一、电　阻

电阻的英文名称为 resistance，通常缩写为 R，它是导体的一种基本性质，与导体的尺寸、材料、温度有关。

电阻器是电气、电子设备中用得最多的基本元件之一，主要用于控制和调节电路中的电流和电压或用作消耗电能的负载。

1. 电阻的分类

电阻器有不同的分类方法。按材料分，有碳膜电阻、水泥电阻、金属膜电阻和线绕电阻等不同类型；按功率分，有 $\frac{1}{16}$W 、$\frac{1}{8}$W 、$\frac{1}{4}$W 、$\frac{1}{2}$W 、1 W、2 W 等额定功率的电阻。

按电阻值的精确度分，有精确度为±5%、±10%、±20% 等的普通电阻，还有精确度为±0.1%、±0.2%、±0.5%、±l% 和±2% 等的精密电阻。

按电阻器的用途分，通常有三大类：固定电阻，可变电阻，特种电阻。在电子产品中，以固定电阻应用最多。而固定电阻以其制造材料又可分为好多种类，但常用的有 RT 型碳膜电阻、RJ 型金属膜电阻、RX 型线绕电阻，还有近年来开始广泛应用的片状电阻。电阻型号命名很有规律，第一个字母 R 代表电阻；第二个字母的意义是：T—碳膜，J—金属，X—线绕，这些符号是汉语拼音的第一个字母。在国产的老式电子产品中，常可以看到外表涂覆绿漆的电阻，这就是 RT 型电阻，而红颜色的电阻是 RJ 型电阻。

2. 固定电阻

2.1　符　号

固定电阻符号如图 1-1-1 所示。

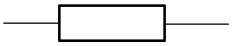


图 1-1-1　固定电阻的符号

2.2　电阻器型号命名方法

电阻器的型号命名方法可依据 GB2471—81，见表 1-1-1。

2.3　电阻值的标识

按部颁标准规定，电阻值的标称值应为表 1-1-2 所列数字的 10^n 倍，其中，n 为正整数、负整数或零。

表 1-1-1　电阻器型号的命名方法

第一部分：主称		第二部分：材料		第三部分：特征			第四部分：序号
符号	意义	符号	意义	符号	电阻器	电位器	
R W	电阻器 电位器	T	碳膜	1	普通	普通	对主称、材料相同，仅性能指标和尺寸大小有区别，但基本不影响互换使用的产品，给同一序号；若性能指标、尺寸大小明显影响互换时，则在序号后面用大写字母作为区别代号
		H	合成膜	2	普通	普通	
		S	有机实芯	3	超高频	—	
		N	无机实芯	4	高阻	—	
		J	金属膜	5	高温	—	
		Y	氧化膜	6	—	—	
		C	沉积膜	7	精密	精密	
		I	玻璃釉膜	8	高压	特殊函数	
		P	硼酸膜	9	特殊	特殊	
		U	硅酸膜	G	高功率	—	
		X	线绕	T	可调	—	
		M	压敏	W	—	微调	
		G	光敏	D	—	多圈	
		R	热敏	B	温度补偿用	—	
				C	温度测量用	—	
				P	旁热式	—	
				W	稳压式	—	
				Z	正温度系数	—	

表 1-1-2　电阻器（电位器、电容器）的标称系列及误差

系列	允许误差	电阻器的标称值
E24	I级（±5%）	1.0　1.1　1.2　1.3　1.5　1.6　1.8　2.0　2.2　2.4　2.7　3.0　3.3　3.6 3.9　4.3　4.7　5.1　5.6　6.2　6.8　7.5　8.2　9.1
E12	II级（±10%）	1.0　1.2　1.5　1.8　2.2　2.7　3.3　3.9　4.7　5.6　6.8　8.2
E6	III级（±20%）	1.0　1.5　2.2　3.3　4.7　6.8

电阻的阻值和允许偏差的标注方法有直标法、色标法和文字符号法。

（1）直标法

将电阻的阻值和误差直接用数字和字母印在电阻上（无误差标示为允许误差±20%）。也有厂家采用习惯标记法，例如：

3Ω3　　表示电阻值为 3.3 Ω、允许误差为±5%。

1K8　　表示电阻值为 1.8 kΩ、允许误差为±20%。

5M1　　表示电阻值为 5.1 MΩ、允许误差为±10%。

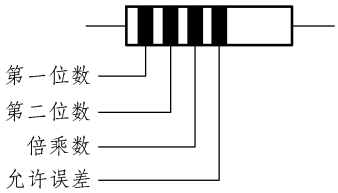
（2）色标法

将不同颜色的色环涂在电阻器（或电容器）上来表示电阻（电容器）的标称值及允许误差，各种颜色所对应的数值见表 1-1-3。固定电阻器的色环标志读数识别规则如图 1-1-2 所示。

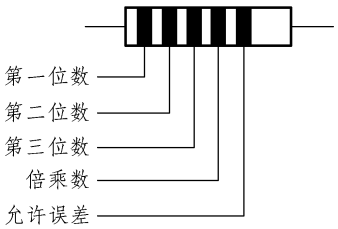
表 1-1-3　电阻器色标符号的意义

颜色	有效数字第一位数	有效数字第二位数	倍乘数	允许误差
棕	1	1	10^1	±1
红	2	2	10^2	±2
橙	3	3	10^3	—
黄	4	4	10^4	—
绿	5	5	10^5	±0.5
蓝	6	6	10^6	±0.2
紫	7	7	10^7	±0.1
灰	8	8	10^8	—
白	9	9	10^9	—
黑	0	0	10^0	—
金	—	—	10^{-1}	±5
银	—	—	10^{-2}	±10
无色	—	—	—	±20

例如：红红棕金，表示 220 Ω±5%；黄紫橙银，表示 47 kΩ±10%；棕紫绿金棕，表示 17.5 Ω±1%。



（a）一般电阻



（b）精密电阻

图 1-1-2　固定电阻器的色环标志读数识别规则

（3）文字符号法

例如：3M3K、3M3 表示 3.3 MΩ，K 表示允许偏差为±10%。

允许偏差与字母的对应关系见表 1-1-4。

表 1-1-4　电阻器的阻值偏差标志符号

允许偏差	标志符号	允许偏差	标志符号	允许偏差	标志符号
± 0.001	E	± 0.1	B	± 10	K
± 0.002	Z	± 0.2	C	± 20	M
± 0.005	Y	± 0.5	D	± 30	N
± 0.01	H	± 1	F		
± 0.02	U	± 2	G		
± 0.05	W	± 5	J		

（4）电阻器额定功率的识别

电阻器的额定功率是指电阻器在直流或交流电路中，长期连续工作所允许消耗的最大功率。有两种标志方法：2 W 以上的电阻，直接用数字印在电阻体上；2 W 以下的电阻，以自身体积大小来表示功率。在电路图上表示电阻功率时，采用图 1-1-3 所示的符号。

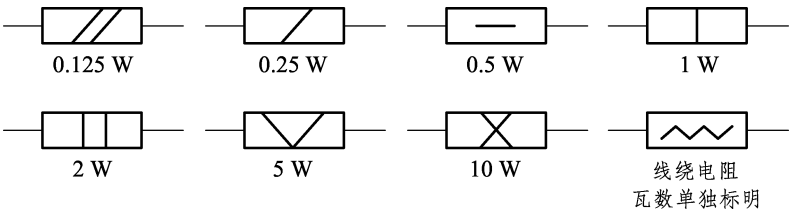


图 1-1-3　电阻额定功率的电路符号

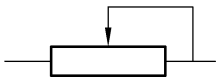
（5）电阻器的阻值偏差标志符号

电阻器的阻值偏差标志符号如表 1-1-4 所示。

3. 可变电阻器

3.1　符　号

可变电阻器的符号如图 1-1-4（a）所示。



（a）符号　　（b）电位器的实物图

图 1-1-4　可变电阻器

3.2　功能简介

可变式电阻器一般称为电位器，从形状上分有圆柱形、长方体形等多种形状；从结构上分有直滑式、旋转式、带开关式、带紧锁装置式、多连式、多圈式、微调式和无接触式等多种形式；从材料上分有碳膜、合成膜、有机导电体、金属玻璃釉和合金电阻丝等多种电阻体材料。碳膜电位器是较常用的一种。电位器在旋转时，其相应的阻值依旋转角度的变化而变化，其变化规律有三种不同形式，参见图 1-1-5。

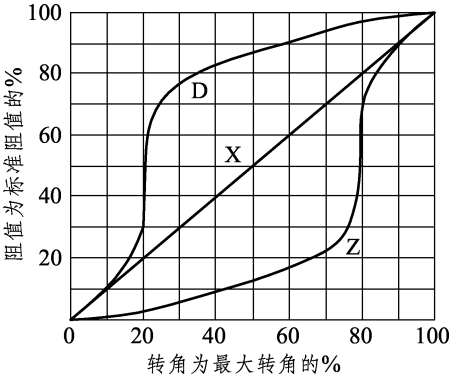


图 1-1-5　电位器旋转角与实际阻值的变化关系

X 型为直线型，其阻值按角度均匀变化。它适于作分压、调节电流等用，如在电视机中作场频调整。

Z 型为指数型，其阻值按旋转角度依指数关系变化（阻值变化开始缓慢，以后变快），它普遍使用在音量调节电路里。由于人耳对声音响度的听觉特性是接近于对数关系的，在音量从零开始逐渐变大的一段过程中，人耳对音量变化的听觉最灵敏，当音量大到一定程度后，人耳听觉逐渐变迟钝。所以音量调整一般采用指数式电位器，使声音变化听起来显得平稳、舒适。

D 型为对数型，其阻值按旋转角度依对数关系变化（即阻值变化开始快，以后缓慢），这种方式多用于仪器设备的特殊调节。在电视机中采用这种电位器调整黑白对比度，可使对比度更加适宜。

在电路中进行一般调节时，采用价格低廉的碳膜电位器；在进行精确调节时，宜采用多圈电位器或精密电位器。

4.　光敏电阻

4.1　符　号

光敏电阻的符号如图 1-1-6 所示。

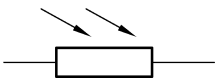


图 1-1-6　光敏电阻的符号

光敏电阻是一种电阻值随外界光照强弱（明暗）变化而变化的元件，光越强阻值越小，光越弱阻值越大。如果把光敏电阻的两个引脚接在万用表的表笔上，用万用表的 R×1 k 挡测量在不同的光照下光敏电阻的阻值：将光敏电阻从较暗的抽屉里移到阳光下或灯光下，万用表读数将会发生变化；在完全黑暗处，光敏电阻的阻值可达几兆欧以上（万用表指示电阻为无穷大，即指针不动），而在较强光线下，阻值可降到几千欧甚至 1 kΩ 以下。

4.2　特性与参数

光敏电阻主要有 CdS 元件、CdSe 元件和 PbS 元件。它们的电阻率对某段波长的照度变化很敏感，当照度增加时，电阻率急剧减小，并在一定条件下，照度和电阻率可呈线性关系。在完全无光照时，光敏电阻也会呈现一定的电阻值，称为暗电阻，而光照时的电阻称为光电阻。对于 CdS 光敏电阻，暗电阻约几兆欧，而光电阻可小到几百欧。光敏电阻的温度系数和照度有关，强光照射条件下为正，弱光照射条件下为负。

在上述三种光敏电阻中，以 CdS 光敏电阻应用最广，它可以工作在交流状态，对可见光敏感，输出信号较大，价格便宜，抗噪声能力比光敏二极管强，但响应速度较慢。表 1-1-5 列出了几种 CdS 光敏电阻的参数，其中峰值波长是指光谱响应中最敏感的波长值；响应时间是指光敏电阻两端加电压后，从受光照开始，电阻中的光电流从 0 增加到正常电流值的 63% 所经历的时间 t，遮光后，光电流从正常值衰减到 37% 时所经历的时间 t_f。

当选用 CdS 作开关元件时，应注意它的允许功耗和响应速度能否满足要求。

表 1-1-5　几种 CdS 光敏电阻的参数

参数 / 型号	光谱响应范围/m	峰值波长/m	允许功耗/mW	最高工作电压/V	响应时间		光电特性		电阻温度系数%/°C（20～60 °C）
					t/ms	t_f/ms	暗电阻/MΩ	光电阻/kΩ(100lx)	
UR-74A	0.4～0.8	0.54	50	100	40	30	1	0.7～1.2	- 0.2
UR-74B	0.4～0.8	0.54	30	50	20	15	10	1.2～4	- 0.2
UR-74C	0.5～0.9	0.57	50	100	6	4	100	0.5～2	- 0.5

5. 最灵敏的感温元件——热敏电阻

半导体热敏电阻是利用半导体材料的热敏特性工作的半导体电阻，它是用对温度变化极为敏感的半导体材料制成的，其阻值随温度的变化会发生极其明显的变化。

热敏电阻主要用在温度测量、温度控制、温度补偿、自动增益调整、微波功率测量、火灾报警、红外探测及稳压、稳幅等方面，是自动控制设备中的重要元件。

热敏电阻按其结构分为直热式和旁热式两大类。直热式热敏电阻一般是用锰、镁、钴、镍铁等金属氧化物粉料挤压成杆状、片状、垫圈状或珠状的电阻体，经 1 000～1 500 °C 高温烧结后，再烧制附银电极，焊接引线而成；其加热电流直接通过电阻体。旁热式热敏电阻由

电阻体和加热器构成，电阻体旁装有金属丝绕制的加热器（加热线圈），二者紧紧耦合在一起，但又彼此绝缘；电阻体和加热器密封在内部抽成高真空的玻璃外壳中，引出电极；加热器通过加热电流时，电阻体周围温度变化，导致阻值改变。

根据电阻的温度系数不同，热敏电阻又分为正温度系数热敏电阻和负温度系数热敏电阻。在工作温度范围内，正温度系数热敏电阻的阻值随温度升高而急剧增大，负温度系数电阻的阻值随温度升高而急剧减小。后者应用较为广泛。此外，热敏电阻由于具有热敏特性，其电压和电流之间不再保持线性关系，成为一种非线性元件。

二、电　容

电容是一种最基本的电子元器件，基本上所有的电子设备都要用到。小小一只电容能体现一个国家的工业技术能力，世界上最先进的电容设计和生产国是美国和日本，我国自主力量还很薄弱，并且生产的产品也都以低端为主。

电容的基本单位为法拉（F），常采用微法（μF）、纳法（nF）、皮法（pF）（皮法又称微微法）等。

1. 电容的分类和技术指标

1.1　电解电容

（1）铝电解电容

电容量：0.47 ~ 10 000 μF。

额定电压：6.3 ~ 450 V。

主要特点：体积小，容量大，损耗大，漏电大。

应用：电源滤波，低频耦合，去耦，旁路等。

（2）钽电解电容（CA）铌电解电容（CN）

电容量：0.1 ~ 1 000 μF。

额定电压：6.3 ~ 125 V。

主要特点：损耗、漏电小于铝电解电容。

应用：在要求高的电路中代替铝电解电容。

1.2　无极电容

（1）瓷片电容

① 低频瓷介电容（CT）：

电容量：10 pF ~ 4.7 μF。

电压：50 ~ 100 V。

特点：体积小，价廉，损耗大，稳定性差。

应用：用于要求不高的低频电路。

② 高频瓷介电容（CC）：

电容量：1 ~ 6 800 pF。

额定电压：63 ~ 500 V。

主要特点：高频损耗小，稳定性好。

应用：高频电路。

（2）独石电容

独石又叫多层瓷介电容，分两种类型，Ⅰ型性能较好，但容量小，一般小于 0.2 μF；另一种叫Ⅱ型，容量大，但性能一般。

容量范围：0.5 pF ~ 1 μF。

耐压：二倍额定电压。

主要特点：电容量大、体积小、可靠性高、电容量稳定，耐高温、耐湿性好，温度系数很高。

应用：广泛应用于电子精密仪器，各种小型电子设备作谐振、耦合、滤波、旁路。

（3）CY-云母电容

电容量：10 pF ~ 0.1 μF。

额定电压：100 V ~ 7 kV。

主要特点：高稳定性，高可靠性，温度系数小。

应用：高频振荡、脉冲等要求较高的电路。

（4）CI-玻璃釉电容

电容量：10 pF ~ 0.1 μF。

额定电压：63 ~ 400 V。

主要特点：稳定性较好，损耗小，耐高温（200 °C）。

应用：脉冲、耦合、旁路等电路。

（5）空气介质可变电容器

可变电容量：100 ~ 1 500 pF。

主要特点：损耗小，效率高；可根据要求制成直线式、直线波长式、直线频率式及对数式等。

应用：电子仪器，广播电视设备。

（6）薄膜介质可变电容器

可变电容量：15 ~ 550 pF。

主要特点：体积小，质量小；损耗比空气介质的大。

应用：通信，广播接收机等。

（7）薄膜介质微调电容器

可变电容量：1 ~ 29 pF。

主要特点：损耗较大，体积小。

应用：收录机、电子仪器等电路作电路补偿。

（8）陶瓷介质微调电容器

可变电容量：0.3 ~ 22 pF。

主要特点：损耗较小，体积较小。

应用：精密调谐的高频振荡回路。

（9）CL-聚酯涤纶电容（常见绿皮封装 CL11）

电容量：40 pF ~ 4 μF。

额定电压：63 ~ 630 V。

主要特点：小体积，大容量，耐热耐湿，稳定性差。

应用：对稳定性和损耗要求不高的低频电路。

CL21：金属化聚脂膜电容，红皮环氧树脂封装/或黄皮塑壳封装（外观类似CBB电容）。

CL21X/CL23/CL233X：超小型金属化聚脂膜电容，红皮、环氧树脂封装或多色塑壳封装。

（10）CB/PS-聚苯乙烯电容（常见水晶封装）

电容量：10 pF ~ 1 μF。

额定电压：100 V ~ 30 kV。

主要特点：稳定，低损耗，体积较大。

应用：对稳定性和损耗要求较高的电路。

（11）CBB/PP-聚丙烯电容

电容量：1 000 pF ~ 10 μF。

额定电压：63 ~ 2 000 V。

主要特点：性能与聚苯乙烯电容相似，但体积小、稳定性略差。

应用：代替大部分聚苯电容或云母电容，用于要求较高的电路。

CBB81：高压金属化/箔式聚丙烯膜电容器。

CBB13：聚丙烯膜电容器。

CBB21：金属化聚丙烯膜电容器。

CBB20：轴向金属化聚丙烯膜电容器。

CBB62：盒式金属化聚丙烯交流电容（安规认证：对应 MKP/MPX 电容）。

CBB65：金属化聚丙烯膜马达运转电容。

（12）MKP/MPP-金属化聚丙烯电容

特点：引出损耗小，内部温升小，负电容量温度系数，优异的阻燃性能。

应用：广泛应用于高压高频脉冲电路，电视机中的 S 校正和行逆程波形及显示器中，照明电路中的电子整流吸收和 SCR 整流电路。用于安规方面。有时也用于 RC 降压时。

（13）MKS-金属化聚苯乙烯电容

（14）MPX-金属化聚丙烯膜介质电容

用于安规用途。

（15）CBF-特富龙（聚四氟乙烯）电容

2. 各种电容的优缺点

各种电容的优缺点如表 1-2-1 所示。

表 1-2-1　各种电容的优缺点

名　称	极　性	制　作	优　点	缺　点
无感 CBB 电容	无	两层聚丙乙烯塑料和两层金属箔交替夹杂然后捆绑而成	无感，高频特性好，体积较小	不适合做大容量，价格比较高，耐热性能较差
CBB 电容	无	两层聚乙烯塑料和两层金属箔交替夹杂然后捆绑而成	有感，其他同“无感 CBB 电容”	
瓷片电容	无	薄瓷片、两面渡金属膜银而成	体积小，耐压高，价格低，频率高（有一种是高频电容）	易碎，容量低
云母电容	无	云母片上镀两层金属薄膜	容易生产，技术含量低	体积大，容量小
独石电容	无		体积比 CBB 更小，其他同 CBB，有感	
电解电容	有	两片铝带和两层绝缘膜相互层叠，转捆后浸泡在电解液（含酸性的合成溶液）中	容量大	高频特性不好
钽电容	有	用金属钽作为正极，在电解质外喷上金属作为负极	稳定性好，容量大，高频特性好	造价高

3. 电容的标称及识别方法

3.1　电容的标称

（1）直接标称法

由于电容体积要比电阻大，所以一般都使用直接标称法。如果数字是 0.001，那它代表的是 0.001 μF = 1 nF，如果是 10 n，那么就是 10 nF，同样 100 p 就是 100 pF。

（2）不标单位的直接表示法

用 1 ~ 4 位数字表示，容量单位为 pF，如 350 为 350 pF，3 为 3 pF，0.5 为 0.5 pF。

（3）色码表示法

沿电容引线方向，用不同的颜色表示不同的数字，第一、第二种环表示电容量，第三种颜色表示有效数字后零的个数（单位为 pF）。颜色意义：黑=0、棕=1、红=2、橙=3、黄=4、绿=5、蓝=6、紫=7、灰=8、白=9。

3.2　电容的识别

看电容上面的标称，一般有标出容量和正负极，也有用引脚长短来区别正负极，长脚为正，短脚为负。

三、二极管

二极管（Diode）是一种具有两个电极的电子元件，只允许电流由单一方向流过，它在许多电子设备中用于整流。而变容二极管（Varicap Diode）则用来当作电子式的可调电容器。大部分二极管所具备的电流方向性通常被称为“整流（Rectifying）”功能，就是只允许电流由单一方向通过（称为顺向偏压），反向时阻断（称为逆向偏压）。因此，二极管可以看成是电子版的逆止阀。

二极管是一种具有单向导电的二端器件，有电子二极管和晶体二极管之分，电子二极管现已很少见到，比较常见和常用的多是晶体二极管。二极管是诞生最早的半导体器件之一，其应用也非常广泛，几乎在所有的电子电路中，都要用到半导体二极管，它在电路中起着重要的作用。

1. 基本概念

在半导体二极管内部有一个 PN 结、两个引线端子，这种电子器件按照外加电压的方向，具备单向电流的转导性。一般来讲，晶体二极管是一个由 P 型半导体和 N 型半导体烧结形成的 P-N 结界面。在其界面的两侧形成空间电荷层，构成自建电场。当外加电压等于零时，由于 P-N 结两边载流子浓度差引起的扩散电流与由自建电场引起的漂移电流相等而处于电平衡状态，这也是常态下的二极管特性。

2. 作　用

二极管是最常用的电子元件之一，它最大的特性就是单向导电性，也就是说，电流只可以从二极管的一个方向流过。二极管的作用有整流、检波、稳压，各种调制功能等。

3. 主要特点

3.1　正向性

外加正向电压时，在正向特性的起始部分，正向电压很小，不足以克服 PN 结内电场的阻挡作用，正向电流几乎为零，这一段称为死区。这个不能使二极管导通的正向电压称为死区电压。当正向电压大于死区电压后，PN 结内电场被克服，二极管导通，电流随电压增大而迅速上升。在正常使用的电流范围内，导通时二极管的端电压几乎维持不变，这个电压称为二极管的正向电压。

二极管的电压与电流不是呈线性关系，所以在将不同的二极管并联的时候要接相适应的电阻。

3.2　反向性

外加反向电压不超过一定范围时，通过二极管的电流是少数载流子漂移运动所形成反向电流，由于反向电流很小，二极管处于截止状态。这个反向电流又称为反向饱和电流或漏电

流，二极管的反向饱和电流受温度影响很大。

3.3 击 穿

外加反向电压超过某一数值时，反向电流会突然增大，这种现象称为电击穿。引起电击穿的临界电压称为二极管反向击穿电压。电击穿时二极管失去单向导电性。如果二极管没有因电击穿而引起过热，则单向导电性不一定会被永久破坏，在撤除外加电压后，其性能仍可恢复；否则二极管就损坏了。因此，二极管在使用时应避免外加的反向电压过高。

4. 二极管的管压降

硅二极管（不发光类型）的正向管压降为 0.7 V，锗管的正向管压降为 0.3 V。发光二极管正向管压降会随不同发光颜色而不同，主要有三种颜色，具体压降参考值如下：红色发光二极管的压降为 2.0 ~ 2.2 V，黄色发光二极管的压降为 1.8 ~ 2.0 V，绿色发光二极管的压降为 3.0 ~ 3.2 V，正常发光时的额定电流约为 20 mA。

5. 二极管的分类

根据用途分类，二极管可分为：整流二极管，检波（也称解调）二极管，变容二极管，快速二极管（快恢复二极管，肖特基（Schottky）二极管），稳压二极管，开关二极管，发光二极管，光敏（光电）二极管，恒流二极管，补偿二极管，双基极二极管，磁敏二极管，精密二极管，隧道二极管。

四、晶闸管

晶闸管又称为晶体闸流管或可控硅整流器，它能承受的电压和电流容量更高，工作更可靠，已被广泛应用于相控整流、逆变、交流调压、直流变换等领域，成为低频（200 Hz 以下）功率装置中的主要器件。一般所说的晶闸管往往专指晶闸管的基本类型——普通晶闸管。广义上讲，晶闸管还包括许多类型的派生器件。

1. 晶闸管的基本结构

晶闸管是一种四层结构（PNPN）的大功率半导体器件，它同时又被称作可控整流器或可控硅元件。它有三个引出电极，即阳极（A）、阴极（K）和门极（G）。其符号表示法和器件剖面图如图 1-4-1 所示。

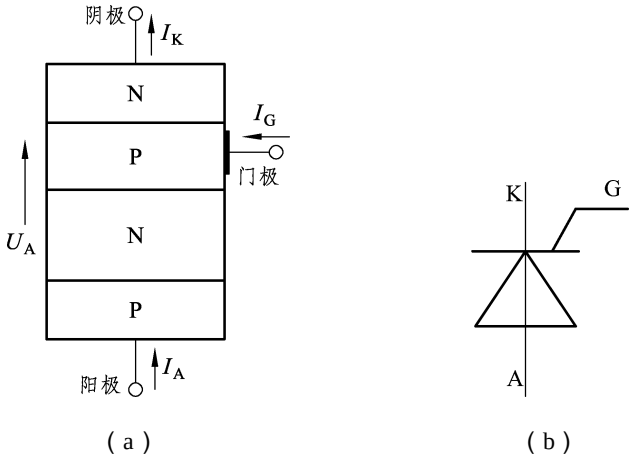


图 1-4-1　晶闸管的符号表示法和器件剖面图

普通晶闸管是在 N 型硅片中双向扩散 P 型杂质（铝或硼），形成 $P_1N_1P_2$ 结构，然后在 P_2 的大部分区域扩散 N 型杂质（磷或锑）形成阴极，同时在 P_2 上引出门极，在 P_1 区域形成欧姆接触作为阳极。

2. 晶闸管的工作特点

可将内部是四层 PNPN 结构的晶闸管看成是由一个 PNP 型和一个 NPN 型晶体管连接而成的等效电路，其连接形式如图 1-4-2 所示。

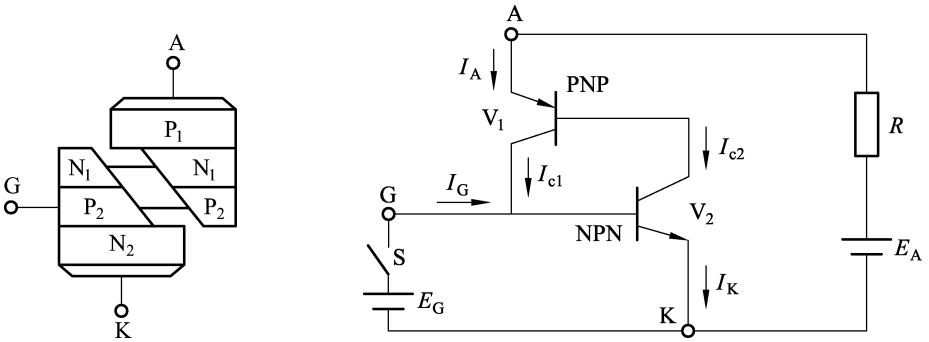


图 1-4-2　晶闸管的内部结构和工作原理等效电路

晶闸管的阳极 A 相当于 PNP 型晶体管 V_1 的发射极，阴极 K 相当于 NPN 型晶体管 V_2 的发射极。

晶闸管的工作特点是：晶闸管电路由两部分组成，一是阳-阴极电路，二是门-阴极控制电路；阳-阴极之间具有可控的单向导电特性；门极仅起触发导通作用，不能控制关断；晶闸管的导通与关断两个状态相当于开关的作用，这样的开关又称为无触点开关。

3. 晶闸管的基本特性

3.1　晶闸管的伏安特性

晶闸管的伏安特性是指晶闸管阳、阴极间电压 U_A 和阳极电流 I_A 之间的关系特性，如图

1-4-3 所示。

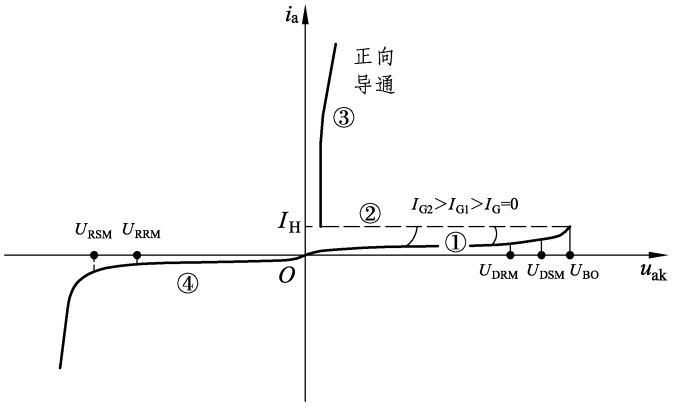


图 1-4-3　晶闸管的伏安特性曲线

图中各物理量的含义如下：

U_{DRM}、U_{RRM}——正、反向断态重复峰值电压。

U_{DSM}、U_{RSM}——正、反向断态不重复峰值电压。

U_{BO}——正向转折电压。

U_{RO}——反向击穿电压。

3.2　晶闸管的开关特性

晶闸管的开关特性曲线如图 1-4-4 所示。晶闸管的开通和关断不是瞬间完成的。

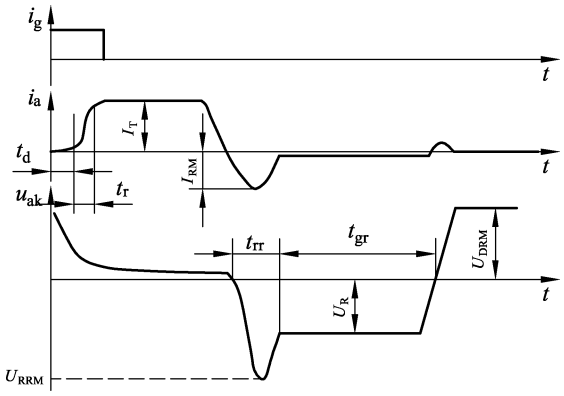


图 1-4-4　晶闸管的开关特性曲线

3.3　晶闸管的基本参数

（1）额定电压 U_{Tn}

通常取 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中较小的，再取靠近标准的电压等级作为晶闸管型的额定电压。在选用管子时，额定电压应为正常工作峰值电压的 2～3 倍，以保证电路的工作安全。

晶闸管的额定电压 $U_{Tn}=\{\min U_{DRM},U_{RRM}\}$

$$U_{Tn}=（2\sim3）U_{TM}$$

U_{TM}：工作电路中加在管子上的最大瞬时电压。

（2）额定电流 $I_{T(AV)}$

$I_{T(AV)}$ 又称为额定通态平均电流。

I_{Tn}：额定电流有效值，根据晶闸管的 $I_{T(AV)}$ 换算得出。

$I_{T(AV)}$、I_{TM}、I_{Tn} 三者之间的关系为：

$$I_{Tn}=0.5I_{TM}$$

$$I_{T(AV)}=0.318I_{TM}$$

（3）维持电流 I_H

维持电流是指晶闸管维持导通所必需的最小电流，一般为几十到几百毫安。维持电流与结温有关，结温越高，维持电流越小，晶闸管越难关断。

（4）掣住电流 I_L

晶闸管刚从阻断状态转变为导通状态并撤除门极触发信号，此时要维持元件导通所需要的最小阳极电流，称为掣住电流。一般掣住电流比维持电流大 2 ~ 4 倍。

（5）通态平均管压降 $U_{T(AV)}$

$U_{T(AV)}$是指在规定的工作温度条件下，使晶闸管导通的正弦波半个周期内阳极与阴极间电压的平均值，一般为 0.4 ~ 1.2 V。

（6）门极触发电流 I_g

在常温下，阳极电压为 6 V 时，使晶闸管能完全导通所需要的电流，称为门极电流，一般为毫安级。

（7）断态电压临界上升率 du/dt

在额定结温和门极开路的情况下，不会导致晶闸管从断态到通态转换的最大正向电压上升率。一般为每微秒几十伏。

（8）通态电流临界上升率 di/dt

在规定条件下，晶闸管能承受的最大通态电流上升率。若晶闸管导通时电流上升太快，则会在晶闸管刚开通时，有很大的电流集中在门极附近的小区域内，从而造成局部过热而损坏晶闸管。

五、晶体三极管

晶体三极管：是一种利用输入电流控制输出电流的电流控制型器件。

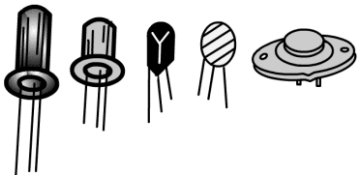
特点：① 管内有两种载流子参与导电；② 有三个电极，故称三极管。

1. 三极管的结构、分类和符号

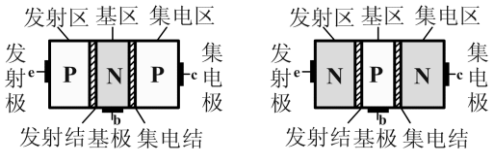
1.1 晶体三极管的基本结构

三极管的外形如图 1-5-1（a）所示。

三极管的结构如图 1.5.1（b）所示。



（a）三极管的外形



（b）三极管的结构

图 1-5-1　三极管的外形及结构

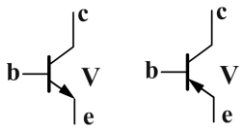
晶体三极管有：三个区——发射区、基区、集电区；两个 PN 结——发射结（BE 结）、集电结（BC 结）；三个电极——发射极 e（E）、基极 b（B）和集电极 c（C）；两种类型——PNP 型管和 NPN 型管。

工艺要求：发射区掺杂浓度较大；基区很薄且掺杂最少；集电区比发射区体积大且掺杂少。

1.2 晶体三极管的电气符号

晶体三极管的电气符号如图 1-5-2 所示。图中，箭头表示发射结加正向电压时的电流方向。

文字符号：V（或 VT）。



（a）NPN 型　（b）PNP 型

图 1-5-2　三极管符号

1.3 晶体三极管的分类

三极管有多种分类方法：

① 按内部结构分：有 NPN 型和 PNP 型管。

② 按工作频率分：有低频和高频管。

③ 按功率分：有小功率和大功率管。

④ 按用途分：有普通管和开关管。

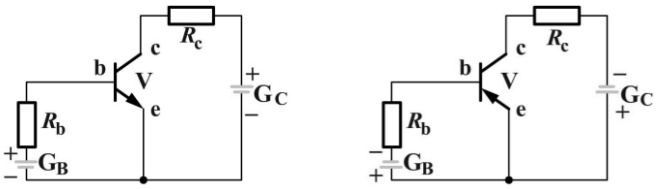
⑤ 按半导体材料分：有锗管和硅管等。

2. 三极管的工作电压和基本连接方式

2.1 晶体三极管的工作电压

三极管的基本作用是放大电信号；工作在放大状态的外部条件是发射结加正向电压，集电结加反向电压。

如图 1-5-3 所示：V 为三极管，G_C 为集电极电源，G_B 为基极电源，又称偏置电源，R_b 为基极电阻，R_c 为集电极电阻。

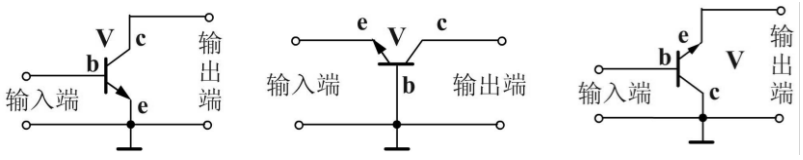


（a）NPN 型　　（b）PNP 型

图 1-5-3　三极管电源的接法

2.2　晶体三极管在电路中的基本连接方式

如图 1-5-4 所示，晶体三极管有三种基本连接方式：共发射极、共基极和共集电极接法。最常用的是共发射极接法。



（a）共发射极接法　　（b）共基极接法　　（c）共集电极接法

图 1-5-4　三极管在电路中的三种基本连接方式

3. 三极管内的电流分配和放大作用

3.1　电流分配关系

测量电路如图 1-5-5 所示：调节电位器 R_p，测得发射极电流 I_E、基极电流 I_B 和集电极电流 I_C 的对应数据如表 1-5-1 所示。

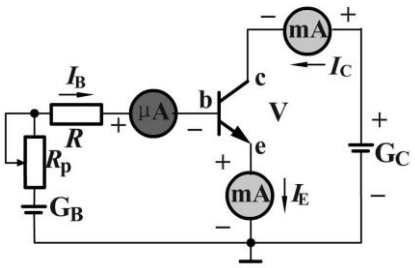


图 1-5-5　三极管三个电流的测量

表 1-5-1　图 1-5-5 所示电路的测量数据

I_B/mA	- 0.001	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
I_C/mA	0.001	0.01	0.56	1.14	1.74	2.33	2.91
I_E/mA	0	0.01	0.57	1.16	1.77	2.37	2.96

由表 1-5-1 可见，三极管中电流的分配关系如下：

$$I_E = I_C + I_B$$

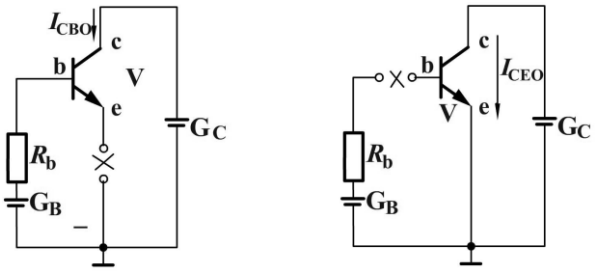
因 I_B 很小，则

$$I_C \approx I_E$$

说明：

① $I_E = 0$时，$I_C = -I_B = I_{CBO}$。I_{CBO}称为集电极-基极反向饱和电流，见图 1-5-6（a）。一般I_{CBO}很小，与温度有关。

② $I_B = 0$时，$I_C = I_E = I_{CEO}$。I_{CEO}称为集电极-发射极反向电流，又叫穿透电流，见图1-5-6（b）。I_{CEO}越小，三极管温度稳定性越好。硅管的温度稳定性比锗管好。



（a）I_{CBO}　　（b）I_{CEO}

图 1-5-6　I_{CBO}和I_{CEO}示意图

3.2　晶体三极管的电流放大作用

由表 1-5-1 得出

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{0.58\ \text{mA}}{0.01\ \text{mA}} = 58$$

结论：

① 三极管有电流放大作用——基极电流的微小变化，会引起集电极电流I_C的较大变化。

② 交流电流放大系数β——表示三极管放大交流电流的能力：

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

③ 直流电流放大系数$\bar{\beta}$——表示三极管放大直流电流的能力：

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$$

④ 通常，$\beta \approx \bar{\beta}$，所以$I_C = \bar{\beta} I_B$可表示为：

$$I_C = \beta I_B$$

考虑I_{CEO}，则

$$I_C = \beta I_B + I_{CEO}$$

4. 三极管的输入和输出特性

4.1　共发射极输入特性曲线

输入特性曲线：集射极之间的电压 U_{CE} 一定时，发射结电压 U_{BE} 与基极电流 I_B 之间的关系曲线，如图 1-5-7 所示。由图可见：

① 当 $U_{CE} \geqslant 2$ V 时，特性曲线基本重合。

② 当 U_{BE} 很小时，I_B 等于零，三极管处于截止状态。

③ 当 U_{BE} 大于门槛电压（硅管约 0.5 V，锗管约 0.2 V）时，I_B 逐渐增大，三极管开始导通。

④ 三极管导通后，U_{BE} 基本不变。硅管约为 0.7 V，锗管约为 0.3 V，称为三极管的导通电压。

⑤ U_{BE} 与 I_B 呈非线性关系。

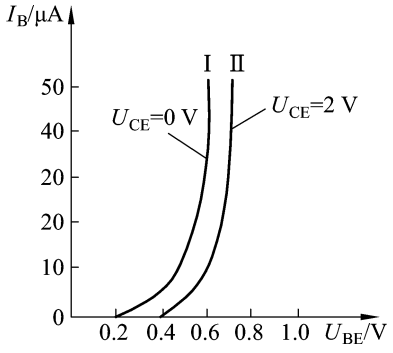


图 1-5-7　U_{BE} 与 I_B 的关系曲线

4.2　晶体三极管的输出特性曲线

输出特性曲线：基极电流 I_B 一定时，集电极、发射极之间的电压 U_{CE} 与集电极电流 I_C 的关系曲线，如图 1-5-8 所示。

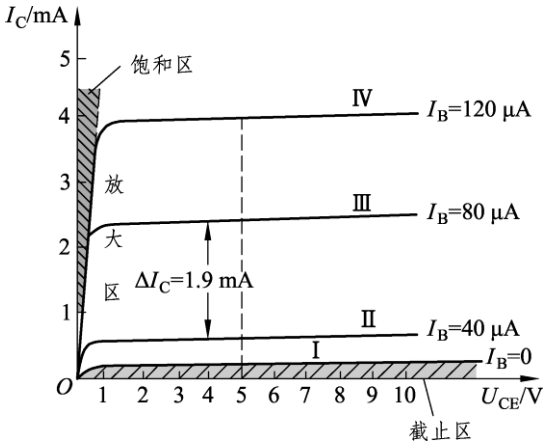


图 1-5-8　三极管的输出特性曲线

由图可见，输出特性曲线可分为三个工作区：

（1）截止区

条件：发射结反偏或两端电压为零。

特点：$I_B = 0$，$I_C = I_{CEO}$。

（2）饱和区

条件：发射结和集电结均为正偏。

特点：$U_{CE} = U_{CES}$。

U_{CES} 称为饱和管压降，小功率硅管约 0.3 V，锗管约为 0.1 V。

（3）放大区

条件：发射结正偏，集电结反偏。

特点：I_C 受 I_B 控制，即 $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$。

在放大状态，当 I_B 一定时，I_C 不随 U_{CE} 变化，即放大状态的三极管具有恒流特性。

5. 三极管的主要技术参数

三极管的技术参数是表征管子的性能和适用范围的参考数据。

5.1 共发射极电流放大系数

① 直流放大系数 $\bar{\beta}$。

② 交流放大系数 β。

电流放大系数一般为 10～100。太小，放大能力弱；太大则易使管子性能不稳定。一般取 30～80 为宜。

5.2 极间反向饱和电流

① 集电极-基极反向饱和电流 I_{CBO}。

② 集电极-发射极反向饱和电流 I_{CEO}。

$$I_{CEO} = (1+\beta)I_{CBO}$$

反向饱和电流随温度的增加而增加，是三极管工作状态不稳定的主要因素。因此，通常把它作为判断三极管性能的重要依据。硅管反向饱和电流远小于锗管，在温度变化范围大的工作环境中应选用硅管。

5.3 极限参数

① 集电极最大允许电流 I_{CM}。三极管工作时，一旦集电极电流超过 I_{CM}，三极管性能将显著下降，并有可能被烧坏。

② 集电极最大允许耗散功率 P_{CM}。当三极管集电结两端电压与通过电流的乘积超过此值时，三极管性能将变坏或烧毁。

③ 集电极-发射极间反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$：三极管基极开路时，集电极和发射极之间的最大允许电压。当电压越过此值时，三极管将发生电压击穿，若电击穿导致热击穿，则会损坏三极管。

6. 三极管的简单测试

6.1 硅管或锗管的判别

判别电路如图 1-5-9 所示。当 $U = 0.6 \sim 0.7$ V 时，为硅管；当 $U = 0.1 \sim 0.3$ V 时，为锗管。

6.2 估计比较 β 值的大小

NPN 管的 β 值估测电路如图 1-5-10 所示。

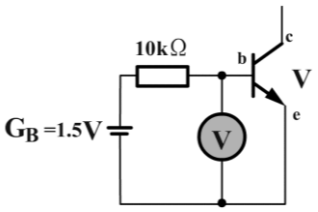


图 1-5-9　硅管和锗管的判别电路

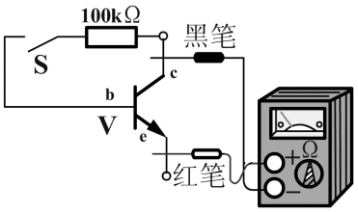


图 1-5-10　估测 β 的电路

万用表设置在 R×1 kΩ挡，测量并比较开关 S 断开和接通时的电阻值。前后两个读数相差越大，说明三极管的 β 值越高，即电流放大能力越大。

估测 PNP 管时，将万用表两只表笔对换位置。

6.3 估测 I_{CEO} 值

NPN 管的估测电路如图 1-5-11 所示。所测阻值越大，说明三极管的 I_{CEO} 越小。若阻值无穷大，三极管开路；若阻值为零，三极管短路。

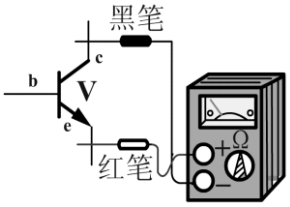


图 1-5-11　I_{CEO} 值的估测

测 PNP 型管时，红、黑表笔对调，方法同前。

6.4 NPN 管型和 PNP 管型的判断

将万用表设置在 R × 1 kΩ 或 R × 100 Ω 挡，用黑表笔和任一管脚相接（假设它是基极 b），红表笔分别和另外两个管脚相接，如果测得两个阻值都很小，则黑表笔所连接的就是基极，而且是 NPN 型的管子。如图 1-5-12（a）所示。如果按上述方法测得的结果均为高阻值，则黑表笔所连接的是 PNP 管的基极，如图 1-5-12（b）所示。

（a）　　（b）

图 1-5-12　NPN 和 PNP 的判断

6.5 e、b、c 三个管脚的判断

首先确定三极管的基极和管型，然后采用估测 β 值的方法判断 c、e 极。方法是：先假定一个待定电极为集电极（另一个假定为发射极）接入电路，记下欧姆表的摆动幅度，然后再把两个待定电极对调一下接入电路，并记下欧姆表的摆动幅度；摆动幅度大的一次，黑表笔所连接的管脚是集电极 c，红表笔所连接的管脚为发射极 e，如图 1-5-10 所示。测 PNP 管时，只要把图 1-5-10 所示电路中的红、黑表笔对调位置，仍照上述方法测试。

六、场效应管

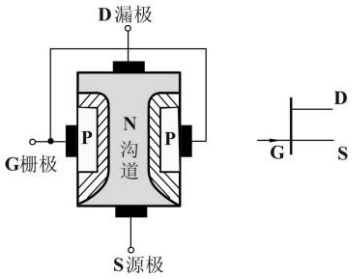
场效应管：是利用输入电压产生的电场效应来控制输出电流的电压控制型器件。

特点：管子内部只有一种载流子参与导电，称为单极型晶体三极管。

1. 结型场效应管

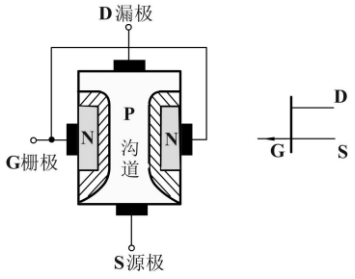
1.1 结构和符号

N 沟道结型场效应管的结构、符号如图 1-6-1 所示；P 沟道结型场效应管如图 1-6-2 所示。



（a）结构　　（b）符号

图 1-6-1　N 沟道结型场效应管



（a）结构　　（b）符号

图 1-6-2　P 沟道结型场效应管

特点：由两个 PN 结和一个导电沟道所组成。三个电极分别为源极 S、漏极 D 和栅极 G。漏极和源极具有互换性。

工作条件：两个 PN 结加反向电压。

1.2　工作原理

以 N 沟道结型场效应管为例，原理电路如图 1-6-3 所示。

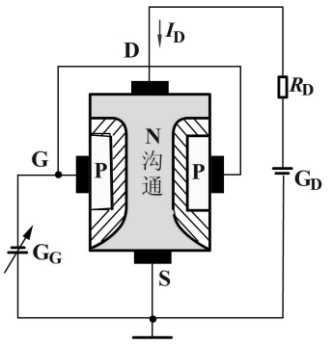


图 1-6-3　N 沟道结型场效应管的工作原理

工作原理如下：$U_{DS} > 0$；$U_{GS} < 0$；在漏源电压 U_{DS} 不变条件下，改变栅源电压 U_{GS}，通过 PN 结的变化，控制沟道宽窄，即沟道电阻的大小，从而控制漏极电流 I_D。

结论：

① 结型场效应管是一个电压控制电流的电压控制型器件。

② 输入电阻很大。一般可达 $10^7 \sim 10^8\ \Omega$。

1.3　特性曲线和跨导

（1）转移特性曲线

转移特性曲线反映了栅源电压 U_{GS} 对漏极电流 I_D 的控制作用。如图 1-6-4 所示，若漏源电压一定，则：

① 当栅源电压 $U_{GS}=0$ 时，漏极电流 $I_D=I_{DSS}$，I_{DSS} 称为饱和漏极电流。

② 当栅源电压 U_{GS} 向负值方向变化时，漏极电流 I_D 逐渐减小。

③ 当栅源电压 $U_{GS}=U_P$ 时，漏极电流 $I_D=0$，U_P 称为夹断电压。

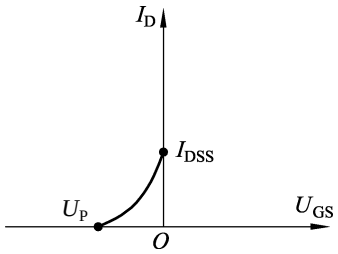


图 1-6-4　结型场效应管的转移特性曲线

（2）输出特性曲线

输出特性曲线表示在栅源电压一定的条件下，漏极电流与漏源电压之间的关系，如图 1-6-5 所示。

① 可调电阻区（图中Ⅰ区）：U_{GS} 不变时，I_D 随 U_{DS} 作线性变化，漏源间呈现电阻性；栅源电压 U_{GS} 越负，输出特性越陡，漏源间的电阻越大。

结论：在Ⅰ区中，场效应管可看作是一个受栅源电压控制的可变电阻。

② 饱和区（图中Ⅱ区）：U_{DS} 一定时，U_{GS} 的少量变化引起 I_D 较大变化，即 I_D 受 U_{GS} 控制；当 U_{GS} 不变时，I_D 不随 U_{DS} 变化，基本上维持恒定值，即 I_D 对 U_{DS} 呈饱和状态。

结论：在Ⅱ区中，场效应管具有线性放大作用。

③ 击穿区（图中Ⅲ区）：当 U_{DS} 增至一定数值后，I_D 剧增，出现电击穿。如果对此不加限制，将损坏管子。因此，管子不允许工作在这个区域。

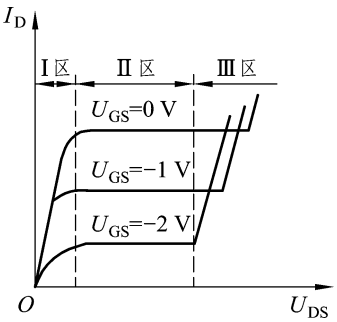


图 1-6-5　结型场效应管的输出特性曲线

（3）跨导（g_m）

g_m 反映了在线性放大区 ΔU_{GS} 对 ΔI_D 的控制能力，单位是 μA/V。

$$g_m=\frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}$$

2. 绝缘栅场效应管

绝缘栅场效应管是一种栅极与源极、漏极之间有绝缘层的场效应管，简称 MOS 管。

特点：输入电阻高，噪声小。

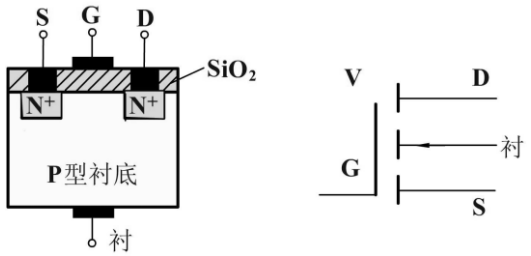
分类：有 P 沟道和 N 沟道两种类型；每种类型又分为增强型和耗尽型两种。

2.1　结构和工作原理

（1）N 沟道增强型绝缘栅场效应管

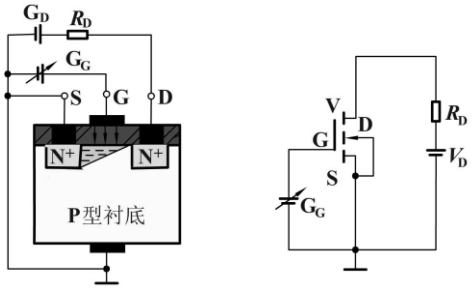
N 沟道增强型绝缘栅场效应管的结构及符号如图 1-6-6 所示。

N 沟道增强型绝缘栅场效应管的工作原理如图 1-6-7 所示。



（a）结构　　（b）符号

图 1-6-6　N 沟道增强型绝缘栅场效应管



（a）示意图　　（b）电路图

图 1-6-7　N 沟道增强型绝缘栅场效应管的工作原理

① 当$U_{GS}=0$，在漏、源极间加一正向电压U_{DS}时，漏源极之间的电流$I_D=0$。

② 当$U_{GS}>0$，在绝缘层和衬底之间感应出一个反型层，使漏极和源极之间产生导电沟道。在漏、源极间加一正向电压U_{DS}时，将产生电流 I_D。

③ 开启电压U_T：增强型 MOS 管开始形成反型层的栅源电压。

④ 在$U_{DS}>0$时：

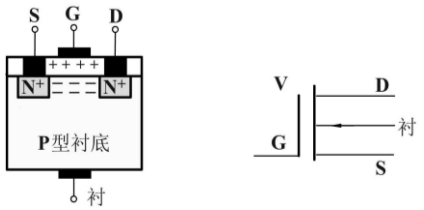
若$U_{GS}<U_T$，反型层消失，无导电沟道，$I_D=0$；

若$U_{GS}>U_T$，出现反型层即导电沟道，D、S 之间有电流 I_D 流过；

若U_{GS}逐渐增大，导电沟道变宽，I_D 也随之逐渐增大，即U_{GS}控制 I_D 的变化。

（2）N 沟道耗尽型绝缘栅场效应管

N 沟道耗尽型绝缘栅场效应管的结构及符号如图 1-6-8 所示。



（a）结构　　（b）符号

图 1-6-8　N 沟道耗尽型绝缘栅场效应管

① 特点：管子本身已形成导电沟道。

② 工作原理：在$U_{DS}>0$时，

若$U_{GS}=0$，导电沟道有电流 I_D；

当$U_{GS}>0$，并逐渐增大时，导致沟道变宽，使 I_D 增大；

当$U_{GS}<0$，并逐渐增大此负电压，导致沟道变窄，使 I_D 减小，实现U_{GS}对 I_D 的控制。

③ 夹断电压U_P：使$I_D=0$时的栅源电压。

2.2　特性曲线和跨导

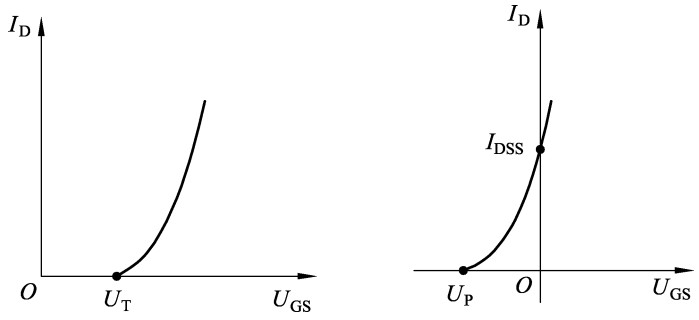
以 N 沟道 MOS 管为例。

（1）转移特性曲线

N 沟道 MOS 管的转移特性曲线如图 1-6-9 所示。

增强型：当$U_{GS}=0$时，$I_D=0$；当$U_{GS}>U_T$时，$I_D>0$。

耗尽型：当$U_{GS}=0$时，$I_D\neq 0$；当U_{GS}为负电压时 I_D 减小；当$U_{GS}=U_P$时，$I_D=0$。

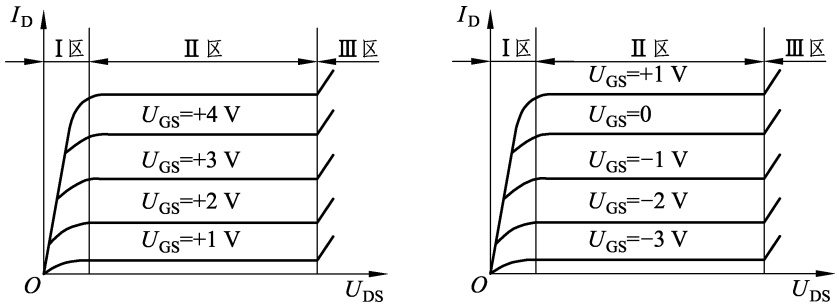


（a）增强型　　（b）耗尽型

图 1-6-9　N 沟道 MOS 管的转移特性曲线

（2）输出特性曲线

N 沟道 MOS 管的输出特性曲线如图 1-6-10 所示。



（a）增强型　　（b）耗尽型

图 1-6-10　N 沟道 MOS 管的输出特性曲线

有三个区：可调电阻区（Ⅰ区）、饱和区（Ⅱ区）和击穿区（β区）。其含义与结型管输出特性曲线的三个区相同。

（3）跨导

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}$$

2.3　图形符号

绝缘栅场效应管的符号如图 1-6-11 所示。N、P 沟道的区别在于图中箭头的指向相反。

（a）增强型 NMOS 管　（b）增强型 PMOS　（c）耗尽型 NMOS 管　（d）耗尽型 PMOS 管

图 1-6-11　MOS 管的图形符号

3. 场效应管的主要参数和特点

3.1　主要参数

（1）直流参数

① 开启电压 U_T：在 U_{DS} 为定值的条件下，增强型场效应管开始导通（I_D 达到某一定值，如 10 μA）时，所需加的 U_{GS} 值。

② 夹断电压 U_P：在 U_{DS} 为定值的条件下，耗尽型场效应管 I_D 减小到近于零时的 U_{GS} 值。

③ 饱和漏极电流 I_{DSS}：耗尽型场效应管工作在饱和区且 $U_{GS}=0$ 时，所对应的漏极电流。

④ 直流输入电阻 R_{GS}：栅源电压 U_{GS} 与对应的栅极电流 I_G 之比。

场效应管的输入电阻很高，结型管一般在 $10^7\ \Omega$ 以上；绝缘栅管则更高，一般在 $10^9\ \Omega$ 以上。

（2）交流参数

① 跨导 g_m：U_{DS} 一定时，漏极电流变化量 ΔI_D 和引起这个变化的栅源电压变化量 ΔU_{GS} 之比。它表示了栅源电压对漏极电流的控制能力。

② 极间电容：场效应管三个电极之间的等效电容 C_{GS}、C_{GD}、C_{DS}。一般为几个皮法，极间电容小的管子，高频性能好。

（3）极限参数

① 漏极最大允许耗散功率 P_{DM}：I_D 与 U_{DS} 的乘积不应超过的极限值。

② 漏极击穿电压 $U_{(BR)DS}$：漏极电流 I_D 开始剧增时所加的漏源间的电压。

3.2　场效应管的特点

场效应管的特点列于表 1-6-1 中，供比较参考。

表 1-6-1　场效应管与普通三极管的比较

项　目	器件名称	
	晶体三极管	场效应管
极型特点	双极型	单极型
控制方式	电流控制	电压控制
类型	PNP 型、NPN 型	N 沟道、P 沟道
放大参数	β = 50 ~ 200	g_m = 1 000 ~ 5 000 A/V
输入电阻	$10^2 \sim 10^4\ \Omega$	$10^7 \sim 10^{15}\ \Omega$
噪声	较大	较小
热稳定性	差	好

抗辐射能力	差	强
制造工艺	较复杂	简单、成本低

七、万用表

1. 概　述

万用表是常用的一种测量与检测仪表。它有两种类型：一种是指针式万用表，另一种是数字式万用表。它们分别有自己特点。万用表能够测量电压、电流、电阻、二极管、三极管、电容、线路。通过测量得到的读数来判断故障。

2. 技术标准与要求

① 直流电压挡可测量 0 ~ 1 000 V。
② 交流电压挡可测量 0 ~ 700 V。
③ 直流电流挡可测量 0 ~ 20 A。
④ 电阻挡可测量 0 ~ 200 MΩ。
⑤ 二极管挡可测量正向、反向电阻，判断二极管好坏，同时还判断正、负极。
⑥ 三极管挡可测量三极管的放大系数与穿透电流。

3. 万用表的组成与使用方法

3.1　万用表的组成

指针式万用表由表壳、表头、测量挡位组合开关、微调电位器、电子原件、电池、表笔组成。

数字式万用表由表壳、表头、测量挡位组合开关、电源开关、电子原件、电池、表笔组成。

3.2　使用方法

① 将红表笔插在万用表的正极插孔内、红黑笔插在万用表的负极插孔内。
② 打开电源开关待显示数字后方可正常使用。
③ 指针万用表测量直流电源时，必须红表笔接电源正极、黑表笔电源负极，否则会损坏表头。
④ 指针万用表测量电阻时要根据电阻值的大小分别将测量挡位组合开关拨至 R × 1、R × 10、R × 100、R × 1 k、R × 10 k 的挡位上。每调一次挡位都要两个表笔连接一起，通过微调电位器校零位。
⑤ 数字万用表测量直流电源时，可以不考虑表笔的正负极。如果接反了正负极表头显示的是负数。

4. 万用表测量

4.1　电压测量

(1) 交流电压

① 将万用表拨至交流电压挡位上，根据电压大小选择量程。
② 两表笔分别触接在交流电源的两个极上。

③ 从万用表的表头显示器上读取电压数值。

（2）直流电压

① 将万用表拨至直流电压挡位上，根据电压大小选择量程。

② 两表笔分别触接在直流电源的两个极上。

③ 从万用表的显示器上读取电压数值。

4.2　电流测量

测量电流与测量电压的方法大体相同，不同之处是：测量电流是把万用表的两个表笔串联在电路中。

4.3　电阻测量

① 将万用表测量挡位组合开关拨至电阻挡位上。

② 根据被测量的电阻大小选择相应的量程，即 R20 Ω ~ 200 MΩ。

③ 两个表笔分别触接在被测电阻两端。

④ 从万用表的显示器上读取电阻数值。

4.4　二极管测量

① 将万用表测量挡位组合开关拨至二极管挡位上。

② 两个表笔分别触接在二极管的两个极上，测得电阻值记下。

③ 然后对换表笔再分别触接在二极管的两个极上。

④ 若第一次测得的电阻值为无穷大，表示是二极管的反向电阻。

⑤ 若第二次测得的电阻值为 650 Ω 左右，表示是二极管的正向电阻。

⑥ 这两次测量得到的读数结果，说明二极管是好的。

⑦ 若两次测得的电阻值都为无穷大，说明二极管断路。

⑧ 若两次测得的电阻值都很小，说明二极管已被击穿。

⑨ 当测得的电阻值为 650 Ω 左右时，红表笔触接是二极管的正极。

⑩ 当测得的电阻值为无穷大时，黑表笔触接是二极管的正极。

⑪ 指针式万用表测量二极管时，要用 R × 100 Ω 或者 R × 1 kΩ 挡位测量，不能用 R × 1 Ω 和 R × 10 kΩ 挡位测量。因为，R × 1 Ω 挡位电流大会烧坏二极管；R × 10 kΩ 挡位电压高会击穿二极管。

⑫ 指针式万用表可以测得二极管的真实正向电阻，以此来判断二极管的性能。

八、示波器

1. 示波器的基本结构

示波器的规格和型号较多，但所有示波器所具有的基本结构都相同，大致可分为：示波管（又称阴极射线管）、X 轴放大器和 Y 轴放大器（含各自的衰减器）、锯齿波发生器等，如图 1-8-1 所示。

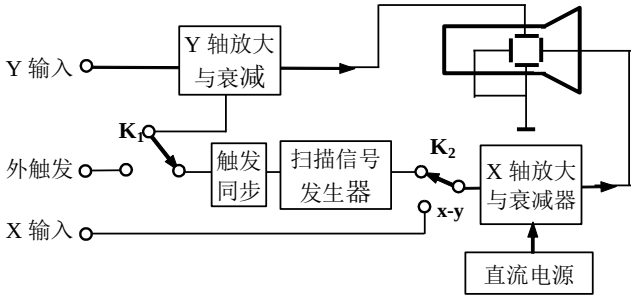


图 1-8-1　示波器的基本结构

1.1　示波管

示波管是示波器的核心部件，它主要包括电子枪、偏转系统和荧光屏三部分，这三部分全部被密封在高真空的玻璃外壳内，如图 1-8-2 所示。电子枪由灯丝、阴极、控制栅极、第一阳极和第二阳极共五部分组成。灯丝通电后加热表面涂有氧化物的金属圆筒（即阴极），使之发射电子。控制栅极是一个套在阴极外面的金属圆筒，其顶端有一小孔，它的电位比阴极低，对阴极发射出来的电子起减速作用，只有初速度较大的电子才可能穿过栅极顶端的小孔，进入加速区的阳极。因此，控制栅极实际上起着控制电子流密度的作用。调整示波器面板上的“亮度”旋钮，其实就是调节栅极电位来改变飞出栅极的电子数目，飞出的电子数目越多，荧光屏上的亮斑就越亮。从栅极飞出来的电子再经过第一阳极和第二阳极的加速与聚焦后打到荧光屏上，形成一个明亮清晰的小圆点。偏转系统是由两对相互垂直的电极板组成。电子束通过偏转系统时，同时受到两个相互垂直方向的电场的作用，荧光屏上小亮点的运动轨迹就是电子束在这两个方向运动的叠加。

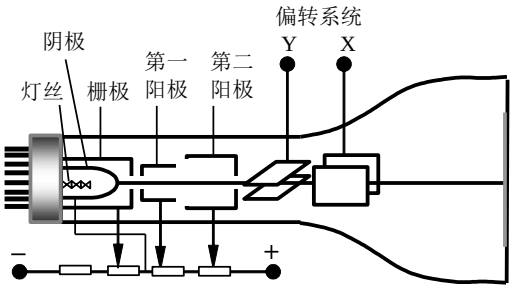


图 1-8-2　示波管的结构示意图

1.2　X、Y 轴电压放大器和衰减器

由于示波管本身的 X 及 Y 偏转板的灵敏度不高（0.1 ~ 1 mm/V），当加在偏转板上的信号电压较小时，电子束不能发生足够的偏转，屏上的光点位移较小，不便观测，这就需要预先将该小电压通过电压放大器进行放大。衰减器的作用是使过大的电压信号衰减变小，以适应轴放大器的要求，否则放大器不能正常工作，甚至受损。

1.3　锯齿波信号（扫描信号）发生器

锯齿波信号发生器的作用就是产生周期性锯齿波信号（见图 1-8-3）。将锯齿波信号加在

X 偏转板上，可以证明，此时电子束打在荧光屏上的亮点将向一个方向做匀速直线运动。经过一个周期后，荧光屏上的亮点又回到左侧，重复运动。如果锯齿波的频率较大，由于荧光材料具有一定的余辉时间，在荧光屏上能看到一条水平亮线。

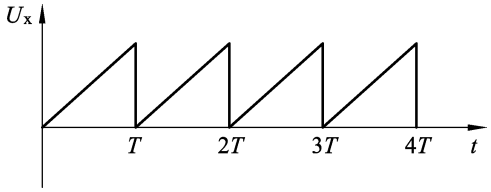


图 1-8-3　锯齿波信号

2. 扫描原理

将一正弦电压信号加到 Y 轴偏转板上，即 $U_y \neq 0$，若 X 轴偏转板上为零电压信号，则荧光屏上的光点将随着正弦电压信号做正弦振荡。若 Y 轴上的电压信号频率较快，则屏上只出现一条亮线。要直观地看到正弦波信号随时间的变化波形，必须将屏上光点在 x 方向（即时间方向）上“拉开”，这就要借助与锯齿波信号的作用。将锯齿波信号加到 X 偏转板上（本实验中只要将“扫速选择开关”不要置于“x-y”挡位即可），此时示波器内的电子束既要在 y 方向按正弦电压信号的规律做正弦振荡，又要在 x 方向做匀速直线运动，y 方向的正弦振荡被“展开”，屏上光点留下的轨迹就是一条正弦曲线。锯齿波信号完成一个周期变化后，屏上光点又回到屏幕的左侧，又准备重复以前的运动，这一过程称为扫描过程，图 1-8-4 所示就是这一过程的图解。图中假设加在 Y 偏转板上的电压信号为待测正弦电压信号，其频率与加在 X 偏转板上的锯齿波信号的频率相同，并将一个周期分为相同的四个时间间隔，U_y 和 U_x 的值分别对应光点在 y 轴和 x 轴偏离的位置。将 U_y 和 U_x 各自对应的投影交汇点连接起来，即得被测电压波形。完成一个波形后的瞬间，屏上光点立刻反跳回原点，并在荧光屏上留下一条“反跳线”，称为回归线。因这段时间很短，线条比较暗，有的示波器采用措施将其消除。

上面所讨论的波形因 U_y 和 U_x 的周期相等，荧光屏上出现一个正弦波。当 $f_y = nf_x$，$n = 1$，2，3，…时，荧光屏上将出现 1 个、2 个、3 个…稳定的波形。

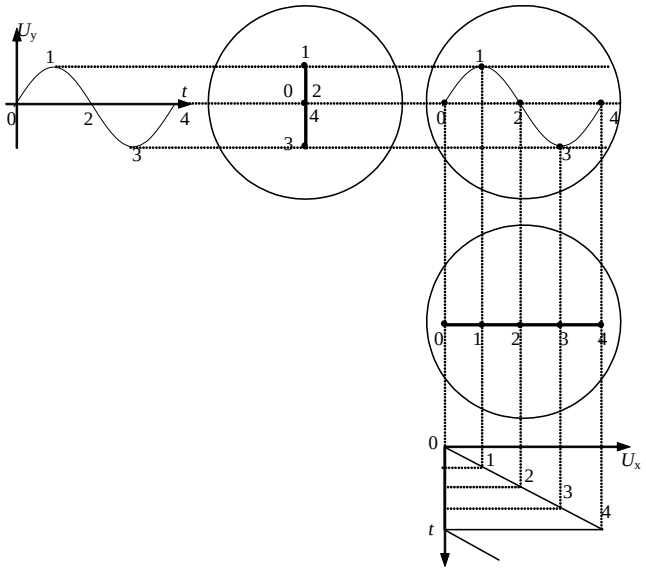


图 1-8-4　扫描过程的图解

3. 示波器的整步（或同步）

若待测正弦信号的频率与锯齿波信号的频率不成整数比，则每当扫描一个周期后，荧光屏上的光点回到左侧起点时，U_y 不能回到一个扫描周期以前的值，即每扫描一个周期，荧光屏上的光点回到起点时的位置将不一样，以至于整个波形在屏幕上“走动”，或者说，波形不稳定。虽然锯齿波信号的频率是可调的，但 f_y 和 f_x 是来自于两个不同系统的频率，在实验中总是有不可避免的变化，因此很难长时间地维持两者成整数比的关系。为了得到稳定的波形，示波器采用整步的方法，即把 y 轴输入的信号电压接至锯齿波信号发生器电路中，强迫 f_x 跟随 y 轴信号频率 f_y 变化而变化，以保证 $f_y = nf_x$ 成立。

4. 李萨如图形

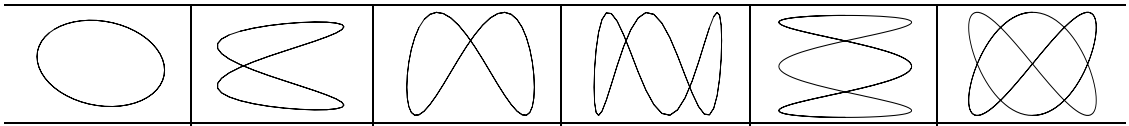
若同时分别在 X、Y 偏转极板上加载两个正弦电压信号，结果又怎样呢？其实，此时荧光屏上运动的光点同时参与两个相互垂直方向的运动，荧光屏上的“光迹”就是两个相互垂直方向上的简谐振动合成的结果。可以证明，当这两个垂直方向上信号频率的比值为简单整数比时，光点的轨迹为一稳定的封闭图形，称为李萨如图形。表 1-8-1 示出了几个常见的李萨如图形。

利用李萨如图形可以测量待测信号的频率。令 N_x、N_y 分别代表 x、y 方向切线和李萨如图形的切点数，则

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{x\text{方向的切点数}N_x}{y\text{方向的切点数}N_y}$$

实验中，若加载在 X 偏转板上的信号频率 f_x 已知，则待测信号频率 f_y 可由上式求出。

表 1-8-1　几种常见的李萨如图形

					
$f_x : f_y = 1:1$	$f_x : f_y = 2:1$	$f_x : f_y = 1:2$	$f_x : f_y = 1:3$	$f_x : f_y = 3:1$	$f_x : f_y = 2:3$

5. 数字示波器面板

数字示波器面板如图 1-8-5 所示。

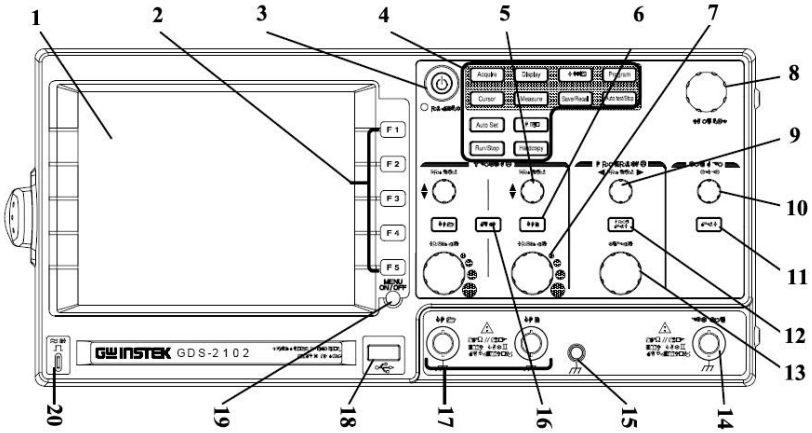


图 1-8-5　数字示波器面板示意图

数字示波器面板的功能说明如表 1-8-2 所示。

表 1-8-2　数字示波器面板的功能说明（编号参见图 1-8-5）

编 号	名　称	功能说明
1	LCD 显示器	TFT 彩色 LCD 显示器，具有 320×234 的分辨率
2	主菜单显示键	在显示器上显示或隐藏功能选单
3	开关/待机键	按一次为开机（亮绿灯），再按一次为待机状态（亮红灯）
4	主要功能键	Acquire 键为波形撷取模式。 Display 键为显示模式的设定。 Utility 键为系统设定，用于 Go-No Go 测试、打印，与 Hardcopy 键并用可作数据传输和校正。 Program 键与 Auto test/Stop 键并用可用于程序设定和播放。 Cursor 键为水平与垂直设定的光标。 Measure 键用于自动测试。 Help 键为操作辅助的说明。 Save/Recall 键为储存/读取 USB 和内部存储器之间的图像、波形和设定储存。

		Auto Set 键为自动搜寻信号和设定。 Run/Stop 键进行或停止浏览的信号。

续表

编 号	名 称	功能说明
5	垂直位置旋钮	调节波形在垂直方向的位置
6	CH1～CH2 菜单键	开启或关闭通道波形显示和垂直功能选单
7	波形 *y* 轴灵敏度旋钮	调节波形在 *y* 轴的电压标度
8	参数旋钮	调节参数和变换参数
9	水平位置旋钮	将波形往右（顺时针旋转）移动或往左（反时针旋转）移动
10	触发水平	设定触发位置：顺时针旋转为增加刻度，反时针旋转为减少刻度
11	触发菜单键	触发信号的设定
12	水平菜单键	水平浏览信号
13	时间刻度旋钮	设置水平方向时间刻度
14	外触发输入	外触发信号输入端口
15	接地端	
16	数学键	根据信道的输入信号执行数学处理
17	信号输入端口	通道 1：CH1　　通道 2：CH2
18	USB 接口	1.1/2.0 兼容的 USB 接口，用于打印与数据存储和读取
19	主菜单显示键	在显示器上显示或隐藏功能选单
20	测试信号输出	输出 2Vpp 的测试棒补偿信号

6. 示波器的显示说明

示波器的显示如图 1-8-6 所示，其说明见表 1-8-3。

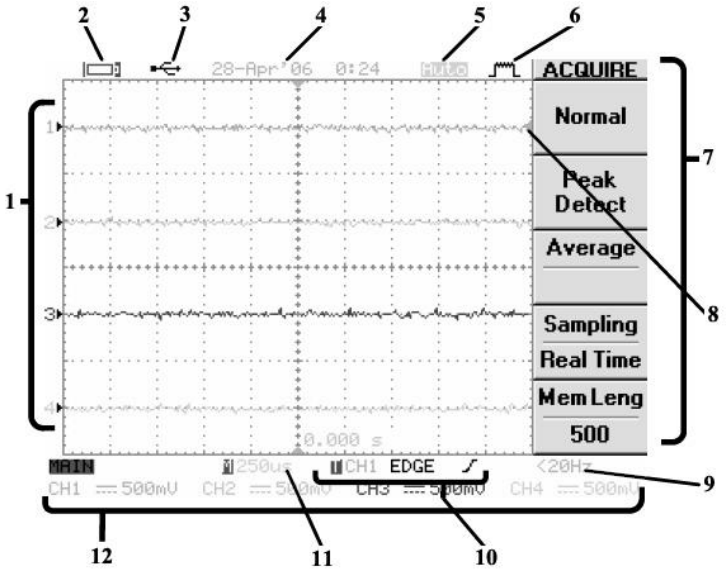


图 1-8-6　示波器的显示

表 1-8-3　示波器的显示说明（编号参见图 1-8-6）

编号	名　称	说　明
1	波形	图中所括 1、2、3、4 为四个信道的信号波形 Channel1: 琥珀色　　Channel2: 蓝色
2	电池状态	
3	远程控制的连接状态	
4	显示日期	28-Apr'06　00：24
5	触发状态	Auto：自动　　Trig?：找不到触发　　Stop：停止触发
6	撷取状态	有三种：Normal（正常模式）；Peak Detect（峰值侦测模式）；Average（平均模式）
7	功能键	这些功能键可通过 F1～F5 调节
8	触发水平指示	
9	触发频率计数器	选择的信道输入信号的频率 CH_1 < 20 Hz
10	触发状态	EDGE
11	时间刻度	M250μs
12	信道状态	CH_1，直流，500 mV；CH_2，…

7. 示波器的按键说明

示波器的按键使用方法如表 1-8-4 所示。

表 1-8-4　示波器的按键使用方法

撷取和光标设置		量测信号	
撷取模式	Acquire→F1～F4	自动设定刻度	Auto Set

记忆长度	Acquire→F5	自动量测时间	Measure→F1→F3（重复）
水平光标	Cursor→F1～F2	自动量测电压	Measure→F1→F3（重复）
垂直光标	Cursor→F1，F3	检视量测结果	Measure→Measure
显示器		系统设置	
固定波形	Run/Stop	远程控制接口	Utility→F2→F1（重复）
更新显示画面	Display→F3	显示系统数据	Utility→F5→F2
显示网格线	Display→F5	选择语言	Utility→F4
F1～F5 功能选单开关	Menu ON/OFF	设定日期/时间	Utility→F5→F5→F2→F1
选择 vectors/dots 波形	Display→F1	快速存到 USB	Utility→F1→F1 Hardcopy
缩放水平画面	HORIMENU→F2～F3	储存图像	Save/Recall→F5→F1→F1～F4
转动水平画面	HORIMENU→F4	储存设定	Save/Recall→F3→F1～F4
检视 XY 模式	HORIMENU→F5	储存波形	Save/Recall→F4→F1～F4
反转波形	CH1/2/3/4→F2	使用边缘（Edge）触发	Trigger→F1 （重复）→F2～F3→F5→F1～F4
限制频宽	CH1/2/3/4→F3	加/减	MATH→F1（重复）→F2～F4
选择耦合模式	CH1/2/3/4→F1		
选择测棒衰减	CH1/2/3/4→F4		

8. F05A 型数字合成函数发生器/计数器前面板介绍

如图 1-8-7 所示，仪器启动：按下面板上的电源按钮，电源接通，先闪烁显示“WELCOME” 2 s，再闪烁显示仪器型号例如“F05A-DDS” 1 s，之后根据系统功能中开机状态的设置，进入“点频”功能状态，波形显示区显示当前波形“～”，频率为 10.00000000 kHz；或者进入上次关机前的状态。

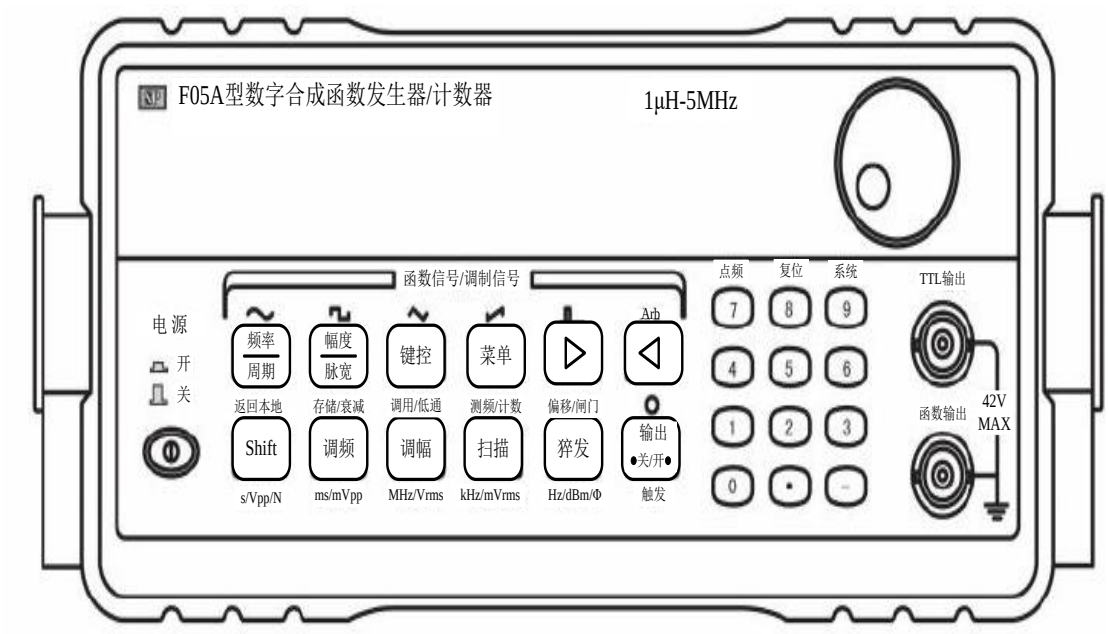


图 1-8-7　F05A 型数字合成函数发生器/计数器前面板示意图

F05A 型数字合成函数发生器/计数器前面板的数字输入键和功能键的说明如表 1-8-5 和表 1-8-6 所示。

表 1-8-5　数字输入键的说明

键名	主功能	第二功能	键名	主功能	第二功能
0	输入数字 0	Shift0 进入 A 通道	7	输入数字 7	Shift 7：进入点频状态
1	输入数字 1	无	8	输入数字 8	Shift 8：系统复位到初始状态
2	输入数字 2	无	9	输入数字 9	Shift 9：进入系统
3	输入数字 3	无	●	输入小数点	Shift●：进入 B 通道
4	输入数字 4	无	－	输入负号	无
5	输入数字 5	无	◀	闪烁数字左移*	shift◀：选择脉冲波
6	输入数字 6	无	▶	闪烁数字右移**	shif▶：选择 ARB 波形

注：*：输入数字未输入单位时，按下此键，删除当前数字的最低位数字，可用来修改当前输错的数字。

*：外计数时，按下此键，计数停止，并显示当前计数值，再按动一次，继续计数。

**：外计数时，按下此键，计数清零，重新开始计数。

表 1-8-6　功能键的说明

键　名	主功能	第二功能	计数第二功能	单位功能

频率/周期	频率/周期选择(可用数据键或调节旋钮输入频率值和周期值，用数据键输入时，数据后面必须输入单位，否则输入数据不起作用）	正弦波选择(按下【shift】频率/周期键选择正弦波形，在波形显示区会显示其波形）	无	无
幅度/脉宽	幅度/脉宽选择	方波选择（按下【shift】幅度/脉宽键 ,选择方波波形）	无	无
键控	键控功能 [通过和其他键连用实现频移键控（FSK）、相移键控（PSK）标志“◀”“FSK”两种功能内部参数的设置]	三角波选择按键（按下【shift】【键控】键，选择三角波波形）	无	
菜单	进入 FSK、PSK、调频、调幅、扫描、猝发和系统功能模式时，可通过【菜单】键选择各功能的不同选项，并改变相应选项的参数。在点频功能时且当前处于幅度时可用【菜单】键进行峰-峰值、有效值和 dBm 数值的转换	升锯齿波波形选择按键（按下【shift】【菜单】键，选择升锯齿波波形）	无	无
调频	调频功能选择，显示标志“FM”(通过使用【调频】键进入调频功能模式，通过使用【菜单】键可对其内部参数进行修改和设置）	存储功能选择	衰减选择（在频率计数器功能模式下，按【Shift】键和【衰减】键设置当前输入信号经过衰减进行测量。显示区右侧的频率计数状态显示区显示衰减状态标志“ATT”）	ms/mVpp :分别表示时间的单位“ms”、幅度的峰-峰值单位“mV”
调幅	调幅功能选择，显示标志“AM”。按【调幅】键进入调幅功能模式，显示区显示载波频率。连续按【菜单】键对调幅的调制深度[AM LEVEL]、调制频率[AM FREQ]、调制波形[AM WAVE]、调制信号	调用功能选择	低通选择（在频率计数器功能模式下，按【Shift】键和【低通】键设置当前输入信号经过低通进行测量。显示区右侧的频率计数状态显示区显示低通状态标志“Filter”）	MHz/Vrms：分别表示频率的单位“MHz”、幅度的有效值单位“Vrms”

	源[AM SOURCE]选项的参数进行修改			

续表

键　名	主功能	第二功能	计数第二功能	单位功能
扫描	扫描功能选择：操作同上。当进入扫描功能模式，此时显示区下端的功能状态显示区显示扫描功能模式标志“Sweep”	测频功能选择	测频/计数选择（按【Shift】键和【测频】键，进入频率测量。功能模式显示区下端的功能状态显示区显示频率测量功能模式标志“Ext”“Freq”。若再按【Shift】键和【计数】键设置当前处于计数测量功能模式，此时显示区下端的功能状态显示区显示计数测量功能模式标志“Ext”和“Count”	KHz/mVrms：分别表示频率的单位“kHz”、幅度的有效值单位“mVrms”
猝发	猝发功能选择：操作同上。当进入猝发功能模式时，状态显示区会显示猝发功能模式标志“Burst”	直流偏移选择（按【Shift】键和【偏移】键来设定直流偏移值，当出现Offset时表示输出信号直流偏移不为0	闸门选择（在测频功能模式下，按【Shift】键和【闸门】键进入闸门时间设置状态，可用数据键或调节旋钮输入闸门时间值，在闸门开启时，显示区右侧频率计态显示区显示闸门开启标志“GATE”	Hz/dBm：分别表示频率的单位“Hz”、幅度的单位“dBm”

F05A型函数发生器/计数器的其他键还包括：

①“输出”键：信号输出与关闭切换。它是扫描功能和猝发功能的单次触发、信号输出控制键。连续使用可使“信号输出（信号灯亮）”“禁止信号输出（信号灯灭）”交替出现。

②“Shift”键：作为其他键的第二功能复用键，按下该键后，“Shift”标志亮，此时按其他键则实现第二功能；再按一次该键则该标志灭，此时按其他键则实现基本功能。s/Vpp/N分别表示时间的单位“s”、幅度的峰-峰值单位“V”和其他不确定单位。

9. 函数信号发生器

9.1 概　述

函数信号发生器是一台具有高度稳定性、多功能等特点的函数信号发生器，能直接产生正弦波、三角波、方波、斜波、脉冲波，波形对称可调并具有反向输出，直流电平可连续调节。

9.2 使用说明

函数信号发生器的面板标志说明及功能见图 1-8-8 和表 1-8-7。

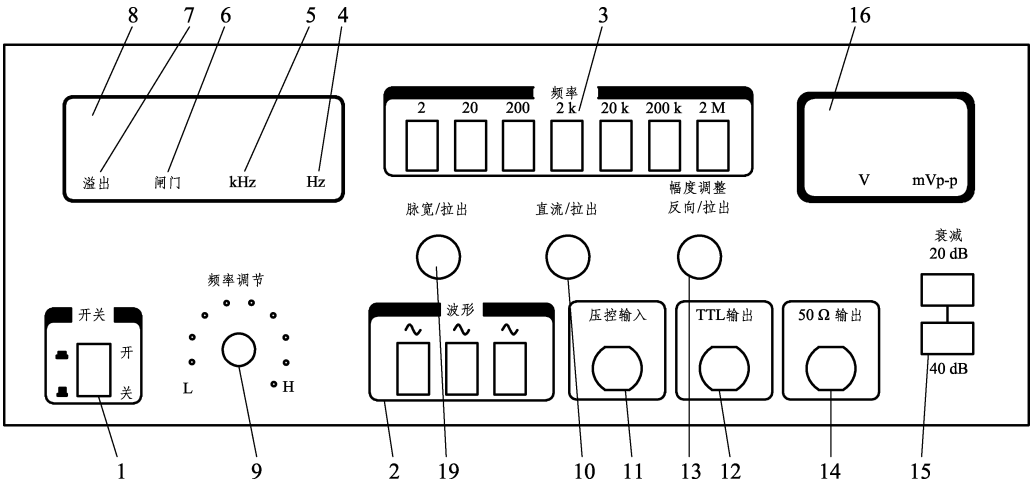


图 1-8-8　函数信号发生器的面板示意图

表 1-8-7　函数信号发生器的面板标志说明

序号	面板标志	名　称	作　　用
1	电源	电源开关	按下开关，电源接通，电源指示灯亮
2	波形	波形选择	① 输出波形选择 ② 与 13、19 配合使用可得到正负相锯齿波和脉冲波
3	频率	频率选择开关	频率选择开关与“9”配合选择工作频率 外测频率时选择闸门时间
4	Hz	频率单位	指示频率单位，灯亮有效
5	kHz	频率单位	指示频率单位，灯亮有效
6	闸门	闸门显示	此灯闪烁，说明频率计正在工作
7	溢出	频率溢出显示	当频率超过 5 个 LED 所显示范围时灯亮
8		频率 LED	所有内部产生频率或外测时的频率均由此 5 个 LED 显示
9	频率调节	频率调节	与“3”配合选择工作频率
10	直流/拉出	直流偏置调节输出	拉出此旋钮可设定任何波形的直流工作点，顺时针方向为正，逆时针方向为负
11	压控输入	压控信号输入	外接电压控制频率输入端
12	TTL 输出	TTL 输出	输出波形为 TTL 脉冲，可做同步信号

13	幅度调整 反向/拉出	斜波倒置开关 幅度调节旋钮	① 与“19”配合使用，拉出时波形反向 ② 调节输出幅度大小
14	50 Ω 输出	信号输出	主信号波形由此输出，阻抗为 50 Ω
15	衰减	输出衰减	按下按键可产生 - 20 dB/ - 40 dB 衰减
16	V　mV_{P-P}	电压 LED	
17	外测 - 20dB	外接输入衰减 - 20dB	① 频率计内测和外测频率（按下）信号选择 ② 外测频率信号衰减选择，按下是信号衰减 20 dB
18	外测输入	计数器外信号输入端	外测频率时，信号由此输出
19	50 Hz 输出	50 Hz 固定信号输出	50 Hz 固定频率正弦波由此输出
20	AC220 V	电源插座	50 Hz/220 V 交流电源由此输出
21	FUSE：0.5 A	电源保险丝盒	安装电源保险丝
22	标准输出 10 MHz	标频输出	10 MHz 标频信号由此输出

10. 误差和有效数字

10.1　关于误差

要求：认识误差问题在实验中的重要性，了解误差的概念，知道系统误差和偶然误差，知道用多次测量求平均值的方法减小偶然误差，能在某些实验中分析误差的主要来源，不要求计算误差。

从来源看，误差分成系统误差和偶然误差两种；从数值看，误差又分为绝对误差和相对误差两种。

（1）系统误差和偶然误差

系统误差是由于仪器本身不精确或实验方法粗略或实验原理不完善而产生的。其特点是，在多次重做同一实验时，其结果总是同样地偏大或偏小，不会出现有几次偏大而另外几次偏小的情况。要减小系统误差，必须校准仪器、改进实验方法、完善设计原理。

偶然误差是由于各种偶然因素对实验者、测量仪器、被测物理量的影响而产生的。偶然误差的特点是，多次重做同一实验时，结果有时偏大、有时偏小，并且偏大和偏小的机会相同。减小偶然误差的一般方法是多次测量，取其平均值。

（2）绝对误差和相对误差

绝对误差：即测量值和真实值之差。它反映了测量值偏离真实值的大小。

相对误差：即绝对误差（Δx）与真实值 (x_0) 的百分比，可用 $\eta = \Delta x / x_0 \times 100\%$ 表示；它反映了实验结果的精确程度，衡量一次实验的精确程度就采用相对误差。

10.2　有效数字

要求：了解有效数字的概念，会用有效数字表达直接测量的结果。间接测量的有效数字运算不作要求，运算结果一般可用 2 ~ 3 位有效数字表示。