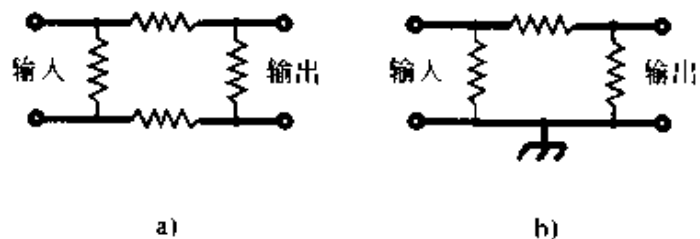


图 13-13 基本衰减器电路

a) 用于对称系统 b) 用于非对称系统

用于音频和对频率灵敏的衰减器可采用 RC

组合并配合一个接成增益小于 1 的运算放大器；用于射频和对频率灵敏的衰减器既可用 RC 组合，也可用电阻-电容-电感组合。

所有衰减器必须能够承受加于其上的功率。在接收机中，这一点不成问题，可以采用 1/4 或 1/8W 小电阻。在设计用于射频发射装置中线性放大器输入回路中的固定衰减器时，各元件一定会消耗较多的功率，可采用大的无感电阻或较小电阻的串并联组合以满足所需要的额定消耗。还必须考虑**工作比**。对于给定的信号功率，元件的额定消耗功率在连续模式（如移频键控或调频）下必须较高，而对于变化的幅度或间歇性模式（例如开关式键控或单边带）则反之。

#### 13.5.2 衰减器的使用

衰减器可用于射频通信中的**退敏**情况。若一个非常强的信号到

来，退敏引起接收机增益减小。若信号是间歇性的，接收机的增益总是在改变，这使得在全频带范围内接收困难。在无线和第一射频放大级之间安置的衰减器能够减小干扰信号的强度，使之不产生有害作用。在正常条件下衰减器被旁路，只有当存在干扰信号时它才起作用。虽然衰减器使接收机收不到最弱的信号，但它允许接收到大部分信号。

在高保真音响系统中，本章前面提到过的图形均衡器使用数个衰减器，每个都在一定音频范围内减少音响电平。这些衰减器实际上是专门频率音响控制器。外置式图形均衡器可安装在高保真放大器的扬声器或（和）耳机中。

衰减器有时用在音频和射频的功率放大中，可变衰减器可用作这类放大器的增益或音量控制。衰减器也能阻止过驱动放大器发生引起失真的振荡，在单边带通信的线性放大器中这一点特别重要，因为失真会不必要地增加这种信号的带宽。



# 第 14 章 通 信

通信一词是指个人之间、企业部门之间和（或）政府部门之间的数据传递。它可以通过陆地通信线（有线方式）、借助于电磁波（无线方式）或联合使用这两种方式来实现。

## 14.1 网络

因特网 (Internet)，是世界范围的计算机网络。它于 1960 年建成，当时称为 ARPAnet 网，它是根据美国联邦政府的“高级研究计划署”的英文名称缩写命名的。

### 14.1.1 报文分组

网上传送数据文件或程序时，在发送计算机端（或源端）将文件或程序分成许多单位报文，称作报文分组。一个报文组由报文头和后随一定数目的数据位或字节组成。每个报文组各有其自己的传送路由。在接收计算机端或终端处，这些单独的报文组再被组合在一起，恢复原始的报文。

图 14-1 是通过因

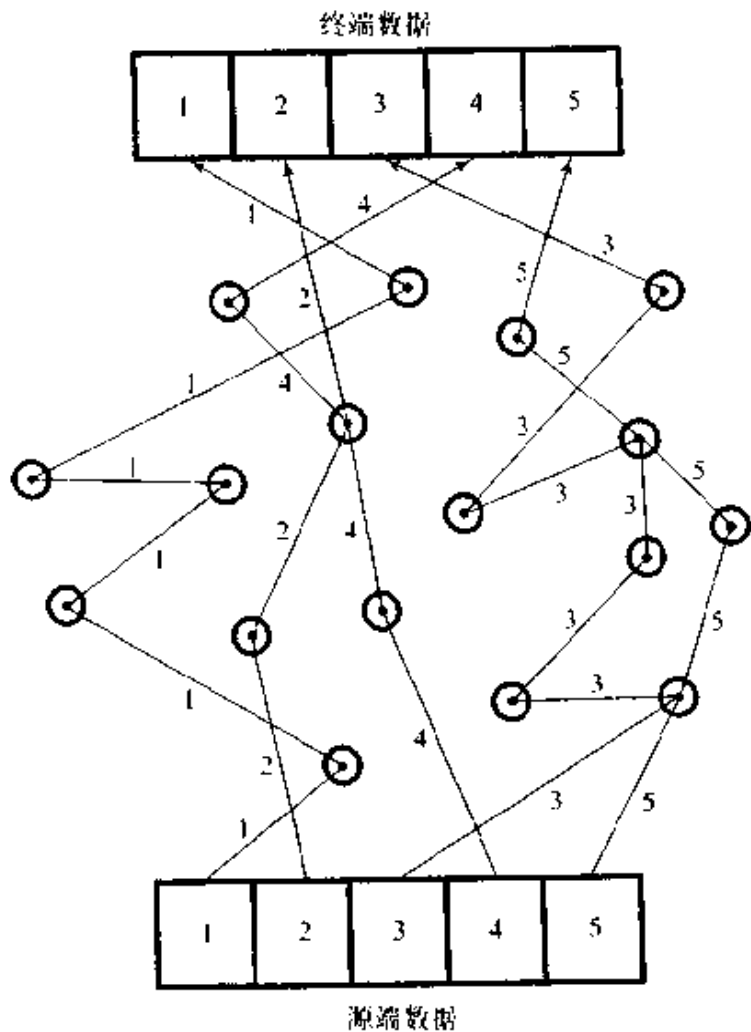


图 14-1 因特网上从源端到终端以报文组方式传送的数据流

特网数据传送一个假想文件的简化图，该文件被分成 5 个报文组，在通信线路繁忙时传送。图中圆圈内的黑点称作**节点**，代表中间计算机。只有在全部报文组都到达终端计算机，且确保无误时，才能完整地恢复原始文件或程序。

### 14.1.2 调制解调器

Modem 是英文**调制解调器**的缩写。调制解调器是从计算机到电话线、有线电视系统或无线电收发机的接口设备。

图 14-2 是一个调制解调器的框图，它适用于家用或商用计算机同电话线的接口。调制器或数模转换器把输出数字数据变成音频信号。解调器或模数转换器将输入的音频信号变换成数字数据。音频信号的频带约在 300~3000Hz 之间，与多数语音通信所用的频带相同。

### 14.1.3 电子邮件和新闻组

许多计算机用户通过因特网的**电子邮件**或新闻组通信，实际上已经部分取代了邮政服务。使用电子邮件或新闻组需要有一个电子邮件地址，以 stangib@aol.com 为例，地址中在符号 @ 前面的部分是**用户名**。而在符号 @ 的后面、英文句号前面的一些字符代表**域名**。句号后面由 3 个字母组成的缩写词表示**域类型**。表 14-1 给出了常用因特网域类型的缩写词。

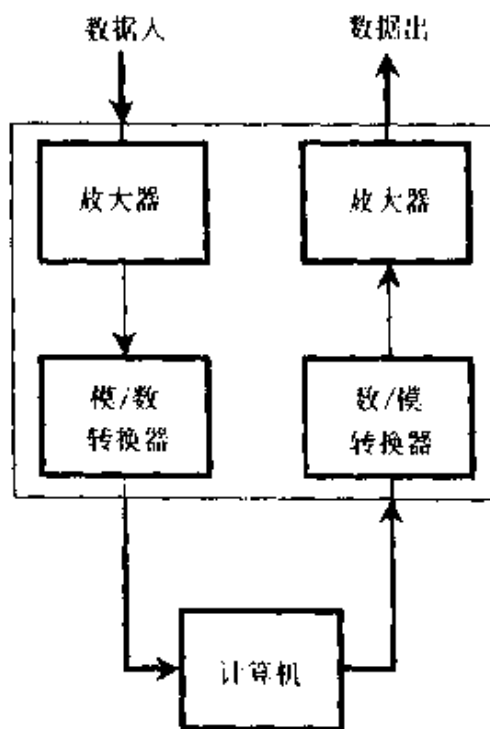


图 14-2 连接电话线的调制解调器的框图

表 14-1 常用因特网域类型的缩写词

缩写词	域类型	缩写词	域类型
.com	商业	.mil	军事
.edu	教育	.net	网络
.gov	政府	.org	组织

### 14.1.4 网上会话

计算机用户们可以通过因特网同其他计算机用户进行“电传打字”式会话。这种方式称为**网上聊天**。也可以把语音信号先数字化，然后通过因特网传送它。当网络上业务清闲时，这种会话联系的效果很好，几乎可以同电话联系媲美；但是当网上业务繁忙时，通话质量变差，效果降至低限；而当网络极端繁忙时，如果网上各站点之间相隔大量的节点，则几乎不能通话联系。

### 14.1.5 获取信息

因特网使人们接触到成千上万的信息源。数据按照**文件传输协议**（file transfer protocol 简称 FTP）在计算机之间传送。当你使用 FTP 时，远处计算机中的文件或程序就可供你使用，就像这些程序或文件存在于你自己的计算机内一样。

**万维网**（World Wide Web 也叫 WWW 或 Web）使用**超文本**，它是一种交互的访问方式，文件中某些词或句被加亮显示和（或）加有下划线。当你选中这些词或句之一时，就会链接到涉及同一论题或有关课题的其他文档。

### 14.1.6 局域网

**局域网**是小区域范围内互相链接的计算机组。在**客户机-服务器式局域网**中（图 14-3a），有一个中心计算机称作**文件服务器**，其他比较小的计算机（图中标为 PC）都同中心计算机相连接。在**对等式局域网**中（图 14-3b），所有的计算机都是 PC，它们具有大体相等的计算能力、速度和外存容量。对等式局域网比客户机-服务器式局域网有较强的保密性和独立性，但是当全体用户共享同一数据时，速度较慢。

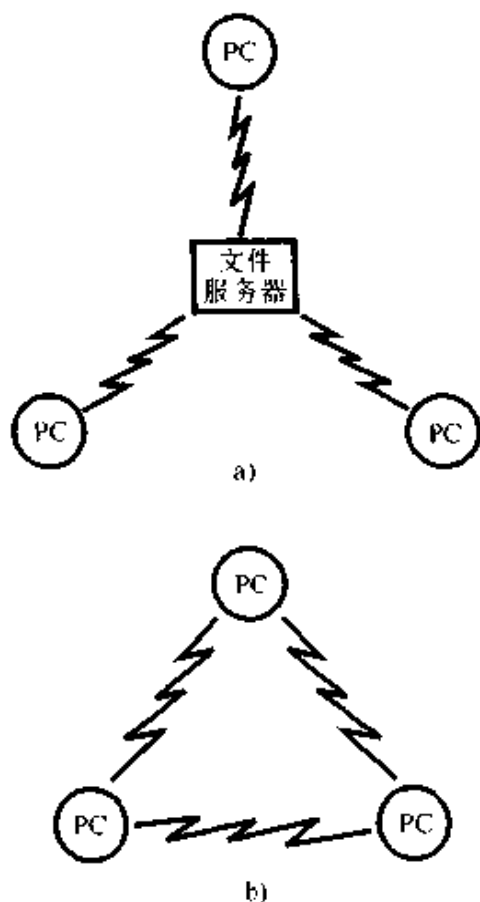


图 14-3 局域网

a) 客户机-服务器式局域网

b) 对等式局域网

## 14.2 卫星

从某种意义上说,通信卫星系统是一个巨大的蜂窝状网络,它的各中继器在围绕地球的轨道上运转。它的终端用户可以是固定位置的、移动的或是便携式的。

### 14.2.1 静止卫星

在高度为 22300mile 的圆形轨道上的卫星,每绕行地球公转一圈正好是一天。如果在赤道上方这样的轨道上安置一颗人造卫星,并且公转的方向与地球自转方向相一致,它就是一个与地球相对位置保持不变的**静止卫星**。地球上的人看到的这颗卫星始终停留在天空中的同一位置。一颗静止卫星用作通信时,能覆盖地球表面 40% 的范围。三颗这样的卫星相互间隔  $120^\circ$ , 就可以覆盖整个世界。

地面上的台站若想通过这样一个卫星进行通信,两个地面站都必须处于该卫星的视线之内。如果两个地面站处于地球几乎相反的两侧,则必须通过两个卫星才能通信,见图 14-4。

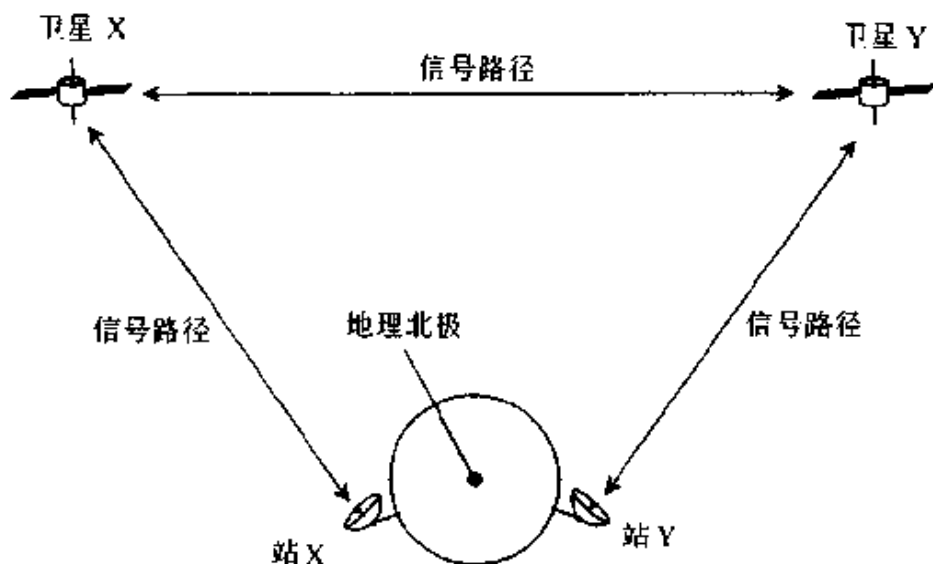


图 14-4 利用两颗静止卫星的通信线路

### 14.2.2 低地轨卫星

静止卫星的轨道需要常年不断调整,发射与维护这种卫星的费用昂贵。由于通信路径长,信号存在明显的延时,同时为保证可靠通信

需要发射机功率高，天线指向精确。为解决利用与地球相对位置保持不变的卫星的这些问题，人们提出了**低地轨 (LEO) 卫星**的概念。

在 LEO 系统中，在地表上数百英里的上空，围绕地球的极地轨道按一定间隔布置十余个卫星。用户发出的信息可以在这些卫星之间中继传输，最后达到终端用户。如果安放的卫星足够多，地球上任何两地的用户都可以维持稳定的联系。

LEO 卫星线路比与地球相对位置保持不变的卫星线路更容易使用。使用简单天线就足够了，不必有准确的指向特性。对发射机功率要求低，只需几瓦就行。传播延时也小，可小于  $0.1\mu\text{s}$ 。

### 14.2.3 全球定位系统

**全球定位系统 (GPS)** 是一种卫星网络，用户可以利用它严格确定出自己所处地理位置的经度、纬度和高度（如果合适）。卫星发射的射频信号具有一定微波谱，并且经过定时码和识别码调制。GPS 接收机包含有计算机，它通过确定信号在卫星之间及卫星与接收机之间的传播时间，计算出到 4 个不同卫星的距离。GPS 接收机给出的位置数据可以准确到几英尺（对政府或工业部门用户）或是几百英尺（民用）。

## 14.3 个人通信系统

**个人通信系统**包括使用无线手机、寻呼机、短波无线电、民用波段无线电和业余无线电。

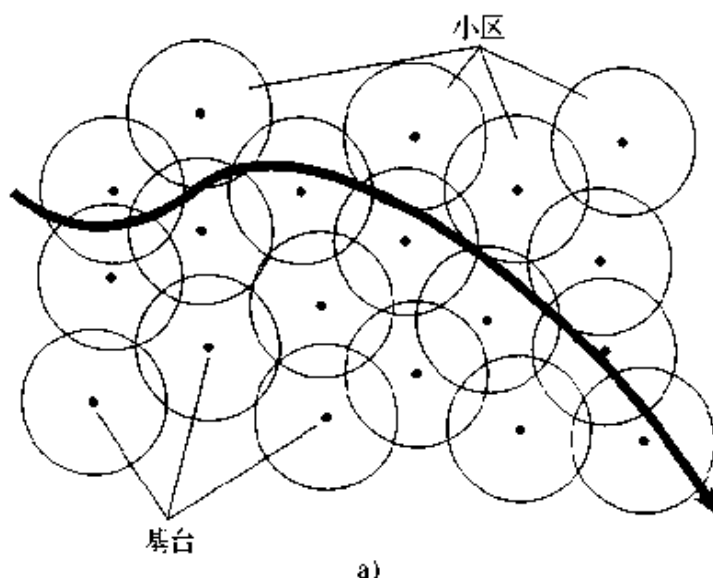
### 14.3.1 蜂窝通信系统

**蜂窝通信系统**是由**中继器**（又叫**基台**）组成的网络，它允许把便携式或移动式无线电收发机当作电话机使用。小区是基台所覆盖的区域。

如果在固定场所使用无线手机，例如在餐馆或居所，进行通信只通过一个小区。而如果无线手机是在移动的车辆上，例如在汽车或船上，通信要经过若干小区，如图 14-5a。所有的基台都通过有线线路、微波线路或光缆连接到电话系统。借助于专用的调制解调器可以把计算机连接到**蜂窝电话**手机上，如图 14-5b，以便访问因特网。

### 14.3.2 无线本地回路

*无线本地回路*同蜂窝系统类似。电话机和数据终端都通过无线电收发两用机连接到系统上,图 14-6 给出了一个例子。粗线代表有线线路连接,细线代表无线联系。椭圆和圆圈代表用户。每个用户可以使用电话机或装备有调制解调器的个人计算机。数个电话机和(或)计算机可以通过居所或企业内部的有线系统连接在一起。



### 14.3.3 寻呼机

简单的*寻呼机*是一个电池供电的小型无线电接收机,它拾取甚高频或特高频频段的射频信号,而发射机则布置在全城、全县或电话分局区内的各个地方。接收机拾取到已编码的信号,显示出一组数字和字母字符。如果寻呼机上装有*语音邮件*功能,发信人还可以留下简短的口头信息。

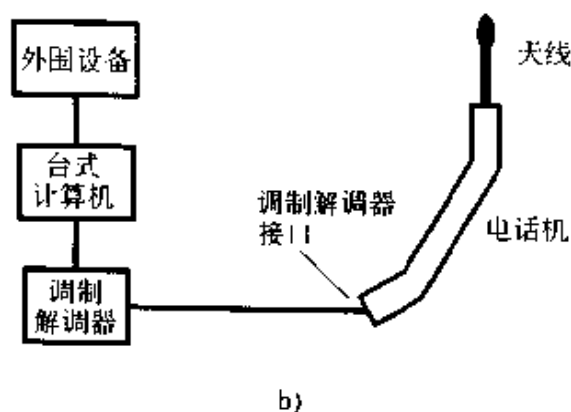


图 14-5 蜂窝通信系统

a) 蜂窝通信系统简图

b) 台式计算机同无线手机相连接

### 14.3.4 无线电子邮件

有接收电子邮件功能的寻呼机接收机,类似于手持计算机或小型计算器。当它发出一系列哔哔声时,用户就会查看显示屏,读取信息。这个信息可以存储起来,以备后来再次查看,或是转发给台式计算机。有些寻呼机不仅能接收电子邮件,而且还能发送电子邮件。它是通过

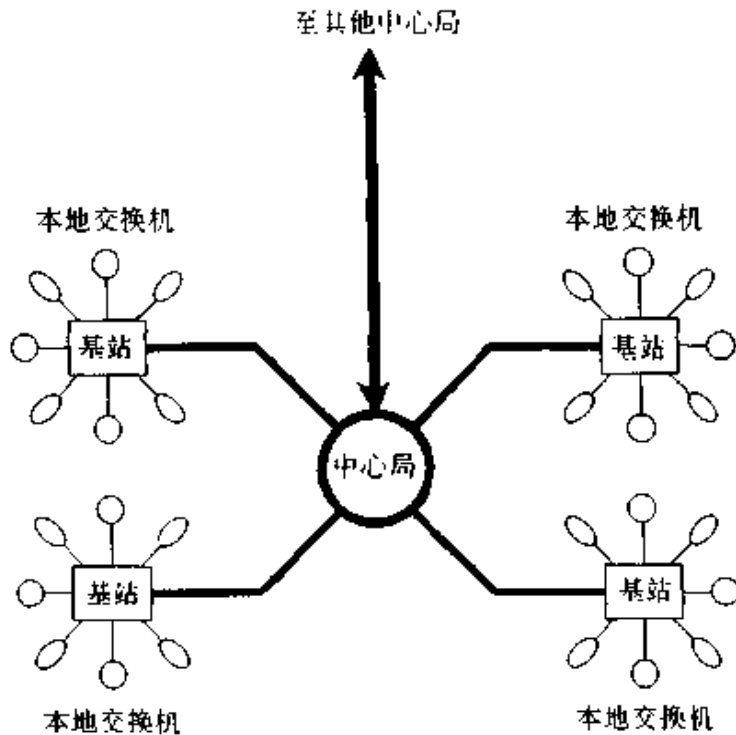


图 14-6 本地回路无线电话系统  
(粗线是有线连接线路, 细线是无线联系,  
圆圈是电话机, 椭圆是数据终端)

类似于蜂窝电话网络的一种系统实现的。这种寻呼机内包含了小型无线电发射机和附加的鞭状天线。

有两点要注意：飞机上一般禁止使用无线电子邮件发射机；驾驶机动车时，绝对不要试图撰写或阅读电子邮件。

### 14.3.5 传真

传真是通过电话线或无线电，发送和接收静止图像的一种方法。每个传真机具有一个图像发送机和一个图像接收机。图 14-7 展示了无线电传真信号的传输过程。但在源端传真机只画出了发送部分，而在终端只画出了接收部分。完整的传真装置应具有发送机和接收机，以便双向交换传真信息。

为发送传真，首先要把一页打印或写好的文稿放在光学扫描器中，扫描器将图像转换成二进制数字信号（1 或 0）。扫描器的输出送到调制解调器，把二进制数字数据转换成适于传送的模拟信号。在终端，模拟信号又被转换回来，变成类似于源端扫描器产生的数字脉冲，这些脉冲再送到打印机、计算机或某种终端。



图 14-7 无线电传真信号的传送

## 14.4 业余通信

业余通信包括短波收听、民用无线电业务和业余无线电。

### 14.4.1 短波收听

高频无线电通信接收机有时称为短波接收机。这些无线电设备大多数都工作在 1.5~30MHz 的频率范围内。也有一些工作在标准的调幅广播波段，即频率范围在 535kHz~1.605MHz，少数甚至可以接收频率低于 535kHz 的信号。大多数电子商店出售短波接收机。

在美国，短波收听者接收信号不必取得执照。但是有预期目的发送短波，则一般需要执照。短波收听者常常对通信怀有浓厚的兴趣，足应获得一个业余无线电爱好者执照。

### 14.4.2 民用无线电业务

民用无线电业务（也称作 CB）是一种无线电通信/管理业务。人们最熟悉的形式是 D 类业务，它工作在高频段 27MHz（波长 11m）附近的 40 个离散信道。

D 类固定台站运行的基本无线电设备是一个具有 40 个信道的、功率为 12W 的收发报机。它采用单边带语音模式工作，由标准的 117V 市电供电。移动台站的收发报机一般也是 12W 的单边带收发报机，由 13.7V 车载电池供电。电源线应当直接连接在电池上，建议不要接在“点烟器”的插座上。

应急无线电联合通信组 (REACT) 是一个世界范围的无线电通信



操作员的组织。他们在受灾害的地区向当局提供援助。REACT 操作员监视 D 类波段内频率为 27.065MHz 的应急信道（第 9 信道）。通用移动无线电业务使用 A 类民用频带，工作在 460~470MHz 之间的频率上。两个 A 类收发报机之间的最大通信距离约 40mile。超出 40mile 以外进行通信要加中继器。

有些 CB 运作需要有政府部门颁发的执照，有些不需要。欲知最新的条例，请向销售 CB 设备的电子商店核对。

#### 14.4.3 业余无线电

业余无线电固定台站由如图 14-8 所示的几部分组成，其中计算机用来同其他拥有计算机的业余台站，以分组无线电方式构成网络。在线电话（陆地通信线路）业务可以装备这种台站。计算机还控制台站的各天线和保存所有联系过的台站的业务记录。大多数现代的收发报机都能够通过计算机在当地现场操作，也能通过无线电通路或陆地有线线路在远处遥控操作。

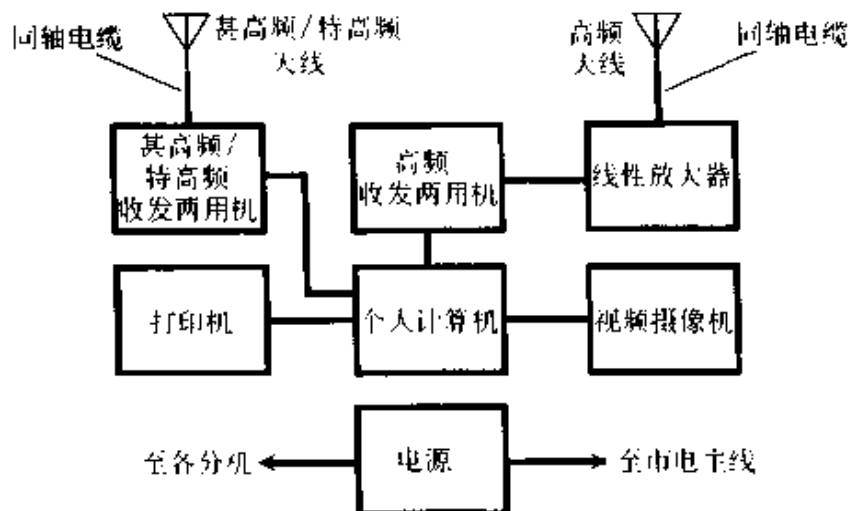


图 14-8 基本的业余无线电台站

业余移动无线电设备一般在运动中的交通工具，如轿车、载货汽车、火车、轮船或飞机上运行。移动设备一般比固定设备紧凑。此外，移动设备都设计得能经受住温度和湿度的剧烈变化，以及强烈的机械振动。

便携式业余无线电设备几乎都用电池作为电源，并且能快速安装和拆卸。有些便携式设备在携带过程中就可以运行，例如手持对讲机

或步谈机。便携式设备必须能经受住振动、极度潮湿和温度变化，必须经久耐用。

所有的业余无线电台站都必须有运营执照。为得到有关信息，请与如下部门联系：

American Radio Relay League (ARRL) (美国无线电中继站联盟)  
225 Main Street  
Newington, CT 06111  
<http://www.arrl.org>

## 14.5 闪电

闪电对业余无线电爱好者、民用无线电业务操作员和短波无线电收听者来说，是一种危害，因为他们的系统中都使用了室外天线。

### 14.5.1 闪电的特性

闪电的冲击或雷击历时不过几分之一秒。闪电有 4 种类型，见图 14-9：

- (1) 云内闪电（在单块云的内部）。
- (2) 云到地面的闪电。
- (3) 云际间闪电（在不同的云之间）。
- (4) 大地到云的闪电。

(2) 和 (4) 类闪电对业余爱好者及电子设备的危险性最大，(1) 和 (3) 类闪电也能引发电磁脉冲，并足以损坏灵敏的设备。

### 14.5.2 自身保护

如果你附近正在发生闪电，推荐采取如下防护措施。这些方法未必保证完全免除危险，但可使危险程度降至最低。

(1) 留在室内或是金属壳体内，如轿车、公交车或火车内。远离窗户。

(2) 如果不可能留在室内，应寻找地势低洼的地方，如沟渠或溪谷躲避，蹲坐下来，双脚并拢，直到险情过去。

(3) 避开孤立的树或其他高耸的绝缘物体，如电线杆或旗杆。

(4) 避开家用电器和电子设备，它们都连接市电的供电线，或是具有室外天线。

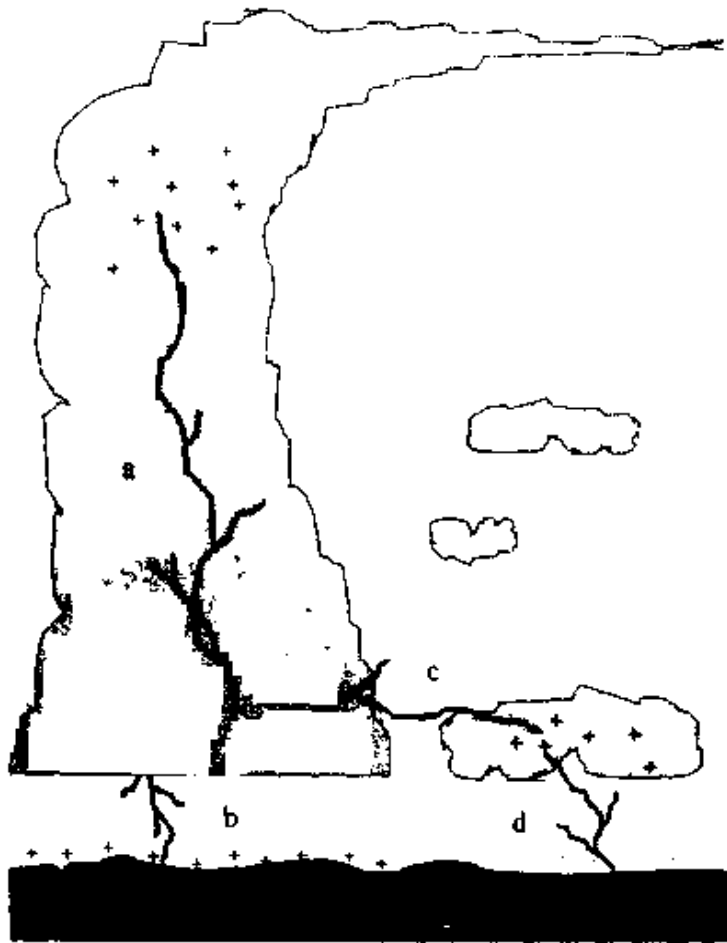


图 14-9 4 种类型的闪电

a—云内闪电 b—云到地面的闪电  
c—云际间闪电 d—大地到云的闪电

- (5) 远离淋浴器和浴缸。
- (6) 避开游泳池，无论是室内的还是室外的。
- (7) 不要使用电话。

### 14.5.3 硬件保护

如下防护措施可使损坏电子设备的风险降至最低（但不保证完全免除）：

- (1) 当你的附近发生闪电时，决不操作或试验无线电台站。
- (2) 当电台不使用时，要断开所有天线和地线的全部馈线导体，市电的接地线除外。最好把这些导线完全放在建筑物的外面，并且连接到距建筑物数英尺远的接地处。
- (3) 当电台不使用时，从市电插座上把所有设备的电源插头拔下来。

(4) 当电台不使用时, 断开所有天线旋转关节的电缆和通向室外的接线, 并且将它们接地。

(5) 避雷器可以防止静电电荷累积, 有一定保护作用, 但它不能彻底保障安全, 不能依靠它作为常规的保护措施。

(6) 避雷针降低了被直接雷击的机会, 但不能把它当作忽视其他安全措施的托辞。

(7) 电源线的瞬变过程抑制器(冲击电压保护器)可降低对计算机的“低频瞬态干扰”, 有时也保护电源内部的敏感元件, 但是也不能将它作为忽视其他安全措施的借口。

(8) 天线杆和天线塔应当使用粗导线或编织电缆接至大地。可以使用数条 8 号线(美国线规)平行地从天线杆或天线塔出发, 直线方向延伸接至大地, 构成可靠的接地导体。

(9) 使用与电子学或无线电有关的杂志广告上刊登的其他保护装置。

欲知更多信息, 请向有资格的通信工程师咨询, 或是参阅由如下机构出版的避雷规范

(Lightning Protection Code):

National Fire Protection Association

Batterymarch Park

Quincy, MA 02269

## 14.6 安全性和保密性

人们都关心通过通信系统交流信息的安全性和保密性, 因为这些信息有时被某些人擅自搞乱、滥用或篡改。

### 14.6.1 无线和有线比较

无线窃听与有线窃听主要在两方面不同。首先, 无线系统比用硬线连接的有线系统, 更容易进行窃听。其次, 在无线通路上不可能发现窃听用的实体装置, 而在硬线连接的有线系统, 通常可以找到窃听搭线。

如果通信线路某部分是经由无线通路实现的, 就可以在射频发射天线的的作用区域内, 放置窃听接收机, 如图 14-10, 截取信号。无线窃

听装置的存在，对系统中任何设备的电子特性皆无影响。

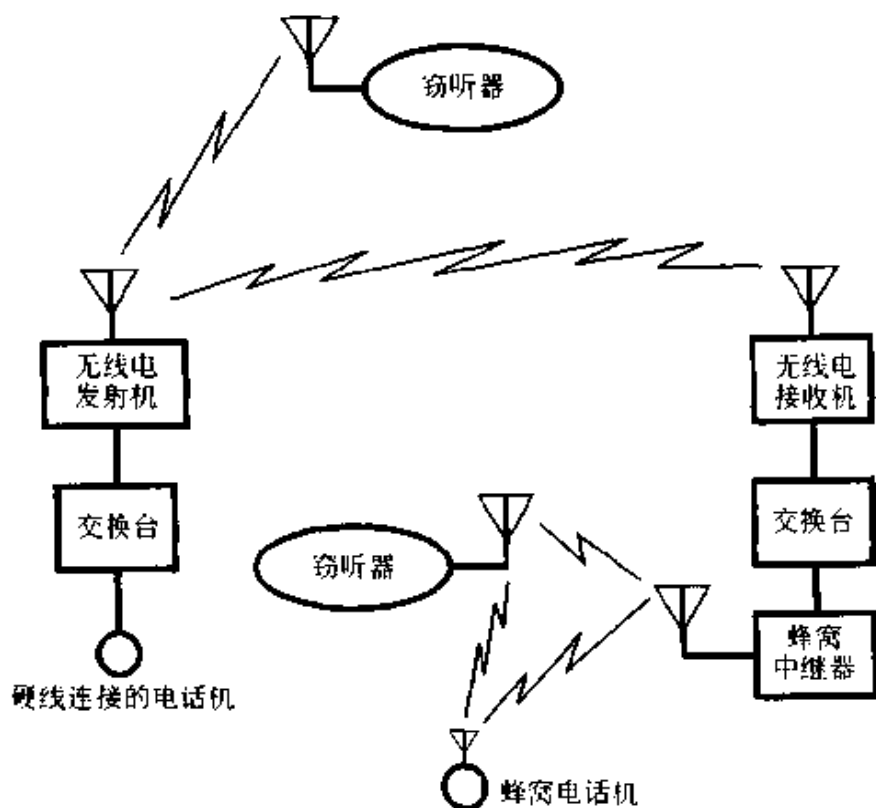


图 14-10 在电话系统的射频通路上窃听  
(粗直线代表导线或电缆，锯齿线代表射频信号)

#### 14.6.2 安全等级

通信安全性分 4 个等级，从零级（不安全）到技术上能达到的最安全的 3 级。

1. 不安全（零级） 在零级安全通信系统中，任何人只要有钱、有时间获得必要的设备，就能在任何时刻接收信号，进行窃听。有两个零级通路的例子，就是业余无线电和民用无线电业务的对话通信。如果某人进行窃听，通信的任何一方都不能检测到这种侵犯。这种通信系统的保密程度很差。

2. 有线电报或等同设备的安全性（1 级） 欲搭线窃听端至端的硬线连接比较费劲，通常灵敏的检测设备能够检测出任何搭线窃听的存在。1 级安全通信系统必须具备一定的有效而实用的特性：

(1) 费用必须能够承受。

(2) 系统必须对一些业务或交易有适度的安全性，例如能保障使用信用卡购物的安全。

(3) 当网络利用率高、业务繁忙时, 提供给每个用户的安全度, 不应比网络清闲时下降。

(4) 如果使用密码, 应当至少在 12 个月内不能被破译, 最好是在 24 个月或更长的时间内不能被破译。

(5) 加密技术(如果使用的话)应当至少每 12 个月更新一次, 最好是 6 个月更新一次。

3. *商务交易的安全性(2级)* 某些财务金融数据和商业数据, 当然要求更强有力的保护, 这已超出有线电报或等同设备的能力。所以许多公司或个人拒绝使用电子手段转帐汇款, 担心罪犯有机可乘, 非法侵入帐户。

在 2 级安全通信系统中, 商务交易使用的加密应当做到: 黑客需要 10 年, 最好是 20 年或更久才能破译密码。而且至少每 10 年, 最好是每 3 至 5 年更新一次加密技术。

4. *军用通信的安全性(3级)* 保障军用通信的安全, 需要最先进的尖端加密技术。技术上先进的国家和实力雄厚的经济实体都有此优势。但是随着技术添加给人类活动的实力日益增强, 一些别有用心的人和恐怖分子, 可能寻求通信基础设施的薄弱之处, 予以破坏。

3 级安全通信系统中的加密应当做到: 工程师确信黑客欲破译此密码需至少 20 年的时间, 最好是 40 年或更久。加密技术要在经济状况允许的条件下经常更新。

### 14.6.3 加密程度

采用数字式加密技术可做到安全和保密兼得。基本思想是: 只有具备必需的解密密钥, 接收机才能读懂信号。

对于 1 级安全通信系统而言, 只有电路的无线部分才需要加密。密码必须定期改换, 以维持其“新鲜”。图 14-11a 中的框图展示了一个假想的蜂窝电话联络系统, 且只有无线部分加密。

对于 2 级或 3 级安全通信系统而言, 必须端至端加密。在所有的中继点也要把信号加密, 甚至由导线或电缆传输的信号也加密。图 14-11b 画出了这种加密安排方案, 系统仍是图 14-11a 的假想的蜂窝通信系统。如果这样做的安全性, 远大于端至端只使用单一密码情况的话, 中继点的密码可以改换成与端点不同。

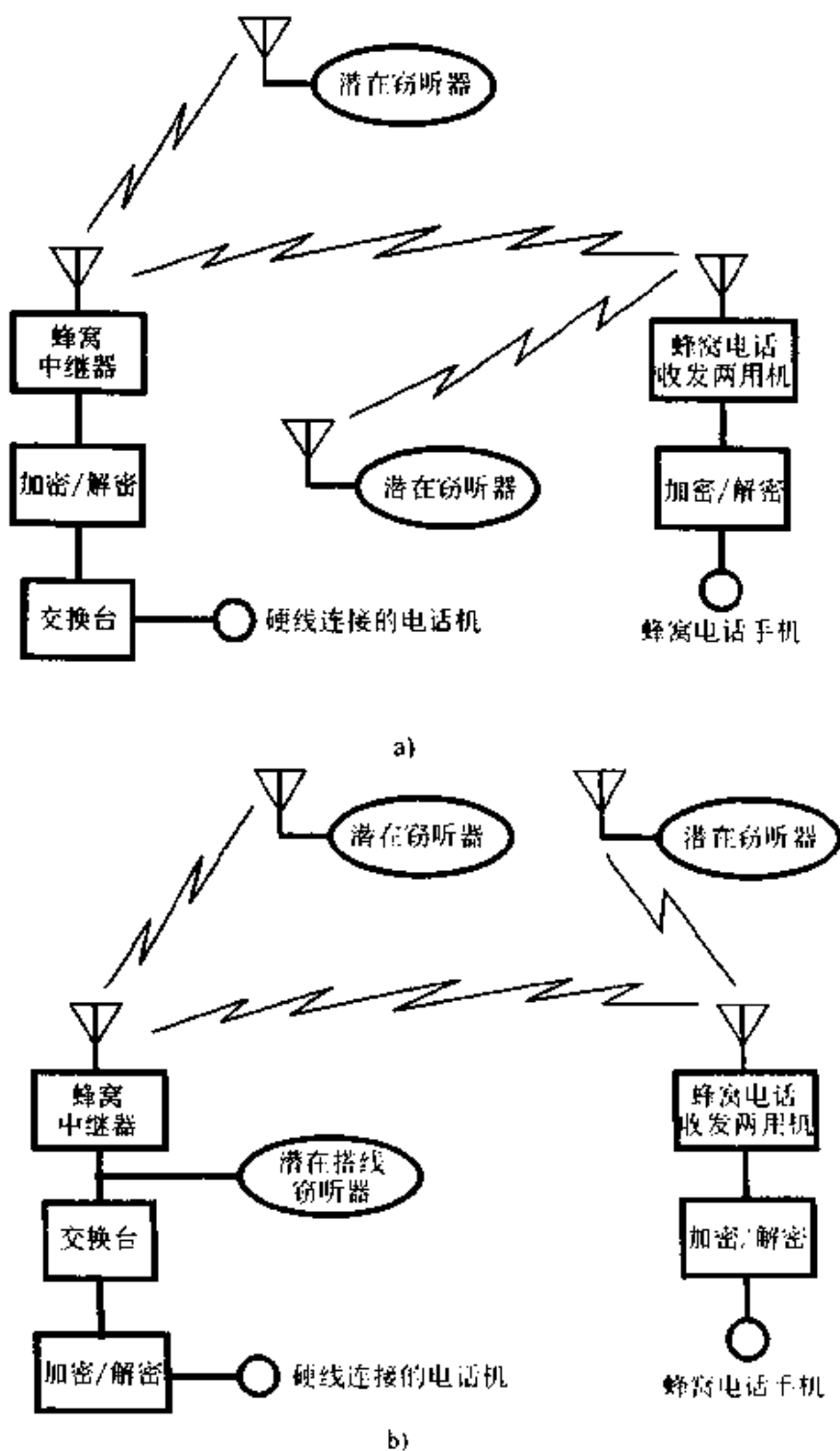


图 14-11 加密

a) 只无线部分加密 b) 端至端加密

(粗直线代表导线或电缆, 锯齿线代表射频信号)

#### 14.6.4 无绳电话的安全性

大多数无绳电话都设计得使别人难以非法“盗用”电话线。防窃听不是在设计上首要考虑的事情，除非是昂贵的无绳电话系统。如果在特殊的场合，担心使用无绳电话不保密，应当使用硬线连接的电话机。

如果某人知道无绳手机和座机的工作频率，决意窃听电话双方的对话，可以在通路上安放无线窃听器，这样在远处就可以截获和记录谈话，如图 14-12。设计和制造用于多信道无绳电话机的无线窃听器，要比单信道的困难得多。

#### 14.6.5 蜂窝电话的安全性

蜂窝电话实际上是长距离无绳电话。由于覆盖范围广，增加了被窃听和非法盗用的风险。近年来蜂窝电话销售商们，开始在广告上宣传说他们的产品是“防窃听”的、“反克隆”的。一些厂家宣

称他们的产品比别的厂家产品有更多的优点。“防”这个用词应当特别予以怀疑。实际上，数字式加密是维护蜂窝通信系统的保密性和安全性的最有效途径。

欲使蜂窝电话系统非常安全可靠，访问代码、私人代码和数据都必须加密。如果某未经授权的个人，获知了蜂窝电话机用以访问通信系统的代码（该电话机的“名字”），就可以把别的电话机编程，哄骗

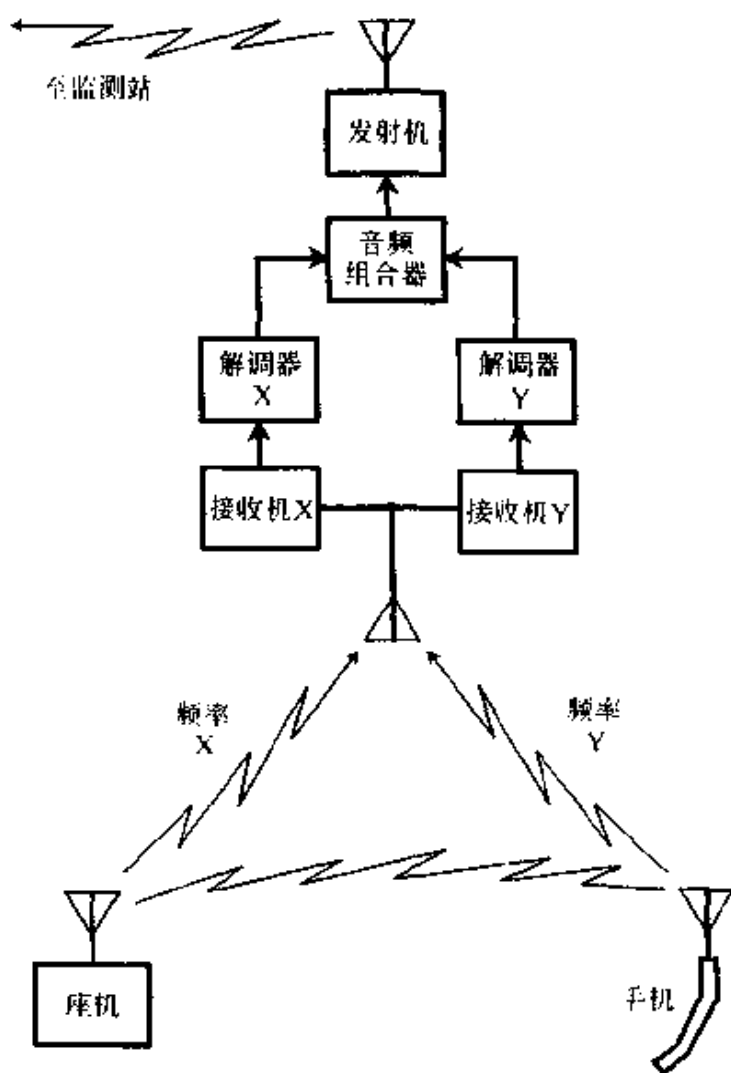


图 14-12 对无绳电话进行无线窃听



系统，使之“认为”这个假冒的电话机是属于系统的合法用户。这就是**蜂窝电话克隆**。

除了把数据进行数字式加密外，还要使用**用户身份辨识代码**（用户 ID）。最简单的是个人身份号码（PIN），更先进的系统使用**语音模式识别**，只有当指定用户的话音送入电话机时，电话机才工作。也可以利用**手印识别**或**虹膜识别**。

#### 14.6.6 单音静噪

使用亚音频或音频猝发音可以防止接收机对不必要的信号和有害信号作出响应。这些方法称作**单音静噪**。为了在有信号时使接收机打开静噪电路，信号必须被具有某一频率的正弦波调制。在美国，一些警察部门和企业的通信系统使用猝发音系统。单音静噪在无线电爱好者中间也很流行。

#### 14.6.7 扩展频谱

接收**扩展频谱**信号需要专门的接收机。常规的接收机或扫描器不能截获扩频信号，除非它能准确追随信号频率的变化。频率变化的次序可以很复杂，当它以最精巧诡秘的形式变化时，其安全效果几乎同数字式加密一样好。欲进一步了解，请见第 15 章。

#### 14.6.8 音频倒频

利用业余无线电爱好者的单边带发射机和接收机，可以演示基本的**音频倒频**技术，见图 14-13。把发射机连接至假天线上，设置发射机运行在上边带，设置接收机运行在下边带，并调谐其频率，使之高于发射机频率 3000Hz。

假设上边带发射机压缩后的载频为 3.800000MHz，它产生的输出谱类似于图中左面的图形。图中水平坐标每个分度代表 500Hz，垂直坐标每个分度代表 5dB。接收机调谐在 3.803000MHz 的频率上。因此，来自发射机的信号能量落入接收机的通带之中，如图中右面的图形所示，但是音频频率却在 3000Hz 的话音通带内被倒置了。为了演示倒频，将音频输出录在磁带上，再把录好的信号加到输入端。于是“上下颠倒”的信号又重新“正面朝上”了。

高级的音频倒频器将音频通带分成两个或更多的子通带，将其中某些通带段或全体通带段倒置，或许还根据主通带中的频率将它们重

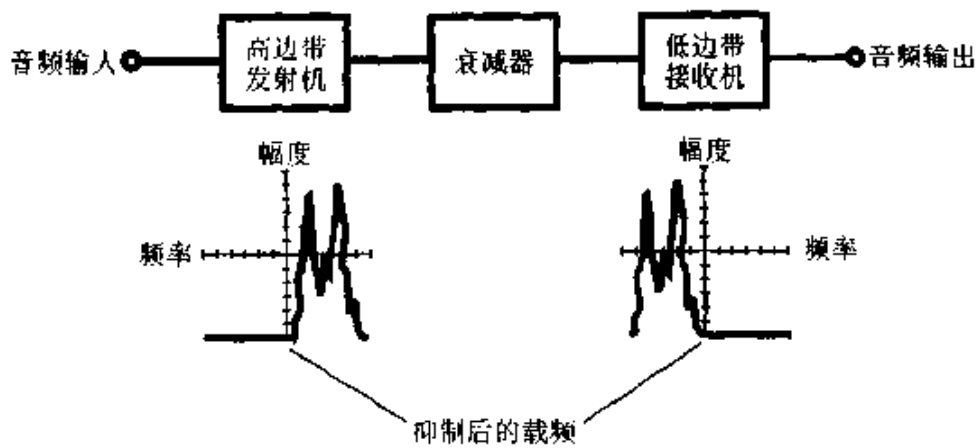


图 14-13 简单的话音倒频和解倒频电路

新排列。音频倒频技术仍然属于模拟方式，达不到数字式加密得到的安全等级。

## 第 15 章 无线电接收机

无线电接收机把远距离无线电发射机发送的电磁波转换成原始的信息。就广义而言，接收机是变送器的一种形式。

### 15.1 简单接收机

对于业余无线电和教学应用，简单电路构成的电磁信号接收机就能有效地发挥作用。

#### 15.1.1 矿石收音机

在如图 15-1 所示的电路中接上高频二极管，就会得到一个能拾取调幅信号的原始接收机。有时，称这个二极管为晶体矿石，低灵敏度接收机的绰号矿石收音机就由此而来。除了从天线进来的输入信号，矿石收音机没有能量来源。如果发射电台距接收机在数英里之内，并且天线足够大，矿石收音机的输出足以能推动普通耳机或头戴式耳机。

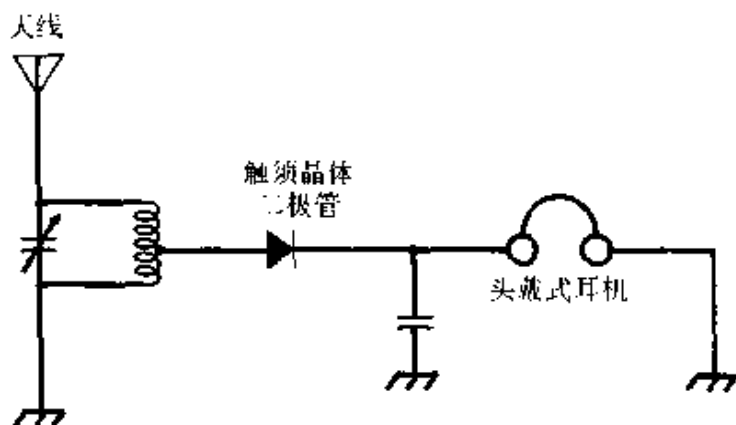


图 15-1 矿石收音机

二极管起检波器作用，从信号中恢复调制波形。要使检波器有效地工作，二极管的电容必须很低，工作时起射频整流器作用，而不是起电容器作用。就这种应用而言，点接触式二极管是极好的。

#### 15.1.2 直接变频接收机

直接变频接收机通过把输入信号与频率可变的本地振荡器的输出进行混频，得到它的输出。也就是说，把接收的信号连同本地振荡器的输出一起馈送到混频器。图 15-2 是直接变频接收机的框图。

为了接收连续波无线电报信号，本地振荡器的频率要设置得略比信号频率高些或低些。音频输出的频率等于本振频率与信号频率之差。而为了接收调幅或单边带信号，本振频率应设置成与输入信号载频零差频。

直接变频接收机的选择性差，频率位于本振频率两侧的许多信号，彼此之间互相干扰。使用选择性滤波器，从理论上说能够消除这些

干扰。但是，这种滤波器一定要针对某一固定频率设计，才能保证具有足够陡峭的边缘。然而直接变频接收机的高频放大器却工作在宽的频率范围上。

### 15.1.3 超外差接收机

*超外差接收机* 利用一个或多个本地振荡器和混频器，得到一个固定频率的信号。固定频率信号比频率变化的信号更容易处理。输入信号首先通过一个称为前端的、灵敏的可调谐放大器。前端的输出同来自可调谐本振的非调制信号混频。再将混频输出的和频、或差频信号放大。得到的就是第一中频信号，如将其滤波，可以得到很好的选择性。

如果把第一中频信号检波，这种收音机就是*单变频接收机*。有些接收机使用第二混频器和第二本振，将第一中频信号变换成频率更低的第二中频信号。这就是*双变频接收机*。由于中频带通滤波器应用于固定频率上，容易制作，能够得到优异的选择性，带宽调整简便。此外，固定频率的中频放大器容易保持在调谐状态，增强了选择性。

超外差接收机能够截获和产生有害信号。来自外部的虚假信号和*镜像频率*信号，而内部产生的是*尖叫哨音*。如果审慎地选择本振频率，镜像频率信号和哨音都不会成为问题。

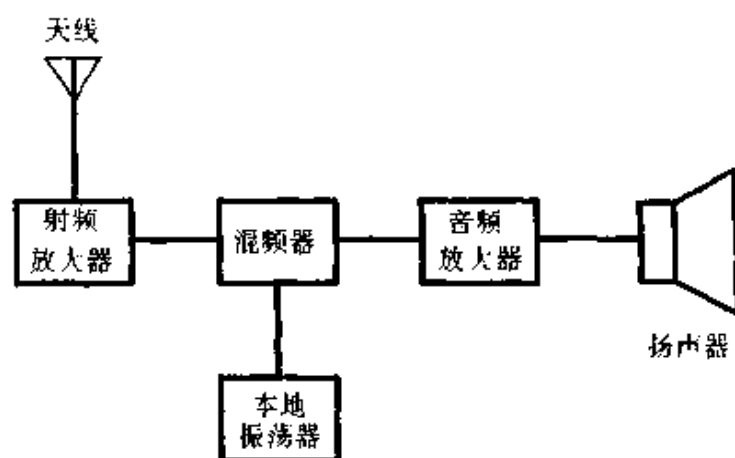


图 15-2 直接变频接收机的框图

## 15.2 现代接收机

无线电通信接收机在无线电频谱的特定范围上工作。具体覆盖的范围视接收机的用途而定。

### 15.2.1 指标

接收机的指标说明接收机完成它的设计功能的程度，主要有：

1. **灵敏度** 表示接收机灵敏度最常用的方法是：规定产生一定**信噪比**（S/N）或信号加噪声对噪声之比（用分贝表示），天线端所必须具有的输入信号微伏数。灵敏度与前端增益有关，但是前端级产生的噪声大小更重要，因为后随各级既放大前端的输出信号，也放大前端的输出噪声。

2. **选择性** 接收机的通带，先由前面高频放大级的宽带预选器初步确定，然后再由后面放大级中的窄带滤波器“磨”准确。预选器使接收机在欲接收的信号频率左右大约±10%的范围内灵敏度最佳。窄带滤波器只在待接收的具体信号的发射频带内有响应，附近信道的信号则受到抑制。

3. **动态范围** 接收机输入端信号的电压幅度可以变化几个数量级。动态范围是指接收机在输入信号从非常弱到非常强的范围内变动时，它维持稳定输出、并保持其额定灵敏度的能力。良好的接收机动态范围超过100dB。

4. **噪声系数** 一般而言，接收机产生的内部噪声越小，其噪声系数越低，信噪比越好。噪声系数在甚高频、特高频和微波频率范围是至关重要的。人们知道，砷化镓场效应晶体管甚至在很高的频率下，噪声电平也很低。其他类型的场效应晶体管用于较低的频率。双极型晶体管噪声相当大。

### 15.2.2 概述

图15-3是一个单变频的基本超外差接收机的框图。个别接收机的设计可能与之不同，但基本由图中几部分构成。

1. **前端** 前端由第一高频放大器构成，放大器和天线之间常常有一些带通滤波器。接收机的动态范围和灵敏度由前端的性能决定。

2. **混频器** 由一级或两级混频级构成，它将变化的信号频率变换

成固定不变的中频。混频输出的频率，是输入信号频率和本振频率的和或差。

3. **中频级** 中频级提供了接收机的大部分增益，又在此级得到最优的选择性。为得到理想的带宽和响应，常常使用**晶格滤波器**或**机械滤波器**。

4. **检波器** 检波器从信号中提取信息。对调幅信号常用**包络检波器**，对单边带、移频键控

和连续波信号用**乘积检波器**，对调频信号用**锁相环**和**比例检波器**。

5. **检波后各级** 检波器之后通常有一或两级音频放大器，用以提升信号电平，使之适于用扬声器或头戴耳机收听。

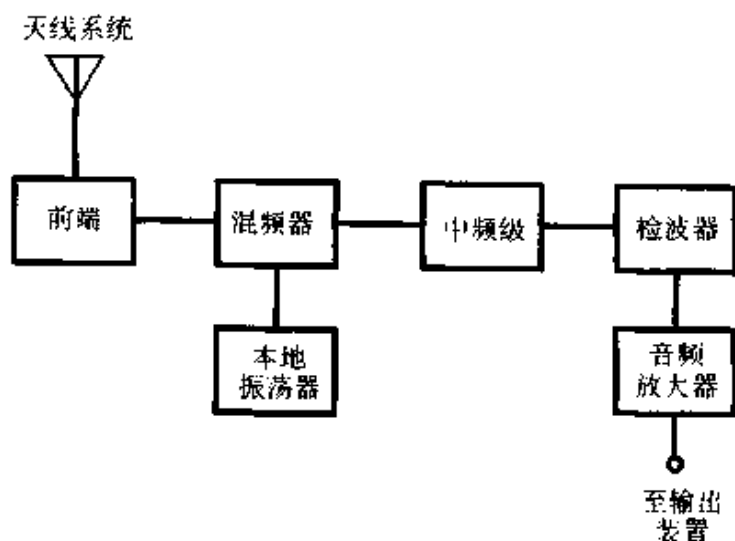


图 15-3 单变频超外差接收机的框图

## 15.3 检波前各级

第一混频器前面的各级，必须提供适当的增益，尽可能降低噪声。

### 15.3.1 预放大器

全部**预放大器**都工作在甲类，且大多使用场效应晶体管。场效应晶体管具有高输入阻抗，适于弱信号工作。图 15-4 是一个简单的高频预放大器，输入用调谐电路降低噪声和提供一定的选择性。此电路产生 5~10dB 的增益，具体值要视工作频率和选用的场效应晶体管而定。

重要的是，预放大器是线性放大器。非线性会造成**互调失真**，接收机中接有非线性预放大器，可能会严重恶化接收机的性能。

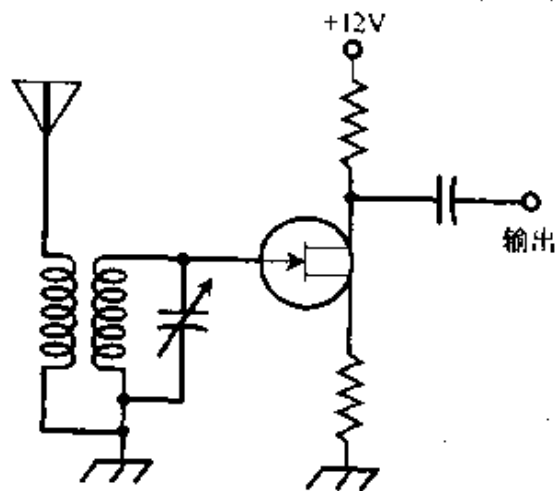


图 15-4 基本预放大器示意图

### 15.3.2 前端

在低频和中频，应该注意天电噪声，但是前端电路的设计很简单。在 30MHz 以上，天电噪声就消失，限制灵敏度的主要因素是接收机内部产生的噪声。因此，随着频率增高到甚高频、特高频和微波频段，前端设计变得愈加关键。

与预放大器一样，前端也必须是尽可能线性的。非线性度越大，电路就越容易受到混合乘积结果的影响。前端还应具有尽可能大的动态范围。

### 15.3.3 预选器

*预选器*提供合适的通带响应，改善信噪比，降低接收机受到远离其工作频率的强信号作用而过载的可能性。在超外差接收机电路中，预选器还起镜像抑制作用。多数预选器的 3dB 带宽为接收频率的很小百分数。

预选器可以利用调谐度盘跟踪调谐，但是需要仔细设计和调整。有些接收机含有可以独立调节的预选器。

### 15.3.4 混频器

*混频器*需要非线性电路元件，如二极管或二极管的组合。这种混频器是*无源混频器*。二极管混频器不需要外部电源，而且有插入损耗。*有源混频器*使用一个或多个晶体三极管，或是使用集成电路提供增益。

混频电路的输出，可以按照需要，调谐在和频或是差频上。

### 15.3.5 中频电路

从镜像抑制考虑，高中频（数兆赫）比低中频（小于 1MHz）更可取，但是低中频可以得到更好更尖锐的选择性。双变频接收机具有较高的第一中频和低的第二中频，可以兼得最好的镜像抑制和选择性。

中频放大器可以由调谐变压器耦合、级联而成。中频放大器置于混频器之后，检波器之前。双变频接收机具有两个中频放大器电路，第一中频放大器电路跟随第一混频器，后接第二混频器，第二中频放大器电路跟随第二混频器，后接检波器。

超外差接收机*中频电路*的选择性可以数学表示。将功率衰减 3dB 和 30dB 两处的带宽相比较，以指出通带响应的形状。30dB 时选择性

对 3dB 时选择性之比,叫*形状因子*。大多数应用场合都希望中频具有*矩形响应*。形状因子越小,响应就越接近矩形。陶瓷、晶格和机械之类的滤波器,都具有小的形状因子。

## 15.4 检波器

*检波*也叫解调,它的作用是从信号中恢复信息,如音频、图像,或是打印的数据。

### 15.4.1 调幅检波

将载波整流,就能从调幅信号中提取出调制波形。图 15-5a 画出了调幅用包络检波器波形图。图中快速跳动的是载频,慢速起伏的是调制信息的复制波形。经过输出电路时,利用一个容量足够大的电容器,其上电荷在一个载波周期内保持不变,使载波跳动被平滑而消失,但是电容量又不能过大,避免使慢起伏的调制信号也被平滑掉。这种方式称作*包络检波*。

### 15.4.2 连续波检波

为检出连续波无线电报信号,需要给接收机注入与载频相差数百赫的另外一个信号。这个注入的信号由可调谐*拍频振荡器*(BFO)产生。将 BFO 和所要的连续波信号混频,输出音频频率的差频信号。为了接收键控的莫尔斯码连接波信号,BFO 的频率应当调谐得使输出差频音调听起来比较舒服。对于多数人来说,此频率在 700Hz 左右。这就是*外差检波*。

### 15.4.3 移频键控检波

可以使用与连续波检波同样的方法,进行信号的*移频键控检波*。在混频器中载波与 BFO 差拍,产生输出音频单音,并在两个不同的音调上交替。

对于移频键控检波,BFO 的频率应设置在这样的频率,它高于或低于传号和空号的载波频率数百赫。BFO 与信号频率之间的差或*频偏*,决定了输出频率,必须设定这个频偏,以得到标准的音调。与连续波接收情况不同,它几乎不容许 BFO 有调整偏差。

### 15.4.4 调频检波

调频信号检波有多种方法。这些方法也适用于调相信号检波。



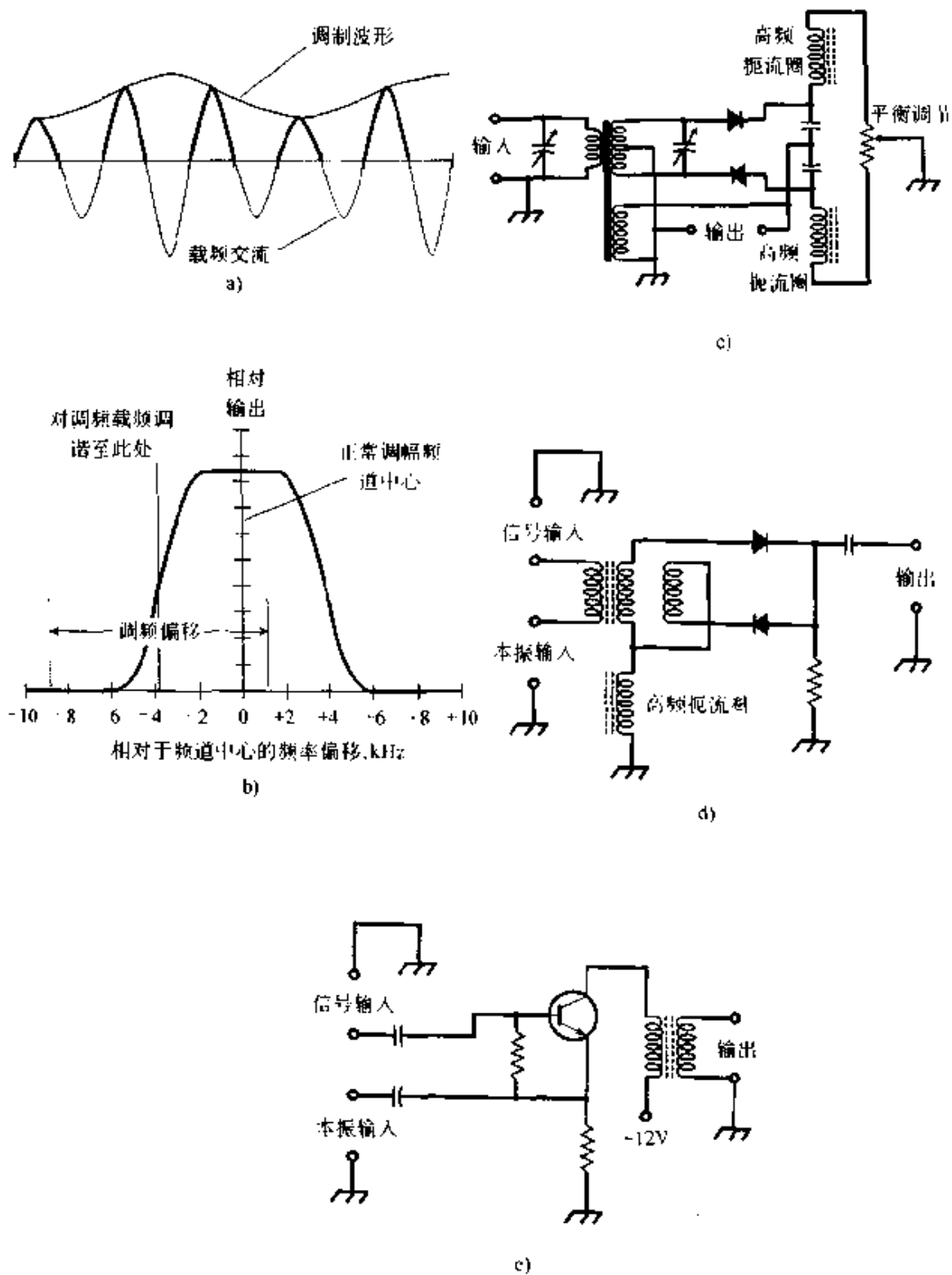


图 15-5 检波器波形及电路

- a) 调幅用包络检波器波形 b) 调频用斜率检波器波形  
 c) 调频用比例检波器电路 d)、e) 单边带用乘积检波器电路

1. **斜率检波** 调幅检波器可以当作粗糙的调频检波器使用,方法是把调幅接收机的频率调在靠近、但不处在调频信号的未调制载波频率上。调幅接收机的窄带滤波器通带为数千赫,其选择特性曲线如图15-5b所示。如果调频信号的未调制载频接近滤波器响应的边缘处,调频使信号反复出入接收机通带,从而造成接收机输出变化。

2. **锁相环** 若将调频信号注入锁相环,环路将产生误差电压,它是调制波形的复制品。锁相环前面安放一个限幅器,使接收机对调幅无响应。在装有限幅器的调频接收机中,弱信号的表现是要么出现、要么消失,没有减弱的过程。

3. **鉴频器** 这种调频检波器的输出,随信号的瞬时频率变化。当信号频率处在通带中心时,输出电压为零。如果信号瞬时频率降低,输出电压变正,如果频率上升,高于中心频率,输出变负。鉴频器对幅度变化敏感,可加接限幅器克服。

4. **比例检波器** 这种调频检波器具有内在的限幅器。最初的设计方案是美国无线电公司开发的,用于高保真度接收机和电视接收机的音频部分。图15-5c是一个简单的比例检波器电路。

#### 15.4.5 单边带检波

为了接收连续波、移频键控和单边带信号,可采用**乘积检波器**。输入信号与来自无调制本振的信号,在乘积检波器组合在一起,产生音频或视频输出。乘积检波在单一频率上实现,不是像直接混频那样在变化的频率下实现。这单一的固定频率,是输入信号与本振输出混频得到的。

图15-5d和图15-5e给出了两个乘积检波器电路。图15-5d使用二极管,没有放大;图15-5e使用双极型晶体三极管,电路提供一些增益。两个电路的关键特性是半导体器件的非线性。利用它产生信号的和频及差频,得到音频或视频输出。

### 15.5 音频级

接收机中适当设计检波器后各级的音频响应,可提高接收机的选择性。

### 15.5.1 滤波

语音信号要求的频带约从 300Hz 到 3000Hz。通带为 300~3000Hz 的音频带通滤波器，可以改善某些语音接收机的接收质量。理想的语音音频滤波器在通带范围内，没有或几乎没有衰减，而在通带外具有强衰减，并且具有陡峭的边缘（矩形响应）。

为清楚读出连续波信号，只需要数百赫的带宽。音频连续波滤波器可使响应带宽缩窄，小到 100Hz。通带比 100Hz 再小，会产生振铃，降低接收质量。连续波音频滤波器的中心频率约为 700Hz。

**音频陷波滤波器**是具有狭窄而尖锐响应的带阻滤波器。干扰信号若是在接收机输出端产生固定频率的单音，可以用它消除。音频陷波滤波器是可调谐的，频率变化范围大致为 300~3000Hz，有些调谐范围较宽。有些复杂设备是自动调谐的。当出现外差效应并保持数十分之一秒时，陷波电路激活，使其自身频率调准在外差频率上。

### 15.5.2 静噪

**静噪**电路当没有信号时，使接收机受到抑制，当信号出现时，使接收机正常接收信号。多数调频通信接收机使用静噪系统。一般是当没有出现信号时，静噪电路接通，而当有信号，且其幅度超过静噪门限，则断开静噪电路。静噪门限可由操作人员调节。

有些系统的静噪电路，只有当输入信号具备某种特性才断开。最常用的**选择性静噪**方法是利用亚音频单音或是猝发音振荡器。这样做可以阻止非法的传输通过中继设备，或是防止接收机接收到这个非法的传输。

## 15.6 电视接收

**电视接收机**具有可调谐前端、振荡器和混频器、中频放大器组、视频解调器、音频解调器和放大器电路、显像管及其周边电路和扬声器。

### 15.6.1 快扫描电视

图 15-6 给出了模拟式**快扫描电视**的框图。按照美国电视标准，每帧 525 行，每秒 30 个整帧。**高清晰度电视**和**数字电视**每帧的行数更多，每秒的帧数也更多。直到撰写本书时，这个每秒 30 帧、每帧 525

行的国家电视标准委员会 (NTSC) 的方案, 事实上仍然是美国的现行使用标准。

在美国, 无线电快扫描电视广播占据了 68 个频道, 从 2 频道至 69 频道。每个频道带宽 6MHz (包括了视频和音频信息)。2 频道至 13 频道组成了甚高频电视广播频道 (表 15-1)。14 频道至 69 频道组成了特高频电视广播频道 (表 15-2)。

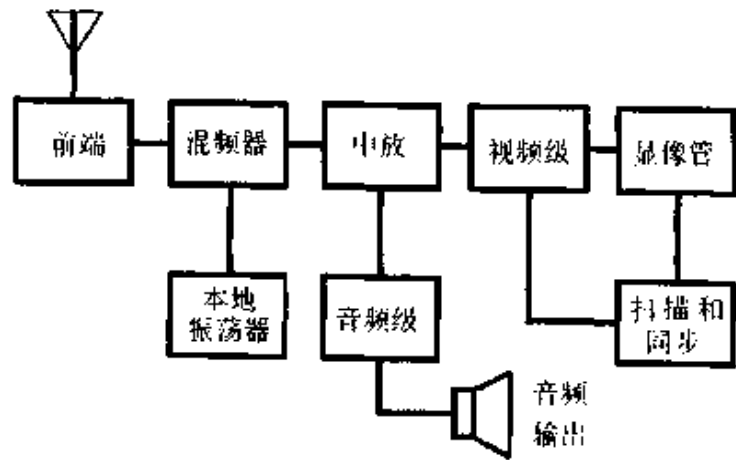


图 15-6 快扫描电视接收机的框图

表 15-1 甚高频电视广播频道

频 道	频率/MHz	频 道	频率/MHz
2	54~60	8	180~186
3	60~66	9	186~192
4	66~72	10	192~198
5	76~82	11	198~204
6	82~88	12	204~210
7	174~180	13	210~216

表 15-2 特高频电视广播频道

频 道	频率/MHz	频 道	频率/MHz
14	470~476	22	518~524
15	476~482	23	524~530
16	482~488	24	530~536
17	488~494	25	536~542
18	494~500	26	542~548
19	500~506	27	548~554
20	506~512	28	554~560
21	512~518	29	560~566

(续)

频 道	频率/MHz	频 道	频率/MHz
30	566~572	50	686~692
31	572~578	51	692~698
32	578~584	52	698~704
33	584~590	53	704~710
34	590~596	54	710~716
35	596~602	55	716~722
36	602~608	56	722~728
37	608~614	57	728~734
38	614~620	58	734~740
39	620~626	59	740~746
40	626~632	60	746~752
41	632~638	61	752~758
42	638~644	62	758~764
43	644~650	63	764~770
44	650~656	64	770~776
45	656~662	65	776~782
46	662~668	66	782~788
47	668~674	67	788~794
48	674~680	68	794~800
49	680~686	69	800~806

### 15.6.2 慢扫描电视

**慢扫描电视** 通信台站, 需要具有单边带能力的收发两用机、一台标准的 NTSC 电视机或个人计算机、视频摄像机和**扫描变换器**。标准传输速率只是每秒 8 帧。这样就降低了对带宽的要求, 实际上降到等于单边带信号的带宽 (音频范围是 300~3000Hz)。

扫描变换器由两个数据变换器 (一个用于接收, 另一个用于发送)、存储器、单音振荡器和检波器组成。扫描变换器在商店可以买到。计算机可编程实现此功能。业余无线电操作人员常常自己组装扫描变换器。

## 15.7 特殊无线电技术

在一定的场合下，某些不太常用的无线通信技术很有效。

### 15.7.1 双分集接收

无线电通信经由电离层传播高频（约 3~30MHz）电磁波时，会在接收机产生衰落效应，采用双分集接收，可以降低这种效应。此方案使用两个接收机，都调谐在同一信号频率上。但是它们各自使用单独的天线，彼此相隔数个波长的距离。两个接收机输出馈送到一个公共的音频放大器，如图 15-7 所示。

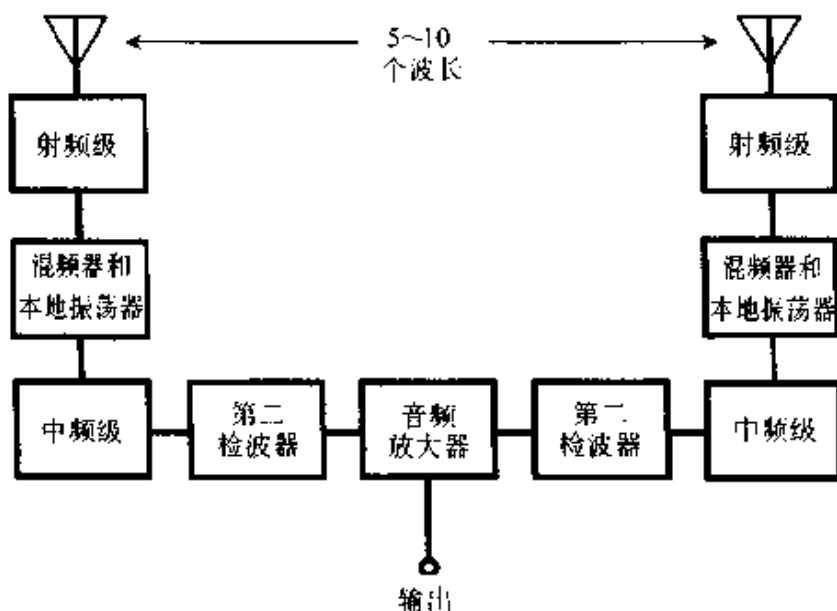


图 15-7 双分集接收可以降低高频衰落

双分集系统的调谐是很苛刻的，设备价格也很昂贵。有些电台使用 3 个或多个天线与接收机，可提供优异的抗衰落性能，但是增加了调谐难度和设备费用。

### 15.7.2 同步通信

数字信号在单位时间内传送给定数量的信息，比模拟信号需要的带宽窄。*同步通信*是一种特殊的数字通信模式，在这种系统中的发射机和接收机，统一在一个公共的标准时钟下工作，以优化在通信信道或通带上能够发送的数据量。

同步数字通信，也称作*相干通信*，系统中发射机和接收机同步运行。接收机把每个发射比特当作单位时间块，计算从该比特准确开始

到准确结束所延续的时间。从而有可能使用带宽极窄的接收滤波器。同步需要使用外部频率/时间标准。美国国家标准局台站 WWV 或 WWVH 的广播可作此用。分频器用来得到必要的同步频率。对于特定的比特，当（且仅当）该比特持续时间内，信号的平均电压超过某一定值时，接收机的输出会产生一个信号音或脉冲。错误信号，如可能是滤波器振铃、天气干扰（闪电生成的无线电噪声）或其他噪声引起的，一般可以忽视，因为它们对平均比特电压，不能产生足够的影响。

试验表明，同步通信比非同步系统改善了信噪比，在低至中等数据速率下，可改善数分贝。如果接收机中使用数字信号处理技术，信噪比还会得到进一步改善。

### 15.7.3 数字信号处理

数字信号处理技术应用于模拟通信系统时，如单边带或慢扫描电视，信号首先由模/数转换变成数字形式。接着把数字数据“整理好”，使数字定时和幅度严格遵守使用该数字数据类型的协议。最后，数字信号经过数/模转换，又变成原始语音和视频。

数字信号处理能够扩展通信电路的工作范围，因为它允许在比较恶劣的条件下接收（同没有数字信号处理相比）。数字信号处理还改善了信号的质量，使接收设备和操作人员不易出错。在纯数字式电路中，模/数和数/模转换是不必要的，但是数字信号处理仍然可以用来整理信号。这样做可改善系统精确度，可以多次复制数据（就是产生多阶段的副本）。

数字信号处理电路，能将接收的数字信号中的噪声和干扰最小化。如图 15-8 所示。图

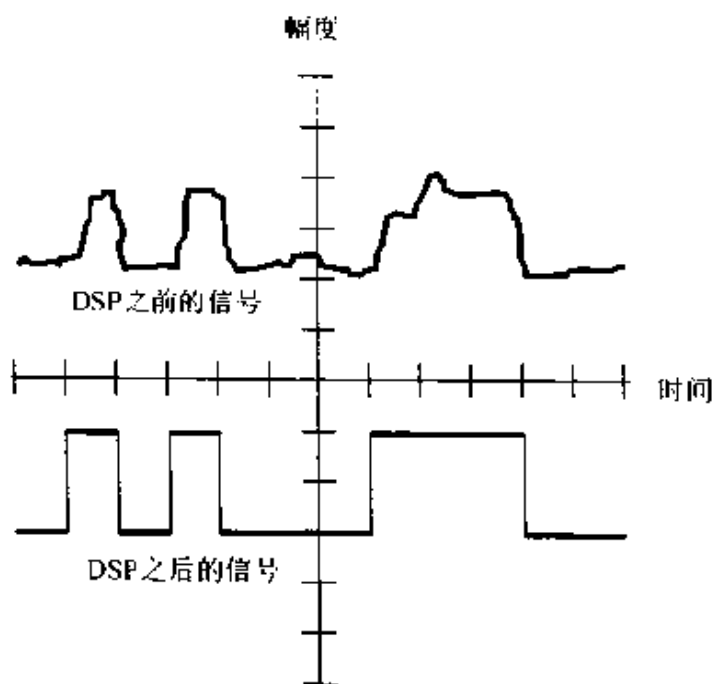


图 15-8 数字信号处理“整理”信号

中上方的曲线，是假想的、数字信号处理前的信号，下方的曲线是处理后的信号。如果输入信号在某时间间隔上，超过了一定电平，则数字信号处理输出高电平（逻辑 1）。如果在某个时间间隔输入信号电平低于临界点，则输出低电平（逻辑 0）。

#### 15.7.4 复用

通信信道或通带上的不同信号可通过多种方式“纠缠”在一起。最常用的方法是*频分多路复用*和*时分多路复用*。多路复用需要发射机端具有编码器，接收机端具有解码器。

频分多路复用时，将信道划分为多个子信道。不同信号的载频也彼此有间隔，以避免相互重叠。每个信号都独立于其他信号。

时分多路复用时，将信号划分为多个时间段，然后轮流传送各段信号。接收机必须与发射机同步。两者可用时间标准（如 WWV）作为同步时钟。

#### 15.7.5 扩展频谱

*扩展频谱通信*时，主载频快速变化，与信号调制无关，接收机经过编程去跟随。结果灾难性干扰（强干扰信号能够湮没期望的信号）出现的概率近乎为零。人们很难非法窃听正在进行中的通信。

扩频系统可以有很复杂的功能，并且有保密功能。如果发射机和接收机的操作人员不将系统功能机密泄漏给其他人，同时他们也不将他们之间正在通信联系的情报告知其他人，那么，没有人会知道在此频带上正发生的通信联系。

发射机与接收机之间，进行扩频通信的过程中，其工作频率可能在数千赫、数兆赫或是数十兆赫的范围内起伏。随着同一通带被越来越多的扩频信号所占据，该通带的总噪声电平呈现增长。因此，一个通带内可以处理的扩频通信的路数，是有实际限制的。这种限制大约与所有信号都是固定频率时的限制相同。

产生扩频频谱的常用方法是*跳频*。发射机有一个按一定次序排列的信道表。接收机必须受程控按照此表、以同一次序与发射机同步工作。*静止时间*是频率发生改变的那段间隔。它必须足够短，以使这变化的信号不被发觉到，而且在任何单频下都不致引起干扰。还存在许多*静止频率*，使信号能量被减弱到这种程度，如果某人调谐到序列表



中任一频率，不会注意到这个信号。

另外一种获得扩频的方法是*扫频*，是将发射机的主载波用正弦波调制，它控制主载频在指定通带内上下变化。此调频信号与信号包含的信息无关。当且只有当接收机的调谐，按同一正弦函数的规律变化并与发射机同相时，才能截获到信号。

## 第 16 章 无线电发射机

*无线电发射机* 把数据转换成电磁波，目的是让一个或多个无线电接收机复原数据。因此，无线电发射机是变送器的一种形式。

### 16.1 振荡与放大

无线电发射机利用一个或多个振荡器产生射频信号，利用放大器产生需要的功率输出。关于振荡器的内容，请见第 11 章。关于放大器的内容，请见第 12 章。

有些发射机除了振荡和放大级外，还装有混频器。在发射机中混频器的作用与在超外差接收机中相同：它将两个不同频率的信号组合，得到第三频率的输出，此频率可以是输入频率的和或差。

### 16.2 调制

*调制* 是将数据“印在”在电流或电磁波上的过程。可以通过改变幅度、频率或相位实现此过程。另一种方法是发射一系列脉冲，使它的宽度、幅度或间隔变化。

#### 16.2.1 载波

无线电信号的核心是*正弦波*，称之为*载波*。但是此正弦波的频率远高于人类的听觉范围。无线电通信用的载波频率，最低为数千赫，最高频率可达数百千兆赫。为了有效地传送数据，载波频率必须至少是调制信号频率的 10 倍。

#### 16.2.2 开关键控

最简单的调制方式是*开关键控*，通常在无线电连续波发射机的振荡器中实现。图 16-1 给出了一个简单连续波发射机的框图。通信中使用的*莫尔斯电码*很原始，但是它的发射机容易制做。

莫尔斯电码属于二进制数字模式。*莫尔斯电码*的“点”的宽度是 1bit 宽度，*莫尔斯电码*的“划”的宽度是 3bit。在一个字符内，点、划

之间的间隔是 1bit。一个字内，字符间的间隔是 3bit。字间间隔是 7bit。标点符号当作附加于前面字的一个字符来发送。图 16-2 给出了英文“eat”的莫尔斯电码的幅度对时间的变化关系。键击下（全载波）状态称作传号；键抬起（无信号）状态称作空号。

莫尔斯电码是数据传输方法中，已知最慢的方法之一。人工操作时，速度大约每分钟 5 个字到 40 或 50 个字。

而使用机器，如计算机和数据终端，速度要快许多倍。这些系统通常采用移频键控，而不用开关键控。

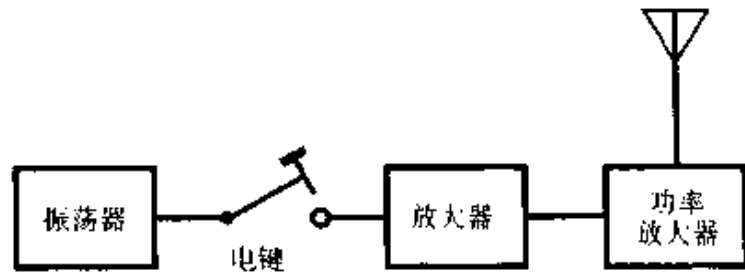


图 16-1 简单连续波发射机框图

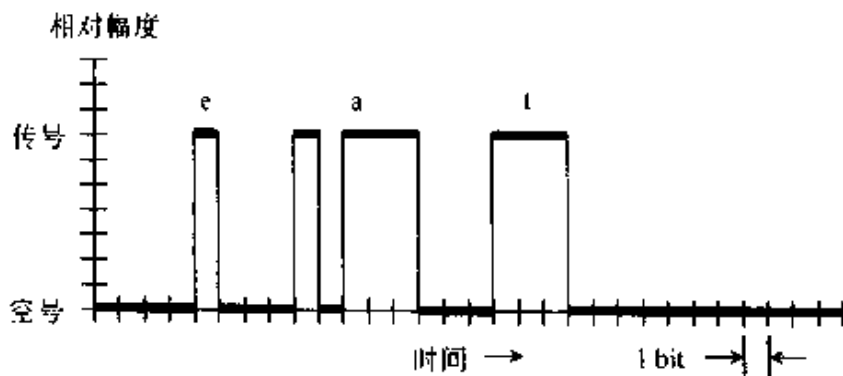


图 16-2 连续波发送时，英文 eat 的莫尔斯电码

### 16.2.3 移频键控

在移频键控 (FSK) 系统中，信号在两个频率上交替变化，通常两频率间隔数百赫兹。有些系统中，载波本身频率在传号和空号之间跳动。而在其他一些系统中，则用双单音音频正弦波调制载波。后面这种模式是音频移频键控 (AFSK)。

FSK 和 AFSK 系统通常使用两种编码：博多电码 (Baudot) 和美国国家标准信息交换码 (ASCII 码)。

在无线电电传打字的 FSK 和 AFSK 系统中，终端设备将数字信号变换成电脉冲，推动电传打字机或在计算机屏幕上显示字符。终端设备还产生发送给无线电电传打字机所必要的信号，就像操作人员在键盘上打字一样。图 16-3 给出了 FSK 方式发送莫尔斯电码时，英文

eat 的频率对时间的关系图。图 16-4 给出了 AFSK 发射机的框图。

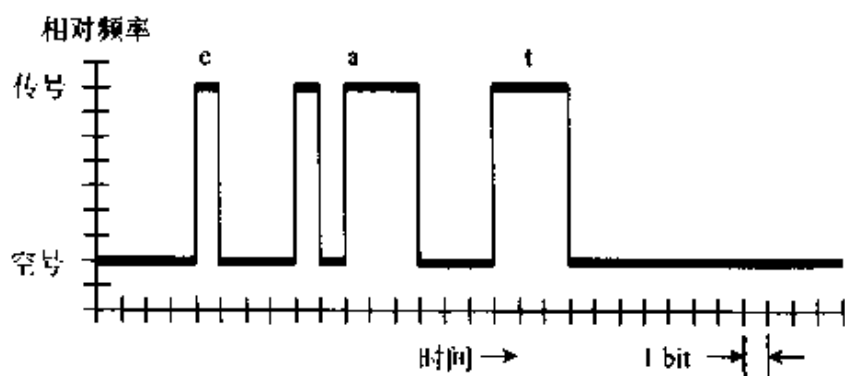


图 16-3 移频键控方式发送时，英文 eat 的莫尔斯码

#### 16.2.4 调制解调器

有三组单音标准频率用于 AFSK：1200Hz 和 2200Hz 用于一般通信，1070Hz 和 1270Hz 用于信源发送，2025Hz 和 2225Hz 用于应答。上述表明：移频为 1000Hz 或 200Hz。发送和接收 AFSK 信号的装置叫**调制解调器**。调制解调器基本上与终端设备相同。

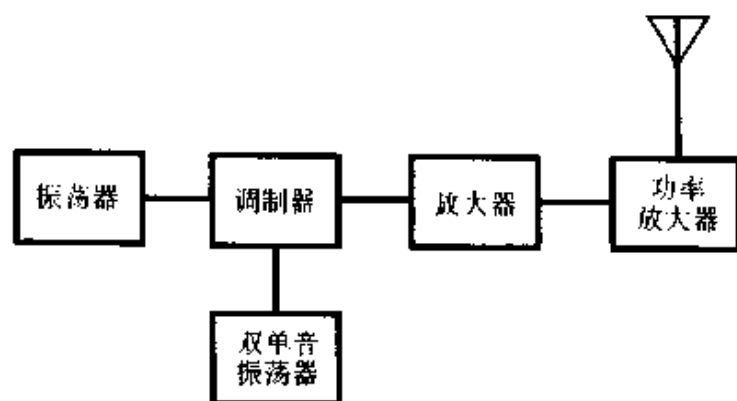


图 16-4 简单的音频移频键控方式发射机的框图

#### 16.2.5 调幅

语音信号是复杂的波形，频率范围主要处于 300Hz~3kHz 之间。利用这些波形可以去改变、或者调制载波的某些特征，借以传输语音信息。图 16-5 给出了一个简单的双极型晶体管**调幅电路**。当音频输入幅度不是过高时，此电路工作很有效。如果音频输入幅度太高，就会发生畸变，降低了信号的可懂度，增加了带宽，使之超出在通信系统中转载它所必须的最小带宽。

图 16-6 是两个完整的调幅发射机的框图。图 16-6a 中介绍了**低电平调幅**，这种方式要求跟随在调制器后面的所有放大器都必须是线性的。但有些发射机在末级功率放大器进行调幅，如图 16-6b 所示，功率放大器工作在 C 类，它既是末级放大器，又是调制器。它是**高电平调幅**。

调幅的深度用百分数表示，从0（未调载波）~100%（满调幅）。调制超出100%就会造成信号畸变，降低数据传输的效率。对于调制度100%的信号而言，只有1/3的功率用来传输数据，其余2/3都被载波消耗掉。

图16-7是语音调幅的无线电信号的频谱说明图。水平标度定为每分格1kHz增量。每个垂直分格代表3dB。最大幅度（参考幅度）相对于1mW是0dB。包含待发送信息的音频分量，呈现在载波的两侧边带上。载波频率与低于它3kHz之间的射频构成了下边带，载波频率与高于它3kHz之间构成了上边带。射频信号带宽是两边带中的最高频率与最低频率之差。

调幅信号的带宽是最高音频调制频率的两倍。在图16-7的例子中，语音的能量处于或低于3kHz，所以完整的信号带宽是6kHz。这是典型的通信信号。对于调幅广播，能量分布的频带往往更宽一些。

16.2.6 单边带

调幅信号中，大部分

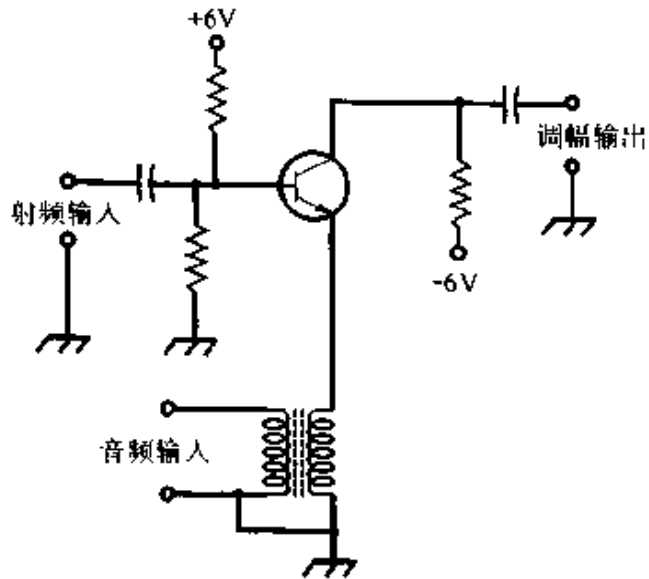


图 16-5 调幅电路

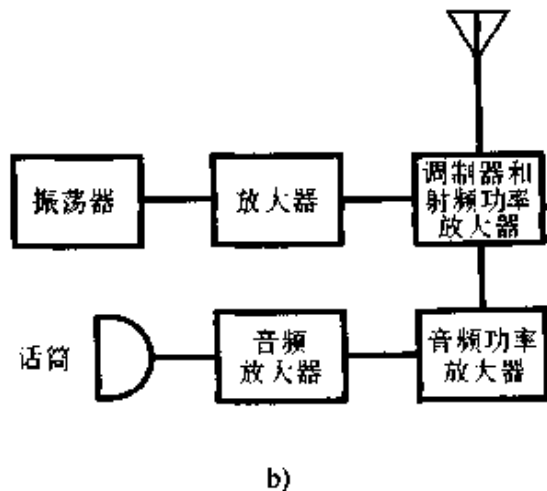
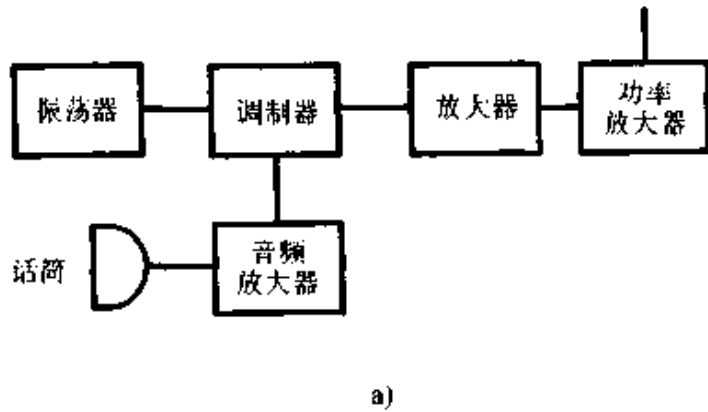


图 16-6 调幅发射机的框图  
a) 低电平调幅 b) 高电平调幅

能量被载波消耗掉。它的两个边带是镜像对称的相同成分。如果把载波和一个边带除去，那么所提供的全部功率都用到了数据传输上，而且带宽的减少多于 50%。剩余的语音信号谱如图 16-8。这就是单边带传输。上边带或下边带都可以利用，工作效果一样好。

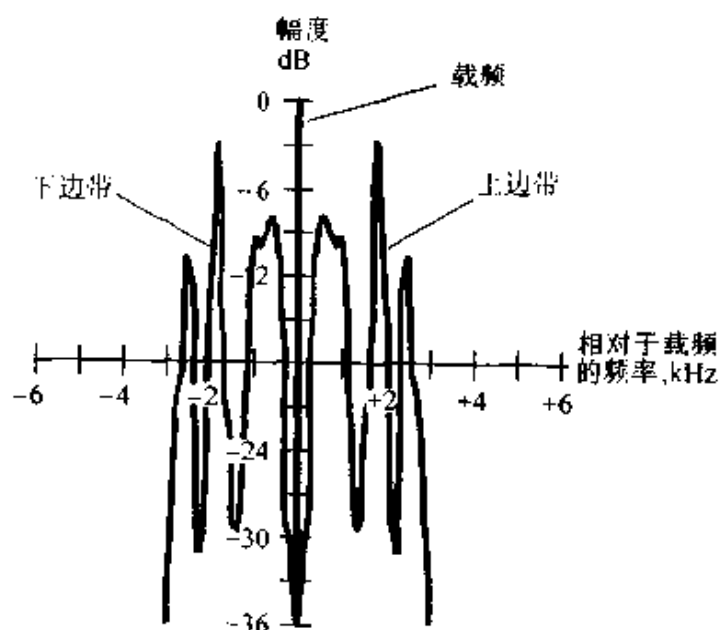


图 16-7 典型语音调幅信号的频谱分布

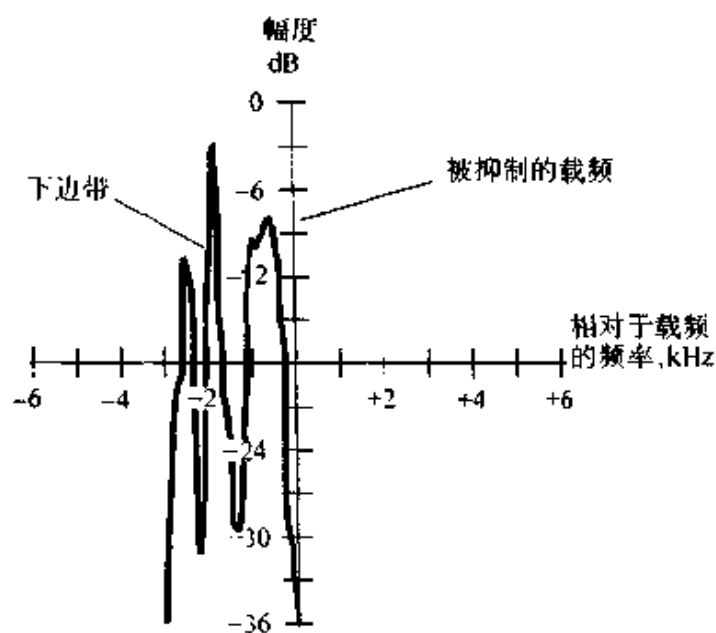


图 16-8 典型语音单边带信号的频谱分布  
(此图是下边带单边带)

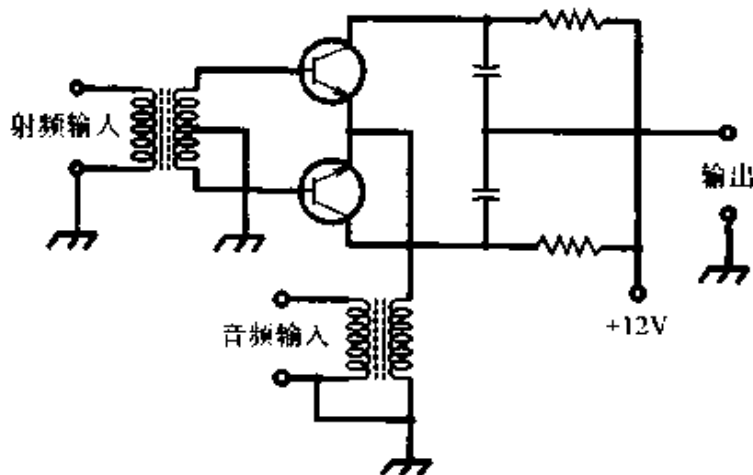


图 16-9 用双极型三极管构成的平衡调制器电路

单边带发射机使用平衡调制器。除了载频被消除外，见图 16-9，电路的工作原理与幅度调制器类似。它只留下两个边带的能量。然后其中一个边带，被发射机后级的带通滤波器滤除掉。图 16-10 给出了一个基本的单边带发射机的框图。

单边带发射机不能使用高电平调制。平衡调制器总是安排在发射机的低功率级。幅度调制器后面的射频放大器必须全是线性的，以避

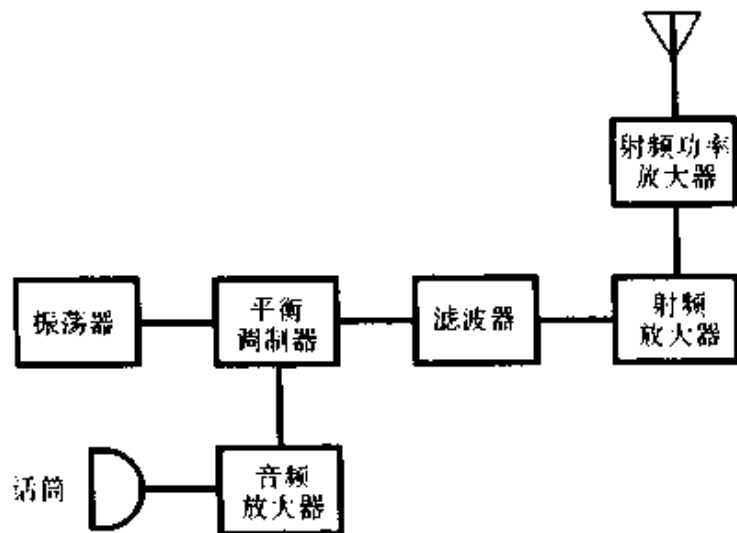


图 16-10 单边带发射机的框图

免畸变和信号带宽不必要的展宽（会产生邻近频道干扰）。平衡调制器的后随射频放大器一般工作在 A 类，末级功率放大器除外，它一般工作在 AB 类或 B 类。

### 16.2.7 调频和调相

调频信号的幅度始终保持不变，而使瞬时频率和相位变化。调频发射机可以使用 C 类功率放大器，不会引起畸变，因为幅度没有起伏，所以对线性不用考虑。

获得调频的最直接途径，是把音频信号加到调谐振荡器中的变容

管上。这是电抗调制方法的一例，如图 16-11 所示。变容管上变化的电压，使它的电容量随着音频波形变化。而电容量的变化，造成 LC 调谐电路的谐振频率变化，使振荡器产生频率摇摆。

获得调频的另一种方法是调制振荡器信号的相位。因为瞬时的相位变化表现为瞬时频率变化（反之亦然），所以也引起频率的小起伏。调相时，音频信号必须加以处理，调整音频放大器的幅度频率响应。否则调频接收机的信号，听起来有压抑的感觉。

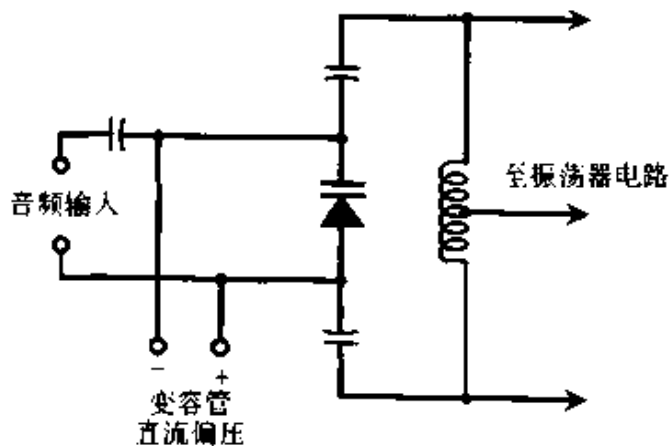


图 16-11 利用电抗调制获得调频

频率偏移是载波瞬时频率偏离未调载波频率的最大程度。对多数语音调频发射机而言，此频率偏移已被标准化成  $\pm 5.0\text{kHz}$ ，见图 16-12。对于给定的振荡器频率，利用直接法调频得到的频率偏移，要比调相能够得到的频率偏移大。利用倍频器可以提高频率偏移，当调频信号通过倍频器时，频率偏移与载频同时倍增。

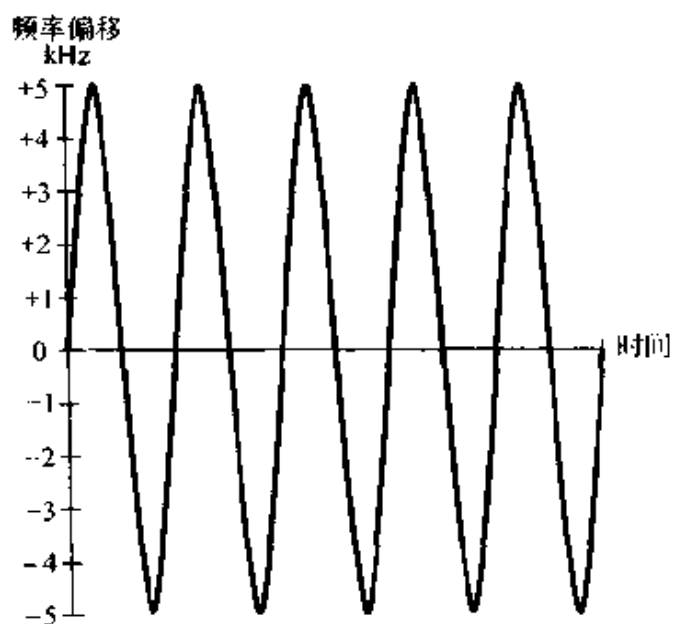


图 16-12 调频信号的频率与时间的关系

高保真度音乐调频广播时，以及其他一些应用场合，频率偏移要比  $\pm 5.0\text{kHz}$  大很多。这时称为宽带调频，是相对于前面讨论的窄带调频而言。若想获得最佳

保真度，调频信号的频率偏移应当等于调制音频的最高频率。因此， $\pm 5.0\text{kHz}$  对于语音信号是足够了。而对于音乐，频率偏移至少需要  $\pm 15 \sim 20\text{kHz}$ 。



频率偏移对最高调制音频频率的比称作*调制指数*。理想情况下,此比值处于 1:1 和 2:1 之间。如果小于 1:1, 信号声音被压抑或是畸变, 并且牺牲效率。调制指数增加到超出 2:1, 则展宽了带宽, 但并不会显著改善清晰度和保真度。

### 16.2.8 脉冲调制

下面扼要介绍*脉冲调制*的几种类型。图 16-13 画出了这几种类型脉冲调制的幅度时间图。

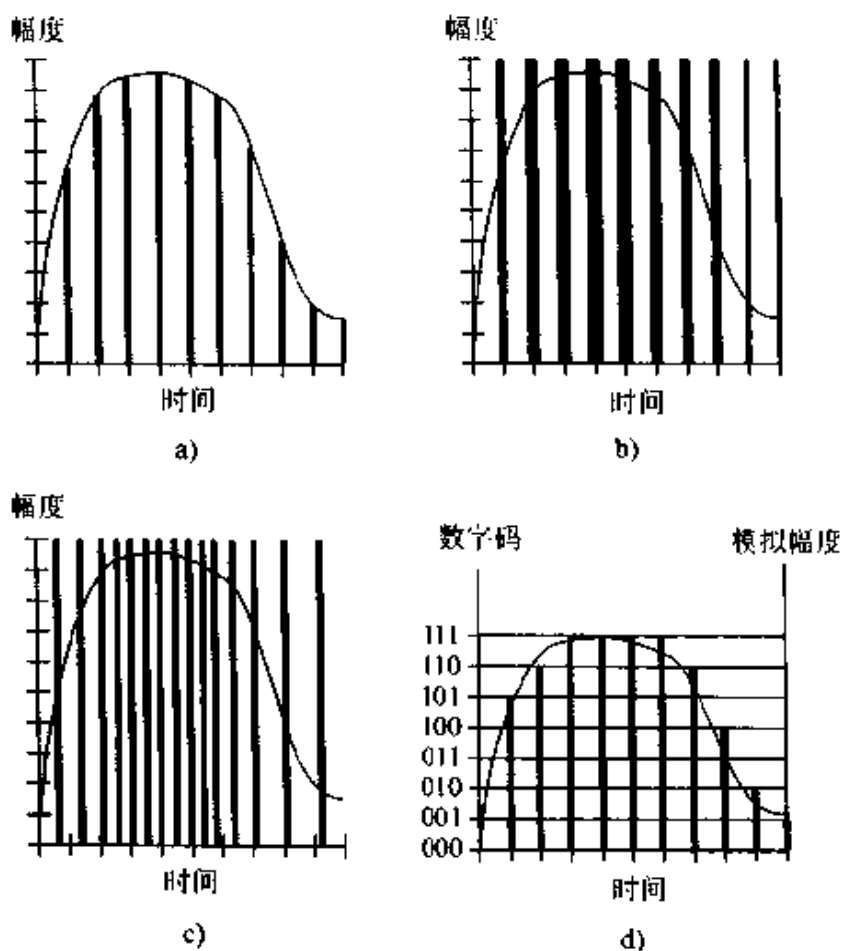


图 16-13 几种类型的脉冲调制

a) 脉冲调幅 b) 脉冲调宽

c) 脉冲间隔调制 d) 脉冲编码调制

(波状线代表模拟输入波形, 垂直条状线代表脉冲)

*脉冲调幅*时, 每个单独脉冲的幅度随调制波形变化, 见图 16-13a, 这时所有脉冲都是等脉宽的。*脉冲持续时间调制*, 也称*脉冲宽度调制*, 见图 16-13b。*脉冲间隔调制*, 又称*脉冲频率调制*, 见图 16-13c。

**脉冲编码调制**是改变脉冲串的前述任一参数：幅度、持续时间或频率。但不是具有无限多的状态或电平，而是只有有限多个。通常其个数是 2 的幂次，如  $2^3=8$  或  $2^4=16$ 。图 16-13d 给出了一个 8 电平脉冲编码调制的例子，它是改变脉冲幅度的。

## 16.3 模拟数字转换

如图 16-13d 所示，脉冲编码调制是模/数转换的一种形式。语音信号，或是任何一种连续变化的信号，都可以数字化，或是变换成脉冲串。脉冲的幅度用有限多状态个数表示。

### 16.3.1 分辨率

模/数转换器的状态个数总是 2 的幂次，因此它可以用二进制数码表示。保真度随指数幂次增加。状态个数称为采样分辨率，或简称分辨率。对于语音传输来说，分辨率为  $2^3=8$ （如图 16-13d 所示）已足够好，并且是商用数字语音电路的标准。对于高保真度音乐复制， $2^4=16$  的分辨率已足够。

### 16.3.2 采样速率

在什么频率下进行采样，决定了将信号数字化的有效性。一般而言，采样速率必须至少高于数据频率的两倍。对于最高频率分量达 3kHz 的音频信号而言，为有效数字化需要的最小采样率为 6kHz；商用语音标准是 8kHz。对于高保真度数字传输，标准采样速率是 44.1kHz；最高的可听频率大约是 20kHz。

## 16.4 图像传输

静止不动的图像可以用与语音信号相同的带宽发送。而对高分辨率和运动的图像，带宽必须要大。

### 16.4.1 无线电传真

静止图像可由传真机发送。如果数据发送的速度足够慢，任何图像细节都可以通过 3kHz 带宽发送。例如，电话传真机就是这样工作的。

为用传真机发送一幅图像，把文件或照片卷绕在鼓上。鼓受控以低速旋转。一个光点自左至右扫描；文件随鼓运动，光点每扫过一次形成一次扫描线。这样连续不断地扫描，一行又一行，一直到扫完全

帧，或整个图片。反射光由光电检测器拾取。图像上黑的部分比明亮部分的反射光弱，因此，通过光电检测器的电流是变化的。这个电流再去调制载波，使用前面介绍的方法之一，如调幅、调频或单边带。典型情况是，发送黑图像用 1.5kHz 音频正弦波，白色用 2.3kHz 音频正弦波。暗灰色产生的音频正弦波频率处于这两个极端频率之间。

在接收机端，扫描频率和图形都可以复制出来，并可以使用显像管或是专用打印机，重现一定灰度的图像。

#### 16.4.2 模拟快扫描电视

为得到运动的真实印象，每秒至少发送 20 个完整帧（固定图像），细节必须适当。快扫描电视（FSTV）系统通常是每秒 30 帧。常规的 FSTV 画面每帧有 525 行或 625 行。高清晰度电视的行数更多，慢扫描电视（SSTV）的行数要少一些。行扫描线水平运动贯穿画面，水平对垂直扫描尺寸比，或称宽高比为 4:3。在灰色标度系统中，每一行都包含亮度的浓淡；在彩色系统中，每一行都包含亮度浓淡和色调变化。FSTV 广播时，图像作为调幅信号发送，声音作为调频信号发送。在 SSTV 通信中，单边带是最常用的方式。

由于 FSTV 发送大量的信息，所以信道很宽。北美电视系统的标准是占据 6MHz 以上的频谱空间。因此，所有的 FSTV 广播，都在甚高频频段或更高的频段进行。图 16-14 给出 FSTV 信号的一个典型帧。

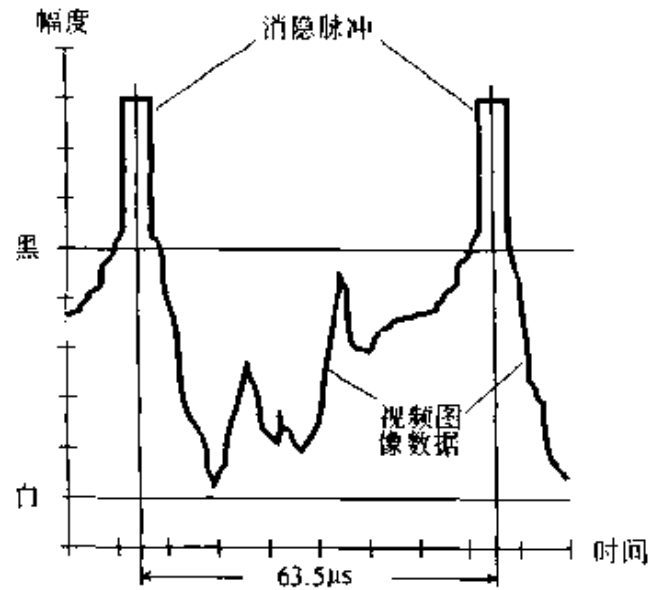


图 16-14 快扫描电视信号

（只显示出—个数据行）

FSTV 发射机由摄像管、振荡器、幅度调制器和一系列视频信号放大器组成。音频系统由输入装置（如话筒）、振荡器、频率调制器和馈送系统组成，馈送系统将射频输出耦合到视频放大器链。还有天线或电缆输出。图 16-15 是模拟 FSTV 发射机的简化框图。

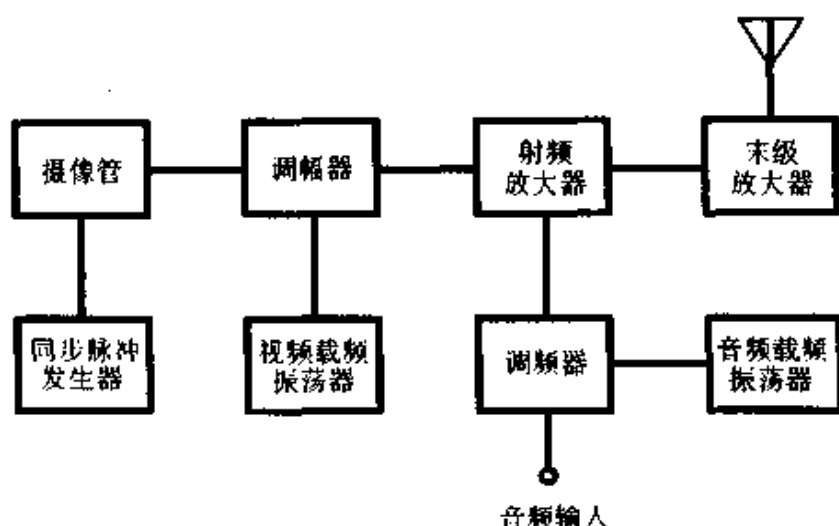


图 16-15 模拟快扫描电视发射机的框图

### 16.4.3 模拟慢扫描电视

如果对信号的某些方面放松要求，可以用比 6MHz 窄得多的频带传送图像。*慢扫描电视* (SSTV) 通过显著降低帧的发送速率来实现这一点。这样对图像的分辨率要求也放松，它比常规的 FSTV 的分辨率低。

发送 SSTV 信号占 3kHz 带宽，这已与单边带语音信号或传真信号需要的频带相同。SSTV 信号一般每秒 8 帧，每帧 120 线。

无线电通信系统中，SSTV 的调制是将音频信号输入到单边带发射机得到的。频率 1.5kHz 的音频正弦波对应黑色，2.3kHz 正弦波对应白色，它们中间的频率对应于灰度梯度。同步信号的发送频率是 1.2kHz。还有持续期为 0.030s (30ms) 的短脉冲用于垂直同步，0.005s (5ms) 的短脉冲用于水平同步。

有时，SSTV 信号连同语音数据一起发送。视频信号在一个边带发送，音频在另一个边带发送。

彩色和黑白 SSTV 之间的区别与彩色和黑白 FSTV 之间的区别相似。三原色红 (R)、绿 (G)、蓝 (B) 信号分别发送。然后在接收机根据 RGB 彩色模型再组合。

### 16.4.4 高清晰度电视

*高清晰度电视* (HDTV) 是指与标准的 FSTV 相比，能使电视画面表现出更多的细节、音频质量更高的电视。

标准 FSTV 画面每帧 525 行，但 HDTV 每帧行数在 787 至 1125 之间。每秒扫描图像约 60 次。高清晰度电视是数字电视，所以比 FSTV 还有其他方面的优越性。数字信号改善传播，弱信号可以用模拟信号无法实现的方法处理。

有些 HDTV 系统隔行扫描，两个光栅“啮合”在一起。这样一来，图像分辨率有效地加倍，而无需加倍硬件成本。但它也有缺点，它会造成快速运动图像跳动。

#### 16.4.5 数字卫星电视

直到 20 世纪 90 年代初期，卫星电视装置还需要一个直径约数英尺的抛物面天线。现在许多这样的天线依然在使用。这种天线价格昂贵，引人注目，容易遭受冰雹、大雪和强风的破坏。数字化改变了这种状况。在通信系统中，数字化使使用较小的接收天线、较小的发射天线和（或）较低的发射机功率成为可能。工程师们已经成功地将接收抛物面天线直径降低到 2ft 左右。

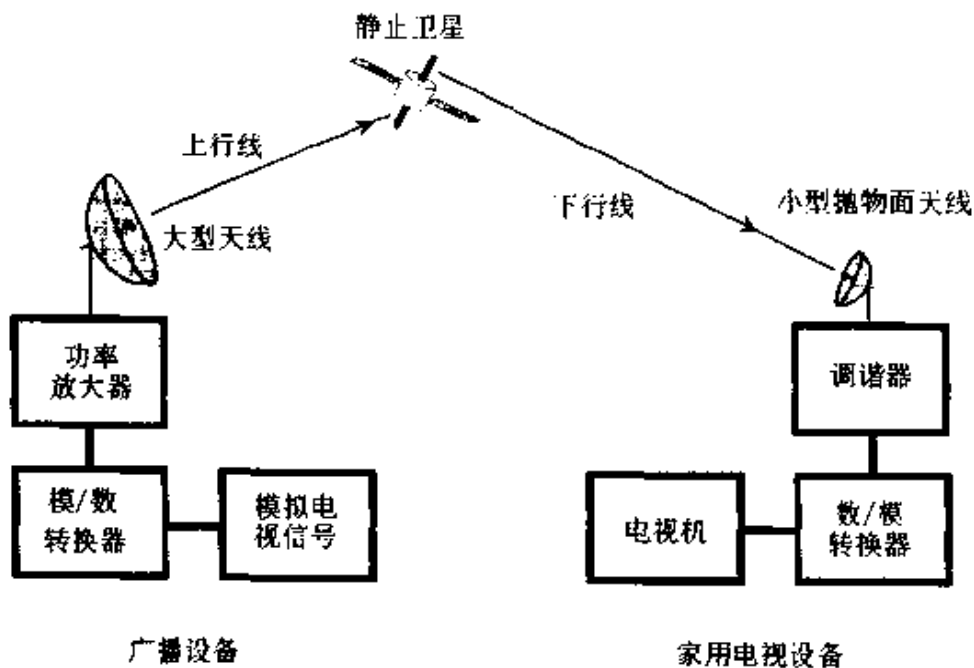


图 16-16 数字卫星系统链路的简化框图

数字卫星电视的先驱者是美国无线电公司，他们开发了数字卫星系统 (DSS)。图 16-16 是 DSS 通信链路的简化框图。模拟信号在发射

台通过模数转换，变成数字脉冲。数字信号经放大后，送上静止卫星。卫星上有转发器，它接收信号，将其频率改换为另一频率，再重新发射回地面。返回的信号由便携式抛物面天线拾取，调谐器被用来选择信道。数字信号处理可用来改进接收信号质量。最后，数字信号通过数模转换，变回模拟形式，以适于在常规的快扫描电视机上观看。

## 第 17 章 定位、导航和控制系统

电子设备可以用来定位和跟踪地球表面、水下、空中和宇宙空间中的物体、人群和动物。

### 17.1 雷达

雷达 (radar) 一词是英文词组“无线电探测与测距”的首字母缩写词。某些频率下的电磁波具有反射功能，它能从各种物体，特别是从含有金属的物体或其他电导体反射。如果探知了无线电信号被反射回来的方向，测量出电磁脉冲从发射机到目标，然后返回所经历的时间，就可以确定飞行物体的位置和估计某些气象现象。

完整的雷达设备由发射机、强方向性天线、接收机和指示器（或显示器）组成。发射机产生微波脉冲，在狭窄的波束内传播。电磁波碰到各个距离的目标而反射。离目标的距离越远，回波被接收到的延时越长。使发射天线旋转，能观测到所有方位（罗盘的各方向）的目标。

雷达的典型圆形显示器是阴极射线管。基本的显示外观如图 17-1 所示。雷达观测站处在显示器的中心。方位角从正北开始，顺时针方向沿屏幕的外围圆周标注角度来显示。距离用

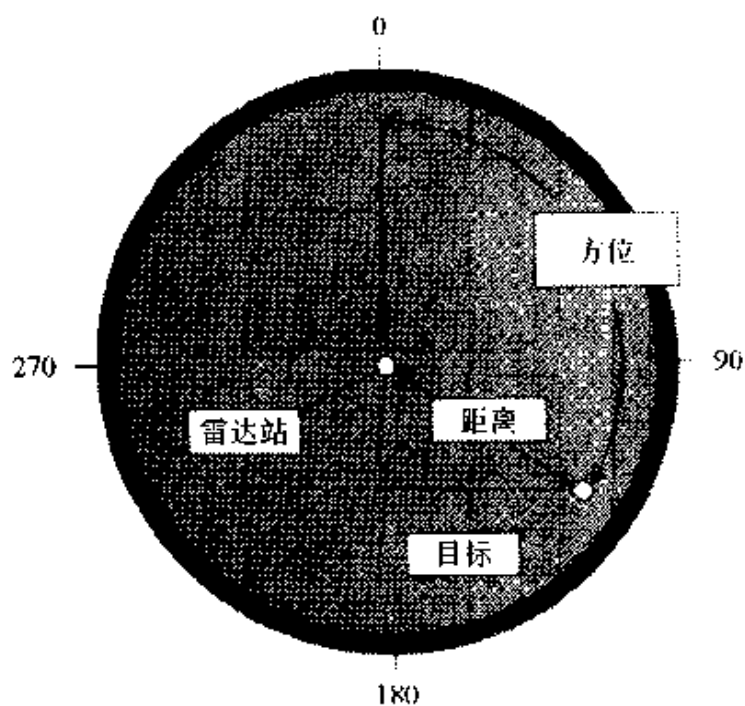


图 17-1 典型雷达显示器  
(显示了雷达站和一个目标)

回波的径向位移指示。机载远距离雷达在理想条件下，可以发现数百英里远的回波。天线设置高度低的普通雷达系统，可以接收来自大约 50mile 远的回波。

有些雷达设备，能够检测回波脉冲的频率变化，因此可以测定飓风和龙卷风的风速。这种雷达称为多普勒雷达。它也用于测量临近或远离雷达站的目标的速度。

## 17.2 声纳

声纳 (sonar) 一词是英文词组“声音检测与测距”的首字母缩写词。

基本的声纳系统由声脉冲产生器、声波发射器、拾音器、接收机、延时定时器以及显示设备（如数码显示器、阴极射线管或笔式记录仪）等组成。发射机发送声波通过媒质（通常是水或空气），声波碰到物体反射回来，接收机拾取到回波。只要声波在该媒质中的传播速度已知，目标的距离就能根据回波的延时计算出来。

图 17-2a 是简单的声纳系统框图。根据从各个方向反射回来的声回波，可以生成二维或三维计算机图形。

如果回波延时等于或长于两个声脉冲之间的间隔，如图 17-2b 所示，声纳系统就会被迷惑。为克服此缺点，可使用计算机控制声脉冲产生器，

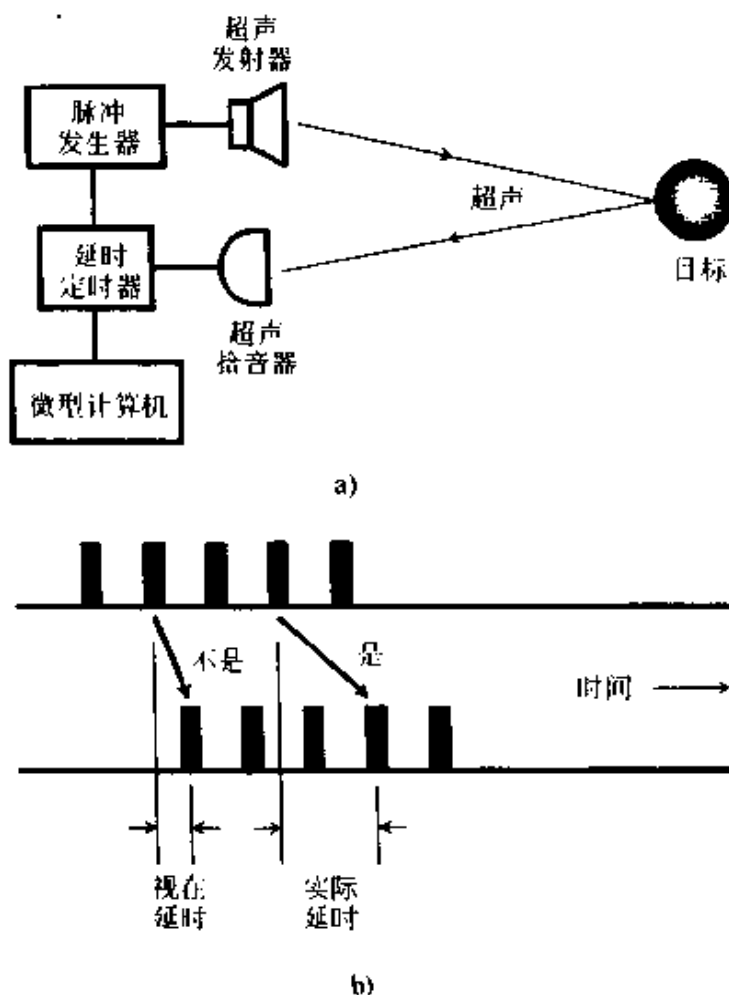


图 17-2 声纳

a) 近距离声纳系统方框图

b) 受长延时迷惑的声纳回波信号



使之按照伪随机序列方式，发送各种频率的脉冲。由计算机记住并确定哪个回波对应哪个脉冲。

### 17.3 测向

射频定位和导航系统的工作频率在数千赫与微波之间。声学系统的工作频率在数百赫与数千赫之间。

#### 17.3.1 信号比较

比较来自两个已知位置的固定台站的信号，机器或船舶可以确定自己的位置，如图 17-3a 所示。把源 X 和源 Y 的方位角加上  $180^\circ$ ，就得到机器或船舶（方块）从源（圆点）“看到”的方位。隔一定时间，取两次读数，就可以确定机器或船舶的方向与速度。计算机能够帮助精确计算，并显示出位置和速度矢量。

图 17-3b 是超声测向器的框图，是供移动机器人之类的设备用的。接收机具有信号强度指示器以及伺服系统，

后者是用来转动超声传感器方向的。信号源有两个，它们的频率不同。当传感器转动至来自一个源的信号强度最大时，将传感器的取向同某已知标准（如磁罗盘）比较，就得到它的方位角。对另一源采用同样做法。然后由计算机利用三角关系算出机器人的准确位置。

#### 17.3.2 无线电测向

无线电接收机装备上信号强度指示器，再连接上可旋转定向天线，就能用来确定信号到来方向。无线电测向 (RDF) 设备如果装在移动的工具上，能确定发射机的位置。RDF 也能用来确定自己相对于两个或多个不同频率的发射机的位置。

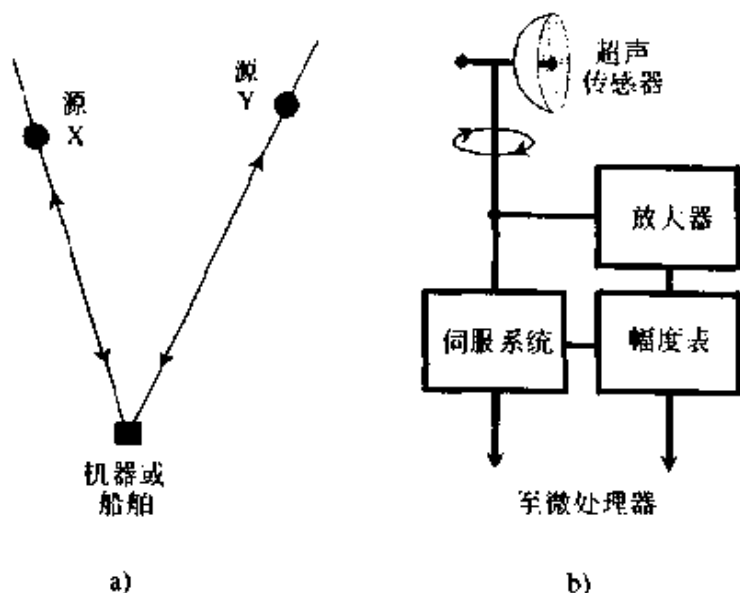


图 17-3 测向

a) 简单测向原理 b) 超声测向器

RDF 接收机通常使用环形天线，它遮蔽无线电波的电分量，所以只拾取磁通量。天线圆周长度小于 0.1 个波长。环形天线旋转搜索，直到接收信号强度减弱至零。找到零点后，环形天线的轴向就指向发射机方向。从两个或多个相隔足够远的位置，进行上述方向测量，记下读数，在地图上画出各方位线，找出它们的交叉点，就可确定出发射机的位置。

频率处于约 300MHz 以上时，定向收发天线，如八木天线，四边形、抛物面天线或螺旋天线，比小的环形天线效果好。当 RDF 使用这类天线时，要使用信号强度的峰值指示方位角，不使用零值。

## 17.4 测距

**测距**是机器或船舶在自己所处环境内导航的一种方法。也可以使用中心计算机记录和保持移动机器人的踪迹。

### 17.4.1 罗兰系统

**罗兰**(loran)一词是英文词组**远距离无线电导航**系统的首字母缩写词。它是最古老的电子导航方案之一，但是目前仍然有一些舰船或飞机使用它。此系统使用脉冲传输，脉冲速率为每秒约 20 个脉冲。为确定每个坐标，要用两个发射机，它们彼此相隔 300mile，工作频率为 100kHz，相当于波长 3km。来自较远发射机的信号抵达时间延迟，同来自较近发射机的信号抵达时间延迟相比较，就能定出坐标位置。

### 17.4.2 距离分辨

**距离分辨**是指：为使机器能够区分出两个目标，要求两个目标间的最小径向间隔（距离

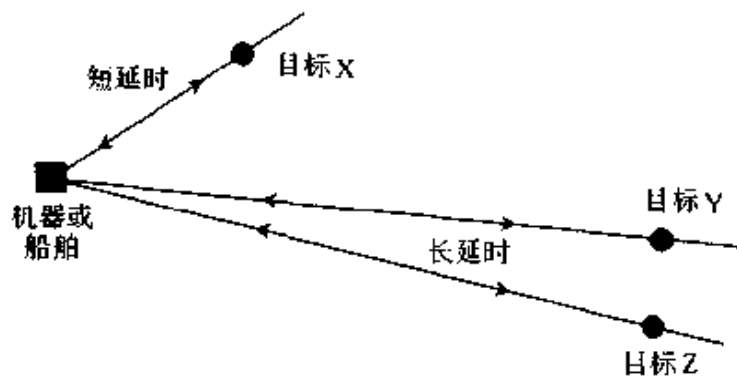


图 17-4 距离正比于回波延迟时间

差)。图 17-4 中目标 Y 与 Z 离机器或船舶几乎等距，两者的延时都很长，但是几乎相同。只根据测量距离，机器能够、也许不能够区分出目标 Y 和 Z，这要视系统的精度而定。但是有了方向指示器就不难区分出 Y 和 Z。单独用距离检测器容易区分目标 X 和 Y、或 X 和 Z，因

为目标 X 的距离与目标 Y、或目标 Z 的距离相差很多。

### 17.4.3 感测与标绘

*距离感测*用来测量单维距离。*距离标绘*是创建目标的距离分布图。

*一维距离感测*系统发射信号，然后用机器测量从发射到回波返回所用的时间。一维距离感测系统，能够区分图 17-4 中的目标 X 和 Y、或目标 X 和 Z。但是它不能够区分目标 X 与 Y。局部化的一维感测称作*近程感测*。

*二维距离标绘*系统包含绘制各目标的距离方向图。绘制精度取决于围绕 360°的圆周上，取多少读数。二维距离图只能表示处在一个平面上的，通常是水平面上的目标。这样的系统可以区分图 17-4 中的所有三个目标 X、Y 和 Z。

*三维距离标绘*系统通常用球坐标：距离、方位和高度（或仰角，即相对于水平面，在垂直方向的角度）实现。为得到适当的分辨，需要数千个读数。

### 17.4.4 全球定位系统

*全球定位系统* (GPS) 是一种全球范围的无线电定位和无线电导航设备网。系统利用多个人造卫星，可以确定经纬度和高度。

所有 GPS 卫星，都发射特高频波段的无线电信号。这些信号都经过包含定时信息的代码调制，接收设备利用定时信息进行测量。GPS 接收机确定自己位置的方法是：测量到 4 个或更多不同卫星的距离，然后用计算机处理接收的卫星信息。根据这些信息，接收机能够给用户指示位置，精度可达数米（对政府或工业用户）或数百米（对民用用户）。

## 17.5 外延极坐标导航和对数极坐标导航

当环境的几何情况已知时，船舶的位置和航线，可以通过多次观测一个参考点来确定。

### 17.5.1 外延极坐标导航

*外延极坐标导航*的工作原理是，从一个运动的视角观察目标，看到被观测者的图像的变化，评估此变化，借以导航。

设想驾驶一架飞机越洋。视线中能看到的唯一陆地是一个小岛。机载计算机上观测到的该岛图像的形状一直在变化。图 17-5 给出了三个观测抽样位置 (A、B、C)，以及三种情况下，机器视觉系统所看到的小岛的尺寸、形状。计算机储存有地图数据，所以知道该岛的真实尺寸、形状和位置。计算机将在每一观测点 (从飞机上的有利位置) 及时观测到的小岛图像的形状和尺寸，同储存的地图数据中该岛的实际形状和尺寸相比较。据此，计算机能够确定飞机的高度、速度、相对与海面的运动方向及经纬度。

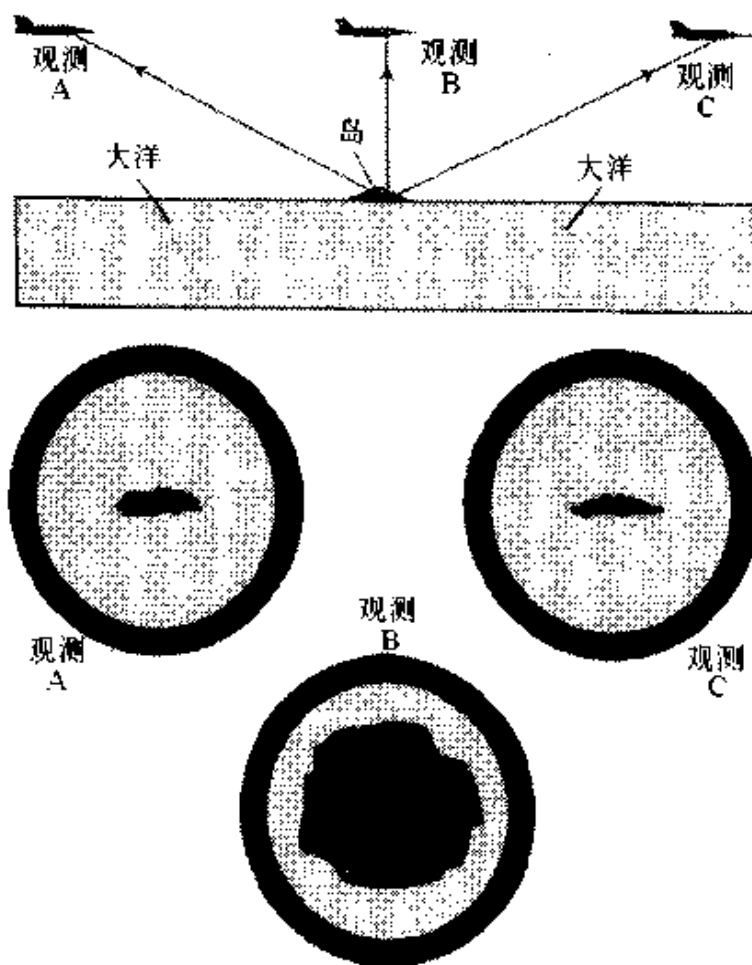


图 17-5 外延极坐标导航是人类空间感觉的模拟

### 17.5.2 对数极坐标导航

在对数极坐标导航中，计算机将极坐标中的图像转换成直角坐标中的图像。图 17-6 给出了它的工作原理。图 17-6a 画出了测绘的两个目标路径的极坐标图形。图 17-6b 画出了同样路径在直角坐标的图形。

极坐标的矢径（图 17-6a）被映射成直角坐标的垂直坐标轴（图 17-6b）；极坐标的角度（图 17-6a）映射成直角坐标的水平横坐标轴（图 17-6b）。

极坐标图（图 17-6a）的径向坐标是不等间隔的，但是直角坐标图（图 17-6b）中却是均匀的。经过这样变换，再对矢径取对数。这样使对远距离目标分辨能力降低，而对近距离目标分辨能力提高。对数极坐标变换，改变了观测人员所看到的场面，但是它将图像和运动翻译成数据，能被计算机化的扫描系统有效处理。

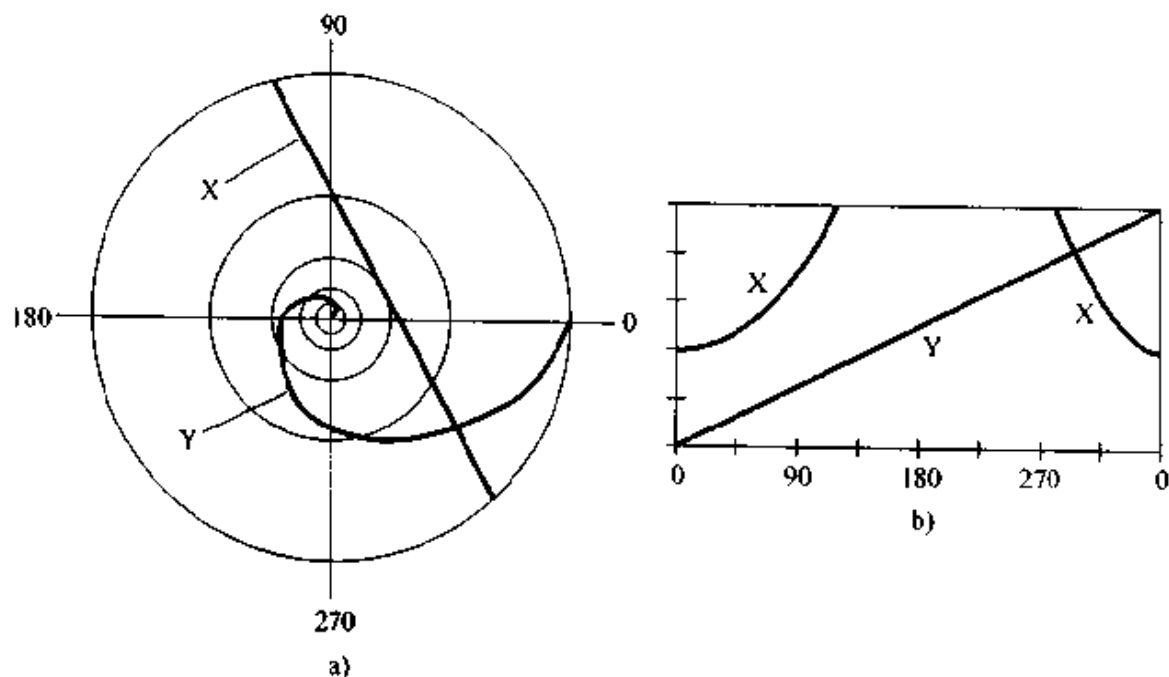


图 17-6 坐标变换

a) 实际空间的极坐标 b) 对数极坐标经变换后的坐标  
(线 X 和 Y 表示在各自坐标系中的假想路径)

## 17.6 机器人制导

有数种机器人使用电子装置在其周围环境中导航的方法。

### 17.6.1 信标

三角反射器是无源信标的范例。机器人需要发射变送器，如激光器，及接收变送器，如光电管。到每个反射器的距离可以这样确定：测出可见光或红外脉冲传播到反射器，然后返回到机器人需要的时间。

有源信标的例子是无线电发射机。数个发射机安放在不同的位置，它们的信号一致同步，即它们是严格同相的。当机器人漫步运动时，信号的相对相位变化。利用内部计算机，机器人通过计算来自信标信号各相位，就能确定它自身的位置。系统的工作原理类似于小规模的全局定位系统。

### 17.6.2 边沿检测

边沿检测是指机器视觉系统确定边界位置的能力。也指机器人具有的、对这些边界应采取什么行动的认识。机器人汽车可以利用边沿检测看见道路的边沿，使自己在道路上顺利行驶，见图 17-7。仿人机器人（人们常常想象让他们做女仆或管家之类的工作）必须在看到门的边沿之后，才能穿过门，他们必须能发现楼梯井的存在，必须能确定常用家具和室内陈设品的外形与轮廓。

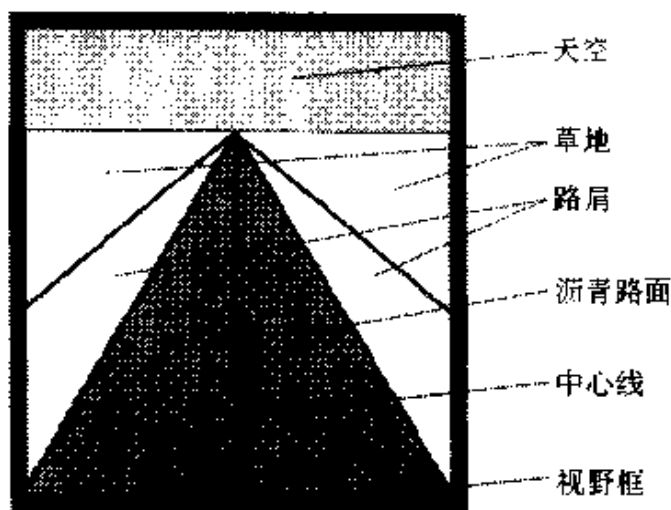


图 17-7 边沿检测（不同物体或物质之间的边界呈现清晰的分界线）

### 17.6.3 嵌埋路径

嵌埋路径的一个常用方法是埋设载流导线。电流产生磁场，机器人可沿之而行。这种导向方法，已经建议作为高速公路上控制轿车行驶的手段，司机即使注意力分散也无妨。要求所埋设的导线能恒定地供应电流。

替代导线的其他方法是不需要电流，使用彩色涂料或色带。机器人利用边沿检测，沿这些带颜色的设施行走。鲜亮的彩色煤质，或是反光强的煤质，有助于机器人认清边界的踪迹。

把大量的无源信标按一定间隔，有规律地沿着边界安放，可以当作信标/边沿/路径的混合系统。在高速公路上常常发现有许多凸起的塑料小“圆点”，可以将光反射回到源方向，它们也可用于导向目的。这些反光圆点必须保持状况良好，如果落雪、堆沙或积尘，它们将不

再可靠。

#### 17.6.4 有偏搜索

**有偏搜索**是一种寻找目的地或目标的方法,它首先偏向一侧观看。机器人控制器有意走不准确的路线,控制器根据它对操作环境的一般了解,来选择它的路线。一旦发现路标,控制器利用其数据库,计算目的地的位置和设定奔向目的地的路线。

图 17-8 展示了有偏搜索技术,一个机器人控制的小艇,在浓雾中驶近码头时,可以应用这个技术。当海岸映入眼帘时,小艇转变方向,开始沿海岸线、并保持一定的安全距离行驶,直到发现码头。为使

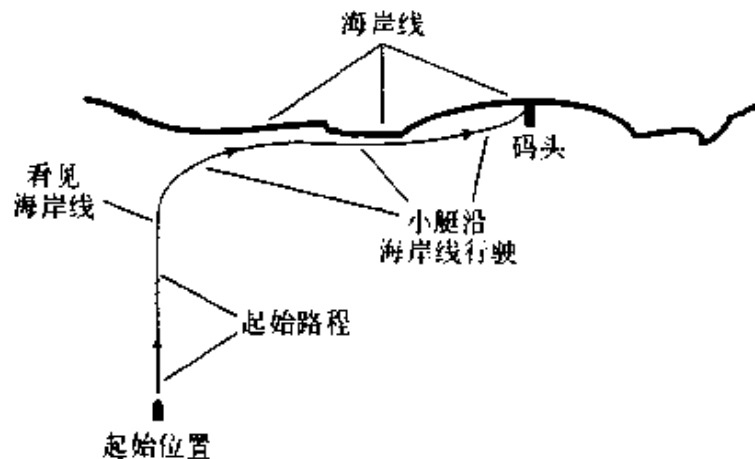


图 17-8 有偏搜索之例:小艇在浓雾中发现码头

此方案有效实施,检测出的误差(向左或向右的误差)必须修正。初始误差必须足够大,确保能被检测出来。

#### 17.6.5 磁通门磁强计

**磁通门磁强计**是机器人制导用的磁罗盘。这个装置使用线圈感知人造磁场的变化。例如,在室内导向,可以这样做:由墙壁内电磁体在室内产生磁场,检查磁场的取向和磁通密度。磁通取向和密度同室内各点的位置之间,在数学上一一对应。对机器人控制器编程,使其具有这个对应关系信息,从而使机器人能够精确确定自己在室内的位置。

#### 17.6.6 陀螺仪

**陀螺仪**或陀螺属于惯性导航系统。当用任何其他方法都不能或不便于确定方位时,则使用陀螺。一个旋转着的粗重圆盘装在方位机中。盘由电动机驱动。常见应用陀螺的场合是维持和调整机器人或船舶行进的方向(方位或航向),不需要依靠外部信号、外部电磁场或参考点。陀螺仪必须定期校准。

### 17.6.7 双声道机器听觉系统

双声道机器听觉系统中，机器人或车辆的两侧被各放置一个声学传感器。机器人控制器比较来自两个传感器信号的相对相位和强度。使机器人有限度地“知道”声音来自何方。如果机器人迷惑了，它可以转动身体，直到不再模糊和得到有意义的方位。如果知道各声源的位置，机器人通过机器听觉的方向感知，引导自己行进。为使此方案行之有效，必须利用有关声源位置的信息，将机器人控制器编程。

## 17.7 机器视觉

视觉系统是电子学中最先进的专业领域之一，又称为机器视觉。目前有数种不同的实现方案，哪一种属于最佳机器视觉形式，要视其用途而定。对于高水平计算机和机器人应用场合，视觉系统尤为重要。

### 17.7.1 组成部分

可见光视觉系统使用摄像管，如视像管或电荷耦合器件。亮光条件下，也可使用正析摄像管。摄像机产生模拟信号，通过模/数转换器变成数字形式。然后进行数字信号处理，最后把数据送至计算机或机器人控制器。图 17-9 是这个方案的框图。

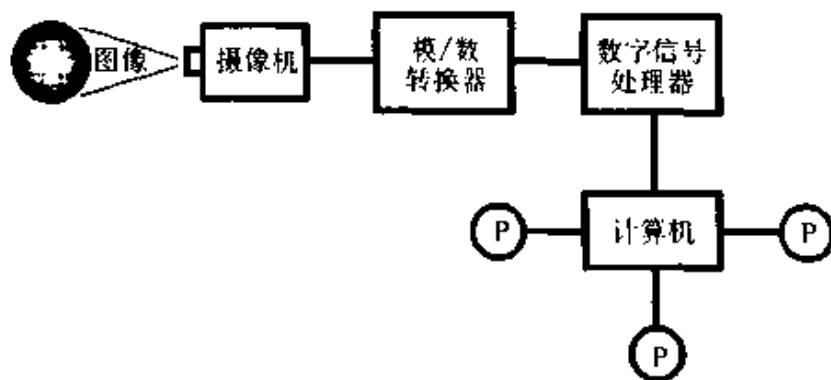


图 17-9 可见光机器视觉系统的组成部分

(标注字母 P 的圆圈代表计算机外围设备)

图 17-10 给出了彩色感测系统的原理框图。系统采用 3 个摄像机，每个摄像机都有滤色器。一个滤色器是红的、另外两个分别是绿的和蓝的。所有的色调、亮度等级和饱和度都由这三种颜色以不同配比组合生成。来自三个摄像机的信号经由微机处理，处理结果反馈给计算机或机器人控制器。



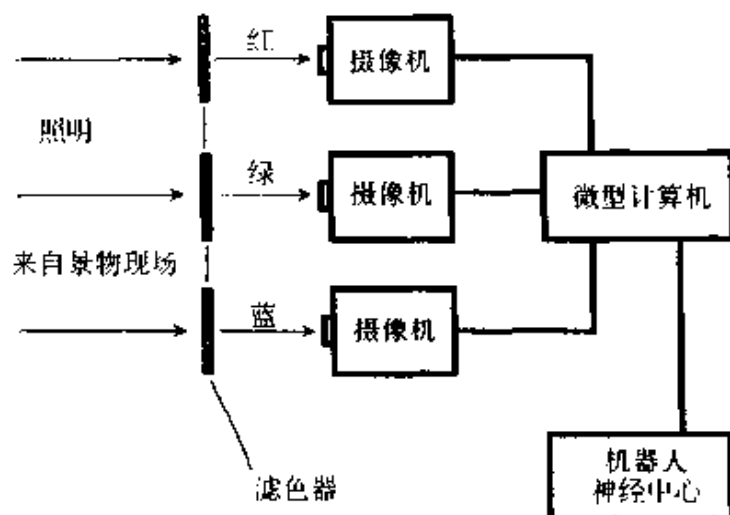


图 17-10 彩色视觉系统的框图

### 17.7.2 计算机地图

自主的机器人必须具有周围环境的地图。计算机地图类似于蓝图。图 17-11 给出了一个例子，它是一个餐厅图。机器人的任务是在人们入座之前布置餐桌。机器人根据餐桌和椅子的布置，可以设想将餐碟放在何处。然后，遵照它的预编程序把餐巾、刀叉、勺和酒杯放置到正确位置。请注意：一把椅子已经移动到餐厅的墙角，它会使机器人迷惑不解，结果机器人会在餐桌上额外安排一个客位，和（或）把餐具扔在墙角的地毯上。这种问题是否出现，取决于地图解释程序的质量。

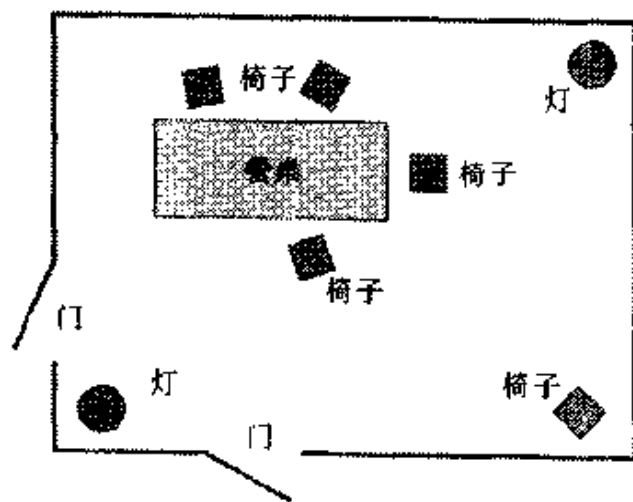


图 17-11 餐厅地面的计算机平面图

## 17.8 遥控

图 17-12 表示一个精巧的遥控系统的例子，它是一个控制家用计算机的遥控系统。

### 17.8.1 功能

有各种遥控程序可供使用，一些程序具有基本功能，而另一些具有复杂功能。下面是常见的功能：

#### 1. 操作系统灵活性

遥控程序适用于所有操作系统。

2. **组网** 当在网上运行时，遥控是宝贵的优点。使用宿主计算机和众多的远方机器，可以装备广域网。

3. **多宿主机** 高端遥控程序允许多屏幕操作，按一定次序轮流。

#### 4. 调制解调器指标

它的性能直接正比于系统中速度最慢的调制解调器。

#### 5. 无人管理宿主机

当无人管理时，它能接通、运行和关断宿主计算机。

6. **聊天模式** 允许使用在线服务，或与在宿主计算机上机的某人通信。也允许远端计算机用户彼此通过宿主机通信。

7. **暂停** 一些遥控系统，特别是具有多个遥控点的系统，允许有时间限制。经过一段预先编排好的时间，系统连接将结束。

8. **打印** 如果有自动而可靠的送纸系统，可以使宿主计算机打印数据。

9. **访问记录** 每次从远处某设备访问宿主计算机，可以记录这次访问的日期、时间、单位识别码和历时长度。

10. **分级口令保护** 也称**多级口令保护**。此功能防止非法使用宿

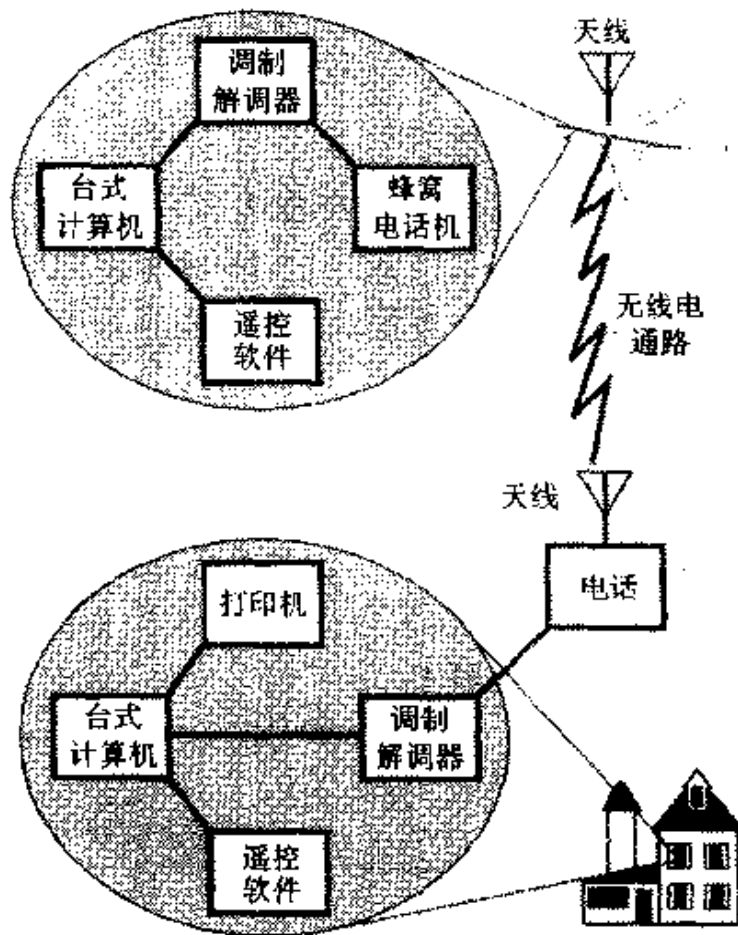


图 17-12 家用计算机由便携计算机遥控操作

主计算机。

11. **重试口令限制** 此功能防止黑客反复猜测口令，试图侵入系统。

12. **在线帮助** 多数复杂的软件包提供免费咨询电话号码和在线帮助。

### 17.8.2 机器人学

电视机的遥控器是**机器人**遥控系统的一个简单例子。其他例子有：控制模型飞机飞行的发射机，车库门电子开启器。多数电视遥控器使用红外线承载数据；模型飞机和车库大门接收无线电信号发给它们的命令。

机器人可用来探测海洋和湖泊底部，通过电缆或光缆线路操纵这些机器人。因为使电缆或光缆长度多于数英里是不切实际的，所以距离受限。在清澈的水中，使用无线激光器联络，可以在短距离内实现。可见红光和红外激光，在水下短距离内传播得相当好。

### 17.8.3 自主机器人

**自主机器人**，也叫做**灵巧机器人**，是一种内部装备齐全的机器人，它内部还装备了计算机。图 17-13 表示一群自主机器人在一起工作。图中机器人用方块表示，计算机用实心黑圆点表示。诸计算机之间在**对等式局域网**中，用无线电通路（直线）联系。每个机器人可以依靠滚轮或轨道四处走动。这群机器人中，每个机器人都各自有它自己的程序。机器人之间彼此共享数据，如同局域网中的计算机彼此共享信息一样。

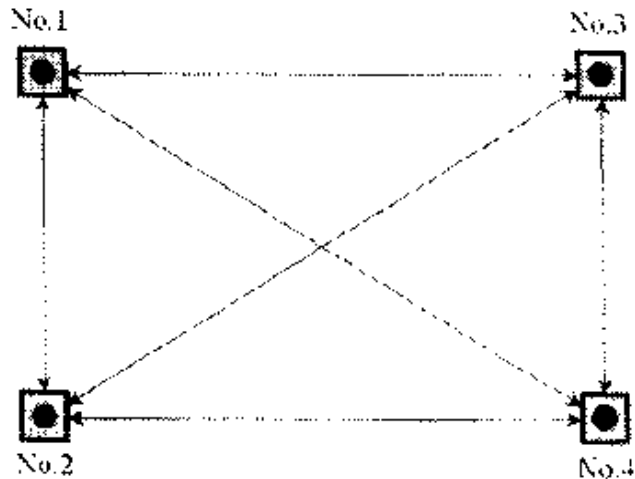


图 17-13 对等无线局域网中的自主机器人

### 17.8.4 机器虫

“**傻瓜机器人**”完全置于中心计算机的绝对控制之下，称为**机器虫**，也有人称之为**昆虫机器人**，因为全系统作为一个整体起作用，很像

蚁丘或蜂窝。这是客户机/服务器局域网的机器人对应物。

蚂蚁或蜜蜂很像傻瓜机器人。但是蚁丘或蜂窝是依靠它的全体成员集体意志运转的有效系统。这样的系统“总体上是灵巧的”。机器虫概念的先驱者罗尼·布鲁克发现了自主智能与集体智能的差别。他设计了机器人群体，包括在中心计算机统一控制之下的许多个体。

布鲁克设想了极其微小的机器虫，它们住在家里或机关大楼内，夜晚出来清扫地面和工作台面。甚至更小比例的“抗体机器人”，可以“介入”受不治之症传染的人体内。通过中心微处理器的控制，它们可以探查致病细菌或病毒，并且消灭之。中心控制器与机器人之间的通信大多是在微波频段，以无线方式联系。

## 第 18 章 天线系统

天线可以分成两大类型：接收天线和发射天线。多数发射天线能够有效地起接收作用。某些接收天线也能有效发射电磁信号，但是其他的则不能。

### 18.1 辐射电阻

当射频交流电在导体内流通时，会向空中辐射电磁能量。如果用一个电阻代替天线，并且将电阻与模仿天线固有电抗的电容器或电感器组合在一起，发射机的工作状况就如同连接到真正天线时一样。工作在特定频率下的任何天线，就有一个特定的上述替代电阻（单位：欧姆）。这个电阻称作该天线在所论及频率下的**辐射电阻** ( $R_R$ )。辐射电阻的单位为欧姆。

#### 18.1.1 决定性因素

若将一根笔直的无损耗细天线，垂直放在理想导电的地平面上， $R_R$  将是垂直天线导体高度（用波长为单位计量）的函数，见图 18-1a。如果把把这个笔直的无损耗细天线置于自由空间中，并在中心点馈电， $R_R$  将是导体总长度的函数，见图 18-1b。

#### 18.1.2 天线效率

效率对于接收天

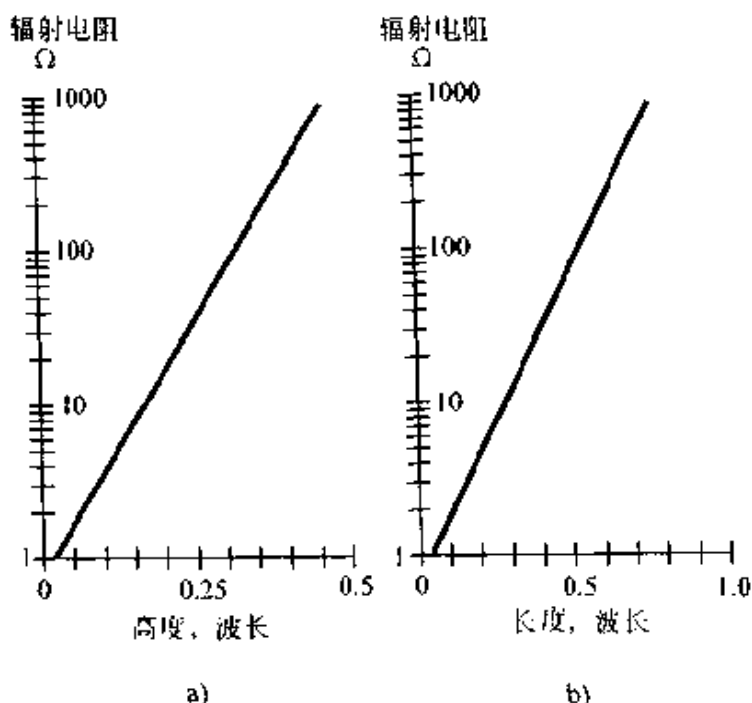


图 18-1 辐射电阻近似值

- a) 理想导体地面上的直立天线
- b) 置于自由空间中的中心馈电天线

线系统性能往往不是关键的，但它对发射天线系统是重要的。理想的发射天线应有高的  $R_R$ ，因为辐射电阻表现为与损耗电阻 ( $R_L$ ) 串联。天线效率 ( $E_{ff}$ ) 为

$$E_{ff} = \frac{R_R}{R_R + R_L}$$

它是天线辐射电阻同系统总电阻之比。若用百分比表示，公式化为

$$E_{ff} = \frac{R_R}{R_R + R_L} \times 100\%$$

有些广泛用于接收的短辐射体，如果保持天线电路远离地面，并把天线放在有利位置，则用于发射也很有效。设计这样的系统时，必须将  $R_L$  减至最小。

## 18.2 半波天线

自由空间中半波长用如下方程表示

$$L = \frac{492}{f}$$

式中  $L$  是线距离 (ft)， $f$  是频率 (MHz)。用米 (m) 表示的半波长为：

$$L = \frac{150}{f}$$

对于普通导线，上式得到的结果应当乘上速度因子  $v$  的值 0.95。对于管状或大直径导线， $v$  值下降至近似 0.90。

### 18.2.1 开偶极子

开偶极子或偶极天线是在中心点馈电的半波辐射器。天线的每一条“腿”都是  $1/4$  波长，见图 18-2a。对于直导线辐射器构成的实用半波偶极子，长度  $L$  (ft)、设计频率  $f$  (MHz) 之间的关系近似为

$$L = \frac{467}{f}$$

长度若以米 (m) 为单位，则近似为

$$L = \frac{143}{f}$$

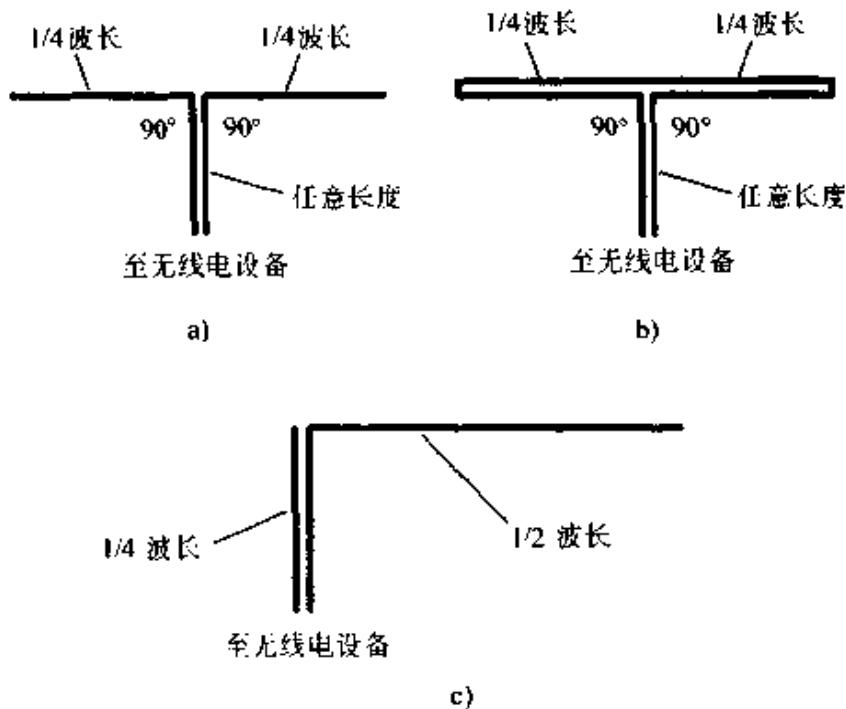


图 18-2 基本半波天线

- a) 偶极子天线    b) 折叠偶极子天线  
c) 齐伯林天线

上述公式假设了  $v=0.95$ 。在自由空间中，馈电点的阻抗是纯电阻，约  $73\Omega$ 。它表示在谐振频率下，仅有辐射电阻，不存在电抗。

### 18.2.2 折叠偶极子

**折叠偶极子天线**是半波长、中心馈电的天线，它由两个平行导线在端部连接在一起而成，如图 18-2b。折叠偶极子的馈电点阻抗是纯电阻，近似  $290\Omega$ 。这个特点使折叠偶极子在增益和方向性要求不特别高的场合，与平行导线构成的高阻传输线配用非常理想。

### 18.2.3 齐伯林天线

**齐伯林天线**是半波辐射器，在  $1/4$  波长开路导线的的一个端部馈电，如图 18-2c。馈电点阻抗极高，且是纯电阻。但在传输线的另一端，即连接发射机端，阻抗低，也是纯电阻。在设计频率的所有谐波上，齐伯林天线都能工作良好。如果有转换匹配器调整掉电抗，馈线的长度可以任意长。应当仔细将辐射器长度消减至给定频率下的  $1/2$  波长，以使馈线的辐射降至最低，而且使用天线时，也应当使其工作在设计频率上或它的谐波频率上。

### 18.3 1/4 波长天线

自由空间中 1/4 波长与频率的关系式为

$$L = \frac{246}{f}$$

式中  $L$  代表 1/4 波长 (ft),  $f$  代表频率 (MHz)。如果  $L$  用米 (m) 表示, 上式化为

$$L = \frac{75}{f}$$

如果不是在自由空间, 而是在其他媒质中,  $v$  是它的速度因子,  $L$  用英尺表示, 上式化为

$$L = \frac{246v}{f}$$

若  $L$  用米表示, 该式是:

$$L = \frac{75v}{f}$$

对于典型的导线,  $v=0.95$ ; 对于金属圆管,  $v$  可降至近似 0.90。例如, 对于由铝管 (它的  $v=0.92$ ) 构成的垂直天线, 若  $L$  用英尺表示, 公式为

$$L = \frac{226}{f}$$

若  $L$  用米表示, 则为

$$L = \frac{69}{f}$$

1/4 波长天线必须依靠射频“地”工作。在理想导电的“地”上方馈电点阻抗近似为  $37\Omega$ 。这是不存在电抗时的辐射电阻, 对于多数同轴传输线来说, 提供了合理的匹配电阻值。

#### 18.3.1 接地直立天线

最简单的直立天线是 1/4 波长辐射器安装在地上。辐射器用同轴电缆馈电。电缆的中心导体接到辐射器的底部, 电缆外皮屏蔽层接地。

在有些频率下, 1/4 波长垂直高度无法做到, 除非使用电感加载来降低辐射器的物理长度。使用多个加载线圈, 或是沿辐射器的一些特



殊点插入陷波器，可使  $1/4$  波长直立天线在数个频率上谐振。

如果不安装增设的放射状接地系统，*接地直立天线* 效率低下。电感加载加剧了这种低下状态。另一问题是垂直极化天线比水平极化天线接收更多的人为噪声。此外，接地的发射天线的电磁场，比装在一定高度的天线更容易造成对电子设备的干扰。

### 18.3.2 地平面天线

*地平面天线* 是依靠  $1/4$  波长径向辐条系统工作的垂直辐射器，并且至少高于地面  $1/4$  波长的高度。辐射器的长度任意，但是在预定的工作频率下，应当能调到谐振。

如果将地平面抬高至少相当  $90^\circ$  电角度的高度，为得到低损耗射频接地系统，只要 3 或 4 根辐条。辐条从天线底部向外伸展，相对于水平面的角度在  $0^\circ \sim 45^\circ$ 。图 18-3a 是典型的地平面天线。

地平面天线应该使用同轴电缆馈电。如果辐条水平放置，具有  $1/4$  波长辐射器的地平面天线的馈电点阻抗大约是  $37\Omega$ 。随着辐条下垂，阻抗增加，下垂角度在  $45^\circ$  时，阻抗达到约  $50\Omega$ 。

地平面天线的辐条可以直接向下方伸展，与馈线形成同心的  $1/4$  波长圆柱体。在这种情况下，馈电点阻抗近似  $73\Omega$ 。它组成了*同轴天线*，见图 18-3b。

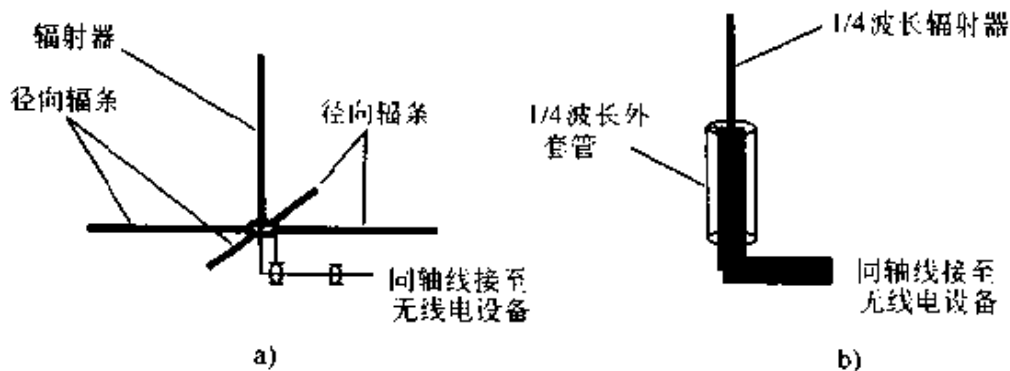


图 18-3 地平面天线

a) 基本地平面天线 b) 同轴天线

## 18.4 环形天线

任何由一圈或多圈导线（形成直流短路电路）组成的发射或接收天线，就是*环形天线*。环形天线可按大小分类。

### 18.4.1 小环形天线

小环形天线周长小于0.1波长,适用于接收,一般不用于发射。小环沿轴向响应最弱,而在垂直其轴的平面上响应最强。给环串接或并联一个电容器,能产生谐振响应。

图18-4给出了这样的例子。

小环形天线对于无线电测向有用,也有利于降低人为噪声和强本地信号引起的干扰。沿轴线的零值低深而尖锐。

### 18.4.2 环杆天线

频率在20MHz以上时,有时使用环杆天线接收信号。这种天线是小环形天线的变种,由绕在铁粉芯杆棒上的线圈组成。线圈上并联或串联一个电容器,构成调谐电路。

环杆天线呈现的方向性类似于图18-4所示的小环形天线。线圈边侧方向上灵敏度最大,杆两侧方向上是尖锐零。在零方向上本地信号和人为噪声源造成的干扰最小。

### 18.4.3 大环形天线

如果环的周长大于0.1波长,则属于大环形天线。通常,大环形天线的周长是0.5或是1个波长,是自谐振的,无须外接调谐电容器。半波长的环在馈电点呈现高阻,最大辐射/响应发生在环平面。全波长的环在馈电点呈现的阻抗约 $100\Omega$ ,沿轴向发生最大辐射响应。

大环可以用于发射或接收。半波长环比偶极子的功率损耗稍大,全波长环在其最强方向比偶极子增益稍高。

## 18.5 接地系统

非平衡天线系统,如 $1/4$ 波长垂直天线,需要低损耗射频接地系统。多数平衡天线系统,如半波偶极子,则不需要。对于任何天线系统,使用低损耗直流接地,又称电接地,都是可取的。

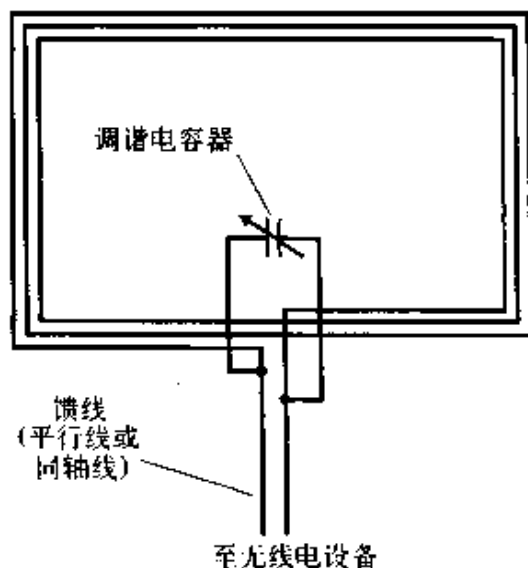


图18-4 小环形天线外接电容,以便调整谐振频率

### 18.5.1 电与射频接地

**电接地**对人身安全很重要,有助于保护设备不受附近雷击的损害,还能使对其他设备的电磁干扰,或是来自其他设备的电磁干扰降至最低。

电子和电气工程界都有一条不成文的戒律:永不同时触摸两个地。它说明两个应当是中性的点之间,可能有电位差,尽管此话表面上不符合逻辑。由于忘了这条规则,甚至经验丰富的人也会触电。

一些电器导线采用三芯线,其中一条线是接硬件“公共”端或“地”端的,它接到电插头的D形或U形插脚上。这个接地插脚决不要拆掉,因为这样变动的结果,可能会使暴露的金属面上出现危险电压。

良好的**射频接地**系统,有利于使电磁干扰降低至最小。图18-5给出了正确的(图18-5a)和不正确的(图18-5b)射频接地方法。在好的射频接地系统中,每个设备都连接到公共的接

地**汇流排**上,然后再通过单一导体接入大地。导体应当尽量短。不良的接地系统会形成**接地回路**,增加了设备对电磁干扰的敏感性。

### 18.5.2 辐条地线和地网

**辐条地线**一般为一个或多个 $1/4$ 波长。它们从地面安装的垂直天线底部径向向外伸展,并连接到同轴馈线的外层屏蔽线。辐条可以安装在地面上或是埋入地下。给定长度的辐条数目越多,天线工作效果就越好。另外,对于给定数目的辐条,其长度越长,效果也越好

对于任何类型电磁通信和广播装置,都可以用辐条获得良好射频接地。接地杆位置应当尽可能接近电台,从接地杆到台站的导线,应当尽可能直,直径尽可能大。

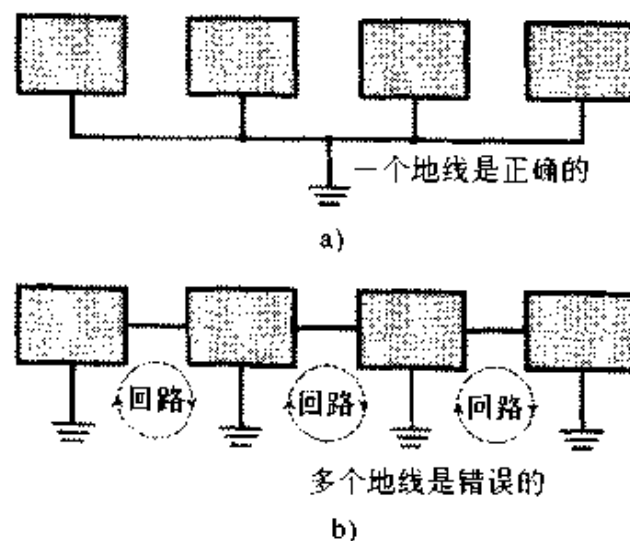


图 18-5 射频接地

a) 多个设备接地的正确方法

b) 不正确的方法产生射频接地回路

**地网**是获得射频接地，或是接地平面，而无须直接连接到大地的方法。把导线栅网、屏蔽板或是金属薄板，水平方向放置在地面上，形成与大地的容性耦合。这样可将射频接地损耗降至最小。理想情况下，地网半径至少应是最低工作频率下的  $1/4$  波长。

## 18.6 增益和方向性

发射天线的**功率增益**是最大有效辐射功率与施加于馈电点的实际射频功率之比。功率增益用  $G$  表示。如果有效辐射功率是  $P_{\text{ERP}}$  (W)，施加功率是  $P$  (W)，则

$$G = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{ERP}}}{P}$$

功率增益总是在天线的最有优势的方向测量，这就是主瓣的中央方向。

为确定功率增益，必须选择参考天线，假定它的增益为单位增益，或 0dB。通常用自由空间中的半波偶极子天线。相对于偶极子（在其最优势方向）的功率增益系数，用 dBd 为单位。测量功率增益的参考天线也可以是**各向同性辐射器**，从理论上说，它在三维空间中辐射与接收，在所有方向上一样好。这时，功率增益单位记作 dBi。对于给定的天线，用 dBd 和 dBi 表示的功率增益是不同的，大约相差 2.15dB

$$G_i = 2.15 + G$$

### 18.6.1 方向图

天线辐射和响应图可用图 18-6 所示的图形来表示。假定天线位置处在坐标原点（中心）。在某方向上辐射或接收能力越强，画在图上的对应点离开中心越远。

一个水平取向的偶极子天线，其导体顺南北方向，它的水平（ $H$ 平面）方向图类似于图 18-6a。垂直

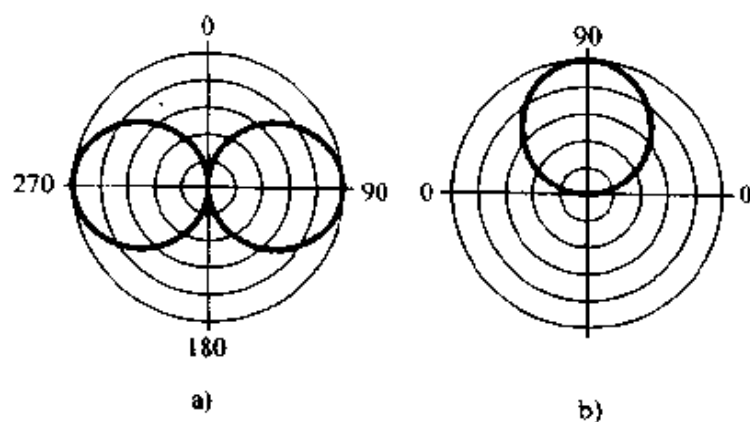


图 18-6 偶极子天线的方向图

a)  $H$  平面 b)  $E$  平面

平面 ( $E$  平面) 方向图取决于天线在观察处距离有效地面的高度。偶极子取向使导体垂直本页纸面, 且天线高于有效地面  $1/4$  波长时,  $E$  平面天线方向图类似于图 18-6b。

### 18.6.2 前向增益

**前向增益** 因子是单向天线的主瓣有效辐射功率电平 (dB) 对参考天线 (通常是半波偶极子) 最优势方向的有效辐射功率之比。典型的 2 阵元相控阵的前向增益是 3dB。随着同相阵元增加越多, 增益上升。典型的 2 阵元八木天线前向增益约 5dB。有些天线的前向增益因子超过 25dB。微波频率下, 大型抛物面天线的前向增益高达 35dB。一般说来, 随着波长减小 (频率增高), 越容易获得高的前向增益因子。

### 18.6.3 前后比

单向天线的**前后比**, 英文缩写为  $f/b$ , 表示主瓣方向对其相反方向上 (距主瓣中心  $180^\circ$ ) 辐射/响应的相对强度。图 18-7 是一个指向北方的单向天线的假设方向图。

最外面的圆表示主瓣中心方向的场强, 代表 0dB。向内第一个稍小的圆代表场强相对主瓣中心降低 5dB。再向内各圆依次表示降低 10dB、15dB 和 20dB。图的中心位置 (原点) 代表下降 25dB, 该点也是天线所处位置。这时, 比较正北 (方位  $0^\circ$ ) 和正南 (方位  $180^\circ$ ) 的信号电平, 就能求出前后比  $f/b$ 。

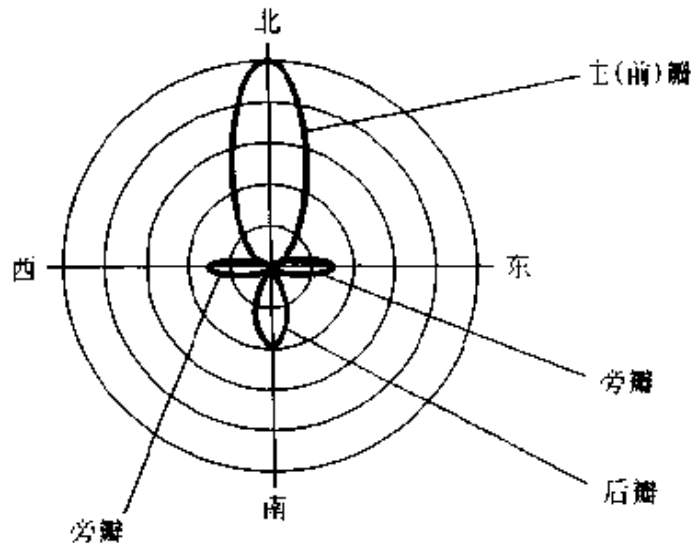


图 18-7 假想天线的方向图 (根据此图可以确定前后比和前侧比)

### 18.6.4 前侧比

有方向性的天线的前侧比, 英文缩写为  $f/s$ , 是天线系统方向性的另一种表示。此术语用于单向或双向天线,  $f/s$  用分贝表示。在最优势方向上电磁场强, 与偏离最优势方向  $90^\circ$  方向上场强相比。图 18-7 给出了一个例子。这时, 比较正北和正东 (右手  $f/s$ )、或比较正北和正西

(左手  $f/s$ ) 之间的信号电平, 就能求出  $f/s$  比。理论上, 左手和右手  $f/s$  比应当相同, 但它们在现实中稍有差别。

## 18.7 相控阵天线

**相控阵天线** 使用两个或多个激励阵元, 以在某方向上产生增益, 牺牲其它方向。

### 18.7.1 概念

图 18-8 画出了两对简单的相控偶极子。在图 18-8a 中, 偶极子间间隔  $1/4$  波长, 馈电相位差  $90^\circ$ , 形成**单向相控阵系统**方向图。如果使偶极子间隔一个波长, 并且同相馈电, 则形成**双向相控阵系统**方向图, 如图 18-8b 所示。

相控阵天线的方向图可以是固定的, 也可以是可旋转的或可控制的。如果波长足够短, 允许用金属管制造, 图 18-8a 所示的相控偶极子对, 可以安装在旋转台上, 以获得  $360^\circ$  可调的方向性。对于相控的垂直天线, 可以变化相对信号相位, 调节方向图。

### 18.7.2 长线天线

长度为全波长或多波长的线天线, 在其一个强电流点或一端

馈电, 则组成长线天线。长线天线提供的增益优于半波偶极子。随着导线长度越长, 主瓣越接近与天线方向一致。增益是天线长度的函数。

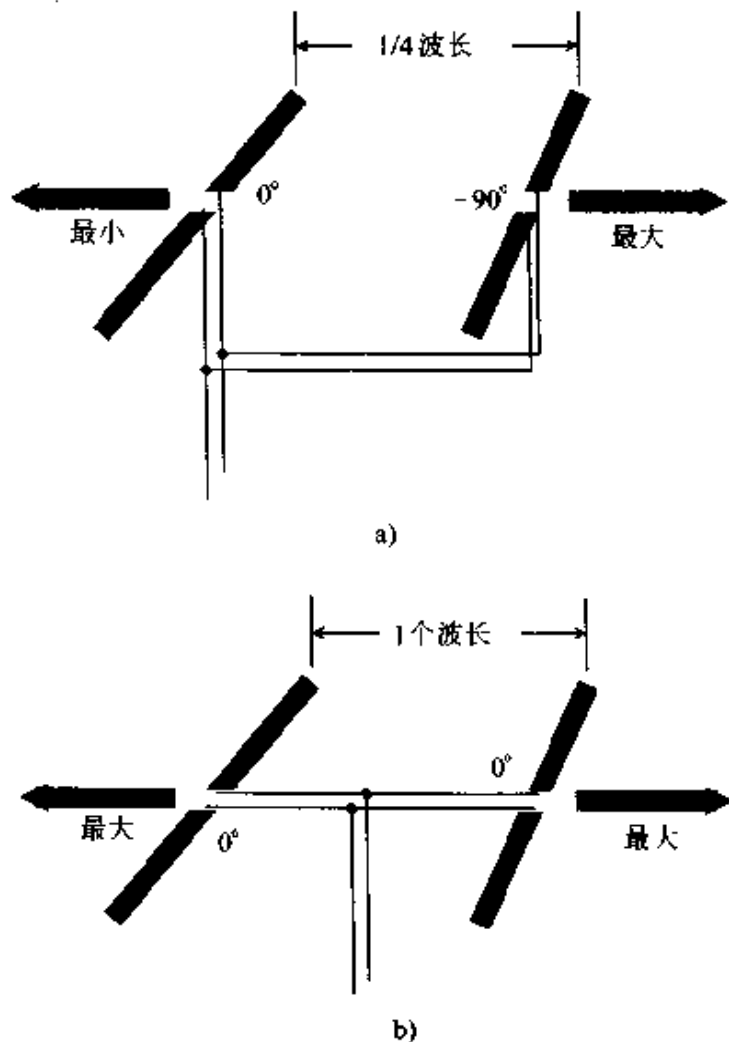


图 18-8 相控偶极子系统

a) 单向相控阵系统 b) 双向相控阵系统

天线越长，增益越大。为正常工作，长线天线必须尽量直。

### 18.7.3 边射天线阵列

图 18-9 表示边射天线阵列的几何布局。每个激励阵元可由如图所示的单一辐射器组成，或是由八木天线、环形天线以及任何其他有独立方向性的系统组成。如果将反射屏放在图 18-9 中的偶极子阵列后面，系统则变成横列定向天线。

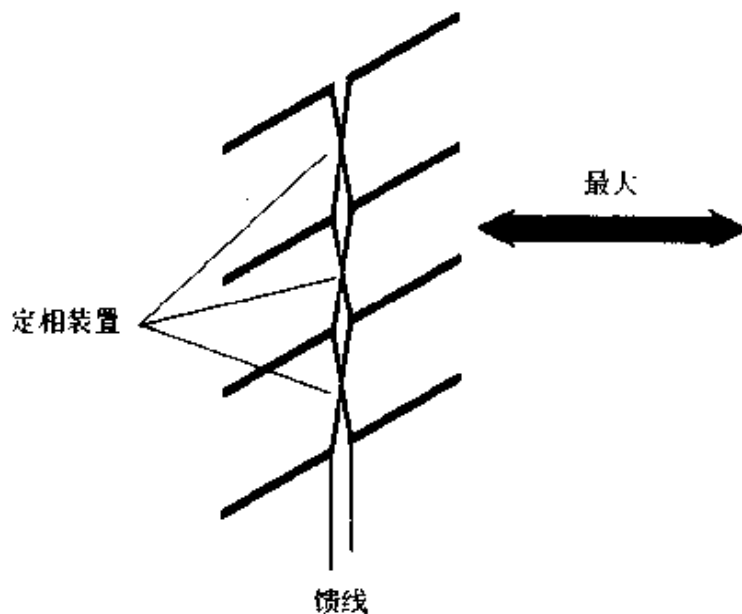


图 18-9 边射天线阵列（全部阵元同相馈电，最大辐射和响应方向正交于包含阵元的平面）

边射天线阵列的方向性取决于阵元个数（不管阵元本身是否有增益），以及各阵元的间隔。一般而言，阵元数越多，增益越高。

### 18.7.4 端射天线阵列

典型的端射天线阵列由互相平行、馈电相位差  $90^\circ$ 、间隔  $1/4$  波长的两个半波偶极子组成。这样能产生单向辐射方向图。或是将两个阵元同相激励、相距间隔一个波长，产生双向辐射方向图。在相位控制系统中，这两个支路的传输线长度必须截取得很准确，传输线的速度因子必须知道且要计算在内。图 18-8 所示的两个相控偶极子系统都是端射天线阵列。

## 18.8 无源阵列

无源阵列应用于频率 5MHz 到微波段，以获得方向性和前向增益。八木天线和四方天线都属无源阵列。

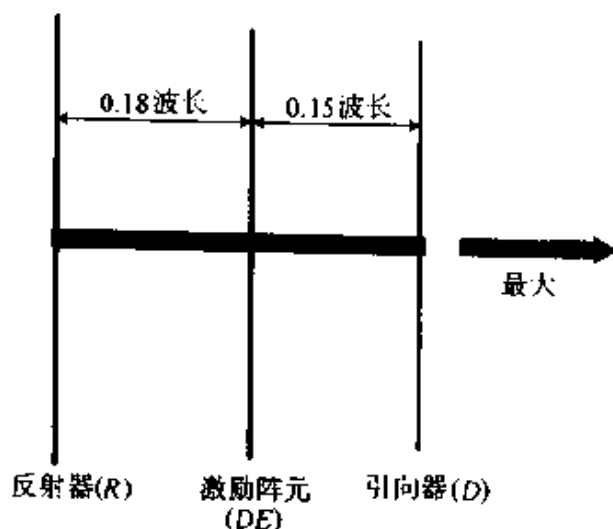
### 18.8.1 概念

无源阵元是构成天线系统的重要组成部分，但它又是不直接连到馈线上的电导体，无源阵元通过与激励阵元的电磁耦合起作用。当在

无源阵元所处方向上产生增益时，此阵元是**引向器**。当在相反方向上产生增益时，阵元是**反射器**。引向器比激励阵元稍短些，反射器比激励阵元稍长些（长或短百分之几）。

### 18.8.2 八木天线

八木天线有时称作“横梁”，是阵元平行排成直列而形成的天线阵列。把一个反射器或是引向器同一个激励阵元平行排列，并且相距一定距离，就构成了**2阵元八木天线**。对于激励阵元和引向器构成的八木天线，它们之间的最优间隔是0.1至0.2个波长，同时引向器的调谐频率高于激励阵元谐振频率5%~10%。而对于激励器与反射器构成的八木天线，两阵元之间最优间隔是0.15至0.2个波长，同时反射器的调谐频率低于激励阵元的谐振频率5%~10%。设计良好的2阵元八木天线之增益近似为5dB。



长度  $DE=470/f$   
 长度  $D=425/f$   
 长度  $R=510/f$   
 其中  $f$  为工作频率, MHz

图 18-10 3 阵元八木天线

八木天线的激励阵元，同时配有一个反射器和一个引向器后，比2阵元八木天线的增益会有所提高， $f/b$  也增加。最优设计的**3阵元八木天线**增益近似为7dB。图18-10给出了一个例子（该图为原理图，不能当作工程蓝图使用）。

随着阵元数目增加，八木天线的增益提高。通常，在3阵元八木天线的前方再安放额外的引向器，但是每个引向器都要比先装的引向器要短一点。设计与制作多阵元八木天线是复杂而精细的工作，随着阵元数目增加，最优天线的尺寸变得愈加复杂苛刻。

随着阵元数目增加，八木天线的增益提高。通常，在3阵元八木天线的前方再安放额外的引向器，但是每个引向器都要比先装的引向器要短一点。设计与制作多阵元八木天线是复杂而精细的工作，随着阵元数目增加，最优天线的尺寸变得愈加复杂苛刻。

### 18.8.3 四方天线

**四方天线**的工作原理与八木天线相同，区别是它使用全波长环形天线，代替半波长直线阵元。



2 阵元四方天线可以包括一个激励阵元和反射器，也可以由一个激励阵元和一个引向器组成。3 阵元四方天线具有一个激励阵元、一个引向器和一个反射器。引向器的周长为 0.95 至 0.97 个波长，激励阵元周长应准确为 1 个波长，反射器周长是 1.03 至 1.05 个波长。

在基本的 3 阵元四方天线上可以添加附加引向器，从而形成具有任意需要数目阵元的多四方天线。增益随阵元数目增加而增加。每个后加的阵元都要比先加的阵元短些。附加的阵元可以是半波直线阵元（类似于多阵元八木天线），这时，天线称为四方八木天线。长的四方天线和四方八木天线在 100MHz 以上很实用。

## 18.9 特高频和微波天线

在特高频和微波频率，由于波长变短，高增益天线的尺寸变得合理了。

### 18.9.1 抛物面天线

抛物面天线必须准确成型和精密调准。最有效的形状是截抛物面反射器。馈电系统由来自接收机和/或发射机的同轴线或波导，以及位于反射器焦点的喇叭或螺旋激励器组成。图 18-11a 给出了传统的抛物面天线馈电系统。图 18-11b 是卡塞格伦抛物面天线馈电系统。

反射器的直径（以波长为单位）越大，则增益越高，主瓣越窄。为能正常运行，抛物面天线的直径必须至少等于数个波长。反射体可以是金属薄板、金属屏或金属网。如果使用金属屏或网，网孔尺寸必须只占波长的很小比例。

### 18.9.2 螺旋天线

螺旋天线是圆极化、高增益的单向天线。图 18-12 是典型的螺旋天线。反射器的直径，在最低工作频率下，应当至少是 0.8 个波长。在所欲工作频率范围的中心频率下，螺旋半径近似为 0.17 个波长。沿螺旋纵向各圈的间距应近似为 0.25 个波长（对应于工作频率范围的中心频率）。螺旋的总长度在最低工作频率下，应当至少是一个波长。

螺旋天线可以提供约 15dB 的前向增益。空间通信系统中，常见到螺旋天线的支架。

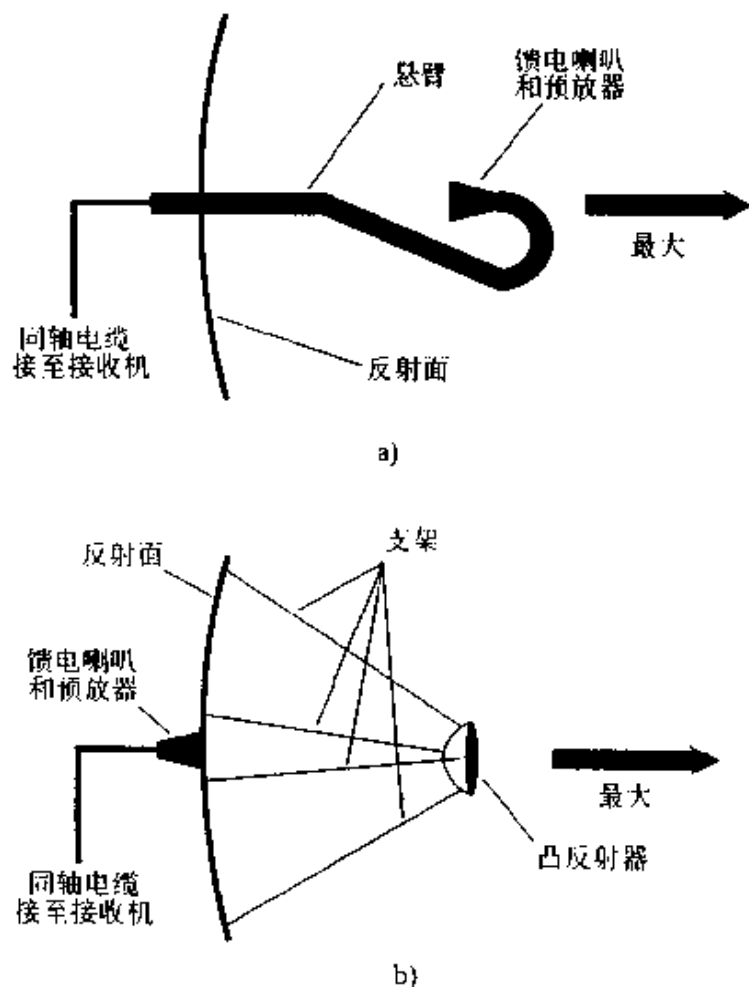


图 18-11 抛物面天线

a) 传统的抛物面天线馈电系统 b) 卡塞格伦抛物面天线馈电系统

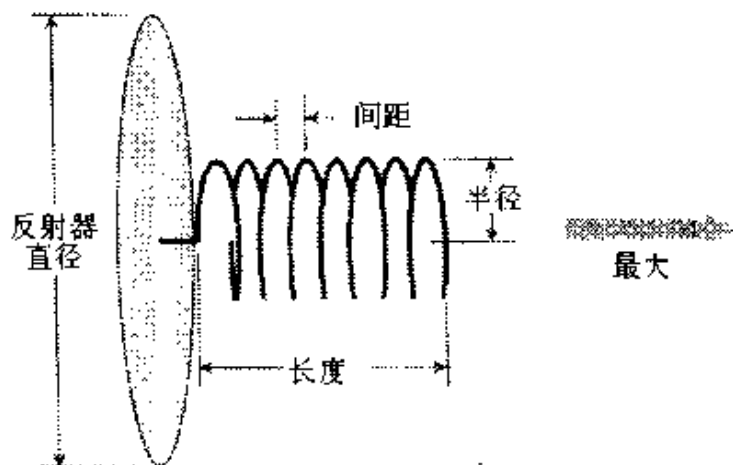


图 18-12 具有反射器的螺旋天线

### 18.9.3 角形反射器天线

图 18-13 介绍了角形反射器天线，它利用一个半波激励单元，提

供了比偶极子高些的增益。反射器是金属网、屏或金属薄板，反射部分的张角近似  $90^\circ$ 。角形反射器天线广泛用于电视接收和卫星通信。数个半波偶极子可以同相馈电，用一个加长的反射器沿公共轴线安放，就构成共线角形反射器阵列。

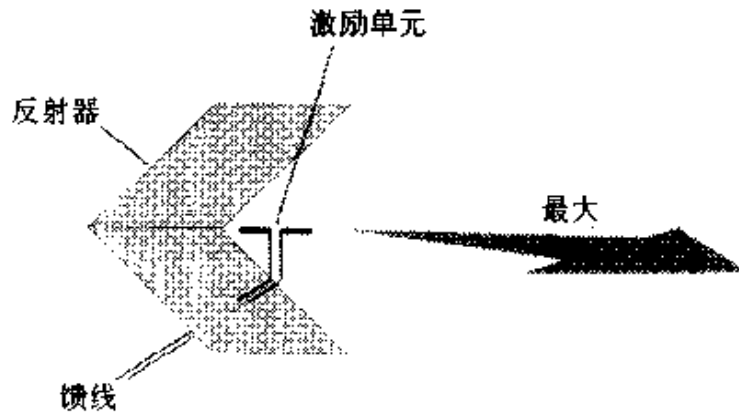


图 18-13 角形反射器天线（通常用在超高频和微波频率）

#### 18.9.4 喇叭天线

喇叭天线有数种不同的配置方式，但外观都相似。图 18-14 是一个有代表性的喇叭天线图。这种天线具有单向辐射和响应方向图，其最优势方向与喇叭开口方向重合。馈线是波导，它在喇叭的最窄部（喉部）与天线接合。

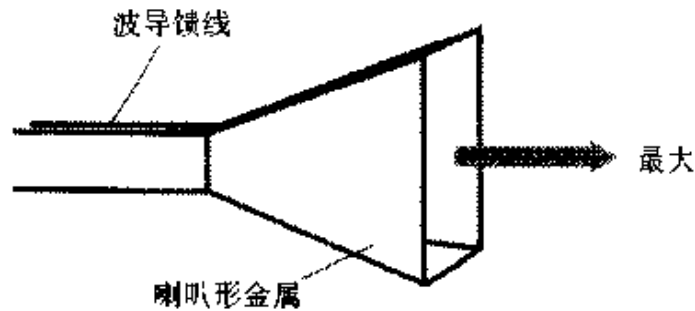


图 18-14 喇叭天线（在微波频率下同波导传输线连接）

喇叭天线不常单独使用，通常用作大型抛物面天线的馈电部分。喇叭口朝着抛物面反射器的中心，使向着或来自抛物面的无关辐射和响应最小。

### 18.10 馈线

馈线，在发射应用场合又称传输线，它在无线电通信硬件与天线之间传送能量。

#### 18.10.1 基本特性

馈线分平衡馈线和不平衡馈线。不平衡馈线有：单根导线、同轴电缆和波导。平衡馈线有：开路导线、梯形线、管状线、带状线和 4 导线传输线。

所有馈线都有特性阻抗 ( $Z_0$ )，它取决于传输线的物理结构。特性

阻抗值以欧姆( $\Omega$ )为单位,它是传输线上无驻波时,线上电压(V)与电流(A)之比,即沿线上所有点电压与电流比值相同时的值。

一般同轴电缆的 $Z_0$ 典型值在 $50\sim 100\Omega$ 之间。平行双导线可用 $Z_0$ 值是 $75\Omega$ 和 $300\Omega$ 。开路导线的 $Z_0$ 值在 $300\sim 600\Omega$ 之间,视导体间距和维持导体间距的电介质而定。

### 18.10.2 波导

波导在特高频和微波频率使用。它是空腔金属管,通常截面为矩形或圆形。为有效地传播电磁波,矩形波导的四边,每边都至少要0.5个波长,最好是大于0.7个波长。圆波导直径至少应当0.6个波长,最好是0.7个波长或更长。

波导的 $Z_0$ 随频率而变化。从这个意义上说,它与同轴线或平行长线不同,后两者的 $Z_0$ 与频率无关。

### 18.10.3 驻波

驻波是射频传输线阻抗不匹配(负载阻抗不等于传输线的特性阻抗)时,发生在传输线上的电压和电流变化。

传输线端接一个等于其特性阻抗的纯电阻时,不会有驻波出现。当出现驻波时,电流和电压的分布是不均匀的。阻抗失配越严重,不均匀程度越厉害。最大电压对最小电压之比,或是最大电流对最小电流之比,就是驻波比。

驻波比大,会显著增加传输线中的损耗。如果使用高功率传输线,严重失配时,传输线上的电流和电压会变得非常大,足以引起物理性损坏。

## 18.11 安全

永远不要把天线安装在这样的地方:它有可能倒落或被风吹落在输电线上。也要避免输电线可能落在天线上。

附近任何地方有雷雨或闪电期间,具有室外天线的无线电设备都应停止使用。当能看到闪电时,绝不能进行天线施工和维护,即便是估计暴雨出现在数英里以外。设备不使用时,最好把天线同电子设备断开连接,并且牢固接入大地。

爬上天线或天线塔,是专业人员的工作。任何情况下不允许未经

验的人试图爬上天线。

室内发射天线使操作人员暴露于电磁场能量。这样暴露造成的伤害程度（如果有伤害），目前尚无肯定明确的说法。但人们始终充分关注有关这个问题的最新出版物。

有关天线安全方面的详细信息，请向专业天线工程师们咨询，或查阅有关天线设计及施工的综合教材。

## 第 19 章 电磁频谱

当电荷载体，如导体中的电子，运动具有加速度时就会产生电磁场。

### 19.1 基本性质

所有电磁场都包含电力线和磁力线。电力线与磁力线在空间任何一点都相互垂直。而电磁场的传播方向又垂直于两者。

#### 19.1.1 频率

频率是周期性电磁变化循环重复的速率。频率的基本单位是赫兹 (Hz)，以前称为每秒循环次数。频率还常常用较大的单位表示：千赫 (kHz)、兆赫 (MHz)、千兆赫 (GHz) 和太赫 (THz)。

$$1\text{kHz} = 1000\text{Hz}$$

$$1\text{MHz} = 1000\text{kHz} = 10^6\text{Hz}$$

$$1\text{GHz} = 1000\text{MHz} = 10^9\text{Hz}$$

$$1\text{THz} = 1000\text{GHz} = 10^{12}\text{Hz}$$

如果周期，或是一次完整循环所需要的时间等于  $T$  秒，则频率  $f = 1/T$ 。

在电磁频谱中，电磁波变化的频率可从小于 1Hz 到  $10^{14}$ Hz。其中无线电频谱从数千赫到数百千兆赫。

#### 19.1.2 自由空间波长

任何电磁场的波长都取决于电磁变化的频率及其传播速度。波长同频率成反比，同传播速度成正比。

对于周期性电磁变化，波长的定义是相邻循环的两个同样点之间的距离。这些点可以是波峰（极大点）、波谷（极小点）或是其他任何特定点。在无线电通信中，电磁波长以米、厘米或毫米度量，频率更高时，常用纳米度量

$$1\text{cm} = 0.01\text{m} = 10^{-2}\text{m}$$

$$1\text{mm} = 0.1\text{cm} = 10^{-3}\text{m}$$

$$1\text{nm} = 10^{-6}\text{mm} = 10^{-7}\text{cm} = 10^{-9}\text{m}$$

电磁波的波长  $s$ 、频率  $f$  和速度  $c$  之间关系的公式是：

$$s = \frac{c}{f}$$

对于自由空间中的电磁波， $c$  近似为每秒 300 000 000 ( $3.00 \times 10^8$ ) m，与光速相同。因此波长为

$$s = \frac{3.00 \times 10^8}{f}$$

### 19.1.3 电波波长

在任何转载射频信号的媒质中，电波波长是一个周期或一次波动的某特定点，与相邻周期或波动的对应点之间的距离，通常用电场瞬时幅度值正向过零点之间的间隔表示，见图 19-1。波长依赖于电场沿着或通过媒质的传播速度因子  $v$ ，也依赖于频率  $f$ 。

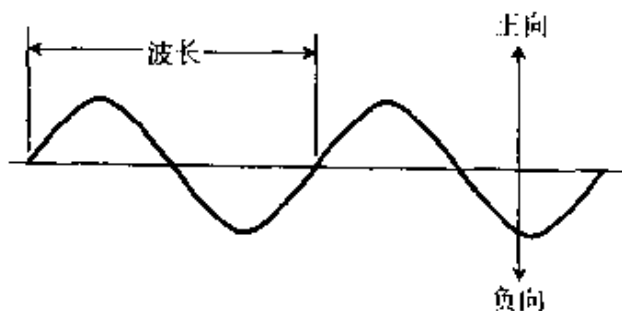


图 19-1 波长是相邻周期的相同点之间的距离

电波沿着单根导线传

播时，在给定的频率下，它的波长稍短于在自由空间中的波长。单根导线的速度因子约为 0.95。因此，上述自由空间波长公式必须修正成近似等于

$$s = \frac{3.00 \times 10^8 \times 0.95}{f} = \frac{2.85 \times 10^8}{f}$$

一般而言，在速度因子为  $v$ （常给比值，不给百分数）的传输线中，波长公式是

$$s = 3.00 \times 10^8 \times \frac{v}{f}$$

通常把这个公式修改，用兆赫代替赫兹表示频率。这样公式就变为

$$s = 300 \times \frac{v}{f}$$

射频传输中信号的波长始终小于其在自由空间中的波长。实际中，

$v$  值变化范围可从实心聚乙烯电介质同轴电缆的 0.66 到以空气为媒质的平行导线的 0.95。

#### 19.1.4 频谱描述

电磁频谱可以用对数刻度的图表示。图 19-2a 是个简化电磁谱图，其中波长用米表示。为找到以兆赫为单位的频率，用图中所示波长除以 300。对于以赫兹为单位的频率，用 300 000 000 ( $3.00 \times 10^8$ ) 替换 300。对于千赫，用 300 000 ( $3.00 \times 10^5$ )；对于千兆赫，用 0.300。

无线电波属于电磁频谱的子集，频率范围为 3000Hz~300GHz，对应于波长从 100km 到 1mm。图 19-2b 是由图 19-2a 截出的、经“放大”的无线电频谱图，刻度是频率，它包括了电视和微波。为找到用米表示的波长，用频率（兆赫）除以 300。对于用赫兹表示的频率，使用  $3.00 \times 10^6$ ；对于千赫，使用  $3.00 \times 10^5$ ；对于千兆赫，使用 0.300。无线电频谱分成 8 个范围或波段，见表 19-1。

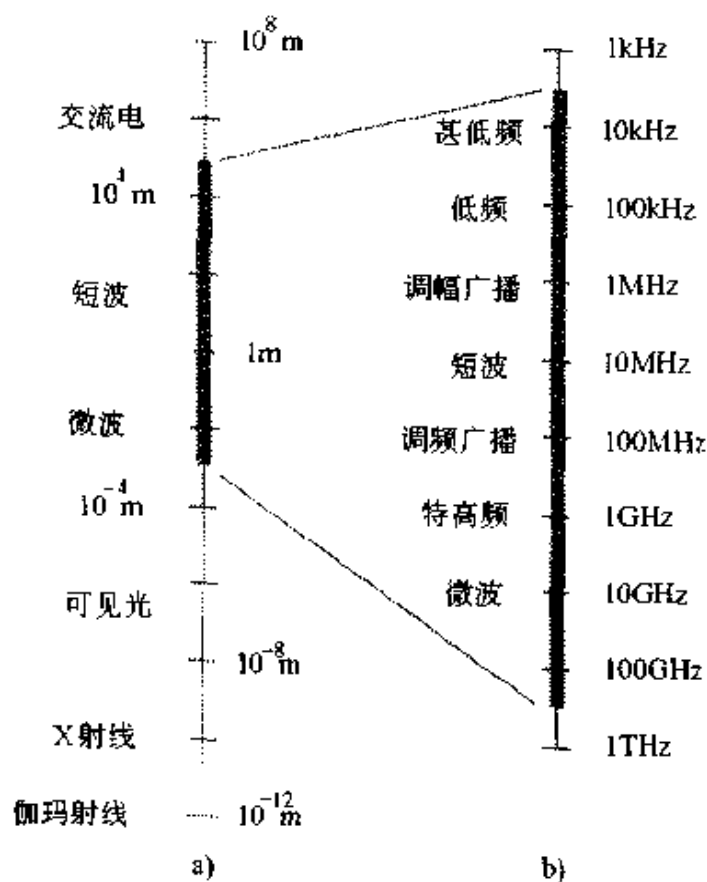


图 19-2 频谱

a) 电磁频谱 (波长范围  $10^8 \sim 10^{-12}$  m)    b) 无线电频谱 (频率范围 1kHz~1THz)



表 19-1 无线电频谱的各波段

频段名称	频率范围	波长范围
甚低频 (VLF)	3~30kHz	100~10km
低频 (LF)	30~300kHz	10~1km
中频 (MF)	300kHz~3MHz	1km~100m
高频 (HF)	3~30MHz	100~10m
甚高频 (VHF)	30~300MHz	10~1m
特高频 (UHF)	300MHz~3GHz	1m~100mm
超高频 (SHF)	3~30GHz	100~10mm
极高频 (EHF)	30~300GHz	10~1mm

## 19.2 电波极化

电磁场极化的定义是电力线的取向。这个取向可能随时间变化，或不随时间变化。

### 19.2.1 水平极化

无线通信时，水平极化在不同波长下各有其优缺点。

在低频或甚低频（低于 300kHz），水平极化不常用。因为地面波在这些频率下是主要传播因素，当电场为垂直取向时，它传输更有效。

在无线电频谱的高频部分（3~30MHz），水平极化开始实用。地波已成为次要，天波是传播的主导模式。

在甚高频、特高频和微波频段（30MHz 以上），水平极化和垂直极化都可以使用。水平极化抗噪声能力比垂直极化好，衰落也小。

### 19.2.2 垂直极化

垂直极化是电磁波的电力线垂直于，或是正交于地平面的情况。

在低频和甚低频，垂直极化是理想的方式，因为地波传播是这些波长下主导传播模式，它需要一个垂直极化场。在甚高频和特高频，垂直极化主要用于移动通信和中继装置。

垂直极化的主要缺点是：由于大多数人为电噪声是垂直极化的，垂直天线通常会比水平天线拾取更多的人为干扰。在甚高频和特高频移动通信中，垂直极化会比水平极化造成更多的“抖动”。

### 19.2.3 椭圆极化

如果电力线随着信号从发射天线向外传播而旋转，则称该信号是

*椭圆极化*的。椭圆极化的电磁场，当它接近观测者时，可以是顺时针旋转，也可以是逆时针旋转。这个变量称为极化旋转方向。

椭圆极化适于接收可变极化的信号，并且衰落小。理想情况下，发射和接收天线都应当是椭圆极化的，然而，即使信号是*线极化*的（通常是水平或垂直极化），椭圆极化天线也能接收。但如果发射的信号是椭圆极化的，而接收天线与其极化旋转方向相反，则会产生很大损耗。

#### 19.2.4 圆极化

均匀旋转的椭圆极化称为*圆极化*。对于电磁波的每个周期，电力线的取向以与信号频率对应的、恒定的角速度完成一次旋转。电力线的旋转是以电的方式实现的。

圆极化与线极化是兼容的，但有 3dB (2 : 1) 的功耗。如果到来的圆极化信号同接收天线极化旋转方向相反，则功耗比同向旋转大 30dB (1000 : 1)。

### 19.3 地表面和电离层传播

长波长的电磁场可以直接沿大地表面传播到很远的距离。在某些波长下，电离层可以将电磁波反射回大地。

#### 19.3.1 地波

无线电通信中，*地波*由 3 部分组成：*直射波*（又称*视线波*）、*反射波*和*地面波*。

直射波直线传播。在多数无线电频率下，电磁场经过树木和砖木结构房屋时，几乎没有衰减。而水泥和钢结构对高频直射波会造成一些损失，地面上的一些障碍物，如丘陵和山脉会阻挡直射波的传播。

无线电信号会被大地或是包含金属的建筑物反射。这个反射波同直射波在终点合并在一起。有时，这两个波异相到达，会使接收信号极其微弱。

地面波传播时接触大地，大地成为电路的一部分。这种现象只在频率高达数兆赫，而且是垂直极化场时才出现。频率低于 300kHz 时，地面波可以传播数千英里。

#### 19.3.2 电离层

在大气层的高处有 3 或 4 个不同层出现电离现象。最低的层区称

为D层，它的高度大约在30mile (50km)，原本只出现在地球白天日照那一侧。此层吸收某些频率的无线电波，阻碍在电离层远距离传播。E层高于地平面50mile (80km)以上，也主要是白天出现，尽管夜晚有时也能观测到电离作用。E层在某些频率下能进行中等距离的无线电通信。最高层称为F1层和F2层。F1层一般只在地球白天日照那一侧出现，在高度约125mile (200km)的地方形成；F2层高度约180mile (300km)，覆盖大部分或整个地球。有时，忽略F1和F2层的区别，统称之为F层。在5~30MHz之间的任何频率下，地球上任意两点，通常可以通过F层通信。

图19-3介绍了这些电离层，以及它们高出地面的距离。但是这个高度是变动的，各层位置不是严格确定的。有时，局部小区域或云中出現电离现象，特别是在E层中。

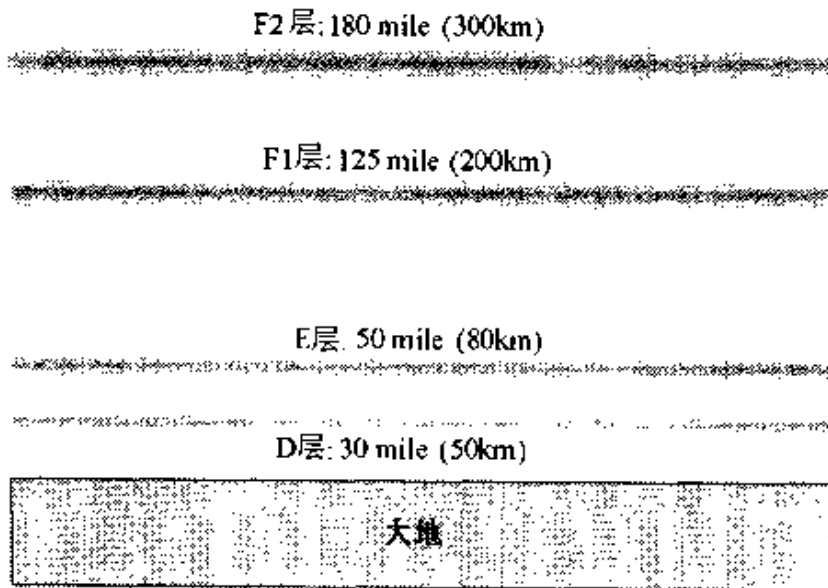


图19-3 电离层的各层及其大致高度

### 19.3.3 太阳活动

太阳的黑子数目每年都剧烈变化，见图19-4。它的起伏称作黑子循环，其周期为10至11年。黑子循环影响频率约200MHz以下的无线电波在电离层中的传播。

黑子循环显著影响F层传播，并且规律性可以预测。当黑子很少时，F层的最大可用频率相对较低，有时降落到5MHz以下。但是在靠近或正逢黑子高峰期，最大可用频率比其平均值高很多，偶尔可达

70MHz。

**太阳耀斑**是太阳表面上的一次突然“暴风雨”。这样的事件会发射高速亚原子质点，几小时内到达地球。因为质点是带电的，就会受到地磁场的加速。从而使某些频率下，电离层传播无线电波的条件突然恶化。太阳耀斑任何时候都可能发生，但还是经常出现在接近黑子循环的峰值期。

#### 19.3.4 偶发性E层传播

在某些无线电频率下，E层偶尔会反射信号回地面。这种效应是间歇的，而且状况变化很快。因此，称之为**偶发性E层传播**。频率在20~150MHz之间，它出现的可能性最大。在高达200MHz的频率下，偶尔也会观测到。利用它通信，正常情况下通信距离可达数百英里，有时能达到1500mile。

标准调频广播波段可能受到偶发性E层传播的影响。对电视广播的低频道，特别是2和3频道也同样。偶发性E层传播常常出现在业余无线电波段（21~148MHz），有时把它误认为发生在与电离层无关的、较低大气层的传播效应。

#### 19.3.5 极光传播

太阳活动反常时，极光可能会将无线电波反射回大地，这就是**极光传播**。极光（又称为“北极光”和“南极光”）出现在40~250mile的高度上。从理论上说，当极光活跃时，从地面上任意两点望去，如果极光的同一部分都处在两点的视线上，则极光传播是可能的。当电路的一端处在赤道两侧南、北纬35°以内时，几乎不发生极光传播。

极光传播的特征是快速和深度衰落。它几乎总是破坏模拟的语音和视频信号，使其变得莫名其妙，难以理解。数字通信经过极光传播

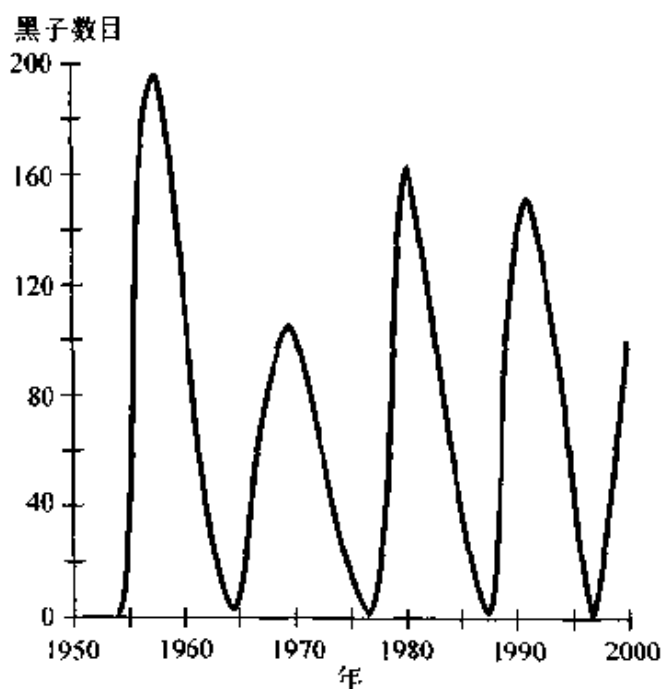


图19-4 近期黑子循环（图中把观测到的近似黑子数目表示成时间的函数）

很有效,但是由于极光运动引起的相位调制,常使载频展延数百赫。严重地限制了最大数据传输速率。极光传播常常伴随有通过E层和F层等电离层传播时造成的恶化。

### 19.3.6 流星散射传播

流星产生电离化的余迹,可持续0.5s至数秒,视具体流星的尺寸、速度以及进入大气层的角度而定。这点时间不足以满足大量数据传输的要求。但是在流星雨期间,众多的流星余迹可能造成几个小时的、几乎连续不断的电离化。这样的离化区会反射某些频率的无线电波,这就是流星散射传播。它可以出现在显著高于30MHz频率上。

流星散射传播主要受到实验研究人员和业余无线电爱好者的关注。这种通信方式,有时用于业余无线电分组报文传送,因为分组报文(消息)都是短时的。进行流星散射传播的距离范围,是从刚刚超出地平线算起到1500mile,它取决于离化余迹的高度、流星余迹与发射台及接收台之间的相对位置。

### 19.3.7 电离层传播预测

电离层传播条件每日、每月、每年都在变化。这种变化,在一定程度上可以预测。人们坚持不懈地监视太阳在各个电磁频率下辐射强度的起伏变化。阳光通量,顾名思义是保证数小时传播条件的良好指示。

阳光通量的突然增加意味着发生了太阳耀斑。耀斑突发随后的短时间内,传播条件通常被扰乱。有时耀斑完全封闭了F层通信,但是E层可能充分电离,允许中距离传播。在高纬度,在太阳耀斑后,可以观测到极光传播。

对于F层来说,传播逐日逐季变动是它的特征。频率约低于10MHz以下,电离层的传播情况一般夜间比白天好。10MHz以上,情况相反。冬季在10MHz以下倾向于更好些,夏天在10MHz以上传播情况更好。

美国国家标准时间频率局的电台WWV和WWVH定期发布传播预测公报。业余无线电爱好者杂志,或是其他面向电子学爱好者及专业人员的出版物,每月也会登载长期传播预报。

## 19.4 对流层传播

地球大气层的最低部分是对流层，这里存在空气扰动。它的范围从地面向上延伸约10mile，此区域对某些频率的无线电波传播有影响。波长约短于15m（频率20MHz以上）时，不同密度的气团内和它们之间能出现折射和反射。在波长约短于3m时（频率100MHz以上），空气也会产生电磁场散射。所有这些效应统称为对流层传播效应。

### 19.4.1 对流层弯曲

对流层传播最普通的一种类型发生于无线电波在低大气层中被折射时。这种情况在一定程度上几乎一直发生，但是靠近气象前端面最剧烈，那里热而轻的空气浮在冷而密的空气上方。冷空气的折射系数高于热空气，造成电磁波传播路径向下弯曲，从发射机算起，弯曲可延伸相当远的距离。这种现象称为对流层弯曲，见图19-5。

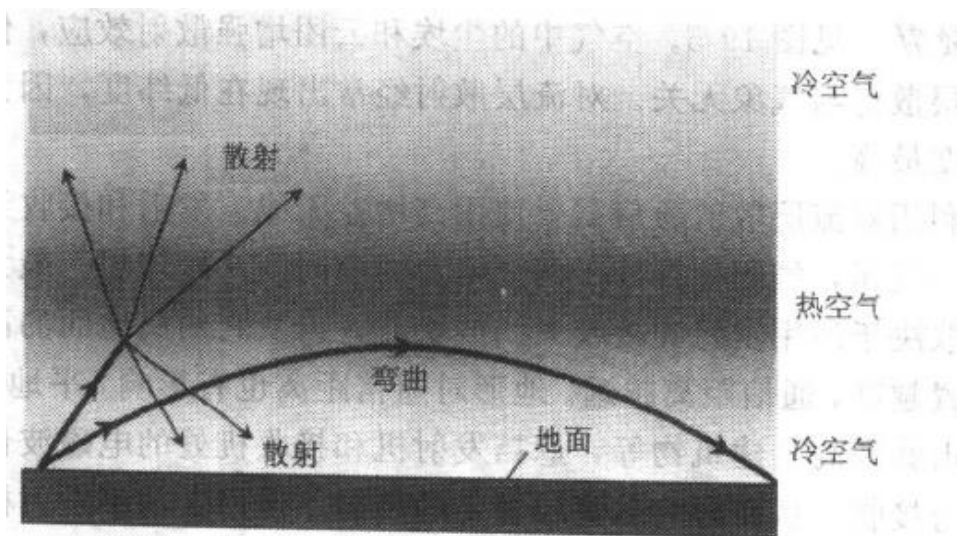


图 19-5 对流层弯曲和散射传播

弯曲现象常常引起调频和电视广播信号的接收反常。如一个数百英里外的电视台信号会突然出现在一个平时没有信号的电视频道上。高保真度调频接收机调谐器有可能接收到不熟悉的电台。有时，两个或数个远距离电台信号进入同一频道，彼此互相干扰。有些情况下，人们还把电视机上出现的这种效应，误以为是电磁干扰。

### 19.4.2 管道效应

管道效应或称为对流层管道，出现在与对流层弯曲相同的频率上。当冷空气层被夹在两个较热的空气层之间时，就形成管道。在温

带的纬度区，沿着或靠近气象端面，这种现象很普遍。水面上白天日照的几个小时内和地面上在夜晚时刻，也频繁发生这种现象。因为在同一湿度下，冷空气比热空气密度高，所以对某些频率的无线电波呈现更高的折射系数。冷空气在这个区域内的内部全反射情况，与光波被局限于光纤内部的情况颇为相近。

为了利用管道进行通信，发射和接收天线必须处于同一管道内，而且两地之间的管道必须是不破裂的和无障碍的。一个管道从顶部到底部的尺寸，可能只有数英尺，尽管如此，它可以平行地面覆盖数千平方英里的范围。管道效应允许沿地平线上空通信，在甚高频和特高频段，通信质量异常高，通信距离可远达数百英里。

### 19.4.3 对流层散射

频率在 100MHz 以上，大气层对电磁场有散射效应。散射容许在甚高频、特高频和微波频段沿地平线上空通信。这种传播模式称为*对流层散射*，见图 19-5。空气中的尘埃和云团增强散射效应，但是有的对流层散射与气象无关。对流层散射经常出现在低纬度，因为那里空气密度最高。

利用对流层散射通信需要使用高增益天线。发射和接收天线要指向同一气团，气团位置处于两个电台的中间则比较理想。最大可通信距离取决于所用发射和接收天线的增益，以及它们离地面的高度。天线设置越高，通信距离越远。地形对通信距离也有影响，平地最好。丘陵、山脉和高大建筑物等，遮挡发射机和接收机处的电磁波低角度的辐射与接收，从而影响对流层散射的传播。使用大功率发射机和高灵敏度接收机比较有利。

## 19.5 传播特性与频率的关系

本节介绍从最低无线电频率到微波及微波以上频率，电磁波在地表大气层的传播特性。

### 19.5.1 甚低频（30kHz 以下）

*甚低频*电波传播主要是依靠大地与电离层之间的波导效应，地面波也会传播相当远的距离。采用大功率发射机和大型天线，可以实现距离数千英里远的通信。大地电离层波导低端截止频率近似 9kHz。因

此，比 9kHz 低许多的信号会受到严重衰减，不宣传播。

甚低频传播发射天线必须是垂直极化的，否则不会出现地面波传播，因为大地对水平极化的长波电磁场有短路效应。

甚低频电波传播颇为稳定，几乎没有衰落。太阳耀斑偶尔会通过提升大地-电离层波导的截止频率，扰乱在这个频率范围的通信。

#### 19.5.2 低频 (30~300kHz)

低频下电波传播以地面波的方式进行，这也是电离层效应的结果。在低频波段的低侧，电波传播类似于甚低频波段的传播特性。随着频率的增高，地面波传播变得不再有效。在 30kHz 时，地面波传播 3000km 以上是很普通的事情，但是到了 300kHz，传播范围能超过数百英里就不寻常了。

低频频段电离层传播通常是通过 E 层进行的，这样在夜晚时刻有效距离会增加，特别是在频段的上、下两侧。使用大功率发射机，有可能实现洲际通信。太阳耀斑破坏低频频段的传播条件。发生耀斑之后，D 层变成具有吸收电磁波的性质，妨碍电离层传播。

#### 19.5.3 中频 (300kHz~3MHz)

中频传播依靠地面波及电离层的 E 层和 F 层进行。靠近中频频段的低端，地面波通信是常见的，通信距离可达数百英里。随着频率上升，地面波的衰减增加。3MHz 时，地面波已限于约 150mile。中频频段在白天时几乎从未观测到有电离层传播，因为 D 层阻碍无线电波达到较高的 E 层和 F 层。夜晚期间，在频段的低侧，电离层传播主要是通过 E 层进行，而在频段的高端，主要是通过 F 层。传播距离随频率增高而增加。3MHz 下，经由夜晚的路径，有时可以实现全球范围的通信。

太阳耀斑严重影响中频通信。太阳黑子循环和一年四季变化也影响中频电磁波传播。一般冬天比夏天传播状况好。这是因为冬天黑暗占优势，比夏天笼罩了半球的更大部分，此外因为雷电干扰（闪电产生的无线电噪声）冬天比夏天少。

#### 19.5.4 高频 (3~30MHz)

高频传播呈现宽范围变化的特性。高频的低段与高段的效应显著不同。现在把从 3~10MHz 范围当作低段，把从 10~30MHz 范围当作



高段。

高频的低段有地面波传播出现。3MHz 时最大传播距离近似为 150mile；15MHz 下它减少到 15 或 20mile。15MHz 以上，地面波传播实际已不存在。

高频电离层通信主要通过 F 层进行。在此波段的低段，白天几乎没有电离层传播，因为 D 层起吸收作用。夜晚可以实现全球通信，因为 D 层这时足够稀薄，使信号达到了 F 层。在此波段的高段，信号穿透 D 层，所以容许白天实现全球通信；但是到了夜晚，传播条件往往恶化，因为 F 层离化不够密，不足以把电波反射回地面。

高频的低段的通信情况一般冬季比夏季好。而高频的高段情况相反。高频的高段偶尔会观测到偶发性 E 层传播。甚至在 F 层最大可用频率低于通信频率时，也可能发生。在高频的高段的最上部、频率接近 30MHz 时，往往没有电离层传播。当黑子循环处于或是接近最小值时，尤为真切。

在高频段，太阳突发耀斑会造成传播条件的巨大变化。在大型耀斑喷射的亚原子质点到达之后，电离层通信在数分钟甚至数秒钟内，就会被完全破坏。

### 19.5.5 甚高频 (30~300MHz)

甚高频电磁波传播是通过视线和对流层方式。电离层的 F 层传播几乎观测不到，虽然在黑子最强时，它可能出现在高达约 70MHz 的频率。偶发性 E 层传播可在高达近似 200MHz 的频率出现。

流星散射和极光传播在甚高频段可以观测到。流星散射的距离是数百英里；极光传播可以提供远达约 1500mile 的通信距离，极光通信时必须使用数字通信。即便如此，最大通信距离是有限制的，因为极光传播产生调相作用。

为了延长移动通信设备的通信距离，在甚高频段广泛使用中继站。设在高处如山顶的中继站可以覆盖数千平方英里的范围。图 19-6 表示在台站 X 发射信号到中继站，中继站把信号重发到台站 Y 和 Z。

在甚高频段，多个有源通信卫星能可靠而有效地覆盖全球。事实上，有源卫星就是在轨中继站。月亮也有时被当作无源通信卫星使用，多数是由无线电爱好者利用。这种方式称为地月地方式，或是月球反

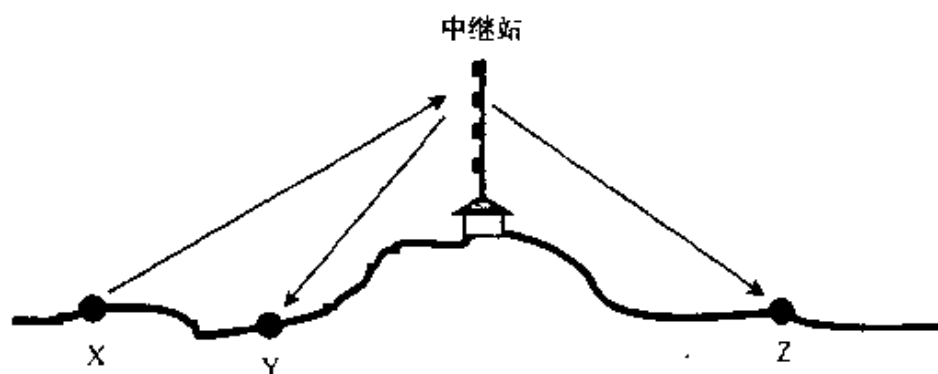


图 19-6 中继站有助于在比视距更远的距离间通信

弹方式。

### 19.5.6 特高频 (300MHz~3GHz)

特高频传播主要通过视线方式和通过卫星及中继站，不会出现“短波型”的电离层传播。在此频段的低段，偶尔会观测到极光、流星散射和对流层传播。管道效应会导致距离数百英里的传播。

特高频段的主要优点是，它的整个频率范围占据了 2.7GHz 的频谱空间。因为特高频能量与电离层的 D 层、E 层和 F 层毫无关系，电离层的扰动几乎对它没有影响。有时，极其强的太阳耀斑通过地磁场的快速起伏引起电磁噪声，从而干扰特高频电路。

特高频段曾经被认为是用不尽的频谱资源，但是近数十年来，情况已经变化。越来越多的人之间，以越来越高的数据速度进行数字通信。信号的数量以及它们的带宽以火箭般的速度猛涨。结果各通信服务部门（尤其是在城区）对使用特高频频谱的竞争日益剧烈。

### 19.5.7 微波 (3GHz 以上)

微波实质上通过大气层直线传播，几乎不受温度逆转，对流层散射及电离层的折射或反射的影响。微波范围的主要传播方式是视线传播。这有利于中继站和卫星通信。

在某些微波频率下，大气层衰减变得非常严重。随着波长变短到与小水珠或尘埃微粒的直径可比较时，雨、雾和其他气象效应能增加传播路径上的损耗。随着频率增高，对发射机和接收机的设计愈加苛刻，尤其是频率在数百千兆赫以上。虽然可以建造兆瓦功率级的发射机，用于甚低频、低频、中频或高频，但这种事情在微波段尚未听说过。但是有一种称为微波激射器 (maser) 的装置（事实上，它是微波

段的激光器),可以在微波频率下,把能量集中在极狭窄的相干波束中。这就提供了远距离,尤其是向外层空间通信的可能性。

### 19.5.8 微波以上

频率高于无线电微波的电磁波总是通过大气层直线传播。唯一的变动因素是路径损耗。

水蒸气会使处在波长约为4500~8000nm之间红外谱严重衰减。在波长约14000~16000nm之间的红外发射受二氧化碳(CO<sub>2</sub>)的干扰。雨、雪、雾和尘埃也都干扰红外的传播。

可见光谱段从约750nm(红光)延伸至390nm(紫光)。可见光在所有波长下,都能相当满意地通过大气层传播。在光谱偏向短波长的端部(蓝色和紫色),散射现象有所增加。对于在自由空间实施激光通信而言,红光是优选的颜色。氦氖(He-Ne)激光器产生红光,而且对试验者来说,价格合理。雨、雪、雾和尘埃都干扰空气中可见光的传播。

紫外光谱中处于较长波长段的能量,能够轻易穿透大气层,尽管会出现一些散射。臭氧(O<sub>3</sub>)层污染会增加损耗。而在紫外光的较短波长段,衰减增加。雨、雪、雾和尘埃都干扰紫外光的传播,干扰方式与干扰可见光相同。

X射线谱和伽玛射线谱(波长比紫外光更短)的能量,通过空气远距离传播效果不好。这是因为数量众多的气团,遍布在任何可用的路径上,足以阻挡这些波长下的辐射。此外,目前几乎不可能建造出有效的发射机。X射线和伽玛射线将来是否用于日常通信还是疑问,尽管它们可用于短距离无线电监视或控制系统。

## 第 20 章 噪声和干扰

**噪声**是来自非通信源的不需要的电磁能量。**干扰**是来自通信设备的不需要的电磁能量，它有时来自和被干扰设备同一类型并用于同样目的的设备。

### 20.1 外部噪声

在射频系统中，来自接收机以外的噪声叫做**外部噪声**。

#### 20.1.1 宇宙噪声

来自外层空间的噪声叫做**宇宙噪声**，它主要影响卫星和空间通信系统。在有些频率下，地球大气能阻止宇宙噪声到达地球表面，在另外一些频率下，宇宙噪声能以很小，甚至以零衰减到达地球表面。宇宙噪声和银河系平面有关，最强的**银河系噪声**来自人马座方向，因为这部分天空位于我们的太阳系和银河中心的连线上。银河系噪声和来自太阳、木星以及另外一些天体的噪声构成到达地球表面宇宙射电噪声的大部分。

#### 20.1.2 太阳通量

从太阳发射的射电噪声的总量叫做**太阳射电噪声通量**，简称为**太阳通量**。当发生太阳耀斑时，太阳通量电平急剧增加。在波长为 10.7cm 或频率为 2.8GHz 处监测太阳通量，在此频率下，对流层和电离层对无线电波没有影响，因此能量以全强度到达地表。太阳通量和**太阳黑子周期**有关。平均说来，太阳通量在接近太阳黑子周期的峰值时较高，在接近太阳黑子谷值时较低。

#### 20.1.3 天电

在地球大气层中产生的电磁噪声绝大部分是由雷阵雨中闪电放电所引起的。这种噪声叫做**天电**。在无线电接收机中，天电产生微弱的背景嘶嘶声或者不时由静电噪声爆发所插入的吼声。图 20-1 给出了接在无线电接收机中频段的示波器上所显示的天电的例子。

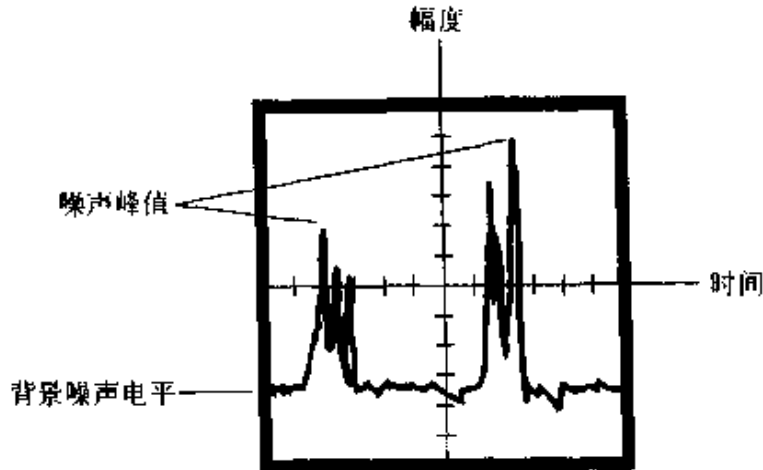


图 20-1 在示波器上显示的天电

一个单独的闪电产生从甚低频 (VLF) 到微波区域的射频能量脉冲。在电磁频谱的红外、可见光和紫外部分也产生能量。甚低频天电能传播几百英里，在微波区域传播距离减少到几英里。

#### 20.1.4 沉积静电噪声

*沉积静电噪声*是由带电水滴或冰晶打到物体上而产生的。特别是在雪暴和尘暴时容易发生。沉积静电噪声有时会很严重，特别是在甚低频、低频和中频段（波长大于约 100m）。*噪声消隐装置*或*噪声限制器*可以减少沉积静电噪声的作用。可以用加快放电的方法减少沉积静电噪声，例如在天线和直流地端之间接一个电感线圈。把天线各元件的尖端部分磨平些也有利于减少沉积静电噪声。

#### 20.1.5 电晕

当电导体上的电压超过某确定值时，导体周围的空气会电离，其结果就是*电晕*，也叫圣艾尔莫火 (Saint Elmo's fire)。这种电离引起宽频带射频噪声，它能使无线电通信接收系统失效。有时在高压空气可变电容器的平板之间可以看到电晕。尖锐的物体，如鞭状天线的端部就比平的或钝的表面更容易产生电晕。雷阵雨时静电电荷的累积也能引起电晕。在黑暗中，电晕看上去是一个蓝白或蓝紫辉光。有些电感加载发射天线在端部加有金属圆盘或圆球以减少电晕。

#### 20.1.6 脉冲噪声

任何突然的高幅度的电压脉冲将产生一个射频场，其结果就是*脉冲噪声*。它可由家用电器产生，例如吸尘器、热吹风机、电热毯、温

度调节装置和日光灯起辉器。脉冲噪声在频率低于约 1MHz 时尤为严重，但它在频率高到几十兆赫时也能见到。图 20-2 是一个接在无线电接收机中频段上的示波器所显示的脉冲噪声的例子。

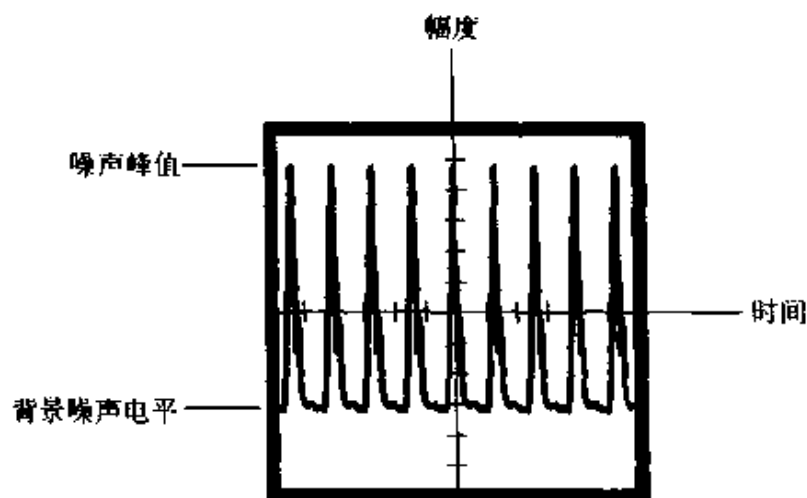


图 20-2 在示波器上显示的脉冲噪声

脉冲噪声能混入高保真立体声音响系统中。系统中外围设备（如磁带播放器，话筒和喇叭等）的数目越多，越会感受到这种噪声。无线话筒和戴在头上的耳机和/或话筒特别容易受到它的影响。

可以用好的直流接地系统来减少脉冲噪声。噪声消隐装置和噪声限制器也很有用。无线电接收机应当设置成和接收模式相一致的最窄频响带宽。在高保真立体声音响系统中，连接电缆应当屏蔽。

### 20.1.7 汽车系统中的噪声

点火噪声是一种宽带形式的脉冲噪声，它是由内燃机中火花塞的电弧所产生。绝大多数的轿车、载货汽车、割草机和汽油发电机等都辐射点火噪声。接收机中可以用噪声消隐装置来减少点火噪声。有时可以安装一种特别的火花塞，即通常所谓的电阻火花塞，可以减少点火噪声。在汽车无线装置中，一个非常好的车辆底盘接地连接是十分必要的。

在汽车无线通信中，点火噪声不是唯一的噪声源。在高速公路上高速行驶时汽车轮胎和公路摩擦也会产生噪声。高压输电线常辐射大量宽频带射频噪声。当汽车加速或减速时，汽车交流发电机可引起噪声使录音机或放音机转速抖动而产生变调。

### 20.1.8 电源线噪声

电力公司电线，除了携带它要输送的 60Hz 交流电外还带有产生电源线噪声的更高频率的成分。这种电流通常是由于在线路的某些点上发生电弧而产生的。电弧可产生于接在终端上的设备，可发生在有故障的变压器，高压线向潮湿空气电晕放电时也会出现。

无线电接收机有电源线噪声时听起来像蜂音或嘶嘶声。有些电源线噪声可用噪声消隐装置衰减。另一些情况下要用噪声限制器以改善接收。相位补偿法是用一个辅助天线接收噪声来消除主接收天线的噪声，它有时能减少接收到的电源线噪声。

## 20.2 内部噪声

有些噪声是由电子设备内部的有源器件产生的，这就是内部噪声。在甚高频、特高频和微波频率下设计低噪声接收机时要特别注意降低内部噪声。

### 20.2.1 热噪声

任何物质中的热噪声电平和热力学温度成正比。当热力学温度接近 0K 时，噪声减少到接近于零。

热噪声决定了电子接收设备可以达到的灵敏度的极限。把前置放大器电路放在液态氦或液态氮中，这种噪声可以降到很低。氮的沸点只有几开尔文。如此冷的温度使得原子和电子以相当低的速度运动，和室温时相比可以减少热噪声电平。

### 20.2.2 散粒噪声

任何携带电流的媒质，当载流子从一个原子移动到另一个原子时产生噪声脉冲，这叫做散粒效应，由此引起的噪声叫做散粒噪声。这种噪声产生于无线电接收机的前端，并和有用信号一起被随后各级放大。

一个器件产生的散粒噪声的总量粗略地和它携带的电流成正比。为了减少散粒噪声以改善接收机前端的灵敏度，开发出了低电流固态器件，例如像砷化镓场效应晶体管。

### 20.2.3 嘶嘶声噪声

在音频噪声中，在其中部或高音部分附近出现幅度高峰的，叫做

**嘶嘶声噪声**。它是由元器件中电子或空穴的随机运动所产生的。前级产生的嘶嘶声噪声被以后各级放大。在无线电接收机中，嘶嘶声噪声会在中频级、前级、混频器和本振中产生。某些嘶嘶声噪声甚至起源于接收机外部，如在天线导体和大气中以热噪声的形式出现。

#### 20.2.4 传导噪声

当通信系统中的噪声是通过电源进入时，这种噪声叫做**传导噪声**。在一个固定的无线站中，如果所有接到电源插座上去的电源线中都串联射频扼流圈，可以抑制这种噪声。在移动通信站中，传导噪声来自交流发电机和火花塞，通过直流电源导线进入无线电。在移动站中，可以把电源线直接接到蓄电池（绝对不要通过香烟点火器）来减少传导噪声。用大约  $0.1\mu\text{F}$  的电容器对交流发电机的引线进行滤波可以减少交流发电机引起的变调。点火系统中的电阻线有时能减少火花塞产生的脉冲噪声。

### 20.3 降低噪声

在通信系统中，存在着各种不同的方法来提高信噪比。

#### 20.3.1 随机噪声

有些噪声在幅度和时间之间不存在有规则的关系，这种噪声叫做**随机噪声**。例如天电、热噪声和散粒噪声。随机噪声比具有一致的波形或样式的噪声更难抑制。

一种能使有用信号超过噪声的限制电路能提供对强随机噪声的防御。采用窄频带发射配合窄带通接收机来对付强随机噪声是很有用的。用调频比用调幅效果更好。定向天线或噪声抵消天线系统有时能在有随机噪声时改进通信。

#### 20.3.2 噪声和模式的关系

射频调制可以概括地分成模拟调制和数字调制。模拟模式包括通常的调幅和调频广播、单边带、通常的快扫描电视和大多数慢扫描电视。数字模式包括开关键控、频移键控、数字电视和脉冲调制。通常数字调制系统比模拟调制系统能提供更好的抗噪声度。

噪声的特点是幅度有起伏，频率不确定并且是散开的。由于这个原因，若调频系统装有限制器使幅度没有变化，在其他因素都一样时，



调频比调幅有更好的抗噪声度。这一事实，再加上频率不同，说明了标准调幅广播频带和标准调频广播频带之间接收到的天电电平有很大的不同。

### 20.3.3 噪声和频带的关系

噪声的本性是宽频带的。相反，信号通常只占有一个窄频带。适当选择接收机的选择性（带宽），会影响接收机在窄带信号和噪声之间进行识别的界限。

图 20-3 表示一个假想信号的两个简化频谱图，它可以用两个不同带宽的带通滤波器接收到。在这两种情况下，噪声的总能量用噪声矩形的面积来代表，信号的总能量用信号矩形的面积来代表。两种情况下信号能量是相同的，但是在图 20-3b 表示的情况下噪声能量却较低，因为接收机的通带较窄。在图 20-3b 的情况下，信号能量和噪声能量的比值较高，因此信号就比较清楚。

### 20.3.4 噪声消隐装置

噪声消隐装置能分别对待短的、强烈的爆发（某些类型噪声的典型特征）和有用的信号。噪声消隐装置通常安装在超外差接收机的一个中频放大器中或直接装在变频接收机的检波级前。

在低噪声情况下，噪声消隐装置对通过装了它的中放级的信号没有影响。但是当发生

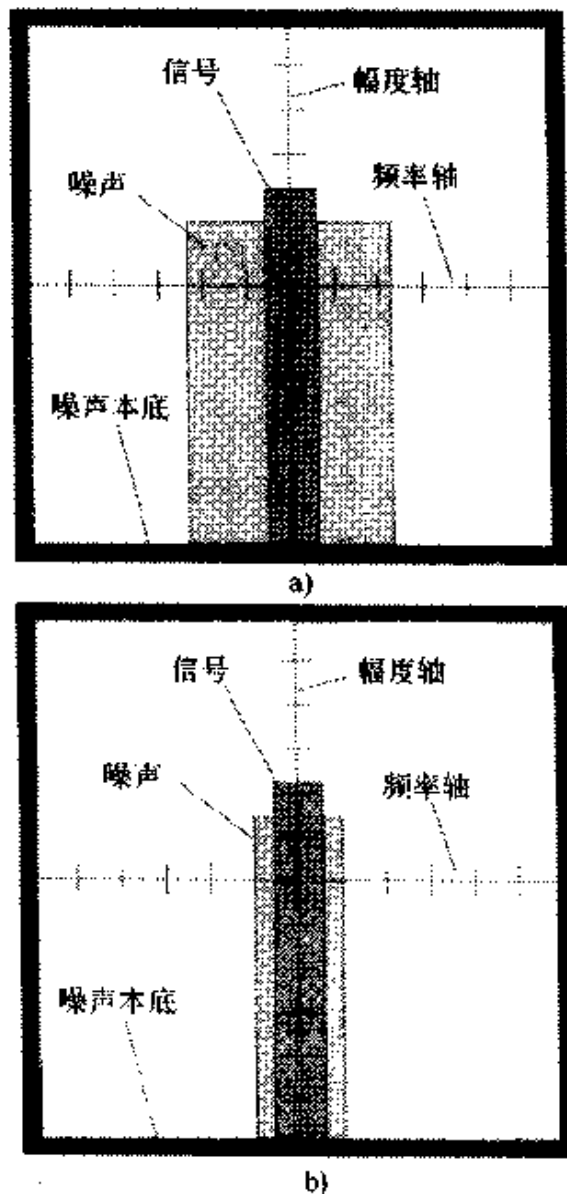


图 20-3 通带与信号带宽

a) 通带比信号带宽大很多

b) 通带比信号带宽稍大

一个突然的、高振幅、短宽度的脉冲时，噪声消隐装置把这一级切断。因此接收机的输出就有一个短暂的寂静（其时信号和噪声都不能接收到），而不是一个响亮的爆裂声或咔嚓声。

噪声消隐装置在对付整齐的、短宽度的脉冲噪声是非常有效的。噪声消隐装置也能对付在接通/断开无线电发射机时因不适当操作而引起的**键味哒声**。噪声消隐装置对天电和电源线嘶嘶声效果不大。

### 20.3.5 噪声限制器

**噪声限制器**也叫**噪声削波器**（箝位器）是一个制止外部产生的噪声超过某一幅度的电路。这个电路由一对二极管组成，二极管上加有用于控制削波电平的可变偏压，见图 20-4。将调节偏压调到切削发生在信号振幅处，于是噪声脉冲不能超过信号幅度。这就使得接收机可以收到（虽然有些困难）可能被噪声淹没的信号。噪声限制器典型地安装在超外差接收机的两个中放级之间。在直接变频接收机中，噪声限制器的最佳位置是在紧挨着检波器的前面。

噪声限制器可以使用这样一种电路，它能按照进入信号的强度自动设置削波电平。这是一个有用的特点，因为它可以在信号衰落时免除接收机操作员连续不断地重新调节削波电平。这种电路叫做**自动噪声限制器**。

对于脉冲噪声，限制器的作用不如消隐装置。但是对天电或变压器电弧等引起的干扰，噪声消隐装置没有用，限制器却可以减轻它们的影响。

### 20.3.6 电源线滤波器

**电源线滤波器**是一个无源电路，它串联在电子设备的交流电源线上。电源线滤波器能让 60Hz 的交流电不受影响地通过，但能抑制较高频率的噪声。典型的电源线滤波器实际上是一个低通滤波器，是由一

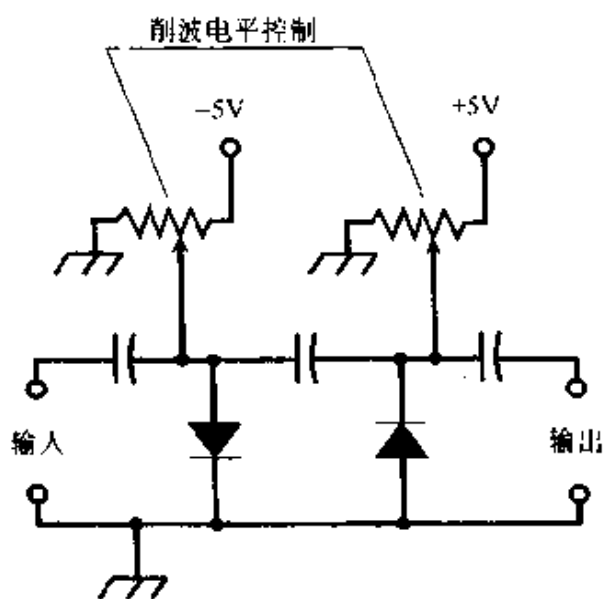


图 20-4 一种简单的噪声限制器

个或几个电容器和电源线并联、一个或几个电感器和电源线串联而成。元件的数值应选成使其截止频率比 60Hz 高些。电源线滤波器只对通过电源线进入设备的噪声有效。

### 20.3.7 特种天线

任何具有尖锐的定向零点的接收天线都可用来减少接收到的人为噪声电平，这种天线也能抑制强的、不要的本地信号。铁氧体环杆或环形天线在这种场合特别有用。当零点对准噪声源方向时，噪声电平下陷。当用可变电容调谐时，这种天线呈现窄频带，进一步抑制宽带噪声。要使这些天线的好处能够实现，馈线必须平衡好或屏蔽好。

在环形元件周围加装法拉第屏蔽也叫静电屏蔽，能加强小环形天线对噪声的抑制。屏蔽减弱电磁场的电场分量，而让磁场分量不受影响地进入。许多噪声信号是由静电耦合近距离传播的。当天线对这些场不敏感时，在接收机的输入端，信噪比可以得到提高。

仔细平衡或屏蔽馈线，有满足要求的射频接地并把频带调到最小，可以把天线系统的总噪声敏感度减到最小。通常在中频和高频段，水平极化天线比垂直极化天线对人为噪声的敏感度要小。

### 20.3.8 相位抵消

在频率低于 100kHz 时，采用两个接收相同幅度噪声但不同幅度信号的 antenna 可以降低人为噪声。两个 antenna 连在一起，因此噪声信号互相抵消。在图 20-5 中举例说明了这种技术。

信号天线和噪声天线必须适当地相互靠近，因此它们能够接收到特性尽可能接近相同的本地人为噪声。但是它们又不应当太靠近，以免信号会同噪声一起被抵消掉。信号天线应当装在有利于接收射频信号的位置，但是噪声

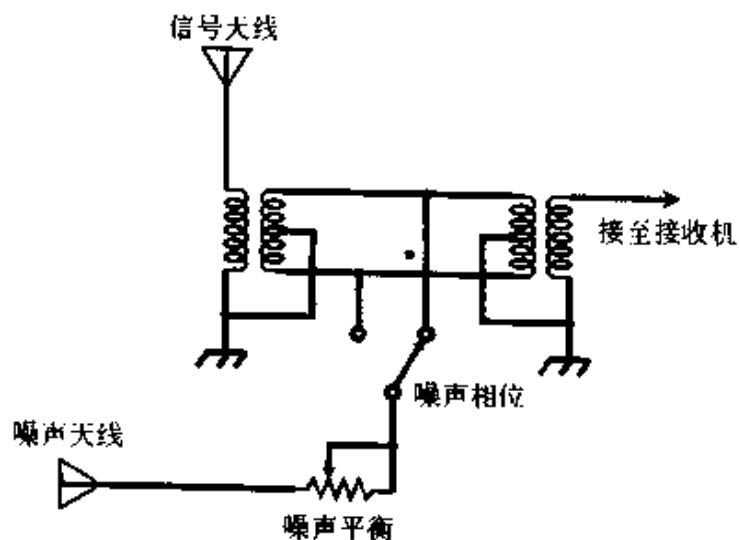


图 20-5 一种抵消噪声的天线系统

天线应当放在尽可能多地接收不要的噪声和相对来说较小的有用信号的位置。

电位器用来调节从噪声天线来的信号和噪声电平，并对从两个天线合成的总信号电平影响最小。相位开关保证噪声天线注入的能量和从信号天线来的噪声能量反相。用累试法选好正确的开关位置后，调节电位器可以得到最小的接收噪声。

### 20.3.9 同步

在同步数字通信中接收机随发射机逐位（比特）锁定，因此接收机能分别地听到和判别每一比特。这就使得接收机能够使用带宽非常窄的接收滤波器。这种同步要求采用外部的公共频率或时间标准。WWV 或 WWVH<sup>⊖</sup>站的广播可用于此目的。分频器可用于得到需要的同步频率。当（且仅当）该比特持续期间平均输入信号电压超过某一特定值时，在接收机中产生一个输出信号。诸如由滤波器瞬变（阻尼振荡）、天电或其他噪声引起的虚假信号通常可以忽略，因为它们很少能有足够的平均电压。

## 20.4 无线干扰

无线干扰是指存在着不要的人为的射频信号，妨碍通信、监控和控制系统的接收。

## 20.5 电磁干扰

电子设备有时会在短距离内对相互之间的工作产生干扰。例如，一台计算机可以干扰业余无线电接收。电视接收机会因在甚低频、低频和中频范围内产生虚假信号（实际上是扫描信号的谐波）而名声不好。这些现象集合起来叫做电磁干扰。

好的硬件设计是防止电磁干扰的最有效手段。常规方法包括屏蔽传送射频信号的导线，所有电子设备的射频接地，以及把发射功率输

⊖ WWV 和 WWVH 分别是美国科罗拉多州和夏威夷州的短波无线电发射台，发布时间、标准时间间隔、UT1 时间校正 BCD 时间编码、地球物理警戒及全球定位系统状态报道等信号。——译者注

出限制到维持有效通信必需的最低电平。

应当指出，在有电磁干扰的大多数情况下，发射设备没有坏，它只不过在执行其预定的功能。通常，引起电磁干扰的原因是无线电接收机或消费电子设备的设计或安装不好。和业余爱好，市民公用频带，商业收发两用无线电设备和商业广播无线发射机有关的电磁干扰尤其如此。

## 20.6 邻频道干扰

当无线电接收机调谐到某一特定频率，而干扰来自邻近频率的信号时，这种干扰就是**邻频道干扰**。

正确设计发射机和接收机能减少这种干扰。发射机的音频放大器、调制器和射频放大器应当具有现代技术能达到的最小失真。接收机应当采用适合于接收信号的特定带宽的选择性好的滤波器，对邻频道的响应应当尽可能低。一个好的接收机设计应当在通带内有相当平坦的响应，在通带外灵敏度要很陡地降下来。在图 20-6 中举例表示一个用于窄带调频接收的良好响应曲线。

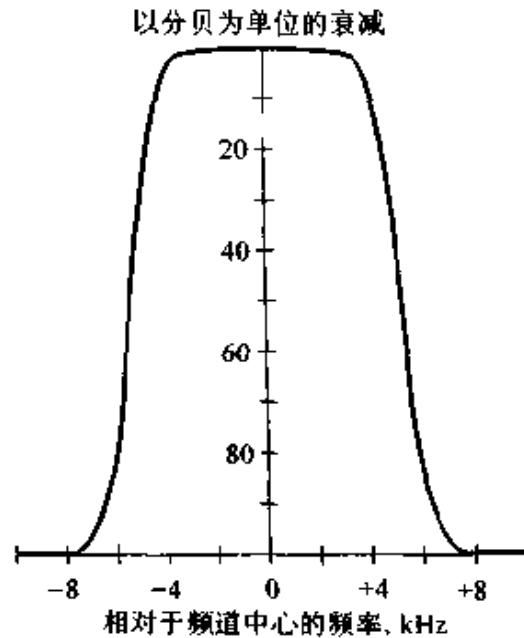


图 20-6 接收机中有适当的对频率响应的衰减时能抑制邻频道干扰

### 20.6.1 边带泼喇声

边带泼喇声是用来描述过大带宽无线信号的不希望有的效应。边带泼喇声可用下列方法来防止：

- (1) 避免过度调制。
- (2) 音频放大器电路在最小失真的情况下运行。
- (3) 保证所有的发射机放大器工作在适当的偏压和驱动。
- (4) 保证外部线性放大器运行适当。
- (5) 语音处理线路运行适当。

键咔哒声是由开关键控发射机产生的一种边带泼喇声。咔哒声事

实上是由过快的信号上升沿和/或下降沿引起的边带。一个调节好的开关键控发射机中的上升沿和下降沿，应当具有类似于图 20-7a 中表示的信号振幅和时间的函数关系。

如果下降或上升时间太短，像图 20-7b 和 c 表示的那样，就会发生咋啞声，它能干扰邻近频率的通信。

### 20.6.2 谐波

任何信号，除了有所要频率的能量外，在整数倍频率处也有能量。信号的最低频率分量叫做基频，所有整数倍频就是谐波。具有二倍基频频率的信号是二次谐波，具有三倍基频频率的信号是三次谐波，以此类推。

一个接近完美的正弦波只有很小的谐波能量。锯齿波，方波以及所有畸变了周期振荡在谐波频率处包含大量的谐波能量。当正弦信号通过一个非线性电路时，谐波能量就产生了。

通常不希望无线电发射机有谐波输出。减少无线电发射机谐波发射的方法有：

- (1) 调谐好末级放大器。
- (2) 不要过度驱动末级放大器。
- (3) 末级放大器和天线系统之间保持良好的阻抗匹配。
- (4) 天线系统中的所有连接是合理的。
- (5) 在天线馈线中安装一个低通滤波器。
- (6) 在天线馈线中使用一个天线调谐器。
- (7) 在天线馈线中使用带阻滤波器，以抑制特定谐波频率的能量。

### 20.6.3 寄生发射

无线电发射机设计不好或操作不当时，就会在不是所要的发射频率处辐射非谐波信号。这种信号能传播几千英里并大范围地干扰其他

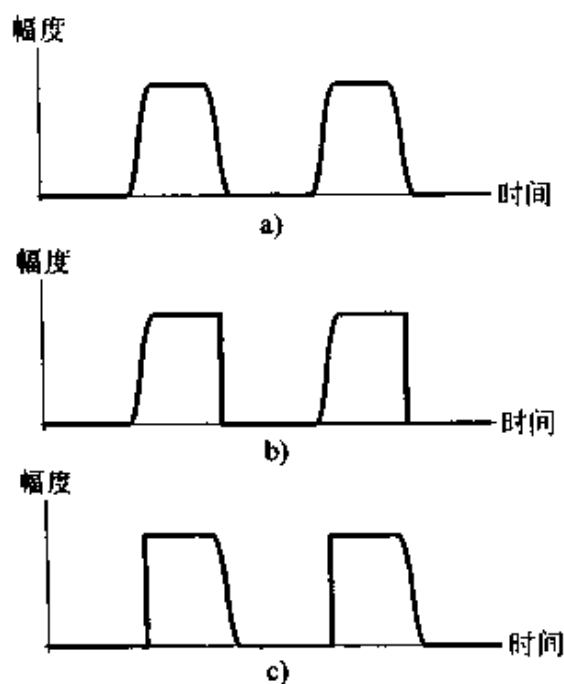


图 20-7 开关键控波形

a) 适宜 b) 下降沿太陡 c) 上升沿太陡

设施。这种寄生发射的最常见原因是在末级放大器电路中的振荡。这种振荡叫做寄生现象。在有些情况下，在末级放大器的晶体管，场效应晶体管或真空管的收集极，漏极或阳极的引线处放一个小的电感线圈，可以消除这种现象。在难处理的情况下，唯一的有效措施是重新设计和制作放大器。

#### 20.6.4 寄生响应

在超外差接收机的镜像频率处出现一个强信号时，就会发生寄生响应。

假定一个单变频接收机有 9MHz 的中频，再假定它设置成接收 25MHz 的信号。接收机内部的本机振荡器调谐到 16MHz；它与进来的 25MHz 的信号混频产生一个 9MHz ( $25 - 16 = 9$ ) 的输出，如图 20-8a 所示。现在假定进来一个 7MHz 的强信号。这个信号和 16MHz 的本振信号混频产生一个 9MHz ( $16 - 7 = 9$ ) 的输出，如图 20-8b 所示，结果，7MHz 的信号干扰了有用的 25MHz 信号。

有很多方法来处理这种情形。在混频器前用一个或多个高选择性调谐射频放大器会加强有用信号和抑制镜像信号。在特别严重的情况下，例如一个邻近的广播站刚好播送一个接收机镜像频率，在天线系统中采用一个带止滤波器（也叫陷波器）会有助于抑制镜像信号。

#### 20.6.5 交叉调制

交叉调制产生另一种干扰。接收机中的非线性电子元件会在外部信号之间引起不需要的混频。接收机外的不良的电气连接也能引起这个问题。在某些大城市的市中心区，有很多的无线电发射机同时运行，除了采用最先进技术的无线电接收机外，几乎所有的接收机都能观察到交叉调制。一般地说，交叉调制问题可以用对付寄生响应的同样方法来处理。

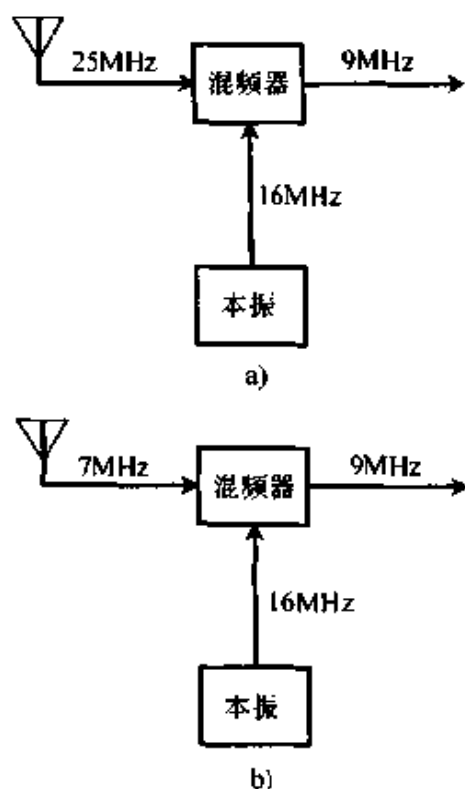


图 20-8 单变频无线电接收机

a) 正常运行 b) 不正常运行

## 20.7 非射频系统

噪声和干扰能使光的、红外的和声学的无线系统的性能降低。

### 20.7.1 光学和红外系统

明亮的日光会偏置光电管并降低它的灵敏度，但是在一个设计得很好的系统中这不一定是个问题。在一个视线光学或红外通信系统中，减小接收机的光圈可消除大部分背景光。用一个望远镜筒，把光电接收管放在物镜的焦点上就能减小光圈，见图 20-9。

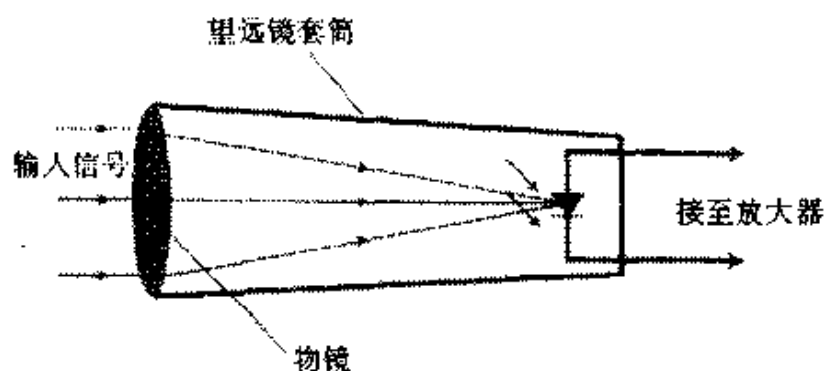


图 20-9 望远镜套筒可用于削减光学的和红外的噪声和干扰

一种更为严重的光学或红外噪声和干扰是由受到调制的可见光或红外源产生的。闪电就是一个例子。另外一些例子像白炽灯、荧光灯和元素蒸气灯。图 20-10 是能减少“灯泡嗡嗡声”的电路图。嗡嗡声传感器放在只能检拾到很少或检拾不到有用信号，但能检拾到很多“灯泡嗡嗡声”的地方。反复调节开关或电位器直到嗡嗡声为零或最小。

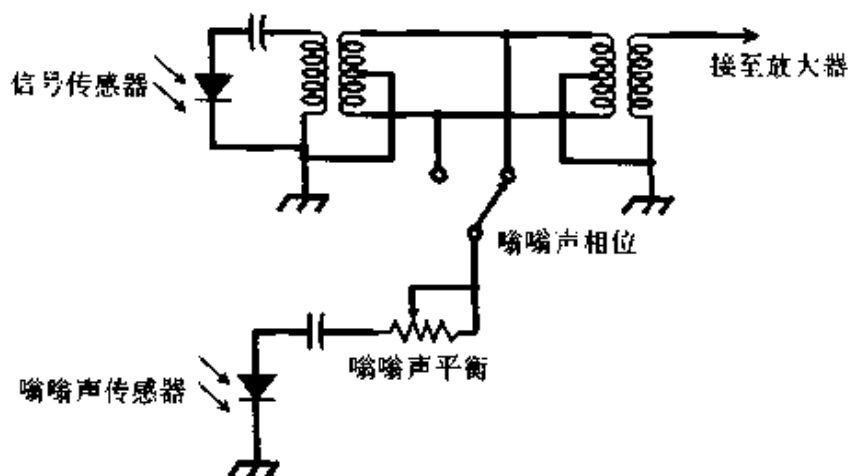


图 20-10 调制光通信中用的消除嗡嗡声电路



这个电路类似于本章早先描述过的低频射频噪声消除电路。

### 20.7.2 声学系统

在声学系统和设备中，由于在空气那样的气体，水那样的液体和水泥或钢铁那样的固体中的分子的物理振动而产生噪声和干扰。

在超声通信系统中，人耳能听到的范围内的噪声，除非它有谐波成分，对通信只有很小的影响。有些噪声是由风引起的空气运动或物体运动（如树叶）造成的。昆虫或各种其他的小动物有时发射出声波和超声波。

在计算机语音识别系统中，声学干扰会成为一个重大问题。砰地一声关上门，从旁边办公桌或物体上发出来的声音，响铃的电话以及翻动纸张等都能被系统当作它应当翻译的声音。

在超声入侵检测或移动检测系统时，除非噪声大到邻近物体发生物理振动而虚假地触发报警外，声学噪声本身很少会引起问题。这些系统的特色是靠检测具有短波长的声波的相位变化而工作的。如果另外一些设备发射相同或接近相同频率的声波，超声系统就会弄错。

声纳被用于水下测深和/或定位物体，有时也会由于水中的鱼、沙子、泥土的干扰，或者温度、咸度的急剧变化而出错。故意发射和声纳同样波长和脉冲频率的信号也能产生虚假的“回波”。

## 第 21 章 测量和监控系统

对于像电流、电压、功率、频率和物体移动等参数常常要进行电子测量和监控。

### 21.1 电流表

**电流表**是用于测量电流的仪表。有些电流表能测到高达数安培的电流；另一些电流表能测到低至只有零点几微安的电流。有些电流表只能测量直流；另一些则能测量交流。

#### 21.1.1 模拟与数字

基本的模拟安培表利用阿尔松范尔 (D' Arsonval) 移动。表针安装在一个载流线圈上，线圈周围是一个磁铁。表针线圈组件装在一个弹簧支承上，绕轴线偏转。线圈中的电流产生一个磁场，这个磁场产生一个可以变化的力，它使指针的偏转和电流成正比。

阿尔松范尔表的灵敏度由磁铁磁场强度和线圈的圈数所决定。磁场强度越强，线圈圈数越多，产生给定偏转所需的电流越小。

**数字电流表**中没有移动的部件，它完全是电子的。大多数数字表给出直接的数字读数。直接读数数字表避免了内插误差。当需要经常调节而影响表的指示，或当电流不断地且很快地起伏时，数字表就很不好用。

#### 21.1.2 交流电流表

通常的电流表设计成测量直流，这种表中如果通过交流电流。由于平均电流为零，故读数为零。要测量交流，电流必须整流。表的刻度必须在实验室中校正。图 21-1 是一个交流电流表的简单的功能电路图。

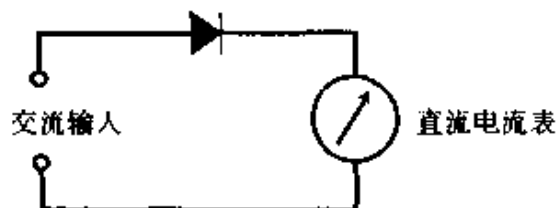


图 21-1 简单的交流电流表

#### 21.1.3 电流表分流器

如果在一个电流表上并联一个数值正确的电阻，可以增加

它的满刻度量程。量程通常以数量级为单位增加，即每档增加 10 倍。电阻必须能够承载流过它的电流而不致烧毁，这就是加装*电流表分流器*。当必须测量很大的电流，如几百安培时，就要用分流器。分流器还能用来把微安表或毫安表用作有几个量程的*多量程表*。

#### 21.1.4 热电式电流表

当电流流过电阻性导线时，导线发热，发热的程度和电流的平方成正比。如果电流保持不变，热量和导线的电阻成正比。选择正确的金属或合金，把导线做成一定的长度和直径，采用一个灵敏的温度计，把整个装置装进一个隔热的机壳中，就做成了一个*热电式电流表*，也叫做*热电丝式电流表*。这种仪表可以测量交流及直流，因为热量和电流的方向无关。

另外一种热电式电流表可以把两种不同的金属在物理上相互接触在一起。如果这两种金属选得正确，电流流过时接点就热起来。这就构成了一个*热电偶电流表*。如同热电丝式电流表一样，可以用温度计来测量发热的程度。

#### 21.1.5 基本的电压表

如果用一个电阻和一个微安表串联，电表给出的读数和表与电阻的组元件两端的电压成正比。用一个微安表和一个大电阻串联，就得到一个几乎不支取电流的电压表。切换和微安表串联的不同阻值的电阻，可以做成有不同满刻度量程的*电压表*，见图 21-2。

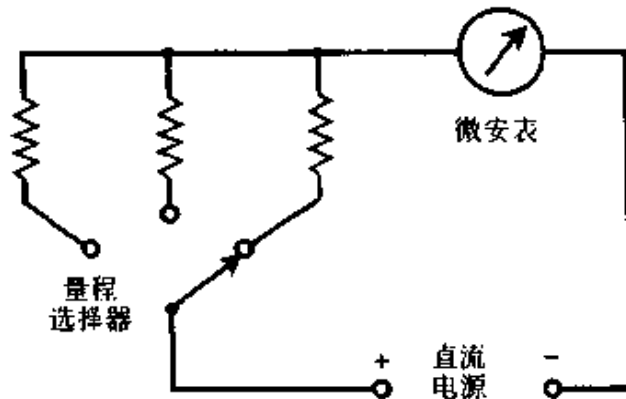


图 21-2 基本的多量程电压表

#### 21.1.6 基本的欧姆表

*欧姆表*用于测量直流电阻。一组内部固定的电阻可以改变测量范围。为得到高的测量精度，电阻的误差必须很小。在图 21-3 上给出一个简单的欧姆表的电路图。

大多数欧姆表有几个量程，按照刻度指示的电阻的数量级的单位来标识（例如： $\times 100$ ， $\times 1k$ ， $\times 10k$  等），刻度盘标定成从零到“无穷”

大”。通常零欧姆（代表最大电流）在刻度盘的最右边，而“无穷大”欧姆（代表零电流）在最左边。在用欧姆表进行测量时，被测电路必须不流过电流，因为流过的电流会引起错误的读数<sup>⊖</sup>。

### 21.1.7 伏特-欧姆-毫安表

在电子学实验室中，一种常用的检测仪表是伏特-欧姆-毫安表。它能测量电压、电阻和电流。商场里可以买到的伏特-欧姆-毫安表能测量的范围有限，最大电压约

1000V，测更大的电压要有特殊的引线接头和绝缘良好的导线以及其他的安全预防措施。普通的伏特-欧姆-毫安表能测量的最大电流是几安培。可测量的最大电阻是几十兆欧。

有些伏特-欧姆-毫安表采用有源放大器以增强电压表的功能。一个好的电压表要对被测电路的影响尽可能小，这就要求电压表具有极高的

内阻。采样一个小到不足以使电表直接指示的电流并把它放大，就能达到此目的，见图 21-4。

### 21.1.8 基本的功率计

功率计用来测量电功率。当电抗不是一个影响因素时，像在直流电路或很多实用交流电路中那样，以瓦特为单位的电功率  $P$  等于以伏特为单位的电压  $E$  和以安培为单位的电流  $I$  之积

$$P = EI$$

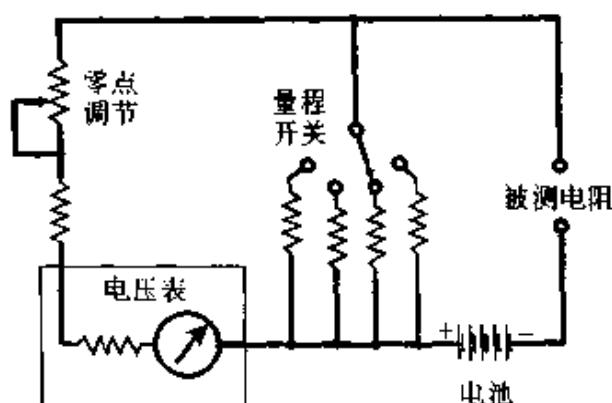


图 21-3 基本的多量程欧姆表

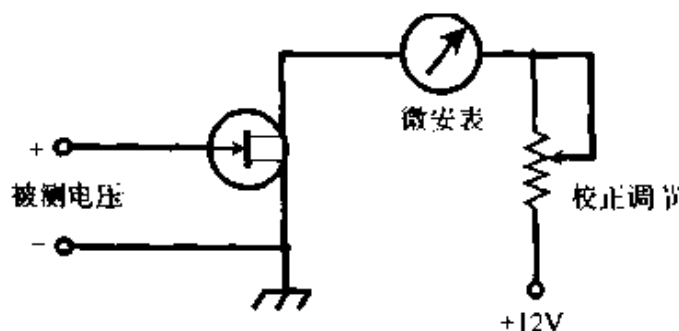


图 21-4 电压表采用有源放大器来增大其内阻

⊖ 实际上在用模拟欧姆表测量时，总要在被测电路中流过一点电流，只是流过的电流必须很小。——译者注

在这些应用中，可以用一个电压表并接在电路上来得到电路两端的电压读数，在电路中串联一个电流表来得到流过它的电流读数。电压和电流相乘就得到功率。

## 21.2 特种仪表

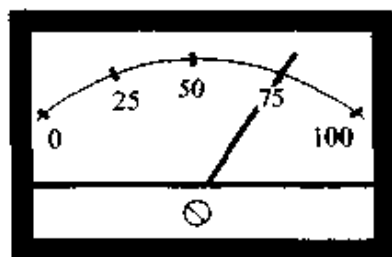
下面是在电子器件、系统和检测设备中经常遇到的特种用途仪表的一些例子。

### 21.2.1 条形表

条形表是由几个灯或发光二极管 (LED) 或液晶显示 (LCD) 元件所组成。这些元件排成一排，因此这些仪表具有逐步增加的刻度显示。图 21-5 表示一个条形表 (图 21-5a) 和一个模拟表 (图 21-5b)，二者都接到有 75 个单位大小的信号源上。条形表给出的读数不能内插，但模拟表能进行一些内插。由于条形表完全是电子的，它比模拟表更能承受物理上的误用。此外，条形表比电气机械表更便宜。



a)



b)

图 21-5 条形表与模拟表 (两种表都显示 75 个单位的读数)

a) 条形表 b) 模拟表

### 21.2.2 定向功率计

定向功率计适用于测量发射机的射频输出功率，还能指示天线和传输线之间的匹配的好坏。

定向功率计分成两类。第一类是简单型，它有一个刻成瓦特，有时也刻成毫瓦和/或千瓦的渐变刻度，可以用开关来选择多种量程。根据开关或内部可旋转元件的位置，从定向功率计可读出前向功率或反射功率。第二类定向功率计是十字交叉指针式功率计，它在一个外壳中有两个指针，分别配有经过校正的刻度。一个指针/刻度指示前向功率，另一个指针/刻度指示反射功率。第三个刻度是对两个指针的交错点校正的。这个刻度指示驻波比。

### 21.2.3 音量单位表

在高保真音响设备中,常用仪表测量响度,响度用分贝来刻度。在音频领域,当音量变化时,人耳能检测出的声音电平增加或减少的最小变化量大约为 1dB。声音响度用音量单位来表示,而指示音量单位的表叫做音量单位表。这种表有一个零刻度,右边是红线,左边是黑线,在零刻度的前后用分贝刻度,见图 21-6。这种表也能刻度成瓦特。

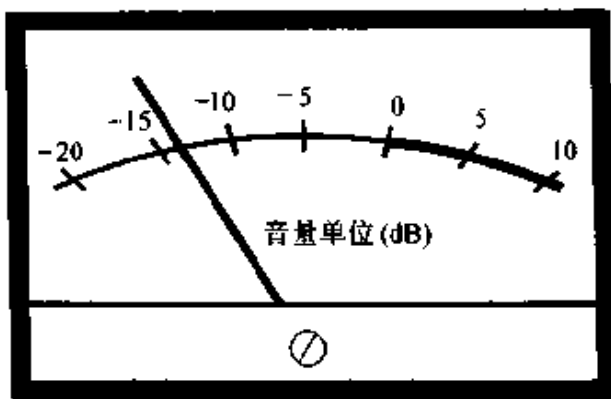


图 21-6 刻度成分贝的声音音量单位表

### 21.2.4 信号强度计

在无线接收机中,信号强度计指示进入信号的幅度。图 21-7 表示两种普通型的信号强度计。驱动它们的信号通常从中放链中得到。得到这种信号的最常用的方法是测量自动增益控制电压。接收到的信号强度的标准单位是信号强度单位。假定阻抗不变,一个信号强度单位代表接收机天线两端的信号强度变化为 6dB (电压比为 2:1)。50 $\mu$ V 的信号电平代表 9 个信号强度单位。在典型的信号强度计中信号强度单位的刻度范围是从 1~9 或 0~9。大多数信号强度计在高于 S-9 处也以分贝为单位标出刻度。

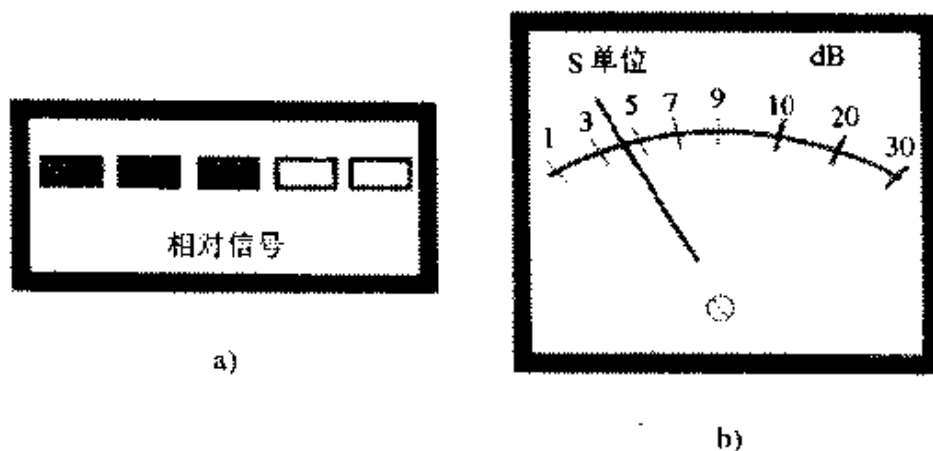


图 21-7 信号强度计

a) 条形信号强度计 b) 模拟信号强度计

### 21.2.5 掌声计

声音电平可以用一种叫做**掌声计**的仪器来测量。由于它被用来测量体育馆和戏院中的鼓掌和声音干扰(例如笑声),因此而得名。图 21-8 是一种简单掌声计的原理电路图,表盘可以不经校正,这时它给出相对的而不是绝对的指示;或者以分贝为单位进行刻度,并把它接到一个带有已知灵敏度的话筒的精密放大器的输出端。

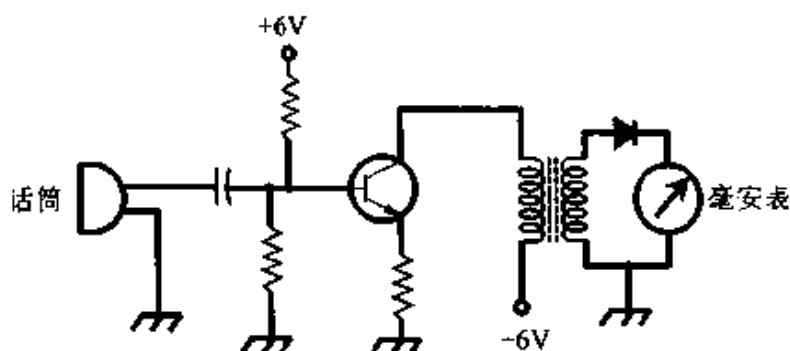


图 21-8 使用双极型晶体管放大器的掌声计

### 21.2.6 照度计

基本的**照度计**,也叫**光度计**,它可由接了一只光生伏打电池的微安表构成,见图 21-9。高级的照度计采用直流放大器以增强灵敏度,并有几个读数量程。在同样波长下,太阳电池对光的灵敏度和人眼不同。这种影响可以在太阳电池前放一个滤色器来补偿,使太阳电池对各波长的灵敏度和人眼一样。照度计可以刻度成以**流明**或**坎德拉**为单位。有时照度计可用于测量红外或紫外光强度。

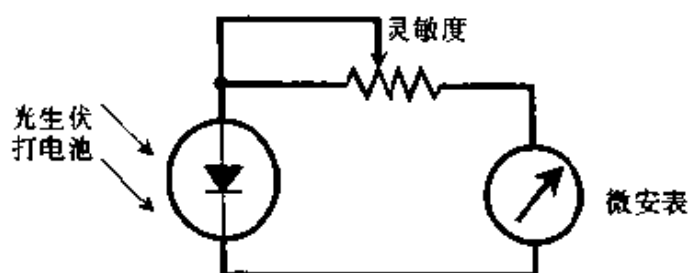


图 21-9 简单的照度计

### 21.2.7 笔记录仪

装有划线笔的表针的移动可以得到某些量的大小随时间变化的图形,这就是**笔记录仪**。一卷有刻度的纸装在一个旋转的滚筒上。滚筒由时钟电动机驱动,以很低的速率转动,如每小时转一圈或每 24 小时

转一圈。采用特种传感器和软件，可以使计算机经编程后用作电子笔记录仪。

### 21.2.8 示波器

示波器是一个图形仪表，用于测量和记录很快变化的量，其变化频率的范围可从几个赫兹到几百兆赫。图形是由电子束打到荧光屏上来产生的。示波器显示瞬态信号电压和时间的关系，它采用一个和电视显像管相似的阴极射线管。示波器不仅显示信号电平的峰值或峰峰值，而且在扫描频率足够高时能显示信号的波形，见图 21-10。在某些情况下，可用示波器来近似地指示信号的频率。

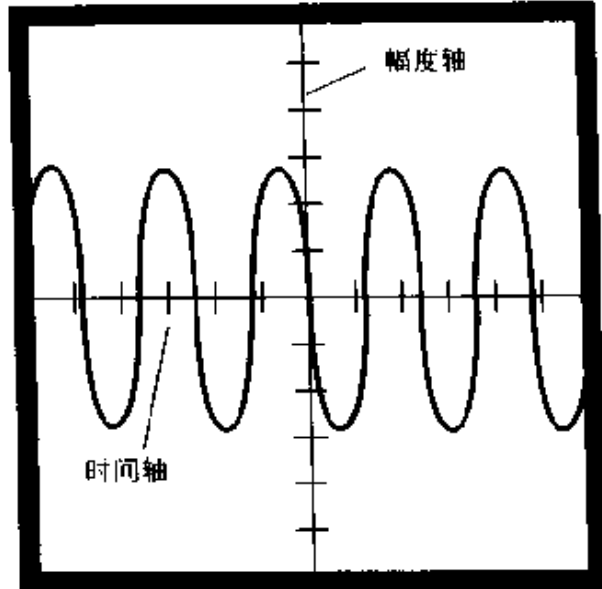


图 21-10 示波器显示的瞬态信号幅度和时间的函数关系

### 21.2.9 频率计数器

频率计数器是测量和显示信号频率的数字仪器，它在一个规定的时间间隔内逐个地计数其中发生的信号周期或脉冲个数。选通脉冲决定了每个计数周期的开始和结束时间。在其他因素保持不变的情况下，选通脉冲的时间越长，测量越精确。用晶体振荡器作为时钟，接收美国国家标准局 WWV 或 WWVH 广播的时间标准来同步它的频率。频率计数器通常能精确地测量的频率范围可高达千兆赫，显示 8 位或 10 位有效数字。

### 21.2.10 频谱分析仪

频谱分析仪用图形显示信号振幅和频率的关系。图 21-11 表示一个典型的频谱分析仪显示的图形。在这个例子中，每个垂直刻度代表 10dB，每个水平刻度代表 10kHz。用户可以改变这些参数。如果需要的话，幅度显示可以设置成线性刻度（如每刻度代表 0.1V），而不是更常用的对数刻度（dB）。

把一个频谱分析仪接到中频放大链上，无线电接收机就能用于频



谱分析, 结果就成为*扫调侦察接收机*。接收机调谐的频率出现在水平刻度的中心。每个水平刻度的频率增量可对各别信号的频谱分析分别设置(例如每刻度 500Hz), 或者它可为观察频率的特定范围而设置(例如每刻度 10kHz)。

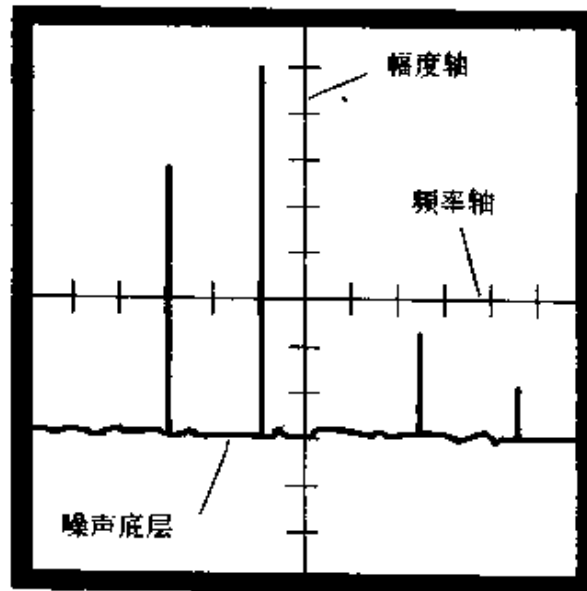


图 21-11 频谱分析仪显示的信号幅度和频率的函数关系

### 21.3 监控系统

大多数监控系统由无线电或红外发射机和接收机组成。有些还有通过到达接收机的信号而运行的机械硬件。

#### 21.3.1 婴儿监控器

一个短程调幅或调频的无线电发射机和接收机可用来收听隔开一段距离的婴儿房间里的声音。发射机包括一个灵敏的话筒、一个鞭状天线和一个电源。接收机是电池供电的便携式接收机, 它有一个类似于无绳电话机上的电感加载短天线。接收机能收到距离高达 200ft 处发射机发出的信号。射频信号很容易通过墙、屋顶和地板。

这种婴儿监控器容易受到附近运行在同一频道的其他装置的干扰。有时邻近的大功率无线电发射机会产生射频干扰。它有多频道可供选择, 如果发生干扰, 可选其他频道, 不用担心通信的保密性和安全性。

### 21.3.2 烟雾探测器

烟雾改变空气的性质，常常伴随着各种气体相对量的变化。火烧掉了氧气并产生其他气体，如二氧化碳，一氧化碳，和/或二氧化硫。烟雾本身是由固体微粒组成。*烟雾探测器*能检测出空气的介电常数和电离电位的改变。两块电极板相隔一个固定的距离，如图 21-12，这两块板组成一个空气介质电容器。直流电源接到这两块板上，在正常情况下，板上的电荷保持不变且电路中的电流为零。如果空气的性质发生变化，电容也就改变，引起短时间内一个小电流流过电路。这个电流可以被检测到，得到的信号可以驱动一个报警器。这个信号也可以驱动一个简单的机器人系统，例如一个用来灭火的喷洒水的装置。

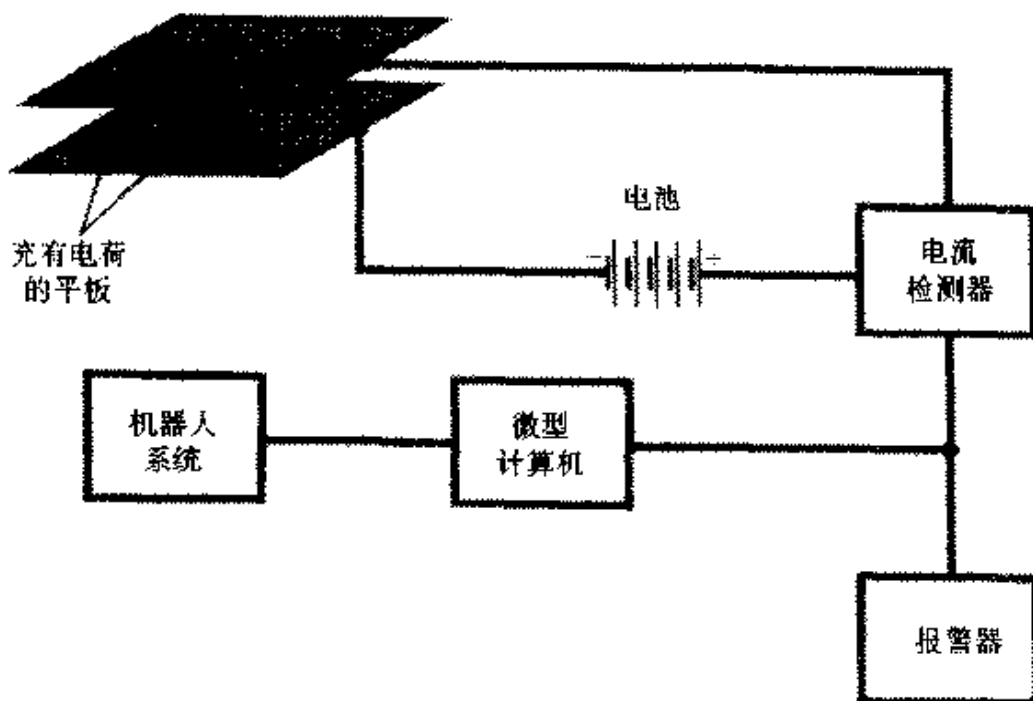


图 21-12 烟雾探测器识别一对电极之间空气特性的变化

### 21.3.3 质量控制

激光是一种应用无线技术，对在装配线上移动的瓶子的高度进行检查的*质量控制*中可以见到它的应用。一个*激光器/机器人*组合体能找到并移走高度不合格的瓶子。这种激光装置是一对电眼，其原理表示在图 21-13 中。如果瓶子太矮，两个激光束都到达光电检测器。如果瓶子太高，没有一个激光束能到达光电检测器。在这两种情况下机器人手臂/抓手装置把废瓶子从传输线上拿走并把它扔掉。只有当瓶子的

高度在一个窄的高度范围（允许范围）内时，上面的激光束到达它的光电检测器而下面的激光束被挡住。这时瓶子才允许通过。

#### 21.3.4 跟踪人

假定一个人被判为拘押在家，让其身上带一个普通的呼机就可监控他是否遵照执行。管理员可随时呼叫此人，他必须在某个规定的时间内打电话给管理员。追踪这个电话，从电话机的位置就可以得到证实。

一个更加可靠的确定一个人某时在某

地的方法，是用短程无线电发射机和接收机。让此人戴上一个发射装置，接收装置放在家里、汽车中和工作地点。发射机的工作范围是100~200ft。接收机的信号送到中央监控点。信号是编码的，所以监控人员（或计算机）知道此人是否在家里、在车中或在工作。任何偏离正常规范都能被检测到。

另一种跟踪人的方法是用无线电定位。被跟踪的人穿上或随身携带一个应答器，询问定位的信号连续不断地送到这个装置，这个装置可通过像蜂窝电话系统那样的无线网络作出响应。

#### 21.3.5 电子窃听器

电子窃听器是一种可以藏在房间里、放在衬衣口袋里或埋装在汽车里的很小的无线电发射机。天线是一段导线，接收机可以放在附近地方。为了节省电池能量，它必须工作在很低的射频功率电平（几个毫瓦）。如果这个发射机靠近一个接到更大系统的无线中继站，在这个无线系统所覆盖范围内的任何地方都能实现窃听。随着低地轨道卫星系统的出现，窃听一个在地球另一边的房间，在理论上是完全可能的。

电子窃听器能比较容易地被探测出来，当然可靠的探测设备是很

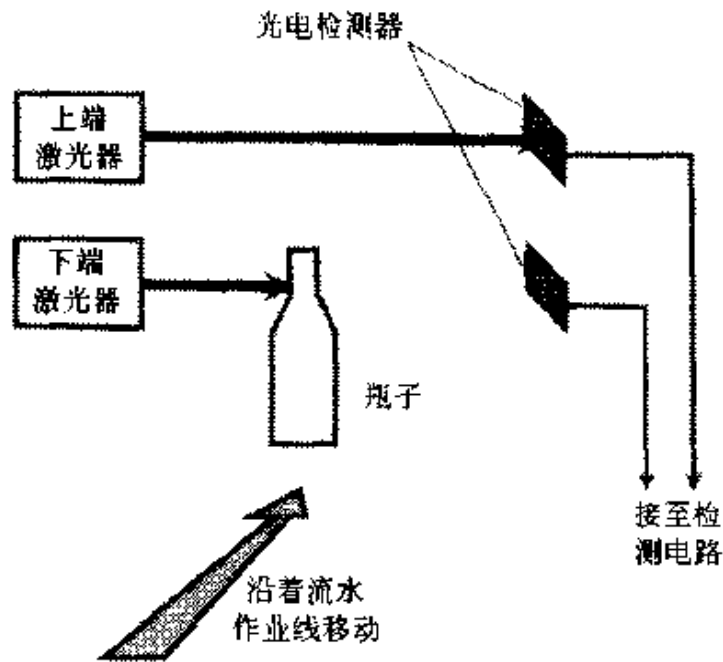


图 21-13 用于质量控制的一对激光器

昂贵的。可疑的射频场的出现就泄露了发射机的存在。

### 21.3.6 手中眼系统

为帮助机器人的夹钳（手）寻找其路径，可在其机械结构中装一个照相机。装备的照相机必须能在近距离范围内工作，大约从 3ft 到零点几英寸，定位误差必须尽可能小。为了保证照相机能够得到清楚的图像，在夹钳中和照相机一起还装有电灯，如图 21-14。这种**手中眼系统**能用来精确地测量夹钳和它要寻找的目标之间有多近，它也能正确辨认目标。

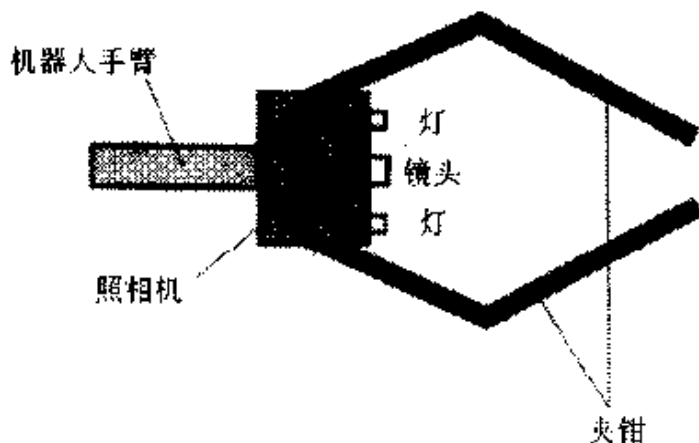


图 21-14 机器人的手中眼系统

手中眼系统使用一种**伺服机构**。机器人装有或能访问一个控制器（计算机），它处理从照相机来的数据并把指令送回夹钳。虽然大多数手中眼系统用可见光作为引导和操纵，但是也可以用红外光。这对机器人的手必须感觉温度差异时是很有用的。

### 21.3.7 飞眼球

在对人有害的环境中，机器人有很多用处，特别是在制造和勘探等行业。一种叫做**飞眼球**的装置对水下作业特别有用。从船上放下一条缆绳，缆绳上挂一个装有机器人的特种发射舱。当发射舱到达预定的深度时，它放出机器人，机器人和发射舱之间用一根系绳连接。系绳和放下来的缆绳把数据送回到船上。在有些情况下，可以不用系绳，用无线连接把数据从机器人送到发射舱。这种连接通常使用光谱中的红外或可见红光部分。机器人有一个摄像机和一个或几个用以照明水下环境的电灯。它还有一套助推器或螺旋桨，使它能够按照船上发来的控制命令在周围移动。船上操作人员看着图像并引导机器人。

### 21.3.8 遥控替身

**遥控替身**是一种先进的远距离监测和远距离控制的技术。即使**遥控机器人**和操作人员相距几英里之远，机器人操作员还是能获得在现场

的感觉。控制和反馈是通过导线、光纤、无线电波传送的遥控信号来实现的，在有些情况下也通过红外或可见光视线连接装置来传送遥控信号。

在理想的遥控替身系统中，遥控机器人是一个像真人那样的自主机器人。机器人越像真人，遥控替身就越可靠。控制站中有操作员穿的一套衣服或坐的一张椅子并有各种不同的操纵装置和显示器。传感器给出压力、视觉和声音的感觉。操作员戴上有视觉屏幕的头盔，它能显示机器人照相机看到的所有东西。当操作员转动他的头时，装有视觉系统的机器人的头也跟着转动。双目机器视觉系统给出深度感觉，双声道机器听觉系统给出真实的声音感觉。

图 2-15 表示遥控替身系统的框图。在电路的遥控机器人端，变送器把声音、图像和机械阻力变成送到操作员那里去的电脉冲，并把从

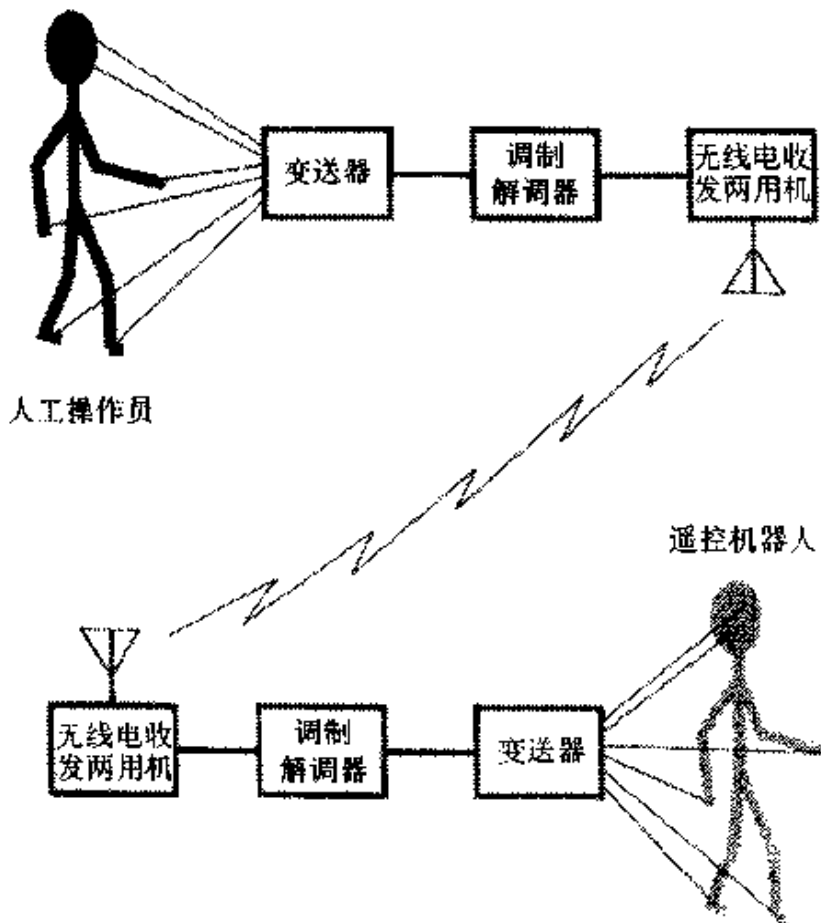


图 21-15 遥控替身可实现远距离监测和控制

操作员那里来的电脉冲变换成机械移动。在操作员端，变送器把机械移动变成送到遥控机器人那里去的电脉冲，并把从遥控机器人那里来的电脉冲变成声音、图像和机械阻力。

## 21.4 财产保护装置

可见光、红外和超声设备被广泛地用于家庭和企业的保安系统中。大多数设备探测移动，有些设备探测人体热量。

### 21.4.1 电眼

探测一个不速之客的最简单的设备是**电眼**。很窄的红外或可见光束照过所有可能的进入点，如通道和窗口。光电检测器从光束中得到能量。如果由于任何原因光电检测器接收不到光束，就触发报警器。尤其是在大的通道以适当的间隔配置好几个电眼时，窃贼不可避免地至少要切断其中一个光束。

### 21.4.2 红外移动探测器

通常的入侵报警器采用**红外移动探测器**。探测器以有规律的间隔发出二至三个广角红外脉冲，这些脉冲覆盖这个房间的绝大部分。接收转换器检拾从墙上、地板上、屋顶上和家具上正常地反射回来的红外能量。微处理机记录了接收到的各个脉冲的强度。如果屋中任何东西改变了位置，接收到的能量强度就有了改变，微处理机就会注意到这种改变，并触发报警器，见图 21-16。这些设备在常规运行时只消耗很小的功率，因此可以用电池作为电源。

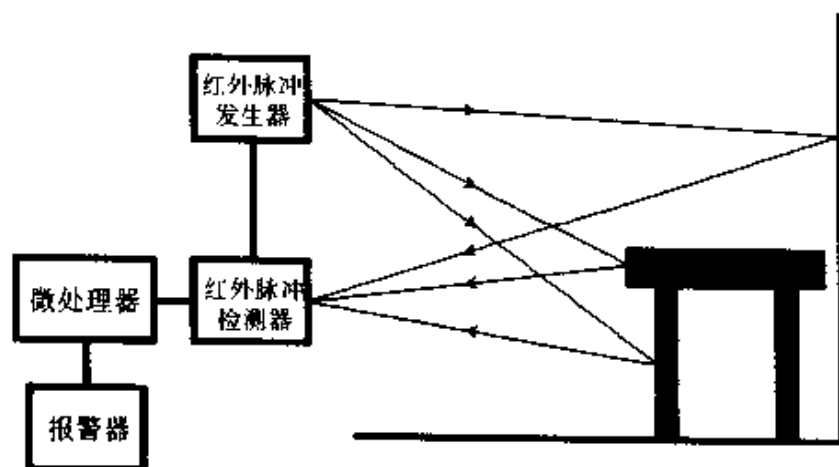


图 21-16 红外入侵报警系统

### 21.4.3 辐射热检测器

通过直接辨别从物体上发出的红外能量（通常叫做辐射热，红外设备能检测出室内环境的变化。人和所有热血动物都辐射红外线。当然火也辐射红外线。一个简单的红外传感器和一个微处理器能检测出一个房间中辐射热总量的快速或大量的增加。时间阈可以这样设置，例如由于日照引起的小的或缓慢的变化不去触发报警器，但是像有人进入房间那样重大的变化就触发报警器。温度改变（增量）阈值设置成小动物不触发报警器，但成人要触发。这类设备可以像红外移动探测器那样用电池供电。

*辐射热检测器*的主要限制是它们会被愚弄。虚假报警便是一种风险，太阳光可能会突然直接地照在传感器上并触发报警器。一个人穿着棉大衣、靴子、兜帽和面罩刚从零下室外环境中进来也可能不会引发报警器。由于这个原因，辐射热传感器较少用于入侵检测器，而更常用于火警致动器。

### 21.4.4 超声移动检测器

用辨别声波相对相位变化的方法可以检测室内的移动。*超声移动检测器*采用一组换能器，它们发射出频率高于人耳能听到的声波（高于20kHz）。另一组换能器检拾反射的声波，其波长为零点几英寸。如果室内任何东西的位置发生变化，各超声检测器检拾到的波的相对相位就将改变。这个数据送到微处理器，它能触发报警器和/或向警察局报警。

## 第 22 章 物理数据

这一章的内容有在电子学及其相关学科中遇到的基本单位的定义，还包括转换表和常用常数。

### 22.1 国际单位制

*国际单位制*，以前叫做*米/千克/秒制*定义了 7 个在自然界中出现的量。

1. 长度 1m 等于电子在氦-86 原子的两个电子层之间跃迁时在真空中的辐射波长的  $1.65076373 \times 10^6$  倍。最初它被定义成沿地球表面从地理上的北极到赤道的路程的  $10^{-7}$ 。在公式中长度用小写字母  $d$  或  $s$  表示。

2. 质量 1kg 是  $1000\text{cm}^3$  的纯水在其最大密度的温度（大约 281K）时的质量。在公式中质量用小写字母  $m$  表示。

3. 时间 1s 是一个太阳日的  $1/86400$ 。它也被定义成可见光在真空中传播  $2.99792 \times 10^8\text{m}$  所需要的时间。时间在公式中用小写字母  $t$  表示。

4. 温度 1K 是在标准大气温度和压力下纯水冰点和绝对零度（没有任何热）之差的  $3.66086 \times 10^{-3}$  份。温度在公式中用大写字母  $T$  表示。

5. 电流 1A 代表  $6.24 \times 10^{18}$  个电荷载流子（通常是电子）在 1s 时间间隔内通过导体的特定截面的运动。电流在公式中用大写字母  $I$  表示。

6. 发光强度 1cd 代表在纯铂凝固点温度下从  $1.667 \times 10^{-6}\text{m}^2$  黑体表面上发出的辐射。发光强度在公式中用大写字母  $B, F, I$  或  $L$  表示。

7. 物质的量 1mol 是精确的 0.012kg 碳-12 中原子的数目，它大约是  $6.022169 \times 10^{23}$ ，也叫阿伏伽德罗常数。物质的量在公式中用大写



字母  $N$  表示。

## 22.2 电单位

这里定义了从国际单位制导出的标准电单位。如果要把代表这些特性的参数转换成其他单位或从其他单位转换过来，请参阅这一章后面的表。

1. 单元电荷 *单元电荷* 是一个电子所带的电荷。一个空穴（一个原子中少一个电子），一个质子，一个正电子和一个反质子中也包含这样大小的电荷。用单元电荷来表示的电量在公式中用小写字母  $e$  表示。

2. 电荷量 电量的标准单位是库仑 (C)，它代表  $6.24 \times 10^{18}$  个电子中所包含的总电荷。电量在公式中用大写的  $Q$  或小写的  $q$  表示。

3. 能量 能量的标准单位是焦耳 (J)，在数学上，它表示成单位质量乘以单位距离的平方再除以单位时间的平方。

$$1\text{J} = 1\text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

能量在公式中用大写字母  $E$  表示。有时也用大写的  $H$ 、 $T$  或  $V$  表示。

4. 电动势 *电动势* 也叫电位或电位差，它的标准单位是伏特 (V)。它等于  $1\text{J}/\text{C}$ 。电动势在公式中用大写的  $E$  或  $V$  表示。

5. 电阻 电阻的标准单位是欧姆 ( $\Omega$ )。它是在电路上加  $1\text{V}$  的电动势得到  $1\text{A}$  的电流时电路的阻力。电阻在公式中用大写字母  $R$  表示。

6. 电阻率 电阻率的标准单位是欧姆米 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )。如果在  $1\text{m}$  长的材料上加上  $1\text{V}$  的电位差，其中流过  $1\text{A}$  的电流，那么这种材料的电阻率是  $1\Omega \cdot \text{m}$ 。电阻率在公式中用小写希腊字母  $\rho$  表示。

7. 电导 电导的标准单位是西门子 (S)，以前叫做姆欧。用数学表示时电导是电阻的倒数，电导在公式中用大写字母  $G$  表示。如果  $R$  是以欧姆为单位的元件的电阻，那么  $G$  就是以西门子为单位的元件的电导。

$$G = \frac{1}{R}$$

和

$$R = \frac{1}{G}$$

8. 电导率 电导率的标准单位是西门子每米 (S/m)。如果在  $1\text{m}$

长的材料两端加上 1V 的电位差而其中流过 1A 的电流时,这个材料就具有 1S/m 的电导率。电导率在公式中用小写希腊字母  $\sigma$  表示。

9. 功率 功率的标准单位是瓦特 (W), 等于 1J/s。功率在公式中用大写字母  $P$  或  $W$  表示。在没有电抗的电力和电子电路中, 如果  $P$  是以瓦特为单位的功率,  $E$  是以伏特为单位的电压,  $I$  是以安培为单位的电流,  $R$  是以欧姆为单位的电阻, 它们之间有下列关系:

$$P = EI = I^2 R = \frac{E^2}{R}$$

10. 周期 交流周期的标准单位是秒 (s)。实用时这是个大单位; 典型信号的周期量级是 1s 的  $10^{-3}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-9}$ ,  $10^{-12}$ 。周期在公式中用大写字母  $T$  表示。

11. 频率 频率的标准单位是赫兹 (Hz), 以前叫做每秒周波数。实用时这是个小单位, 典型信号的频率量级是赫兹的  $10^3$  倍,  $10^6$  倍,  $10^9$  倍,  $10^{12}$  倍。在数学上频率是周期的倒数, 在公式中用小写字母  $f$  表示。如果  $T$  是以秒为单位的波的周期, 那么以赫兹为单位的频率  $f$  可用下式表示:

$$f = \frac{1}{T}$$

12. 电容 电容的单位是法拉 (F), 它等于 1C/V。实用中这是个大单位, 在电子线路中大多数电容值的量级是 1F 的  $10^{-6}$ ,  $10^{-9}$ ,  $10^{-12}$ 。电容在公式中用大写字母  $C$  表示。

13. 电感 电感的标准单位是亨利 (H), 它等于 1V · s/A。实用时这是个大单位, 在电子线路中大多数电感值的量级是 1H 的  $10^{-3}$  或  $10^{-6}$ 。电感在公式中用大写字母  $L$  表示。

14. 电抗 电抗的标准单位是欧姆 ( $\Omega$ ), 电抗在公式中用大写字母  $X$  表示。它可以是正的 (电感性的), 并用符号  $X_L$  表示; 或者是负的 (电容性的), 用符号  $X_C$  表示。电抗和频率有关, 若令  $f$  代表以赫兹为单位的频率,  $L$  代表以亨利为单位的电感,  $C$  代表以法拉为单位的电容, 则有下列公式:

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

15. 复数阻抗 复数阻抗有两个分量：电阻 ( $R$ ) 和电抗 ( $X$ )。电抗分量要乘以称作  $j$  运算子的单元虚数。在数学上  $j$  等于  $-1$  开平方的正根，因此有下列公式：

$$j = (-1)^{1/2}$$

$$j^2 = j \cdot j = -1$$

$$j^3 = j^2 \cdot j = -1 \cdot j = -j$$

$$j^4 = j^3 \cdot j = -j \cdot j = 1$$

当  $j$  的幂超过 4 时，将周期性地重复，因此通常对于整数  $n > 4$  时：

$$j^n = j^{(n-4)}$$

令  $Z$  代表复数阻抗， $R$  代表电阻， $X$  代表电抗（不论感性或容性），则有：

$$Z = R + jX$$

16. 绝对值阻抗 复数阻抗可以在直角坐标平面中表示成一个矢量，电阻画在横坐标（水平坐标）上，电抗画在纵坐标（垂直坐标）上。这个矢量的长度叫做绝对值阻抗，用大写的  $Z$  为标记，以欧姆为单位。这种阻抗通常只在  $jX = 0$  时讨论，即此阻抗是个纯电阻 ( $Z = R$ )。广义地说，假定  $Z$  是绝对值阻抗，则

$$Z = (R^2 + X^2)^{1/2}$$

从理论上说存在着无限多个  $R$  和  $X$  的组合，能形成给定的绝对值阻抗  $Z$ 。

17. 电场强度 电场强度的标准单位是伏特每米 ( $V/m$ )。1  $V/m$  的电场表示相距 1m 的两点间存在 1V 电位差时的电场。电场强度在公式中用大写字母  $E$  表示。

18. 电磁场强度 电磁场强度的标准单位是瓦特每平方米 ( $W/m^2$ )。1W 功率垂直地照射到  $1m^2$  的平面上，这时的电磁场强度是  $1W/m^2$ 。

19. 电极化率 电极化率的标准单位是库仑每伏米，简写为  $C/(V \cdot m)$ 。这个量在公式中用小写希腊字母  $\eta$  表示。

20. 介电常数 介电常数的标准单位是法拉每米 ( $F/m$ )。介电常数在公式中用小写希腊字母  $\epsilon$  表示。

21. 荷电载流子迁移率 荷电载流子迁移率也叫载流子迁移率或

简称为迁移率，它的标准单位是平方米每伏秒，简写为  $\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。迁移率在公式中用小写希腊字母  $\mu$  表示。

### 22.3 磁单位

下面定义从国际单位制中导出的磁单位。如果要把代表这些特性的参数转换成其他单位或从其他单位转换过来，请参阅这一章后面的表。

1. 磁通量 磁通量的标准单位是韦伯 (Wb)，定义为  $1\text{V} \cdot \text{s}$ 。实用时这是个大单位，它等效于  $1\text{A} \cdot \text{H}$ ，代表  $1\text{A}$  的恒定直流电流流过一个具有  $1\text{H}$  电感的线圈所产生的磁通量。磁通量在公式中用大写希腊字母  $\Phi$  表示。

2. 磁通密度 磁通密度的标准单位是特斯拉 (T)，等于  $1\text{Wb}/\text{m}^2$ 。有时磁通密度被说成是单位面积磁通线的数目，这是一种不精确的术语。

3. 磁场强度 磁场强度的标准单位是安培每米 ( $\text{A}/\text{m}$ )，有时也用非法定计量单位奥斯特 (Oe)， $1\text{Oe} = 79.6\text{A}/\text{m}$ 。磁场强度在公式中用大写字母  $H$  表示。

4. 磁极强度 磁极强度的标准单位是安培米 ( $\text{A} \cdot \text{m}$ )，磁极强度在公式中用小写字母  $p$  或大写字母  $P$  表示。

5. 磁动势 磁动势的标准单位是安匝 (A)。它由  $1\text{A}$  的恒定直流电流流过一个的空心线圈所产生。磁动势和线圈的半径无关。

### 22.4 其他单位

下列单位有时会在电子学中用到。把它们转换成其他单位或从其他单位转换过来，请参阅这一章后面的表。

1. 面积 面积的标准单位是平方米 ( $\text{m}^2$ )。面积在公式中用大写字母  $A$  表示。

2. 体积 体积的标准单位是立方米 ( $\text{m}^3$ )。体积在公式中用大写字母  $V$  表示。

3. 平面角 平面角的标准单位是弧度 (rad)。它是圆周上长度等于半径的圆弧所对的角。平面角在公式中通常用小写希腊字母  $\varphi$  或  $\theta$

表示。

4. 立体角 立体角的标准单位是球面度(sr)。1sr的立体角可用一个顶点在球心的圆锥角来表示,此圆锥和球面相交得到一个圆周,圆周所包围的球面的面积等于球半径的平方。

5. 速度 速度的标准单位是米每秒(m/s)。速度有两个特性:速度大小和方向。方向用地表的地理北方按顺时针方向以弧度数表示,而在 $xy$ 平面坐标系中是从正 $x$ 轴按逆时针方向以弧度数表示。在三维系统中,方向可以在直角坐标、球坐标或柱坐标中指定。速度在公式中用小写字母 $v$ 表示。

6. 角速度 角速度的标准单位是弧度每秒(rad/s)。角速度在公式中用小写希腊字母 $\omega$ 表示。

7. 加速度 加速度的标准单位是米每二次方秒( $m/s^2$ )。加速度在公式中用小写字母 $a$ 表示。

8. 角加速度 角加速度的标准单位是弧度每二次方秒( $rad/s^2$ )。角加速度在公式中用小写希腊字母 $\alpha$ 表示。

9. 力 力的标准单位是牛顿(N)。它是使1kg质量得到 $1m/s^2$ 加速度所需要的力。力在公式中用大写字母 $F$ 表示。

## 22.5 前缀乘子

任何单位能表示成数倍基本单位的更大单位或几分之一基本单位的更小单位。这些乘数和除数有给定的标准数值和前缀名。十进制(以10为基数)前缀乘子代表以10为基数的数量级数(十进制数字系统),它们用于模拟电子学和其他学科。二进制(以2为基数)前缀乘子代表以2为基数的数量级数(二进制数字系统),它们用于数字电子学和计算机等学科。表22-1列出这两种体系的前缀名称和前缀乘子。

表 22-1 前缀乘子和它们的缩写

词头名称	符 号	十 进 制	二 进 制
约 [克托]	y	$10^{-24}$	$2^{-80}$
泽 [普托]	z	$10^{-21}$	$2^{-70}$
阿 [托]	a	$10^{-18}$	$2^{-60}$
飞 [母托]	f	$10^{-15}$	$2^{-50}$

(续)

词头名称	符 号	十 进 制	二 进 制
皮 [可]	p	$10^{-12}$	$2^{-40}$
纳 [诺]	n	$10^{-9}$	$2^{-30}$
微	$\mu$ 或 mm	$10^{-6}$	$2^{-20}$
毫	m	$10^{-3}$	$2^{-10}$
厘	c	$10^{-2}$	
分	d	$10^{-1}$	
(没有)		$10^0$	$2^0$
十	da 或 D	$10^1$	
百	h	$10^2$	
千	K 或 k	$10^3$	$2^{10}$
兆	M	$10^6$	$2^{20}$
吉 [咖]	G	$10^9$	$2^{30}$
太 [拉]	T	$10^{12}$	$2^{40}$
拍 [它]	P	$10^{15}$	$2^{50}$
艾 [可萨]	E	$10^{18}$	$2^{60}$
泽它	Z	$10^{21}$	$2^{70}$
约它	Y	$10^{24}$	$2^{80}$

## 22.6 其他单位制

国际单位制系统是最为广泛采用的系统,然而有时也会遇到别的系统。其中最常见的是厘米/克/秒制系统和英尺/磅/秒(英制)系统。

## 22.7 国际单位制的转换

表 22-2 是从国际单位制转换成各种其他单位或从其他单位转换回来的数据表。第一列列出要转换的单位;第二列列出要转换成的单位。第三列列出从第一列单位转换成第二列单位时第一列单位前的数值要乘的倍率。第四列列出从第二列单位转换成第一列单位时第二列单位前的数值要乘的倍率。

表 22-2 国际单位制的转换 (当不给出系数时,系数精确地为 1)

要转换的单位	转换成的单位	倍 率	逆转换时的倍率
米	埃	$10^{10}$	$10^{-10}$
米	纳米	$10^9$	$10^{-9}$
米	微米	$10^6$	$10^{-6}$

(续)

要转换的单位	转换成的单位	倍 率	逆转换时的倍率
米	毫米	$10^3$	$10^{-3}$
米	厘米	$10^2$	$10^{-2}$
米	英寸	39.37	0.02540
米	英尺	3.281	0.3048
米	码	1.094	0.9144
米	千米	$10^{-3}$	$10^3$
米	法定英里	$6.214 \times 10^{-4}$	$1.609 \times 10^3$
米	海里	$5.397 \times 10^{-4}$	$1.853 \times 10^3$
米	光秒	$3.336 \times 10^{-9}$	$2.998 \times 10^8$
米	天文单位	$6.685 \times 10^{-12}$	$1.496 \times 10^{11}$
米	光年	$1.057 \times 10^{-16}$	$9.461 \times 10^{15}$
米	秒差距	$3.241 \times 10^{-17}$	$3.085 \times 10^{16}$
千克	原子质量单位	$6.022 \times 10^{26}$	$1.661 \times 10^{-27}$
千克	纳克	$10^{12}$	$10^{-12}$
千克	微克	$10^9$	$10^{-9}$
千克	毫克	$10^6$	$10^{-6}$
千克	克	$10^3$	$10^{-3}$
千克	盎司	35.28	0.02834
千克	磅	2.205	0.4535
千克	英吨	$1.103 \times 10^{-3}$	907.0
秒	分	0.01667	60.00
秒	小时	$2.778 \times 10^{-4}$	$3.600 \times 10^3$
秒	日	$1.157 \times 10^{-5}$	$8.640 \times 10^4$
秒	年	$3.169 \times 10^{-8}$	$3.156 \times 10^7$
秒	世纪	$3.169 \times 10^{-10}$	$3.156 \times 10^9$
秒	千年	$3.169 \times 10^{-11}$	$3.156 \times 10^{10}$
开 [尔文]	摄氏温度	减去 273	加上 273
开 [尔文]	华氏度	乘以 1.80 再减 459	乘以 0.556 再加 255
开 [尔文]	兰氏度	1.80	0.556
安培	载流子数每秒	$6.24 \times 10^{18}$	$1.60 \times 10^{-16}$
安培	静电安培	$2.998 \times 10^9$	$3.336 \times 10^{-10}$
安培	纳安	$10^9$	$10^{-9}$
安培	微安	$10^6$	$10^{-6}$
安培	绝对安培	0.10000	10.000
安培	毫安	$10^3$	$10^{-3}$
坎 [德拉]	微瓦每球面度	$1.464 \times 10^3$	$6.831 \times 10^{-4}$
坎 [德拉]	毫瓦每球面度	1.464	0.6831
坎 [德拉]	流明每球面度	恒等, 不变换	恒等, 不变换
坎 [德拉]	瓦每球面度	$1.464 \times 10^{-3}$	683.1

## 22.8 电单位的转换

表 22-3 是从国际单位制导出的标准电单位转换成各种其他单位或从其他单位转换回来的数据表。第一列列出要转换的单位；第二列列出要转换成的单位。第三列列出从第一列单位转换成第二列单位时第一列单位前的数值要乘的倍率。第四列列出从第二列单位转换成第一列单位时第二列单位前的数值要乘的倍率。

表 22-3 电单位的转换 (当不给出系数时, 系数精确地为 1)

要转换的单位	转换成的单位	倍 率	逆转换时的倍率
单位电荷	库 [仑]	$1.60 \times 10^{-19}$	$6.24 \times 10^{18}$
单位电荷	绝对库 [仑]	$1.60 \times 10^{-20}$	$6.24 \times 10^{19}$
单位电荷	静电库 [仑]	$4.80 \times 10^{-10}$	$2.08 \times 10^9$
库 [仑]	单位电荷	$6.24 \times 10^{18}$	$1.60 \times 10^{-19}$
库 [仑]	静电库 [仑]	$2.998 \times 10^9$	$3.336 \times 10^{-10}$
库 [仑]	绝对库 [仑]	0.1000	10.000
焦 [耳]	电子伏	$6.242 \times 10^{18}$	$1.602 \times 10^{-19}$
焦 [耳]	尔格	$10^7$	$10^{-7}$
焦 [耳]	卡	0.2389	4.1859
焦 [耳]	英热单位	$9.478 \times 10^{-4}$	$1.055 \times 10^3$
焦 [耳]	瓦小时	$2.778 \times 10^{-4}$	$3.600 \times 10^3$
焦 [耳]	千瓦小时	$2.778 \times 10^{-7}$	$3.600 \times 10^6$
伏 [特]	绝对伏	$10^8$	$10^{-8}$
伏 [特]	微伏	$10^6$	$10^{-6}$
伏 [特]	毫伏	$10^3$	$10^{-3}$
伏 [特]	静电伏	$3.336 \times 10^{-3}$	299.8
伏 [特]	千伏	$10^{-3}$	$10^3$
伏 [特]	兆伏	$10^{-6}$	$10^6$
欧 [姆]	绝对欧	$10^9$	$10^{-9}$
欧 [姆]	兆欧	$10^{-6}$	$10^6$
欧 [姆]	千欧	$10^{-3}$	$10^3$
欧 [姆]	静电欧	$1.113 \times 10^{-12}$	$8.988 \times 10^{11}$
西 [门子]	静电西 [门子]	$8.988 \times 10^{11}$	$1.113 \times 10^{-12}$
西 [门子]	微西 [门子]	$10^6$	$10^{-6}$
西 [门子]	毫西 [门子]	$10^3$	$10^{-3}$
西 [门子]	绝对西 [门子]	$10^{-9}$	$10^9$
瓦 [特]	皮瓦	$10^{12}$	$10^{-12}$
瓦 [特]	纳瓦	$10^9$	$10^{-9}$



(续)

要转换的单位	转换成的单位	倍 率	逆转换时的倍率
瓦 [特]	微瓦	$10^6$	$10^{-6}$
瓦 [特]	毫瓦	$10^3$	$10^{-3}$
瓦 [特]	英热单位每小时	3.412	0.2931
瓦 [特]	马力	$1.341 \times 10^{-3}$	745.7
瓦 [特]	千瓦	$10^{-3}$	$10^3$
瓦 [特]	兆瓦	$10^{-6}$	$10^6$
瓦 [特]	吉瓦	$10^{-9}$	$10^9$
赫 [兹]	度每秒	360.0	0.002778
赫 [兹]	弧度每秒	6.283	0.1592
赫 [兹]	千赫	$10^{-3}$	$10^3$
赫 [兹]	兆赫	$10^{-6}$	$10^6$
赫 [兹]	吉赫	$10^{-9}$	$10^9$
赫 [兹]	太赫	$10^{-12}$	$10^{12}$
法 [拉]	皮法	$10^{12}$	$10^{-12}$
法 [拉]	静电法	$8.898 \times 10^{11}$	$1.113 \times 10^{-12}$
法 [拉]	纳法	$10^9$	$10^{-9}$
法 [拉]	微法	$10^6$	$10^{-6}$
法 [拉]	绝对法	$10^{-9}$	$10^9$
亨 [利]	纳亨	$10^9$	$10^{-9}$
亨 [利]	绝对亨	$10^9$	$10^{-9}$
亨 [利]	微亨	$10^6$	$10^{-6}$
亨 [利]	毫亨	$10^3$	$10^{-3}$
亨 [利]	静电亨	$1.113 \times 10^{-12}$	$8.898 \times 10^{11}$
伏每米	皮伏每米	$10^{12}$	$10^{-12}$
伏每米	纳伏每米	$10^9$	$10^{-9}$
伏每米	微伏每米	$10^6$	$10^{-6}$
伏每米	毫伏每米	$10^3$	$10^{-3}$
伏每米	伏每英尺	3.281	0.3048
瓦每平方米	皮瓦每平方米	$10^{12}$	$10^{-12}$
瓦每平方米	纳瓦每平方米	$10^9$	$10^{-9}$
瓦每平方米	微瓦每平方米	$10^6$	$10^{-6}$
瓦每平方米	毫瓦每平方米	$10^3$	$10^{-3}$
瓦每平方米	瓦每平方英尺	0.09294	10.76
瓦每平方米	瓦每平方英寸	$6.452 \times 10^{-4}$	$1.550 \times 10^3$
瓦每平方米	瓦每平方厘米	$10^{-4}$	$10^4$
瓦每平方米	瓦每平方毫米	$10^{-6}$	$10^6$

## 22.9 磁单位的转换

表 22-4 是从国际单位制导出的标准磁单位转换成各种其他单位或从其他单位转换回来的数据表。第一列列出要转换的单位；第二列列出要转换成的单位。第三列列出从第一列单位转换成第二列单位时第一列单位前的数值要乘的倍率。第四列列出从第二列单位转换成第一列单位时第二列单位前的数值要乘的倍率。

表 22-4 磁单位的转换 (当不给出系数时, 系数精确地为 1)

要转换的单位	转换成的单位	倍 率	逆转换时的倍率
韦[伯]	麦克斯韦	$10^8$	$10^{-8}$
韦[伯]	安微亨	$10^6$	$10^{-6}$
韦[伯]	安毫亨	$10^3$	$10^{-3}$
韦[伯]	单位磁极[强度]	$1.257 \times 10^{-7}$	$7.956 \times 10^6$
特[斯拉]	麦克斯韦每平方米	$10^8$	$10^{-8}$
特[斯拉]	高斯	$10^4$	$10^{-4}$
特[斯拉]	麦克斯韦每平方厘米	$10^4$	$10^{-4}$
特[斯拉]	麦克斯韦每平方毫米	$10^2$	$10^{-2}$
特[斯拉]	韦伯每平方厘米	$10^{-4}$	$10^4$
特[斯拉]	韦伯每平方毫米	$10^{-6}$	$10^6$
奥斯特	微安每米	$7.956 \times 10^7$	$1.257 \times 10^{-8}$
奥斯特	毫安每米	$7.956 \times 10^4$	$1.257 \times 10^{-5}$
奥斯特	安[培]每米	79.56	0.01257
安匝	微安匝	$10^6$	$10^{-6}$
安匝	毫安匝	$10^3$	$10^{-3}$
安匝	吉[伯]	1.256	0.7956

## 22.10 其他单位的转换

表 22-5 是从国际单位制导出的标准单位转换成各种其他单位或从其他单位转换回来的数据表。第一列列出要转换的单位；第二列列出要转换成的单位。第三列列出从第一列单位转换成第二列单位时第一列单位前的数值要乘的倍率。第四列列出从第二列单位转换成第一列单位时第二列单位前的数值要乘的倍率。

表 22-5 其他单位的转换(当不给出系数时,系数精确地为 1)

要转换的单位	转换成的单位	倍 率	逆转换时的倍率
平方米	平方埃	$10^{20}$	$10^{-20}$
平方米	平方纳米	$10^{18}$	$10^{-18}$
平方米	平方微米	$10^{12}$	$10^{-12}$
平方米	平方毫米	$10^6$	$10^{-6}$
平方米	平方厘米	$10^4$	$10^{-4}$
平方米	平方英寸	$1.550 \times 10^3$	$6.452 \times 10^{-4}$
平方米	平方英尺	10.76	0.09294
平方米	英亩	$2.471 \times 10^{-4}$	$4.047 \times 10^3$
平方米	公顷	$10^{-4}$	$10^4$
平方米	平方千米	$10^{-6}$	$10^6$
平方米	平方法定英里	$3.863 \times 10^{-7}$	$2.589 \times 10^6$
平方米	平方海里	$2.910 \times 10^{-7}$	$3.434 \times 10^6$
平方米	平方光年	$1.117 \times 10^{-17}$	$8.951 \times 10^{16}$
平方米	平方秒差距	$1.051 \times 10^{-35}$	$9.517 \times 10^{32}$
立方米	立方埃	$10^{30}$	$10^{-30}$
立方米	立方纳米	$10^{27}$	$10^{-27}$
立方米	立方微米	$10^{18}$	$10^{-18}$
立方米	立方毫米	$10^9$	$10^{-9}$
立方米	立方厘米	$10^6$	$10^{-6}$
立方米	毫升	$10^6$	$10^{-6}$
立方米	升	$10^3$	$10^{-3}$
立方米	美加仑	264.2	$3.785 \times 10^{-3}$
立方米	立方英寸	$6.102 \times 10^4$	$1.639 \times 10^{-5}$
立方米	立方英尺	35.32	0.02831
立方米	立方千米	$10^{-9}$	$10^9$
立方米	立方法定英里	$2.399 \times 10^{-10}$	$4.166 \times 10^9$
立方米	立方海里	$1.572 \times 10^{-10}$	$6.362 \times 10^9$
立方米	立方光秒	$3.711 \times 10^{-26}$	$2.695 \times 10^{25}$
立方米	立方天文单位	$2.987 \times 10^{-34}$	$3.348 \times 10^{33}$
立方米	立方光年	$1.181 \times 10^{-48}$	$8.469 \times 10^{47}$
立方米	立方秒差距	$3.406 \times 10^{-52}$	$2.936 \times 10^{49}$
弧度	度	57.30	0.01745
米每秒	英寸每秒	39.37	0.02540
米每秒	千米每小时	3.600	0.2778
米每秒	英尺每秒	3.281	0.3048
米每秒	法定英里每小时	2.237	0.4470
米每秒	节	1.942	0.5149

(续)

要转换的单位	转换成的单位	倍 率	逆转换时的倍率
米每秒	千米每分	0.06000	16.67
米每秒	千米每秒	$10^{-3}$	$10^3$
弧度每秒	度每秒	57.30	0.01745
弧度每秒	转每秒	0.1592	6.283
弧度每秒	转每分	$2.653 \times 10^{-3}$	377.0
米每秒每秒	英寸每秒每秒	39.37	0.02540
米每秒每秒	英尺每秒每秒	3.281	0.3048
弧度每秒每秒	度每秒每秒	57.30	0.01745
弧度每秒每秒	转每秒每秒	0.1592	6.283
弧度每秒每秒	转每分每秒	$2.653 \times 10^{-3}$	377.0
牛[顿]	达因	$10^5$	$10^{-5}$
牛[顿]	盎司	3.597	0.2780
牛[顿]	磅	0.2248	4.448

## 22.11 常数

表 22-6 列出常用的物理和化学的常数。参考表 22-2 到 22-5 就能把这里表示的单位转换成其他单位。

表 22-6 物理、电学和化学常数

常 数 名 称	数 值	符 号
太阳质量	$1.989 \times 10^{30} \text{kg}$	$m_{\text{sun}}$
地球质量	$5.974 \times 10^{24} \text{kg}$	$m_{\text{earth}}$
阿伏伽德罗数	$6.022169 \times 10^{23}$	$N$
月球质量	$7.348 \times 10^{22} \text{kg}$	$m_{\text{moon}}$
太阳平均半径	$6.970 \times 10^8 \text{m}$	$r_{\text{sun}}$
自由空间中电磁场传播速度	$2.99792 \times 10^8 \text{m/s}$	$c$
法拉第常数	$9.649 \times 10^7 \text{C/kmol}$	$F$
地球平均半径	$6.371 \times 10^6 \text{m}$	$r_{\text{earth}}$
地球平均轨道速度	$2.978 \times 10^4 \text{m/s}$	
自然对数的底	2.718282	$e$ 或 $e$
月球平均半径	$1.738 \times 10^6 \text{m}$	$r_{\text{moon}}$
自由空间的特性阻抗	$376.7 \Omega$	$Z_0$
在标准大气温度和压力	$344 \text{m/s}$	

(续)

常数名称	数值	符号
下干燥空气中的声速		
在海平面上的重力加速度	9.8067m/s <sup>2</sup>	$g$
气体常数	8.3145J/K·mol	$R_0$
维恩(wien)常数	0.0029m·K	$\sigma_w$
第二辐射常数	0.01439m·K	$c_2$
自由空间的导磁率	$1.257 \times 10^{-6}$ H/m	$\mu_0$
斯蒂芬-玻耳兹曼常数	$5.6697 \times 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> ·K	$\sigma$
万有引力常数	$6.673 \times 10^{-11}$ N·m <sup>2</sup> /kg <sup>2</sup>	$G$
自由空间介电常数	$8.85 \times 10^{-12}$ F/m	$\epsilon_0$
玻耳兹曼常数	$1.3807 \times 10^{-23}$ J/K	$k$
一次辐射常数	$4.993 \times 10^{-24}$ J·m	$c_1$
阿尔发粒子的质量	$6.64 \times 10^{-27}$ kg	$m_\alpha$
中子的质量	$1.675 \times 10^{-27}$ kg	$m_n$
质子的质量	$1.673 \times 10^{-27}$ kg	$m_p$
电子的质量	$9.109 \times 10^{-31}$ kg	$m_e$
普朗克常数	$6.6261 \times 10^{-34}$ J·s	$h$

## 第 23 章 数学数据

在电子学中有许多用来表示单位、常数、变量、数学运算以及逻辑运算的符号。本章以表格的形式列出了这些符号及它们最常用的用法或含义，本章还涉及了科学符号、坐标系统和其他的一些概念。

### 23.1 希腊字母

表 23-1 列出了大写希腊字母、字母的名称（用英文标出）和常用含义。表 23-2 列出了小写希腊字母及其名称和常用含义。大写或小写希腊字母有时写成斜体，但在这两个表中未写成斜体。

表 23-1 大写希腊字母

符号	字母名称	常用含义	符号	字母名称	常用含义
A	Alpha	磁通量密度 Y 匹配; 广义加标集; 曲线; 外形	M	Mu	互感
B	Beta		N	Nu	阿伏伽德罗常数 ( $6.022169 \times 10^{23}$ )
Γ	Gamma		Ξ	Xi	
Δ	Delta	三角形匹配; 不共地三相交流电; 增量; 微商; 导数; 拉普拉斯算子	O	Omicron	阶、序
E	Epsilon	电压; 能量	Π	Pi	积; 无限乘积; 同伦
Z	Zeta	阻抗	P	Rho	功率
H	Eta	效率	Σ	Sigma	总和; 数列; 无限数列
Θ	Theta	阶、序	T	Tau	时间常数; 温度
I	Iota	电流	Υ	Upsilon	
K	Kappa	磁化率; 开尔文	Φ	Phi	磁通量; 弗拉蒂尼子集
Λ	Lambda	广义、加标集	X	Chi	电抗
			Ψ	Psi	电通量
			Ω	Omega	欧姆; 一个物体的体积

表 23-2 小写希腊字母

符号	字母名称	常用含义
α	Alpha	共基极双极型晶体管的电流增益; α 质点; 角加速度; 角; 方位角; 超越数; 标量系数

(续)

符号	字母名称	常用含义
$\beta$	Beta	共发射极双极型晶体管的电流增益;磁通密度; $\beta$ 粒子;角;方位角;超越数;标量系数
$\gamma$	Gamma	$\gamma$ 射线;电导率;欧拉常数;重力;方位角;标量系数;排列;循环
$\delta$	Delta	导数;量的变化;点估计;支撑函数;规度函数;距离函数;整数变化;拉普拉斯算子
$\epsilon$	Epsilon	介电常数;自然对数之底(约为 2.71828);离心率;正负符号差
$\zeta$	Zeta	阻抗,系数;变换中的坐标变量
$\eta$	Eta	电极化率;磁滞系数;效率;变换中的坐标变量
$\theta$	Theta	角;相位角;极坐标角;柱坐标中的角;参数;同态
$\iota$	Iota	确定描述(在判断逻辑中)
$\kappa$	Kappa	介质常数;耦合系数;曲率
$\lambda$	Lambda	波长;维恩位移定律常数;比率;勒贝格测度;特征值
$\mu$	Mu	微;磁导率;放大系数;荷电载流子迁移率;平均;统计参数
$\nu$	Nu	频率;磁阻率;统计参数;天然同态
$\xi$	Xi	变换中的坐标变量
$\omicron$	Omicron	阶,序
$\pi$	Pi	圆周率(约为 3.14159);弧度;排列
$\rho$	Rho	电阻率;代表角的变量;曲率;相关;度量;密度
$\sigma$	Sigma	电导率;斯蒂芬-玻耳兹曼常数;标准差;方差;数学分类;排列;拓扑
$\tau$	Tau	时-相位移;扭力;数学分类;拓扑
$\upsilon$	Upsilon	
$\phi$	Phi	角;相角;电通量密度;球坐标中的角;欧拉 $\phi$ 函数;映像;谓词
$\chi$	Chi	磁化率;特征函数;色数;体的组态
$\psi$	Psi	角;映像;谓词;图(表)
$\omega$	Omega	角速度;周期;连续模

## 23.2 常用数学符号

表 23-3 所列出的常用数学符号用来描述物理及工程数学中的运算、关系和规范。斜体有时用于字母符号,其他符号基本上不写成斜体。

表 23-3 常用数学符号及其含义

符号	名称	常用含义
.	小数点	将整数和小数分开
$\forall$	全称量词	读作“对于所有”
#	磅的符号	数;磅

(续)

符 号	名 称	常 用 含 义
$\exists$	存在量词	读作“存在”
%	百分号	读作“一百分之”或“百分之”
‰	千分号	读作“一千分之”或“千分之”
$\&$	与	逻辑“与”运算
@	以	读作“以……的比率”或“以……的价格”
( )	圆括号	将定义点坐标的元括起来;将一系列数列括起来;限定有界开区间
[ ]	中括号	将一组包含一个或多个圆括号的式子括起来;限定有界闭区间
{ }	大括号	将一组包括一个或多个方括号的式子括起来;表示一组集合的元
[ )或( ]	半方括号	表示半开半闭区间
] [	反括号	限定有界开区间
( )或[ ]	大圆或大方括号	表示一个矩阵
*	星号	乘法运算;逻辑“与”运算
$\times$	乘号	乘法运算;逻辑“与”运算;两个矢量的矢量积运算
$\Pi$	大写希腊字母 Pi	许多值进行连乘
.	点	乘法运算;逻辑“与”运算;两个矢量进行标量积运算
+	加号	加法运算;逻辑“或”运算
$\Sigma$	大写希腊字母 Sigma	许多值进行连加
,	逗号	将大数字以千分位分隔开;将表示一个坐标点的元分隔开;将一序列中的数分隔开;将区间的界分隔开
-	减号	减法运算;逻辑“非”的符号
$\pm$	加/减号	读作“加或减号”;定义一个值偏离其标定值的范围
/	斜线	除;比率;比例;网址分隔符
$\div$	除号	除法运算
:	冒号	比率;时、分分隔;分、秒分隔
::	双冒号	意指
!	惊叹号	阶乘
$\leq$	不等号	读作“小于或等于”
$<$	不等号	读作“小于”
$\ll$	不等号	读作“远小于”
$=$	等号	读作“等于”;逻辑等价
$\geq$	不等号	读作“大于或等于”
$>$	不等号	读作“大于”
$\gg$	不等号	读作“远大于”
$\cong$	全等号	读作“恒等于”
$\neq$	不等号	读作“不等于”
$\equiv$	等价号	读作“逻辑上等价于”
$\approx$	约等号	读作“约等于”



(续)

符 号	名 称	常 用 含 义
$\propto$		读作“正比于”
$\sim$	近似号	读作“相当于”
$\dots$	三点	读作“如此等等”或“如此其他”
	竖线	读作“恰好被……除尽”
	双竖线	绝对值号; 矢量模; 两点距离; 基数; 模数
—	长竖线	表示函数的极限值
	双长竖线	行列式, 矩阵
$\aleph$	大写希伯来语 aleph	无限基数列; 连续统假设
$\cap$	交集符	求交集运算
$\cup$	并集符	求并集运算
$\emptyset$	空集符	空集
$\in$		读作“属于……”
$\notin$		读作“不属于……”
$\subset$		读作“是……的纯子集”
$\supset$	隐含符	读作“逻辑上的暗示……”
$\subseteq$		读作“是……的子集”
$\not\subseteq$		读作“不是……的纯子集”
$\sphericalangle$	角符	角; 角度
$\perp$		读作“垂直于……”
$\nabla$	微分算子	矢量微分运算符
$\sqrt{\quad}$	根号或无理数	求根; 求平方根
$\Leftrightarrow$ 或 $\leftrightarrow$	双箭头	读作“倘若或仅当”; 逻辑上等价为
$\Rightarrow$	右箭头	逻辑暗示
$\therefore$		读作“因此”
$\rightarrow$	右箭头	逻辑暗示; 收敛于; 映像
$\uparrow$	上箭头	读作“高于……”或“增加”
$\downarrow$	下箭头	读作“低于……”或“减少”
$\partial$		偏微分; 雅可比行列式; 体的表面
$\int$		积分
$\iint$		双重积分
$\int_E$		黎曼积分
$\int_{\Gamma}$		环积分
$\iint_S$		面积分
$\iiint$		三重积分
$^\circ$	度(上标)	角度; 温度
$\infty$	无穷符号	无穷; 任意大的数; 任意远的距离

### 23.3 上标和下标

下标限定单位、常量和变量的含义。下标置于主字符的右侧（无空格），低于主字符基准线，尺寸比主字符小。数字下标通常不写成斜体。字母下标有时写成斜体。以下是一些下标的例子。

$Z_0$  读成  $Z$  下标零，表示特征阻抗

$R_{out}$  读成  $R$  下标 out，表示输出电阻

$x_3$  读成  $x$  下标 3，表示一个变量

上标表示幂（将底数或变量乘以指定的幂）。上标通常是数字，但有时也可以是字母，常用斜体小写英文字母（从  $n$  到  $z$ ）表示变量的幂。上标置于主字符的右侧（无空格），高于主字符基准线，尺寸比主字符小。以下是上标的例子。

$2^3$  读成 2 的立方，表示  $2 \times 2 \times 2$

$e^x$  读成  $e$  的  $x$  次幂，表示  $x$  的指数函数

$y^{1/2}$  读成  $y$  的  $1/2$  次幂，表示  $y$  的平方根

### 23.4 科学计数法

科学计数法用来表示很大或很小的数值，同时它使得不同数量级的数之间的运算变得更方便。用科学计数法表示的数如下

$$m \cdot n \times 10^z$$

小数点左边的  $m$  是数列 {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9} 中的某一个数，小数点右边的  $n$  是一个非负整数，10 的幂次  $z$  可以是任一个整数。下面是一些用科学计数法表示的数

$$2.56 \times 10^6$$

$$8.0773 \times 10^{-18}$$

$$1.000 \times 10^0$$

在有些国家，科学计数法中的  $m$  必须表示为零，即  $m=0$ 。以这种很少见的方式，上述数字将表示为

$$0.256 \times 10^7$$

$$0.80773 \times 10^{-17}$$

$$0.1000 \times 10^1$$

乘法符号可以用很多形式表示，若不用常见的乘号，可以用星号“\*”，则上述数字可表示为

$$\begin{aligned} &2.56 * 10^6 \\ &8.0773 * 10^{-18} \\ &1.000 * 10^0 \end{aligned}$$

另外一种表示法是用点“.”，上述数字则表示为

$$\begin{aligned} &2.56 \cdot 10^6 \\ &8.0773 \cdot 10^{-18} \\ &1.000 \cdot 10^0 \end{aligned}$$

有时在使用科学计数法时要用到简单的文字，比如当通过 e-mail 进行信息传送时（不是作为电子邮件的附件），就会碰到这种情况。一些计算器和计算机使用这种计数方法，大写字母 E 表示其后所跟的数字是幂次。用这种形式，上述数字可表示为

$$\begin{aligned} &2.56E6 \\ &8.0773E-18 \\ &1.000E0 \end{aligned}$$

有时幂次数要以两位数表示，且要加上正负号，则上述数字表示为

$$\begin{aligned} &2.56E+06 \\ &8.0773E-18 \\ &1.000E+00 \end{aligned}$$

另外一种表示法是用星号表示乘，用符号“^”表示幂次，则可写成

$$\begin{aligned} &2.56 * 10^6 \\ &8.0773 * 10^{-18} \\ &1.0000 * 10^0 \end{aligned}$$

在所有这些例子中，所表示的数是相同的。若将这些数完整写出，则为

$$\begin{aligned} &2560000 \\ &0.00000000000000000080773 \\ &1.000 \end{aligned}$$

在印刷文献中，只有当 10 的幂次数  $z$  相当大或相当小时才使用科学计数法。若  $-2 \leq z \leq 2$ ，按惯例，数字要完整写出，且 10 的幂次不写。

如果  $z = -3$  或  $z = 3$ , 数字既可完整写出, 也可用科学计数法表示。当  $z \leq -4$  或  $z \geq 4$  时, 数字应该用科学计数法表示。计算器显示数字时, 一概用科学计数法表示, 不管 10 的幂次为多少, 即使为零。

如果可能的话, 加减法时, 最好将数字完整地写出, 例如

$$\begin{aligned}(3.045 \times 10^2) + (6.853 \times 10^3) &= 304.5 + 6853 = 7157.5 \\ &= 7.1575 \times 10^3\end{aligned}$$

当以科学计数法表示的数字进行乘除运算时, 乘号左边十进制的数相乘或相除, 10 的幂次相加 (乘法运算时) 或相减 (除法运算时)。最后, 乘积或商写成标准形式, 举例如下

$$(3.045 \times 10^2)(6.853 \times 10^3) = 20.867385 \times 10^5 = 2.0867385 \times 10^6$$

## 23.5 有效数字

在科学计数法中, 有效数字是指能体现一个量达到已知精度的表示式的十进制数的位数, 如  $3.83 \times 10^{-25}$  有 3 位有效数字, 而  $3.83018 \times 10^{-25}$  有 6 位有效数字,  $3.83018 \times 10^{-25}$  比  $3.83 \times 10^{-25}$  具有更高的精度。

### 23.5.1 舍位

舍位的过程就是将一个数的小数点右边的所有数截去一定位数。虽然不是大多数, 但许多电子计算器用这种方法来让数字适合显示屏的显示。例如数字 3.830175692803 可以按下面的步骤来截短

3.830175692803

3.83017569280

3.8301756928

3.830175692

3.83017569

3.8301756

3.830175

3.83017

3.83

3.8

3

### 23.5.2 四舍五入

四舍五入是一种更为精确、更常使用的数字舍位法。用这种方法舍位时,当要把最右边的某一称作 $r$ 的数字舍去时,其左边紧挨的数字为 $q$ (当原有的 $r$ 被舍去后,它就成为新的 $r$ ),若 $0 \leq r \leq 4$ ,则 $q$ 不变,若 $5 \leq r \leq 9$ ,则 $q$ 加1。有些电子计算器使用四舍五入舍位法,而不用别的舍位法。若使用四舍五入,则数3.830175692803将以以下步骤舍位

3.830175692803  
 3.83017569280  
 3.8301756928  
 3.830175693  
 3.83017569  
 3.8301757  
 3.830176  
 3.83018  
 3.8302  
 3.830  
 3.83  
 3.8  
 4

### 23.5.3 有效数字在运算中的应用

如果在运算过程中使用了科学计数法,最终结果的有效数字不能大于参加运算的任一数字的有效数字。

在先前的加法运算例子中,和数 $7.1575 \times 10^3$ 必须减至4位有效数字,因为加数只有4位有效数字,通过四舍五入,则为 $7.158 \times 10^3$ 。

在先前的乘法运算例子中,积 $2.0867385 \times 10^6$ 必须减至4位有效数字,因为被乘数只有4位有效数字。若直接舍位,则为 $2.086 \times 10^6$ ;若采用四舍五入,则结果是 $2.087 \times 10^6$ 。

## 23.6 代数定理

现将代数中的常见定理,也称规则或定律列于表23-4中,这些定

理适用于所有实数，但只有一个例外：当表示商数的一个分数，其分母为变量时，例如  $1/x$ ，则对于  $x=0$ ，代数式无意义。

表 23-4 代数中的常见定理

(当分母不为零时，这些定理适用于所有实数)

方 程	表 示	方 程	表 示
$x+0=x$	加恒等	$xy=yx$	乘法交换律
$x \cdot 1=x$	乘恒等	$x+(y+z)=(x+y)+z$	加法结合律
$x \cdot 0=0$	乘零	$x(yz)=(xy)z$	乘法结合律
$-(-x)=x$	两次求反	$x(y+z)=xy+xz$	分配律
$x+(-x)=0$	加反量	$(w+x)(y+z)=wy+wz$ $+xy+xz$	和的积
$x(1/x)=1$	乘倒置数	$w/x=y/z \rightarrow wz=xy$	交叉相乘法则
$1/(1/x)=x$	倒数的倒数律	$1/(xy)=(1/x)(1/y)$	积的倒置
$x+y=y+x$	加法交换律	$1/(x/y)=y/x$	商的倒置

## 23.7 坐标系

相互关系和函数常常画在坐标系统中，这些图形显示了器件和现象的特性，例如天线的辐射图样、波形及谱形。

### 23.7.1 笛卡尔平面

最常用的二维坐标系是笛卡尔平面，见图 23-1，也称为直角坐标系或  $xy$  平面。自变量由  $x$  轴或称横轴标出，因变量由  $y$  轴或称纵轴标出。虽然横、纵坐标的分度不一定要等距分隔，但分度通常是线性分隔的。如将纵坐标分度取对数，则称为半对数图；如纵、横坐标分度都取对数，则称为双对数图。

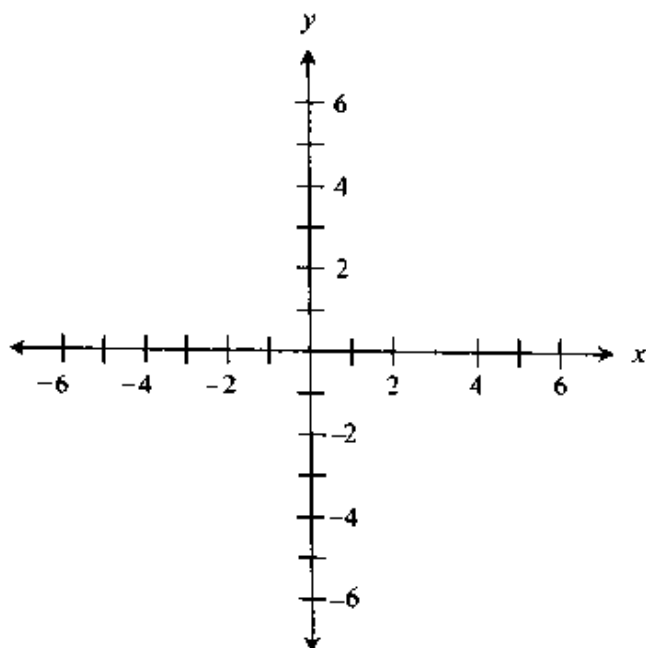


图 23-1 笛卡尔平面 (也称直角坐标平面或  $xy$  平面)

### 23.7.2 极坐标平面

另一个二维坐标系是极坐标平面，自变量为半径  $r$ ，因变量为角  $\theta$ 。图 23-2a 是

用于数学和物理学的极坐标系统， $\theta$ 角用弧度表示，且由向右（东）延伸的射线逆时针旋转。图 23-2b 是用于无线通信、定位和导航的极坐标平面， $\theta$ 用度表示，且由向上（北）延伸的射线顺时针旋转。在任何极坐标平面中，角度的刻度都是均匀的，半径的刻度在大多数极坐标平面中是线性的，但有些时候以对数形式刻度。

### 23.7.3 纬度和经度

纬度角和经度角唯一地确定了一个球面上或天空中的某个点的位置。图 23-3a 给出了确定地球上地理位置的图例。极轴将球面上恰好相反的特殊点联接起来，这两点分别为纬度  $\theta=90^\circ$ （北极点）和  $\theta=-90^\circ$ （南极点）。赤道轴从球的中心以和极轴成  $90^\circ$  的夹角方向向外延伸，此轴定为经度  $\phi=0$ 。纬度角  $\theta$  相对于赤道面有正（赤道面以北），有负（赤道面以南）。经度角  $\phi$  相对于赤道轴有逆时针方向（从赤道轴向东），顺时针方向（从赤道轴向西）。角度有以下限定：

$$-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$$

$$-180^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$$

在地球表面，用两个极点联接零度经线的半圆经过英国的格林威治，被称为格林威治子午线，经度角相对于该子午面而定义。

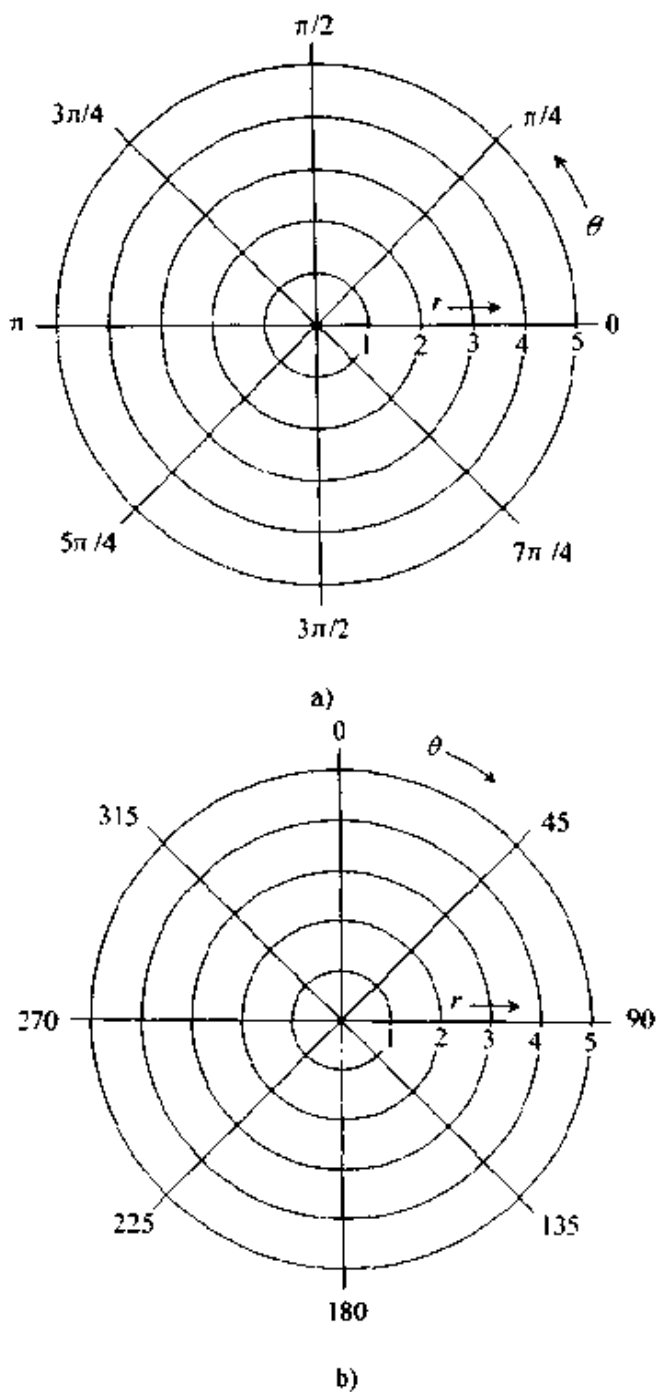


图 23-2 极坐标平面

a) 用于数学和物理学的极坐标平面

b) 用于无线通信、定位和导航的极坐标平面

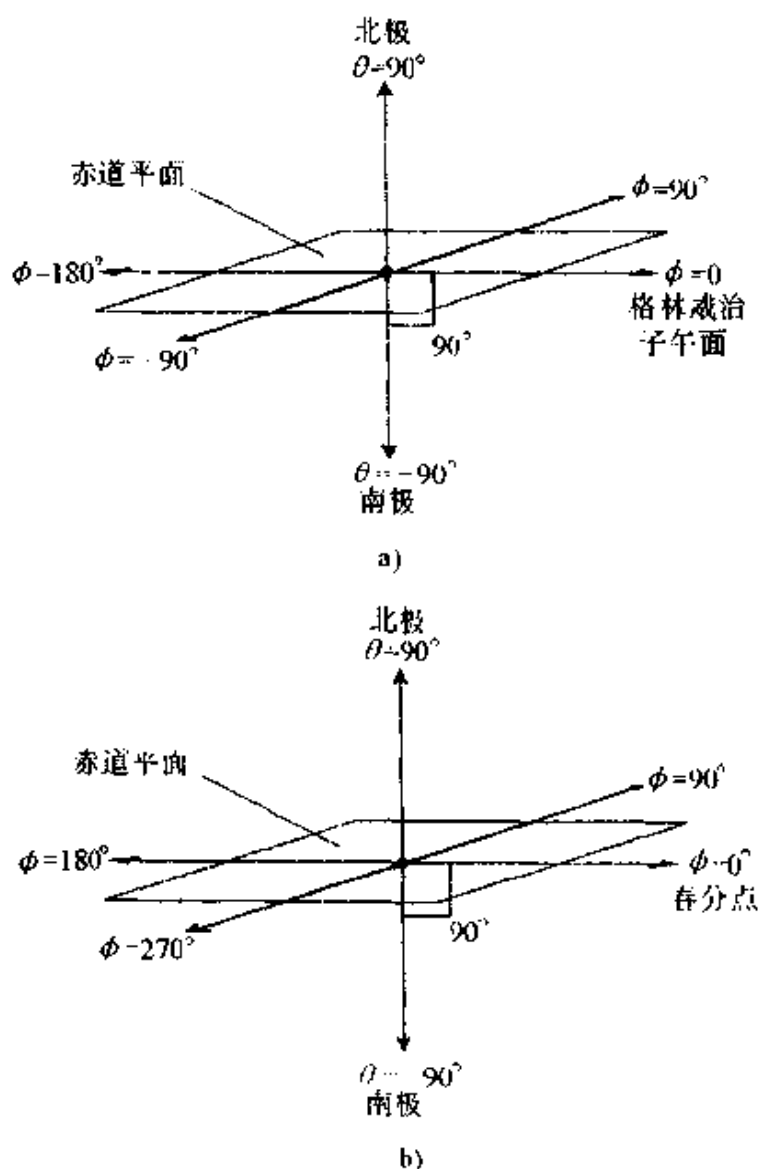


图 23-3 经纬图  
a) 纬度和经度图 b) 赤纬和赤经图

#### 23.7.4 天体坐标

天体经度和天体纬度是地球上经纬度向天空的延伸，图 23-3a 表示了此天体坐标。若天空中某点的坐标为  $(\theta, \phi)$ ，则此点是根据地球表面经纬坐标为  $(\theta, \phi)$  的点确定的。天体经度和天体纬度又分别称为黄经、黄纬。

赤纬和赤经确定了天空中的物体相对于星星的位置。图 23-3b 所示即为此系统。赤纬  $(\theta)$  相当于天体纬度，赤经  $(\phi)$  由北半球春天开始时太阳所处位置（春分点）向东算起。各角度限定如下：

$$-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$$

$$0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$$



### 23.7.5 笛卡尔三维空间

直角坐标向三维空间的扩展即为笛卡尔三维空间，见图 23-4，也称为  $xyz$  空间。自变量通常由  $x$  和  $y$  轴标出，因变量由  $z$  轴标出。虽然分度间隔不一定必须相同，但通常都是线性的，可以采用一个、两个或三个轴为对数分度来画图。

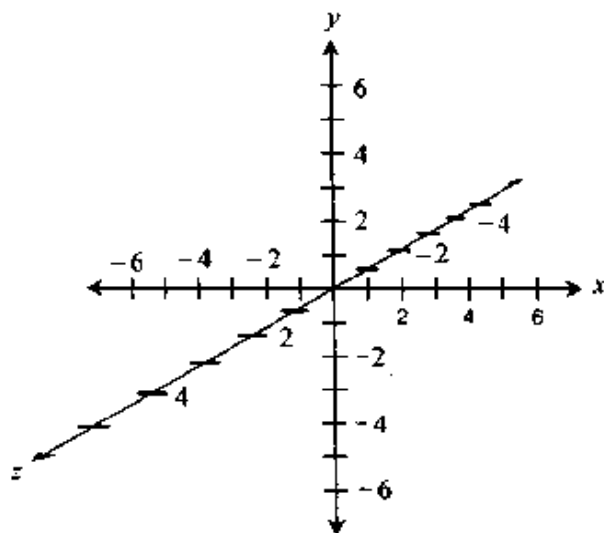


图 23-4 笛卡尔三维空间(也称  $xyz$  空间)

### 23.7.6 柱坐标

图 23-5 表示用柱坐标系确定空间中点的位置。给定一个笛卡尔坐标系或  $xyz$  空间，定义角  $\theta$  处于  $xy$  平面，并从  $x$  轴逆时针旋转，以弧度计算。给定空间一个点  $P$ ，它在

$xy$  平面上投影为  $P'$ 。  $P$  点的位置由三个量  $(\theta, r, z)$  确定：

$\theta$  为在  $xy$  平面中  $P'$  与  $x$  轴的夹角

$r$  为  $P$  点到原点的距离 (半径)

$z$  为  $P$  点距  $xy$  平面的距离 (高度)

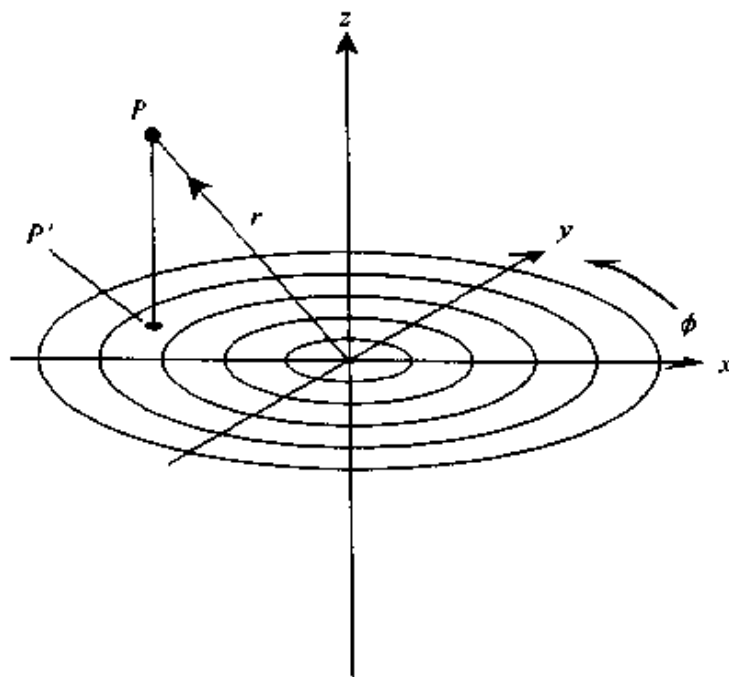


图 23-5 确定三维空间中点的位置的柱坐标

### 23.7.7 球坐标

图 23-6 表示用球坐标系统确定空间中点的位置。这一系统相当于赤经和赤纬系统，只不过加了一个表示从原点到  $P$  点距离的矢量  $r$ 。 $P$  点的位置由三个量  $(\theta, \phi, r)$  确定：

$\theta$  为  $P$  点的赤纬角

$\phi$  为  $P$  点的赤经角

$r$  为从  $P$  点到原点的距离（半径）

在本例中，角度单位是度，也可以用弧度作单位。此系统还有几种形式，但都通称为球坐标。

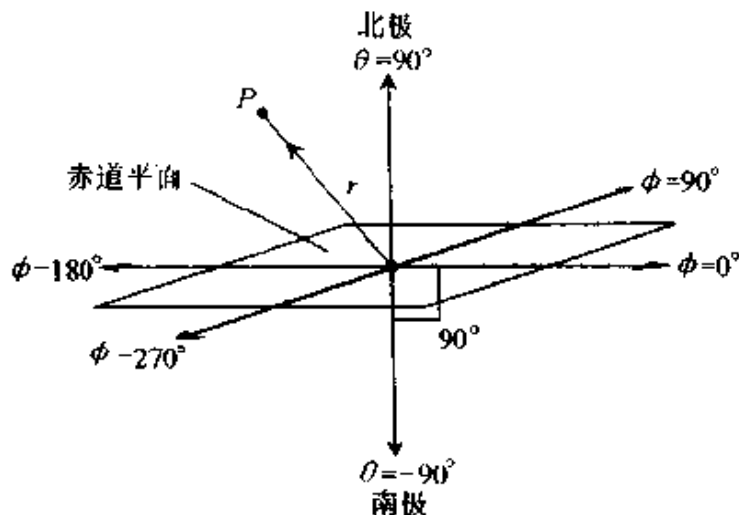


图 23-6 确定三维空间中点的位置的球坐标

## 23.8 三角学

基本三角函数共有三个：正弦、余弦和正切。这些函数一般用于以弧度表示的  $\theta$  角，且范围为  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ 。在公式和方程中，这三个函数简写为  $\sin\theta$ ,  $\cos\theta$ ,  $\tan\theta$ 。

### 23.8.1 基本函数

设有一个圆，在笛卡尔平面中有如下方程

$$x^2 + y^2 = 1$$

因该圆的半径为 1，圆心在原点  $(0, 0)$ ，所以称它为单位圆。设  $\theta$  为顶点在原点，且由横轴  $x$  逆时针旋转的角，假设这个角对应于与单位圆相交于某点  $P(x_0, y_0)$  的射线，则

$$y_0 = \sin\theta$$

$$x_0 = \cos\theta$$

$$\frac{y_0}{x_0} = \tan\theta$$

### 23.8.2 二级函数

另有三个三角函数可由以上定义的函数导出,它们分别是余割、正割和余切。在公式和方程中它们可写为  $\csc\theta$ ,  $\sec\theta$ ,  $\cot\theta$ , 并分别定义如下

$$\csc\theta = \frac{1}{\sin\theta} = \frac{1}{y_0}$$

$$\sec\theta = \frac{1}{\cos\theta} = \frac{1}{x_0}$$

$$\cot\theta = \frac{1}{\tan\theta} = \frac{x_0}{y_0}$$

### 23.8.3 三角恒等式

三角中的定理以三角恒等式列出,其中一些常用的恒等式列于表 23-5。所有  $\theta$  角都为弧度制,注意下面的标准简写

$$\sin^2\theta = (\sin\theta)^2 = (\sin\theta)(\sin\theta)$$

$$\cos^2\theta = (\cos\theta)^2 = (\cos\theta)(\cos\theta)$$

$$\tan^2\theta = (\tan\theta)^2 = (\tan\theta)(\tan\theta)$$

$$\csc^2\theta = (\csc\theta)^2 = (\csc\theta)(\csc\theta)$$

$$\sec^2\theta = (\sec\theta)^2 = (\sec\theta)(\sec\theta)$$

$$\cot^2\theta = (\cot\theta)^2 = (\cot\theta)(\cot\theta)$$

表 23-5 常用三角恒等式

(只要分母不为零,这些公式适用于所有实数)

等 式	名 称
$\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$	正弦和余弦函数的毕达哥拉斯定理
$\sec^2\theta - \tan^2\theta = 1$	正割和正切函数的毕达哥拉斯定理
$\sin - \theta = -\sin\theta$	负角的正弦公式
$\cos - \theta = \cos\theta$	负角的余弦公式
$\tan - \theta = -\tan\theta$	负角的正切公式
$\sin(\theta + 2\pi) = \sin\theta$	正弦函数的周期性
$\cos(\theta + 2\pi) = \cos\theta$	余弦函数的周期性
$\tan(\theta + 2\pi) = \tan\theta$	正切函数的周期性

(续)

等 式	名 称
$\sin 2\theta = 2\sin\theta\cos\theta$	正弦函数的倍角公式
$\cos 2\theta = 1 - (2\sin^2\theta) = (2\cos^2\theta) - 1$	余弦函数的倍角公式
$\tan 2\theta = (2\tan\theta)/(1 - \tan^2\theta)$	正切函数的倍角公式
$\sin(\theta/2) = \pm [(1 - \cos\theta)/2]^{1/2}$	正弦函数的半角公式
$\cos(\theta/2) = \pm [(1 + \cos\theta)/2]^{1/2}$	余弦函数的半角公式
$\tan(\theta/2) = (\sin\theta)/(1 + \cos\theta)$	正切函数的半角公式
$\sin(\theta + \phi) = \sin\theta\cos\phi + \cos\theta\sin\phi$	正弦函数的和角公式
$\cos(\theta + \phi) = \cos\theta\cos\phi - \sin\theta\sin\phi$	余弦函数的和角公式
$\tan(\theta + \phi) = (\tan\theta + \tan\phi)/(1 - \tan\theta\tan\phi)$	正切函数的和角公式
$\sin(\theta - \phi) = \sin\theta\cos\phi - \cos\theta\sin\phi$	正弦函数的差角公式
$\cos(\theta - \phi) = \cos\theta\cos\phi + \sin\theta\sin\phi$	余弦函数的差角公式
$\tan(\theta - \phi) = (\tan\theta - \tan\phi)/(1 + \tan\theta\tan\phi)$	正切函数的差角公式
$\sin\theta = \cos(\pi/2 - \theta)$	正弦、余弦函数的余角公式
$\cos\theta = \sin(\pi/2 - \theta)$	正弦、余弦函数的余角公式
$\tan\theta = \cot(\pi/2 - \theta)$	正切、余切函数的余角公式
$\cot\theta = \tan(\pi/2 - \theta)$	正切、余切函数的余角公式
$\sec\theta = \csc(\pi/2 - \theta)$	正割、余割函数的余角公式
$\csc\theta = \sec(\pi/2 - \theta)$	正割、余割函数的余角公式
$\sin\theta = \sin(\pi - \theta)$	正弦函数的补角公式
$\cos\theta = -\cos(\pi - \theta)$	余弦函数的补角公式
$\tan\theta = \tan(\pi - \theta)$	正切函数的补角公式

## 23.9 对数

对数是一个指数的幂，一个常数以此幂自乘便得到已给数。假设三个实数  $a$ ,  $m$ ,  $x$  间存在如下关系

$$a^m = x$$

则  $m$  就是以  $a$  为底， $x$  的对数，表示为

$$m = \log_a x$$

最常见的两个对数是以  $a=10$  和  $a=e \approx 2.71828$  为底的对数。

以 10 为底的对数也称为常用对数，在式子中，常用对数写成  $\log$ ，例如

$$\log 10 = 1.000$$

以  $e$  为底的对数称为自然对数或纳皮尔对数。在式子中，自然对数常简写成  $\ln$ ，但有时也写成  $\log_e$ ，如

$$\ln 2.71828 = \log_e 2.71828 \approx 1.00000$$

表 23-6 列出了一些与对数有关的公式。

表 23-6 常用对数公式

(这些公式只要分数的分母不为零,适用于所有实数)

公 式	名 称
$\log x = \ln x / \ln 10 \approx 0.434 \ln x$	将以 10 为底的常用对数转化为以 e 为底的自然对数
$\ln x = \log x / \log e \approx 2.303 \log x$	将自然对数转化为常用对数
$\log xy = \log x + \log y$	积的常用对数
$\ln xy = \ln x + \ln y$	积的自然对数
$\log(x/y) = \log x - \log y$	商的常用对数
$\ln(x/y) = \ln x - \ln y$	商的自然对数
$\log x^y = y \log x$	幂函数的常用对数
$\ln x^y = y \ln x$	幂函数的自然对数
$\log 1/x = -\log x$	倒数的常用对数
$\ln 1/x = -\ln x$	倒数的自然对数
$\log(x)^{1/y} = (\log x)/y$	根的常用对数
$\ln(x)^{1/y} = (\ln x)/y$	根的自然对数
$\log 10^x = x$	以 10 为底指数的常用对数
$\ln e^x = x$	以 e 为底指数的自然对数

## 第 24 章 化学数据

本章内容是关于化学材料和它们在电子学中的应用。

### 24.1 原子和分子

所有物质都是由叫做原子的微粒所组成。原子组合成分子。由两种或更多的不同元素的原子组成的分子是化合物。

#### 24.1.1 原子结构

原子的原子核决定了化学元素的独特性质。原子核由质子和中子组成，质子携带正电荷，中子不带电荷（中性）。原子的原子核内的质子数就是原子序数。对于同一种元素，中子数是可以改变的，不同的中子数构成元素的不同的同位素。元素的原子重量大约等于原子核中质子数和中子数之和。

在大多数原子中，原子核被带负电的电子所包围。任一瞬时内，电子有 50% 的几率存在于叫做电子壳层的内部区域中。通常壳层是以原子核为球心的不同直径的球面，每一壳层表征着一定的电子能量。壳层直径越大，电子具有的能量越大。如果一个电子得到足够的能量，它就能脱离原子核而变成共享电子，在原来原子核和更多的其他原子核之间漂动。或者它可以变为一个荷电载流子。从一个原子跳到另一个原子。在极端情况下，它可以变成自由电子，不受任何原子核的束缚。

#### 24.1.2 离子

如果一个原子具有的电子数比质子数多或少，则原子就带电。缺少电子使原子带正电。电子过剩使原子带负电。带电原子就叫离子。当一种材料含有大量离子时，就说此材料是离子化了的。离子化了的材料通常能很好传导电流，尽管材料本身不是良导体。这对于气体、液体和固体都是一样的。

#### 24.1.3 化合物

如果两种或更多种不同元素的原子互相结合，共享电子就构成化

合物。化合物与组成它的元素相比常常具有很多不同的特性。在室温和常压下，氢和氧都是气体，但同样条件下水就是液体。如果将水冷却，常压下它就会变成固体。如果将水加热到足够高的温度，它就变成无色、无味的气体，就像它的组成元素一样。另一个化合物的例子是氧化铁（锈）。当铁与氧化合时形成氧化铁，铁是暗灰色固体，氧是气体，但铁锈是棕色的粉末，与组成它的任何一种元素都不相像。

#### 24.1.4 分子

元素的自然形式是以分子而存在的。氧在空气中大部分时间是成对出现的，因此氧分子的符号表示为 $O_2$ 。有时三个氧原子组成一个分子，这就是臭氧（ $O_3$ ）。化合物常常是分子，例如水是 $H_2O$ ，每个水分子由两个氢原子和一个氧原子组成。另一个例子是二氧化碳（ $CO_2$ ），每个分子由一个碳原子和两个氧原子组成。

#### 24.1.5 导体

导体是这样一种物质，在其中电子很容易沿着原子运动。纯银是室温下最好的导体，铜和铝也是很好的导体，铁、钢和其他不同的金属也是较好的导体。某些液体是很好的导体，汞就是一例。此外，盐水也是良好导体。气体通常是不良导体，除非它们被离子化。

#### 24.1.6 绝缘体

绝缘体是非常不良的导体。大多数气体是好的绝缘体。玻璃、干的木材、纸张和塑料同样是绝缘体。纯水是良好的绝缘体，尽管，当水中含有某些导电杂质时水是能导电的。虽然纯金属是良好导体，但是金属氧化物是很好的绝缘体。

当采用绝缘材料来隔离电荷极性时，这种材料叫做介质。陶瓷和玻璃在电力系统中常被用来防止发生短路。金属氧化物、云母、各种陶瓷和空气常被用作电容器的介质材料。

#### 24.1.7 半导体

在半导体中，电子也流动，但不如在导体中那样好。常见的半导体包括硅（Si）、硒（Se）、镉（In）或掺了杂质的镓（Ga）。在这些材料中，导电常常是由于电子的运动，但有时候导电是用空穴（原子内的电子空位）来描述。空穴带正电荷，电荷量的大小与电子电荷相等。在

半导体中,数量多的荷电载流子叫多数载流子,而数量少的叫少数载流子。半导体常被用于制造二极管、晶体管和集成电路。

## 24.2 元素

表 24-1 列出了 112 种已知的化学元素(按元素的英文字母顺序排列)。表后各元素的说明则是按原子序数的顺序。

表 24-1 化学元素表

元素名称		化学符号	原子序数	元素名称		化学符号	原子序数
英文	中文			英文	中文		
Actinium	锕	Ac	89	Europium	铕	Eu	63
Aluminium	铝	Al	13	Fermium	镭	Fm	100
Americium	镅	Am	95	Fluorine	氟	F	9
Antimony	锑	Sb	51	Francium	钫	Fr	87
Argon	氩	Ar	18	Gadolinium	钆	Gd	64
Arsenic	砷	As	33	Gallium	镓	Ga	31
Astatine	砹	At	85	Germanium	锗	Ge	32
Barium	钡	Ba	56	Gold	金	Au	79
Berkelium	锫	Bk	97	Hafnium	铪	Hf	72
Beryllium	铍	Be	4	Hahnium	镎	Ha	105
Bismuth	铋	Bi	83	Hassium	镄	Hs	108
Bohrium	𨭈	Bh	107	Helium	氦	He	2
Boron	硼	B	5	Holmium	铥	Ho	67
Bromine	溴	Br	35	Hydrogen	氢	H	1
Cadmium	镉	Cd	48	Indium	铟	In	49
Calcium	钙	Ca	20	Iodine	碘	I	53
Californium	锎	Cf	98	Iridium	铱	Ir	77
Carbon	碳	C	6	Iron	铁	Fe	26
Cerium	铈	Ce	58	Krypton	氪	Kr	36
Cesium	铯	Cs	55	Lanthanum	镧	La	57
Chlorine	氯	Cl	17	Lawrencium	𨭈	Lr 或 Lw	103
Chromium	铬	Cr	24	Lead	铅	Pb	82
Cobalt	钴	Co	27	Lithium	锂	Li	3
Copper	铜	Cu	29	Lutetium	镥	Lu	71
Curium	锔	Cm	96	Magnesium	镁	Mg	12
Dysprosium	镝	Dy	66	Manganese	锰	Mn	25
Einsteinium	镄	Es	99	Meitnerium	钷	Mt	109
Erbium	铒	Er	68	Mendelevium	钷	Md	101



(续)

元素名称		化学符号	原子序数	元素名称		化学符号	原子序数
英文	中文			英文	中文		
Mercury	汞	Hg	80	Scandium	钪	Sc	21
Molybdenum	钼	Mo	42	Seaborgium	锿	Sg	106
Neodymium	钕	Nd	60	Selenium	硒	Se	34
Neon	氖	Ne	10	Silicon	硅	Si	14
Neptunium	镎	Np	93	Silver	银	Ag	47
Nickel	镍	Ni	28	Sodium	钠	Na	11
Niobium	铌	Nb	41	Strontium	锶	Sr	38
Nitrogen	氮	N	7	Sulfur	硫	S	16
Nobelium	锗	No	102	Tantalum	钽	Ta	73
Osmium	锇	Os	76	Techetium	锝	Tc	43
Oxygen	氧	O	8	Tellurium	碲	Te	52
Palladium	钯	Pd	46	Terbium	铽	Tb	65
Phosphorus	磷	P	15	Thallium	铊	Tl	81
Platinum	铂	Pt	78	Thorium	钍	Th	90
Plutonium	钚	Pu	94	Thulium	铥	Tm	69
Polonium	钋	Po	84	Tin	锡	Sn	50
Potassium	钾	K	19	Titanium	钛	Ti	22
Praseodymium	镨	Pr	59	Tungsten	钨	W	74
Promethium	钷	Pm	61	Ununbium	(中文名未定)	Uub	112
Protactinium	钷	Pa	91	Ununnilium	(中文名未定)	Uun	110
Radium	镭	Ra	88	Unununium	(中文名未定)	Uuu	111
Radon	氡	Rn	86	Uranium	铀	U	92
Rhenium	铼	Re	75	Vanadium	钒	V	23
Rhodium	铑	Rh	45	Xenon	氙	Xe	54
Rubidium	铷	Rb	37	Ytterbium	镱	Yb	70
Ruthenium	钌	Ru	44	Yttrium	钇	Y	39
Rutherfordium	钚	Rf	104	Zinc	锌	Zn	30
Samarium	钐	Sm	62	Zirconium	锆	Zr	40

1. 氦 气态元素，并且是自然界最轻和含量非常丰富的元素。用于半导体制造过程和辉光放电灯中。易燃，容易与氧合成形成水(H<sub>2</sub>O)。

2. 氦 气态元素，在自然界中仅比氢重，含量也很丰富。它是氢聚合的产物，用于氦-氖(He-Ne)激光器，能产生红色可见相干光。

3. **锂** 碱金属元素，是最轻的金属元素。用于电化学电池，适于小电流、长寿命的场合。

4. **铍** 金属元素，存在于不同的介质、合金和荧光物质中。铍的氧化物可用作绝缘体。

5. **硼** 以粉末状或块状的硬金属的形态存在。硼是不良导体，可用于核反应堆、半导体电子器件制造和其他工业用途。

6. **碳** 以两种形式存在：**石墨**（常见形态为黑色粉末）和**金刚石**（透明固体，很少见）。可用于电化学电池、热电偶和无感电阻。

7. **氮** 地球大气中含量最丰富的成分（地球表面将近含78%）。与其他元素能发生某种程度的反应。

8. **氧** 地球大气中含量仅次于氮（表面约含21%）。很容易与其他元素，特别是金属结合。三个氧原子组成分子时就形成**臭氧**。

9. **氟** 卤族气态元素。很容易与其他元素发生反应。

10. **氖** 在空气中少量存在的惰性气体。可用于特殊的低频振荡器、触发器、稳压器、指示灯泡和显示器。也可用于**氦-氖**（He-Ne）激光器，它能产生红色可见相干光。

11. **钠** 碱金属族的金属元素。可用于气体放电灯，当它发出荧光时具有烛光火焰色的辉光。极易与不同的其他元素发生反应。

12. **镁** 金属元素。它的化合物、作为荧光物质可用于某些阴极射线管。与铝组成的合金可用于天线设备。极易与不同的其他元素反应。

13. **铝** 金属元素，良好导体。可用作天线设备的骨架和导线，在电解电容器中用作电极材料，也可用于半导体掺杂和形成氧化物电介质。

14. **硅** 地球的地壳内含量丰富的非金属元素。通常掺杂后形成半导体材料，氧化后形成介质。该元素和不同的化合物可用于制造二极管、晶体管和集成电路。

15. **磷** 氮族非金属元素。作为掺杂物，可用于制造半导体，同时也可作为某些电工或电子元件的合金组分。

16. **硫** 非金属元素。可与其他元素发生反应。硫的化合物常用于可充电电化学电池和电力变压器。

17. **氯** 卤族元素中的一员。室温下为气体，极易与其他不同元素

反应。有潜在的危險，如果吸入后，它能置换血液中的氧。

18. 氙 室温下为惰性气体，空气中只有少量存在。可用于某些激光器或放电灯中。

19. 铯 碱金属族中的一员。它的化合物被用于阴极射线管的荧光涂层和电镀，也可作为铁电材料。

20. 钙 碱土金属族中的金属元素。它的化合物用于阴极射线管的荧光涂层，用钙的不同化合物可以得到不同的显示颜色。

21. 铟 纯铟是一种软的金属。

22. 钛 用于大型天线支撑塔的结构中。某些化合物，特别是钛的氧化物可被用作电介质材料。

23. 钨 金属元素。用于制造特殊工业合金。

24. 铬 纯铬是有光泽的银灰色金属。用于金属板可以提高抗腐蚀性能。它的化合物可用作记录磁带和热电偶。

25. 锰 金属元素。锰的合金可用于制造永久磁铁。

26. 铁 纯铁是暗灰色金属。可用作磁性回路和变压器铁心，也可以用作热电偶。它的合金（钢）常用作无线电通信天线结构。

27. 钴 金属元素。可用于制造不锈钢。同位素钴-60 是放射性元素，用于放射医学。

28. 镍 镍的化合物被用于可充电电化学电池和制造半导体二极管。镍合金可用作电阻丝。元素镍常用于电子管。

29. 铜 纯铜是略带红色的金属。它是极好的导电和导热体，常用来制造电线和电缆。铜的氧化物被用于特殊的二极管和光电池。

30. 锌 纯锌是暗灰色金属。在电化学电池中用作负电极材料和金属（特别是铁和钢）的保护层。锌的某些化合物可以用作阴极射线管中的荧光物质。

31. 镓 一种半导体元素。与砷形成的化合物砷化镓（GaAs）可用于制造低噪声、高增益的场效应晶体管和特殊二极管。

32. 锗 类金属半导体。用于特殊的二极管、晶体管、整流器和光电池。近年来，在半导体元件中锗已大量被其他材料所替代。

33. 砷 类金属元素。用于半导体制造中的掺杂，与镓形成化合物砷化镓（GaAs）用于低噪声、高增益的场效应晶体管和特殊二极管。

34. 砷 半导体元素。用于二极管、整流器和光电池。
35. 溴 卤素族的非金属元素。室温下为红褐色液体，很容易与不同的其他元素发生反应。
36. 氙 地球大气中少量存在的惰性气体。该元素的同位素具有放射性。
37. 铷 金属元素。易与氧和氯发生反应。
38. 铯 碱土金属族的金属元素。它的化合物用于制造特殊的陶瓷介质。
39. 钇 稀土金属族的金属元素。钇元素及其化合物被用于电光器件，特别是灯和激光器。
40. 锆 金属元素。锆的氧化物可用作高温下的介电材料。铈-铈-锆的硅酸盐被用作阴极射线管的荧光材料。
41. 铈 金属元素，化学性质类似于铈。工业上将其用在特殊的焊接工艺中。
42. 铟 纯铟是银色金属，在一些真空管中用作栅极和阳极，也用于增加钢的硬度。
43. 镅 曾经叫过钷，纯净状态下是金属。用核分裂的方法使铀分裂时得到镅。
44. 钇 金属元素。用于组成合金。
45. 铈 金属元素，在自然界与铂同时存在。用于科学研究，特别是在光学器件和仪器中用它能做出良好的银色镜面。
46. 钨 铂族金属元素。在自然界，常在铜矿中发现钨。
47. 银 金属元素。是特别好的导电体和导热体，抗腐蚀。在低阻和高品质因数（选择性）电路中必须用银，也用作电接触的电极片。
48. 镉 金属元素。与镍一起用于制造可充电电化学电池，也用作保护板。与铅一样有毒，在很多地区它的处理要依据法律规定。
49. 铟 金属元素。在半导体工艺中用作掺杂。自然界它常与铊一起被发现。它的某些化合物直接就是半导体材料。
50. 锡 纯锡是灰色金属。与铅一起可制造焊料。锡箔可用作某些固定电容器的极板，锡的化合物可以用来制造电阻器，锡板可以保护金属不受腐蚀。

51. **铋** 纯铋是蓝灰色金属。在制造 N 型半导体材料时被用作掺杂剂。
52. **碲** 与硒相似的稀少的类金属。在自然界它常与其他金属,如铜一起被发现,可用于制造半导体材料。
53. **碘** 卤素族中的一员。它的放射性同位素被用于医学放射性治疗。
54. **氙** 惰性气体元素,大气中有少量存在。可用于某些闸流管、电灯泡、闪光灯和激光器。氙气闪光灯能产生极亮的白色光。
55. **铯** 碱金属中的一员。铯原子振荡可作为原子时间标准。它常被用在光电管和产生红外光的弧光灯中作为光敏材料。
56. **钡** 碱土金属中的一种元素。钡的不同化合物可以用作介电和铁电材料。氧化钡和氧化锶用作真空管阴极的涂层以增加电子发射。
57. **镧** 稀土族中的金属元素,具有多种工业用途。
58. **铈** 稀土族中的金属元素。它有若干种同位素,其中有几种具有放射性。纯铈是有光泽的金属,具有多种工业用途。
59. **镨** 稀土族中的金属元素,具有多种工业用途。
60. **钕** 稀土族中的金属元素。用于特殊的低到中功率钕铝石榴石(YAG)晶体激光器,钕-YAG 激光器被用于要求高精度的工作场合。
61. **铈** 以前曾叫做铈,稀土族元素。可从铀、钍和钷的裂变中得到。它的同位素用于特殊的光伏电池和蓄电池。
62. **钆** 稀土族中的元素。用于制造永久磁铁和特殊合金。
63. **铕** 稀土族中的元素。用于阴极射线管的彩色显示。
64. **钆** 稀土族中的元素。用于磁性器件。
65. **铽** 稀土族中的元素。用于阴极射线管的显示。
66. **镱** 稀土族中的铁磁元素,从分离铟和铪中可以得到。用于核反应堆。
67. **铪** 稀土族中的元素。可形成铁磁化合物,用于核反应堆。
68. **铒** 稀土族中的元素。用于制造陶瓷。
69. **铥** 稀土族中的元素。用于 X 射线发生设备的电源。
70. **镱** 稀土族中的元素,可以从各种含有钷和磷、铈、镧的矿石

中提炼出。用于实验室研究。

71. 镨 稀土族中的元素，纯镨是银色的。

72. 铈 过渡金属，纯铈是银色的，很容易发射电子，可用于核反应堆。

73. 铈 钷族元素，纯铈呈灰色。用于制造大容量、高精度电解电容器，真空管元器件，二极管和电阻器。

74. 铈 过渡金属，纯铈是银色的。用于开关和延迟接触、电子管的灯丝和白炽灯泡，也用作 X 射线管的阳极。

75. 铈 过渡金属，纯铈是银灰色的。用于某些热电偶和质谱仪器。

76. 铈 铂族过渡金属，纯铈是银色的。用作灯丝和精密模拟电机测量仪的轴承。

77. 铈 铂族过渡金属，纯铈是白色的。在自然界与铂一起存在。

78. 铈 过渡金属，纯铈是银白色的，抗腐蚀。在电子学和计算机系统中用作电极和开关触点涂层。也用于特殊的真空管和热电偶型测量仪。

79. 金 过渡金属，纯金是黄色的，具有光泽和延展性，抗腐蚀。在电子学和计算机系统中用作开关和开关触点的涂层。也用在特殊的半导体器件中作为电极或掺杂剂。

80. 汞 过渡金属，在室温下呈银色液体状。用于开关、继电器、高压整流器、高真空泵、灯、气压计、温度计和电化学电池。

81. 铯 金属元素。它的化合物具有光电导性，可用作红外波长的光电池。

82. 铅 沉重、柔软、可延展的金属，纯铅呈暗灰色，具有较低的熔点。用于可充电电池和蓄电池，也可用作熔丝。与锡一起可制成焊料，也可用作防电离辐射的屏蔽。

83. 铋 金属元素，白色，有抗磁性。可用作保险丝、热电偶和热电偶型测量仪

84. 钷 由镭衰减而产生的类金属。在自然界存在于沥青铀矿中。

85. 砷 以前曾叫做砷。放射性衰变后产生卤素。

86. 氡 一种有放射性、无色、稀有的气体，由镭的蜕变而得到。

可用于医学放射性治疗。如果长时间定期吸入氡则对肺癌产生影响。

87. 钷 碱金属族中的放射性元素，通过铀的人为放射性裂变而产生。

88. 镭 碱土金属族中稀有的放射性金属，纯镭呈银灰色，用于医学放射性治疗。在自然界与铀同时存在。

89. 钍 稀土族中的稀有放射性金属，纯钍呈银灰色。

90. 铀 银色稀土元素，从独居石和硅酸铀矿中得到。用于特殊的合金、化合物及用来制造光电池。

91. 镤 由铀、钍和钍裂变后产生的一种稀土元素。

92. 钷 存在于钾钒铀矿和沥青铀矿中的一种稀土元素，用作核反应堆的燃料。

93. 铈 稀土族中的人造元素。

94. 铈 稀土族中的人造元素。用于核反应堆和制造原子弹。

95. 镨 稀土族中的人造元素。用于高技术烟雾探测器。

96. 钕 稀土族中的人造元素。

97. 铈 稀土族中的人造元素。

98. 铈 稀土族中的人造元素。

99. 铈 稀土族中的人造元素。

100. 铈 稀土族中的人造元素。

101. 铈 稀土族中的人造元素。

102. 铈 稀土族中的人造元素。

103. 铈 稀土族中的人造元素。

104. 铈 人造过渡金属。

105. 铈 人造过渡金属。

106. 铈 人造过渡金属。

107. 铈 人造过渡金属。

108. 铈 人造过渡金属。

109. 铈 人造过渡金属。

110. (中文名未定) 人造过渡金属。

111. (中文名未定) 人造过渡金属。

112. (中文名未定) 从铕和铈聚变得得到的人造过渡金属。

### 24.3 化合物和混合物

下面是用于电子元件、器件和系统的一些化合物和混合物。

**铝镍钴永磁合金** 商业名字叫“阿尔尼可”，用于强永久磁铁，含铝、镍和钴，有时也含铜或钛。

**镍铝合金** 商业名字叫“阿鲁美”，用于热电偶。由三份镍和一份铝组成。

**氧化铝陶瓷** 又称刚玉，用作电子管中的绝缘子，也用于制造薄膜电路的衬底。

**锑化铝** 分子式为  $AlSb$ ，结晶状化合物，用作半导体中的掺杂剂。

**氧化钡铯** 由氧化钡和氧化铯组成，用作真空管阴极的涂层，以便在较低温度下增加电子发射。

**钛酸钡铯** 钡、铯、氧和钛的化合物，用作陶瓷介质材料，具有铁电性质和高介电常数。

**钛酸钡** 分子式为  $BaTiO_2$ ，一种用于电容器中作为介质的陶瓷，有高的介电常数和铁电性质。

**氧化铍** 分子式为  $BeO$ ，用作绝缘体和结构元件（如电阻器的芯）。

**硼酸镉** 分子式为  $(CdO + B_2O_3) : Mn$ ，用作阴极射线管荧光屏的涂层，其特征荧光是绿色或橙色。

**硒化镉** 含镉和硒的化合物，具有光电导性质，用作光电池中的半导体材料。

**硅酸镉** 分子式为  $CdO + SiO_2$ ，用作阴极射线管荧光屏的涂层，其特征荧光是橙黄色。

**硫化镉** 含镉和硫的化合物，具有光电导性质，用作光电池中的半导体材料。

**钨酸镉** 分子式为  $CdO + WO_3$ ，用作阴极射线管荧光屏的涂层，其特征荧光为蓝白色。

**磷酸钙** 分子式为  $Ca_3(PO_4)_2$ ，用作阴极射线管荧光屏的涂层，其特征荧光为白色。

**硅酸钙** 分子式为  $(CaO + SiO_2) : Mn$ ，用作阴极射线管荧光屏的



涂层，其特征荧光的范围在橙色和绿色之间。

**钨酸钙** 分子式  $\text{CaWO}_4$ ，用作阴极射线管荧光屏的涂层，其特征荧光为蓝色。

**铬镍(耐热)合金** 它是镍铬铁合金，用于制造热电偶。

**二氧化铬** 分子式为  $\text{CrO}_2$ ，用于制造特殊的热电偶和录音(像)带。

**康铜** 这是铜、镍合金的商用名，用于热电偶和标准电阻。

**氧化铜和硫化铜** 具有半导体性质的化合物，用于制造整流器、仪表、调制器和光电池。近年来大量被硅所取代。

**铁氧体** 这是含有氧化铁和一种或多种其他金属的**铁磁性材料**的商用名。用作电感材料和开关元件，也用于阴极射线管的偏转线圈和极低频、低频、中频和高频无线电的环形接收天线。

**砷化镓** 分子式为  $\text{GaAs}$ ，镓与砷的化合物。是用作低噪声二极管、变容管和场效应晶体管的半导体材料。

**磷化镓** 镓与磷的化合物，用作发光二极管的半导体材料。

**石榴石** 含有硅和其他元素的矿物质，硬的晶体材料。与铝和钇混合后的石榴石用于固体激光器。

**二氧化锗** 分子式为  $\text{GeO}_2$ ，可从不同来源得到的灰色或白色粉末。在氢气或氦气中还原可以得到元素锗。

**氦-氖** 记作 He-Ne。这两种气体的混合物用于不同用途的廉价的激光器。输出光在可见光谱的红光部分。

**铋化铟** 铟和铋的化合物，用于制造半导体元件。

**氧化铁** 含有铁和氧的化合物，最常见的例子就是铁锈。用于特殊的可充电电池和蓄电池。

**过氧化铅** 该化合物用于铅-酸电池和蓄电池中正电极的组成部分。

**氟化镁** 用于长余辉阴极射线管荧光屏的涂层，荧光呈橙色。

**硅酸镁** 用于阴极射线管荧光屏的涂层，荧光呈橙红色。

**钨酸镁** 用于阴极射线管荧光屏的涂层，荧光呈蓝白色。

**磁钢** 含铬、钴、锰、钢和钨的高剩磁合金。用于制造永久磁铁。

**二氧化锰** 分子式为  $\text{MnO}_2$ ，与碳粉混合后可用在电化学干电池

中作为去极化剂。

**锰铜** 这是低温度系数合金的商用名。可以用来制造精密电阻的金属丝，它的成分为84%的铜、12%的锰和4%的镍。

**蒙内尔合金** 这是镍、铜、铁、锰和少量其他金属组成的合金的商用名称。

**碘化汞** 分子式为 $\text{HgI}_2$ 。该化合物的晶体用作高分辨率 $\gamma$ 射线谱仪的检测器。

**氧化汞** 化合物，用作电化学汞电池和蓄电池的阴极。

**碲镉汞** 分子式为 $\text{HgCdTe}$ ，一种合金。作为半导体用于晶体管、集成电路和红外检测器。

**钕钇铝石榴石** 按字头缩写为钕YAG，是一种混合物。用作小功率固体激光器，用于医学及其他精度要求高的场合。

**镍络合金** 做成丝和条，用于制造电阻器和加热器元件。

**镍镉** 缩写为NiCd，一种混合物。可用作充电电池和蓄电池。

**氢氧化镍** 一种化合物。可用于可充电电化学电池，用于老的笔记本电脑的镍镉和镍-金属氢化物电池就是一例。

**镍铁** 一种混合物。用于特殊的充电电池。其中正电极板是氢氧化镍，负电极板材料是氧化铁粉与镉的混合物，而电介质是氢氧化钾。

**氧化镍** 镍和氧的化合物。用于特殊的半导体元件，特别是二极管。

**镍银** 一种铜、镍和锌的合金。有时用来制造电阻丝，也叫**德国银**。

**铂碲** 这是两种金属，当它们直接接触时形成热电偶，用于特殊的测量仪器。

**氯化钾** 分子式为 $\text{KCl}$ 。用作长余辉阴极射线管荧光屏的涂层，荧光呈深红色或白色。

**氰化钾** 分子式为 $\text{KCN}$ ，是毒性很大的盐。用作电镀中的电介质。

**氢氧化钾** 与其他不同的化合物混合起来，用于充电电池和蓄电池的一种化合物。镍镉电池就是一例。

**碲砷银(矿)** 三硫化砷银晶体的商用名。这种化合物的人工晶体用于可调谐红外发射器件。

**碳化硅** 分子式为 SiC，硅和碳的化合物。用作半导体、研磨材料和难熔衬底。工业应用中，这种化合物的商业名称有时叫**金刚砂**。

**二氧化硅** 分子式为 SiO<sub>2</sub>，也叫硅石，常用于红外发射器件。在晶体管和集成电路的钝化工艺中，在晶片表面生长一薄层二氧化硅以防止 PN 结暴露在外。

**氧化硅** 一氧化硅与二氧化硅的混合物，具有介质性质。用于制造金属-氧化物-半导体 (MOS) 器件。

**硅钢** 含硅 2%~3% 的高磁导率、高阻钢。在变压器和其他电磁器件中用作铁心材料。

**银焊料** 由银、铜、锌组成的一种合金焊料，有较高的熔化温度。

**碘化钠** 晶状化合物，当它遇到高速亚原子粒子和放射性照射时会闪烁。可用作电离辐射的检测和计数。

**硅酸钠** 又叫**水玻璃**，可作为防火剂和保护层。

**钢** 铁、碳和其他金属的合金。用于天线支撑塔结构，永久磁铁和电磁铁，也可用作高抗拉强度线的芯材料。

**六氟化硫** 一种气体。在一些电源变压器中用作冷却剂和绝缘物。

**硫酸** 分子式为 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>，含有氢、硫和氧的一种酸。用于稀释溶液或在可充电铅酸电池和蓄电池中用作电介质。

**氮化钽** 化合物。用于制造特殊的高精度薄膜电阻器。

**硫化氧铊** 铊、氧和硫的化合物。在光电池中用作光敏材料。

**氧化钨** 与钨混合后用于电子管灯丝和阴极以增加电子发射率。

**锡铅** 这两种元素的合金通常用作焊料，一般锡与铅的比例为 50 : 50 或 60 : 40。

**氧化锡** 锡与氧的化合物，用作制造薄膜电阻器的材料。

**二氧化钛** 钛和氧的化合物，用作电介质材料。

**钇铝石榴石** 按字头缩写记为 YAG，晶体状混合物，与其他元素，如钕一起用于低功率固体激光器。

**钇铁石榴石** 按字头缩写记为 YIG，一种晶体混合物。用于声学延迟线、参量放大器和滤波器。

**铝酸铍** 有两种类似的化合物都用作阴极射线管荧光屏的涂层。一种呈亮蓝色，另一种呈亮红色。

**硅酸铍锌** 用作阴极射线管荧光屏的涂层，荧光呈黄色。

**硅酸铟铍锆** 用作阴极射线管荧光屏的涂层，荧光呈白色。

**硼酸铟** 用作阴极射线管荧光屏的涂层，荧光呈黄橙色。

**硫酸铟镉** 有两种相似的化合物都用作阴极射线管荧光屏的涂料。一种呈亮蓝色，另一种呈亮红色。

**锑酸铟** 用作阴极射线管荧光屏的涂层，荧光呈黄绿色。

**氟化铟铯** 用作阴极射线管荧光屏的涂层，荧光呈橙色。

**正硅酸铟** 商用名也叫硅酸铟。用作阴极射线管荧光屏的涂料，荧光呈黄绿色。

**氧化铟** 用作阴极射线管荧光屏的涂料，荧光呈蓝绿色。也用于制造某些电子元件，如与电压相关的电阻器（变阻器）。

**硅酸铟** 用作阴极射线管荧光屏的涂料，荧光呈蓝色。

**硫酸铟** 用作阴极射线管荧光屏的涂料，荧光呈蓝绿色或黄绿色。

**氧化锆** 各种含锆的化合物，特别是二氧化锆 ( $ZrO_2$ )，具有有价值的高温电介质特性。

## 第 25 章 电子学缩写词

下面是在电子学和相关科技领域常遇到的缩写词。

在许多情况下，缩写词全部是小写字母（如 adu 或 bw），相对应的大写字母（如 ADU 或 BW）常常同样可被接受。只有当大写和小写字母的缩写词的意义或多或少有些不同时，才既列出全小写字母的缩写词，也列出全大写字母的缩写词。

当缩写词有些字母是小写，另一些是大写（例如 aH 或 Ah）时，应严格照写缩写词，不能随意更改。

a	面积；加速度；英亩；阳极
A	安培；面积；增益；阳极
AAC	自动孔径控制
ab-	CGS 制电磁制单位词首
abA	CGS 电磁制安培
abc	自动低音补偿；自动偏置控制；自动亮度控制；自动亮度补偿
abC	CGS 电磁制库仑
abF	CGS 电磁制法拉
abH	CGS 电磁制亨利
abS	CGS 电磁制西门子
ABS	绝对值；绝对值函数
abV	CGS 电磁制伏特
abW	CGS 电磁制瓦特
abWb	CGS 电磁制韦伯
ac, AC	交流电流；空气动力学中心；方位角控制；电子计算机
a/c	飞机；空调
ACA	自动电路分析仪

acc	自动彩色控制; 自动色彩补偿; 加速度
ACIA	非同步通信界面匹配器
acr	盒式录音机; 盒式录音
ACS	自动控制系统
ACU	自动呼叫单元
A/D, a/d, AD	模拟-数字转换; 模数转换器
adc, ADC	模数转换器
ADF	自动定向跟踪仪
ADI	交替数字转换
adp	自动数据处理
ADT	大西洋夏令时间
adu	自动拨号单元
aF	阿法 ( $10^{-18}\text{F}$ )
AF	音频
afc, AFC	自动频率控制; 自动频率扼流圈
AFPC	自动频率/相位控制
AFSK	音频移频键控
agc, AGC	自动增益控制
Ah	安培小时
aH	阿亨 ( $10^{-18}\text{H}$ )
AI	人工智能
AIP	美国物理学会
Al	铝的化学符号
alc, ALC	自动电平控制
ALU	运算器
Am	镅的化学符号
AM	幅度调制; 幅度调制器
AMI	交替符号变换
AMNL	幅度调制的噪声电平
amp	安培; 放大器
amp-hr	安培小时

amu, AMU	原子质量单位
anl, ANL	自动噪声限制器; 自动噪声限制
ANSI	美国国家标准协会
ant	天线
apc, APC	自动相位控制; 自动图像控制
APL	平均图像电平
Ar	氩的化学符号
ARRL	美国无线电中继联盟
ARS	业余无线电服务; 业余无线电站
As	砷的化学符号
ASA	美国标准协会
ASC I	美国标准信息交换码
ASRA	自动立体声录音放大器
AST	大西洋标准时间
At	碲的化学符号
ATR	收发转换
atto	乘 $10^{-18}$ 的词头
ATV	业余电视
Au	金的化学符号
AU	天文单位
a/v	可听到的/可见到的
aV	阿伏 ( $10^{-18}\text{V}$ )
avc, AVC	自动音量控制; 自动电压控制
AWG	美国线规
az-el	方位-高度
B	双极型晶体管的基极
B	电纳; 磁通量密度; 电池; 低音; 硼的化学符号; 计算机中数字的位; 双极型晶体管的基极; 低音; 靶 (恩)
B&S	美国线规

Ba	钡的化学符号
BA	电池
BAL	平衡
BAT	电池；间歇存储器
BC	广播
BCD	二进制编码的十进制
BCFSK	二进制码移频键控
BCI	广播干扰
BCL	广播听众；广播监听
BCN	信标，灯塔
BCO	二进制编码的八进制
BCST	广播
BDC	二-十进制计数器
Be	铍的化学符号
BeO	氧化铍的化学符号
BeV	$10^9\text{eV}$
BFO	差频振荡器
BG	伯明翰线规
B-H	磁通密度和磁力
Bi	铋的化学符号
biMOS	双极型金属氧化物半导体
bip	双图像处理
BIPM	国际计量局
bit	比特（二进制码）
BITE	机内测试设备
BK	击穿
BO	拍频振荡器
bp	带通
bpi	位/英寸
bps	位/秒
Br	溴的化学符号



Btu, BTU	英国热量单位
bw	带宽; 黑和白
b&w, b/w	黑和白
BWA	回波放大器
BWG	伯明翰线规
BWO	回波振荡器
BX	铠装绝缘电缆
c	百分之一; 电容; 真空中光速; 卡; 摄氏; 居里; 烛光 (光强度单位); 双极型晶体管的集电极
C	电容; 电容器; 双极型晶体管的集电极; 摄氏; 库仑; 碳的化学符号
Ca	钙的化学符号
CAD	计算机辅助设计
cal	卡
CAL	会话型代数语言
CAM	计算机辅助制造; 可编址存储器
cap	电容; 电容器
CAT	计算机轴向层析 X 射线摄影法
CATV	共用天线电视系统
$C_B$	双极型晶体管基极电容
Cb	铈的化学符号 (铌 Nb 的旧称)
CB	民用频带
$C_c$	双极型晶体管集电极电容
cc	立方厘米
CCA	电流控制放大器
CCD	电荷耦合器件
CCIS	公用通道界面信号
CC, c/c	闭路
CCTV	闭路电视

ccw	逆时针方向
cd	坎德拉
Cd	镉的化学符号
cd/m <sup>2</sup>	坎德拉每平方米
CDT	中央日照时间
C <sub>E</sub>	双极型晶体管发射极电容
Ce	硒的化学符号
centi-	[词头] 厘, 10 <sup>-2</sup>
Cf	铀的化学符号
C <sub>GK</sub>	真空管中栅极与阴极间电容
C <sub>GP</sub>	真空管中栅极与板极间电容
egs	厘米-克-秒
CHIL	电流错乱注入逻辑
C <sub>i</sub> , C <sub>in</sub>	输入电容
Ci	居里 (放射性强度单位)
circ	电路; 圆的
cis	在...的一边
ckt	电路
Cl	氯的化学符号
Cm	镉的化学符号
c. m. , cir mil	圆密耳 (直径为 0.001in 圆的面积)
cm <sup>2</sup>	平方厘米
cm <sup>3</sup>	立方厘米
C <sub>max</sub>	最大电容
C <sub>min</sub>	最小电容
CML	电流型逻辑电路
CMOS	互补型金属氧化物半导体
CMR	共模抑制
CMRR	共模抑制比
CMYK	蓝/深红/黄/黑彩色模型
C <sub>o</sub> , C <sub>out</sub>	输出电容

Co	钴的化学符号
COBOL	面向商业的通用语言
CODEC	编码器-译码机；压缩器-减压缩器
COM	计算机输出缩微胶片
.com	国际互联网站点域名后缀
COS	互补对称
cp	烛光；中央处理器
cps	字符/秒；周/秒
CPU	中央处理器，中央处理单元
Cr	铬的化学符号
CRO	阴极射线示波器
crt, CRT	阴极射线管
C <sub>s</sub>	场效后晶体管源极电容；标准电容
Cs	铯的化学符号
CS	互补对称
CST	美国中部地区标准时间
CTL	互补晶体管逻辑电路
Cu	铜的化学符号
cu ft	立方英尺
cu in	立方英寸
cur	电流
CW, cw	连续波；连续波发射；逆时针
d	分；差分、微分；距离；密度；场效应晶体管的漏极；耗散；日；度；直径；驱动；深（度）
D	分；十；氘的化学符号；场效应晶体管的漏极；位移；通量密度；耗散因子；耗散；行列式；扩散常数；直径
da	分；十
DA, D/A, d/a	数字-模拟；数模转换器

DAC	数模转换器
DACI	直接相邻通道干扰
DAGC	延迟式自动增益控制
DAM	数据编址存储器
DART	数据分析记录磁带
DAT	扩散合金晶体管
DAVC	延迟式自动音量控制;延迟式自动电压控制
dB	分贝;分贝数
DB	扩散基极;双击穿
dBa	可调分贝数
dBc	关于载流子的分贝
dBd	相对于半波偶极振子天线主瓣信号的分贝数
DBD	双基极二极管
dB <sub>i</sub>	相对于各向同性天线信号的分贝数
dB <sub>j</sub>	以 1mV 为零电平的信号电平
dB <sub>k</sub>	以 1kW 为零电平的信号电平
dB <sub>m</sub>	以 1mW 为零电平的的分贝数
DBM	数据库管理
dB <sub>m0</sub>	相对于零传输电平的 dB <sub>m</sub>
dB <sub>mp</sub>	相对于噪声评价系数的 dB <sub>m</sub>
dB <sub>m0p</sub>	相对于噪声评价系数的 dB <sub>m0</sub>
dB <sub>mV</sub>	相对于 1mV 的分贝数
dB <sub>r</sub>	相对于零传输电平的的分贝数
dB <sub>rap</sub>	在参考音频功率之上的分贝数
dB <sub>rn</sub>	在参考噪声之上的分贝数
dB <sub>rnc0</sub>	在 dB <sub>rnc</sub> 中相对于零电平的噪声
dBV	相对于 1V 的分贝数
dBW	相对于 1W 的分贝数
dB <sub>x</sub>	在参考耦合之上的分贝数

dc, DC	直流; 直接耦合; 直接变换
D/CMOS	DMOS 与 CMOS 的组合
DCM	数字电容计
DCTL	直接耦合晶体管逻辑
dcu	十进制计数器
dcv, DCV	直流电压
DDA	数字微分分析器
DDD	直接远距离拨号
DE	判定元件
deac	频率校正电路, 减加重电路
deca-, deka-	[词头] $10$
deci-	[词头] $10^{-1}$
deg	度
dens	密度
df, DF	测向器; 测向
dg	分克
dia	直径
DIIC	介质绝缘集成电路
DIP	双列式封装
dj	扩散结
DMA	直接存储器存取; 直接存储器寻址
DMM, dmm	数字式万用表
DMOS	双扩散金属-氧化物半导体
DNL	微分非线性
DOS	磁盘操作系统
dwnconv	下变频器, 下变频
dp	双极
DP	双极; 数据处理
DPDT, dpdt	双极; 双刀双掷
DPM, dpm	数字功率计; 数字面板表; 每分钟蜕变数

---

DPST	双极；双刀单掷
dr	英钱（等于 1.771g）
DRO	数字式读出
DSB	双边带
DSBSC	双边带；抑制载波
dsc	双丝包的
DSP	数字信号处理；数字信号处理器；二次镀银
DSR	动态三维再现
DSS	直接站选
DSSC	双边带；抑制载波
dt	双掷；时间微分
DT	双掷；数据传输
DTL	二极管-晶体管逻辑
DTS	数据传输系统；数据遥测系统
DU	占空因数，工作周期
dv	速度微分
DVM	数字电压表
DVOM	数字电压-欧姆-毫安表
DX	远距离通信；在外国的无线电站；双重的
Dy	镉的化学符号
dyn	达因
dyna-	功率
e	电压；双极型晶体管的发射极；电子电荷；自然对数的底（约为 2.71828）；偏心率；尔格
E	电压；电场强度；双极型晶体管的发射极；加重；能量
$E_0$	零参考电压

EAM	电子计算机
$E_{avg}$	平均电压
$E_b$	电池组电压
$E_{BB}$	真空管中板极供电电压
EBI	等价背景输出
EBR	电子束记录
EBS	电子轰击半导体
ec	漆包线
$E_{CX}$	真空管中栅极供电电压
ECDC	电化学扩散收集极
ECG	心电图；心电图描记器
ECL	发射极耦合逻辑
ECM	电子干扰
ECO	电子耦合振荡器
ECTL	发射机耦合晶体管逻辑
EDD	包络延迟畸变
EDP	电子数据处理
EDT	东部夏令时间；酒石酸氢化二胺
EDU	电子显示单元
.edu	国际互联网教育用站点域名后缀
EDVAC	电子离散变量自动计算机
EE	电气工程；电气工程师
$EMO_{eff}$	等效电压
EEG	脑电图；脑电图扫描仪
EEPROM	可电擦除可编程只读存储器
EFL	发射极跟随逻辑
$E_G$	真空管中栅极电压；FET 中栅极电压； 发生器电压
$E_H$	真空管中热子电压
EHF	极高频
EHV	超高压

$E_i, E_{in}$	输入电压
EIT	培训中的工程师
$E_K$	真空管中阴极电压
EKG	心电图; 心电图描记器
EL	电致发光
ELD	电致发光显示
ELSIE	电子信件分类和指示设备
$E_m$	最大电压; 最大结场强
EM	电磁; 有效调制; 电磁铁; 电磁器; 电子显微镜; 曝光表; 电动的
$e/m_e$	电子的荷质比
$E_{max}$	最大电压
EMC	电磁兼容性
EMF, emf	电动势
ENIAC	电子数字积分计算机
ENIC	电压负阻转换器
$E_o, E_{out}$	输出电压
EOF	文件结束
EOL	线路终端
EOLM	电光调制器
EOR	运行结束
EOS	电光系统
EOT	磁带末端
EOTS	电光跟踪系统
$E_p$	真空管板极电压; 峰值电压
EP, ep	密纹唱片
$E_{pk}$	峰值电压
$E_{pk-pk}, E_{p-p}, E_{pp}$	峰-峰值电压
EPROM	电可编程只读存储器
EPU	电子电源; 应急用电源
$E_q, eq$	方程; 等价



equiv	等价
$E_R$	电阻上的压降
Er	铟的化学符号
$E_{rms}$	方均根电压
ERP	有效发射功率
$E_s$	真空管屏极电压
Es	镱的化学符号
ESG	电子扫描发生器
ESS	电子开关系统
EST	东部夏令时间
esu	静电单位
$E_{sup}$	真空管抑制极电压；供电电压
ETC	电子温度控制
Eu	铕的化学符号
eV	电子伏
$E_X$	电抗上的压降；激发能
exa-	乘 $10^{18}$ 词头；二进制中乘 $2^{60}$ 词头
exc	激励器；激励
exp	指数的；实验
$E_Z$	阻抗上的压降
f	乘 $10^{-15}$ 词头；频率；函数；因数
$F_0$	阻尼因数
F	法拉；力；氟的化学符号；费米；焦距；真空管中的灯丝；熔丝；法拉第常数；逻辑错误
fax	传真
$f_c$	载波频率
fc	英尺烛光
FCC	美国联邦通信委员会
$f_{\infty}$	截止频率

FDM	频分复用
FDS	法拉第暗空间
Fe	铁的化学符号
FE	铁电体
FE-EL	铁电体-电致发光
femto-	乘 $10^{-15}$ 词头
ferfi-	表示磁性的词头
ferro	表示磁性的词头
FET	场效应晶体管(通常指结型场效应晶体管)
FET VOM	场效应晶体管伏特-欧姆-毫安表
FF	触发器
FFI	燃料流量指示器
fig	图
fil	灯丝
FIR	远红外
fl	英尺-朗伯
$f_m$	调制频率
Fm	镱的化学符号
FM	频率调制
FORTRAN	公式翻译程序语言
FOSDIC	计算机胶片光扫描输入装置
$F_p$	功率损耗因素
FPIS	借电离层散射的前向传播
fps	每秒英尺; 每秒帧数; 英尺-磅-秒
fr	弗朗克林
Fr	钫的化学符号
FRUGAL	用于通用语言的 FORTRAN 规则
FRUSA	柔软的可卷起来的太阳能电池阵列
FSK	移频键控
FSM	场强计

FSR	反馈移位寄存器
ft	英尺
ft-L	英尺-朗伯
ft-lb	英尺-磅
FUBAR	不能辨认的混乱
<i>g</i>	电纳; 场效应晶体管的栅极
<i>g</i>	重力; 克; 发生器; 真空管的栅极
<i>G</i>	电纳; 千兆; 偏转因子; 导流系数; 重力常数; 发生器; 场效应晶体管的栅极
Ga	镓的化学符号
GA	向前
GaAs	砷化镓的化学符号
GaAsFET	砷化镓场效应晶体管
Gd	钆的化学符号
GDO	栅陷振荡器
Ge	锗的化学符号
gen	发生器
GeV	千兆电子伏
GFI	接地失效断路器
$g_t$	正向跨导
G/G, G-G	地对地
GHz	千兆赫
$G_i, G_{in}, G_f, g_i, g_{in}, g_f$	输入电纳
giga-	乘 $10^9$ 词头; 二进制中乘 $2^{30}$ 词头
GJD	结型锗二极管
$g_m$	跨导
gm	克
gcal, gmcals	克-卡
gmcm	克-厘米
gmm	克-米

GMT	格林威治平均时间
GND, gnd	地
$G_o, G_{out}, g_o, g_{out}$	输出电纳
.gov	国际互联网政府用站点域名后缀
$G_p, g_p$	真空管板极电纳
gpc	锗点接触
GSR	电流集肤效应
h	百的词头; 普朗克常数; 小时; 高度
H	磁场强度; 磁化力; 氢的化学符号; 单元函数; 水平; 热子; 亨利; 谐波
hal	卤素
HCD	硬盘复制机
HCM	半周磁化器
HDB3	高密度双极-3
He	氦的化学符号
hecto-	乘 $10^2$ 的词头
He-Ne	氦-氖的化学符号
Hf	铪的化学符号
HF	高频
Hg	汞的化学符号
HIC	混合集成电路
HIDM	高信息三角形调制
hi-fi	高保真
hipot	高位
HLL	高级语言
Ho	铥的化学符号
hor, horiz	水平
HOT	水平输出变压器; 水平输出晶体管; 水平输出管

hp	马力
h-p	高压
hr	小时
HSM	高速存储器
HTL	高阈值逻辑
HV	高电压
hy	亨利 (更常用 H)
Hz	赫兹
<i>i</i>	瞬间电流; $-1$ 开方的数学符号; 瞬间值; 本征半导体; $\lambda$ 射角; 平行于横轴的矢量; $\lambda$ 射射线
<i>I</i>	电流; 碘的化学符号; 本征半导体; 光强度
$I_A$	真空管阳极电流
$I_{AC}, I_{ac}$	交流电流分量
$I_{AF}$	音频电流
IAGC	瞬时增益自动控制
ICAS	断续商业和业余爱好者服务
ICBM	洲际弹道导弹
$I_{CBQ}$	共基极双极型晶体管电路中静态反向集电极电流
ICBS	互联商务系统
$I_{CEO}$	共发射极双极型晶体管电路中静态反向集电极电流
ICET	工程技术人员认证协会
$I_{CO}$	双极型晶体管集电极截止电流
ICW	断续等幅波
ID	识别; 标识设定器; 内径
i. d.	内径
$I_{DC}, I_{dc}$	直流电流分量

$I_D$ (off)	场效应晶体管漏极截止电流
IDOT	仪器在线转录器
IDP	工业数据处理; 集成数据处理; 交调畸变百分比
$I_{DSS}$	场效应晶体管零栅压下的漏极电流
$I_E$	双极型晶体管发射极电流
IEC	集成电子元件
IEE	电信(电气)工程师协会(英国)
IEEE	电气和电子工程师协会(美国)
$I_f$	真空管灯丝电流
$I_F, i-f$	中频
$I_{FB}$	集成电路反馈电流
$I_{FS}$	全标电流
$I_g$	真空管栅极电流
$I_G$	场效应晶体管栅极电流
IGFET	绝缘栅场效应晶体管
$I_{GSS}$	场效应晶体管反向栅极电流
$I_h$	真空管热子电流; 维持电流
IHF	制止触发器
$I_i$	瞬间电流; 输入电流
$I_{in}$	输入电流
$I_K$	真空管阴极电流
$I^2L$	集成注入逻辑(电路)
$I_m$	测量电流; 最大电流
IM	交调
$I_{max}$	最大电流
IMPATT	碰撞雪崩渡越时间二极管
In	铟的化学符号
in	输入; 英寸
ind	指示器; 电感; 电感器

INV, inv	反向器; 倒数; 反函数
I/O	输入/输出; 输入/输出设备; 输入/输出端口
$I_o, I_{out}$	输出电流
$I_p$	真空管板极电流
$I_p$	峰值电流
ipm	英寸每分钟
ips	英寸每秒钟
$I_k$	电阻器中电流
Ir	铱的化学符号
IR	电流和电阻乘积; 绝缘电阻; 红外线
IRE	无线电工程师协会
$I_{RF}$	射频电流
$I_s$	场效应晶体管源极电流; 真空管屏极电流
ISCAN	无惯性方向图可控通信天线
$I_{sup}$	真空管抑制极电流
$I(t)$	过渡响应
$I_x$	电抗中电流
$I_y$	电纳中电流
$I_z$	阻抗中电流
j	j算子 (-1开方的符号)
J	焦耳; 起重机; 联接器; 发射功率
JEDEC	联合电子器件工程协会
JFET	结型场效应晶体管
JHG	焦耳热梯度
J/K	焦耳每开尔文
J/(kgK)	焦耳每千克开尔文
J/s, J/sec	焦耳每秒
JSR	转向子程序

k	千; 常数; 介电常数; 玻耳兹曼常数
K	钾的化学符号; 开尔文; 常数; 继续 (无线电报学中的术语); 真空管阴极; 千
kA	千安
Kb	千比特
kc	千周 (已不用)
kcal	千卡
kCi	千居里
kcs	每秒 1000 字符
KDP	磷酸二氢钾
keV	千电子伏
kg	千克
kgc	千克卡
kgm	千克米
kg/m <sup>3</sup>	千克每立方米
kHz	千赫兹
kilo	乘 10 <sup>3</sup> 的词头; 二进制中乘 2 <sup>10</sup> 的词头
kJ	千焦耳
km	千米
Kr	氪的化学符号
kV	千伏
kVA	千伏安
kVAR	千乏
kVARh	千乏小时
kW	千瓦
kΩ	千欧
l	长度; 升; 低; 流明
L	电感
L	朗伯; 左立体声声道; 平均寿命; 低; 拉



	普拉斯变换
La	镧的化学符号
LASCR	光激发晶闸管整流器
LASCS	光激发晶闸管开关
lb	磅
LC	电感电容
LC	液晶
LCD	液晶显示
LCR	电感-电容-电阻
$L_d$	分布电感
LED	发光二极管
LF	低频
Li	锂的化学符号
LIY	液晶
LLL	低电平逻辑
lm	流明
$\text{lm}/\text{ft}^2$	流明每平方英尺
lmhr	流明小时
$\text{lm}/\text{m}^2$	流明每平方米
$\text{lm}/\text{W}$	流明每瓦
ln	以 e 为底的自然对数
lo	低
LO	本地振荡器; 低
log	以 10 为底的对数
$\log_e$	以 e 为底的自然对数
$\log_{10}$	以 10 为底的对数
loran	远程导航
LP	低功率; 密纹; 低压
LPB	光按钮
lpm, l/m	每分钟线数
$\text{lpW}, \text{l/W}$	流明每瓦

Lr	铈的化学符号 (也可用 Lw)
L+R	左右立体声声道的和
L-R	左右立体声声道的差
LSB	最小有效位; 低端边带
LSC	最低位字符
LSD	最低位
LSI	大规模集成
LSSC	低端边带被压缩载波
LTROM	线性转换只读存储器
Lu	镱的化学符号
LUF	最低可用频率
LV	低压
LVDT	线性变量微分变换
Lw	铈的化学符号 (也可用 Lr)
lx	勒克斯
LZT	铅锆英石-钛酸盐
m	乘 $10^{-3}$ 词头; 质量; 米; 英里; 调制系数
M	乘 $10^6$ 词头; 互感; 折射系数
m <sup>2</sup>	平方米
m <sup>3</sup>	立方米
mA	毫安
MADT	微合金扩散晶体管
MAG	最大可用增益
mag	磁; 放大率
magamp	磁放大器
MAR	存储地址寄存器
MAT	微合金晶体管
max	最大
mb	毫巴

MBM	磁泡存储器
MBO	单稳态阻塞振荡器
MBS	磁控管射束开关
mc	毫居里；米-烛光
Mc	兆周（已不用）
MCG	磁心动图；磁心动记录器
mCi	毫居里
MCi	兆居里
MCW	已调制连续波
Md	钷的化学符号
MDI	磁航向指示器
MDS	可辨别最小信号
MDT	山区日照时间
$m_e$	电子静止质量
meg	兆欧；兆比特
mega	乘 $10^6$ 词头；二进制中乘 $10^{20}$ 词头
MESFET	耗尽/增强混合型场效应晶体管
MeV	兆电子伏
mF	毫法
MF	中频
MFSK	多频移键控
Mg	镁的化学符号
MGD	磁气体动力学
MHD	磁流体动力学
MHz	兆赫兹
mi	英里
mic, mike	拾音器
MIC	微波集成电路；拾音器
MICR	磁墨水字符识别
micro-	乘 $10^{-6}$ 词头；非常小
.mil	国际互联网军事用站点域名后缀

milli-	乘 $10^{-3}$ 词头
min	最小
MIR	存储器-信息寄存器
mks	米/千克/秒
mL	毫朗伯
ml	毫升
mm	毫米
MMF	磁动势
mmF	微微法 (常称皮法)
mmol	毫摩尔
MMV	单稳态多谐振荡器
$m_n$	中子静止质量
Mn	锰的化学符号
mnr	监视器
Mo	钼的化学符号
MO	主振荡器
mod	调制器; 调制; 调整; 模数
mol	摩尔
MOPA	主振荡器/功率放大器
MOS	金属-氧化物半导体; 金属-氧化物硅
MOSFET	金属-氧化物-硅场效应晶体管
MOSROM	金属-氧化物-硅只读存储器
MOST	金属-氧化物-硅晶体管
MOV	金属-氧化物压敏电阻
MPG	微波脉冲发生器
mph	英里每小时
MPO	最大功率输出
mps	米每秒; 英里每秒
MPT	最大功率传输
MPX	多路调制器
MR	存储寄存器

mrاد	毫弧度
ms, msec	毫秒
msg	信息
MSI	中规模集成
MST	山区标准时间
mtr	米 (更常用的是缩写词 m)
mu	放大系数; 磁导率; 微; 微米; 电矩; 介电常数; 磁矩; 分子电导率
MUF	最大可用频率
MUPO	最大无畸变输出功率
MUSA	可变方向的多元菱形天线
mV	毫伏
MV	兆伏; 多谐振荡器; 中等电压
MVA	兆伏安
mV/m	毫伏每米
MVP	毫伏电位计
mW	毫瓦
MW	兆瓦
Mwh	兆瓦小时
mWRTL	毫瓦电阻-晶体管逻辑
Mx	麦克斯韦
$\mu$	$10^{-6}$ ; 放大系数; 磁导率; 微; 微米; 电矩; 介电常数; 磁矩; 分子电导率
$\mu A$	微安
$\mu\mu$	微微 (更常用的是缩写词皮)
$\mu_B$	波耳磁子
$\mu Ci$	微居里
$\mu_e$	电子磁矩
$\mu F$	微法
$\mu g$	微克

$\mu\text{H}$	微亨
$\mu\text{l}$	微升
$\mu_n$	核磁子
$\mu_0$	自由空间磁导率常数
$\mu\text{P}$	微处理器
$\mu\nu$	微姆欧 (更常用微西门子, 缩写为 $\mu\text{S}$ )
$\mu\Omega$	微欧
$\mu\Omega \cdot \text{cm}$	微欧-厘米
$\mu_p$	质子磁矩
$\mu\text{s}, \mu\text{sec}$	微秒
$\mu\text{S}$	微西门子
$\mu\text{V}$	微伏
$\mu\text{V}/\text{m}$	微伏每米
$\mu\text{W}$	微瓦
$\mu\text{W}/\text{cm}^2$	微瓦每平方厘米
$n$	数 (通常为整数)
$n$	纳 ( $10^{-9}$ ); 折射系数; 物质的量
$\text{N}$	氮的化学符号; 数; 自然数; 自然数列; 牛顿
$\text{nA}$	毫微安
$\text{Na}$	钠的化学符号
nano-	乘 $10^{-9}$ 的词头
$\text{NAP}$	核辅助功率
$\text{NAPU}$	核辅助功率站
$\text{NARTB}$	全国无线电及电视广播员协会 (美国)
$\text{NAS}$	国家科学院 (美国)
$\text{NAVAIDS}$	航海救护
$\text{Nb}$	铌的化学符号
$\text{NB}, \text{N/B}$	窄带
$\text{NBFM}$	窄带频率调制

NBTDR	窄带时域反射仪
NBVM	窄带声音调制
NBW	噪声带宽
nc	不连接
NC	常闭；不连接；数控
N/C	数控
NCS	无线电网控制站
Nd	钕的化学符号
Ne	氖的化学符号
NEB	噪声等效带宽
NEC	全国电气规程（美国）
NEDA	全国电子经销商协会（美国）
NEI	等效噪声输入
NEL	国家电子实验室
NELA	全国电照明协会
NEMA	全国电气制造商协会（美国）
NEP	等效噪声功率
NEPD	等效噪声功率密度
NESC	全国用电安全条例（美国）
net	网络
Net	因特网
NET	等效噪声温度
nF	毫微法
NF	噪声指数
NFET	N 沟道结型场效后晶体管
NFM	窄带频率调制
NG	负辉；不通行；不行
NGT	噪声发生管
nH	毫微亨
Ni	镍的化学符号
NIDA	数字集成微分分析器

NIF	噪声改善系数
NIPO	负输入/正输出
NIR	近红外
NLR	非线性电阻
NLS	无载速度
$N/m^2$	牛顿每平方米 (帕斯卡)
NMOS	N 沟道金属-氧化物半导体
NMR	核磁共振; 正常模式抑制
NMRI	核磁共振成像
No	镉的化学符号
No. , no.	数
NO	常开
$N_p, N_{pv}$	原边绕组匝数
$N_p$	奈培; 镱的化学符号
NPM	每分钟尖峰信号数
NP0	负-正-零
NPS	每秒尖峰信号数
NRD	负阻二极管
NRZ	不归零
$N_s, N_{sec}$	二次绕组匝数
NSPE	全国职业工程师协会
NTC	负温度系数
NTSC	美国国家电视系统委员会
nu	希文 $\nu$ ; 磁阻率
nV	毫微伏
nW	毫微瓦
O	氧的化学符号; 输出
O <sub>2</sub>	普通氧分子的化学符号
O <sub>3</sub>	臭氧分子的化学符号
OAT	运行环境温度



OBWO	O 型返波振荡器
OC, o/c	开路
OCR	光学符号识别
oct	八进制的
OD, o. d.	外直径
Oe	奥斯特
OGL	引出线
OLRT	联机实时
OM	光学显微镜; 老人 (无线电爱好者行话)
op	操作的; 操作; 操作者
op amp	运算放大器
op code	运算规则
opt	光学; 可选择的
.org	国际互联网团体用站点域名后缀
Os	锶的化学符号
osc	振荡器
Os-Ir	锶铱矿化学符号
OTA	运算跨导放大器
OTL	无变压器输出
ox	氧
oz-in	英两-英寸
p	乘 $10^{-12}$ 词头; 峰值; 原边; 真空管板极; 节距
P	功率; 磷的化学符号; 真空管板极; 压力; 一次侧; 点
PA	功率放大器; 脉冲放大器; 脉冲幅度; 公共地址; 特殊平均; 无人驾驶飞机
pA	微微安
Pa	镭的化学符号; 帕斯卡

PACM	脉冲-幅度编码调制
PADT	柱状合金扩散晶体管
PAM	脉冲-幅度调制
PAN	紧急信息跟随
PAV	相位-角度伏特计
PAX	专用自动交换机
Pb	铅的化学符号
PBX	专用小交换机
pc	皮居里;秒差距(表示天体距离的单位,相当于 3.259 光年)
PC	个人计算机;印制电路;光电池;点接触;程序计算器;打孔卡
PCB	印制电路板
PCL	印制电路灯
PCM	脉冲-编码调制;打卡机
Pd	钯的化学符号
PD	脉冲持续时间;板极耗散;贴近检测;电位差
PDAS	可编程数据获得系统
PDM	脉冲宽度调制
PDT	太平洋夏季时间
PE	位能;职业工程师;概率误差
PEM	光电磁效应
PEP	峰值包络功率;平面外延钝化
peta	乘 $10^{15}$ 词头;二进制中乘 $2^{50}$ 词头
pF	皮法
PF, pf	功率因数
PFET	P 沟道结型场效应晶体管
PFM	脉冲-频率调制
PG	功率增益
pH	氢离子浓度

$P_i, P_{in}$	输入功率
PIA	外部接口适配器
pico	乘 $10^{-12}$ 词头
PIM	脉冲间隔调制
PIO	并口输入/输出
PIV	峰值反向电压
PLC	输电线通信
PLL	锁相环
PLM	脉冲长度调制
PLO	锁相振荡器
$P_m, P_{max}$	最大功率
PM	脉冲调制; 相位调制; 脉冲调制器; 相位调制器; 永久磁铁; 下午
PMOS	P 沟道金属-氧化物半导体
PN	波兰表示法; 正-负
PNM	脉冲数调制
$P_o, P_{out}$	输出功率
Po	钋的化学符号
pos	正; 位置
pot	电位计; 缓冲器; 电位
$P_p$	峰值功率; 板极功率
PP	外围处理器
ppb	十亿分之几
ppm	百万分之几; 每分钟脉冲数
pps	每秒钟脉冲数
ppt	千分之几
Pr	镨的化学符号
PRF	脉冲重复频率
pri	一次侧的
PROM	可编程只读存储器
PRR	脉冲重复率

PRV	峰值反向电压
ps, psec	皮秒
PS	电源
PSD	相敏检测器
psf	磅每平方英尺
psi	磅每平方英寸; 角; 通量
psia	每平方英寸绝对磅
psig	每平方英寸表压磅
PSK	相移键控
PSM	脉冲间隔调制
PST	太平洋标准时间
PSVM	相敏电压表
PSWR	功率驻波比
Pt	铂的化学符号
PTC	正温度系数
PTM	脉时调制
PTO	磁导率调谐振荡器
PTT	按键通话
Pu	钷的化学符号
pV	皮伏
PVC	聚氯乙烯
pW	皮瓦
PWM	脉宽调制
pwr	功率
PZT	铅锆酸盐钛酸盐
q	电荷量; 电子电荷; 量子值; 夸(脱)
Q	优值; 电荷; 选择性; Q带; Q输出
QAVC	无噪声自动音量控制
QCW	Q-相位连续波信号(电视)
QFM	量化频率调制

QM	正交调制
QMQB	快通, 快断
qt	夸 (脱)
qty	数量
qual	质的; 质量
r	伦琴; 修正系数; 半径
R	电阻; 电阻器
R	罗杰 (通信术语, 表示信息收到无误); 磁阻; 立体声右声道; 根号
$R_{(00)}$	里德伯 (Rydberg) 常数 (光谱学单位)
RA	随机存取; 赤经
$R_{AC}, R_{ac}$	交流电阻
RAC	被整流的交变电流
racon	雷达导航台
rad	辐射计; 弧度; 无线电; 根值数; 半径; 根号
$r_e$	经典电子半径
RAM	随机存取存储器
$R_B$	双极型晶体管基极电阻
Rb	铷的化学符号
$R_C$	双极型晶体管集电极电阻; 冷电阻
RC	电阻-电容
Rc	遥控; 无线电控制
RCL	电阻-电容-电感
RCL	再呼叫
RCTL	电阻-电容-晶体管逻辑
RCV, rcv	接收
RCVR, rcvr	接收机
R&D, R/D	研究与开发

$R_D$	场效应晶体管漏极电阻
$R_{DC}, R_d$	直流电阻
RDF	无线电测向
$R_E$	双极型晶体管发射极电阻
Re	铼的化学符号
rect	整流器; 整流
ref	参考
$R_{eff}$	等效电阻
rej	抑制
rem	人体伦琴当量 (高化辐射剂单位)
res	电阻; 电阻器; 分辨率; 研究; 余项
rev	反转; 分辨率
$R_f$	真空管灯丝电阻; 反馈电阻; 反馈电阻器
RF	射频
RFC	射频扼流圈
RFI	射频干扰
RFO	射频振荡器
$R_g$	真空管栅极电阻
$R_G$	场效应晶体管栅极电阻
RGB	红/绿/蓝颜色模式
RGT	谐振-门晶体管
Rh	铼的化学符号
$R_{HF}$	高频电阻
$R_i, R_{in}$	输入电阻
RI	无线电干扰
$R_K$	真空管阴极电阻
$R_L$	负载电阻; 损耗电阻
RL	电阻-电感
RL	继电器逻辑电路

$R_{L,F}$	低频电阻
$R_{load}$	负载电阻
$R_{loss}$	损耗电阻
$r_m$	双极型晶体管发射极-集电极的互阻
$R_m$	米电阻
RMA	无线电制造商协会
rms	方均根
Rn	氮的化学符号
$R_o, R_{out}$	输出电阻
ROM	只读存储器
$R_p$	真空管板极电阻；并联电阻；原边电阻
$R_{pt.}$	原边电阻
rps	转数每秒
RPT	重复；报告
$R_{req}$	所需电阻
$R_s$	二次电阻；真空管屏栅电阻；串联电阻
$R_S$	场效应晶体管源极电阻
RST	无线电报信号的可读性/强度/音调
$R_t, R_T$	总电阻
$R_T$	热电阻
RTD	电阻-温度检测器
RTL	电阻-晶体管逻辑
RTTY	无线电电传打字机
RTZ	归零
Ru	钨的化学符号
$R_x$	未知电阻
RY	继电器；无线电电传打字机测试信号 (重复)
RZ	归零

s	真空管的屏栅; 距离; 位移; 标准偏差; 秒
S	西门子; 真空管屏栅; 壳; 硫的化学符号; 偏转灵敏度; 开关; 同步; 第二次; 正弦; 嫡
SADT	表面合金扩散基极晶体管
SAE	轴角解码器; 汽车工程师协会
sat	饱和
satd	饱和
SAVOR	信号激励声音记录器
Sb	铋的化学符号
SB	边带; 联播
SBC	单片机
SBDT	表面势垒扩散晶体管
SBT	表面势垒晶体管
sc	正弦-余弦; 单晶; 科学; 比例尺
Sc	钪的化学符号
SC	被抑制的载流; 短路; 丝包
SCA	子边带通信授权
scc	单纱包
sce	单纱包漆包
SCEPTRON	谱线花纹比较确认器
SCLC	空间电荷限制流
sco	副载波振荡器
SCR	晶闸管整流器
SCS	晶闸管开关
SCT	表面电荷晶体管
SD	标准偏差
Se	硒的化学符号
sec	秒; 第二; 正割; 剖面
sech	双曲正割



SELCAL	选择呼叫
SEM	单电子存储器；扫描电子显微镜
ser	系列；串联
SF	安全系数；单频；标准频率；稳定系数
SFA	单频放大器
SFO	单频振荡器；标准频率振荡器
SFR	单频接收机
SG	真空管中屏栅
SGCS	硅栅控开关
SHF	超高频
Si	硅的化学符号
SI	国际单位制
S/I	信号与互调比；信号与干扰比
SIC	比电感容量
SiC	碳化硅
sig	信号
sin	正弦
SINAD	信号与噪声和畸变之比
SIO	串口输入/输出
SIP	单列直插式封装
SJD	单结二极管
SKM	正弦-余弦乘法器
SLS	旁瓣抑制
Sm	钐的化学符号
Sn	锡的化学符号
SN	半导体网络
S/N	信噪比
SNOBOL	一种行处理语言
SNR	信噪比
sol	溶液；可溶的
SOM	信息开始

SOP	标准操作过程
SOS	呼救信号 (无线电报)
sp	单极; 比 (率)
SP	单极; 单相; 自推动; 堆栈指针
SPC	硅点接触; 铜镀银
SPDT, spdt	单极; 双掷
spec	规格; 光谱
spec an	谱线分析仪
specs	说明书
SPFW	单相全波
sp gr	体积质量
SPHW	单相半波
spkr	话筒
SPOT	卫星定位与跟踪
SPST, spst	单刀单掷
sq	平方
SQR	平方根; 平方根函数
Sr	锶的化学符号
SR	硅整流器; 移位寄存器; 硅橡胶
S-R, S/R	发送-接收
SRAM	静态随机存取存储器
SRF	自谐振频率
SS	固态; 一次成像; 小信号; 单信号; 相同大小; 不锈钢
SSB	单边带
SSBSC	单边带被压缩载波
ssc	单丝包
sse	单丝漆包
SSI	小规模集成
SSL	固态灯
SSSC	单边带被压缩载波

ST, st	单掷
sta	站; 稳定的
stab	稳压器; 稳定性; 稳定
STALO	标准振荡器
stat-	静电
statA	静电安培
statC	静电库仑
statF	静电法拉
statH	静电亨利
statOe	静电奥斯特
statS	静电西门子
statV	静电伏特
statWb	静电韦伯
std	标准
stn	站
STO	存储器; 储藏
STP	标准温度和压力
sup	真空管的抑制栅; 压缩
SVGA	超视频图像列阵
sw	开关
SW	短波
SWG	标准线规
SWR	驻波比
sym	对称; 对称的; 符号
symb	符号
sync	同步
t	时间; 吨; 摄氏温度; 靶; 张力; 技术
T	变压器; 乘 $10^{12}$ 词头; 热力学温度; 氙 的化学符号; 吨; 特斯拉; 动能; 周期; 逻辑真

Ta	钽的化学符号
tach	转速计
tan	正切
tanh	双曲正切
Tb	铽的化学符号
Tc	锝的化学符号
TCCO	温控晶体振荡器
TCL	晶体管耦合逻辑
TCM	热偶计
TDM	时分多路转接, 时分复用
TDR	延时继电器; 时域反射仪
Te	碲的化学符号
TE	横向电场; 下降沿
tel	电话; 电报
TEM	横电磁波
tera-	乘 $10^{12}$ 词头; 二进制中乘 $2^{40}$ 词头
TeV	太电子伏 ( $10^{12}\text{eV}$ )
TGTP	调栅调板
Th	钍的化学符号
TH	真实航向
THD	总谐波畸变
thy	闸流管
THz	太赫 ( $10^{12}\text{Hz}$ )
Ti	钛的化学符号
Tl	铊的化学符号
T <sup>2</sup> L	晶体管-晶体管逻辑 (即 TTL)
Tm	铥的化学符号
TM	横磁波; 技术手册
tot	总计; 摘要
TP	试验点; 调谐板; 执行过程
TPTG	调板调栅

<i>t<sub>r</sub></i>	恢复时间；上升时间
TR, T/R	传输-接收
trans	横向的；传送；发射机；变压器
TRF	调谐的无线电频率
trig	三角学
ts	抗拉强度
TSS	分时系统
TTL	晶体管-晶体管逻辑（即 T <sup>2</sup> L）
TTY	电传打字；电传打字机
TU	终端
TV	电视；终端速度
T/V	温度-电压
TVI	电视干扰
TVL	电视听众
TVM	晶体管电压表
TVO, TVOM	晶体管伏-欧表
TVT	电视端口
TW	太瓦（10 <sup>12</sup> W）；行波
TWA	行波放大器
TWT	行波管
u	微（当不用符号 $\mu$ 时）；单元；统一的 原子量单元
U	铀的化学符号；单元；通用设备；并集
<i>U<sub>s</sub></i>	放射性单位
UDOP	超高频多普勒系统
UEP	水下电位
UFET	单极场效应晶体管
UHF	超高频
UJT	单结晶体管
ULD	超低畸变

ULF	超低频
uni-	单；一
UNIFET	单极场效应晶体管
UNIPOL	通用面向过程语言
UNIVAC	通用自动计算机
uns	不对称；不稳定
UPC	通用产品编码
upconv	上变频；向上转换
UPS	不间断电源
USB	上边带
USSC	上边带被压缩载波
UTC	调整好的通用时间
UTL	单元传输损失
UV	紫外线；欠电压
UVM	通用自动售货机的标志
v	速度；电压；矢量
V	伏特；电压；电位；钒的化学符号；体 积；磁阻；垂直速度；矢量
VA	伏安
V/A	伏特每安培
$V_{ac}$ , $v_{ac}$	交流电压
vac	真空
VAC	交流电压；矢量模拟计算机
val	值
var	变量
VAR	乏（无功伏安）
$V_B$	双极型晶体管的基极电压
$V_{BB}$	双极型晶体管电路中基极电压电源
$V_C$	双极型晶体管的集电极电压
VCA	压控放大器

$V_{cc}$	双极型晶体管电路中集电极电压电源
VCCO	压控晶体振荡器
VCD	变容二极管
VCG	压控发生器
VCO	压控振荡器
VCR	录音机
VCSR	压控移位寄存器
VCXO	压控晶体振荡器
$V_D$	场效应晶体管漏极电压
VD	压降；蒸气密度
$V_{dc}, v_{dc}$	直流电压
VDC	直流电压
VDU	电视显示单元
VDCW	直流工作电压
VDR	压敏电阻器；录像光盘机；光盘录像
$V_{drive}$	驱动电压
$V_E$	双极型晶体管的发射极电压
VE	价值工程，志愿者检查员
$V_{EE}$	双极型晶体管电路中发射极电压电源
vel	速度
vers	正矢
vert	垂直
VF	视频
$V_{FB}$	反馈电压
VFO	可变频率振荡器
$V_F, v_F$	发生器电压
VGA	可变增益放大器；视频图像系统
$V_{GD}$	场效应晶体管栅-漏电压
$V_{GS}$	场效应晶体管栅-源电压
VHF	甚高频
VHR	甚高电阻

VHRVM	高阻伏特计
$V_i, V_m$	输入电压
VI	音量指示器; 粘度指数
VLF	甚低频
VLR	甚低电阻; 甚长程
VLSI	超大规模集成
V/m	伏特每米
VMOS	垂直金属-氧化物半导体
VMOSFET	垂直金属-氧化物半导体场效应晶体管
$V_o, V_{out}$	输出电压
VOA	伏-欧-安表; 美国之音
vol	音量
VOM	伏-欧-毫安表
VOR	甚高频全向无线电信标天线
vox	音控传输
$V_p$	场效应晶体管的夹断电压; 真空管的板极电压
$V_{pm}$	伏特每米
VR	电压调节器; 电压调节
$V_{ref}$	参考电压
VRR	可视无线电波段
$V_s$	伏秒
$V_s/A$	伏秒每安
VSA	声压分析仪
VSΒ	残留边带
VSF	残留边带滤波器
VSR	甚短程
VSWR	电压驻波比
vt	真空管; 变时
VTL	可变阈值逻辑
VTM	电压调谐磁控管



VTO	电压调谐振荡器
VTR	磁带录像机
VTVM	真空管电压表
VU	音量单位
VVCD	电压-变容二极管
VVV	试验信号 (无线电报)
VW	工作电压
w	宽度
W	瓦特; 功; 钨的化学符号; 能; 西; 宽度
W3	万维网
WAC	洲际工作
WAS	国间工作
WATS	宽域电话业务
WAZ	域间工作
Wb	韦伯
$W_E$	双极型晶体管基区宽度
$Wb/m^2$	韦伯每平方米
$W_c$	双极型晶体管集电区宽度
$W/cm^2$	瓦特每平方厘米
$W_E$	双极型晶体管发射区宽度
WE	允许写入
WG	线规
wgt	重量
WH, Wh, w · h	瓦特小时
WHP	水马力
WL	波长
WM	瓦特表
$Wm^2$	瓦特平方米
$W/(mk)$	瓦特每米开尔文

w/o	无
$W_{pc}$ , W/c	瓦特每烛光
wpm	每分钟字数
W/sr	瓦特每球面度
$W/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$	瓦特每球面度平方米
wt	重量
WT	无线电报; 防水的
WVDC	直流工作电压
ww	绕线的
WWW	万维网
$x$	载流子数; 未知量
X	横坐标; 乘号; 发射机; 横过
X	电抗; 未知量
X	不联接; 横轴; 乘号; 发射机; 横过
XB	交叉
$X_c$	容抗
XCVR, xcvr	无线电收发两用机
Xe	氙的化学符号
xfmr, xformer	变压器
XHV	超高真空
xistor	晶体管
$X_L$	感抗
xmission, xmsn	发射
xmit, xmt	传输
XMTR, xmtr	发射机
XOR	异或门
xover	交叉
xponder	发送应答机
XR	指针寄存器
xsection	截面

$X_T, X_t$	总电抗
xtal	晶体
xtalk	串音
$y$	年; 码; 纵坐标
Y	导纳; 纵坐标; 钇的化学符号; 杨氏模量
YAG	钇铝石榴石
YIG	钇铁石榴石
yT	晶体管 $y$ 矩阵
yV	真空管 $y$ 矩阵
$z$	零; 电化学价; 区域
Z	阻抗
Z	原子序数; 无顶距
Zn	锌的化学符号; 方位
$z_0$	特征阻抗
Zr	锆的化学符号

## 第 26 章 其他数据



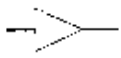



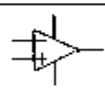

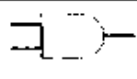
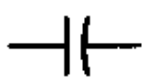


本章内容包含图形符号、通信信号和不适于放在其他章节的与电子学相关的数据。

### 26.1 图形符号

图形符号是元件在电路图中相互连接的技术表示。某些符号还包括元件的数值和允许的容差,常用的图形符号见表 26-1。符号图并不能指出元件在底板或线路板上的实际位置,它只表示元件是如何相互连接的。

对于电子学的初学者来说符号图看起来很复杂,但是它比画实物简图要简单得多。对于一个复杂的装置,如超外差接收机,画实物简图是不切实际的,但用符号图在一张纸上可以将元件之间的连接表达得很清楚。



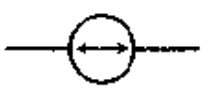

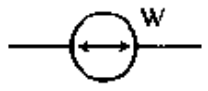



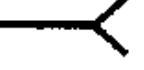

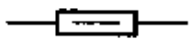


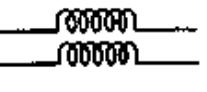





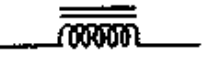


表 26-1 电子元件名称与符号

元件名称	符 号	元件名称	符 号
电流表		环状天线	
普通放大器		多圈环状天线	
倒相放大器		电池	
运算放大器		穿心式电容器	
与门		固定电容器	
对称天线			
普通天线			



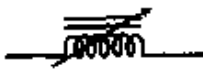

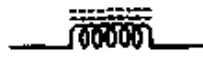
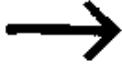




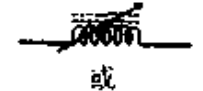
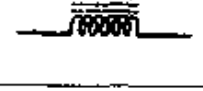

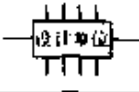
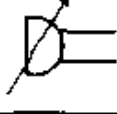







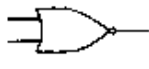
(续)

元件名称	符 号	元件名称	符 号
可变电容器		延迟线	
可变电容器(分旋片)		二端交流开关	
可变电容器(分定片)		场效应二极管	
阴极(冷阴极电子管)		普通二极管	
阴极(电子管,直热式)		耿氏二极管	
阴极(电子管,间热式)		发光二极管	
谐振腔		光敏二极管	
电化学电池		二极管(PIN)	
电路断路器		肖特基二极管	
同轴电缆		隧道二极管	
压电晶体		变容二极管	

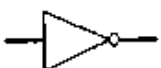




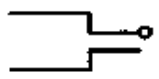







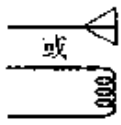








(续)

元件名称	符 号	元件名称	符 号
齐纳二极管		接地	
定向耦合器		送话器	
定向功率计		两耳受话器	
异或门		单耳受话器	
接触插孔(普通)		立体声受话器	
铁氧体磁珠		电感(空心)	
灯丝(电子管)		电感(空心、双绕线圈)	
熔丝		电感(空心、带中心抽头)	
电流计		电感(空心、可变)	
栅极(电子管)		电感(铁心)	
接地(底板)		电感(铁心、双绕线圈)	

(续)

元件名称	符 号	元件名称	符 号
电感(铁心,带中心抽头)		白炽灯	
电感(铁心,可变)		氖灯	
电感(粉末铁心)		普通插头	
电感(粉末铁心,双绕线圈)		普通表头	
电感(粉末铁心,带中心抽头)		微安表	
电感(粉末铁心,可变)	 或 	话筒	
集成电路(普通)		定向话筒	
插座(同轴或音频)		毫安表	
插座(音频,双触点)		与非门	
插座(音频,三触点)		负电压连接	
按键(电报)		或非门	

(续)


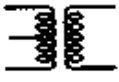
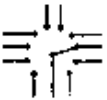
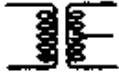




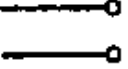






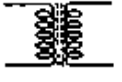


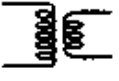


元件名称	符 号	元件名称	符 号
非门		插头(234V)	
光隔离器		插头(同轴或音频)	
或门		插头(音频, 双触点)	
电源插座(双线, 无极性)		插头(音频, 三触点)	
电源插座(双线, 有极性)		正电压连接	
电源插座(三线)		电位器	
电源插座(234V)		探头(高频)	
阳极(电子管)		充气整流器	
插头(双线, 无极性)		高真空整流器	
插头(双线, 有极性)		半导体整流器	
插头(三线)		晶闸管整流器	



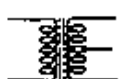










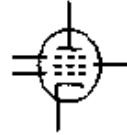



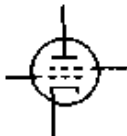


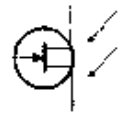



(续)

元件名称	符 号	元件名称	符 号
继电器(双刀,双掷)		饱和扼流圈	
		信号发生器	
继电器(双刀单掷)		太阳能蓄电池	
		太阳能电池	
继电器(单刀,双掷)		恒流电源	
继电器(单刀,单掷)		恒压电源	
电阻(固定值)		喇叭(扬声器)	
电阻(微调)		开关(双刀,双掷)	
电阻(带中心抽头)		开关(双刀,旋转)	
谐振腔		开关(双刀,单掷)	
变阻器		开关(瞬间接触)	


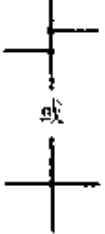

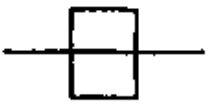


(续)

元件名称	符 号	元件名称	符 号
开关(晶闸管)		变压器(空心,一次绕组带中心抽头)	
开关(单刀,旋转)		变压器(空心,二次绕组带中心抽头)	
开关(单刀,双掷)		变压器(铁心)	
开关(单刀,单掷)		变压器(铁心,降压)	
终端(普通,平衡)		变压器(铁心,升压)	
终端(普通,不平衡)		变压器(铁心,一次绕组带中心抽头)	
测试点		变压器(铁心,二次绕组带中心抽头)	
热电偶		变压器(粉末铁心,降压)	
变压器(空心)		变压器(粉末铁心,升压)	
变压器(空心,降压)		变压器(粉末铁心,一次绕组带中心抽头)	
变压器(空心,升压)			

(续)

元件名称	符 号	元件名称	符 号
变压器(粉末铁心、二次绕组带中心抽头)		晶体管(单结)	
晶体管(双极型, NPN)		三端双向可控硅开关	
晶体管(双极型, PNP)		电子管(二极管)	
晶体管(场效应, N沟道)		电子管(七极管)	
晶体管(场效应, P沟道)		电子管(六极管)	
晶体管(MOS场效应, N沟道)		电子管(五极管)	
晶体管(MOS场效应, P沟道)		电子管(光敏)	
晶体管(光敏, NPN)		电子管(四极管)	
晶体管(光敏, PNP)		电子管(三极管)	
晶体管(光敏, 场效应, N沟道)		电压表	
晶体管(光敏, 场效应, P沟道)		功率计	

(续)

元件名称	符 号	元件名称	符 号
波导(圆形)		导线(交叉,连接)	
波导(柔性)			
波导(矩形)		导线(交叉,不连接)	
波导(扭曲)			

## 26.2 莫尔斯电码

莫尔斯电码是发送和接收信息的数字方法。它是一种二代码,因为只有两种可能的状态:通(键按下去)和断(键抬起来)。

说英语的操作员使用两种不同的莫尔斯电码。最常用的电码叫做国际莫尔斯电码或大陆码,见表 26-2。

近代通信设备能够在弱信号条件下工作,这种弱信号会使操作员遇到一些麻烦,但是当操作员专心操作时,莫尔斯电码仍然是通过强烈干扰得到信息的可靠方法。因为莫尔斯电码的无线信号的带宽非常窄,对于人的耳朵比较容易区分背景噪声和码信号。莫尔斯电码主要由业余无线电操作员使用,他们中的许多人将无线电报用作娱乐的手段。

表 26-2 国际莫尔斯电码

字 符	信 号	字 符	信 号
A	.-	F	..-.
B	-...	G	---.
C	-.-.	H	....
D	-..	I	..
E	.	J	.-.-.-

(续)

字 符	信 号	字 符	信 号
K	— — —	1	. — — — —
L	. — . . .	2	. . — — — —
M	— — —	3	. . . — — —
N	. . . —	4	. . . . — —
O	— — — —	5	. . . . .
P	. — . . .	6	. — . . . .
Q	— — . —	7	— — . . . .
R	. — . —	8	— — — . . .
S	. . . —	9	— — — — .
T	— — —	句号	. — . — . —
U	. . . —	逗号	— — . . — —
V	. . . —	问号	. . — . . .
W	. — . —	斜线号	— . . — .
X	— . . —	破折号	— . . . . —
Y	— . — —	中断(间歇)	— . . . . —
Z	— — . . .	分号	. — . — . .
0	— — — — .	冒号	— — . . . .

### 26.3 Q 信号

在莫尔斯无线电报中常常需要造一些句子、短语和单词。当需要发出复杂的句子、短语和单词时,特别当要重复时,莫尔斯电码就显得很繁琐。为了革新操作,人们设计出一套叫做*Q信号*的缩略词。

每一个*Q信号*都包含字母*Q*,后面跟着另外两个字母。在*Q信号*后面跟一个问号表示查询,如果信号后不跟问号或者跟一数字,这就表示陈述。例如,“*QRM?*”表示“你受到干扰了吗?”,而“*QRM*”表示“我受到了干扰”。另一个例子是“*QTH?*”表示“你的位置在哪里?”而“*QTH ROCHESTER, MN*”表示“我的位置在罗彻斯特,明尼苏达”。表 26-3 是常用*Q信号*及其含义。

设计*Q信号*的本意是用于无线电报,但是许多无线电传打字和无线电话的操作员也在使用它。像莫尔斯电码用了*Q信号*后更方便那样,*Q信号*也同样使无线电传打字变得非常方便。*Q信号*如何被用于音频通信,还存在一些问题。

表 26-3 常用 Q 信号及其含义

Q 信号	提 问 及 回 答
QRA	你的站名叫什么? 我的站名叫_____。
QRB	你离我的站多远? 我离你的站_____米或_____公里。
QRD	你从哪儿来,要到哪儿去? 我从_____来,要到_____去。
QRG	我的频率是多少? 你的频率是_____ (kHz, MHz, GHz)
QRH	我的频率是否不稳定? 你的频率是不稳定。
QRI	我的信号的音调如何? 你的信号的音调是 1(好), 2(满意), 3(不好)。
QRK	我的信号清楚可读吗? 你的信号是 1(不可读), 2(勉强可读), 3(读起来很困难), 4(读起来几乎没困难), 5(完全可读)
QRL	你忙吗? 或正在使用该频率吗? 我忙。或正在使用这个频率。
QRM	你受到从其他台来的干扰吗? 我受到从其他台来的干扰。
QRN	你的接收信号受到天电或电噪声的影响而衰变吗? 我的接收信号受到天电或电噪声的影响而衰变。
QRO	我需增加我的发射机的输出功率吗? 增加你的发射机的输出功率。
QRP	我需要降低我的发射机的输出功率吗? 降低你的发射机的输出功率。
QRQ	我需要更快些发送(莫尔斯电码)吗? 更快些发送(莫尔斯电码)。
QRS	我需要更慢些发送(莫尔斯电码)吗? 更慢些发送(莫尔斯电码)。
QRT	我要停止发送吗? 或你将停止发送吗? 停止发送。或我将停止发送。
QRU	你那里有我的信息吗? 我这里有你的信息。
QRV	你准备好了吗? 我准备好了。
QRW	要我告诉_____你呼叫他/她/他们了吗? 告诉_____我呼叫了他/她/他们。

(续)

Q 信号	提 问 及 回 答
QRX	什么时候你再呼我? 我在_____再呼你。
QRY	我的接入序号是多少? 你的接入序号是_____。
QRZ	谁呼我? 呼你的是_____。
QSA	我的信号有多强? 你的信号是1(几乎听不见),2(很弱)3(强度合适),4(强),5(很强)。
QSB	我的信号强度在改变吗? 你的信号强度在改变。
QSD	我的信号缺码吗?或我的键坏了吗? 你的信号有缺码。或你的键坏了。
QSG	我要发送更多的信息吗? 发送更多的信息。
QSJ	每一个字你的费用是多少? 每一个字我的费用是_____。
QSK	在你的信号之间能听到我吗?或你有完全插入的能力吗? 在我的信号之间我能够听到你。或我有完全插入的能力。
QSL	你肯定收到我的电报了吗? 我肯定收到你的电报了。
QSM	我要重发我的电报吗? 重发你的电报。
QSN	你能听到我在_____频率,信道或波长吗? 我能听到你在_____频率、信道或波长。
QSO	你能与_____通信吗? 我能与_____通信。
QSP	你将发电报给_____吗? 我将发电报给_____。
QSQ	大夫在那里吗?或_____在吗? 大夫在这里。或_____在这里。
QSU	我将在什么频率、信道或波长答复你? 你在_____频率、信道或波长答复我。
QSV	为测试目的我要发送V串码吗? 为测试目的发送V串码。
QSW	你将在什么频率、信道或波长下发送? 我将在_____频率、信道或波长下发送。

(续)

Q 信号	提 问 及 回 答
Q SX	你在听我吗? 或你在听_____吗? 我在听你。或我在听_____。
Q SY	我要改变频率、信道或波长吗? 改变频率、信道或波长到_____。
Q SZ	我要多次发送每一词或词组吗? 多次发送每一词或词组。
Q TA	我要删去_____号电报吗? 删去_____号电报。
Q TB	你的字的计数与我一致吗? 我的字的计数与你的不一致。
Q TC	你要发多少份电报? 我要发_____份电报。
Q TE	相对于你,我的方位是多少? 相对于我,你的方位是_____。
Q TH	你的位置在哪里? 我的位置在_____。
Q TJ	你开汽车旅行的速度是多少? 我开汽车旅行的速度是_____英里/小时或公里/小时。
Q TL	你在朝什么方向前进? 我在朝_____方向前进。或我的前进方向是_____方位。
Q TN	你什么时候离开的? 我在_____ (点钟)离开_____。
Q TO	你坐飞机吗? 我坐飞机。
Q TP	你打算着陆吗? 我打算着陆。
Q TR	准确的时间是多少? 准确的时间是_____。
Q TX	你将等我吗? 我将等你到_____。
Q UA	你有关于_____的信息吗? 我有关于_____的信息。
Q UD	你收到我的紧急信号或关于_____吗? 我收到了你的紧急信号或关于_____。
Q UF	你收到我的求救信号或关于_____吗? 我收到了你的求救信号或关于_____。



## 26.4 十字码

为了改进双向无线电电话(声音)操作,设计出一套叫做*十字码*的缩略符号。这套码也有某种保密性,因为不知道这套码的偷听者不能完全理解发送的内容。

十字码用于市民无线电服务和法律实施通信。其他服务部门,如保安公司和消防部门也使用它。十字码不用于数字文本格式,如莫尔斯电码,无线电传或计算机通信。

每一个十字码信号由数字 10 和紧随其后的 1~100 中的一个数组成。表 26-4 列出了十字码信号及其含义。

表 26-4 十字码信号及其含义

a) 用于市民无线电服务的十字码信号	
十字码信号	提 问 及 回 答
10-1	你接收我的信号时有麻烦吗? 我接收你的信号时有麻烦。
10-2	我的信号清楚吗? 你的信号清楚。
10-3	我要停止发送吗? 停止发送。
10-4	你完整地收到我的电报了吗? 我完整地收到了你的电报。
10-5	我要转发电报给 _____ 吗? 转发电报给 _____。
10-6	你忙吗? 我忙。要等到 _____。
10-7	你的站是否不工作? 我的站停止工作。
10-8	你的站在工作吗? 我的站在工作。
10-9	我要重发我的电报吗? 或接收是否不好? 重发你的电报。或接收不好。
10-10	你发送结束了吗? 我发送结束了。
10-11	我是否说得太快? 你说得太快。
10-12	你有访问者吗? 我有访问者。

(续)

十字码信号	提问及回答
10-13	你处的天气状况和道路条件如何? 我处的天气状况和道路条件_____。
10-14	当地时间几点了?或在_____几点了? 当地时间或在_____现在是_____点。
10-15	我要在_____带上_____吗? 在_____带上_____。
10-16	你带_____了吗? 我带_____了。
10-17	你有紧急事情吗? 我有紧急事情。
10-18	你有什么信息要告诉我吗? 我有一些信息要告诉你,它们是_____。
10-19	你没有信息要告诉我吧? 我没有信息要告诉你。
10-20	你位于什么地方? 我位于_____。
10-21	我要给你打电话吗? 给我打电话。
10-22	我要亲自报告给_____吗? 亲自报告给_____。
10-23	我要等候吗? 等候到_____。
10-24	你完成你的最后作业了吗? 我完成我的最后作业了。
10-25	你与_____联系了吗? 我与_____联系了。
10-26	我将无视你刚才发给我的信息? 可以无视我刚才发给你的信息。
10-27	我将移动到信道_____? 移动到信道_____。
10-30	这个行为是正当的还是不正当的? 这个行为是不正当的。
10-33	你有一封紧急电报吗? 我有一封紧急电报。
10-34	你遇到麻烦了吗? 我遇到麻烦了。
10-35	你有机密电报吗? 我有机密电报。

(续)

十字码信号	提 问 及 回 答
10-36	发生事故了吗?
	在_____发生了事故。
10-37	需要一辆牵引车吗?
	在_____需要一辆牵引车。
10-38	需要一辆救护车吗?
	在_____需要一辆救护车。
10-39	在_____有护送队吗?
	在_____有护送队。
10-41	我们要改变信道吗?
	改变信道。
10-60	请给我你的电报号码。
	我的电报号码是_____。
10-63	这个网络是定向的吗?
	这个网络是定向的。
10-64	你打算停止发送吗?
	我打算停止发送。
10-65	你有_____的网络电报吗?
	我有_____的网络电报。
10-66	你希望删去你的从_____号到_____号的电报吗?
	我希望删去我的从_____号到_____号的电报。
10-67	我要停止发送而去接收电报吗?
	停止发送,去接收电报。
10-68	我要重发我的从_____号到_____号的电报吗?
	重发你的从_____号到_____号的电报。
10-70	你有电报吗?
	我有电报。
10-71	我要按号码发送电报吗?
	按号码发送电报。
10-79	我要通知_____关于在_____着火的事吗?
	通知_____关于在_____着火的事。
10-84	你的电话号码是多少?
	我的电话号码是_____。
10-91	我的信号是否很弱?
	你的信号很弱。
10-92	我的信号是否失真了?
	你的信号失真了。
10-94	我要做一次试验发送吗?
	做一次试验发送。
10-95	我要关上我的话筒而不说话吗?
	关上你的话筒不用说话了。

(续)

## b) 用于法律实施通信的十字码信号

十字码信号	提 问 及 回 答
10-1	你接收我的信号遇到麻烦了吗? 我接收你的信号遇到了麻烦。
10-2	我的信号良好吗? 你的信号良好。
10-3	我要停止发送吗? 停止发送。
10-4	你全部收到我的电报了吗? 我全部收到了你的电报。
10-5	我要转发电报给_____吗? 转发电报给_____。
10-6	你忙吗? 我很忙,要等到_____。
10-7	你的站是否停止工作? 我的站停止工作。
10-8	你的站在工作吗? 我的站在工作。
10-9	要重复我的电报吗? 重复你的电报。
10-10	在你的站台处是否有人正在打架? 在我的站台处有人正在打架。
10-11	你是否在处理与狗有关的案件? 我在处理与狗有关的案件。
10-12	我要等待吗?或我要等到_____? 等待。或等到_____。
10-13	你那里的气候和道路情况如何? 我这里的气候和道路条件_____。
10-14	你收到了一个关于小偷的报告吗? 我收到了一个有关小偷的报告。
10-15	你那里有市民骚动吗? 我这里有市民骚动。
10-16	你那里遇到了生活麻烦吗? 我这里遇到了生活麻烦。
10-17	我要与原告见面吗? 与原告见面。
10-18	我要赶紧完成这一转让吗? 赶紧完成这一转让。

(续)

十字码信号	提 问 及 回 答
10-19	我要转向_____吗? 转向_____。
10-20	你的位置是什么? 我的位置是_____。
10-21	我要用电话呼_____吗? 用电话呼_____。
10-22	我要驳回以前的起诉吗? 驳回以前的起诉。
10-23	_____到达_____了吗? _____已经到达_____了。
10-24	你已经完成你的转让了吗? 我已经完成我的转让了。
10-25	我要亲自报告给_____吗? 亲自报告给_____。
10-26	你留下一个病人了吗? 我留下了一个病人。
10-27	你有驾驶执照的号码吗? 这里有驾驶执照的号码。
10-28	你有汽车登记号吗? 这里有汽车登记号。
10-29	我是否要核对记录,查看一下_____是一名通缉犯吗? 核对记录查看一下_____是否是一名通缉犯。
10-30	_____是非法使用无线电了吗? _____是非法使用无线电了。
10-31	你那里(或在_____ )有犯罪活动吗? 我这里(或在_____ )有犯罪活动。
10-32	在你们区域(或在_____ )有一个带枪的人吗? 在我们区域(或在_____ )有一个带枪的人。
10-33	在你们区域(或在_____ )有紧急情况吗? 在我们区域(或在_____ )有紧急情况。
10-34	在你们区域(或在_____ )有骚乱吗? 在我们区域有骚乱。
10-35	由于出现了严重犯罪,你们戒严了吗? 由于出现了严重犯罪,我们戒严了。
10-36	准确时间是几点? 当地(或协调世界时间)准确时间是_____。
10-37	我要调查这辆可疑的汽车吗? 调查这辆可疑的汽车。

(续)

十字码信号	提 问 及 回 答
10-38	你堵截这辆可疑的汽车了吗? 我堵截了这辆型号为_____的可疑汽车。
10-39	你的状况危急吗? 我的状况危急,使用警灯和/或警笛。
10-40	我要戒用我的警灯或警笛吗? 戒用你的警灯和警笛。
10-41	你刚上班吗? 我刚上班。
10-42	你下班了吗? 我刚下班。
10-43	你需要,或要发给你关于_____的资料吗? 我需要,或发给我关于_____的资料。
10-44	你要离开巡查吗? 我要离开巡查,去_____。
10-45	你们区域(或在_____)有一只死动物吗? 我们区域(或在_____)有一只死动物。
10-46	我要在我的区域(或在_____)帮助一位驾驶汽车的人吗?或你 要在你的区域(或在_____)帮助一位驾驶汽车的人吗? 在你的区域(或在_____)帮助一位驾驶汽车的人。或在我的区 域(或在_____)我要帮助一位驾驶汽车的人。
10-47	在你的区域(或在_____)现在需要修理道路吗? 在我的区域(或在_____)现在需要修理道路。
10-48	在你的区域(或在_____)需要确定交通标准吗? 在我的区域(或在_____)需要确定交通标准。
10-49	在你的区域(或在_____)交通信号灯是否不亮了? 在我的区域(或在_____)交通信号灯不亮了。
10-50	在你的区域(或在_____)发生意外事故了吗? 在我的区域(或在_____)发生了意外事故。
10-51	在你的区域(或在_____)需要一辆牵引车吗? 在我的区域(或在_____)需要一辆牵引车。
10-52	在你的区域(或在_____)需要一辆救护车吗? 在我的区域(或在_____)需要一辆救护车。
10-53	在你的区域(或在_____)道路堵塞了吗? 在我的区域(或在_____)道路堵塞了。
10-54	在你的区域(或在_____)有动物在道路上吗? 在我的区域(或在_____)有动物在道路上。
10-55	在你的区域(或在_____)有一名酒醉驾驶者吗?

(续)

十字码信号	提 问 及 回 答
10-56	在我的区域(或在____)有一名酒醉驾驶者。 在你的区域(或在____)有一名酒醉步行者吗? 在我的区域(或在____)有一名酒醉步行者。
10-57	在你的区域(或在____)是否发生了汽车驾驶员肇事逃逸的 事故?
10-58	在我的区域(或在____)发生了汽车驾驶员肇事逃逸的事故。 在我的区域(或在____)我要指挥交通吗?
10-59	在你的区域(或在____)指挥交通。 在你的区域(或在____)有护送者吗?或需要护送者吗?
10-60	在我的区域(或在____)有护送者,或需要护送者。 在你的区域(或在____)有执勤小队吗?
10-61	在我的区域(或在____)有执勤小队。 在你的附近地区(或在____附近)全体人员都在吗?
10-62	在我的附近地区(或在____附近)全体人员都在。 我要答复____的电报吗?
10-63	答复____的电报。 我要做____的笔录吗?
10-64	做____的笔录。 这封电报是本地投递吗?
10-65	这封电报是本地投递。 你有最后的电报作业吗?
10-66	我有最后的电报作业。 你希望删去电报号码吗?
10-67	我希望删去电报号码。 我要清除最后的电报吗?
10-68	清除最后的电报。 我要传播关于____的信息吗?
10-69	传播关于____的信息。 你收到我的号码从____到____的电报了吗?
10-70	我已经收到你的号码从____到____的电报。 在你的区域(或在____)发生火灾了吗?
10-71	在我的区域(或在____)发生火灾了。 我要说明我的区域(或____的)这次火灾的细节吗?
10-72	说明你的区域(或____的)这次火灾的细节。 我要报告我的区域(或____的)火灾的经过吗?
10-73	报告你的区域(或____的)火灾的经过。 有你的区域(或____)发生烟雾的报告吗?

(续)

十字码信号	提问及回答
10-74	有我的区域(或在_____)发生烟雾的报告。 (没提问) 否定的。
10-75	你与_____联系了吗? 我与_____联系了。
10-76	你要去_____吗? 我要去_____。
10-77	你估计什么时候到达_____? 我估计当地时间_____ (或协调世界时间_____)到达_____。
10-78	你需要帮助吗? 在这一区域(或在_____)我需要帮助。
10-79	要我通知_____的验尸官吗? 通知_____的验尸官。
10-82	我要在_____预订一个旅馆或汽车旅馆的房间吗? 在_____预订一个旅馆或汽车旅馆的房间。
10-85	你(或_____)将晚到吗? 我(或_____)将晚到。
10-87	我要带着销售账单吗? 带着销售账单。
10-88	_____的电话号码是多少? _____的电话号码是_____。
10-90	在你的区域(或在_____)有银行警报吗? 在我的区域(或在_____)有银行警报。
10-91	没有案件时我使用无线电吗? 没有案件时你使用无线电。
10-93	在你的区域(或在_____)交通堵塞吗? 在我的区域(或在_____)交通堵塞。
10-94	在你的区域(或在_____)有非法拉力赛吗? 在我的区域(或在_____)有非法拉力赛。
10-96	在你的区域(或在_____)有一位精神病患者吗? 在我的区域(或在_____)有一位精神病患者。
10-98	在你的区域(或在_____)有越狱逃犯吗? 在我的区域(或在_____)有越狱逃犯。
10-99	_____是被通缉者或赃物吗? _____是被通缉者或赃物。



## 26.5 语音字母表

语音字母表有 26 个词,对应于英语 26 个字母,它被无线电话员使用以便在介乎两者之间的情况下来分清信息。在表 26-5 中列出这些词的发音,使它们不容易与其他词混淆。

在无线电话通信中当需要拼一个词时,话务员会说,“他的名字叫 Stan,拼写时是由 Sierra, Tango, Alpha, November 四个词的词头组成的”。

语音字母只在必要时使用。否则接收话务员会发生混淆或搞错。语音不用来区分普通词。如果条件如此差,以致语音通信很困难,则采用双文本模式如无线电传打字、莫尔斯电码等。

表 26-5 国际通信联盟推荐的语音字母表

字 母	发 音	字 母	发 音
A	AL-fa	N	No-VEM-ber
B	BRAH-vo	O	OS-car
C	CHAR-lie	P	pa-PA
D	DEL-ta	Q	Que-BECK
E	ECK-o	R	ROW-me-oh
F	FOX-trot	S	See-AIR-ah
G	GOLF	T	TANG-go
H	ho-TEL	U	YOU-ni-form
I	IN-dia	V	VIC-tor
J	Ju-li-ETTE	W	WHIS-key
K	KEE low	X	X-vay
L	L.EE-ma	Y	YANK-key
M	MIKE	Z	ZOO-loo

## 26.6 协调世界时间

为了实用目的,协调世界时间 (Coordinated Universal Time) 是位于经度为  $0^{\circ}$ , 通过英国伦敦附近的格林威治子午线或本初子午线处的时间。协调世界时间通常称为 zulu。字母 Z 的语音表示就是格林威治时间。

当谈到协调世界时间时,一般是在军事上才用它。它也被航空、政府部门和业余无线电操作员所采用。当你认真地涉及到电子通信领域,

包括用个人计算机的*在线服务*时,你将遇到军事时间。

在 24 小时制中,人们以几百来谈论时间,你将听到这样的表示:“喔 300 协调世界时间”或“1700zulu”把它们写出来就是 0300Z 和 1700Z。这分别表示上午 3:00,下午 5:00。当谈及时间要准确到分时,人们就这样说“1543 协调世界时间”或“1543zulu,这可以写成 1543Z,表示下午 3:43。还要指出,24 小时制中在时和分之间没有冒号,12 小时制中也是这样。

表 26-6 表示协调世界时间与美国*不同时区*的时间关系。*东部夏令时间*比协调世界时间晚 4 小时;*东部标准时间*和*中部夏令时间*比协调世界时间晚 5 小时;*中部标准时间*和*山区夏令时间*比协调世界时间晚 6 小时,*山区标准时间*和*太平洋标准时间*比协调世界时间晚 7 小时;*太平洋标准时间*比协调世界时间晚 8 小时。

表 26-6 协调世界时间转换为美国国内不同时区的时间

UTC	EDT	EST/CDT	CST/MDT	MST/PDT	PST
0000	2000*	1900*	1800*	1700*	1600*
0100	2100*	2000*	1900*	1800*	1700*
0200	2200*	2100*	2000*	1900*	1800*
0300	2300*	2200*	2100*	2000*	1900*
0400	0000	2300*	2200*	2100*	2000*
0500	0100	0000	2300*	2200*	2100*
0600	0200	0100	0000	2300*	2200*
0700	0300	0200	0100	0000	2300*
0800	0400	0300	0200	0100	0000
0900	0500	0400	0300	0200	0100
1000	0600	0500	0400	0300	0200
1100	0700	0600	0500	0400	0300
1200	0800	0700	0600	0500	0400
1300	0900	0800	0700	0600	0500
1400	1000	0900	0800	0700	0600
1500	1100	1000	0900	0800	0700
1600	1200	1100	1000	0900	0800
1700	1300	1200	1100	1000	0900

(续)

UTC	EDT	EST/CDT	CST/MDT	MST/PDT	PST
1800	1400	1300	1200	1100	1000
1900	1500	1400	1300	1200	1100
2000	1600	1500	1400	1300	1200
2100	1700	1600	1500	1400	1300
2200	1800	1700	1600	1500	1400
2300	1900	1800	1700	1600	1500
2400	2000	1900	1800	1700	1600

注：1. 带 \* 的时间是协调世界时间的前一天。

2. UTC 表示协调世界时间；EDT 表示东部夏令时间；  
 EST 表示东部标准时间；CDT 表示中部夏令时间；  
 CST 表示东部标准时间；MDT 表示山区夏令时间；  
 MST 表示山区标准时间；PDT 表示太平洋夏令时间；  
 PST 表示太平洋标准时间。

## 26.7 焊接和去除焊料

**焊料**是金属合金，用来加固导线之间的电连接。有几种类型的焊料，它们用于不同的金属和不同的用途。

### 26.7.1 焊料的类型

最常用的焊料是由锡和铅制成的，它含有松香芯。有一些类型的焊料含有酸性芯。在电子设备中应使用**松香芯焊料**。

在**锡铅焊料**中，组成金属的比例决定了焊料的熔点，锡与铅的比例越高，熔点越低。对于一般的焊接用途，采用 50：50 的焊料。对于热敏感的元件，用 60：40 的焊料更好，因为它的熔点低。锡铅焊料适用于除铝以外的大多数金属。要焊接铝，必须用**铝焊料**。它比锡铅焊料的熔点高，这时需要用喷灯或其他产生高热的装置。

在大电流线路中，推荐使用**银焊料**，因为银焊料能承受得住当大电流通过元件连接处时所产生的高温。使用银焊料工作时必须用喷灯。必须在通风良好的地方使用银焊料，因为加热时会产生危险的浓烟。

表 26-7 给出常用的几种焊料及它们的熔点和主要用途。

表 26-7 用于电子工业的几种常用焊料

焊料种类	熔点		用途
	°F	°C	
锡/铅 50/50, 松香芯	430	220	一般用途
锡/铅 60/40, 松香芯	370	190	低热
锡/铅 63/37, 松香芯	360	180	低热
银	600	320	高热, 大电流
锡/铅 50/50, 酸芯	430	220	金属片, 压焊

### 26.7.2 焊接设备

**焊枪**是快速加热的焊接工具。之所以叫它“枪”是因为它的形状像枪,手指按压住触发工作开关,能在几秒钟内使元件加热升温。在组装和修理某类电子设备时使用焊枪是很方便的。对于不同的用途可采用不同瓦数的焊枪。

**烙铁**由加热元件和手柄组成,接通电源后需要几分钟烙铁才能完全加热。烙铁越大,升温时间越长。最小的烙铁功率只有几瓦,它用于微小型电子设备。最大的烙铁要耗电几百瓦,它用于室外金属线绞接和金属片焊接。

对于金属片焊接和室外的导线绞接可以用喷灯。其主要优点是便于携带,工作时不需要用电,这就不需要很长的电线。当刮大风时,在焊枪和烙铁不能很好工作的情况下,喷灯能够提供足够的热量。

使用各种焊接设备都必须十分小心,因为它们的热量足以引起火灾。在有挥发性液体,如酒精和汽油存在的场合,不能使用焊接设备。

### 26.7.3 印制电路板焊接

大多数**印制电路板焊接**是在电路板上不装元件的一面进行的。元件的引线插入合适的孔,烙铁放在该处同时加热金属箔和引线,见图26-1a。如果元件对温度很敏感,则需要用尖嘴钳从电路板装元件的一侧夹住元件的引线。当元件引线和金属箔结点处足够热时,焊料就熔化并流入结点处。加热需要几秒钟,焊料应该完全覆盖元件引线中心周围金属箔的区域。过多的焊料是没用的。当结点冷却后,用斜口钳将多余的元件引线齐焊料平面剪去。

如果印制电路板是双面的(两面都有金属箔),它一般有**电镀的过孔**,上述焊接过程也适用。但是如果孔不是电镀的过孔,必须用焊料将

印制电路板两面元件引线 and 金属箔焊牢。

有时元件要装在印制电路板有金属箔的一面,在这种情况下应将元件引线和电路板上的金属箔表面首先涂上一层薄焊料。然后将元件引线平放在金属箔上,把烙铁放在元件引线上,见图 26-1b,通过热传导就可将焊料熔化。

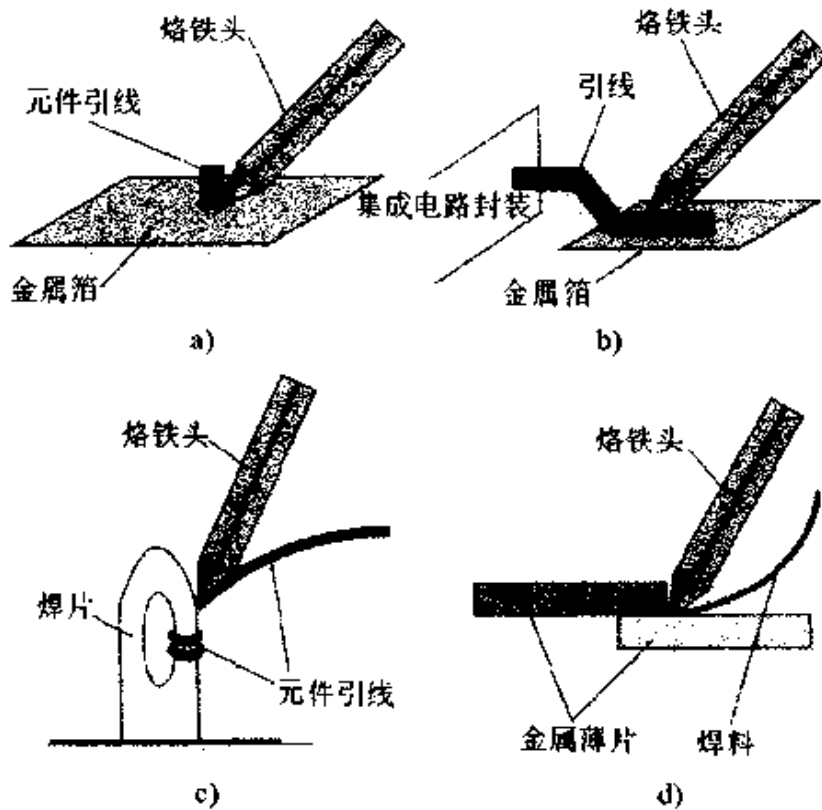


图 26-1 元件焊接

- a) 元件与金属箔不在同一面的焊接 b) 元件与金属箔在同一面的焊接 c) 元件引线 with 焊片的焊接 d) 金属薄片的焊接

#### 26.7.4 点对点焊接

大多数点对点布线是用焊片完成的。焊片上接有一条或多条线的末端。

在用焊片布线时,焊片上首先涂上一层薄焊料。在所有的线没有接到焊片上之前不要进行实际焊接。用尖嘴钳将导线缠绕焊片 2~3 圈,将多余的线头用斜口钳剪去。当所有线都接到焊片后,用焊接工具对着每一个线圈,一次一个进行焊接。当焊料自由地流进线圈的缝间并粘上导线和焊片后就焊接好了,见图 26-1c。要用足够的焊料使接点处被完全盖上,但焊料也不要太多以致成球或滴下。

如果绕到焊片上去的是对热敏感的元件,则要用尖嘴钳将热从元件上导走。钳子必须钳在连接处和元件之间的引线上,在焊点冷却到室温之前不要将钳子移开。不能试图用水来冷却焊点。

如果焊接的接点处温度不够高,则会造成冷焊点。正常的焊接点有光亮洁净的外观,而冷焊点看起来是灰暗和不平的。许多电子设备的失效就是因为存在冷焊点,它具有高的电阻并断断续续地导电。一旦发现冷焊点,要用工具将尽可能多的焊料去除掉,把表面搞干净再重新将接点处焊牢。

### 26.7.5 金属薄片焊接

当要焊接金属薄片时,应尽可能用松香芯焊料,但是有时候使用松香芯焊料会降低接点处的机械强度,有些情况下要用酸芯焊料。对于铝要选用特殊的焊料,它不容易与大多数焊料粘结。

当焊接金属薄片时,它的表面应当用金刚砂纸打磨,然后用没有腐蚀性和油性的溶液像异丙基乙醇清洁其表面。两块金属薄片都涂上一薄层焊料后,用大功率烙铁或喷灯将它们加热,足够的热量会使焊料自由流动;在焊接的每一边还要用一些附加的焊料,从一边到另一边沿长度方向进行焊接,见图 26-1d。经过一定时间焊接处才会冷却,直到它完全冷却之前应使它不受外力,不能试图用水和其他液体加速它的冷却过程。

### 26.7.6 去除焊料

在电子电路中,当要更换一个失效的元件时,一般需要对连接处去除焊料。

对于大多数印制电路板,去除焊料包括用烙铁加热和从接点处将焊料除掉。连接处必须加热到足够温度以使焊料熔化。要避免过量加热,目的是只去掉连接处的焊料,而电路板和附近的元件不致被损坏。

许多复杂的去焊料设备现在可为人们所用。一种普及的设备是采用空气吸嘴,它可以在用烙铁加热连接处时靠抽真空来吸掉焊料。当有大量的连接点需要去除焊料时,这一设备特别有用,因为它工作很快。当对很小的接点去除焊料时它也很有用,因为这时有毛病的空间很小。对于大的连接处,例如导线绞缠并用焊料焊接的接头,有时更好的办法是去掉整个接头,而不要试图去除掉焊料。

## 26.8 机器人时代

某些研究人员分析了机器人的进展,指出人类已进入*机器人时代*。第一位做出此番正式论述的工程师是日本的中野营次。

### 26.8.1 第一代机器人

中野营次指出,*第一代机器人*是简单的机械手。这种机械手有能力做出高速、多次、长时间的精密移动。这样的机器人如今被用在工业生产中。第一代机器人可以群体工作,只要它们的动作是同步的。人们必须经常监视它们的工作,因为如果它们一旦失调而继续进行工作,结果将生产出一系列不合格的产品。

### 26.8.2 第二代机器人

*第二代机器人*具有一些*人工智能*。这样的装置包括*压力传感器*、*接近传感器*、*触觉传感器*和*机器视觉*。机器人控制器(计算机)处理从传感器送来的数据并相应地调整机器人的工作。这些装置大约在1980年左右进入一般应用。第二代机器人能够相互保持同步,不需要操作人员经常监视。

### 26.8.3 第三代机器人

有两条途径来发展*第三代机器人*技术。*自主机器人*能够自己独立工作,它们内含自控装置,大部分这样的机器人工作时不需要监视。最好的例子就是*仿人机器人*。

有些情况下自主机器人不能很好工作,这时就使用在一个中心计算机控制下的数个简单的机器人。它们工作起来类似于蚁穴中的一群蚂蚁或蜂箱中的蜜蜂。这些机器人叫做*昆虫机器人*。

### 26.8.4 第四代机器人和今后的发展

在中野营次的论述文章中,他没有写出第三代机器人后还将出现什么样的机器人。但是,我们可以推测,*第四代机器人*尚需人们认真思索研究。也许第四代的机器人群体能够繁殖和进化,或者具有推理思考能力,能够代替人类在很多方面做事情。关于*第五代机器人*我们可以说还没有谈到过、写到过或在电影上出现过。

表26-8是机器人时代的综合划分、机器人的能力及出现的大体时间。

表 26-8 机器人时代

时代	出现的时间	能 力
第一代	1980 年以前	主要是机械的、固定的,高精度,高速度,耐用,用于伺服机构,无外传感器,无人工智能
第二代	1980~1990 年	有触觉传感器、视觉系统、位置传感器、压力传感器,微型计算机控制,程序化
第三代	1990 年至今	可移动的,自主的,类似于昆虫,实现人工智能化,语音识别、语音合成、导航、遥控
第四代	将来	设计尚未开始,可繁殖吗?可进化吗?像人一样地活着吗?像人一样聪明吗?有真实的幽默感吗?这些问题均为未知
第五代	?	尚未讨论

## 26.9 湿件

湿件是表示计算机与人脑相联系。这个词最早是由科学幻想小说的作者杜撰出来的,但是湿件正在成为现实。

### 26.9.1 脑电波

湿件后面的概念是简单的:将计算机接到脑电图仪上,试图让计算机得到受脑电波变化控制的响应。人的精神和身体状态变化伴随着脑电波不同的频率和波形。表 26-9 给出公认的脑电波类型,它们以赫兹为单位的频率范围及当时受测人员的精神和身体状态。尽管设备和系统不能直接推断受测者的意图,但是波形和频率能够被编成程序。

表 26-9 脑电波类型与人的行为

类 型	频 率 /Hz	行 为
$\alpha$	8~13	醒着,活跃的,放松的
$\mu$	8~13	紧张的肌肉活动(触摸和移动)
$\beta$	13~30	高度精神集中
$\delta$	0.5~5	深度睡眠
$\theta$	4~7	轻度睡眠,做梦

### 26.9.2 应用

在这里讨论湿件的一些用途。从今天的眼光来看有些想法是稀奇古怪的,但是技术能够将今天认为可笑的东西变为现实。

(1) 湿件最有希望的用途是假肢或人工手足的控制。这就有必要研究大脑指挥的新的途径,而人的大脑能够很好地使自己适应这种变



化。还有,可以用湿件去控制电子神经和刺激肌肉,这样手足瘫痪的人就可以康复。

(2) 可以用湿件遥控复杂机械设备的工作。一名将军可以坐在一个暗室里,眼睛盯着监视器屏幕,观看在远距离战区内机器人士兵、坦克、舰船和飞机的运动。而敌人可能是另一名将军,在某个遥远的暗室里,观看着不同的屏幕,指挥着同一场战斗。

(3) 除了人们已经想到的控制肌肉、人工手足和机器的运动外,设想信号能否被处理并送进大脑?一对摄像管就是一双眼睛,一对话筒就是一对耳朵。*触觉传感器*能够让人感觉到热、冷、材料质地和压力。数据可以被送到安在头皮上的电极并注入大脑或脊髓。这样的技术可以用来武装*遥控替身*。这时,机器人可以取代人类到危险的或人类到不了的地方工作。

(4) 一些音乐家已经表示他们对将脑电波转换为声音感兴趣。这曾经用计算机和电子音乐合成器试验过,具有混合的效果。用大脑控制来绘画可以产生“脑电波艺术”。还有人建议用大脑阅读计算机可以帮助作者写出自己的想法。但是涉及上述内容的湿件技术水平在今后几十年内不可能达到。

(5) *计算机游戏*是湿件在当代可实现的应用。你可以和朋友竞赛看谁能对激烈的场面实现最佳控制,例如飞机着陆或卡通人运动。上述“虚拟战争”的例子适用于个人计算机,它可以改变从格斗到棒球、足球、篮球或几乎所有其他竞技性项目的方式,但它是非破坏性的运动。

# 索引

## 数字及英文字母词汇

1/4 波长天线 241  
1 级安全通信系统 190  
2 级安全通信系统 191  
2 阵元八木天线 249  
2 阵元四方天线 250  
3 级安全通信系统 191  
3 阵元八木天线 249  
3 阵元四方天线 250  
A 类放大器 157  
AB 类放大器 157  
AB<sub>1</sub> 类放大器 158  
AB<sub>2</sub> 类放大器 158  
B 类放大器 158  
B 类推挽放大器 158  
BNC 连接器 68  
C 类放大器 159  
C 类射频功率放大器 159  
D 层 260  
D 形壳式连接器 70  
E 层 260  
E 平面 246  
F 层 260  
F1 层 260  
F2 层 260

GB 平面 42  
H 平面 245  
j 运算子 300  
JK 触发器 50  
L 型低通滤波器 169  
L 型高通滤波器 168  
m 派生 LC 滤波器 173  
N 沟道 MOSFET 109  
N 沟道结型场效应晶体管  
106  
N 沟道金属-氧化物-半导体  
逻辑电路 117  
N 型半导体 88  
N 型连接器 69  
NPN 晶体管 100  
P 沟道 MOSFET 110  
P 沟道结型场效应晶体管  
106  
P 沟道金属-氧化物-半导体  
逻辑电路 117  
P 型半导体 88  
PIN 二极管 92  
PN 结 88  
PNP 晶体管 100  
Q 信号 398  
RC 电路 34

RC 平面 33  
 RC 相移角 34  
 RC 音调控制 161  
 RL 电路 30  
 RL 平面 29  
 RL 相移角 31  
 RS 触发器 49  
 RST 触发器 50  
 RX 平面 37  
 SWR 损耗 40  
 T 触发器 50  
 T 型高通滤波器 168  
 TO 封装 113  
 X 射线谱 268  
 $xy$  平面 319  
 $xyz$  空间 322  
 $\alpha$  截止频率 104  
 $\pi$  型低通滤波器 169

## 汉字词汇

### A

阿姆斯特朗振荡器 146  
 铱 336  
 铈 336  
 铍 335  
 安培 1  
 安培定律 12  
 安培每米 301  
 安培米 301  
 安培小时 82  
 安全性 189  
 安匝 11, 301  
 暗噪声 143  
 奥斯特 301

### B

八进制数字系统 45  
 八木天线 249  
 八位位组 51  
 巴特沃兹滤波器 173  
 巴特沃兹滤波器响应 173  
 钇 333  
 板极 135  
 半波整流器 73  
 半导体 328  
 半对数图 319  
 半功率点 171  
 包层 66  
 包络检波 91, 201  
 包络检波器 199  
 饱和 97, 102  
 饱和度 56  
 饱和式磁力仪 132  
 保密性 189  
 报文分组 178  
 背压力传感器 130  
 钇 334  
 倍频器 217  
 本初子午线 410  
 本地节点 54  
 本地振荡器 196  
 本征半导体 92

比较器集成电路 116  
比例检波器 199, 203  
比特 51  
笔记录仪 288  
闭环结构 115  
铋 335  
避雷器 189  
避雷针 189  
边带 214  
边射天线阵列 248  
边沿触发 50  
边沿检测 231  
便携式业余无线电设备  
186  
变流电源 85  
变流器 85  
变容二极管 89, 96, 152  
变容管 96  
变送器 120  
变压器 27, 71  
变压器耦合 163  
标量 28  
标准电池 82  
表面结构传感器 132  
并行-串行 (P/S) 转换 53  
并行电缆 65  
并行数据传输 53  
波长 255  
波导 143, 253  
波特 51  
波阻抗 39

铍 336  
伯明翰线规 60  
铂 335  
铂碲 339  
博多电码 48, 212  
不规则波 18  
不间断电源 85  
布尔代数 46  
布尔定理 46  
步进电动机 125  
步进角 125  
步谈机 187  
铀 336

## C

擦除头 122  
擦除头指示器 124  
采样分辨率 219  
参考天线 245  
参考振荡器 153  
操纵杆 123  
操作系统灵活性 235  
测距 227  
测向器 226  
插入损耗 170  
插入增益 170  
缠绕绞接 61  
长线天线 247  
常闭继电器 13  
常开继电器 13  
常用对数 325

常用数学符号 312  
 场效应晶体管 105  
 超大规模集成电路 118  
 超文本 180  
 超声滤波器 174  
 超声移动检测器 296  
 超外差接收机 197  
 超正析像管 142  
 沉积静电噪声 270  
 衬底 106  
 成捆光纤 67  
 乘积检波器 199, 203  
 赤经 321  
 赤纬 321  
 充气管 134  
 重试口令限制 236  
 臭氧 331  
 储存寿命 82  
 触发器 49  
 触觉传感器 416, 418  
 触摸板 124  
 传导冷却 140  
 传导噪声 273  
 传感器 128  
 传输线 39, 252  
 传统的抛物面天线馈电系统  
     250  
 传真 184  
 串并网络 7  
 串行-并行 (S/P) 转换 53  
 串行电缆 65

串行数据传输 53  
 申音 65  
 垂直极化 258  
 纯电阻 38  
 纯正弦波 16  
 纯直流 3  
 磁场 11  
 磁场强度 11, 301  
 磁带 13  
 磁带录音机 122  
 磁导率 12  
 磁动势 301  
 磁钢 338  
 磁极强度 301  
 磁介质 122  
 磁控管 143  
 磁盘 14  
 磁通量 301  
 磁通(量)密度 11  
 磁通(量)线 11  
 磁通门磁强计 232  
 磁通密度 301  
 从触发器 50  
 存储器 118  
 存储容量 82

## D

打拿极 142  
 打印 235  
 大地到云的闪电 187  
 大规模集成电路 118

- 大环形天线 243  
大陆码 397  
带宽 171, 214  
带通滤波器 166, 216, 274  
带止滤波器 167, 280  
带中心抽头的全波整流器  
73  
带状电缆 64  
带阻滤波器 167  
单边带发射机 216  
单变频接收机 197  
单列直插式封装 113  
单平衡混频器 93  
单位圆 323  
单向相控阵系统 247  
单音静噪 194  
单元电荷 298  
氮 331  
氮化钽 340  
导纳 41  
导体 328  
导线夹 67  
倒相输入 115  
铊 333  
德国银 339  
灯泡嗡嗡声 281  
灯丝 135  
低地轨 (LEO) 卫星 182  
低电平调幅 213  
低频 265  
低通滤波器 168  
低通响应曲线 169  
镉 334  
笛卡尔平面 319  
笛卡尔三维空间 322  
地波 259  
地面波 258, 259  
地平面天线 242  
地网 245  
地月地方式 266  
第二代机器人 416  
第二中频 197  
第三代机器人 416  
第四代机器人 416  
第五代机器人 416  
第一代机器人 416  
第一中频 197  
碲 334  
碲镉汞 339  
点对点布线 414  
点火噪声 271  
点接触二极管 91  
碘 334  
碘化汞 339  
碘化钠 340  
电波波长 256  
电场强度 300  
电池 80  
电池组 80  
电磁变速器 122  
电磁场 255  
电磁场强度 300

- 电磁辐射损耗 27  
电磁干扰 168, 277  
电磁脉冲 91  
电磁频谱 255  
电磁屏蔽 64  
电磁阴极射线管 140  
电导 6, 298  
电导率 298  
电动机 124  
电动机/发电机 127  
电动势 2, 298  
电镀的过孔 413  
电感-电容回路 114  
电荷储存二极管 92  
电荷载流子 1  
电话用插头和插座 69  
电极化率 300  
电接地 244  
电解电容器 76  
电抗 28  
电抗调制 217  
电可擦除可编程只读存储器  
119  
电缆 58, 63  
电离层 260  
电流 1  
电流表 283  
电流表分流器 284  
电流放大器 103  
电流增益 103, 155  
电路断路器 71, 80, 175  
电纳 41  
电容器输入滤波器 77  
电容(式)接近传感器 130  
电容(式)压力传感器 128  
电视接收机 204  
电枢线圈 124  
电网滤波器 175  
电压倍增器 75  
电压表 284  
电压放大 109  
电压尖峰 79  
电压控制振荡器 96  
电压增益 155  
电眼 295  
电源 71  
电源变压器 71  
电源逆变器 85  
电源线滤波器 275  
电源线噪声 272  
电晕 270  
电噪声 258  
电子 327  
电子管 134  
电子管稳压器 78  
电子开关 91  
电子壳层 327  
电子枪 140  
电子窃听器 292  
电子学 342  
电子邮件 179  
电阻 2, 28

电阻并联 6  
电阻串联 5  
电阻-电容回路 114  
电阻火花塞 271  
电阻率 58, 60  
电阻性阻抗 38  
叠层电池 84  
定时器集成电路 116  
定向功率计 286  
铥 334  
东部标准时间 411  
东部夏令时间 411  
氩 335  
动态变送器 120  
动态电流放大 103  
动态范围 198  
动态互电导 109  
动态话筒 120  
动态随机存取存储器 118  
动态扬声器 120  
独立应用的光电系统 25  
端射天线阵列 248  
端至端加密 191  
短波接收机 185  
短波收听 185  
对等式局域网 180, 236  
对流层 263  
对流层传播 263  
对流层管道 263  
对流层散射 264  
对流层弯曲 263

对数 325  
对数极坐标导航 229  
多级口令保护 235  
多量程表 284  
多普勒雷达 225  
多腔速调管 144  
多数载流子 329  
多宿主机 235  
多谐振荡器 154  
多芯电缆 64

## E

铱 335  
扼流圈输入滤波器 77  
鳄鱼夹 67  
铟 334  
二次电池 81  
二次电子 137  
二次谐波 279  
二极管 88, 135  
二极管限幅器 94  
二极管振荡器 149  
二进制数据 48  
二进制数字系统 45  
二维距离标绘 228  
二氧化铬 338  
二氧化硅 340  
二氧化锰 338  
二氧化钛 340  
二氧化锕 338



## F

- 发电机 25, 127  
 发光二极管 97  
 发射极 100  
 发射极跟随器 105  
 发射极耦合逻辑电路 117  
 发射天线 122  
 法拉 299  
 法拉第屏蔽 276  
 法拉每米 300  
 钒 332  
 反馈 145  
 反射波 259  
 反射功率 286  
 反射器 249  
 反射速调管 144  
 反相 23  
 反相放大器 157  
 反相器 47  
 反向偏置 89, 101  
 方波 16  
 方均根幅度 21  
 方向图 246  
 钿 336  
 仿人机器人 231, 416  
 访问记录 235  
 放大器 155  
 放大系数 155  
 放音头 123  
 放音状态 123  
 飞眼球 293  
 非 46  
 非倒相输入 115  
 非电抗性阻抗 38  
 非门 47  
 非线性 92  
 非易失存储器 118  
 镨 336  
 分贝 155, 287  
 分级口令保护 235  
 分压器 10  
 分子 327, 328  
 分组通信 53  
 分组无线通信 54  
 风冷 140  
 风力发电站 26  
 峰-峰幅度 21  
 峰值反向电压 73  
 峰值幅度 20  
 峰值响应 172  
 蜂窝电话 182  
 蜂窝电话克隆 194  
 蜂窝通信系统 182  
 伏安容量 72  
 伏特 2, 298  
 伏特每米 300  
 伏特-欧姆-毫安表 285  
 氟 331  
 氟化镁 338  
 氟化锌镁 341  
 幅度 20

辐射电阻 238  
 辐射热 296  
 辐射热检测器 296  
 辐条地线 244  
 负边沿触发 50  
 负峰值幅度 20  
 负逻辑 47  
 负载控制 165  
 负阻特性 96  
 复合波 17  
 复合交直流 22  
 复数 36  
 复数导纳 41  
 复数阻抗 29, 300  
 负数阻抗矢量 29  
 复用 209  
 复用器集成电路 116

G

伽玛射线谱 268  
 钷 334  
 钙 332  
 干电池 81  
 干扰 269  
 感抗 28  
 感性电纳 41  
 钢 340  
 高电平调幅 213  
 高频 265  
 高清晰度电视 204, 221  
 高斯 11

高通滤波器 168  
 高通响应曲线 168  
 高压输电网 87  
 高压线 26  
 锆 333  
 格林威治子午线 320, 410  
 隔行扫描 222  
 镉 333  
 个人通信系统 182  
 各向同性辐射器 245  
 铬 332  
 铬镍(耐热)合金 338  
 跟踪球 124  
 耿氏二极管 96  
 耿振发射器 96  
 工作比 176  
 功率计 285  
 功率损耗 27  
 功率增益 156, 245  
 汞 335  
 汞电池 84  
 共发射极电路 104  
 共基极电路 104  
 共集电极电路 105  
 共漏极电路 113  
 共栅极电路 112  
 共线角形反射器阵列 252  
 共享电子 327  
 共源极电路 112  
 勾股定理 37  
 沟道 106

- 钴 332  
固定栅极偏置 107  
固定衰减器 176  
固化 119  
管道效应 263  
管状线 252  
光(电)发射 97  
光编码器 128  
光电倍增管 142  
光电二极管 98  
光电检测器 220  
光电接近传感器 131  
光电能量发生系统 25  
光度计 288  
光伏电池 99  
光伏效应 99  
光隔离器 99  
光敏二极管 98  
光耦合器 99  
光纤 66  
光纤光缆 66  
光纤技术 98  
光学扫描器 184  
光阴极 142  
广域网 235  
硅 331  
硅钢 340  
硅光电二极管 98  
硅酸钙 337  
硅酸镉 337  
硅酸镁 338  
硅酸钠 340  
硅酸铍锌 341  
硅酸锌 341  
硅酸锌铍镉 341  
国际单位制 297  
国际莫尔斯电码 397  
过度驱动 160  
过氧化铅 338
- ## H
- 哈脱莱振荡器 146  
铪 335  
氦 330  
氦-氟 338  
铯 336  
焊料 412  
焊枪 413  
毫安 1  
耗尽区 89, 95, 107  
耗尽型 MOSFET 111  
盒式录像机 141  
荷电载流子 134, 327  
荷电载流子迁移率 300  
赫兹 15, 255, 299  
黑子循环 260  
镱 336  
亨利 299  
横列定向天线 248  
红绿蓝 (RGB) 色彩模型  
55  
红外发光二极管 97

- 红外移动探测器 295  
虹膜识别 194  
弧度 301  
弧度每秒 20, 302  
弧度每二次方秒 302  
互补金属-氧化物-半导体逻辑电路 117  
互调失真 199  
互动式的光电系统 26  
化合物 328, 337  
环杆天线 243  
环形天线 242, 276  
缓冲寄存装置 53  
换向器 124  
惠斯顿电池 82  
混合物 337  
混频器 198, 200  
钛 334  
或 46  
或非 46  
或非门 47  
或门 47
- J**
- 机电变送器 123  
机器虫 236  
机器人 236  
机器人时代 416  
机器视觉 233, 416  
机械滤波器 174, 199  
基尔霍夫第二定律 10  
基尔霍夫第一定律 10  
基极 100  
基频 16, 279  
基台 182  
激光二极管 97  
激光器 291  
激射 97  
吉伯 12  
吉赫 15  
极光传播 261  
极化 258  
极间电容 138  
极坐标平面 319  
急变二极管 92  
集成电路 100  
集成电路放大器 157  
集电极 100  
集电极电流 102  
集肤效应 58  
计数器 50  
计算机地图 234  
计算机游戏 418  
记忆存储集成电路 118  
继电器 13  
寄生发射 164, 280  
寄生现象 280  
寄生响应 280  
寄生阻尼器 167  
加速度 302  
夹断 107, 157  
镓 332

- 钾 332  
尖叫哨音 197  
间热式阴极 135  
监控系统 290  
检波 201  
检波后各级 199  
检波器 196, 199  
碱性电池 81, 83  
鉴频器 203  
键咔哒声 275  
江崎二极管 97  
降压变压器 27, 71  
交叉调制 280  
交流电 1  
交流电流表 283  
焦耳 298  
角加速度 302  
角频率 20  
角速度 302  
角位移变送器 123  
角形反射器天线 251  
阶跃恢复二极管 92  
阶跃折射率光纤 66  
接地回路 244  
接地汇流排 244  
接地系统 243  
接地直立天线 242  
接近传感器 416  
接收天线 122  
节点 179  
结电容 89  
结型场效应晶体管 106  
截止 157  
解复用器 116  
解密密钥 307  
介电常数 132, 300  
介质 328  
金 335  
金刚砂 340  
金刚石 331  
金属薄片 415  
金属壳封装 113  
金属-氧化物-半导体场效应  
晶体管 106, 109  
近程感测 228  
经度 320  
晶格滤波器 199  
晶体管 78, 100  
晶体管-晶体管逻辑电路  
116  
晶体管用积层电池 83  
晶体恒温箱 151  
晶体控制振荡器 150  
晶体滤波器 175  
静电变送器 121  
静电发射器 121  
静电放电 110  
静电屏蔽 13, 276  
静电拾音器 121  
静电阴极射线管 141  
静态触发 49  
静态随机存取存储器 118

- 静态正向电流转换比 103  
 静噪 204  
 静止频率 209  
 静止时间 209  
 静止卫星 181  
 镜像频率 197, 280  
 局域网 180  
 锡 336  
 矩形波 16  
 矩形波导 253  
 矩形响应 172, 201  
 距离标绘 228  
 距离分辨 227  
 距离感测 228  
 锯齿波 17  
 绝对值 37  
 绝对值阻抗 300  
 绝缘栅场效应晶体管 110  
 绝缘体 328  
 军用通信的安全性 191
- ### K
- 卡塞格伦抛物面天线馈电系  
 统 250  
 开放系统互连参考模型 54  
 开关键控 211, 278  
 开环结构 115  
 开路导线 252  
 开偶极子 239  
 铜 336  
 坎德拉 288  
 康铜 338  
 抗磁性材料 12  
 抗拉强度 58  
 抗体机器人 237  
 钪 332  
 考比兹振荡器 147  
 科学计数法 315  
 可编程分配器 153  
 可变电阻硅二极管 90  
 可变频率晶体振荡器 152  
 可变频率振荡器 149  
 可变栅极偏置 107  
 可擦除的可编程只读存储器  
 119  
 可见光谱 268  
 克拉泼振荡器 148  
 客户机-服务器式局域网  
 180  
 氦 333  
 空间飞船用电池 84  
 空穴 328  
 控制栅极 136  
 库仑 1, 298  
 库仑每伏米 300  
 跨导 109  
 快扫描电视 204, 220  
 快速熔断熔丝 80  
 宽带射频功率放大器 164  
 宽带调频 217  
 宽高比 220  
 矿石收音机 196

- 矿石无线电接收机 91  
 馈线 252  
 馈线失配损耗 40  
 昆虫机器人 236, 416  
 扩展频谱 194  
 扩展频谱通信 209
- ### L
- 喇叭天线 252  
 莱纳尔兹晶体振荡器 151  
 铼 335  
 镧 334  
 浪涌保护器 79  
 浪涌电流 75, 78  
 镑 336  
 铈 333  
 烙铁 413  
 雷达 224  
 雷击 187  
 镭 336  
 冷焊点 415  
 冷阴极 136  
 厘米/克/秒制系统 303  
 离化电位 132  
 离子 327  
 理想电池 82  
 锂 331  
 锂电池 84  
 立体角 302  
 连接器 67  
 两相步进电动机 125  
 亮度 56  
 聊天模式 235  
 钊 333  
 邻频道干扰 278  
 磷 331  
 磷化镓 338  
 磷酸钙 337  
 灵敏度 198  
 灵巧机器人 236  
 零级安全通信系统 190  
 零偏置 101  
 流明 288  
 流星散射传播 262  
 硫 331  
 硫化镉 337  
 硫化铜 338  
 硫化氧铈 340  
 硫砷银(矿) 339  
 硫酸 340  
 硫酸锌 341  
 硫酸锌镉 341  
 六氟化硫 340  
 六极管 138  
 漏极 106  
 钪 336  
 镓 335  
 录音头 122  
 录音状态 122  
 铝 331  
 铝焊料 412  
 铝镍钴永磁合金 337

铝酸锌 340  
 滤波扼流圈 77  
 滤波器 71, 76, 166, 204  
 滤波器带宽 171  
 氯 331  
 氯化钾 339  
 罗兰 227  
 逻辑 46  
 逻辑门电路 47  
 螺旋天线 250

## M

麦克斯韦 11  
 脉冲编码调制 219  
 脉冲持续时间调制 218  
 脉冲间隔调制 218  
 脉冲宽度调制 218  
 脉冲频率调制 218  
 脉冲调幅 218  
 脉冲调制 218  
 脉冲噪声 270  
 脉动直流 3  
 镁 336  
 慢熔断熔丝 80  
 慢扫描电视 206, 221  
 镅 336  
 每秒比特数 51  
 每秒周波数 299  
 美国国家标准局 208, 289  
 美国国家标准信息交换码  
 49, 212

美国线规 58  
 镁 331  
 钼 336  
 蒙内尔合金 339  
 锰 332  
 锰铜 339  
 米每二次方秒 302  
 米每秒 302  
 米/千克/秒制 297  
 民用无线电业务 185  
 模糊逻辑 47  
 模块结构 114  
 模拟-数字转换 52  
 模拟-数字转换器 129  
 模/数转换 219  
 莫尔斯电码 48, 211, 397  
 莫尔斯电码的“点” 211  
 莫尔斯电码的“划” 211  
 莫雷电码 48  
 姆欧 41, 298  
 钼 333

## N

镎 336  
 纳安 1  
 纳皮尔对数 325  
 钠 331  
 氮 331  
 氮管 134  
 脑电波 417  
 脑电图仪 417



内部噪声 272

铌 333

镍 332

镍镉 339

镍镉电池 81

镍铬合金 339

镍基电池 84

镍基蓄电池 84

镍-金属-氢电池 85

镍铝合金 337

镍铁 339

镍银 339

牛顿 302

钮扣电池 84

钹 334

钹钇铝石榴石 339

锆 336

## O

欧姆 2, 298, 299

欧姆表 284

欧姆定律 3

欧姆米 298

偶发性 E 层传播 261

偶极天线 239

## P

拍频振荡器 201

抛物面天线 250

镨 336

硼 331

硼酸镉 337

硼酸锌 341

碰撞雪崩渡越时间 96

碰撞雪崩渡越时间二极管  
96

皮尔斯振荡器 150

铍 331

偏置 107

偏转板 135, 141

偏转线圈 135, 140

频分多路复用 209

频率 15, 255, 299

频率倍增 92

频率计数器 50, 289

频偏 201

频谱分析仪 289

平方米每伏秒 301

平衡调制器 216

平面电缆 64

平面封装 113

平面角 301

平坦放电曲线 82

屏蔽 64

屏栅 137

钋 335

铀 334

镧 336

镱 334

## Q

七极管 138

齐伯林天线 240  
齐纳电压 90  
齐纳二极管 78, 89  
汽车电池 81  
契比雪夫滤波器 173  
千赫 15, 255  
千欧 2  
千瓦小时 82  
千兆赫 255  
铅 335  
铅酸电池 80, 84  
前侧比 246  
前端 164, 198  
前后比 246  
前向功率 286  
前向增益 246  
前缀乘子 302  
嵌埋路径 231  
氢 330  
氢氧化钾 339  
氢氧化镍 339  
氰化钾 339  
球面度 302  
球坐标 323  
驱动 160  
取样分辨率 52  
取样率 52  
全波电压倍增整流器 75  
全波桥式整流器 74  
全波整流器 74  
全内反射 66

全球定位系统 182, 228

## R

热电偶电流表 284  
热电式电流表 284  
热电丝式电流表 284  
热载流子二极管 93  
热噪声 272  
人工智能 416  
容抗 32  
容性电纳 41  
熔丝 71, 80  
铷 333  
弱信号放大器 164

## S

三次谐波 279  
三极管 136  
三角波 17  
三角函数 323  
三角恒等式 324  
三维距离标绘 228  
三相交流电 27  
三元逻辑 47  
散粒效应 272  
散粒噪声 272  
散热片 140  
扫描 140  
扫描变换器 206  
扫频 210  
扫调侦察接收机 290

- 色调 56  
铯 334  
傻瓜机器人 236  
山区标准时间 411  
山区夏令时间 411  
钐 334  
栅极 106, 135  
栅极接地 138  
栅极偏置 136  
栅控触发器 49  
闪电 187  
商务交易的安全性 191  
上标 315  
少数载流子 329  
舍位 317  
射频放大器 163  
射频干扰 290  
射频接地 244  
射频天线 122  
射频振荡器 145  
摄像管 141  
砷 332  
砷化镓 338  
甚低频 264  
甚高频 266  
甚高频电视广播频道 205  
升压变压器 72  
声变送器 120  
声纳 225, 282  
声学系统 282  
湿件 417  
十进制数字系统 44  
十六进制数字系统 45  
十字交叉指针式功率计 286  
十字码 402  
石墨 331  
石英晶体 150  
时分多路复用 209  
时区 411  
时钟 50, 289  
矢量 24, 29, 37  
示波器 140, 289  
视觉系统 233  
视像管 141  
铈 334  
手持对讲机 186  
手灯电池 84  
手印识别 194  
手中眼系统 293  
鼠标 124  
束射功率管 139  
数据压缩 53  
数模转换 223  
数字电流表 283  
数字电路 48  
数字电视 204  
数字集成电路 116  
数字-模拟转换 52  
数字式加密技术 191  
数字卫星电视 222  
数字卫星系统 222

- 数字信号处理 56, 208  
衰减器 166, 176  
双 T 振荡器 154  
双变频接收机 197  
双对数图 319  
双分集接收 207  
双极型晶体管 100  
双列直插式封装 113  
双目机器视觉系统 294  
双平衡混频器 93  
双屏蔽电缆 64  
双声道机器听觉系统 233,  
294  
双向相控阵系统 247  
双芯电缆 63  
水玻璃 340  
水电站 26  
水平极化 258  
顺序逻辑门 49  
瞬变 78, 79, 90  
瞬变过程抑制电容器 80  
瞬变过程抑制器 79, 189  
瞬时幅度 20  
瞬时绝对值 15  
锶 333  
嘶嘶声噪声 273  
四方八木天线 250  
四方天线 249  
四极管 137  
四相步进电动机 125  
伺服机构 293  
松香芯焊料 412  
速度 302  
速度因子 239  
速调管 144  
算术对称 172  
随机存取存储器 118  
随机噪声 273  
隧道二极管 97  
损耗 155  
损耗电阻 239  
缩写词 342  
锁相环 199, 203  
锁相环频率合成器 152
- T
- 铊 335  
太赫 15, 255  
太平洋标准时间 411  
太平洋夏令时间 411  
太阳黑子周期 269  
太阳能电池 86  
太阳能电池板 99  
太阳能电池组 99  
太阳耀斑 261  
钛 332  
钛酸钡 337  
钛酸钡锶 337  
弹性体 129  
钽 335  
碳 331  
碳化硅 340

- 陶瓷滤波器 175  
特高频 267  
特高频电视广播频道 205  
特高频连接器 68  
特斯拉 11, 301  
特性曲线 102  
特性曲线族 109  
特性阻抗 39, 66, 252  
铽 334  
梯度折射率光纤 66  
梯形线 252  
铈 334  
铈化铝 337  
铈化镧 338  
体电容 129  
天波 258  
天电 265, 269  
天然方铅矿石 91  
天体经度 321  
天体纬度 321  
天体坐标 321  
天线 238  
天线辐射体 39  
天线效率 239  
条形表 286  
调幅电路 213  
调幅无线电信号 18  
调频 216  
调色板 56  
调相 217  
调谐回路耦合 163  
调谐控制 165  
调谐器 223  
调谐射频功率放大器 165  
调制 211  
调制解调器 51, 179, 213  
调制解调器指标 235  
调制指数 218  
跳频 209  
铁 332  
铁磁性材料 12, 338  
铁氧体 338  
铁氧体环杆 276  
通信 178  
通信卫星 181  
通用 N 沟道结型场效应晶体管放大器 156  
通用双极型 NPN 晶体管放大器 156  
通用移动无线电业务 186  
同步触发器 49  
同步机 126  
同步数字通信 277  
同步通信 207  
同位素 327  
同相 22  
同轴电缆 64, 252  
同轴天线 242  
铜 332  
图像发送机 184  
图像分辨率 143  
图像接收机 184

图形均衡器 161, 169  
钷 336  
退敏 176  
陀螺仪 232  
椭圆极化 259

## W

瓦特 299  
瓦特每平方米 300  
瓦特小时 82  
外部噪声 269  
外差检波 201  
外延极坐标导航 228  
万维网 180  
网上聊天 180  
微安 1  
微波 267  
微波激励器 267  
微处理器 50  
微欧每米 60  
韦伯 11, 301  
纬度 320  
位移变送器 123  
文件传输协议 180  
文件服务器 180  
稳压器 78  
稳压器集成电路 115  
涡轮机 25  
钨 335  
钨酸钙 338  
钨酸镭 337

钨酸镁 338  
无抗阻抗 38  
无人管理宿主机 235  
无绳电话 193  
无损图像压缩 54  
无线本地回路 183  
无线电测向 226  
无线电传真 184  
无线电定位 292  
无线电发射机 196, 211  
无线电接收机 196  
无线电频谱 255  
无线干扰 277  
无线窃听 189  
无源混频器 200  
无源信标 230  
无源阵列 248  
无源阵元 248  
五极管 137  
误差电压 153

## X

西门子 6, 298  
西门子每米 298  
析像管 143  
硒 333  
硒化镉 337  
锡 333  
锡铅 340  
锡铅焊料 412  
镱 336

- 下标 315  
 下降放电曲线 83  
 氙 334  
 衔铁 13  
 线极化 259  
 线位移变送器 123  
 线性放大器 103  
 线性集成电路 115  
 陷波滤波器 167  
 陷波器 167, 280  
 相干通信 207  
 香蕉插头 67  
 相控阵天线 247  
 相位比较器 153  
 相位差 22  
 相位度 20  
 相位弧度 20  
 相移角 22  
 小环形天线 243  
 效率 159  
 协调世界时间 410  
 协议 54  
 斜波 17  
 斜率检波 203  
 谐波 16, 92, 279  
 谐振 163  
 锌 332  
 锌-碳精电池 81, 83  
 信号带宽 171  
 信号强度 287  
 信号强度单位 287  
 信号强度计 287  
 信号输出功率 159  
 信噪比 172, 198  
 行波管 143  
 形状因子 201  
 溴 333  
 虚数 36  
 选通时间 50  
 选择性 198  
 选择性静噪 204  
 选择性滤波器 170  
 选择性曲线 166  
 雪崩点 89  
 雪崩电压 89  
 雪崩击穿 101  
 雪崩效应 89  
 寻呼机 183  
 循环 15
- ## Y
- 压电变送器 121  
 压电晶体 150  
 压控变容管 96  
 压力传感器 416  
 氩 332  
 烟雾检测器 133, 291  
 衍射花纹 143  
 阳光通量 262  
 阳极 135, 140  
 氧 331  
 氧化钡锶 337

- 氧化钴 341  
氧化汞 339  
氧化汞电池 84  
氧化硅 340  
氧化铝陶瓷 337  
氧化镍 339  
氧化铍 337  
氧化铁 338  
氧化铜 338  
氧化钽 340  
氧化锡 340  
氧化锌 341  
氧化银电池 84  
遥控 234  
遥控机器人 293  
遥控替身 293, 418  
业余通信 185  
业余无线电 186  
业余移动无线电设备 186  
一次电池 81  
一维距离感测 228  
铀 335  
移频键控检波 201  
钇 333  
钇铝石榴石 340  
钇铁石榴石 340  
异步触发器 49  
抑制栅 137  
抑制瞬态 175  
易失存储器 118  
镱 334  
因特网 178  
阴极 135  
阴极接地 138  
阴极射线管 140  
音量单位 287  
音量单位表 287  
音量控制 162  
音频插头和插座 70  
音频倒频 194  
音频放大器频率响应曲线 161  
音频陷波滤波器 204  
音频移频键控 212  
音频振荡器 153  
铟 333  
银 333  
银焊料 340, 412  
银河系噪声 269  
引向器 249  
印制电路板焊接 413  
应急无线电联合通信组 185  
英尺/磅/秒(英制)系统 303  
英国标准线规 58  
荧光粉 140  
硬线 64  
用户名 179  
用户身份标识代码 194  
铀 336  
有偏搜索 232



- 有损图像压缩 54  
 有线电报或等同设备的安全性 190  
 有线窃听 189  
 有效辐射功率 245  
 有效数字 317  
 有源混频器 200  
 有源信标 230  
 销 334  
 右手法则 12  
 与 46  
 与非 46  
 与非门 47  
 与门 47  
 宇宙噪声 269  
 语音模式识别 194  
 语音识别 282  
 语音邮件 183  
 语音字母表 410  
 预放器 199  
 预选器 200  
 域类型 179  
 域类型的缩写词 179  
 域名 179  
 鸳鸯插头 68  
 元件密度 117  
 原子 327  
 原子核 327  
 原子序数 327  
 原子重量 327  
 圆波导 253  
 圆极化 259  
 圆柱形电池 84  
 源极 106  
 源极跟随器 113  
 远程操纵 126  
 远距离无线电导航 227  
 月球反弹方式 266  
 乐器数字界面 154  
 云到大地闪电 187  
 云际间闪电 187  
 云内闪电 187  
 运算放大器 115, 157
- ## Z
- 载波 211  
 载流容量 58, 60  
 在线帮助 236  
 在线服务 411  
 暂停 235  
 噪声 269  
 噪声消隐装置 270, 274  
 噪声系数 160, 198  
 噪声限制器 95, 270, 275  
 噪声削波器 275  
 增强型 MOSFET 111  
 增益 155  
 增益带宽积 104  
 窄带调频 217  
 斩波轮 128  
 张弛振荡器 134  
 掌声计 288

- 兆赫 15, 255  
兆欧 2  
照度计 288  
折叠偶极子天线 240  
折射率 66  
锗 332  
锗酸锌 341  
石榴石 338  
真空管 134  
振荡器 145  
振荡器稳定性 149  
振铃 204  
整流二极管 89  
整流器 71, 73  
正边沿触发 49  
正峰值幅度 20  
正硅酸锌 341  
正逻辑 47  
正弦波 16, 211  
正向导通电压 88, 101  
正向偏置 88, 102  
直角坐标系 319  
直接变频接收机 196  
直接绞接 62  
直流变压器 85  
直流电 1  
直流电发生器 3  
直流功率输入 159  
直流-直流变换器 85  
直热式阴极 135  
直射波 259  
只读存储器 119  
质量控制 291  
质子 327  
中部标准时间 411  
中部夏令时间 411  
中规模集成电路 117  
中继器 182  
中继站 266  
中频 265  
中频电路 200  
中频级 199  
中子 327  
终端节点控制器 54  
终端设备 212  
周期 15, 255  
周期性交流波 15  
主触发器 50  
主从 (M/S) 触发器 50  
注入型激光器 97  
驻波 39, 253  
驻波比 40, 253  
柱坐标 322  
转发器 223  
紫外光谱 268  
字节 51  
自动同步机 126  
自动噪声限制器 275  
自耦调压器 79  
自然对数 325  
自由电子 327  
自由空间波长 256

自主机器人 236, 416

阻抗 28

阻抗连续性 67

阻抗失配 40

阻抗失配损耗 40

组网 235

最大可用频率 260

最大可支取电流 82

坐标系统 319

