

电工电子技术备课—李景 2020

第一讲： 电路和电路的基本物理量

电路参考点、物理量参考方向、电路元件特性

第 1 章 电路和电路元件

• 本章要求

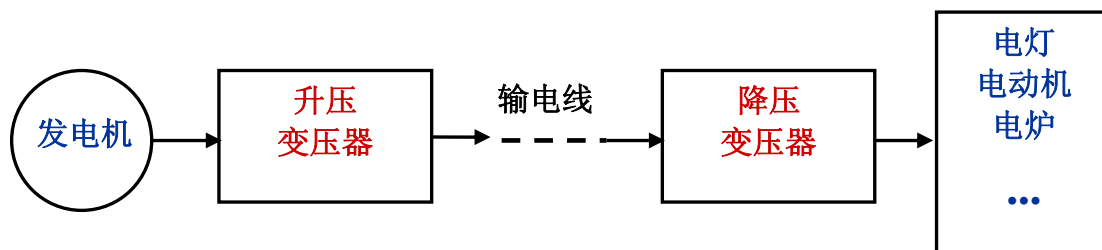
- 1.理解电压与电流参考方向的意义；
- 2.理解电功率和额定值的意义；
- 3.会计算电路中各点的电位；
- 4.掌握所介绍的几种电路元件的外部特性和电路模型

1.1 电路和电路的基本物理量

1.1.1 电路

- **电路**：是各种电气设备或元件为了某种需要按一定方式组成的总体，它为电流提供了通路。
- **电路**：是各种电气设备或元件为了某种需要按一定方式组成的总体，它为电流提供了通路。

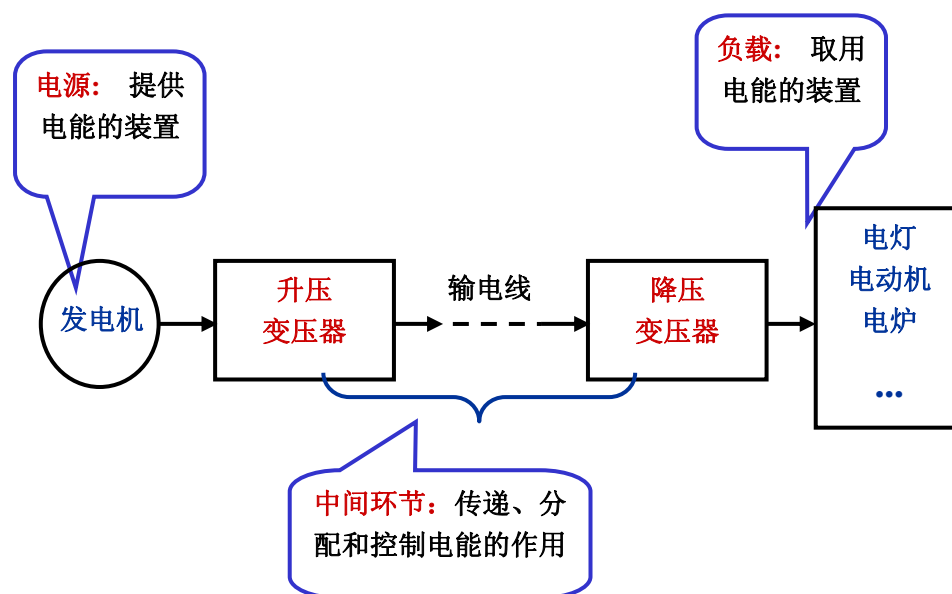
(1) 实现电能的传输、分配与转换 （强电系统）



(2)实现信号的传递与处理 （弱电系统）

电路的组成部分（如图）

组成：电源/信号源、负载、中间环节三部分

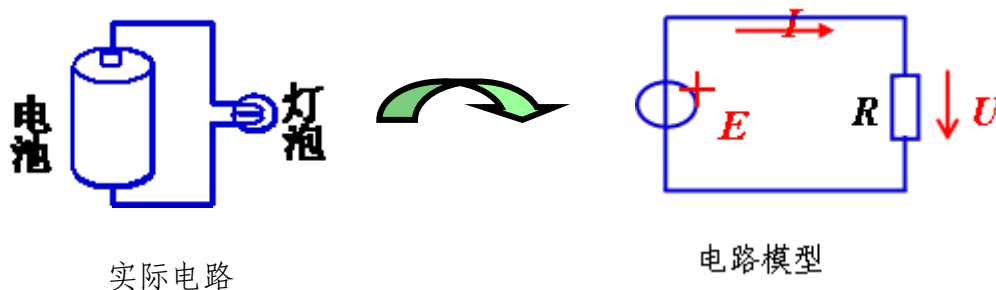


电源或信号源的电压或电流称为激励，它推动电路工作；由激励所产生的电压和电流称为响应。

1.1.2 电路元件和电路模型

实际电路：由电阻器、电容器、线圈、变压器、晶体管、运算放大器、传输线、电池、发电机和信号发生器等实际电气器件和设备连接而成的电路。

- **电路模型：**为了便于用数学方法分析电路,一般要将实际电路模型化，用足以反映其电磁性质的理想电路元件或其组合来模拟实际电路中的器件，从而构成与实际电路相对应的电路模型。
- **电路模型：**为了便于用数学方法分析电路,一般要将实际电路模型化，用足以反映其电磁性质的理想电路元件或其组合来模拟实际电路中的器件，从而构成与实际电路相对应的电路模型。



1.1.3 电流、电压及其参考方向

电路中的物理量：电压 电流

物理量的正方向：实际正方向 假设正方向

物理中对基本物理量规定的方向

电流 I 正电荷运动的方向 kA 、 A、 mA、

电压 U 高电 \rightarrow 低电位 kV 、 V、 mV、 μ V
(电位降低的方向)

电动势 E 低电位 \rightarrow 高电位 kV 、 V、 mV、 μ V
(电位升高的方向)

解决方法

- (1) 在解题前先设定一个正方向，作为参考方向；
- (2) 根据电路的定律、定理，列出物理量间相互关系的代数表达式；
- (3) 根据计算结果确定实际方向：
若计算结果为正，则实际方向与参考方向一致；
若计算结果为负，则实际方向与参考方向相反。
- (4) 今后解题时一律以正方向为准。

1、电流及其参考方向

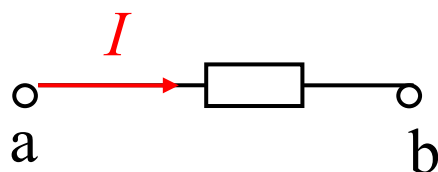
$$i = \frac{dq}{dt}$$

直流(DC) I

交流(AC)

电流的实际方向 是指正电荷运动的方向

电流的参考方向 参考方向的选择具有任意性。在选定参考方向的情况下，
电流成为代数量。



$I > 0$ 意味着电流的实际方向与参考方向一致。

$I < 0$ 意味着电流的实际方向与参考方向相反。

标注：（1）用箭头在电路图上表示

（2）用双下标表示 I_{ab} $I_{ab} = -I_{ba}$

2、电压及其参考方向

概念：电压是衡量电场力对电荷做功的能力。

a,b 两点间的电压 U_{ab} 在数值上等于电场力把单位

正电荷从 a 点移到 b 点所做的功。即从 a 点（高电位点）移到 b 点（低电位点）所失去的电能。

电压的实际方向：高电位指向低电位

电压的参考方向：人为设定的电压的正方向

3、关联参考方向

关联参考方向——同一元件的电流参考方向与电压参考方向一致。即电流从电压的正极性端流入，从负极性端流出。

约定：无源元件上的电流和电压都采用关联参考方向。有源元件采用非关联参考方向。

1.1.4 电路功率

功率的概念：设电路任意两点间的电压为 U ，流入此部分电路的电流为 I ，则这部分电路消耗的功率为：

$$P = U \cdot I \quad \text{W}$$

在 U 、 I 取关联参考方向的前提下，

若 $P = UI > 0$ “吸收功率（负载）”

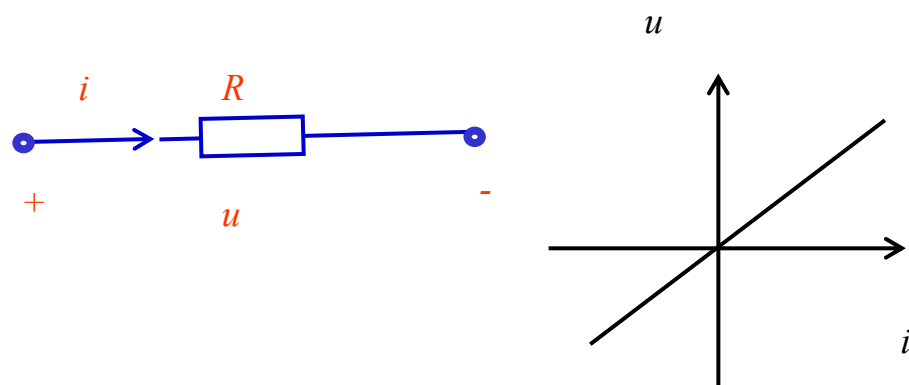
若 $P = UI < 0$ “发出功率”（电源）

1.2 电阻、电感和电容元件

1.2.1 电阻元件

电阻元件是由消耗电能的物理过程抽象出来的理想电路元件.例如:电阻器、白炽灯、电炉在一定条件下可用电阻元件模拟。

常用单位: Ω 、 $k\Omega$ 、 $M\Omega$ 线性电阻: $u=Ri$



$$P=ui=i^2 R= u^2 /R \quad \text{电阻是耗能元件}$$

1.2.2 电感元件

$$u= - eL=Ldi/dt \quad \text{单位: H, mH, } \mu\text{H}$$

线性电感: $i \quad \psi$ 线性函数关系 $N\phi=Li$

特点: 1、变化的电流产生电压。直流电路中 $I=\text{常数}$,

$UL=0$; 所以在直流电路中电感可视为短路。

2、电感元件是储能元件,储能决定于该时刻的电流值,只进行能量吞吐,不耗能。

1.2.3 电容元件

$$C = q/u$$

单位: F, μF , pF

线性电容: $q \quad u$ 线性函数关系 $C=\text{常数}$

伏安特性: $i= dq / dt = C du / dt$

特点: 1、电容两端电压变化, 才会产生电流。 $u=\text{常数}$

时, $i= 0$ 。所以在直流电路中, 电容相当于开路。

2、电容元件是储能元件。

电阻、电感、电容的串并联公式及计算 (课本 P9 表 1.2.1)

第二讲：独立电源元件、电路基本定律

电压源、电流源模型及其等效、基尔霍夫定律

1.3 独立电源元件

独立电源是指能向电路独立地提供电压、电流的器件或装置。

1.3.1 理想电压源和理想电流源

理想电压源两端的电压与通过它的电流无关，总保持为某给定值或给定的时间函数。(恒压源)

恒压源的性质

- (1) 输出电压恒定，与流过的电流无关。
- (2) 它的电流不是由电压源本身就能确定的，而是与相连接的外电路共同决定的。

恒流源性质：

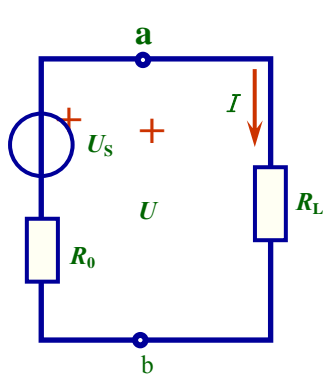
- (1) 提供的电流是给定的时间函数或某给定值，与电压无关。(恒流源)
- (2) 它的端电压不是由电流源本身就能确定，而是与相连接的外电路共同决定的。

1.3.2 实际电源的模型

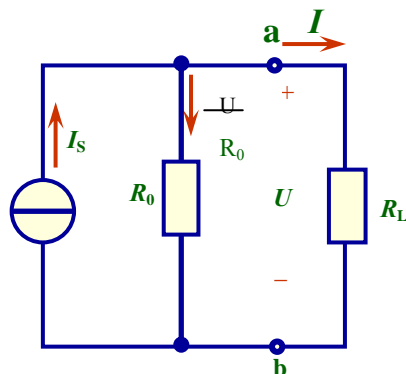
一个实际的电源一般不具有理想电源的特性。当外接负载电阻 R 变化时，电源提供的电压和电流都会发生变化：有的是输出电压波动很小，接近电压源的特性；有的是输出电流波动较小，接近电流源特性。

实际电源的特性可以用理想电源元件和电阻元件的组合来表征。

根据串联电路的分压特性、并联电路的分流特性，可以建立实际电源的两种电路模型。



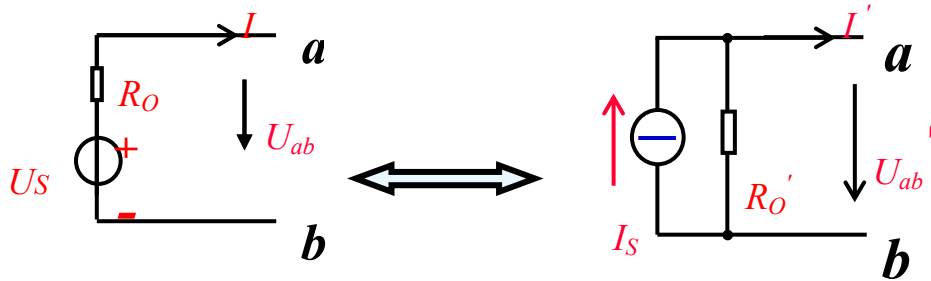
实际电压源模型



实际电流源模型

实际电源模型的等效互换

一个实际电源既可用电压源与电阻串联的电路模型来表示,也可用电流源与电阻并联的电路模型来表示。即



等效互换的条件：对外的电压电流相等。

等效互换公式

$$\begin{aligned} I_s &= \frac{U_s}{R_o} \\ R_o' &= R_o \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_s &= I_s \cdot R_o' \\ R_o &= R_o' \end{aligned}$$

等效变换的注意事项

- (1) “等效”是指“对外”等效（等效互换前后对外伏--安特性一致），对内不等效
- (2) 转换前后电压源电动势的参考方向与电流源电流的参考方向应一致。即电流源电流的参考方向对应于电压源电动势的负极指向正极。
- (3) 恒压源和恒流源不能等效互换

第 2 章 电路分析基础

2.1 基尔霍夫定律

几个电路名词

1. **支路：**一个或几个二端元件首尾相接中间没有分岔，使各元件上通过的电流相等，这种连接方式称为支路。
2. **结点：**三条或三条以上支路的联接点称之为结点。
3. **回路：**电路中的任意闭合路径称为回路。
4. **网孔：**单一闭合路径，其中不包含其它支路的回路称为网孔。

1. 基尔霍夫电流定律(KCL 定律)

在任一瞬间，流向任一结点的电流等于流出该结点的电流。

$$\sum I_{\lambda} = \sum I_{\text{出}} \text{ 或 } \sum I = 0$$

基尔霍夫电流定律 (KCL) 反映了电路中任一结点处各支路电流间相互制约的关系。

推广

电流定律可以推广应用于包围部分电路的任一假设的闭合面。

2. 基尔霍夫电压定律 (KVL 定律)

在任一瞬间, 从回路中任一点出发, 沿回路循行一周, 则在这个方向上电位升之和等于电位降之和。

在任一瞬间, 沿任一回路循行方向, 回路中各段电压的代数和恒等于零。

即: $\sum U = 0$

基尔霍夫电压定律 (KVL) 反映了电路中任一回路中各段电压间相互制约的关系。

注意:

1. 列方程前标注回路循行方向;
2. 应用 $\sum U = 0$ 列方程时, 项前符号的确定: 如果规定电位降取正号, 则电位升就取负号。
3. 开口电压可按回路处理

例题 2.1.1

第三讲：电路定理

支路电流法，叠加定理、等效电源定理及应用

2.1.2 支路电流法

以各支路电流为未知量列写电路方程。

对以支路电流为待求量的任何线性电路，运用 KCL 和 KVL 总能列写出足够的独立方程，从而可求出各支路电流。

支路电流法的一般步骤：

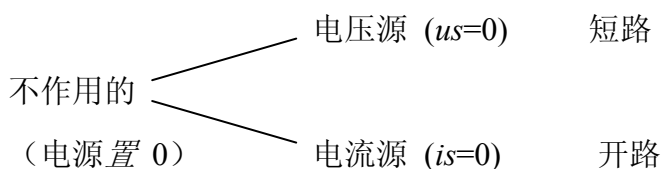
- (1) 在给定电路图中设定各支路电流的参考方向。
- (2) 选择 $(n-1)$ 个独立结点写出 $(n-1)$ 个 KCL 方程。
- (3) 据 KVL 列电压方程。如选网孔为独立回路,并设定其绕行方向，列写出各网孔的 KVL 方程,恰好 $b-(n-1)$ 个独立方程。
- (4) 联立求解上述独立方程，得出各支路电流。

2.2 叠加定理与等效电源定理

2.2.1 叠加定理

含义：

在多个独立电源同时作用的线性电路中，任何支路的电流或任意两点间的电压，都是各个电源单独作用时在该支路所得结果的代数和。



注意事项：

- ① 叠加定理只适用于线性电路（电路参数不随电压、电流的变化而改变）。
- ② 线性电路的电流或电压均可用叠加定理计算，

但功率 P 不能用叠加定理计算。例： $P_1 = I_1^2 R_1 = (I_1' + I_1'')^2 R_1 \neq I_1'^2 R_1 + I_1''^2 R_1$

- ③ 不作用电源的处理：

$US=0$ ，即将 US 短路； $Is=0$ ，即将 Is 开路。

- ④ 解题时要标明各支路电流、电压的参考方向。

若分电流、分电压与原电路中电流、电压的参考方

向相反时，叠加时相应项前要带负号。

⑤ 应用叠加定理时可把电源分组求解，即每个分电路中的电源个数可以多于一个。

⑥ 在含有受控源的电路中，因受控源不是独立电源，不能单独作用。在某个独立电源单独作用而除去其余独立电源时，受控源不能除去，仍要保留在电路中。

例题 2.2.1

2.2.2 等效电源定理

等效电源定理包括戴维宁定理与诺顿定理，是计算复杂线性电路的有力工具。

二端网络的概念：

二端网络：若一个部分电路只通过两个接线端与外电路相联，则该部分电路称为“二端网络”。

无源二端网络(NP)：二端网络中没有电源。

有源二端网络(NA)：二端网络中含有电源。

等效电源定理的概念：

有源二端网络用电源模型替代，称为等效电源定理。

有源二端网络用电压源模型替代 ----- 戴维宁定理

有源二端网络用电流源模型替代 ----- 诺顿定理

戴维宁定理：

任何一个线性有源二端网络，对外电路来说，可以用一个理想电压源 U_S 和电阻 R_0 的串联组合来等效替代

戴维宁定理指出：有源二端网络可以用电压源模型等效，该等效电压源的电压等于有源二端网络的接线端开路电压，即将负载断开后 a、b 两端之间的电压；等效电压源的内阻等于有源二端网络除去所有电源得到的相应无源二端网络的等效电阻。

诺顿定理：

任何一个有源二端线性网络都可以用一个电流为 I_S 的理想电流源和内阻

R_0 并联的电源来等效代替。

等效电源的电流 I_S 就是有源二端网络的短路电流，即将 a 、 b 两端短接后其中的电流。

等效电源的内阻 R_0 等于有源二端网络中所有电源均除去（理想电压源短路，理想电流源开路）后所得到的无源二端网络 a 、 b 两端之间的等效电阻。

例题 2.2.2 ， 2.2.3

第四讲： 正弦交流电路基础

正弦量的三要素、相量表示法、电阻、电容、电感上电压电流的关系

2.3 正弦交流电路

2.3.1 正弦量的三要素

2.3.2 正弦量的相量表示法

2.3.3 R、L、C 元件上的电压与电流的相量形式

2.3.4 简单正弦交流电路的计算

2.3.5 交流电路的功率

2.3.6 RLC 电路中的谐振

本节要求

1. 理解正弦量的特征及其各种表示方法;
2. 理解电路基本定律的相量形式及阻抗;
熟练掌握计算正弦交流电路的相量分析法,
会画相量图;
3. 掌握有功功率和功率因数的计算,了解瞬时
功率、无功功率和视在功率的概念;
4. 了解提高功率因数的意义和方法;
5. 了解正弦交流电路串、并联谐振的条件及特征。

发电厂提供的和工业上广泛采用的电压和电流就属于正弦交流电。

2.3.1 正弦量的三要素

几个基本概念

交流电：大小和方向随时间作周期性交替变化且在一个周期内的平均值为零的电流 i 、电压 u 、电动势 e 总称为交流电。

正弦交流电：随时间按正弦规律变化的交流电称正弦交流电。

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$$

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi_e)$$

瞬时值： i 、 u 、 e 表示正弦交流电在某一瞬间时的量值，称瞬时值。

最大值：又称为幅值，上面式中 I_m 、 U_m 、 E_m 表示正弦交流电在变化过程中出现的最大瞬时值，称为最大值。

角频率： ω 是正弦交流电的角频率。

初相位： φ_i 、 φ_u 、 φ_e 为正弦交流电的初相位。

正弦交流电的三要素：最大值、角频率和初相位

1. 周期、频率和角频率

周期 T : 正弦量完整变化一周所需要的时间。(s)

频率 f : 正弦量在单位时间内变化的周数。(Hz)

$$f = \frac{1}{T}$$

角频率与周期及频率的关系:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

我国规定工业用交流电的频率(称工频)为 $f=50\text{Hz}$, $\omega=314\text{ rad/s}$, $T=20\text{ms}=0.02\text{s}$

2. 相位、初相位和相位差

相位: 正弦量表达式中的角度。反映正弦量变化的进程。

初相位: 表示正弦量在 $t=0$ 时的相角。

相位差: 指两个同频率正弦量之间的相位差, 数值上等于它们的初相位之差。

3. 瞬时值、最大值和有效值

$$\begin{aligned}i &= I_m \sin(\omega t + \varphi_i) \\u &= U_m \sin(\omega t + \varphi_u) \\e &= E_m \sin(\omega t + \varphi_e)\end{aligned}$$

瞬时值是以上面解析式表示正弦量在某一瞬间的量值。

最大值(幅值)就是上式中的 I_m 、 U_m 、 E_m , 最大值反

映了正弦量振荡的幅度。

有效值: 与交流电热效应相等的直流电数值定义为交流电的有效值。

$$\begin{aligned}U &= \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707U_m \\I_m &= \sqrt{2}I = 1.414I\end{aligned}$$

交流电压表、电流表测量数据为有效值

交流设备铭牌标注的电压、电流均为有效值

2.3.2 正弦量的相量表示法

实质: 用复数表示正弦量

(1) 代数式: $A=a+jb$

$$a=r\cos\psi \quad r=\sqrt{a^2+b^2} \quad \text{复数的模}$$

$$b=r\sin\psi \quad \psi=\arctan\frac{b}{a} \quad \text{复数的辐角}$$

(2) 三角式

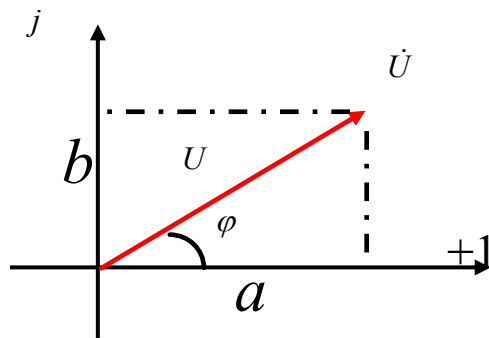
$$A=r\cos\psi+jr\sin\psi=r(\cos\psi+j\sin\psi)$$

(3) 指数式: $A=re^{j\psi}$

(4) 极坐标式: $A=r\angle\psi$

$$\text{即: } A=a+jb=r\cos\psi+jr\sin\psi=re^{j\psi}=r\angle\psi$$

复平面上画出的相量的图形称为相量图, 复数式称为相量式。



$$\dot{U}=a+jb=U\cos\varphi+jU\sin\varphi$$

注意:

①相量只是表示正弦量, 而不等于正弦量。

②只有正弦量才能用相量表示,

非正弦量不能用相量表示。

③ 相量的两种表示形式

$$\text{相量式: } \dot{U}=Ue^{j\psi}=U\angle\psi=U(\cos\psi+j\sin\psi)$$

相量图: 把相量表示在复平面的图形

④只有同频率的正弦量才能画在同一相量图上。

⑤相量的书写方式

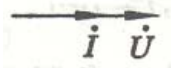
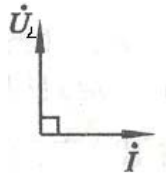
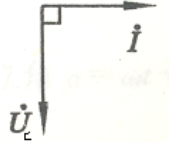
⑥旋转 90°。因子： $e^{\pm j90^\circ}$

$$e^{\pm j90^\circ} = \cos 90^\circ \pm j \sin 90^\circ = \pm j$$

乘以 j ，在相量图上就等于该相量朝逆时针方向旋转 90°，乘以 j^2 就等于该相量朝逆时针方向旋转 180°，除以 j ，相当于乘以 $-j$ ，意味着该相量朝顺时针方向旋转 90°。

例题 2.3.1

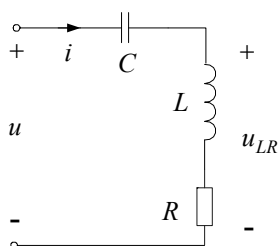
2.3.3 R、L、C 元件上的电压与电流的相量形式

电路参数		R	L	C
电压 电流 关系	瞬时值	$u_R = Ri = R I_m \sin \omega t$	$u_L = L \frac{di}{dt}$ $= X_L I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$	$u_C = \frac{1}{C} \int i dt$ $= X_C I_m \sin(\omega t - 90^\circ)$
	有效值	$U_R = IR$	$U_L = I\omega L = IX_L$	$U_C = I \frac{1}{\omega C} = IX_C$
	相量式	$\dot{U}_R = \dot{I}R$	$\dot{U}_L = j\dot{I}X_L$	$\dot{U}_C = -j\dot{I}X_C$
	相量图			
	相位差	u_R 和 i 同相	u_L 超前 i 90° 角	u_C 滞后 i 90° 角
有功功率		$P_R = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$	0	0
无功功率		0	$Q_L = U_L I$ $= I^2 X_L = \frac{U_L^2}{X_L}$	$Q_C = -U_C I$ $= -I^2 X_C = -\frac{U_C^2}{X_C}$

【例4.1】RLC 串联电路如下图所示，已知： $u = 220\sqrt{2} \sin 314t \text{ V}$ ， $R = 30\Omega$ ，

$L = 127\text{mH}$ ， $C = 40 \mu\text{F}$ 。试求：(1) 电流 i 的瞬时值表达式；(2) 电压 u_{LR} 的有

效值 U_{LR} .



【解】 (1) $X_L = \omega L = 314 \times 127 \text{ m} = 40 \Omega$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \times 40 \mu} = 80 \Omega$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{30^2 + (40 - 80)^2} = 50 \Omega$$

$$I = \frac{U}{|Z|} = \frac{220}{50} = 4.4 \text{ A}$$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = \arctan \frac{40 - 80}{30} = -53.1^\circ$$

$$\psi_i = \psi_u - \varphi = 0 - (-53.1^\circ) = 53.1^\circ$$

$$i = \sqrt{2} I \sin(314t + \psi_i) = 4.4\sqrt{2} \sin(314t + 53.1^\circ) \text{ A}$$

$$(2) |Z_{LR}| = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50 \Omega$$

$$U_{LR} = |Z_{LR}| I = 50 \times 4.4 = 220 \text{ V}$$

例题 2.3.2 , 2.3.3

第五讲： 正弦交流电路分析

简单正弦交流电路的计算、交流电路的计算、RLC电路中的谐振

2.3.4 简单正弦交流电路的计算

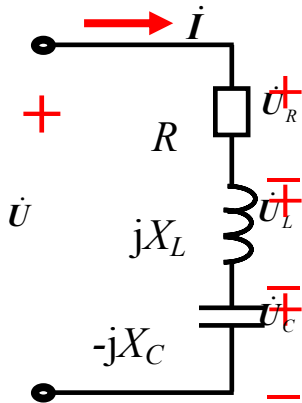
一、相量形式的 KCL、KVL

分析交流电路时，仍然是根据基尔霍夫定律来列写有关的方程式。即对于任一结点， $\sum i = 0$ ；对于任一回路， $\sum u = 0$ ；故在电路任一结点上的电流相量代数和为零；沿电路任一回路，各支路电压相量的代数和为零

二、RLC 串联的交流电路

1. 电流、电压的关系

$$Z = R + j(X_L - X_C)$$



2. 功率关系

(1) 瞬时功率

(2) 平均功率 P (有功功率) $P = UI \cos \varphi$

(3) 无功功率 Q

(4) 视在功率 S $S = UI = |Z|I^2$

例题 2.3.4

三、阻抗的串联与并联

1. 阻抗的串联 $Z = Z_1 + Z_2$ 分压公式: $\dot{U}_1 = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \dot{U}$

2. 阻抗并联 $\frac{1}{Z} = \sum \frac{1}{Z_k}$ 分流公式: $\dot{I}_1 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \dot{I}$

一般正弦交流电路的解题步骤:

1、据原电路图画出相量模型图

$$R \rightarrow R, L \rightarrow jX_L, C \rightarrow -jX_C$$

$$u \rightarrow \dot{U}, i \rightarrow \dot{I}, e \rightarrow \dot{E}$$

2、根据相量模型列出相量方程式或画相量图

3、用复数符号法或相量图求解

4、将结果变换成要求的形式

例题 2.3.5

2.3.5 功率因数的提高

1.功率因数：对电源利用程度的衡量。

(1) 电源设备的容量不能充分利用

(2) 增加线路和发电机绕组的功率损耗

2. 功率因数 $\cos \varphi$ 低的原因

日常生活中多为感性负载---如电动机、日光灯

3.功率因数的提高

在感性负载两端并电容

4. 并联电容值的计算
$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi)$$

例题 2.3.7

2.3.6 RLC 电路中的谐振

谐振的概念：在同时含有 L 和 C 的交流电路中，如果总电压和总电流同相，称电路处于谐振状态。此时电路与电源之间不再有能量的交换，电路呈电阻性。

(1) 串联谐振： L 与 C 串联时 u 、 i 同相

(2) 谐振条件： $X_L = X_C$ $\omega_o L = \frac{1}{\omega_o C}$ $f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

阻抗最小 $Z=R$ 电流最大 $I=U/R$

(3) 并联谐振： L 与 C 并联时 u 、 i 同相，

(4) 阻抗最大，总电流最小

第六讲：三相交流电路

简单三相交流电路的

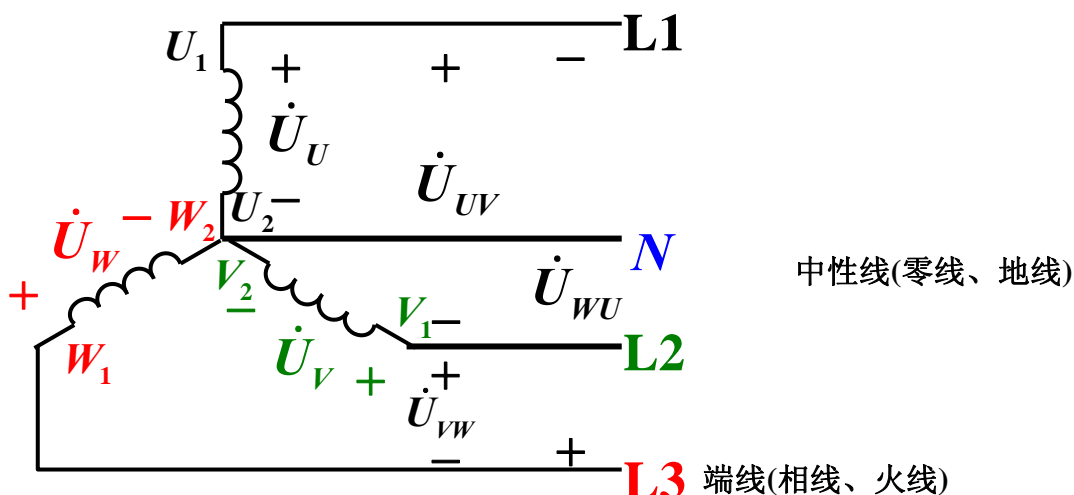
本节要求：

1. 掌握三相四线制供电系统中单相及三相负载的正确联接方法，理解中线的作用。
2. 搞清对称三相负载 Y 和 Δ 联结时相线电压、相线电流关系。
3. 掌握对称三相电路电压、电流及功率的计算。
 - 由三个最大值相等、频率相同、相位互差 120° 。（称为对称）的正弦电动势组成的电源，称为三相交流电源，由三相交流电源构成的电路，称为三相交流电路。
 - 工农业生产和日常生活中的供用电电路属于三相交流电路

2.4.1 三相交流电源

实际中，三相交流电源一般来自三相交流发电机或变压器副边的三个绕组，可用如图所示形式表示。

(1) 三相电源的星形联接



相电压：端线与中性线间（每相绕组两端间）的电压

线电压：端线与端线间的电压

三相电源相电压的瞬时值表达式：

$$u_U = \sqrt{2}U_p \sin \omega t$$

$$u_V = \sqrt{2}U_p \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$u_W = \sqrt{2}U_p \sin(\omega t - 240^\circ)$$

相应的相量表示:

$$\dot{U}_U = U_p \angle 0^\circ$$

$$\dot{U}_V = U_p \angle -120^\circ$$

$$\dot{U}_W = U_p \angle -240^\circ$$

三个正弦交流电源满足以下特征:

$$U_W = U_p \angle -240^\circ$$

最大值相等

频率相同

相位互差 120

称为对称三相电源

对称三相电源的瞬时值之和为 0

$$\text{即: } u_U + u_V + u_W = 0$$

$$\text{或 } \dot{U}_U + \dot{U}_V + \dot{U}_W = 0$$

三相交流电到达正最大值的顺序称为相序。

(2) 线电压与相电压的关系

由相量图可得:

$$\dot{U}_{UV} = \sqrt{3}\dot{U}_U \angle 30^\circ = \sqrt{3}U_p \angle 30^\circ = U_L \angle 30^\circ$$

$$\dot{U}_{VW} = \sqrt{3}\dot{U}_V \angle 30^\circ = \sqrt{3}U_p \angle -90^\circ = U_L \angle -90^\circ$$

$$\dot{U}_{WU} = \sqrt{3}\dot{U}_W \angle 30^\circ = \sqrt{3}U_p \angle -210^\circ = U_L \angle -210^\circ$$

结论: 电源 Y 形联结时, 线电压 $U_l = \sqrt{3}U_p$, 且超前相应的相电压 30° , 三相线电压也是对称的。

2.4.2 三相电路的计算

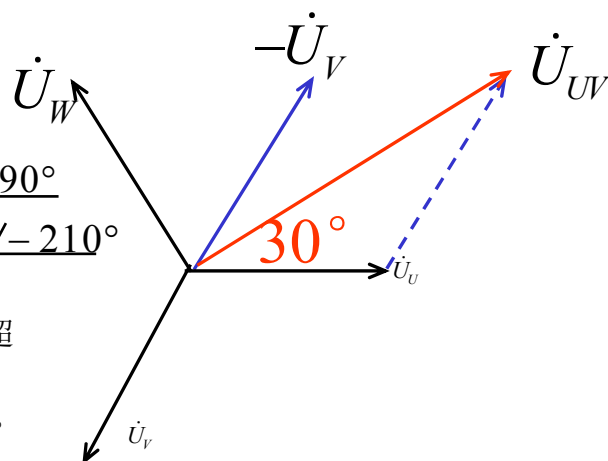
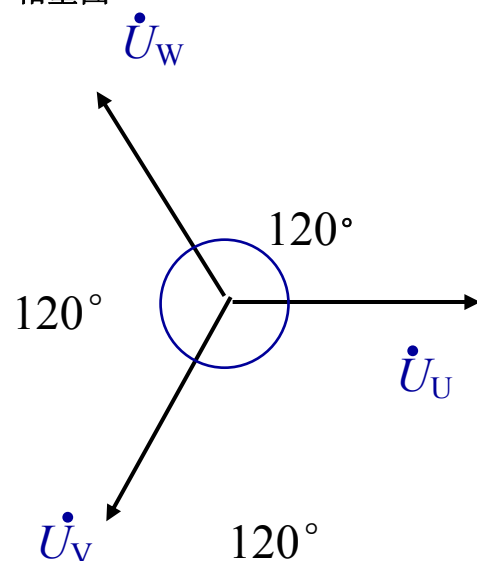
三相负载的概念

对称三相负载: $Z_U = Z_V = Z_W$
如三相电动机

三相负载

不对称三相负载: 不满足 $Z_U = Z_V = Z_W$

相量图



如由单相负载组成的三相负载

1. 负载星形联结的三相电路

(1) 联结形式无中线：三相三线制 有中线：三相四线制

(2) 负载 Y 联结三相电路的计算

Y 联结时：1) 负载端的线电压 = 电源线电压

2) 负载的相电压 = 电源相电压

3) 线电流 = 相电流

4) 中线电流 $\dot{I}_N = \dot{I}_U + \dot{I}_V + \dot{I}_W$

即： $U_L = \sqrt{3}U_P$ $I_L = I_P$

$$\dot{I}_U = \frac{\dot{U}_U}{Z_u}$$

$$\dot{I}_V = \frac{\dot{U}_V}{Z_v}$$

$$\dot{I}_W = \frac{\dot{U}_W}{Z_w}$$

(3) 对称负载 Y 联结三相电路的计算

因为三相电压对称，且 $Z_u = Z_v = Z_w$

所以负载对称时，三相电流也对称。

中线电流 $\dot{I}_N = \dot{I}_U + \dot{I}_V + \dot{I}_W = 0$

负载对称时，中性线无电流，

可省掉中性线。

(4) 不对称负载 Y 联结无中线三相电路的计算（略）

结论：

(1) 不对称负载 Y 联结又未接中性线时，负载相电压不再对称，且负载电阻越大，负载承受的电压越高。

(2) 中线的作用：保证星形联结三相不对称负载的相电压对称。

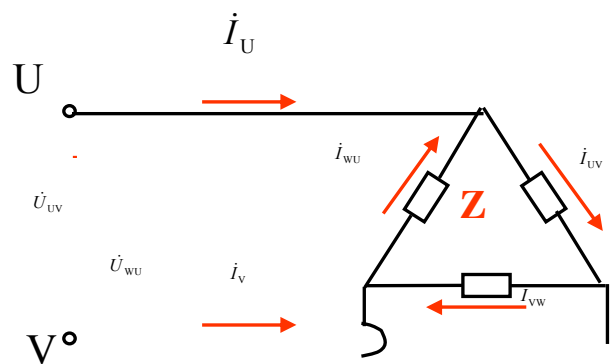
(3) 照明负载三相不对称，必须采用三相四线制供电方式，且中性线（指干线）内不允许接熔断器或刀闸开关。

2. 负载三角形联结的三相电路

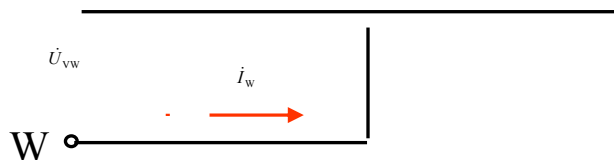
➤ 相电流

$$\dot{I}_{UV} = \frac{\dot{U}_{UV}}{Z_{UV}}$$

$$\dot{I}_{VW} = \frac{\dot{U}_{VW}}{Z_{VW}}$$



$$\dot{I}_{WU} = \frac{\dot{U}_{WU}}{Z_{WU}}$$



线电流: $\dot{I}_U = \dot{I}_{UV} - \dot{I}_{WU}$

结论: 对称负载 Δ 联接时 线电流 $I_l = \sqrt{3}I_p$ (相电流), 且落后相应的相电流 30° 。

3. 三相功率

无论负载为 Y 或 Δ 联结, 每相有功功率都应

$$P_p = U_p I_p \cos \phi_p \quad P = 3U_p I_p \cos \phi_p = \sqrt{3}U_l I_l \cos \phi_p$$

第二章 半导体二极管及其基本电路

本章内容简介

半导体二极管是由一个 PN 结构成的半导体器件,在电子电路有广泛的应用。本章在简要地介绍半导体的基本知识后, 主要讨论了半导体器件的核心环节——PN 结。在此基础上, 还将介绍半导体二极管的结构、工作原理、特性曲线、主要参数以及二极管基本电路及其分析方法与应用。最后对齐纳二极管、变容二极管和光电子器件的特性与应用也给予简要的介绍。

(一) 主要内容:

- ✧ 半导体的基本知识
- ✧ PN 结的形成及特点, 半导体二极管的结构、特性、参数、模型及应用电路

(二) 基本要求:

- ✧ 了解半导体材料的基本结构及 PN 结的形成
- ✧ 掌握 PN 结的单向导电工作原理
- ✧ 了解二极管 (包括稳压管) 的 V-I 特性及主要性能指标

(三) 教学要点:

- ✧ 从半导体材料的基本结构及 PN 结的形成入手, 重点介绍 PN 结的单向导电工作原理、
- ✧ 二极管的 V-I 特性及主要性能指标

2.1 半导体的基本知识

2.1.1 半导体材料

根据物体导电能力(电阻率)的不同,来划分导体、绝缘体和半导体。导电性能介于导体与绝缘体之间材料,我们称之为半导体。在电子器件中,常用的半导体材料有:元素半导体,如硅(Si)、锗(Ge)等;化合物半导体,如砷化镓(GaAs)等;以及掺杂或制成其它化合物半导体材料,如硼(B)、磷(P)、铟(In)和锑(Sb)等。其中硅是最常用的一种半导体材料。

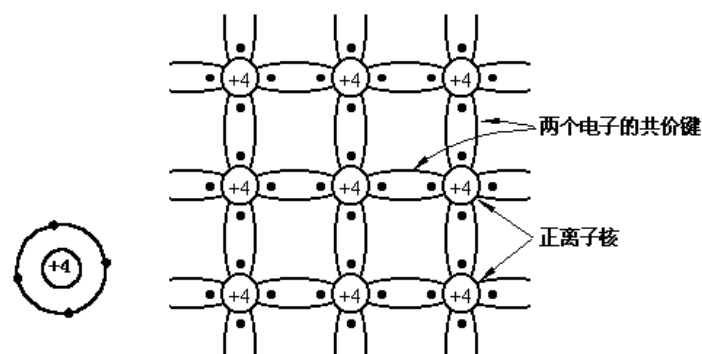
半导体有以下特点:

1. 半导体的导电能力介于导体与绝缘体之间
2. 半导体受外界光和热的刺激时,其导电能力将会有显著变化。
3. 在纯净半导体中,加入微量的杂质,其导电能力会急剧增强。

2.1.2 半导体的共价键结构

在电子器件中,用得最多的半导体材料是硅和锗,它们的简化原子模型如下所示。硅和锗都是四价元素,在其最外层原子轨道上具有四个电子,称为价电子。由于原子呈中性,故在图中原子核用带圆圈的+4符号表示。半导体与金属和许多绝缘体一样,均具有晶体结构,它们的原子形成有排列,邻近原子之间由共价键联结,其晶体结构示意图如下所示。图中表示的是晶体的二维结构,实际上半导体晶体结构是三维的。

硅和锗的原子结构简化模型及晶体结构



2.1.3 本征半导体

本征半导体——化学成分纯净的半导体。它在物理结构上呈单晶体形态。

空穴——共价键中的空位。

电子空穴对——由热激发而产生的自由电子和空穴对。

空穴的移动——空穴的运动是靠相邻共价键中的价电子依次充填空穴来实现的。

本征激发

在室温下,本征半导体共价键中的价电子获得足够的能量,挣脱共价键的束



缚进入导带，成为自由电子，在晶体中产生电子-空穴对的现象称为本征激发。

由于共价键出现了空穴，在外加电场或其他的作用下，邻近价电子就可填补到这个空位上，而在这个电子原来的位置上又留下新的空位，以后其他电子又可转移到这个新的空位。这样就使共价键中出现一定的电荷迁移。空穴的移动方向和电子移动的方向是相反的。

本征半导体中的自由电子和空穴数总是相等的。

2.1.4 杂质半导体

在本征半导体中掺入某些微量元素作为杂质，可使半导体的导电性发生显著变化。掺入的杂质主要是三价或五价元素。掺入杂质的本征半导体称为杂质半导体。

N 型半导体——掺入五价杂质元素（如磷）的半导体。

P 型半导体——掺入三价杂质元素（如硼）的半导体。

1. N 型半导体

因五价杂质原子中只有四个价电子能与周围四个半导体原子中的价电子形成共价键，而多余的一个价电子因无共价键束缚而很容易形成自由电子。

在 N 型半导体中自由电子是多数载流子，它主要由杂质原子提供；空穴是少数载流子，由热激发形成。提供自由电子的五价杂质原子因带正电荷而成为正离子，因此五价杂质原子也称为施主杂质。

2. P 型半导体

因三价杂质原子在与硅原子形成共价键时，缺少一个价电子而在共价键中留下一个空穴。

在 P 型半导体中空穴是多数载流子，它主要由掺杂形成；自由电子是少数载流子，由热激发形成。空穴很容易俘获电子，使杂质原子成为负离子。三价杂质因而也称为受主杂质。

3. 杂质对半导体导电性的影响

掺入杂质对本征半导体的导电性有很大的影响，一些典型的数据如下：

T=300 K 室温下，

本征硅的电子和空穴浓度： $n = p = 1.4 \times 10^{10} / \text{cm}^3$

掺杂后 N 型半导体中的自由电子浓度： $n = 5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$

本征硅的原子浓度： $4.96 \times 10^{22} / \text{cm}^3$

以上三个浓度基本上依次相差 $10^6 / \text{cm}^3$ 。

小结：本节主要介绍了半导体、本征半导体和杂质半导体的基本知识。

2.2 PN 结的形成及特性

2.2.1 PN 结的形成：

在 P 型半导体和 N 型半导体结合后，由于 N 型区内电子很多而空穴很少，而 P 型区内空穴很多电子很少，在它们的交界处就出现了电子和空穴的浓度差别。这样，电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。于是，有一些电子要从 N 型区向 P 型区扩散，也有一些空穴要从 P 型区向 N 型区扩散。它们扩散的结果就使 P 区一边失去空穴，留下了带负电的杂质离子，N 区一边失去电子，留下了带正电的杂质离子。半导体中的离子不能任意移动，因此不参与导电。这些不能移动的带电粒子在 P 和 N 区交界面附近，形成了一个很薄的空间电荷区，就是所谓的 PN 结。扩散越强，空间电荷区越宽。在空间电荷区，由于缺少多子，所以也称耗尽层。在出现了空间电荷区以后，由于正负电荷之间的相互作用，在空间电荷区就形成了一个内电场，其方向是从带正电的 N 区指向带负电的 P 区。显然，这个电场的方向与载流子扩散运动的方向相反它是阻止扩散的。另一方面，这个电场将使 N 区的少数载流子空穴向 P 区漂移，使 P 区的少数载流子电子向 N 区漂移，漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反。从 N 区漂移到 P 区的空穴补充了原来交界面上 P 区所失去的空穴，从 P 区漂移到 N 区的电子补充了原来交界面上 N 区所失去的电子，这就使空间电荷减少，因此，漂移运动的结果是使空间电荷区变窄。当漂移运动达到和扩散运动相等时，PN 结便处于动态平衡状态。内电场促使少子漂移，阻止多子扩散。最后，多子的扩散和少子的漂移达到动态平衡。

2.2.2 PN 结的单向导电性

当外加电压使 PN 结中 P 区的电位高于 N 区的电位，称为加正向电压，简称正偏；反之称为加反向电压，简称反偏。

(1) PN 结加正向电压时：

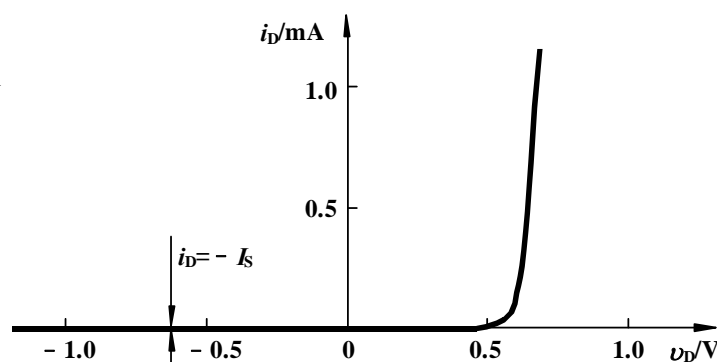
在正向电压的作用下，PN 结的平衡状态被打破，P 区中的多数载流子空穴和 N 区中的多数载流子电子都要向 PN 结移动，当 P 区空穴进入 PN 结后，就要和原来的一部分负离子中和，使 P 区的空间电荷量减少。同样，当 N 区电子进入 PN

结时，中和了部分正离子，使 N 区的空间电荷量减少，结果使 PN 结变窄，即耗尽区厚变薄，由于这时耗尽区中载流子增加，因而电阻减小。势垒降低使 P 区和 N 区中能越过这个势垒的多数载流子大大增加，形成扩散电流。在这种情况下，由少数载流子形成的漂移电流，其方向与扩散电流相反，和正向电流比较，其数值很小，可忽略不计。这时 PN 结内的电流由起支配地位的扩散电流所决定。在外电路上形成一个流入 P 区的电流，称为正向电流 I_F 。当外加电压 V_F 稍有变化（如 0.1V），便能引起电流的显著变化，因此电流 I_F 是随外加电压急速上升的。这时，正向的 PN 结表现为一个很小的电阻。在一定的温度条件下，由本征激发决定的少数浓度是一定的，故少数形成的漂移电流是恒定的，基本上与所加反向电压的大小无关，这个电流也称为反向饱和电流。

(2) PN 结加反向电压时：

在反向电压的作用下，P 区中的空穴和 N 区中的电子都将进一步离开 PN 结，使耗尽区厚度加宽，PN 结的内电场加强。这一结果，一方面使 P 区和 N 区中的多数载流子就很难越过势垒，扩散电流趋近于零。另一方面，由于内电场的加强，使得 N 区和 P 区中的少数载流子更容易产生漂移运动。这样，

此时流过 PN 结的电流由起支配地位的漂移电流所决定。漂移电流表现在外电路上有一个流入 N 区的反向电流 I_R 。由于少数载流子是由本征激发产生的其浓度很小，所以 I_R 是很微弱的，一般为微安数量级。当管子制成后， I_R 数值决定于温度，而几乎与外加电压 V_R 无关。 I_R 受温度的影响较大，在某些实际应用中，还必须予以考虑。PN 结在反向偏置时， I_R 很小，PN 结呈现一个很大的电阻，可认为它基本是不导电的。这时，反向的 PN 结表现为一个很大的电阻。PN 结加正向电压时，呈现低电阻，具有较大的正向扩散电流；PN 结加反向电压时，呈现高电阻，具有很小的反向漂移电流。



PN 结的伏安特性

由此可以得出结论：PN 结具有单向导电性。

(3) PN 结 $V-I$ 特性表达式：

在常温下 ($T=300K$):

$$i_D = I_S (e^{v_D/V_T} - 1)$$

$$V_T = \frac{kT}{q} = 26mV$$

2.2.3 PN 结的反向击穿

当 PN 结的反向电压增加到一定数值时，反向电流突然快速增加，此现象称为 PN 结的反向击穿。反向击穿分为电击穿和热击穿，电击穿包括雪崩击穿和齐纳击。PN 结热击穿后电流很大，电压又很高，消耗在结上的功率很大，容易使 PN 结发热,把 PN 结烧毁。

热击穿——不可逆；电击穿——可逆

当 PN 结反向电压增加时，空间电荷区中的电场随着增强。这样，通过空间电荷区的电子和空穴，就会在电场作用下获得的能量增大，在晶体中运动的电子和空穴将不断地与晶体原子又发生碰撞，当电子和空穴的能量足够大时，通过这

样的碰撞的可使共价键中的电子激发形成自由电子-空穴对。新产生的电子和空穴也向相反的方向运动，重新获得能量，又可通过碰撞，再产生电子-空穴对，这就是载流子的倍增效应。当反向电压增大到某一数值后，载流子的倍增情况就像在陡峻的积雪山坡上发生雪崩一样，载流子增加得多而快，这样，反向电流剧增，PN 结就发生雪崩击穿。

在加有较高的反向电压下，PN 结空间电荷区中存一个强电场，它能够破坏共价键，将束缚电子分离出来造成电子-空穴对，形成较大的反向电流。发生齐纳击穿需要的电场强度约为 $2 \times 10^5 \text{V/cm}$ ，这只有在杂质浓度特别大的 PN 结中才能达到，因为杂质浓度大，空间电荷区内电荷密度（即杂质离子）也大，因而空间电荷区很窄，电场强度可能很高。

电击穿可被利用（如稳压管），而热击穿须尽量避免。

2.2.4 PN 结的电容效应

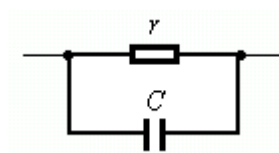
(1) 势垒电容 C_B : 用来描述二极管势垒区的空间电荷随电压变化而产生的电容效应的。PN 结的空间电荷随外加电压的变化而变化，当外加正向电压升高时，N 区的电子和 P 区空穴进入耗尽区，相当于电子和空穴分别向 CB“充电”，如图 (a) 所示。当外加电压降低时，又有电子和空穴离开耗尽区，好像电子和空穴从 CB 放电，如图 (b) 所示。CB 是非线性电容，电路上 CB 与结电阻并联，在 PN 结反偏时其作用不能忽视，特别是在高频时，对电路的影响更大。

(2) 扩散电容 C_D : 二极管正向导电时，多子扩散到对方区域后，在 PN 结边界上积累，并有一定的浓度分布。积累的电荷量随外加电压的变化而变化，当 PN 结正向电压加大时，正向电流随着加大，这就要有更多的载流子积累起来以满足电流加大的要求；而当正向电压减小时，正向电流减小，积累在 P 区的电子或 N 区的空穴就要相对减小，这样，就相应地要有载流子的“充入”和“放出”。因此，积累在 P 区的电子或 N 区的空穴随外加电压的变化就可 PN 结的扩散电容 CD 描述。扩散电容反映了在外加电压作用下载流子在扩散过程中积累的情况。

(3) PN 结的高频等效电路：由于 PN 结结电容（CB 和 CD）的存在，使其在高频运用时，必须考虑结电容的影响。PN 结高频等效电路如下图所示，图中 r 表示电阻， C 表示结电容，它包括势垒电容和扩散电容，其大小除了与本身结构和工艺有关外，还与外加电压有关。当 PN 结处于正向偏置时， r 为正向电阻，数值很小，而结电容较大（主要决定于扩散电容 CD）。当 PN 结处于反向偏置时， r 为反向电阻，其数值较大。

结电容较小（主要决定于势垒电容 CB）。

小结：本节主要介绍了 PN 结的形成及基本特性。



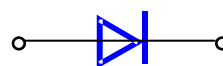
2.3 半导体二极管

2.3.1 半导体二极管的结构

在 PN 结上加上引线 and 封装，就成为一个二极管。二极管按结构分有点接触型、面接触型和平面型三大类。

(1) 点接触型二极管：**PN** 结面积小，结电容小，用于检波和变频等高频电路。

(2) 面接触型二极管：**PN** 结面积大，用于工频大电流整流电路。

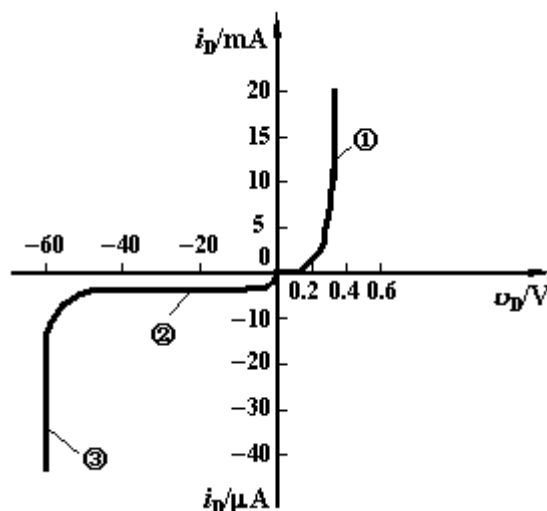


(3) 平面型二极管：往往用于集成电路制造工艺中。**PN** 结面积可大可小，用于高频整流和开关电路中。

(4) 二极管的代表符号

2.3.2 二极管的伏安特性

(1) 正向特性：正向特性表现为图中的①段。当正向电压较小，正向电流几乎为零。此工作区域称为死区。 V_{th} 称为门坎电压或死区电压（该电压硅管约为 0.5V，锗管为 0.2V）。当正向电压大于 V_{th} 时，内电场削弱，电流因而迅速增长，呈现的很小正向电阻。



(2) 反向特性：反向特性表现为如图中的②段。

由于是少数载流形成反向饱和电流，所以其数值很小，当温度升高时，反向电流将随之急剧增加。

(3) 反向击穿特性：反向击穿特性对应于图中

③段，当反向电压增加到一定大小时，反向电流剧增，二极管的反向击穿。其原因和 PN 击穿相同。

2.3.3 二极管的参数

(1) 最大整流电流 I_F ； (2) 反向击穿电压 V_{BR} 和最大反向工作电压 V_{RM}

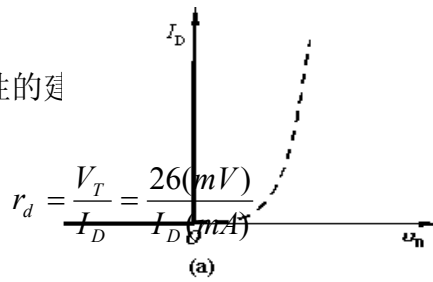
(3) 反向电流 I_R ； (4) 正向压降 V_F ； (5) 极间电容 C_B

小结：本节主要介绍了二极管的结构和伏安特性。

2.4 二极管基本电路及其分析方法

2.4.1 二极管 $V-I$ 特性的模型

在小信号模型中:



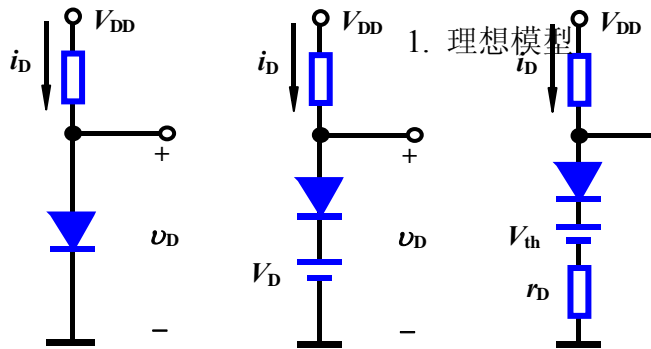
2.4.2 应用举例

1. 二极管的静态工作情况:

(1) $V_{DD}=10V$ 时 ($R=10k\Omega$)

图 2.4.1 理想模型

(a) $V-I$ 特性 (b) 代表符号



1. 理想模型

10K Ω)

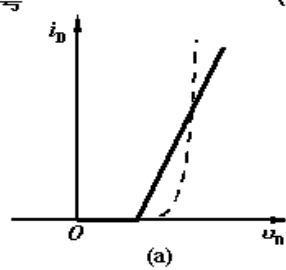


图 2.4.3 折线模型

(a) $V-I$ 特性 (b) 代表符号

图 2.4.2 恒压降模型

(a) $V-I$ 特性 (b) 代表符号

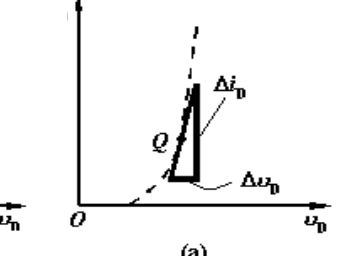


图 2.4.4 小信号模型

(a) $V-I$ 特性 (b) 代表符号

解: (1) $V_{DD}=10V$

① 使用理想模型得

$$v_D = 0V \quad I_D = \frac{V_{DD}}{R} = 1mA$$

② 使用恒压降模型得

$$v_D = 0.7V \quad I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = 0.93mA$$

③ 使用折线模型得

$$r_D = 0.2K\Omega \quad I_D = \frac{V_{DD} - V_{th}}{R + r_D} = 0.931mA \quad v_D = V_{th} + r_D I_D = 0.69V$$

(2) $V_{DD}=1V$

① 使用理想模型得

$$v_D = 0V \quad I_D = \frac{V_{DD}}{R} = 0.1mA$$

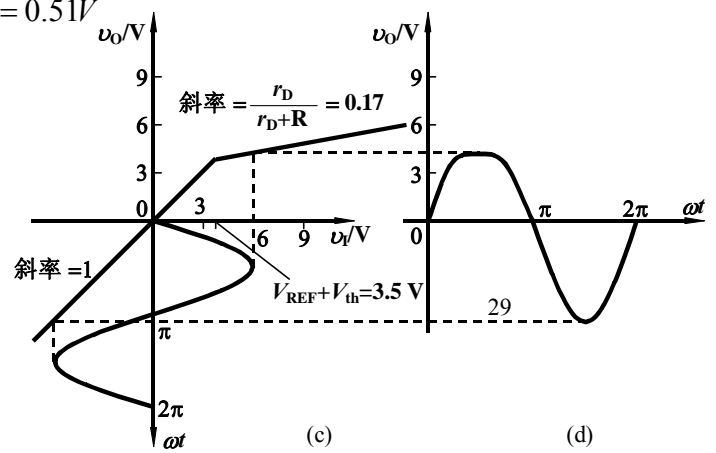
② 使用恒压降模型得

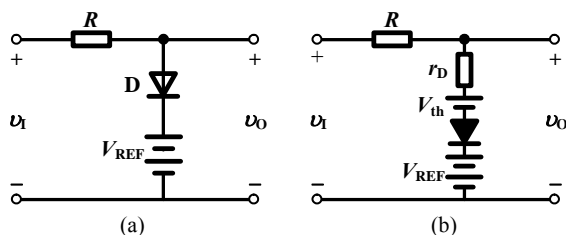
$$v_D = 0.7V \quad I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = 0.03mA$$

③ 使用折线模型得

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{th}}{R + r_D} = 0.049mA \quad v_D = V_{th} + r_D I_D = 0.51V$$

2. 限幅电路: 例 2.4.2 已知: $R=1K\Omega$





当 $v_i \leq 3.5V$ 时, $v_o = v_i$

当 $v_i > 3.5V$ 时, $v_o = 3.5 + \frac{r_D}{R + r_D}(v_i - 3.5)$

$$V_{DD} = 5V \quad R = 5K\Omega$$

3. 开关电路：例 2.4.3 已知：

利用假定状态分析法知：

设 D_1 导通，则： $v_o = 0V$ ， D_2 截止，无矛盾。

设 D_2 导通，则： $v_o = 3V$ ， D_1 亦导通， $v_o = 0V$ ，矛盾。

故 $v_o = 0V$ 。

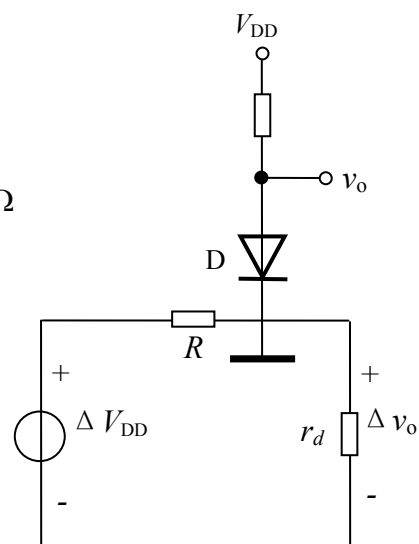
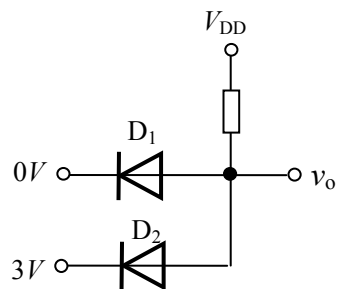
4. 低压稳压电路：例 2.4.4 已知： $V_{DD} = 10V$ $R = 10K\Omega$

若 V_{DD} 变化 $\pm 1V$ ，则硅二极管输出电压变化多少？

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = 0.93mA \quad \text{则 } r_d = \frac{V_T}{I_D} \approx 28\Omega$$

$$\Delta v_o = \Delta V_{DD} \times \frac{r_d}{R + r_d} = \pm 1 \times \frac{28}{10 \times 10^3 + 28} = \pm 2.79mV$$

小结：本节主要介绍了如何用二极管等效模型分析具体电路。



2.5 特殊体二极管

2.5.1 稳压二极管：

齐纳二极管又称稳压管。利用二极管反向击穿特性实现稳压。

稳压二极管稳压时工作在反向电击穿状态。

1. 符号及稳压特性:

2. 稳压二极管主要参数

(1) 稳定电压 V_Z : 在规定的稳压管

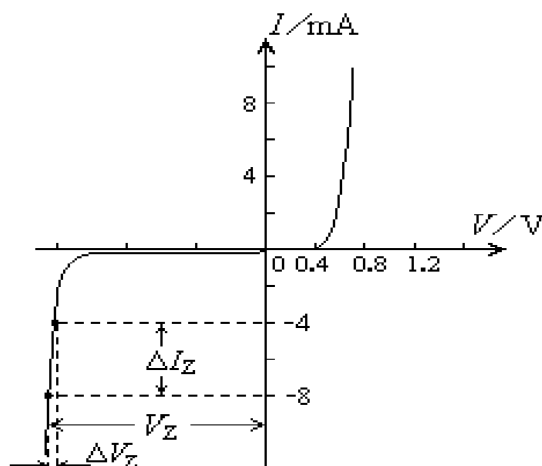
反向工作电流 I_Z 下, 所对应的反向工作电压。

(2) 动态电阻 r_Z ;

(3) 最大耗散功率 P_{ZM}

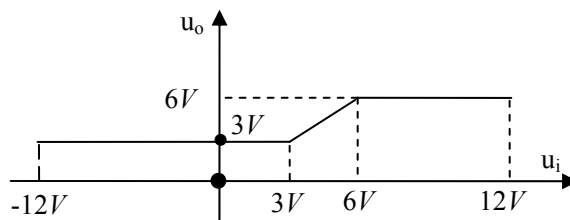
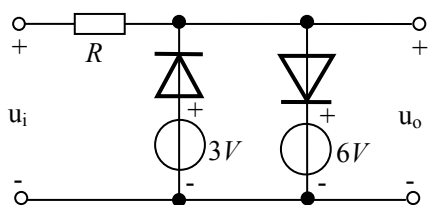
(4) 最大稳定工作电流 I_{Zmax} 和最小稳定工作电流 I_{Zmin}

(5) 稳定电压温度系数—— a_{VZ}



稳压管的稳压作用原理在于, 电流有很大增量时, 只引起很小的电压变化。反向击穿曲线愈陡, 动态电阻愈小, 稳压管的稳压性能愈好。在稳压管稳压电路中一般都加限流电阻 R , 使稳压管电流工作在 I_{Zmax} 和 I_{Zmin} 的稳压范围。另外, 在应用中还要采取适当的措施限制通过管子的电流, 以保证管子不会因过热而烧坏。

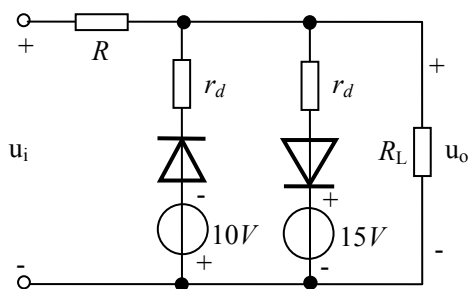
例. 已知: u_i 在 $-12V \sim +12V$ 之间, 绘出 $u_o \sim u_i$ 的波形。



$u_i > 6V$ 时, 第二管工作, $u_o = 6V$; $6V > u_i > 3V$ 时, 两管均不工作, $u_o = u_i$;

$u_i < 3V$ 时, 第一管工作, $u_o = 3V$;

例. 已知: u_i 在 $-30V \sim +30V$ 之间, 试求转移特性曲线。



$$\text{当 } u_i > 15V \text{ 时, } \frac{u_i - u_o}{R} = \frac{u_o - 15}{r_d} + \frac{u_o}{R_L}$$

$$\Rightarrow u_o = \left(\frac{u_i}{R} + \frac{15}{r_d} \right) (R // R_L // r_d)$$

$$\text{当 } r_d \ll R, r_d \ll R_L \text{ 时, } u_o \approx 15 + \frac{r_d}{R} u_i \approx 15(V)$$

$$\text{当 } -10V < u_i < 15V \text{ 时, } u_o = \frac{R_L}{R + R_L} u_i$$

$$\text{当 } R_L \rightarrow \infty \text{ 时, } u_o = u_i$$

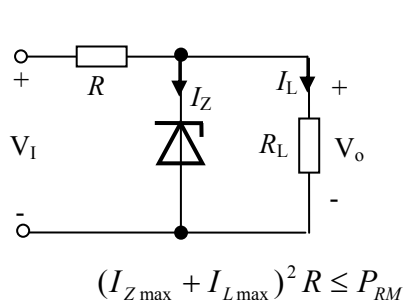
$$\text{当 } u_i < -10V \text{ 时, } \frac{u_i - u_o}{R} + \frac{(-10) - u_o}{r_d} = \frac{u_o}{R_L}$$

$$\Rightarrow u_o = \left(\frac{u_i}{R} + \frac{-10}{r_d} \right) (R // R_L // r_d)$$

$$\text{当 } r_d \ll R, r_d \ll R_L \text{ 时, } u_o \approx -10 + \frac{r_d}{R} u_i \approx -10(V)$$

例. 已知: $V_I \in (V_{Imin}, V_{Imax})$; V_Z ; P_{LM} ; $I_Z \in (I_{Zmin}, I_{Zmax})$; 求: P_{ZM} , R

$$V_Z I_L \leq P_{LM} \Rightarrow I_{Lmax} \leq \frac{P_{LM}}{V_Z} \quad P_Z = \left(\frac{V_I - V_Z}{R} - \frac{V_Z}{R_L} \right) V_Z$$



$$\text{当 } R_L \rightarrow \infty \text{ 时, } P_Z = \left(\frac{V_I - V_Z}{R} \right) V_Z \leq P_{ZM};$$

$$I_{Zmin} \leq \frac{V_{Imin} - V_Z}{R} \quad \frac{V_{Imax} - V_Z}{R} \leq I_{Zmax}$$

$$P_R = \frac{(V_I - V_Z)^2}{R} \leq \frac{(V_{Imax} - V_Z)^2}{R} \leq P_{RM}$$

$$(I_{Zmax} + I_{Lmax})^2 R \leq P_{RM}$$

2.5.2 变容二极管

变容二极管: 结电容随反向电压的增加而减小的效应显著的二极管。最大电容和最小电容之比约为 5:1, 在高频技术中应用较多。

2.5.3 光电子器件

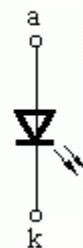
优点: 抗干扰能力强, 传输量大、损耗小; 缺点: 光路复杂, 信号的操作与调试需精心设计。

1. 光电二极管: 随着科学技术的发展, 在信号传输和存储等环节中, 越来越多地有效地应用光信号。光电二极管是光电子系统的电子器件。光电二极管的结构与 PN 结二极管类似, 管壳上的一个玻璃窗口能接收外部的光照。这种器件的 PN 结在反向偏置状态下运行, 它的反向电流随光照强度的增加而上升。光电二极管的主要特点是, 它的反向电流与照度成正比, 其灵敏度的典型值为 0.1mA/lx 数量级。

优点: 抗干扰能力强, 传输信息量大、传输损耗小且工作可靠。

2. 发光二极管(LED): 发光二极管通常用元素周期表中 III、V 族元素的化合物, 如砷化镓、磷化镓等所制成的。当这种管子通以电流时将发出光来, 这是由于电子与空穴直接复合而放出能量的结果。光谱范围是比较窄的, 其波长由所使用的基本材料而定。几种常见发光材料的主要参数如下表所示。发光二极管常用来作为显示器件, 除单个使用外, 也常作为七段式或矩阵式器件, 工作电流一般为几 mA 到十几 mA。

颜色	波长 (nm)	基本材料	正向电压 (10mA 时)V	光强(10mA 时, 张角 ±45°)	光功率 (μW)
红外	900	砷化镓	1.3~1.5		100~500
红	655	磷砷化镓	1.6~1.8	0.4~1	1~2
鲜红	635	磷砷化镓	2.0~2.2	2~4	5~10
黄	583	磷砷化镓	2.0~2.2	1~3	3~8
绿	565	磷化镓	2.2~2.4	0.5~3	1.5~8



*cd(坎德拉)发光强度的单位

3. 激光二极管：激光二极管的物理结构是在发光二极管的结间安置一层具有光活性的半导体，其端面经过抛光后具有部分反射功能，因而形成一光谐振腔。在正向偏置的情况下，LED 结发射出光来并与光谐振腔相互作用，从而进一步激励从结上发射出单波长的光，这种光的物理性质与材料有关。半导体激光二极管的工作原理，理论上与气体激光器相同。主要应用于小功率光电设备中，如光盘驱动器和激光打印机的打印头等。

第三章 半导体三极管及其放大电路

3.1 半导体三极管 (BJT)

3.1.1 BJT 的结构简介：半导体三极管有两种类型:NPN 型和 PNP 型。

结构特点：发射区的掺杂浓度最高；集电区掺杂浓度低于发射区，且面积大；基区很薄，一般在几个微米至几十个微米，且掺杂浓度最低。

3.1.2 BJT 的电流分配与放大原理

三极管的放大作用是在一定的外部条件控制下，通过载流子传输体现出来的。

外部条件：发射结正偏，集电结反偏。

1. 内部载流子的传输过程

发射区：发射载流子；

集电区：收集载流子；

基区：传送和控制载流子（以 NPN 为例）

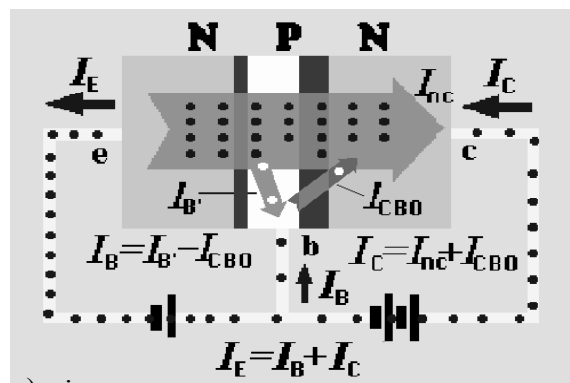
以上看出，三极管内有两种载流子(自由电子和空穴)参与导电，故称为双极型三极管，

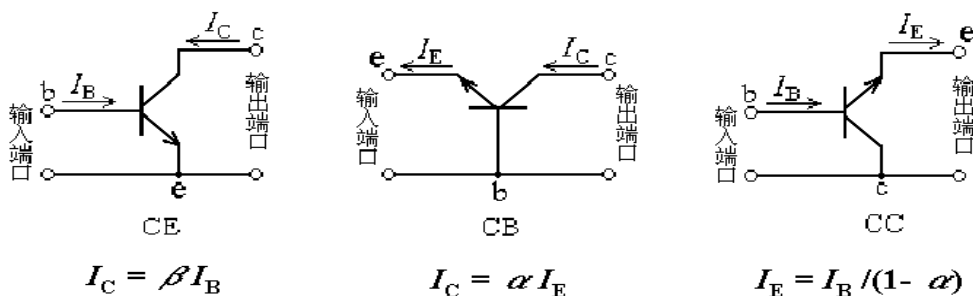
或 BJT (Bipolar Junction Transistor)。

2. 电流分配关系

3. 三极管的三种组态

共发射极接法，发射极作为公共电极，用 CE 表示。共基极接法，基极作为公共电极，用 CB 表示。共集电极接法，集电极作为公共电极，用 CC 表示。





BJT的三种组态

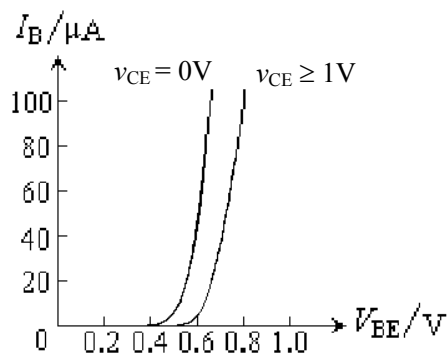
4. 放大作用

综上所述，三极管的放大作用，主要是依靠它的发射极电流能够通过基区传输，然后到达集电极而实现的。实现这一传输过程的两个条件是：(1) 内部条件：发射区杂质浓度远大于基区杂质浓度，且基区很薄。(2) 外部条件：发射结正向偏置，集电结反向偏置。

3.1.3 BJT 的特性曲线

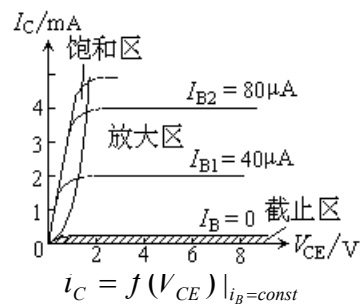
1. 输入特性曲线 $i_B = f(V_{BE})|_{V_{CE}=const}$

- (1) 当 $V_{CE} = 0V$ 时，相当于发射结的正向伏安特性曲线。
- (2) 当 $V_{CE} \geq 1V$ 时， $V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} > 0V$ ，集电结已进入反偏状态，开始收集电子，基区复合减少，同样的 V_{BE} 下， i_B 减小，特性曲线右移。
- (3) 输入特性曲线的三个部分：死区；非线性区；线性区



2. 输出特性曲线

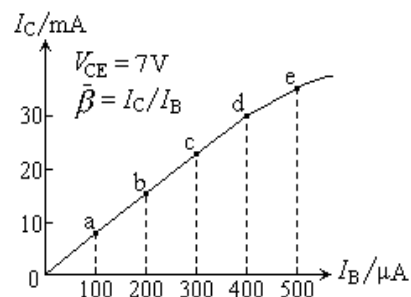
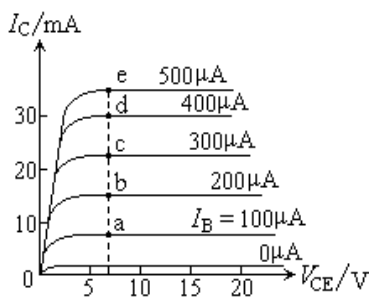
放大区： i_C 平行于 v_{CE} 轴的区域，曲线基本平行等距。此时，发射结正偏，集电结反偏。
截止区： i_C 接近零的区域，相当 $i_B=0$ 的曲线的下方。此时， v_{BE} 小于死区电压，集电结反偏。
饱和区： i_C 明显受 v_{CE} 控制的区域，该区域内，一般 $v_{CE} < 0.7V$ (硅管)。此时，发射结正偏，集电结正偏或反偏电压很小。



3.1.4 BJT 的主要参数

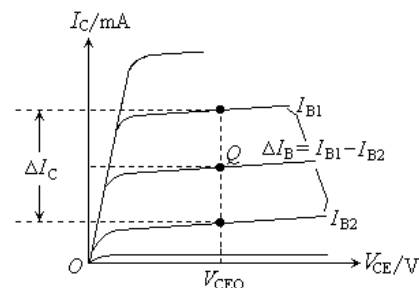
1. 电流放大系数

- (1) 共发射极直流电流放大系数
 - (2) 共发射极交流电流放大系数
 - (3) 共基极直流电流放大系数
 - (4) 共基极交流电流放大系数
- 当 I_{CBO} 和 I_{CEO} 很小时，直流和交流可以不加区分。



2. 极间反向电流

- (1) 集电极基极间反向饱和电流 I_{CBO} ：发射极开路时，集电结的反向饱和电流。
- (2) 集电极发射极间的反向饱和电流 I_{CEO} ：



即输出特性曲线 $I_B = 0$ 那条曲线所对应的 Y 坐标的数值。

I_{CEO} 也称为集电极发射极间穿透电流。

3. 极限参数

(1) 集电极最大允许电流 I_{CM}

(2) 集电极最大允许功率损耗 $P_{CM} = I_C V_{CE}$

(3) 反向击穿电压

$V_{(BR)CBO}$ ——发射极开路时的集电结反向击穿电压。

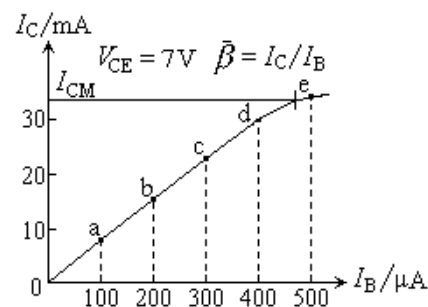
$V_{(BR)EBO}$ ——集电极开路时发射结的反向击穿电压。

$V_{(BR)CEO}$ ——基极开路时集电极和发射极间的击穿电压。

几个击穿电压有如下关系： $V_{(BR)CBO} > V_{(BR)CEO} > V_{(BR)EBO}$

由 P_{CM} 、 I_{CM} 和 $V_{(BR)CEO}$ 在输出特性曲线上可以确定过损耗区、过电流区和击穿区。

小结：本节主要介绍了三极管的结构、工作原理和特性曲线。



3.2 共射极放大电路

1. 电路组成

放大电路组成原则：

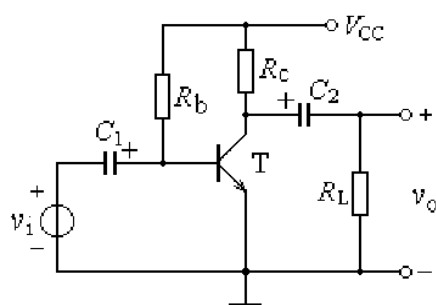
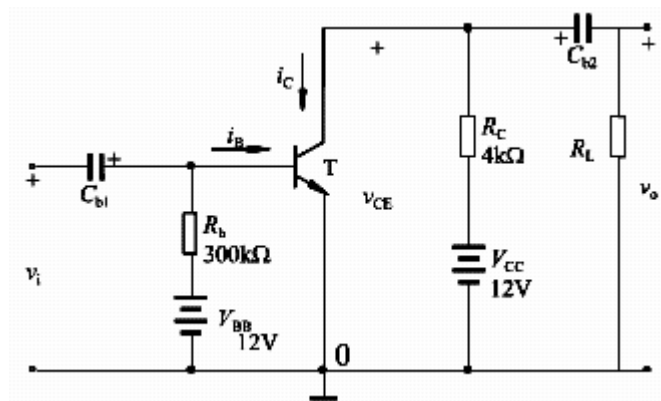
1. 提供直流电源，为电路提供能源。

2. 电源的极性和大小应保证 BJT 基极与发射极之间处于正向偏置；而集电极与基极之间处于反向偏置，从而使 BJT 工作在放大区。

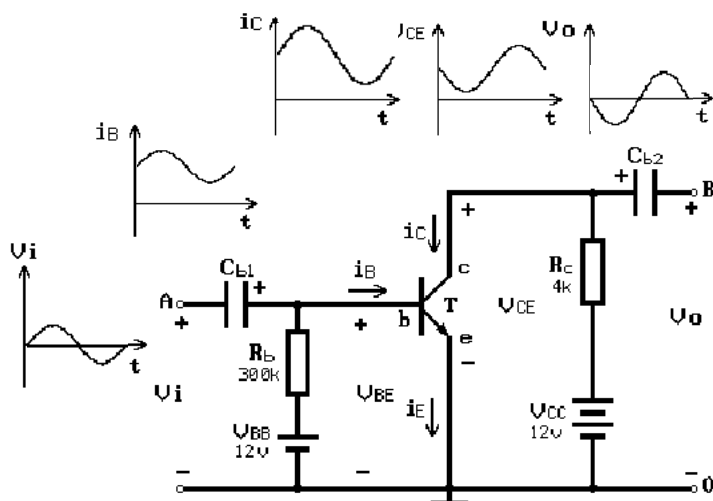
3. 电阻取值与电源配合，使放大管有合适的静态点。

4. 输入信号必须能够作用于放大管的输入回路。

5. 当负载接入时，必须保证放大管输出回路的动态电流能够作用于负载，从而使负载获得比输入信号大得多的信号电流或信号电压。



共射极放大电路



2. 简化电路及习惯画法

3. 简单工作原理

共射极基本放大电路的电压放大作用是利用了 BJT 的电流控制作用，并依靠 R_c 将放大后的电流的变化转为电压变化来实现的。

4. 放大电路的静态和动态

静态：输入信号为零时，电路的工作状态，也称直流工作状态。

动态：输入信号不为零时，电路的工作状态，也称交流工作状态。

电路处于静态时，三极管各电极的电压、电流在特性曲线上确定为一点，称为静态工作点，常称为 Q 点。一般用 I_B 、 I_C 、和 V_{CE} （或 I_{BQ} 、 I_{CQ} 、和 V_{CEQ} ）表示。

5. 直流通路和交流通路

根据叠加原理可将电路中的信号分解为：直流信号和交流信号。直流信号通过直流通路求解，交流信号通过交流通路求解。

直流通路：当没加输入信号时，电路在直流电源作用下，直流电流流经的通路。

直流通路用于确定静态工作点。

直流通路画法：①电容视为开路；②电感线圈视为短路；③信号源视为短路，但保留其内阻。

交流通路：在输入信号作用下交流信号流经的通路。交流通路用于计算电路的动态性能指标。

交流通路画法：①容量大的电容视为短路；②直流电源视为短路。

对于放大电路来说其最基本要求，一是不失真，二是能够放大。只有在信号的整个周期内 BJT 始终工作在放大状态，输出信号才不会产生失真。

静态工作点设置合适能实现线性放大；静态工作点设置偏高会产生饱和失真；静态工作点设置偏低会产生截止失真。 Q 点不仅影响电路是否会产生失真，而且影响着放大电路几乎所有的动态系数。

小结：本节主要介绍了共射极放大电路简单工作原理。

3.3 图解分析法

3.3.1 静态工作情况分析

1. 用近似估算法求静态工作点：采用该方法，必须已知三极管的 β 值。

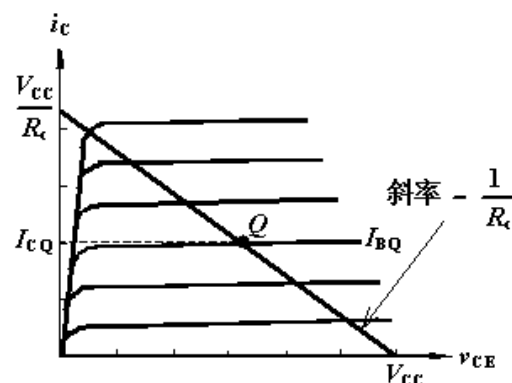
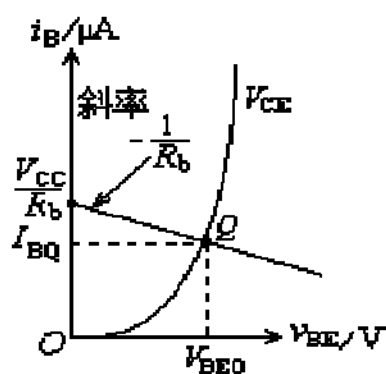
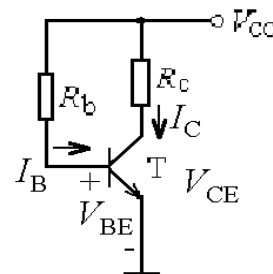
根据直流通路：硅管 $V_{BE}=0.7V$ ，锗管 $V_{BE}=0.2V$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b}; I_C = \beta I_B; V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c$$

2. 用图解分析法确定静态工作点(Q 点)：

采用该方法分析静态工作点，必须已知三极管的输入输出特性曲线。

首先，画出直流通路；在输入特性曲线上，作出直线 $V_{BE} = V_{CC} - I_B R_b$ ，两线的交点即是 Q 点，

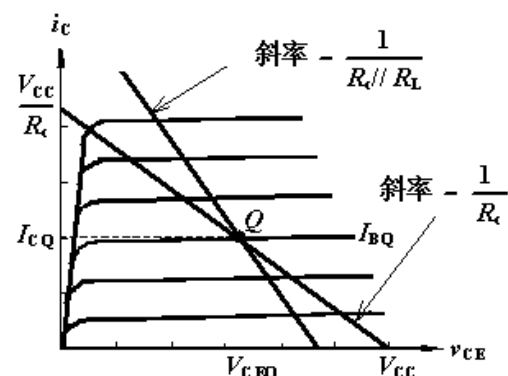


得到 I_{BQ} 。在输出特性曲线上，作出直流负载线 $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_c$ ，与 I_{BQ} 曲线的交点即为 Q 点，从而得到 V_{CEQ} 和 I_{CQ} 。

3.3.2 动态工作情况分析

1. 交流通路及交流负载线

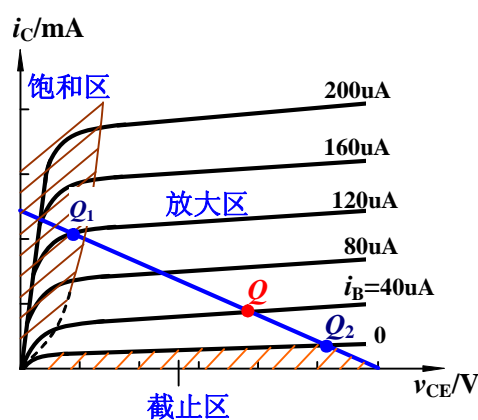
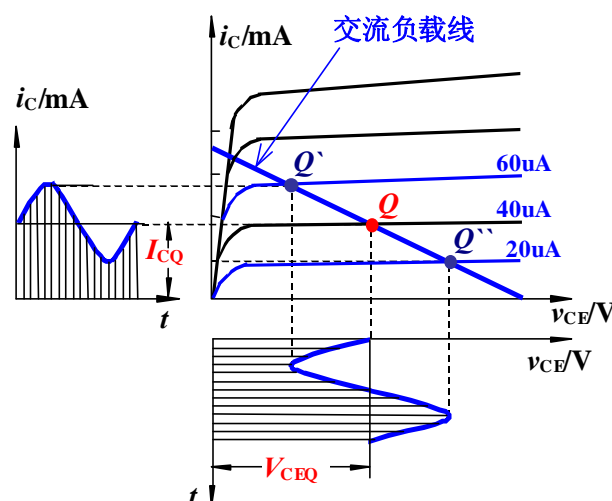
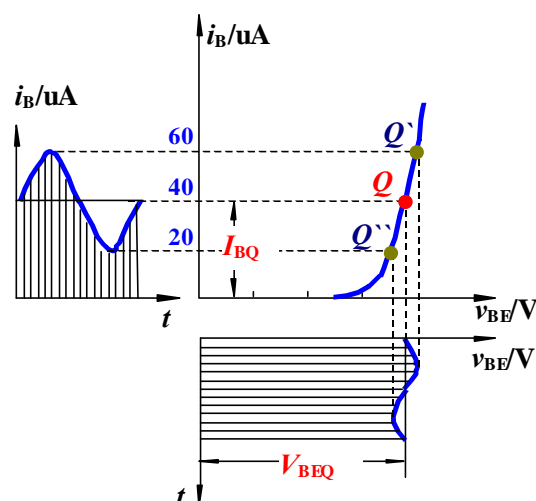
过输出特性曲线上的 Q 点做一条斜率为 $-1/(R_L // R_c)$ 直线，该直线即为交流负载线。交流负载线是有交流输入信号时 Q 点的运动轨迹。 $R'_L = R_L // R_c$ ，是交流负载电阻。



2. 输入交流信号时的图解分析

通过图解分析，可得如下结论：

1. $v_i \rightarrow v_{BE} \rightarrow i_B \rightarrow i_C \rightarrow v_{CE} \rightarrow |v_o|$
2. v_o 与 v_i 相位相反；
3. 可以测量出放大电路的电压放大倍数；
4. 可以确定最大不失真输出幅度。



3. BJT 的三个工作区

饱和区特点： i_C 不再随 i_B 的增加而线性增加，

截止区特点: $i_B = 0$, $i_C = I_{CEO}$

当工作点进入饱和区或截止区时, 将产生非线性失真

1. 波形的失真

饱和失真: 由于放大电路的工作点达到了三极管的饱和区而引起的非线性失真。对于 NPN 管, 输出电压表现为底部失真。

截止失真: 由于放大电路的工作点达到了三极管的截止区而引起的非线性失真。对于 NPN 管, 输出电压表现为顶部失真。

2. 放大电路的动态范围

放大电路要想获得大的不失真输出幅度, 要求: 工作点 Q 要设置在输出特性曲线放大区的中

间部位, 即: $V_{CEQ} = \frac{V_{CC} - V_{CES}}{2}$; 要有合适的交流负载线。

3. 输出功率和功率三角形

放大电路向电阻性负载提供的输出功率在输出特性曲线上, 正好是三角形 $DABQ$ 的面积, 这一三角形称为功率三角形。要想 P_o 大, 就要使功率三角形的面积大, 即必须使 V_{om} 和 I_{om} 都要大。

放大电路如图所示。已知 BJT 的 $\beta=80$,

$R_b=300K\Omega$, $R_C=2K\Omega$, $V_{CC}=12V$, $V_{BE}=0.7V$,

求: (1) 放大电路的 Q 点? 此时 BJT 工作在哪个区域?

(2) 当 $R_b=100K\Omega$ 时, 放大电路的 Q 点。此时 BJT 工作在哪个区域? (忽略饱和压降)

解: (1) 放大电路的 Q 点:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b} \approx \frac{12V}{300K\Omega} = 40\mu A \quad I_C = \beta I_B = 80 \times 40\mu A = 3.2mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 12V - 2K\Omega \times 3.2mA = 5.6V$$

静态工作点为 Q ($40\mu A$, $3.2mA$, $5.6V$), BJT 工作在放大区。

(2) 当 $R_b=100K\Omega$ 时,

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 12V - 2K\Omega \times 9.6mA = -7.2V$$

$$I_B \approx \frac{V_{CC}}{R_b} = \frac{12V}{100K\Omega} = 120\mu A \quad I_C = \beta I_B = 80 \times 120\mu A = 9.6mA$$

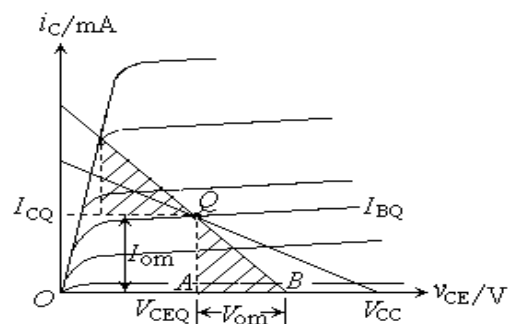
V_{CE} 不可能为负值, 其最小值也只能为 0, 即 I_C 的最大电流为:

$$I_{CM} = \frac{V_{CC} - V_{CES}}{R_C} \approx \frac{12V}{2K\Omega} = 6mA \quad \text{所以 BJT 工作在饱和区}$$

小结: 本节主要介绍了图解分析法的原理和主要应用。

3.4 小信号模型分析法

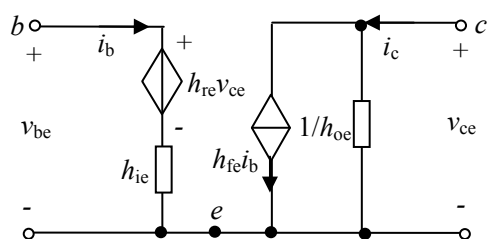
3.4.1 BJT 的小信号建模



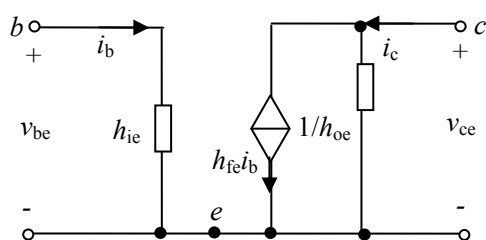
建立小信号模型的意义：由于三极管是非线性器件，这样就使得放大电路的分析非常困难。建立小信号模型，就是将非线性器件做线性化处理，从而简化放大电路的分析和设计。

建立小信号模型思路：当放大电路的输入信号电压很小时，就可以把三极管小范围内的特性曲线近似地用直线来代替，从而可以把三极管这个非线性器件所组成的电路当作线性电路来处理。H 参数都是小信号参数，即微变参数或交流参数。H 参数与工作点有关，在放大区基本不变。H 参数都是微变参数，所以只适合对交流信号的分析。

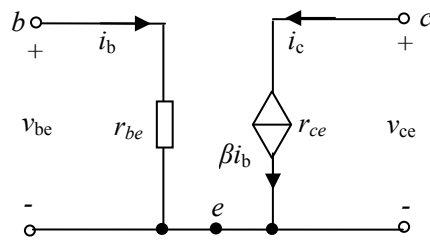
模型的简化：H 参数的确定： β 一般用测试仪测出； r_{be} 与 Q 点有关，可用图示



BJT的H参数模型



BJT的H参数简化模型



BJT的H参数简化模型

仪测出。

一般也用公式估算：

3.4.2 用 H 参数小信号模型分析共射极基本放大电路

1. 利用直流通路求 Q 点：

一般硅管 $V_{BE}=0.7V$ ，锗管 $V_{BE}=0.2V$ ， β 已知。

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b} \quad I_C = \beta I_B \quad V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$$

2. 画出小信号等效电路

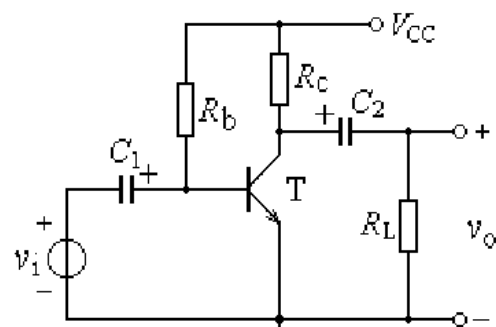
3. 求电压增益：

$$\dot{A}_v = \frac{u_o}{u_i} = \frac{-\beta(R_C // R_L)i_b}{i_b r_{be}} = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be}}$$

4. 求输入电阻： $R_i = R_b // r_{be}$

5. 求输出电阻： $R_o = R_C$

放大电路小信号模型分析法的一般步骤：



共射极放大电路

1. 根据直流通路估算静态工作点，并确定 H 参数；
2. 画出放大电路的交流通路；
3. 根据交流通路用 BJT 的 H 参数小信号模型代替电路中的 BJT，画出放大电路的小信号模型等效电路。
4. 根据放大电路的小信号模型等效电路计算放大电路的交流指标。

图解法和小信号模型分析方法的比较

图解法的特点是真实地根据 BJT 的非线性特性求解。它在输入大信号以及分析输出幅值和波形失真的情况时比较合适。小信号模型分析法的特点是在小信号条件下，将 BJT 线性化为我们所熟悉的线性网络来，进而利用电路理论的方法分析放大电路的各项技术指标，它适用于放大电路工作于小信号时的动态分析。

小结：本节主要介绍了小信号模型分析法基本原理及应用。

3.5 放大电路的工作点稳定问题

3.5.1 温度对工作点的影响

$$I_{CBO} = I_{CBO(T_0=25^\circ)} e^{k(T-T_0)}$$

温度 T 上升，则输出特性曲线上移

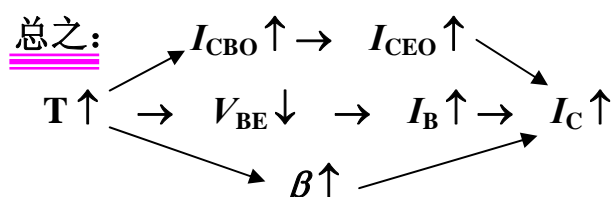
3.5.2 温度变化对输入特性曲线的影响

$$V_{BE} = V_{BE(T_0=25^\circ)} - (T - T_0) \times 2.2 \times 10^{-3} V$$

3.5.3 温度变化对 β 的影响

温度每升高 1°C ， β 要增加 $0.5\% \sim 1.0\%$ ；

温度 T 上升，则输出特性曲线族间距增大



综合上述：

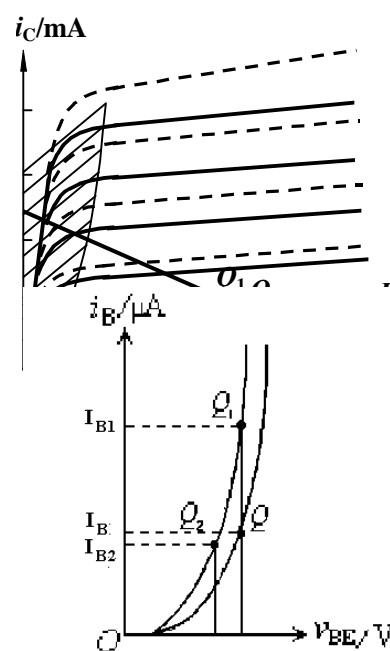
- ① I_{CBO} 、 b 、 V_{BE} 随温度 T 升高的结果，都集中表现在 Q 点电流 I_C 的增大。
- ② 硅管的 I_{CBO} 小，温度的变化主要考虑对 V_{BE} 和 β 的影响，。
- ③ 锗管的 I_{CBO} 大， I_{CBO} 的温度影响对锗管是主要的。

3.5.2 射极偏置电路

1. 稳定工作点原理：

目标：温度变化时，使 I_C 维持恒定。

如果温度变化时，b 点电位能基本不变，则可实现静态工作点的稳定。



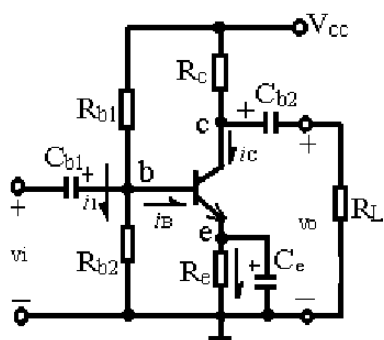
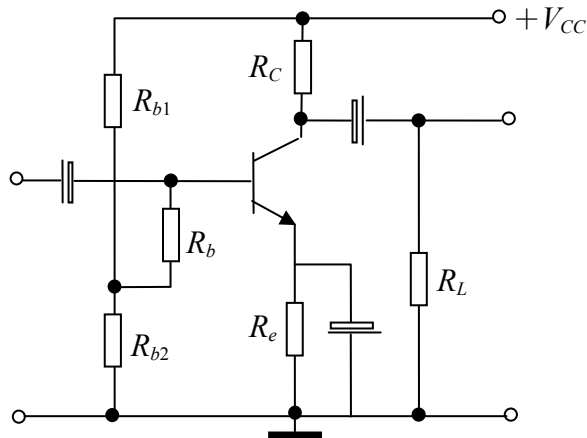


图 3.5.1 射极偏置电路



可选大电阻 R_b 使得:

$$R_i = (R_b + R_{b1} // R_{b2}) // r_{be} \approx r_{be}$$

小结：本节主要介绍了射极偏置电路的工作原理及改进电路。

3.6 共集电极电路和共基极电路

3.6.1 共集电极电路:

该电路也称为射极输出器

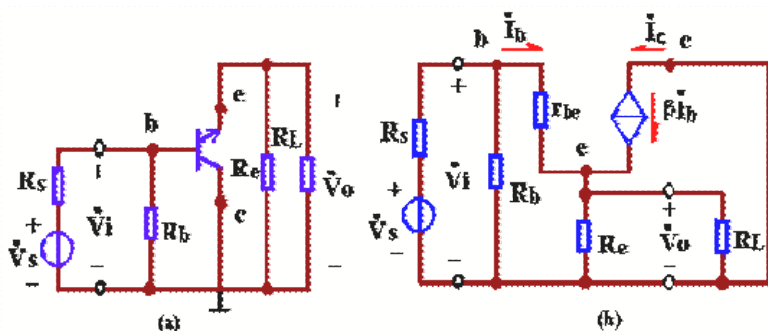
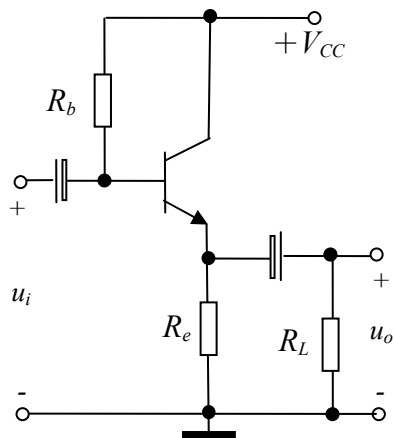


图 3.6.2 射极输出器的小信号等效电路

(a) 交流通路

(b) 小信号等效电路

①求静态工作点:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_b + (1 + \beta)R_e} \quad I_C = \beta I_B \quad V_{CE} = V_{CC} - I_E R_e \approx V_{CC} - I_C R_e$$

②电压增益:

$$\dot{A}_v = \frac{u_o}{u_i} = \frac{i_b(1 + \beta)(R_e // R_L)}{i_b(1 + \beta)(R_e // R_L) + i_b r_{be}} = \frac{(1 + \beta)(R_e // R_L)}{(1 + \beta)(R_e // R_L) + r_{be}} \approx 1$$

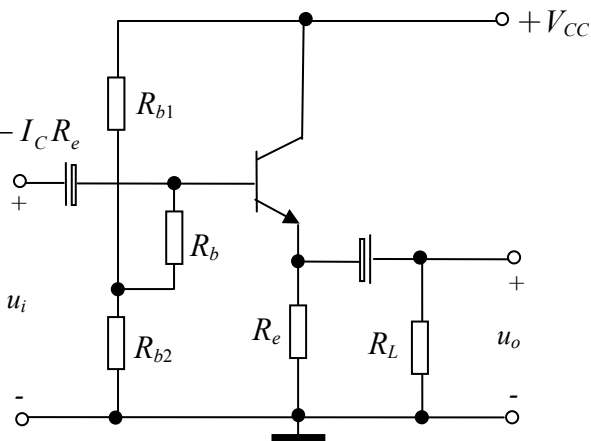
③输入电阻: $R_i = R_b // [(1 + \beta)(R_e // R_L) + r_{be}]$

可选 $R_b \rightarrow \infty$, 使 $R_i \approx \beta R_e$

④输出电阻:

$$R_o = \frac{u}{i} = R_e // \frac{(R_s // R_b) + r_{be}}{\beta}$$

共集电极电路特点: 电压增益接近于 1;



输入电阻大，对电压信号源衰减小；

输出电阻小，带负载能力强：电压跟随器。

共集电极电路做如何改进，既可以使其具有温度稳定性，又可以不影响其动态指标？

3.6.2 采用复合管进一步提高输入电阻

①电压增益：
$$\dot{A}_V = \frac{u_o}{u_i} = \frac{(1+\beta_2)(1+\beta_1)(R_e // R_L)i_{b1}}{[r_{be1} + (1+\beta_1)r_{be2} + (1+\beta_2)(1+\beta_1)(R_e // R_L)]i_{b1}}$$
$$= \frac{(1+\beta_2)(1+\beta_1)(R_e // R_L)}{r_{be1} + (1+\beta_2)(1+\beta_1)(R_e // R_L)} \approx 1$$

②输入电阻：
$$R_i = (R_b + R_{b1} // R_{b2}) // [r_{be1} + (1+\beta_1)r_{be2} + (1+\beta_2)(1+\beta_1)R_e]$$

可选 $R_b \rightarrow \infty$, 使 $R_i \approx R_e // [(1+\beta_2)(1+\beta_1)R_e] \approx R_b // \beta R_e$

③输出电阻：
$$R_o = \frac{u}{i} = R_e // \frac{(1+\beta_1)r_{be2} + [(R_s // R_b) + r_{be1}]}{(1+\beta_2)(1+\beta_1)}$$

由于采用复合管，使共集放大电路 $(1+\beta_2)(1+\beta_1)$

R_o 小的特点得到进一步的发挥。在多级电子电路中，因电压跟随器的输入电阻高而用作输入级；因输出电阻低且电流增益大而用作输出级；因输入电阻高且输出电阻低而用作缓冲级。

3.6.2 共基极电路

1. 静态工作点：

直流通路与射极偏置电路相同

2. 动态指标

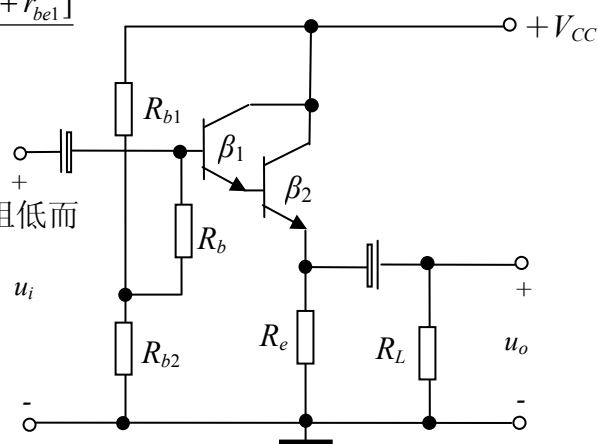
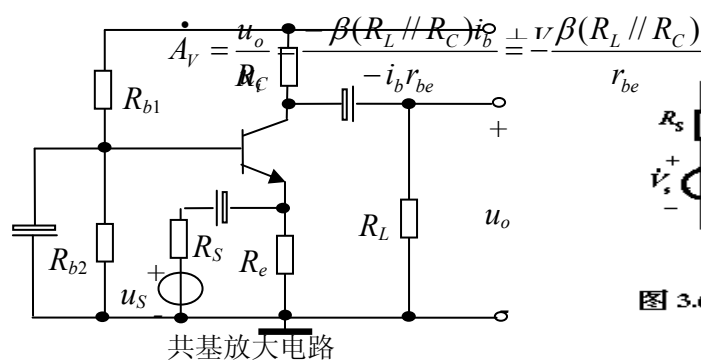


图 3.6.8 共基极电路的小信号等效等效电路

①电压增益：

② 输入电阻：
$$R_i = \frac{u}{i} = R_e // \frac{(R_s // R_b) + r_{be}}{1+\beta}$$

③ 输出电阻：
$$R_o \approx R_C$$

共基极电路的输入电阻很小，最适合用来放大何种信号源的信号？电流源。

3. 三种组态的比较

电压增益：
$$-\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be}}$$

输入电阻：
$$R_b // r_{be}$$

$$\frac{(1+\beta)(R_e // R_L)}{r_{be} + (1+\beta)(R_e // R_L)}$$
$$R_b // [r_{be} + (1+\beta)R_e]$$

$$-\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{beq}}$$
$$R_e // \frac{(R_s // R_b) + r_{be}}{1+\beta}$$

输出电阻： $R_C \parallel \frac{(R_S \parallel R_b) + r_{be}}{1 + \beta}$

小结：本节主要介绍了共集电极电路和共基极电路的工作原理。

第一章 数制与编码(Number System and Codes)

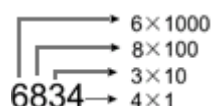
一、数制

1、十进制数(Decimal Number)

十进制数是日常生活中使用最广的计数制。组成十进制数的符号有 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 等共十个符号，我们称这些符号为数码。

在十进制中，每一位有 0~9 共十个数码，所以计数的基数为 10。超过 9 就必须用多位数来表示。十进制数的运算遵循加法时：“逢十进一”，减法时：“借一当十”。

十进制数中，数码的位置不同，所表示的值就不相同。如：



式中，每个对应的数码有一个系数 1000,100,10,1 与之相对应，这个系数就叫做权或位权。

对于位一十进制数可表示为：

$$N_{10} = a_{n-1} \times 10^{n-1} + a_{n-2} \times 10^{n-2} + \cdots + a_1 \times 10^1 + a_0 \times 10^0 + a_{-1} \times 10^{-1} + a_{-2} \times 10^{-2} + \cdots + a_{-m} \times 10^{-m}$$

$$= \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \times 10^i$$

式中： a_i 为 0~9 中的位一数码；10 为进制的基数；10 的 i 次为第 i 位的权； m, n 为正整数， n 为整数部分的位数， m 为小数部分的位数。

2、二进制数(Binary Number)

与十进制相似，二进制数也遵循两个规则：

仅有两个不同的数码，即 0,1；

进/借位规则为：逢二进一,借一当二。

对于任意一个二进制数可表示为：

$$N_2 = \sum_{i=-m}^{n-1} b_i \times 2^i$$

由于二进制数仅 0,1 两个数码，所以其运算规则比较简单，下现列出了二进制数进行加法和乘法的规则：

加法	乘法
0+0=0	0×0=0
0+1=1	0×1=0
0+1=1	1×0=0

0+1=10	1×1=1
--------	-------

上表中式 1+1=10 中的前面一位为进位位。

3、十六进制(Hexadecimal Number)

二进制数在计算机系统中处理很方便，但当位数较多时，比较难记忆及书写，为了减小位数，通常将二进制数用十六进制表示。

十六进制是计算机系统中除二进制数之外使用较多的进制，其遵循的两个规则为：

其有 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,A,B,C,D,E, F 等共十六个数码，其分别对应于十进制数的 0~15；

十六进制数的加减法的进 / 借位规则为：借一当十六，逢十六进一。

十六进制数同二进制数及十进制数一样，也可以写成展开式的形式。

在数制使用时，常将各种数制用简码来表示：如十进制数用 D 表示或省略；二进制用 B 来表示；十六进制数用 H 来表示。

如：十进制数 123 表示为：123D 或者 123；二进制数 1011 表示为:1011B；十六进制数 3A4 表示为:3A4H。

在计算机中除上面讲到的二进制、十进制、十六进制外，常常还会讲到八进制数，这里就不讨论了。

下表列出了十进制 0~16 对应的二进制数和十六进制数。

十进制数	二进制数	十六进制数
0	0000	0
1	0001	1
2	0010	2
3	0011	3
4	0100	4
5	0101	5
6	0110	6
7	0111	7
8	1000	8
9	1001	9
10	1010	A
11	1011	B
12	1100	C
13	1101	D
14	1110	E
15	1111	F
16	10000	10

二、各种进制相互转换

1、其它进制转换为十进制

方法是：将其它进制按权位展开，然后各项相加，就得到相应的十进制数。

例 1： $N = (10110.101)_B = (?)_D$

$$\begin{aligned}\text{按权展开 } N &= 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} \\ &= 16 + 4 + 2 + 0.5 + 0.125 = (22.625)_D\end{aligned}$$

2、将十进制转换成其它进制

方法是：它是分两部分进行的即**整数部分**和**小数部分**。

整数部分：（基数除法）

把我们要转换的数除以新的进制的基数，把余数作为新进制的最低位；

把上一次得的商在除以新的进制基数，把余数作为新进制的次低位；

继续上一步,直到最后的商为零,这时的余数就是新进制的最高位.

小数部分：（基数乘法）

把要转换数的小数部分乘以新进制的基数，把得到的整数部分作为新进制小数部分的最高位

把上一步得的小数部分再乘以新进制的基数，把整数部分作为新进制小数部分的次高位；

继续上一步，直到小数部分变成零为止。或者达到预定的要求也可以。

例 2： $N = (68.125)_D = (?)_O$

整数部分

$$\begin{array}{r} 8 \overline{) 68} \text{ --- } 4 \\ 8 \overline{) 8} \text{ --- } 0 \\ \underline{1} \end{array}$$

小数部分

$$\begin{array}{r} 0.125 \\ * \quad 8 \\ \hline 1.0 \text{ --- } 1 \end{array}$$

$$(68.125)_D = (104.1)_O$$

3、二进制与八进制、十六进制的相互转换： 二进制转换为八进制、十六进制：它们之间满足 2^3 和 2^4 的关系，因此把要转换的二进制从低位到高位每 3 位或 4 位一组，高位不足时在有效位前面添“0”，然后把每组二进制数转换成八进制或十六进制即可；

八进制、十六进制转换为二进制时，把上面的过程反过来即可。

例 3： $N = (C1B)_H = (?)_B$

$(C1B)_H = 1100/0001/1011 = (110000011011)_B$

三、二进制的四则运算

二进制也可以进行四则运算，它的运算规则如下所示：

加运算 $0+0=0, 0+1=1, 1+0=1, 1+1=10$ 逢 2 进 1

减运算 $1-1=0, 1-0=1, 0-0=1, 0-1=1$ （向高位借 1 当 2）

乘运算 $0*0=0, 0*1=0, 1*0=0, 1*1=1$

除运算 二进制只有两个数（0，1），因此它的商是 1 或 0。

例 1： 求 $(1011101)_B$ 与 $(0010011)_B$ 之和
例 2： 求 $(1101)_B$ 与 $(0101)_B$ 的乘积

$$\begin{array}{r} 1011101 \\ + 0010011 \\ \hline 1110000 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 1101 \\ * 0101 \\ \hline 1101 \\ 0000 \\ 1101 \\ 0000 \\ \hline 1000001 \end{array}$$

通过例(1)我们再来介绍两个概念：半加和全加。

半加是最低位的加数和被加数相加时，不考虑低位向本位进位。

全加是加数和被加数相加时，我们还要考虑低位向本位的进位。

四、数的原码、反码及补码

1、数的表示形式

在生活中表示数的时候一般都是把正数前面加一个“+”，负数前面加一个“-”，但是在数字设备中，机器是不认识这些的，我们就把“+”用“0”表示，“-”用“1”表示。**原码、反码和补码**。这三种形式是怎样表

示的呢？如下所示：

	真值	原码	反码	补码
正数	+X	0X	0X	0X

例 1：求+12 和-12 八位原码、反码、补码形式
它们的原码分别为

$$[+12]=00001100[-12]=100011$$

$$\text{它们的反码分别为 } [+12]^*=00001100$$

	真值	原码	反码	补码
负数	-X	1X	$(2^n-1)+X$	2^n+X

$[-12]^*=(2^8-1)+(-1100)=11110011$

$$\text{它们的补码分别为 } [+12]^{**}=00001100$$

$$[-12]^{**}=2^8+(-1100)=11110100$$

2、原码、反码及补码的算术运算

因为这三种数码表示法的形成规则不同，所以算术运算方法也不相同。

原码：与我们的日常中算术运算相同。

反码：先转换为反码形式,再进行加减运算。它的减法可以按 $A_{\text{反}}+[-B]_{\text{反}}$ 的形式进行.

补码：先转换为补码形式，再进行加减运算,其减法可以按 $A_{\text{补}}+[-B]_{\text{补}}$ 进行.

3、溢出及补码运算中溢出的判断

溢出可以描述为运算结果大于数字设备的表示范围。这种现象应当作故障处理。

判断溢出是根据最高位的进位来判断的。

第二章 逻辑代数基础(Logic Base)

一、逻辑代数的基本运算

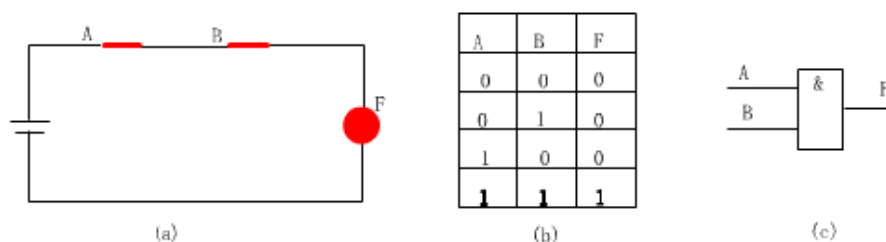
逻辑代数是 1847 年由英国数学家乔治·布尔 (George Boole) 首先创立的, 所以通常人们又称逻辑代数为布尔代数。逻辑代数与普通代数有着不同概念, 逻辑代数表示的不是数的大小之间的关系, 而是逻辑的关系, 它仅有两种状态即: 0, 1。它是分析和设计数字系统的数学基础。

逻辑代数的运算规则也不同于普通的运算规则, 它有三个基本的运算——与、或、非。

基本的逻辑运算 (Base Logic Operations)

1、与逻辑 (AND Logic)

与逻辑又叫做逻辑乘, 下面通过开关的工作状态加以说明与逻辑的运算。



从上图可以看出, 当开关有一个断开时, 灯泡处于灭的状态, 仅当两个开关同时合上时, 灯泡才会亮。于是我们可以将与逻辑的关系速记为: “有 0 出 0, 全 1 出 1”。

图(b)列出了两个开关的所有组合, 以及与灯泡状态的情况, 我们用 0 表示开关处于断开状态, 1 表示开关处于合上的状态; 同时灯泡的状态用 0 表示灭, 用 1 表示亮。

图(c)给出了与逻辑关系的逻辑符号 (Logic Symbol), 该符号表示了二个输入的逻辑关系, & 在英文中是 AND 的速写, 如果开关有三个则符号的左边再加上一道线就行了。

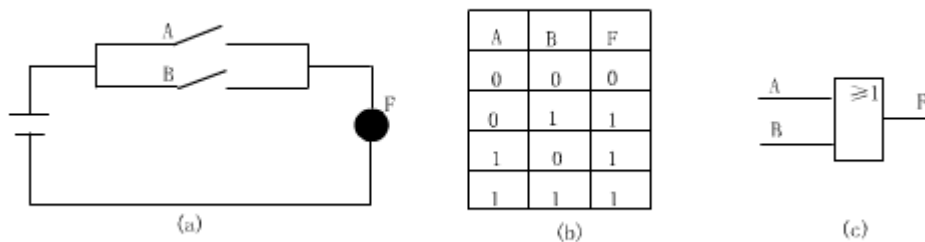
逻辑与的关系还可以用表达式的形式表示为:

$$F = A \cdot B$$

上式在不造成误解的情况下可简写为: $F = AB$ 。

从电路上可以看出, 图(a)所示的电路为一串联的电路形式, 下面我们来看一下并联的电路形式的逻辑关系如何。

2、或逻辑 (OR Logic)



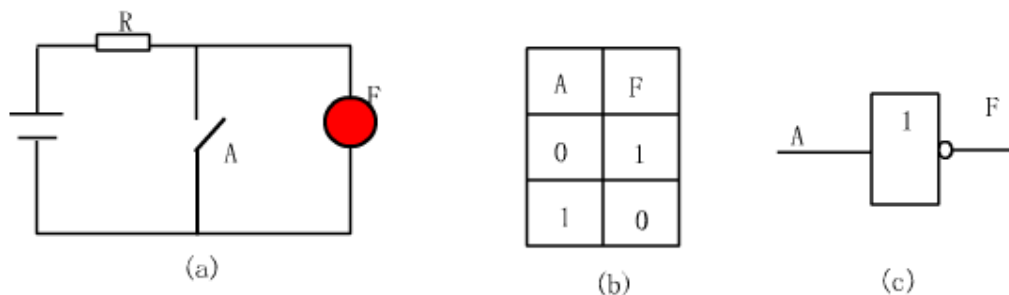
上图(a)为一并联直流电路，当两只开关都处于断开时，其灯泡不会亮；当A,B两个开关中有一个或两个一起合上时，其灯泡就会亮。如开关合上的状态用1表示，开关断开的状态用0表示；灯泡的状态亮时用1表示，不亮时用0表示，则可列出图(b)所示的真值表。这种逻辑关系就是通常讲的“或逻辑”，从表中可看出，只要输入A,B两个中有一个为1，则输出为1，否则为0。所以或逻辑可速记为：“有1出1，全0出0”。

上图(c)为或逻辑的逻辑符号，后面通常用该符号来表示或逻辑，其方块中的“ ≥ 1 ”表示输入中有一个及一个以上的1，输出就为1。

逻辑或的表示式为：

$$F=A+B$$

3、非逻辑(NOT Logic)



非逻辑又常称为反相运算(Inverters)。下图(a)所示的电路实现的逻辑功能就是非运算的功能，从图上可以看出当开关A合上时，灯泡反而灭；当开关断开时，灯泡才会亮，故其输出F的状态与输入A的状态正好相反。非运算的逻辑表

达式为 .

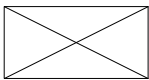
图(c)给出了非逻辑的逻辑符号。

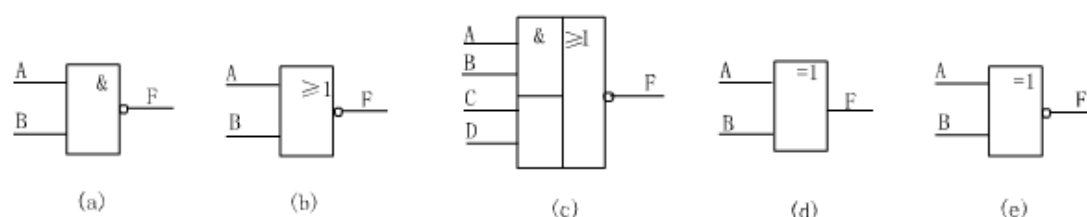
复合逻辑运算

在数字系统中，除了与运算、或运算、非运算之外，常常使用的逻辑运算还有一些是通过这三种运算派生出来的运算，这种运算通常称为复合运算，常见的复合运算有：与非、或非、与或非、同或及异或等。

4、与非逻辑(NAND Logic)

与非逻辑是由与、非逻辑复合而成的。其逻辑可描述为：“输入全部为 1 时，输出为 0；否则始终为 1”。下图(a)为与非运算的逻辑符号。

多输入的与非逻辑表达式可写为： $F = \overline{A \bullet B \bullet C \bullet \bullet}$ 



5、或非逻辑(NOR Logic)

上图(b)为或非的逻辑符号，从与非的逻辑可以推出或非的逻辑关系：“输入中有一个及一个以上 1，则输出为 0，仅当输入全为 0 时输出为 1”。

6、与或非逻辑

上图中图(c)为与或非的逻辑符号，A, B 相与后输出到或运算输入，同时 C, D 也相与后输出到或逻辑的输入，这两个输出再进行或运算后加到非运算输出。上图与或非的逻辑表达式为： $F = \overline{AB + CD}$

7、异或逻辑

图(d)为异或运算的逻辑符号，=1 表示当两个输入中只有一个为 1 时，输出为 1；否则为 0。异或运算的逻辑表达式为： $F = A \oplus B = \overline{A}B + A\overline{B}$

上式中，“ \oplus ”表示异或运算。

8、同或逻辑

图(e)为同或的逻辑关系，从图上可以看出同或实际上是异或的非逻辑，下表也说明了其两者的非的逻辑关系。

异或逻辑及同或逻辑真值表

输入变量		异或逻辑	同或逻辑
A	B	$A\odot B$	$A\odot B$
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

同或的逻辑表达式为： $F=A\odot B=AB+\overline{A}\overline{B}$

上式中“ \odot ”是同或的逻辑运算符号。

二、逻辑代数的运算规则

逻辑代数的基本定律

0-1律	$A \cdot 0=0$	$A+1=1$
自等律	$A \cdot 1=A$	$A+0=A$
重叠律	$A \cdot A=A$	$A+A=A$
互补律	$A \cdot \overline{A}=0$	$A+\overline{A}=1$
交换律	$A \cdot B=B \cdot A$	$A+B=B+A$
结合律	$A \cdot (B \cdot C)=(A \cdot B) \cdot C$	$A+(B+C)=(A+B)+C$
分配律	$A \cdot (B+C)=A \cdot B+A \cdot C$	$A+B \cdot C=A \cdot B+A \cdot C$
吸收律	$A(A+B)=A$	$A+AB=A$
反演律	$\overline{A \cdot B}=\overline{A}+\overline{B}$	$\overline{A+B}=\overline{A} \cdot \overline{B}$
非非律	$\overline{\overline{A}}=A$	

逻辑代数的三个规则

1、代入规则

在任一逻辑等式中，如果将等式两边所有出现的某一变量都代之以一个逻辑函数，则此等式仍然成立，这一规则称之为代入规则。

例

将函数 $B=XY$ 代入等式 $\overline{AB}=\overline{A+B}$ 中的 B ，证明新的等式仍相等。

证明：

$$\because \text{左式}=\overline{AB}=\overline{A(XY)}=\overline{A+XY}=\overline{A+X+Y}$$

$$\text{右式}=\overline{A+B}=\overline{A+XY}=\overline{A+X+Y}$$

$$\therefore \text{等式成立}$$

2、反演规则

已知一逻辑函数 F ，求其反函数时，只要将原函数 F 中所有的原变量变为反变量，反变量变为原变量；“+”变为“ \cdot ”，“ \cdot ”变为“+”；“0”变为“1”；“1”变为“0”。这就是逻辑函数的反演规则。

3、对偶规则

已知一逻辑函数 F ，只要将原函数 F 中所有的“+”变为“ \cdot ”，“ \cdot ”变为“+”；“0”变为“1”；“1”变为“0”，而变量保持不变、原函数的运算先后顺序保持不变，那么就可以得到一个新函数，这新函数就是对偶函数 F' 。

- 其对偶与原函数具有如下特点：
1. 原函数与对偶函数互为对偶函数；
 2. 任两个相等的函数，其对偶函数也相等。这两个特点即是逻辑函数的对偶规则。

例

已知原函数 $F=AB+\overline{ABC}+\overline{BD}$,试利用对偶规则求其对偶函数。

$F'=(A+B)\overline{A+B+C}(\overline{B+D})$

逻辑运算的常用公式

公式1		$A(A+B)=A$
公式2	$AB+A\overline{B}=A$	$(A+B)(A+\overline{B})=A$
公式3	$A+\overline{A}B=A+B$	$A(\overline{A}+B)=AB$
公式4	$AB+\overline{A}C+BC=AB+\overline{A}C$	$AB+\overline{A}C+BCDE=AB+\overline{A}C$

三、标准形式逻辑函数

逻辑函数的一般表示形式

1. 与或表达式 (SOP form)

在函数表达式中，包含若干个与项，每个与项中各变量以原变量或反变量的形式出现，每个与项之间以或的形式相连，这种表达式即与或表达式。如：

$$F(A, B, C) = \bar{A} + BC + A\bar{B}C$$

2. 或与表达式 (POS form)

一个函数表达式，包含若干个或项，其中每个或项可有一个或多个变量，每个变量以原变量或反变量形式出现，这些或项以逻辑与的形式连在一起，形成了或与表达式。

第三章 组合逻辑电路 (Combinational Logic Circuits)

§ 3.1 组合逻辑电路分析

1、什么是组合逻辑电路？

在模拟电子线路中放大器可分为普通放大器和带负反馈放大器两大类，数字逻辑电路也可分为两大类电路：组合逻辑电路和时序逻辑电路。这里只介绍组合逻辑电路，时序电路方面的内容将在后面的章节里介绍。

组合逻辑电路模型如下图所示，其可以有若干个输入变量和若干个输出变量，其每个输出变量是其输入的逻辑函数，其每个时刻的输出变量的状态仅与当时的输入变量的状态有关，与本输出的原来状态及输入的原状态无关，也就是输入状态的变化立即反映在输出状态的变化。



上面的组合逻辑电路的模型可以用函数式表示为：

$$\begin{aligned} Y_1 &= F_1(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \\ Y_2 &= F_2(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \\ Y_3 &= F_3(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \\ &\dots\dots\dots \\ Y_m &= F_m(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \end{aligned}$$

上面的表达式也可简化为：

$$Y_i = F_i(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad i=1, 2, 3, \dots, m$$

组合逻辑电路的表示除上面的函数表达式之外不可以由真值表、卡诺图、逻辑电路图来表达。

2、逻辑代数的运算规则

逻辑代数的基本定律

0-1律	$A \cdot 0 = 0$	$A + 1 = 1$
自等律	$A \cdot 1 = A$	$A + 0 = A$
重叠律	$A \cdot A = A$	$A + A = A$
互补律	$A \cdot \bar{A} = 0$	$A + \bar{A} = 1$
交换律	$A \cdot B = B \cdot A$	$A + B = B + A$
结合律	$A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C$	$A + (B + C) = (A + B) + C$
分配律	$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$	$A + B \cdot C = A + B \cdot A + C$
吸收律	$A(A + B) = A$	$A + AB = A$
反演律	$\overline{A \cdot B} = \bar{A} + \bar{B}$	$\overline{A + B} = \bar{A} \cdot \bar{B}$
非非律	$\overline{\bar{A}} = A$	

逻辑代数的三个规则

1、代入规则

在任一逻辑等式中，如果将等式两边所有出现的某一变量都代之以一个逻辑函数，则此等式仍然成立，这一规则称之为代入规则。

例 将函数 $B = XY$ 代入等式 $\overline{AB} = \bar{A} + \bar{B}$ 中的 B ，证明新的等式仍相等。

证明： \because 左式 $= \overline{AB} = \overline{A(XY)} = \bar{A} + \overline{XY} = \bar{A} + \bar{X} + \bar{Y}$
右式 $= \bar{A} + \bar{B} = \bar{A} + \overline{XY} = \bar{A} + \bar{X} + \bar{Y}$
 \therefore 等式成立

2、反演规则

已知一逻辑函数F，求其反函数时，只要将原函数F中所有的原变量变为反变量，反变量变为原变量；“+”变为“·”，“·”变为“+”；“0”变为“1”；“1”变为“0”。这就是逻辑函数的反演规则。

3、对偶规则

已知一逻辑函数F，只要将原函数F中所有的“+”变为“·”，“·”变为“+”；“0”变为“1”；“1”变为“0”，而变量保持不变、原函数的运算先后顺序保持不变，那么就可以得到一个新函数，这新函数就是对偶函数F'。

其对偶与原函数具有如下特点：

1. 原函数与对偶函数互为对偶函数；
2. 任两个相等的函数，其对偶函数也相等。这两个特点即是逻辑函数的对偶规则。

例 已知原函数 $F=AB+\overline{ABC}+\overline{BD}$,试利用对偶规则求其对偶函数。
 $F'=(A+B)\overline{A+B+C}(\overline{B+D})$

逻辑运算的常用公式

公式1		$A(A+B)=A$
公式2	$AB+A\overline{B}=A$	$(A+B)(A+\overline{B})=A$
公式3	$A+\overline{A}B=A+B$	$A(\overline{A}+B)=AB$
公式4	$AB+\overline{A}C+BC=AB+\overline{A}C$	$AB+\overline{A}C+BCDE=AB+\overline{A}C$

3、标准形式逻辑函数

逻辑函数的一般表示形式

1. 与或表达式 (SOP form)

在函数表达式中，包含若干个与项，每个与项中各变量以原变量或反变量的形式出现，每个与项之间以或的形式相连，这种表达式即与或表达式。如：

$$F(A,B,C)=\overline{A}+BC+\overline{A}\overline{B}C$$

2. 或与表达式 (POS form)

一个函数表达式，包含若干个或项，其中每个或项可有一个或多个变量，每个变量以原变量或反变量形式出现，这些或项以逻辑与的形式连在一起，形成了或与表达式。

4. 组合逻辑电路的分析方法

组合逻辑电路分析一般是根据已知逻辑电路图求出其逻辑功能的过程，其广泛用于系统仿制、系统维修等领域，是学习技术、追踪最新技术的必备手段。

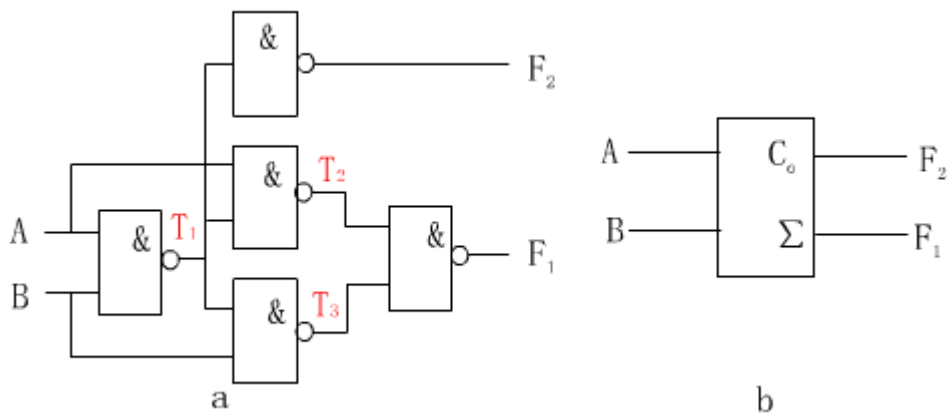
组合逻辑电路分析实际上是根据逻辑图写出其逻辑表达式、真值表，并根据其归纳出其逻辑功能，理论上讲其分析过程并不难，但要说明其具体的功能，须跟平时的知识积累密不可分。

组合逻辑电路的分析可分为以下几步：

1. 分别用代号标出每一级的输出端；
2. 根据逻辑关系写出每一级输出端对应的逻辑关系表达式；并一级一级向下写，直至写出最终输出端的表达式；
3. 列出最初输入状态与最终输出状态输出的真值表（注意：输入、输出变量的排列顺序可能会影响其结果的分析，一般按 ABC 或 $F_3F_2F_1$ 的顺序排列）；
4. 根据真值表或表达式分析出逻辑电路的功能。

5. 组合逻辑电路分析举例

例 分析下图 a 的逻辑功能。



第一步：在各级的输出用代号将其标注出来，如下图 a 所示；

第二步：写出各级的输出表达式，最终写出输出与输入的逻辑关系表达式；

$$\begin{aligned} T_1 &= \overline{A}B \\ T_2 &= \overline{T_1}A = \overline{\overline{A}B}A = \overline{\overline{A}(\overline{A}+B)} = \overline{\overline{A}}\overline{B} \\ T_3 &= \overline{T_1}B = \overline{\overline{A}B}B = \overline{\overline{A}(\overline{A}+B)} = \overline{\overline{A}}\overline{B} \\ F_1 &= \overline{T_2}T_3 = \overline{\overline{A}}\overline{B} + \overline{\overline{A}}\overline{B} \\ F_2 &= \overline{T_1} = AB \end{aligned}$$

第三步：列出逻辑函数对应的真值表：

A	B	F_2	F_1
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

第四步：对真值表进行分析。

从对上表的真值进行分析不难看出，输出 F_2 是输入变量 AB 的与关系， F_1 是输入变量 AB 的异或关系，这仅仅是一种逻辑分析，而不是最终的分析结果，最终的分析结果须找到其实际的用途。

其实际的功能是：如果 AB 对应是两个二进制数的输入，输出 F_2 、 F_1 分别输入的两数和的进位、本位的和，其实际的功能实际是一个求和电路或加法器，由于一个完整的加法器还须能接收前一级的进位输出，故该电路通常称为半加器(Half Adder)。

在上面图中的图 b 符号实际上是其半加器逻辑符号，实际用进位 Co 取代 F_2 ，和 S 取代 F_1 的符号。

从上面的分析过程看，组合逻辑电路的分析并不难，但是要找出其最终的功能须一些知识的积累。

§ 3.2、组合逻辑电路设计

组合逻辑电路设计主要是将客户的具体设计要求用逻辑的函数加以描述，再用具体的电路加以实现的过程，组合逻辑电路的设计可分为小规模集成电路、中规模集成电路、定制或半定制集成电路的设计，这里主要讲解用小规模集成电路（即用逻辑门电路）来实现组合逻辑电路的功能，后面会介绍有关可编程逻辑器件设计组合逻辑电路的方法。

1、组合逻辑电路设计步骤

组合逻辑电路的设计步骤可分为：

1. 根据电路功能的文字描述，将其输入与输出的逻辑关系用真值表的形式列出；
2. 通过逻辑化简，将真值表写出最简的逻辑函数表达式；
3. 选择合适的门器件，把最简的表达式转换为相应的表达式；
4. 根据表达式画出该电路的逻辑电路图；
5. 最后一步进行实物安装调试，这是最终验证设计是否正确的手段。

2、组合逻辑电路设计举例

例 设计一个三变量的表决器，当多数人同意时，提议通过；否则不通过。

从题目要求可能看出其有三个输入变量，输出仅一个。设输入三个变量分别为：A, B, C, 输出变量用 F 表示，当输入同意时用 1 表示，否则为 0；输出状态为 1 时表示通过，输出为 0 时表示否决。

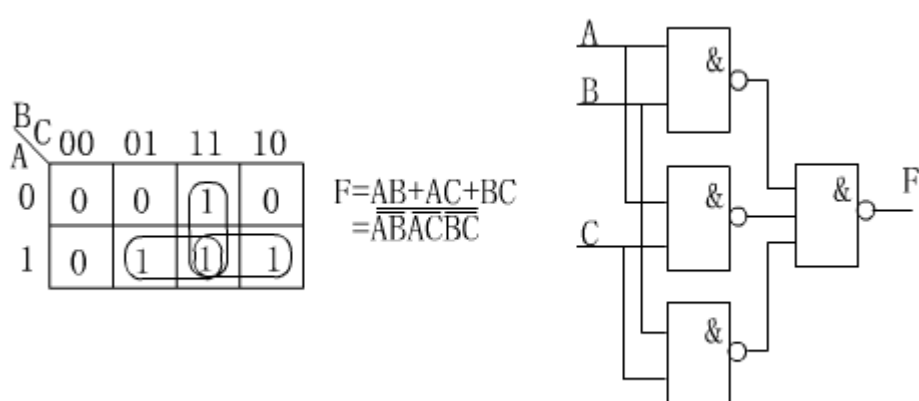
第一步：根据上面假设列出其状态真值表。

输 入			输 出
A	B	C	F
0	0	0	0
0	0	1	0

0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

第二步：由真值表写出表达式。

根据真值表写出其卡诺图，通过卡诺图的化简写其最简的表达式，由于其使用的门电路是与非门，故化简后的表达式还须转换为与非的表达式的形式，下图 a 为其卡诺图。



$$F = AB + AC + BC$$

$$= \overline{\overline{AB} \overline{AC} \overline{BC}}$$

第三步：根据逻辑表达式画出逻辑电路图。如上图 b 所示。

例 设计一个用来判别一位 8421BCD 码是否大于 5 的电路。如果输入值大于 5 时，电路输出 1；当输入小于等于 5 时，电路输出为 0。

第一步：根据题意列出真值表。

由于 8421BCD 码每一位数是由四位二进制数组成，且其有效编码为 0000~1001，而 1010~1111 是不可能出现的，故在真值表中当作任意项来处理。其值表如下表：

十进制数	输入对应的 8421BCD 码				输出
	A	B	C	D	F
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0
2	0	0	1	0	0
3	0	0	1	1	0
4	0	1	0	0	0
5	0	1	0	1	0

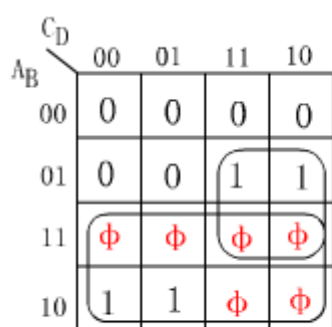
6	0	1	1	0	1
7	0	1	1	1	1
8	1	0	0	0	1
9	1	0	0	1	1
10	1	0	1	0	ϕ
11	1	0	1	1	ϕ
12	1	1	0	0	ϕ
13	1	1	0	1	ϕ
14	1	1	1	0	ϕ
15	1	1	1	1	ϕ

第二步：根据真值表写出其化简过的与非表达式。

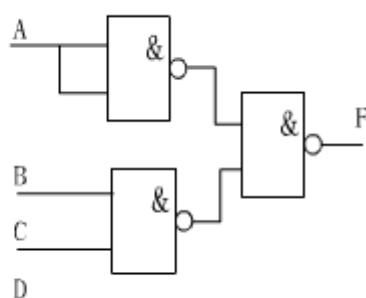
由下图 a 的卡诺图不难化简写出其与非的表达式为：

$$F = A + BC$$

$$= \overline{\overline{A} \overline{BC}}$$



a



b

第三步：根据简化的与非表达式画出如上图 b 所示的逻辑电路图。

3、组合逻辑电路设计中的实际问题

上面介绍的是组合逻辑的一般设计方法，实际遇到的问题往往比较复杂。下面对设计过程常见的问题进行讨论。

★输入端的限制问题（扇入问题）

1. 多余输入端的处理

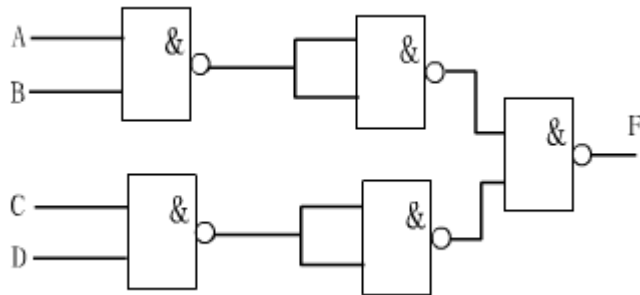
多余输入端的处理可分为两种情况加以处理：即输入端的逻辑关系是与逻辑关系还是或逻辑关系两种。

输入端为与逻辑时：对于 TTL 电路可将多余输入端接高电平、与其它输入端并联或悬空（但在干扰比较严重的场合不能将多余输入端悬空）；对于 CMOS 的输入与逻辑只能接成高电平或输入端相并联，但不能悬空。

输入端为或逻辑时：无论对于 TTL 电路，还是 CMOS 电路可将多余输入端接低电平、与其它输入端并联。

2. 电路提供的输入端少于实际需要的输入端

当集成电路的输入端少于实际电路需要的输入端数时较输入有多余端的处理来得复杂，通常采用分组的方法进行解决。下图你应该不难看懂。



★扇出问题

在我们设计电路时，最终的电路可能存在一个门电路的输出带的负载非常多，可能超过器件的带负载能力，由于负载一般为同系列的门电路，故这问题通常叫做扇出问题。

解决这种问题可通过两种方法来解决：一种是采用扇出系数大的门作为输出（通过在器件手册称为带缓冲的门），一般这种门的扇出可达 20，这一般是可以满足要求的。另一种方法可采用分组的方法增加驱动能力，这与上图的工作原理类似。

第四章 常用组合逻辑功能器件

§ 4.1 编码器

定义与功能

编码器功能正好与译码器功能相反，将某一时刻仅一个输入有效的多个输入的变量情况用较少的输出状态组合来表达出现的一种器件，通常使用的编码器一般分为： 2^n 到 n 及10到8421BCD码的编码。

编码器的功能

下面我们通过一个例子来说明编码器的逻辑功能。

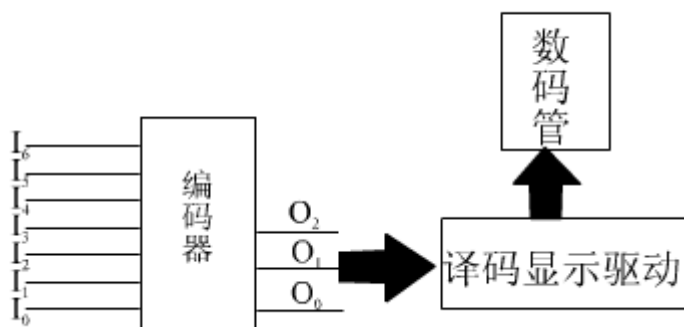
例 一个7层高的大楼，其每层有一个火警报警传感器，如有火警希望在控制中心的数码显示屏上能显示出火警的楼层数，假设不会在两层上同时出现火警。

这是一个实际使用编码器的例子，我们在上一节里学过了译码显示驱动器电路，其输入是8421BCD码，而现在其每层有一个传感器，也就相当于其输入的7根，这里无法直接与译码显示电路相连，须在这两之间加上一个转换电路，将其7种状态转换为4位(或更少位)的二进制输出。

由于7个传感器，并且同一时刻仅一个传感器有效，故输入共7种状态，我们可以用3位二进制数据来描述其状态，假设输入用 $I_0, I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$ ，输出为 O_0, O_1, O_2 。我们可以将其状态用真值表表示为：

I_6	I_5	I_4	I_3	I_2	I_1	I_0	O_2	O_1	O_0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
1	0	0	0	0	0	0	1	1	0

根据上面的分析我们可以画出下图的工作框图。



根据真值表及其每个时刻仅一个输入有效，于是可写出输出与输入的表达式如下：

$$O_2 = I_6 + I_5 + I_4$$

$$O_1 = I_6 + I_3 + I_2$$

$$O_0 = I_5 + I_3 + I_1$$

标准编码器器件

74148 是一个 8-3 线的优先编码器电路。

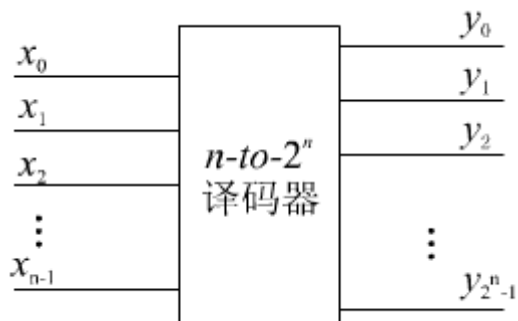
§ 4.2 译码器

译码器是组合逻辑电路的一个重要的器件，其可以分为：变量译码和显示译码两类。

变量译码一般是一种较少输入变为较多输出的器件，一般分为 2^n 译码和 8421BCD 码译码两类。

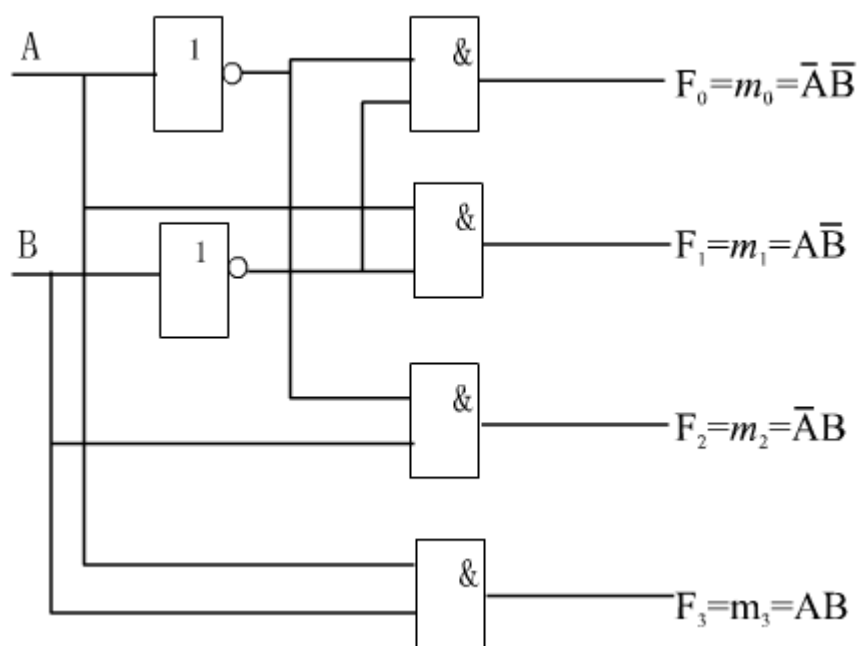
显示译码主要解决二进制数显示成对应的十、或十六进制数的转换功能，一般其可分为驱动 LED 和驱动 LCD 两类。

变量译码：变量译码器是一个将 n 个输入变为 2^n 个输出的多输出端的组合逻辑电路。其模型可用下图来表示，其是输入变化的所有组合中，每个输出为 1 的情况仅一次，由于最小项在真值表中仅有一次为 1，所以输出端为输入变量的最小项的组合。故译码器又可以称为最小项发生器电路。



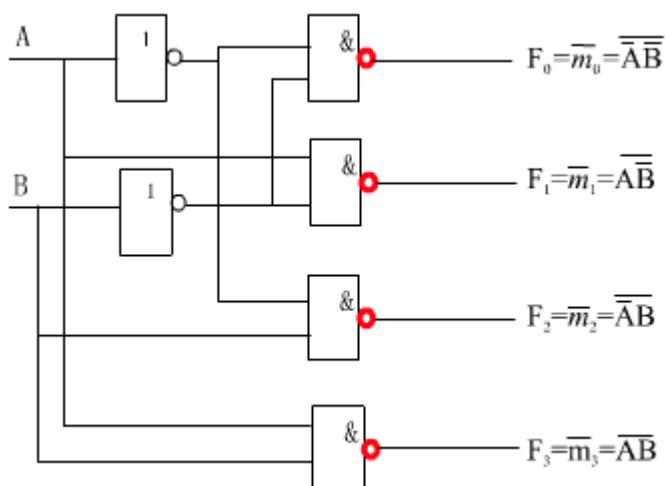
1、译码器电路结构

在讨论译码器的功能前我们来看一下译码器的内部结构，下图是一个主要由与门电路构成的 2 输入译码器，其输出共有 2^2 个（即 4），从图上可以每个其输出对应于一个最小项。在这电路中当输入 BA 的取值为 10，即对应于十进制数的 2 时，其 F_2 输出为高电平，其余的输出为 0。



下图同样是一个 2 输入的译码器，但由于其主要使用了与非门构成的，其每个输出对应于一个最小项的非。在这电路中，当输入 BA 的取会为 10 时，其输出 F_2 不再为 1，而是输出为 0，其余的输出为 1。

我们将下面这种译码器电路看作输出低电平有效（即当输入变量对应于十进制 i 时，其对应的第 i 个输出端为低电平，其余为高电平）。而前面的译码器当然就是高电平有效了。



上面列出的两个电路为 2 输入的情况，对于输入为 2 个以上的情况也与此相同，同样可以有输出高电平有效的，也有输出低电平有效的。

2、用译码器实现逻辑功能

由于任何一组合逻辑电路都可以写成最小项表达式形式，而译码器电路的输出列出了该电路的所有最小项表达式（或最小项的非表达式），故我们可能用译码器电路实现各种组合逻辑电路。

例 用译码器实现 $F(X, Y, Z) = \sum (0, 1, 4, 6, 7) = \prod M(2, 3, 5)$

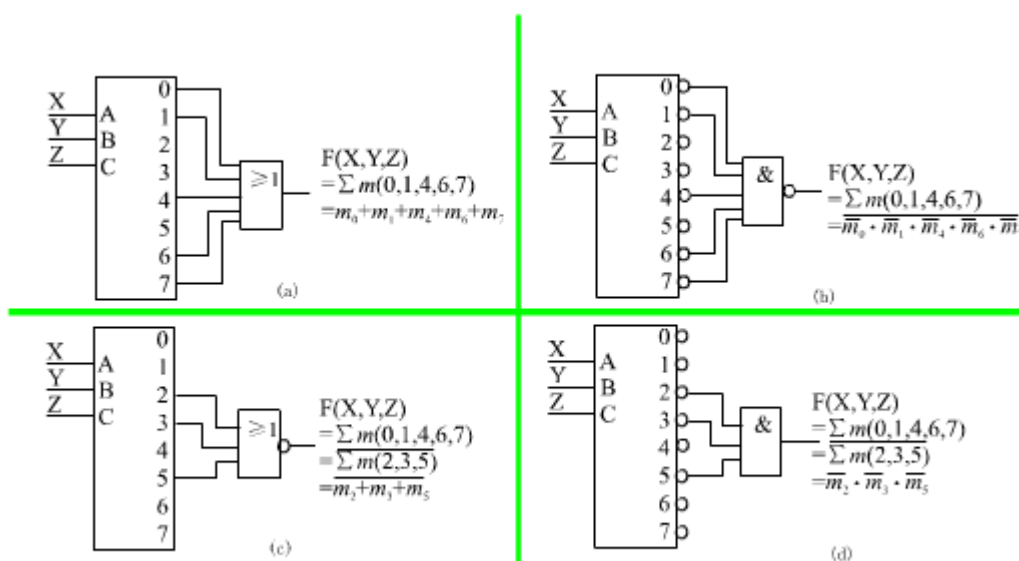
我们实现该逻辑功能可以有几种方法，下图列出了四种方法，从这四个图中你应可以总结出其规律。其中：

图 a 为高电平有效输出加或门的实现方法；

图 b 为低电平有效输出加与非门的实现方法；

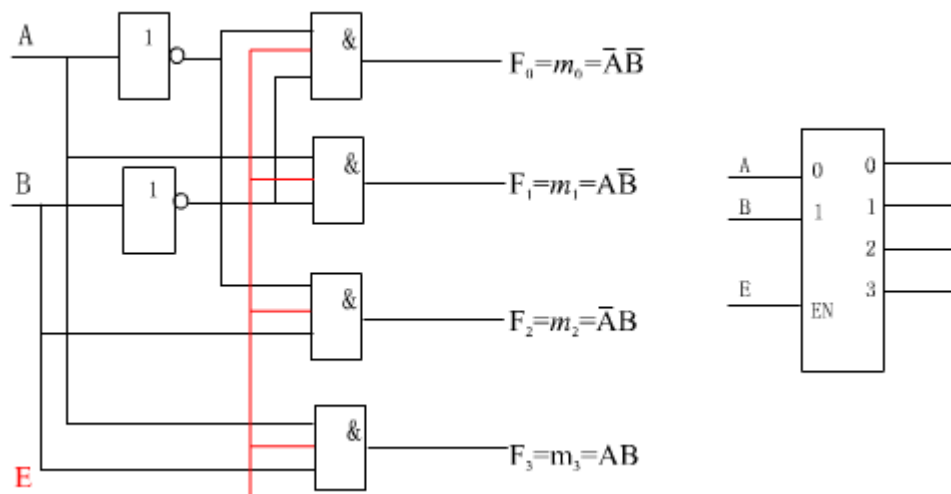
图 c 为高电平有效输出加或非门的实现方法；

图 d 为低电平有效输出加与非门的实现方法；

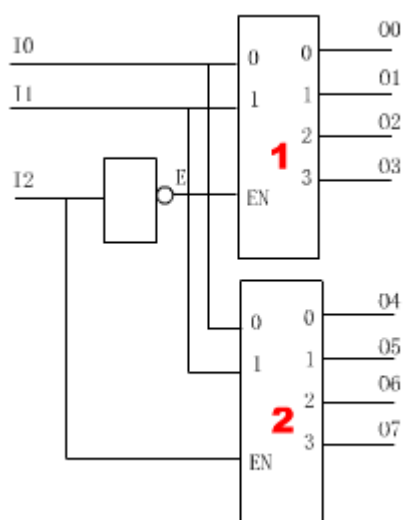


3、使能输入端 (Enable Inputs)

在大规模集成电路中经常会碰到使能端 (Enable Pin)，使能端可以是输入，也可以是输出，其是用来扩展大规模集成电路功能的输入 / 输出端，下图 a 是一个 2 输入译码器上加上一个输入 E，由于输入端 E 的加入，其功能发生了变化，当 $E=0$ 时，其输出全部为 0，而该译码器在没有加上 E 端时，其为高电平有效，这时其输出端没有一个处于有效工作状态，我们可以理解为 $E=0$ 时，该译码器不工作；当 $E=1$ 时，我们看到，其译码器可以正常工作，我们把这种输入端在 $E=1$ 时能正常工作的使能端叫做高电平有效。下图 b 为其简化的逻辑符号。

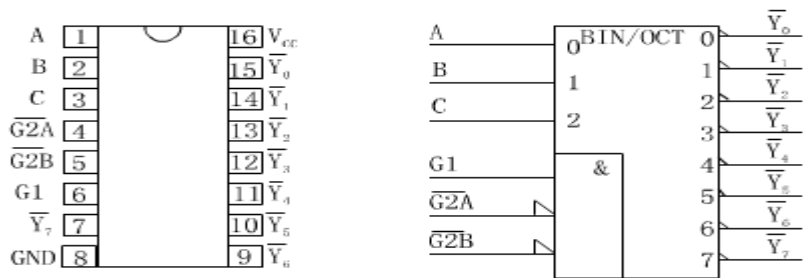


下图是使用使能端将两个 2 输入的译码器转变为 3 输入的译码器的例子，在下图中当 I_2 为低电平时，第 1 个译码器的使能端为高电平，其正常工作，而第 2 个译码器此时不工作，于是译码器 1 的输出对应于输入 $I_3I_2I_1$ 的 0~3；当 I_2 为高电平时，译码器 2 工作，而译码器 1 不工作，故其输出对应于输入 $I_2I_1I_0$ 的 4~7，故下图电路实现了利用使能端将 2 输入的译码器扩展为 3 输入的译码器。



4、标准中规模译码器电路

在中规模集成电路中译码器有几种型号，使用最广的通常是 74138，其是一个 3 到 8 的译码器，下图是其逻辑符号及管脚排布，下表中列出了该器件的逻辑功能，从表中可以看出其输出为低电平有效，使能端 G_1 为高电平有效， \bar{G}_2 , \bar{G}_3 为低电平有效，当其中一个为低电平，输出端全部为 1。



输 入					输 出							
使能端		选 择 端										
G_1	$/G_2^*$	C	B	A	$/Y_0$	$/Y_1$	$/Y_2$	$/Y_3$	$/Y_4$	$/Y_5$	$/Y_6$	$/Y_7$
1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1
1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1
1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
×	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	×	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

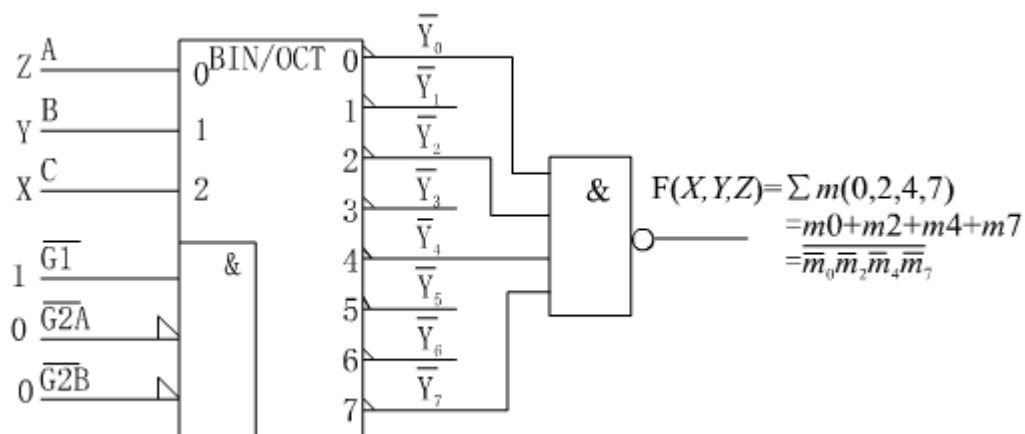
$/G_2^* = /G_{1A} + /G_{2B}$

例 试用 74138 实现函数 $F(X, Y, Z) = \sum m(0, 2, 4, 7)$

用 74138 实现函数与前面讲到的译码器实现逻辑函数的方法相同，但须注意两点：

1. 74138 的输出是低电平有效，故实现逻辑功能时，输出端不可接或门及或非门（因为每次仅一个为低电平，其余皆为高电平）；

2. 74138 与前面不同的是，其有使能端，故使能端必须加以处理，否则无法实现需要的逻辑功能。下图给出了其最终的电路。



显示译码

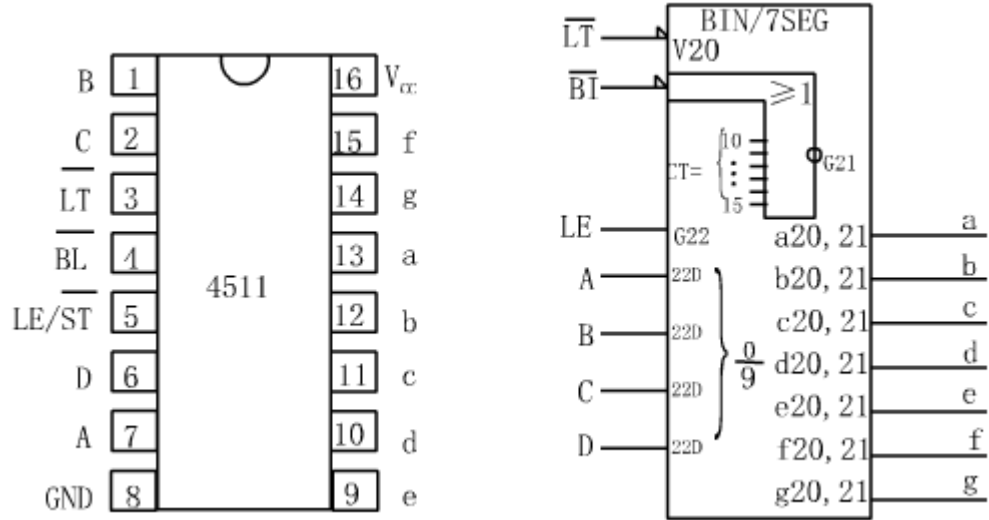
5、常用的显示器件工作原理

在数字系统中常见的数码显示器通常有：发光二极管数码管(LED 数码管)和液晶显示数码管(LCD 数码管)两种。发光二极管数码管是用发光二极管构成显示数码的笔划来显示数字，由于发二极管会发光，故 LED 数码管适用于各种场合。液晶显示数码管是利用液晶材料在交变电压的作用下晶体材料会吸收光线，而没有交变电场作用下有笔划不会听吸光，这样就可以来显示数码，但由于液晶材料须有光时才能使用，故不能用于无外界光的场合（现在便携式电脑的液晶显示器是用背光灯的作用下可以在夜间使用），但液晶显示器有一个最大的优点就是耗电相当节省，所以广泛使用于小型计算器等小型设备的数码显示。

6、LED 译码驱动器

发光二极管点亮只须使其正向导通即可，根据 LED 的公共极是阳极还是阴极分为两类译码器，即针对共阳极的低电平有效的译码器；针对共阴极 LED 的高电平输出有效的译码器。

4511 是输出高电平有效的 CMOS 显示译码器，其输入为 8421BCD 码，下图和表分别 4511 的管脚排布、逻辑符号和逻辑功能表。



输 入							译 码 输 出						
使能输入			变量输入										
/LT	/BL	/ST/LE	D	C	B	A	a	b	c	d	e	f	g
1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1
1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1
1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1
1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1
0	×	×	×	×	×	×	1	1	1	1	1	1	1

1	0	×	×	×	×	×	1	1	1	1	1	1	0
1	1	1	×	×	×	×	※	※	※	※	※	※	※
※ 表示状态锁定在 LE=0 时，D~A 的状态													

图中：

/LT:试灯极，低电平有效，当其为低电平时，所有笔划全部亮，如不亮表示该笔划有问题；

/BL:灭灯极，低电平有效，当其为低电平时，不管输入的数据状态如何，其输出全为低电平，即所有笔划熄灭；

/ST / LE:选通/锁存极，其是一个复用的功能端，当输入为低电平时，其输出与输入的变量有关；当输入为高电平时，其输出仅与该端为高电平前的状态，并且输入 DCBA 端不管如何变化，其显示数值保持不变。

D, C, B, A: 8421BCD 码输入，其 D 位为最位；

a~g:输出端，为高电平有效，故其输出应与其阴极的数码管相对应。

7、LCD 译码驱动器*

LCD 译码驱动器电路与 LED 的译码驱动电路不同，其输出不是高电平或低电平，而是脉冲电压，当输出有效时，其输出为交变的脉冲电压，否则为高电平或低电平。

§ 4.3 数据选择器

数据选择器又称为多路选择器 (*Multiplexer*) 是一种多个输入一个输出的中规模器件，其输出的信号在某一时刻仅与输入端信号的一路信号相同，即输出为输入端信号中选择一个输出。

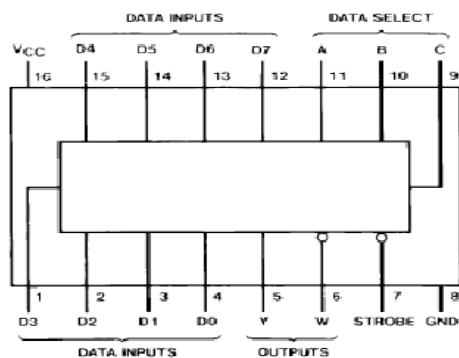
我们在日常生活中常常会碰到这种多路选择器的情况，如家庭音响系统中在选择音源时，可以在 CD、录音磁带、收音机中选择一路进行欣赏，这是将多个信号源中选择一路进行输出，但这例子中的信号是模拟信号，而这里主要讲的是数据信号。

1、数据选择器的电路结构

数据选择器在上面已经讲到是在多个输入中选择一路进行输出，至于选择哪一路，须首先对输入信号进行编号，另外还须一个选择哪一路输入的选择信号，于是我们可得到 4 输入的多路选择器，下表列出了其工作的情况。

B	A	Y
0	0	D ₀
0	1	D ₁
1	1	D ₂
1	1	D ₃

- 1、标准中规模数据选择器:这里以 74151 为例说明其结构及逻辑功能。下图为 74151 的逻辑符号。这里以 74151 为例说明其结构及逻辑功能。下图为 74151 的逻辑符号。



引出端符号：

A、B、C

D0~D7

STROBE

W

Y

选择输入端

数据输入端

选通输入端（低电平有效）

反码数据输出端

数据输出端

常见标准中规模数据选择器有 74153(双 4 选 1 多路选择器)、74151A(8 选 1 多路选择器)、74150(16 选 1 多路选择器), 这里以 74151A 为例说明其结构及逻辑功能。下图为 74151A 的逻辑符号。

地 址 输 入				输 出	
A ₂	A ₁	A ₀	/ST	Y	/Y
×	×	×	1	0	1
0	0	0	0	D ₀	/D ₀
0	0	1	0	D ₁	/D ₁
0	1	0	0	D ₂	/D ₂
0	1	1	0	D ₃	/D ₃
1	0	0	0	D ₄	/D ₄
1	0	1	0	D ₅	/D ₅
1	1	0	0	D ₆	/D ₆
1	1	1	0	D ₇	/D ₇

3、数据选择器组合逻辑电路

从数据选择器的输出与输入的表达式中可以看出，其实际上是数据输入与地址输入的最小项相与的关系，所以数据选择器可以实现各种组合逻辑功能。

第五章 触发器

§ 5.1 引言部分

一、时序电路概述

同步时序电路的状态只在统一的信号脉冲控制下才同时变化一次，如果信号脉冲没有到来，即使输入信号发生变化，电路的状态仍不改变。

异步时序电路的状态变化不是同时发生的，它没有统一的信号脉冲（时钟脉冲用 CP 表示），输入信号的变化就能引起状态的变化。

二：时序电路的表示形式

时序电路按输入变量的依从关系可分为米里型和莫尔型。米里型电路的输出是输入变量的现态函数；莫尔型电路的输出仅与电路的现态有关。

一般用 $Q^n(t)$ 表示现态函数，用 $Q^{n+1}(t)$ 表示次态函数。它们统称为状态函数，一个时序电路的主要特征是由状态函数给出的。

三：时序电路的特征

时序电路中记忆功能是靠触发器来实现的，我们设计和分析时序电路的对象就是触发器。

描述时序电路时通常使用状态表和状态图，我们分析时序电路的方法通常是比较相邻的两种状态（即现态和次态）。

例 1: 列出下表所示时序电路的逻辑表达式、状态表和状态图

逻辑表达式为: $Q^{n+1} = AQ^n + BQ^n$ $F = A \oplus B + AB$,

它的状态表为如下右图所示

状态图如下右图所示:

Q^n	A	B	Q^{n+1}	F
0	0	0	0	1
0	0	1	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	1	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	1

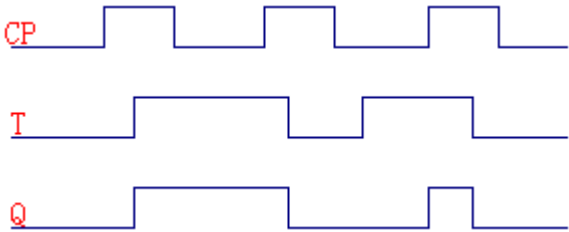
$Q^n \backslash AB$	00	01	11	10
0	0/1	0/0	1/0	1/1
1	1/1	0/0	1/0	0/1

§ 5.2 R-S 触发器和 D 触发器

	R-S 触发器	D 触发器																								
逻辑符号																										
特征方程	$Q^{n+1}=S_d+R_dQ^n$	$Q_{n+1}=D$																								
状态表	<table><tr><th>$Q^n \backslash S_d R_d$</th><th>00</th><th>01</th><th>11</th><th>10</th></tr><tr><th>0</th><td>×</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><th>1</th><td>×</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	$Q^n \backslash S_d R_d$	00	01	11	10	0	×	1	0	0	1	×	1	1	0	<table><tr><th>$Q^n \backslash D$</th><th>0</th><th>1</th></tr><tr><th>0</th><td>0</td><td>1</td></tr><tr><th>1</th><td>0</td><td>1</td></tr></table>	$Q^n \backslash D$	0	1	0	0	1	1	0	1
$Q^n \backslash S_d R_d$	00	01	11	10																						
0	×	1	0	0																						
1	×	1	1	0																						
$Q^n \backslash D$	0	1																								
0	0	1																								
1	0	1																								
状态图																										
功能概述	<p>Sd=0, Rd=1 时，触发器处于置位状态，次态=1</p> <p>Sd=1, Rd=0 时，次态=0，处于复位状态。</p> <p>Sd=Rd=1 时，触发器状态不变，处于维持状态。次态=现态</p> <p>Sd=Rd=0 时，次态=现态=1，破坏了触发器的平衡，触发器处于禁止状态。（工作是不</p>	<p>当 CP=0 时，触发器不工作，处于维持状态。</p> <p>当 CP=1 时，它的功能如下：</p> <p>当 D=0 时，次态=0，</p> <p>当 D=1 时，次态=1，</p> <p>由此可见，当触发器工作时它的次态由输入控</p>																								

	允许出现这种情况)	制函数 D 来确定。
		(CP 为时钟脉冲, 它使触发器有节奏的工作)

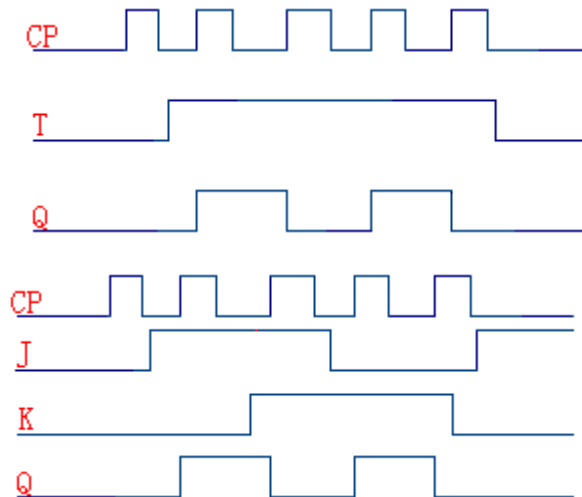
例 1、已知 D 触发器的 CP 脉冲、D 输入端的输入波形，画出次态的波形图。



§ 5.3 T 触发器和 JK 触发器

	T 触发器	JK 触发器																								
逻辑符号																										
特征方程	$Q^{n+1}=TQ^n+TQ^n$	$Q^{n+1}=JQ^n+KQ^n$																								
状态表	<table><tr><th>$Q^n \backslash T$</th><th>0</th><th>1</th></tr><tr><th>0</th><td>0</td><td>1</td></tr><tr><th>1</th><td>1</td><td>0</td></tr></table>	$Q^n \backslash T$	0	1	0	0	1	1	1	0	<table><tr><th>$Q^n \backslash JK$</th><th>00</th><th>01</th><th>11</th><th>10</th></tr><tr><th>0</th><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><th>1</th><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>	$Q^n \backslash JK$	00	01	11	10	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
$Q^n \backslash T$	0	1																								
0	0	1																								
1	1	0																								
$Q^n \backslash JK$	00	01	11	10																						
0	0	0	1	1																						
1	1	0	0	1																						
状态图																										
功能概述	<p>CP=0 时，触发器不工作，处于维持状态</p> <p>CP=1 时，触发器的功能如下：</p> <p>T=0 时，次态=现态；</p> <p>T=1 时，次态与现态相反：触发器翻转</p>	<p>当 CP=0 时，触发器不工作，处于维持状态</p> <p>当 CP=1 时，触发器的功能如下：</p> <p>当 JK 为 00，01，10 时实现 R-S 触发器的功能</p> <p>当 JK 为 11 时它实现 T 触发器的功能。</p>																								

例 1. 已知 T 触发器的 CP 脉冲、T 的输入波形，试画出输出波形。（如下图）



例 2. 已知 JK 触发器的 CP 脉冲、JK 的输入波形，画出输出波形。（如上图）

基本触发器的空翻和振荡现象及解决

(1) 触发器在应用中，CP 脉冲期间控制端的输入信号发生变化或 CP 脉冲过宽，有时会使触发器存在空翻和振荡现象，它破坏了触发器的平衡。

(2) 为了解决这个问题，必须改进电路设计，实际中常用的结构有三种类型：

主从触发器. 它的类型有: 主从 R-S 触发器、主从 JK 触发器。

维持阻塞触发器. 维持就是在 CP 期间触发器完成其预定功能; 阻塞就是在 CP 期间阻止触发器产生不应有的操作。它的类型有: 维持阻塞 D 触发器。

边沿触发器. 它分为上升沿触发、下降沿触发、上升下降沿同时触发三种情况。边沿触发也就是在 CP 脉冲上升或下降的瞬间，输出状态发生改变。

§ 5.4 触发器的相互转换

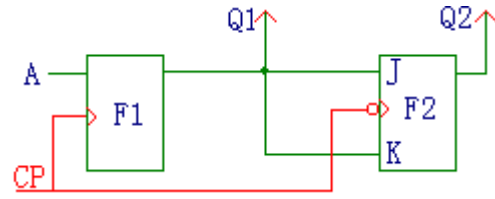
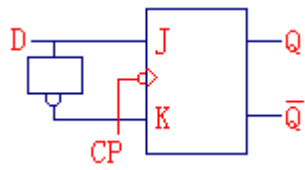
基本触发器之间是可以互相转换的，JK 触发器和 D 触发器是两种最常用的触发器，别的触发器可以通过这两种触发器转化得来，它们之间也可相互转化。

JK 触发器具有两个输入控制端，它转化为别的触发器十分方便。

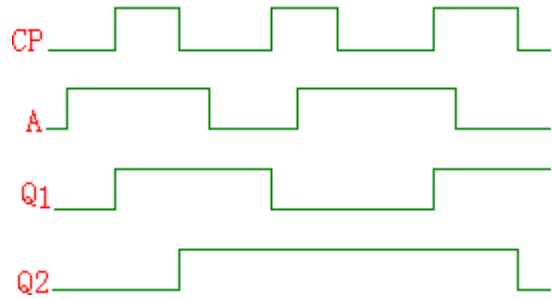
我们转化后怎样判断它们的正确性呢？是根据各触发器的特征方程来验证

例 1: 已知 D 触发器，试把它转化为 JK 触发器。

D 触发器的特征方程为: $Q^{n+1} = D$ JK 触发器的特征方程为 $Q^{n+1} = JQ^n + KQ^n$ ，由此可以看出转化电路如下左图



例 2: 在上右图中 F1 是 D 触发器, F2 是 JK 触发器, CP 和 A 的波形如右上图所示, 试画出 Q1, Q2 的波形.



从电路图中我们可以看到 F1 是在上升沿触发, F2 是在下降沿触发.

所以波形图如右图所示:

§ 6.1 同步时序电路分析

在分析同步时序电路时分为以下几个步骤:

分清时序电路的组成.

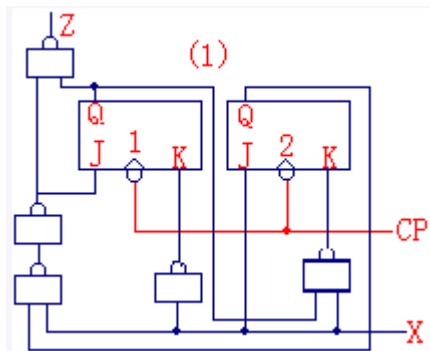
列出方程. 根据时序电路的组合部分, 写出该时电路的输出函数表达式. 并确定触发器输入信号的逻辑表达式(激励函数), 由此得到触发器的特征方程.

由上步得出的方程写出状态真值表, 把触发器的现态和外界输入信号作为时序电路的输入信号.

通过状态真值表得到该时序电路的状态图和状态表.

通过电路的状态表和状态图, 对电路进行功能描述.

例 1: 分析图(1)所示的电路, 作出状态转换表及状态转换图, 并作出输入信号为 0110111110 的输出波形.



1. 列方程.

激励方程为: $J_1 = XQ_2$, $K_1 = X$; $J_2 = X$, $K_2 = XQ_1$

特征方程为: $Q_1^{n+1} = XQ_2 + XQ_1$, $Q_2^{n+1} = XQ_2 + XQ_1Q_2$

输出方程为: $Z = XQ_1Q_2$

2. 列状态转换真值表. 如表(2)所示:

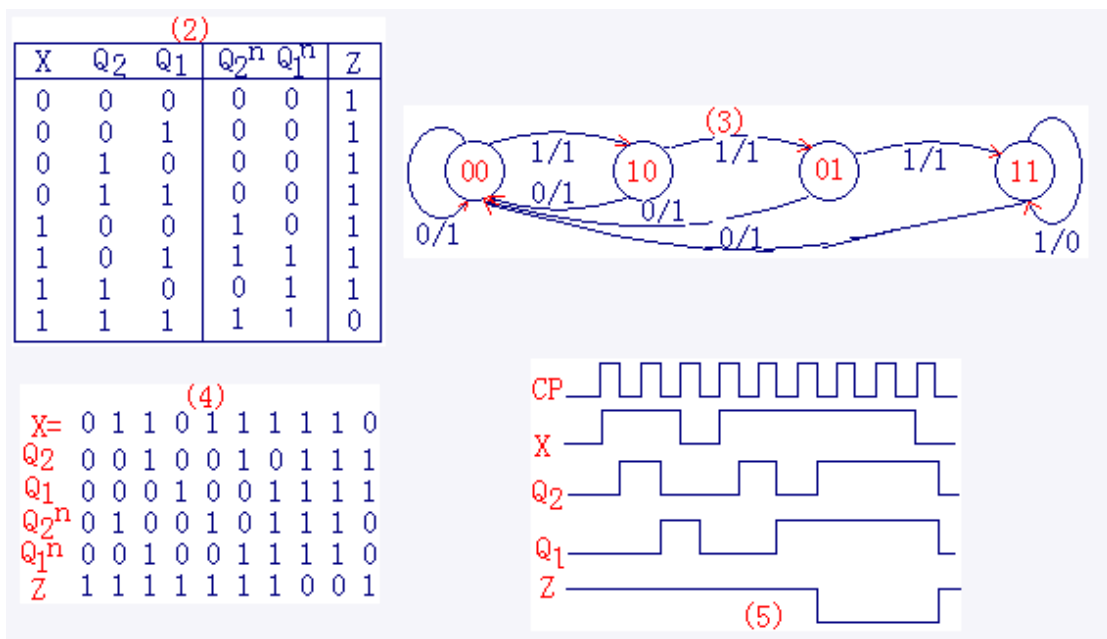
3. 画出状态迁移图. 如图(3)所示:

4. 功能描述.

由状态迁移表可看出, 该电路是“1111”序列检测电路, 当

出现该序列时, 输出为“1”, 否则为“0”

5. 画时序图. 先列出时序表, 根据时序表(如图(4))作出时序图如图(5)所示:



§ 6.2 同步时序电路设计

1. 建立原始状态图.

建立原始状态图的方法是:

确定输入、输出和系统的状态函数(用字母表示).

根据设计要求, 确定每一状态在规定条件下的状态迁移方向, 得到原始状态图.

2. 化简原始状态.

在制作原始状态图时, 难免会出现多余状态(触发器的个数增多 激励电路过于复杂等), 因此要进行状态化简, 化简时应根据具体情况来考虑.

3. 分配化简后的状态.

把化简后的状态用二进制代码来表示称为状态编码. 时序电路中, 电路的状态是由触发器的状态来描述的.

例 1. 设计一个“111”序列检测器. 题意即检测连续三个“1”输出为“1”. 允许重合.

1. 画出状态迁移图. 如图(1)所示:

2. 列出状态表. 如表(2)所示(化简前); 如表(3)所示(化简后)

3. 化简状态. 通过状态表可以看出, 所列状态为最简状态.

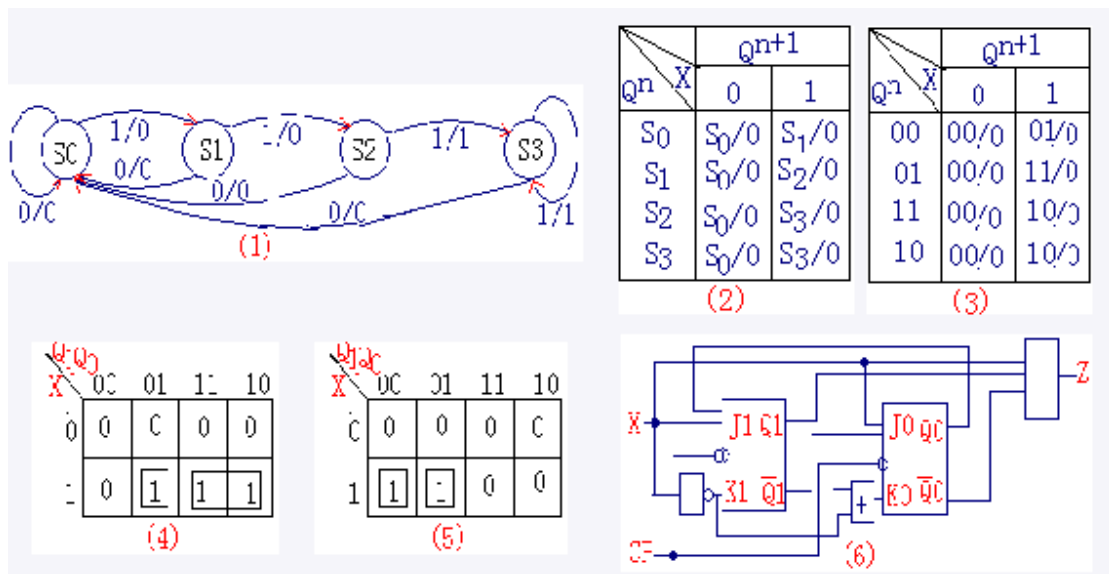
4. 状态分配. $S_0 \rightarrow Q_1 Q_0 = 00$; $S_1 \rightarrow Q_1 Q_0 = 01$; $S_2 \rightarrow Q_1 Q_0 = 10$; $S_3 \rightarrow Q_1 Q_0 = 11$.

5. 求激励方程. 如用 JK 触发器则激励方程为(由卡诺图(4、5)得):

$$Q_1^{n+1} = XQ_1^n Q_0^n + XQ_1^n J_1 = XQ_0^n, \quad K_1 = X;$$

$$Q_0^{n+1} = XQ_1^n Q_0^n + XQ_1^n Q_0^n J_0 = XQ_1^n K_0 = XQ_1^n$$

6. 画出逻辑电路图. 如图(6)所示:



§ 6.3 异步计数器的分析与设计

异步计数器的时钟脉冲不是同步的, 因此在设计时要特别注意各触发器的时钟信号.

§ 7.1 计数器

计数器的分类:

按进位模数分为模 2 计数器和非模 2 计数器。

进位模是计数器所经历的独立状态的总数, 也就是进位制数。

模 2 计数器就是进位模为 2^n 的计数器。其中 n 为触发器的级数; 非模 2 计数器就是进位模非 2^n 的计数器。

按计数脉冲的输入方式分为同步计数器和异步计数器。

同步计数器是相应的触发器的计数脉冲也相同, 使相应的触发器同时翻转。异步计数器是相应的触发器的计数脉冲不相同, 并且不同时翻转。

按计数增减趋势分为递增计数器、递减计数器和双向计数器。

递增计数器是每来一个时钟脉冲触发器的组成状态按二进制代码规律增加, 递减计数器就是按二进制代码规律减少。

双向计数器是可增可减, 由控制端来决定。

按电路集成度分为小规模集成计数器和中规模集成计数器。

1、同步计数器的分析与设计

在设计同步计数器是由于已经明确了状态数、状态代码和状态迁移关系, 所以不需要制作原始状态图、状态化简和状态分配。

1、二进制计数器的设计

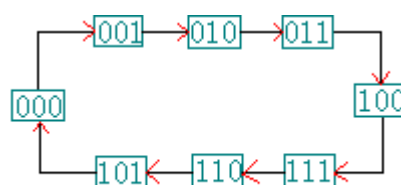
模为 2 的同步计数器称为二进制计数器, 它的特点是没有多余状态, 触发器的利用率高。它通常是采用自然二进制编码。

例 1. 设计一个三位二进制同步递增计数器。

三位二进制的进位模数为 $2^3=8$, 它的状态表为: 如图(1)所示. 状态迁移图为: 如图(2)所示

Q_c^n	Q_b^n	Q_a^n	Q_c^{n+1}	Q_b^{n+1}	Q_a^{n+1}
0	0	0	0	0	1
0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	1	1
0	1	1	1	0	0
1	0	0	1	0	1
1	0	1	1	1	0
1	1	0	1	1	1
1	1	1	0	0	0

(1)



(2)

将现态 Q_C^n 、 Q_B^n 、 Q_A^n 作为输入，次态 Q_C^{n+1} 、 Q_B^{n+1} 、 Q_A^{n+1} 作为输出，通过卡诺图可得出各触发器的次态方程为：

$$Q_C^{n+1} = Q_A^n Q_B^n Q_C^n + Q_A^n Q_C^n + Q_B^n Q_C^n = Q_A^n Q_B^n Q_C^n + Q_A^n Q_B^n Q_C^n$$

$$Q_B^{n+1} = Q_A^n Q_B^n + Q_A^n Q_B^n$$

$$Q_A^{n+1} = Q_A^n$$

把求得的次态方程与选用触发器的特征方程作比较, 求得各触发器的激励函数:

$$J_C = Q_A^n Q_B^n$$

$$J_B = Q_A^n$$

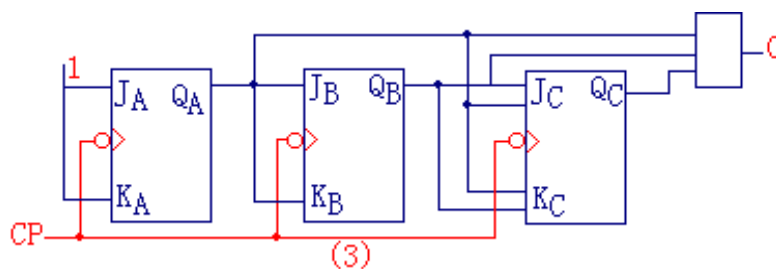
$$J_A=1$$

$$K_c = Q_A^n Q_B^n$$

$$K_B = Q_A^n$$

$K_A=1$

它的逻辑电路图为：如图(3)所示



位数增多的二进制计数器的设计可按以上方法进行,当位数 >5 时,就不能用上面的方法了(卡诺图不易制),从上面的例子我们可以看出:低级触发器除外,每一位触发器的 J、K 激励函数都是由它的低位各触发器原码相与而成。由此就可以设计更多位的二进制计数器了。

二进制的减法计数器的设计方法与加法相似,只不过状态迁移图不同。

2. 非 2^n 进制计数器

由于这种进制不是 2 的倍数, 所以存在着多余状态, 在设计中应把这些多余状态作无关项来考虑. 在实际中用的最多的是十进制计数器, 它需要四个触发器.

例 1. 五级触发器的进位模数最大为: ()

- A. 五进制 B. 十进制 C. 十六进制 D. 三十二进制

因为是五级触发器, 所以它的最大进位模数为 $2^5=32$, 所以答案为 D

例 2. 设计一个模六计数器.

由于 $2^2 < 6 < 2^3$, 所以模六计数器需要三级触发器组成. 三级触发器有 8 种状态, 因此存在着两种多余状态, 我们任选其

中的六种,它的状态图为:如图(1)所示,

我们通过各级触发器(用 JK 触发器来实现)的卡诺图可得各级触发器的次态

方程为:

$$Q_C^{n+1} = Q_A^n Q_C^n + Q_A^n Q_C^n$$

$$Q_B^{n+1} = Q_B^n Q_C^n + Q_B^n Q_C^n$$

$$Q_A^{n+1} = Q_A^n Q_B^n + Q_A^n Q_B^n$$

$$C = Q_A^n Q_B^n$$

Q_C^n	Q_B^n	Q_A^n	Q_C^{n+1}	Q_B^{n+1}	Q_A^{n+1}	C
0	0	0	1	0	0	0
1	0	0	1	1	0	0
1	1	0	1	1	1	0
1	1	1	0	1	1	0
0	1	1	0	0	1	0
0	0	1	0	0	0	1

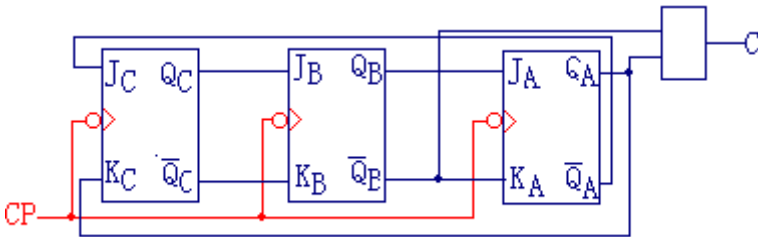
(1)

由次态方程可得激励方程为:

$$J_C = Q_A^n \quad K_C = Q_A^n$$

$$J_B = Q_C^n \quad K_B = Q_C^n$$

$$J_A = Q_B^n \quad K_A = Q_B^n$$



(2)

所的逻辑电路图为:如图(2)所示

这类计数器由于状态没有用完,存在着多余状态,所以它就有个**自启动**和**自校正**问题.

自启动就是当电源合上之后,电路能否进入所用的状态之中的任一状态,如果能则有,否则即无.

自校正就是计数器正常工作时,由于一些原因,使计数状态离开正常的的序列,若经过若干个节拍后电路如能返回

正常的计数序列,则有校正能力.如不能,则无校正能力.

注:具有自校正能力的计数器也具有自启动能力.

§ 7.2 寄存器和移位寄存器

§ 7.2.1 寄存器

移位寄存器具有数码寄存和移位两个功能,在移位脉冲的作用下,数码如向左移一位,则称为左移,反之称为右移。

移位寄存器具有单向移位功能的称为单向移位寄存器,即可向左移也可向右移的称为双向移位寄存器。

移位寄存器的设计比较容易,因为它的状态受移位功能的限制。

例:若现态为“001”它的次态只有两种可能,分别是:“000”或“010”,不可能出现别的情况,否则就没有意义.

§ 7.2.2 集成移位寄存器 (74194)

§ 8.1 随机存储器 (RAM)

§ 8.2 只读存储器 (ROM)

一、ROM 及其应用

ROM 在数字系统中的应用十分广泛。在使用时，它只能读出信息，而无法写入信息。

1、ROM 的组成

ROM 的电路结构包含三个主要部分：

存储矩阵：它是由许多存储单元排列而成，而且每个存储单元都被编为一个地址（地址变量）。

地址译码器：它是将输入的地址变量译成相应的地址控制信号，该控制信号可将某存储单元从存储矩阵中选出，并将存储在该单元的信息送至输出缓冲器。

输出缓冲器：它是作为输出驱动器和实现输出的三态控制。

2、ROM 的应用（通过例题说明）

例 1：把表（1）的内容用 ROM 电路表示出来。

从表中我们可以得出如下表达式：

$$D_3 = A_1 A_0 + A_1 \bar{A}_0$$

$$D_2 = A_1 A_0 + A_1 \bar{A}_0$$

$$D_1 = A_1 A_0 + A_1 \bar{A}_0$$

$$D_0 = A_1 A_0 + A_1 \bar{A}_0 + A_1 \bar{A}_0$$

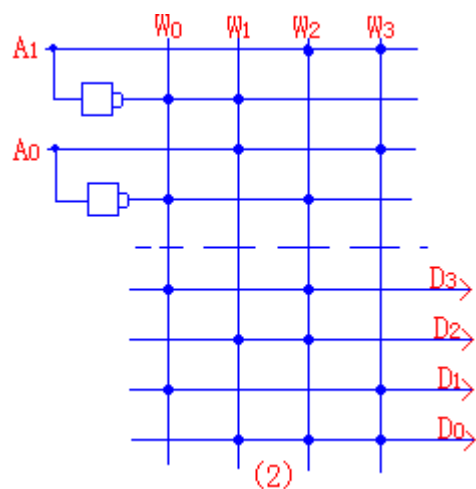
A ₁	A ₀	D ₃	D ₂	D ₁	D ₀
0	0	1	0	1	0
0	1	0	1	0	1
1	0	1	1	0	1
1	1	0	0	1	1

(1)

将地址变量作为逻辑变量，则地址译码器提供的每个最小项，即相当于“与”运算。每一位线，对最小项实现“或”运算。

得的 ROM 阵列：如图 (2) 所示。

从例题我们可以看出：ROM 电路是将逻辑函数通过与—或网络的形式表示出来。通过地址译码器形成输入变量的所有的最小项（实现“与”运算），再通过存储矩阵实现“或”运算，这样就形成了各个输出函数。



3、ROM 的扩展

存储器的容量是字数与字长的乘积。ROM 的扩展分为字扩展和位扩展，位扩展即字长扩展。

§ 9.1 多谐振荡器(只要求知道它的工作特点和用途)

多谐振荡器的工作特点是:

电路不具有稳定状态,但是具有两个暂稳态;

不需外加触发信号,电路就能自动产生矩形波的输出;

电路工作就是在两个暂稳态之间来回转换。

它的用途是:

产生定量的矩形脉冲。

§ 9.2 单稳态触发器

单稳态电路只有一个稳定状态。在外界触发脉冲的作用下,电路从稳态翻转到暂态,在暂态维持一段时间之后,又返回稳态,并在输出端产生一个矩形脉冲。

它的工作特点:

电路只有一个稳定状态;

当外界触发脉冲来后,电路从稳态翻转到暂态,并在暂态停留一段时间,而且在输出端产生一个宽度为 T_w 的矩形脉冲。

它的应用:

在数字系统中,单稳态电路常用于整形。即:把不规则的波形转换成宽度、幅度相同的波形。

例 1. 怎样改变输出脉冲的宽度(即延迟时间)呢?

答: 有三种方法 1. 改变电阻 R; 2. 改变电容 C; 3. 改变控制电压端的接法。

例 2. 如图(1)所示:改变控制电压端(引脚 5)的电压值,可改变()

答案为: D

A. 输出电压的高低电平

B. 输出电压的周期

C. 对输出波形无影响

D. 输出电压的脉冲的宽度

§ 9.3 施密特触发器

施密特电路的工作特点是：

有两个稳定状态，但是这两个稳定状态要靠输入信号来维持，而且转换也要靠输入信号的转换来实现
输出电压和输入电压具有迂回特性，抗干扰能力强。

施密特电路的用途是：

整形：将不好的矩形波，变为较好的矩形波；

波形转换：将三角波、正弦波和其它波形转换为矩形波；转换后的输出波形与输入波形相同；

幅度鉴别：可以将输入信号中的幅度大于某一数值的信号检测出来。

例 1. 施密特电路具有（ ）

- A. 一个稳定状态 B. 两个稳定状态 C. 三个稳定状态 D. 没有稳定状态

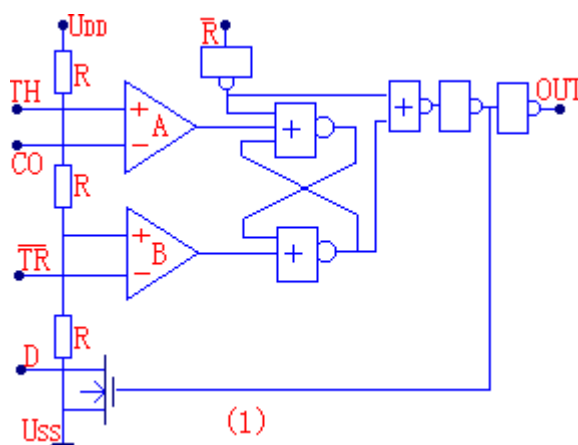
答案为：B

§ 9.4 555 定时器及其应用

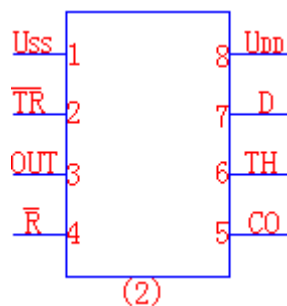
555 定时电路的应用十分广泛，它由 TTL 集成定时电路和 CMOS 集成定时电路，这二者功能完全相同，不同之处是：TTL 集成定时电路的驱动能力比 CMOS 集成定时电路大。

1、555 定时电路的组成

555 定时电路是由三个 5 千欧电阻组成分压器、两个高精度电压比较器、一个基本 R-S 触发器、一个作为放电通路的管子及输出驱动电路组成。它的逻辑电路图为：如图（1）所示



它的逻辑符号为：如图（2）所示



功能描述：（功能表如表 3 所示）

当输入端 **R** 为低电平时，不管别的输入端为何种情况，输出为**低电平**, **CMOS 管工作**。

当引脚 6 的输入电平**大于 $2/3U_{DD}$** 并且引脚 2 的输入电平**大于 $1/3U_{DD}$** , 输出为**低电平**, **CMOS 管工作**

当引脚 6 的电平**小于 $2/3U_{DD}$** 并且引脚 2 的输入电平**大于 $1/3U_{DD}$** , 输出为**原状态**。

当引脚 2 的电平**小于 $1/3U_{DD}$** , 电路输出为**高电平**, **NMOS 管关断**。

TH	\overline{TR}	\overline{R}	OUT	D
×	×	L	L	接通
$> \frac{2}{3}U_{DD}$	$> \frac{1}{3}U_{DD}$	H	L	接通
$< \frac{2}{3}U_{DD}$	$> \frac{1}{3}U_{DD}$	H	原状态	原状态
×	$< \frac{1}{3}U_{DD}$	H	H	关断

图中的L为低电平，H为高电平
(3)

例 1. 555 集成电路, 改变电压控制端(引脚 5)的电压可改变()

A. 高触发端, 低触发端的电平 B. 555 定时电路的高低电平

C. 开关放电管的开关电平 D. 置“0”端 R 的电平

答案为：A

例 2. 555 定时电路 R 端的作用是什么？

答: 它的作用是: 复“0”. 不管 555 定时电路是何种状态, 只要 R 输入为低电平, 输出即为低电平; 只有它输入为高电平时定时电路才工作。

第八章 信号的运算和处理电路

讲义摘要：

8.1 基本运算电路

引言

运算电路是集成运算放大器的基本应用电路，它是集成运放的线性应用。讨论的是模拟信号的加法、减法、积分和微分、对数和反对数（指数）、以及乘法和除法运算。为了分析方便，把集成运放电路均视为理想器件，应满足：

- (1) 开环电压增益 $A_u = \infty$
- (2) 输入电阻 $R_i = \infty$ ，输出电阻 $R_o = 0$ ，
- (3) 开环带宽 $BW = \infty$
- (4) 同相输入端端压与反相输入端端压 $v_P = v_N$ 时，输出电压 $v_o = 0$ ，无温漂

因此，对于工作在线性区的理想运放应满足“虚短”：即 $v_P = v_N$ ；“虚断”：

即 $i_P = i_N = 0$ 本章讨论的即是上述“虚短”、“虚断”四字法则的灵活应用。

一、加减法电路

1. 反相输入求和电路

在反相比例运算电路的基础上，增加一个输入支路，就构成了反相输入求和电路，如图 8.1.1 所示：

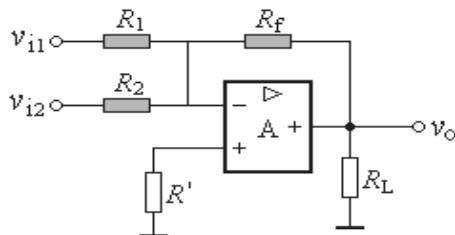


图 8.1.1 反相输入求和电路

两个输入信号电压产生的电流都流向 R_f ，所以输出是两输入信号的比例和：

$$v_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} v_{i1} + \frac{R_f}{R_2} v_{i2}\right) = -(v_{i1} + v_{i2})$$

2. 同相输入求和电路

在同相比例运算电路的基础上，增加一个输入支路，就构成了同相输入求和电路，如图 8.1.2 所示：

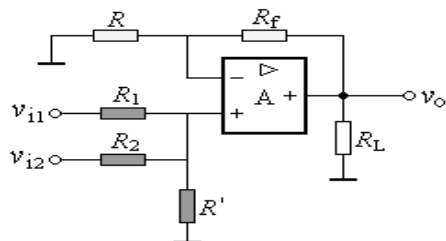


图 8.1.2 同相输入求和电路

因运放具有虚断的特性，对运放同相输入端的电位可用叠加原理求得：

$$v_+ = \frac{(R_2 // R') v_{i1}}{R_1 + (R_2 // R')} + \frac{(R_1 // R') v_{i2}}{R_2 + (R_1 // R')}$$

而

$$v = \frac{R}{R_f + R} v_o$$

可得:

$$v = v_i$$

$$v_o = \left(\frac{R_p}{R_1} v_{i1} + \frac{R_p}{R_2} v_{i2} \right) \left(\frac{R + R_f}{R} \times \frac{R_f}{R_f} \right) = \frac{R_p}{R_n} \times R_f \times \left(\frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} \right)$$

当

$$R_p = R_n, \quad R_1 = R_2 = R_f \text{ 时,}$$

$$v_o = v_{i1} + v_{i2}$$

3. 双端输入求和电路

双端输入也称差动输入，双端输入求和运算电路如图 8.1.3 所示：

其输出电压表达式的推导方法与同相输入运算电路相似。当 $v_{i1}=v_{i2}=0$ 时，用叠加原理分别求出 $v_{i3}=0$ 和 $v_{i4}=0$ 时的输出电压 v_{op} 。当 $v_{i3}=v_{i4}=0$ 时，分别求出 $v_{i1}=0$ ，和 $v_{i2}=0$ 时的 v_{on} 。

先求： v_{op}

$$\begin{aligned} v_{op} &= \frac{(R_4 // R') v_{i3}}{R_3 + (R_4 // R')} \left(1 + \frac{R_f}{R_1 // R_2} \right) + \frac{(R_3 // R') v_{i4}}{R_4 + (R_3 // R')} \left(1 + \frac{R_f}{R_1 // R_2} \right) \\ v_{op} &= \frac{R_3}{R_3} \times \frac{(R_4 // R') v_{i3}}{R_3 + (R_4 // R')} \left(1 + \frac{R_f}{R_1 // R_2} \right) + \frac{R_4}{R_4} \times \frac{(R_3 // R') v_{i4}}{R_4 + (R_3 // R')} \left(1 + \frac{R_f}{R_1 // R_2} \right) \\ &= \frac{R_p}{R_3} v_{i3} \left(1 + \frac{R_f}{R_1 // R_2} \right) + \frac{R_p}{R_4} v_{i4} \left(1 + \frac{R_f}{R_1 // R_2} \right) \\ &= \left[\frac{(R_1 // R_2) + R_f}{R_1 // R_2} \times \frac{R_f}{R_f} \right] \left(\frac{R_p}{R_3} v_{i3} + \frac{R_p}{R_4} v_{i4} \right) \\ &= \frac{R_p R_f}{R_n} \left(\frac{v_{i3}}{R_3} + \frac{v_{i4}}{R_4} \right) \end{aligned}$$

式中 $R_p = R_3 // R_4 // R$, $R_n = R_1 // R_2 // R_f$

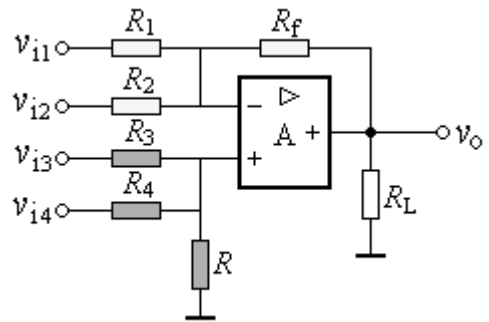


图 8.1.3 双端输入求和电路

再求 v_{on}

$$v_{on} = -\frac{R_f}{R_1} v_{i1} - \frac{R_f}{R_2} v_{i2}$$

$$v_o = v_{op} + v_{on}$$

$$= \frac{R_p R_f}{R_n} \left(\frac{v_{i3}}{R_3} + \frac{v_{i4}}{R_4} \right) - R_f \left(\frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} \right)$$

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, $R_f = R'$ 时, $R_p = R_n$

于是 $v_o = \frac{R_f}{R} (v_{i3} + v_{i4} - v_{i1} - v_{i2})$

4. 加减法运算器

由差动输入放大器演变而来。

由 $I \rightarrow 0$, 有 $I_1 + I_2 = I_f \rightarrow$

$$\frac{U_{i1} - U_-}{R} + \frac{U_{i2} - U_-}{R} = \frac{U_- - U_o}{R} \quad \Rightarrow \quad -U_o = U_{i1} + U_{i2} - 3U_-$$

$$I_3 + I_4 = I_p \rightarrow \frac{U_{i3} - U_+}{R} + \frac{U_{i4} - U_+}{R} = \frac{U_+}{R} \quad \Rightarrow \quad 3U_+ = U_{i3} + U_{i4}$$

由 $U_+ = U_-$ 则 $U_o = -U_{i1} - U_{i2} + U_{i3} + U_{i4}$

若有更多的相加量或相减量, 可以增加或减少电路的相应的输入端。

二、积分和微分运算电路

1. 积分运算电路

积分运算电路的分析方法与求和电路差不多, 反相积分运算电路如图 8.2.1

$$\begin{aligned} \text{根据虚地有 } i &= \frac{v_i}{R}, \text{ 于是} \\ v_o &= -v_c = -\frac{1}{C} \int i_c dt \\ &= -\frac{1}{RC} \int v_i dt \end{aligned}$$

当输入信号是阶跃直流电压 V_I 时, 即

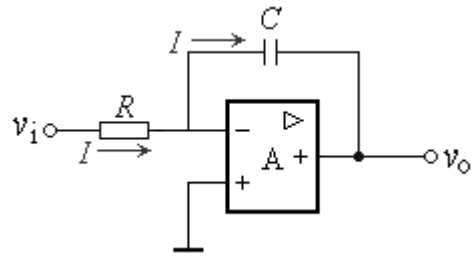
$$v_o = -v_c = -\frac{1}{RC} \int v_i dt = -\frac{V_I}{RC} t$$

2. 微分运算电路

微分运算电路如图 8.2.2 所示:

显然

$$\begin{aligned} v_o &= -i_R R = -i_C R \\ &= -RC \frac{dv_c}{dt} \\ &= -RC \frac{dv_I}{dt} \end{aligned}$$



8.1.4 积分运算电路

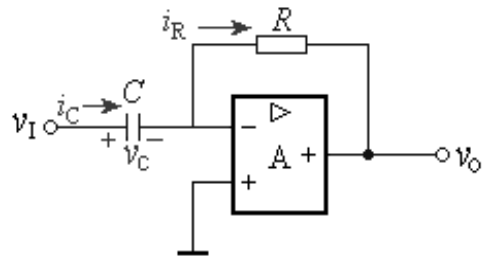


图 8.1.5 微分运算

8.2 实际运算放大器运算电路的误差分析

一、共模抑制比 K_{CMR} 为有限值的情况

集成运放的共模抑制比 K_{CMR} 为有限值时, 对运算电路将引起误差, 现以同相运算放大电路 (图 8.1.5) 为例来讨论。

$$v_P = v_I$$

$$v_N = v_O \frac{R_1}{R_1 + R_f}$$

$$v_{IC} = \frac{v_P + v_N}{2}$$

$$v_{ID} = v_P - v_N$$

$$v_O = A_{vD} v_{ID} + A_{vC} v_{IC}$$

$$K_{CMR} = \frac{A_{vD}}{A_{vC}}$$

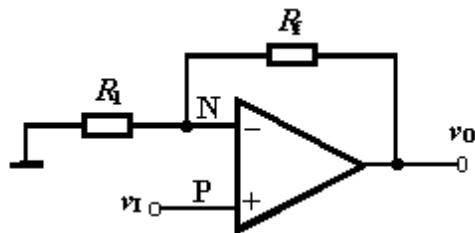


图 8.1.5 同相比例运算电路

闭环电压增益 $A_{vF} = \frac{v_O}{v_I} = (1 + \frac{R_f}{R_1}) \cdot \frac{1 + \frac{1}{2K_{CMR}}}{1 + \frac{(R_1 + R_f)/R_1}{A_{vD}} - \frac{1}{2K_{CMR}}}$

理想情况 $A_{vF} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$

A_{vD} 和 K_{CMR} 越大，误差越小。

二、 V_{IO} 、 I_{IO} 不为零时的情况

输入为零时的等效电路

$$V_P = -(I_{IB} - \frac{I_{IO}}{2})R_2$$

$$V_N = V_O \frac{R_1}{R_1 + R_f} - (I_{IB} + \frac{I_{IO}}{2})(R_1 // R_f) - V_{IO}$$

$$V_P \approx V_N$$

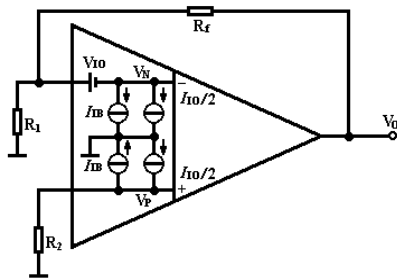


图 8.1.6 等效电路

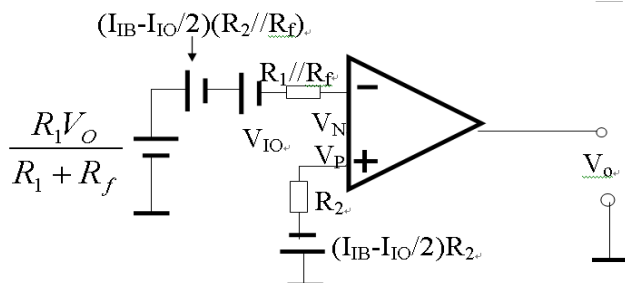


图 8.1.7

解得误差电压

$$V_O = (1 + R_f / R_1) \left[V_{IO} + I_{IB}(R_1 // R_f - R_2) + \frac{1}{2} I_{IO}(R_1 // R_f + R_2) \right]$$

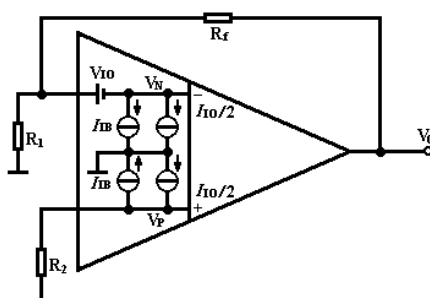
当 $R_2 = R_1 // R_f$ 时，可以消除偏置电流 I_{IB} 引起的误差，此时 $V_O = (1 + R_f / R_1)(V_{IO} + I_{IO}R_2)$

V_{IO} 和 I_{IO} 引起的误差仍存在

当电路为积分运算时，即 R_f 换成电容 C ，则

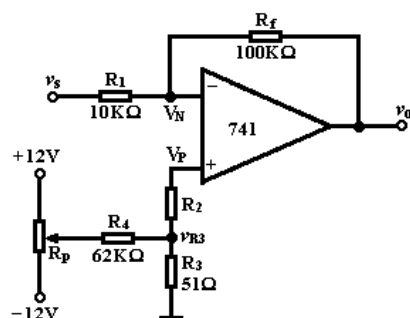
$$v_O(t) = (1 + \frac{R_f}{R_1}) \left\{ [V_{IO}(t) + I_{IO}(t)R_2] + \frac{1}{R_1 C} \left[\int V_{IO}(t) dt + \int I_{IO}(t)R_2 dt \right] \right\}$$

时间越长，误差越大，且易使输出进入饱和状态。



减小误差的方法

- 输入端加补偿电路
- 利用运放自带的调零电路



3. 对数和反对数运算电路

1. 对数运算电路

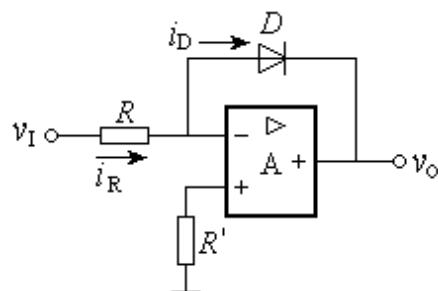
对数运算电路见下图。

由图可知 $i_D = I_S e^{v_D / V_T}$

$$i_R = i_D$$

$$v_O = -v_D$$

$$v_O = -V_T \ln \frac{i_D}{I_S} = -V_T \ln \frac{v_1}{R I_S}$$



2.反对数运算电路

反对数运算电路如下图所示。

$$\begin{aligned}v_O &= -i_R R = -i_D R \\&= -RI_S e^{v_I/V_T} \\&= -RI_S \ln^{-1} \frac{v_I}{V_T}\end{aligned}$$

