

第2篇

电子电路

第2篇

电子电路

主编单位 西安交通大学

编写单位 西安交通大学

主 编 叶德璇

编 写 人 叶德璇 王志宏 翟 钰 林雪亮
张志清 迟钦河

主 审 康华光

常用符号表

A_u ——电压放大倍数	P_i ——输入信号功率
A_i ——电流放大倍数	P_{Ni} ——输入端噪声功率
A_p ——功率放大倍数	P_{No} ——输出端噪声功率
A_{ud} ——差模电压放大倍数	Q ——品质因数
A_{uo} ——开环电压增益	Q^n ——现态
A_F ——反馈放大电路的闭环增益	Q^{n-1} ——次态
BW ——频带宽度	R_i ——输入电阻
C_j ——变容二极管的结电容	R_o ——输出电阻
C_{ext} ——外接定时电容	r ——微变等效电阻
D ——占空比、非线性失真系数	r_{be} ——晶体管基极与发射极之间的微变等效电阻
F ——反馈系数	R_{on} ——开门电阻
f_c ——滤波器的截止频率	R_{off} ——关门电阻
f_0 ——振荡频率、谐振频率、带阻和带通滤波器的中心频率	R_{ext} ——外接定时电容
g_m ——跨导	S_u ——电压调整率
h_i, h_r, h_f, h_o —— h 参数	S_T ——温度系数
I_S ——反向饱和电流	T_w ——脉冲宽度
I_Q ——静态工作点的电流	t_{pd} ——门延迟时间
I_B ——基极静态电流	T_{re} ——恢复时间
I_{os} ——失调电流	T_d ——单稳态电路的分辨时间
I_C ——集电极静态电流	U_T ——热电压, 常温下约为 26mV
I_b ——基极交流电流有效值	U_Q ——静态工作点的电压
I_c ——集电极交流电流有效值	U_{BE} ——基极与发射极之间的静态电压
I_D ——漏极静态电流	U_{CE} ——集电极与发射极之间的静态电压
I_{DSS} ——漏极零偏电流	U_B ——基极对地静态电压
I_{OH} ——截止漏电流	U_i ——输入信号电压的交流有效值
I_{LM} ——最大灌入电流	U_o ——输出信号电压的交流有效值
I_{IL} ——低电平输入电流	U_R ——参考电压
I_{IH} ——高电平输入电流	U_{os} ——失调电压
K ——耦合系数、乘法器系数	U_{GS} ——栅极与源极之间的静态电压
K_{CMR} ——共模抑制比	$U_{GS(off)}$ ——夹断电压
m ——调幅系数	U_{DS} ——漏极与源极之间的静态电压
n ——匝数比	U_Z ——稳压管的稳定电压
NF ——噪声系数	u_c ——截波信号电压
P_o ——输出信号功率	u_n ——调制信号电压
	u_{AM} ——调幅波电压

u_{FM}	调频波电压	Z_i	输入阻抗
u_{PM}	调相波电压	Z_o	输出阻抗
U_{OL}	输出低电平	α	晶体管共基接法的电流放大系数
U_{OH}	输出高电平	β	晶体管共射接法的电流放大系数
U_{th}	TTL 门阈值电压	η	效率
U_{T+}, U_{T-}	施密特比较电平	φ_A	放大电路的相位移角
ΔU_T	回差电压	φ_F	反馈网络的相位移角
V_{CC}, V_{EE}	双极型、晶体管的直流电源电压	ω_0	振荡角频率
V_{DD}, V_{SS}	场效应晶体管的直流电源电压		

第 1 章 电子器件的特性

1 电子器件的非线性特性^{[1]~[3]}

1.1 电压-电流特性

电子器件和电阻等元件组成的电子电路，能产生各种非线性电压-电流特性。

1.1.1 指数函数特性

半导体二极管的电压-电流特性（又称伏安特性）可用下式表示：

$$i = I_S (e^{u/U_T} - 1) \quad (2.1-1)$$

式中 U_T —— 热电压，当常温（约 27~30℃）时，约为 26mV；

I_S —— 反向饱和电流。

正向电压约在 80mV 以上时，其特性大致成指数函数关系，如图 2.1-1 所示。

如果将二极管用作反馈放大电路中反馈元件，就可以得到指数函数的逆函数，即对数特性。

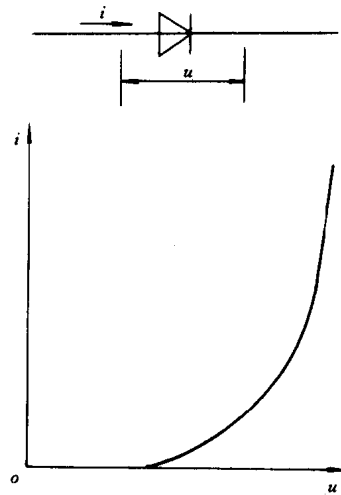
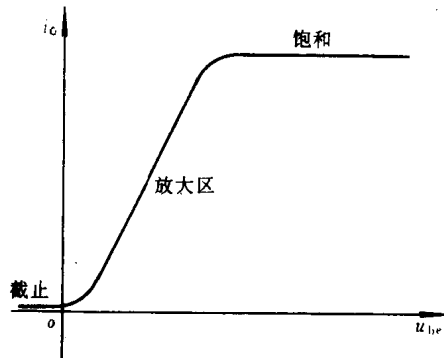
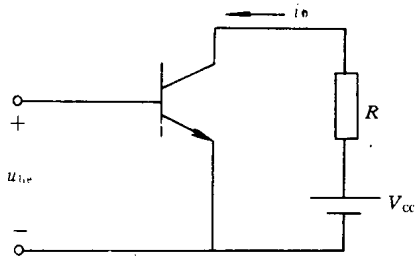
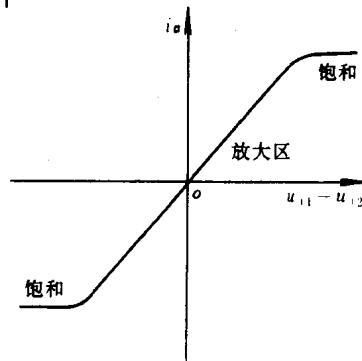
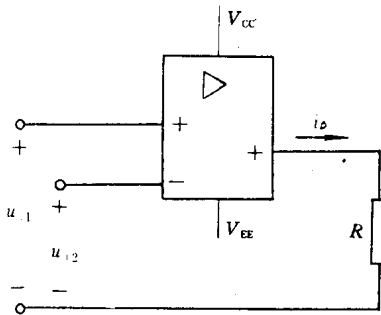


图 2.1-1 半导体二极管指数函数特性



a)



b)

图 2.1-2 截止和饱和

a) 晶体管 b) 集成运算放大器

1.1.2 截止和饱和特性

电子器件在大信号工作时，由于器件处于截止状态或饱和状态，使信号受到限制（如图 2.1-2 所示），利用这种特性可实现整流、控制、开关等功能。

1.1.3 击穿特性

半导体二极管反向击穿特性如图 2.1-3b 所示，可利用其稳压特性组成稳压电路、过电压保护电路等。

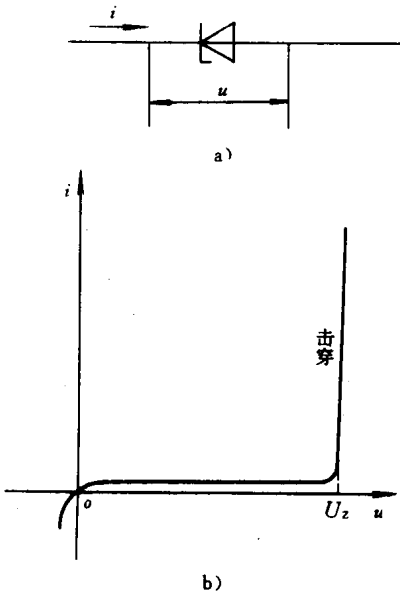


图 2.1-3 击穿特性

1.1.4 平方特性

当半导体二极管、半导体三极管又称晶体管、场效应晶体管等电子器件工作在一定偏置电压时，利用特性曲线的某一非线性范围，加上微变信号后，在工作点附近的电压变化量 Δu 和电流变化量 Δi 之间的关系

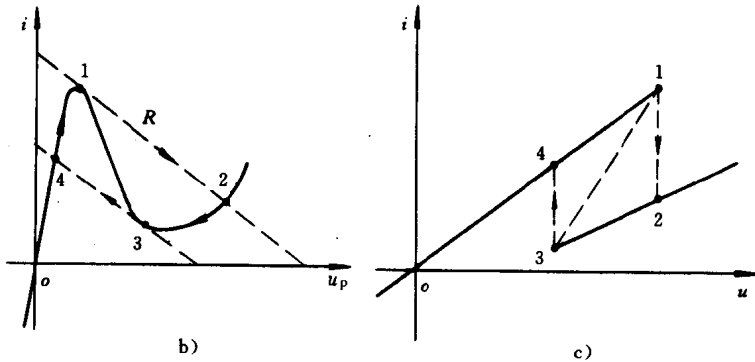
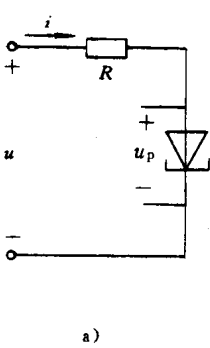


图 2.1-5 隧道二极管的滞回特性

a) 电路 b) 隧道二极管特性 c) 滞回特性

是 $\Delta i \propto \Delta u^2$ 。这种特性可用作乘法电路和变频电路等。

1.1.5 负阻特性

在器件的非线性特性曲线中间区段，具有 du/di 或 di/du 为负值（如图 2.1-4）的特性，称为负阻特性，可以用来组成振荡器。

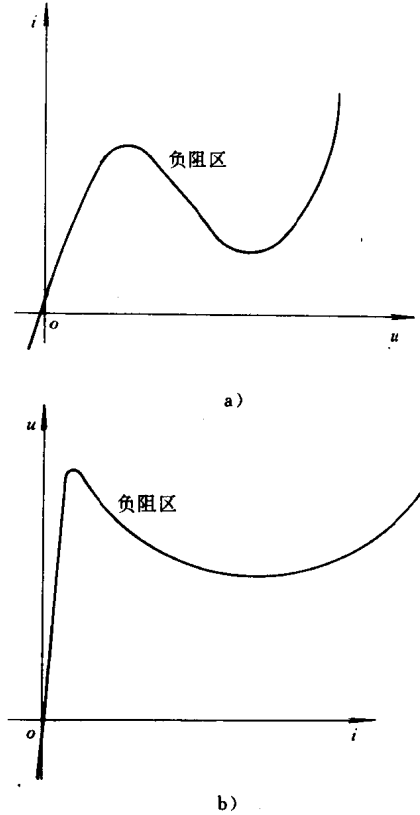


图 2.1-4 负阻特性

a) 隧道二极管 b) 辉光放电管

1.1.6 滞回特性

具有负阻（图 2.1-5b）和击穿（图 2.1-6b）特性

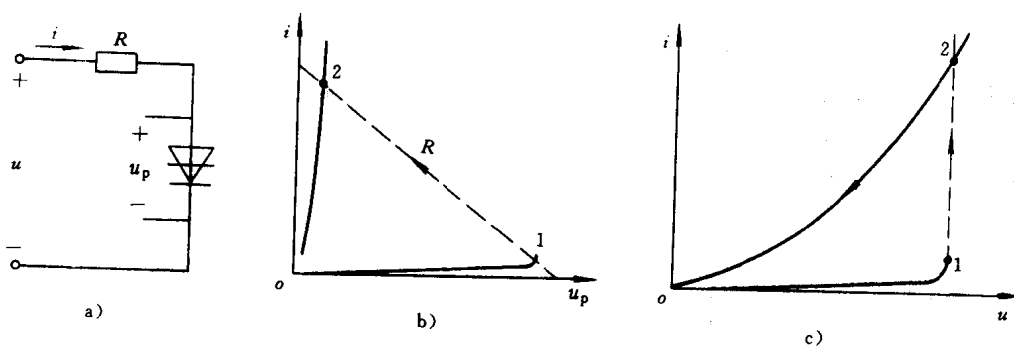


图 2-1-6 反向阻断三极晶间管的滞回特性

a) 电路 b) 反向阻断三极晶间管特性 c) 滞回特性

的器件或电路与电阻组合，可以出现电压与电流的滞回特性，如图 2-1-5c 和图 2-1-6c 所示。这种特性可用于记忆和控制。

1.2 电压-电荷特性

当半导体 PN 结加反向偏压时，可以利用其结电容的大小与所加反向电压的关系，来获得电压与电荷量的非线性关系。利用该特性可构成变容二极管，其特性如图 2-1-7 所示，可作非线性电抗用。

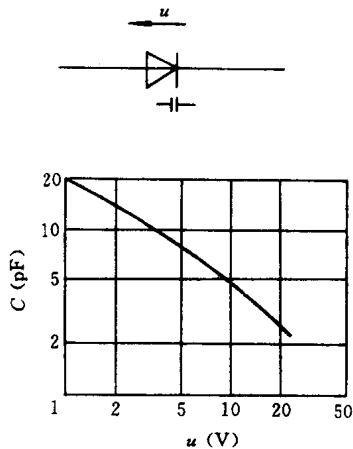


图 2-1-7 变容二极管特性

2 电子器件的控制特性

多端电子器件可用其某两端的电压或电流去控制其他两端间所连接电路中的电压或电流。图 2-1-8 所示的晶体管电路就是利用基极与发射极间输入的控制信号去控制集电极与发射极回路中的集电极电流和集电极与发射极间电压，也就是控制直流电源供给外电路的功率。电子电路中，放大电路是电子器件作线性控制，而开关电路是电子器件作非线性控制。

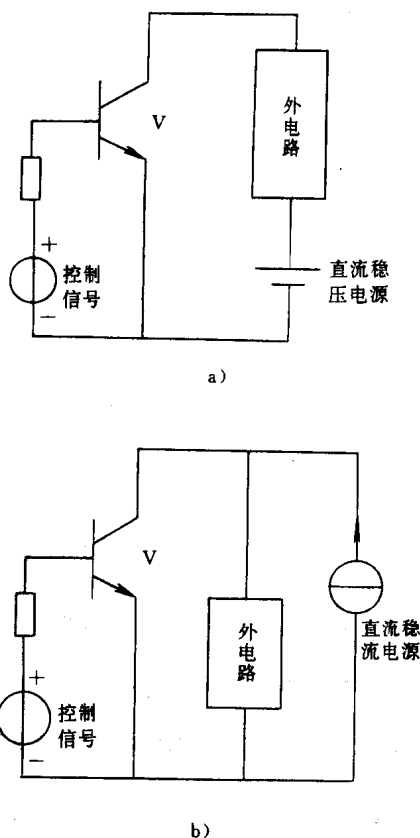


图 2-1-8 控制特性

a) 串联控制 b) 并联控制

3 电子器件的小信号特性

电子器件的伏安特性一般都是非线性的，当其工作于某一设定的工作状态（即静态工作点）下，在小信号作用区内，可以近似认为线性工作，该工作区称为线性区。为设定静态工作点所加的直流电压或电流，称为静态偏置电压或电流。

3.1 二端器件的小信号等效电路

半导体二极管在静态工作点 Q 附近作微小变化工作时 (见图 2.1-9b), 可认为其电压 u 与电流 i 呈线性关系, 则可用一个电阻 r 来等效, 其值为

$$r = \left. \frac{\partial u}{\partial i} \right|_{u=U_Q} \approx \frac{U_T}{I_Q} \quad (2.1-2)$$

式中 I_Q —— 静态工作点的电流值;
 U_Q —— 静态工作点的电压值。

二极管小信号等效电路 (又称微变等效电路或小

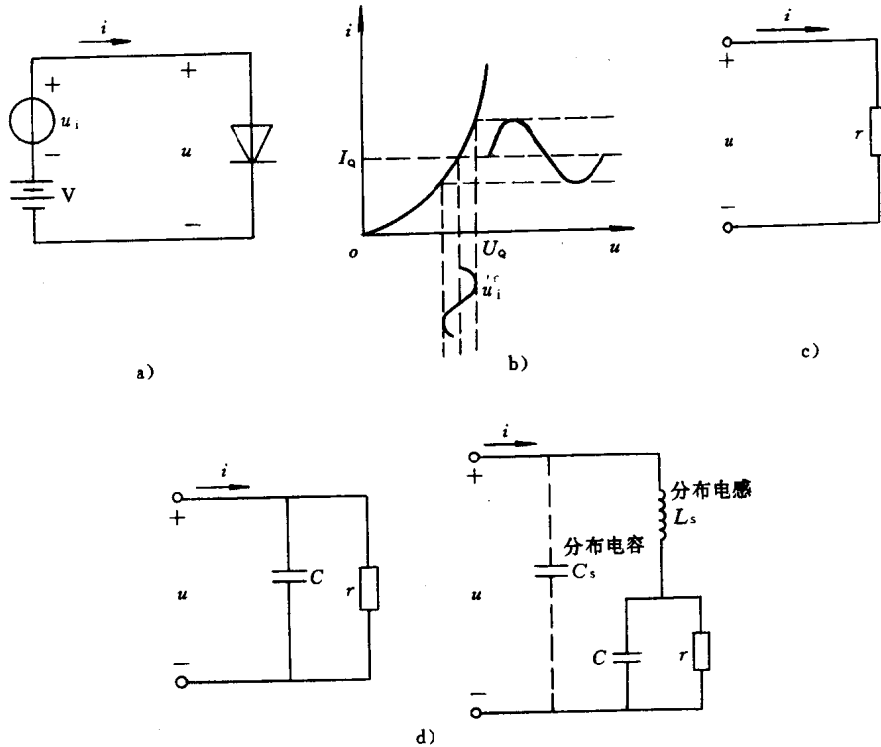


图 2.1-9 半导体二极管小信号等效电路

a) 电路 b) 工作特性 c) 低频微变等效电路 d) 高频微变等效电路

信号模型) 如图 2.1-9c、d 所示, 电阻 r 称为微变等效电阻。当工作点 Q 改变时, 等效电阻 r 也改变。

3.2 三端器件的小信号等效电路

三端器件有双极型晶体管、场效应晶体管 (又称单

极型晶体管)、电子三极管等。它们的小信号等效电路都可用二端口参数作基本参数。这里仅选择实际工作中常用的等效电路。根据二端口参数可画出图 2.1-10 所示的等效电路。在低频工作时, 常用 h 参数, 可得

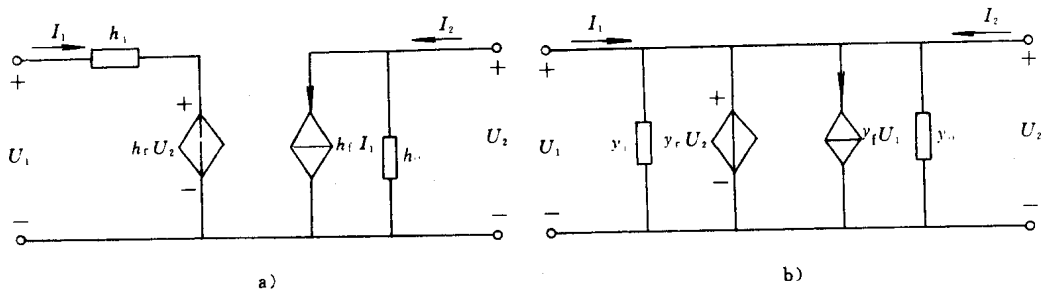


图 2.1-10 用二端口参数的等效电路

a) h 参数 b) y 参数

$$u_1 = h_i i_1 + h_e u_2 \quad (2\cdot1-3)$$

$$i_2 = h_f i_1 + h_o u_2 \quad (2\cdot1-4)$$

高频工作时，也采用 y 参数，如图 2·1-10b 所示。

根据器件的结构和工作原理可画出图 2·1-11 所示的等效电路。如果考虑结电容的存在，则可等效为图 2·1-12 所示电路。

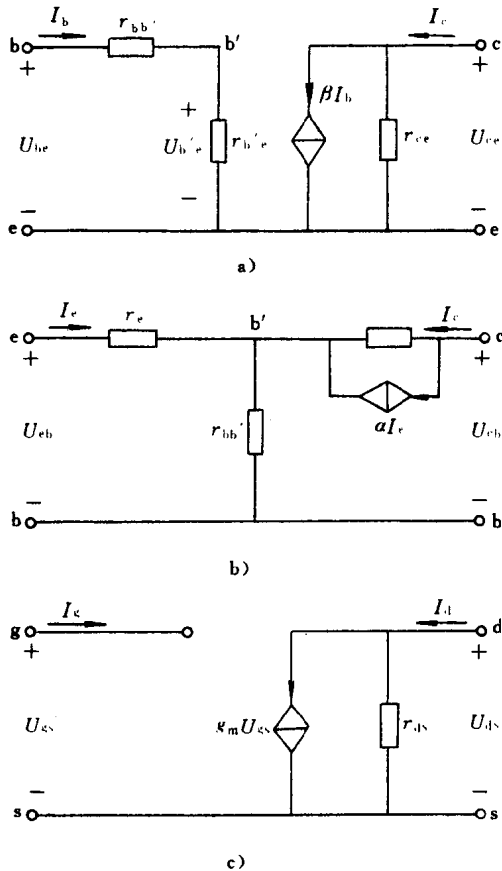


图 2·1-11 按器件结构和工作原理画的等效电路
a) 共射极接法 b) 共基极接法 c) 场效应晶体管

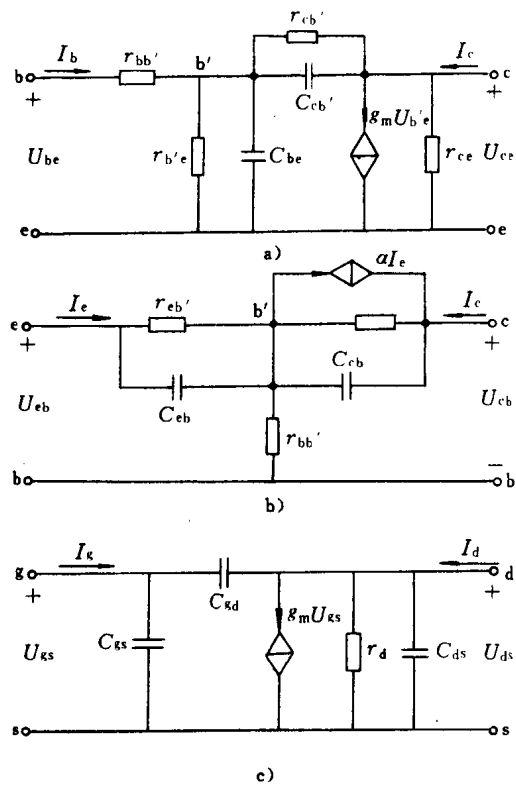


图 2·1-12 考虑结电容存在的等效电路
a) 混合 π 型 (共发射极) b) T 型 (共基极)
c) 场效应晶体管

3·3 线性失真

电子器件及其组成的放大电路的频率响应特性，如图 2·1-13 所示。在放大多频率成分的信号时，虽然电子器件工作在线性区，但因不同频率分量的放大作用不同，就会产生失真，这种失真称为线性失真，又称频率失真。频率响应是放大电路中一个很重要的指标。

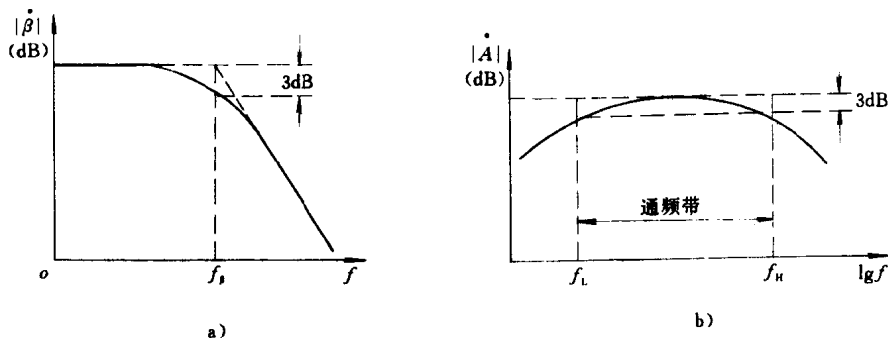


图 2·1-13 幅频特性

a) 晶体管 β 的幅频特性 b) 阻容耦合放大电路的幅频特性

4 电子器件的大信号特性^[3]

当电子器件工作状态超出线性区时，称为大信号工作。此时电子器件的伏安特性为非线性，在电路应用中，有时要设法改善其特性，使其尽量接近线性。但有时可合理地利用非线性特性来实现开关、分频、倍频等功能。另外在大信号下工作，应该考虑器件的极限参数是否满足电路工作的需要，如耐压、耗散功率、最大电流等。

4.1 开关特性

利用电子器件在导通时其等效电阻远小于截止时等效电阻的特性，可作为开关和门电路用。这种特性称为开关特性。在导通状态与截止状态转换过程中，电荷运动存在存储效应，会影响开关动作时间。在作模拟开关应用时，截止时存在的漏电流，导通时存在的一定管压降，都会影响开关性能。

4.2 电子器件的大信号等效电路

典型的晶体管大信号等效电路是埃伯尔斯-莫尔(Ebers-Moll)等效电路，如图 2-1-14 所示。电路中考虑了电荷的存储效应。在计算机辅助分析和设计中常用此等效电路。其非线性特性可采用折线来近似代替，即把特性曲线用若干段折线来等效，以半导体二极管为例来说明，见图 2-1-15。采用不同的折线近似，就会产生不同的误差。图中 $\text{—}|>$ 符号表示理想二极管。

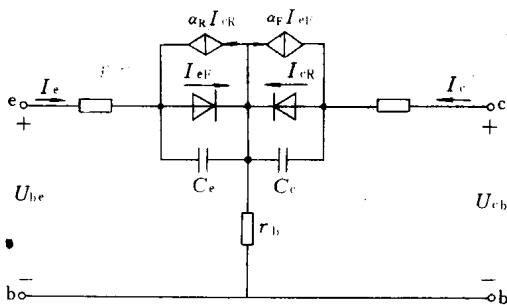


图 2-1-14 大信号等效电路

4.3 非线性失真

一般功率放大电路属于大信号放大工作，会产生饱和失真和截止失真，常称为非线性失真。在乙类推挽功率放大电路中，还会出现交越失真。

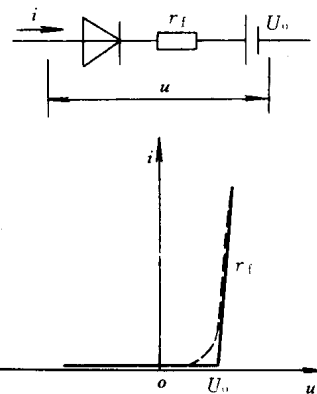
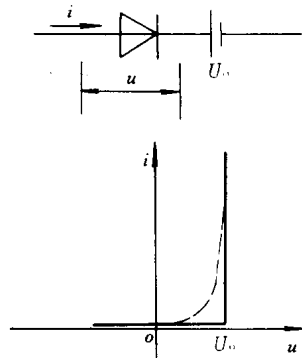


图 2-1-15 折线法近似等效电路

5 电子器件的信号变换功能^{[4]~[7]}

电子器件可以把不同能量形式的各种信号，直接或间接地变换成电信号，或实现其逆变换。在电子电路中，为了隔离，也会采用信号变换。几种常用的变换功能如下：

5.1 压电变换

利用某些晶体材料具有的压电效应进行压电变换。常用的有石英晶体，可用来组成晶体振荡器或压电式传感器。

此外，还有半导体本身的压力电阻变化引起电压-电流特性改变的压敏二极管或压敏晶体管。

5.2 光电变换

光电变换的器件种类很多，有：利用光的照射产生电动势的器件，例如光电二极管、光电晶体管、光电池等；由光的照射引起电阻变化的器件，如光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管；利用光发射电子的器件如光电管、光电倍增管等；还有将电信号变换成光信号的器

件,这类器件有发光二极管、半导体激光器等。可用这些器件组成各种测量仪器。应用发光二极管与光敏三极管组成光耦合器件,使电路中各单元之间实现电隔离。

5.3 热电变换

应用最广泛的热电变换器件是利用温度变化产生电动势的热电偶。除此之外,还有因温度变化引起电阻变化的热敏电阻;反向饱和电流和伏安特性与温度有

关的半导体二极管、晶体管。还可采用光电二极管把物体辐射的红外线变换成物体的温度。

5.4 磁电变换及其他

磁电变换器件的电参数随外加磁场强度的改变而变化,又称磁敏器件,有霍尔器件、磁敏电阻器、磁敏二极管、三极管等。

除上述变换外,还有气敏元件、湿敏元件等,在电子电路中都可实现能量变换。

第2章 放大电路

1 基本电路

双极型晶体管、场效应管等三端器件,由于其中任一端作为输入输出的公共端,从而得到共发射极

(源极)型、共基极(栅极)型、共集电极(漏极)型三种基本电路。这些电路的静态工作点、微变等效电路、输入输出电阻和增益等,如表2.2-1、表2.2-2所示。

表 2.2-1 双极型晶体管放大电路

结构	共发射极型	共基极型	共集电极型
电路图			
静态工作点	$I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_B}$ $I_C = \beta I_B$ $U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$	$U_B \approx \frac{V_{CC}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot R_{B2}$ $I_C \approx I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E}$ $I_B = I_C / \beta$ $U_{CE} \approx V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$	$I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_B + (1 + \beta) R_E}$ $I_C = \beta I_B$ $U_{CE} \approx V_{CC} - I_C R_E$
简化微变等效电路			

(续)

结构	共发射极型	共基极型	共集电极型
输入电阻 R_i	r_{be}	$\frac{r_{be}}{1+\beta}$	$r_{be} + [(1+\beta)(R_E // R_L)]$
输入电阻 R_i	$R_B // r_{be}$	$R_E // \frac{r_{be}}{1+\beta}$	$R_B // [r_{be} + (1+\beta)(R_E // R_L)]$
输出电阻 R_o	R_C	R_C	$\frac{r_{be} + (R_B // R_S)}{1+\beta} // R_E$
管子电流系数	$\frac{I_c}{I_b} = \beta$	$\frac{I_c}{I_e} = \alpha$	$\frac{I_c}{I_b} = 1+\beta$
电压增益 $\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$	$-\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be}}$	$\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be}}$	$\frac{(1+\beta)(R_E // R_L)}{r_{be} + (1+\beta)(R_E // R_L)}$

表 2-2-2 场效应管放大电路

结构	共源极型	共栅极型	共漏极型
电路图			
静态工作点	$\begin{cases} I_D = I_{DSS} \left[1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(off)}} \right]^2 \\ U_{GS} = -I_D R_S \end{cases}$ 上两式解出 I_D 值, 然后得: $U_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S)$	$\begin{cases} U_{GS} = \frac{V_{DD}}{R_{G1} + R_{G2}} R_{G2} \\ I_D = K (U_{GS} - U_{GS(th)})^2 \end{cases}$ 上两式解出 I_D 值, 然后得: $U_{DS} = V_{DD} - I_D (R_D + R_S)$	$\begin{cases} I_D = I_{DSS} \left[1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(off)}} \right]^2 \\ U_{GS} = -I_D R_S \end{cases}$ 上两式解出 I_D 值, 然后得: $U_{DS} = V_{DD} - I_D R_S$
简化微变等效电路			
R_i	R_G	$R_S // \frac{1}{g_m}$	R_G

(续)

结构	共源极型	共栅极型	共漏极型
R_o	R_D	R_D	$R_S // \frac{1}{g_m}$
$A_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$	$-g_m R_D$	$g_m R_D$	$\frac{g_m (R_S // R_L)}{1 + g_m (R_S // R_L)}$

2 主要指标^[8]

1. **增益** 它衡量一个放大器的放大能力,可用双口网络来表示,见图2·2-1。其中 U_o/U_i 、 I_o/I_i 、 $U_o I_o/U_i I_i$ 的比值分别称为电压增益、电流增益及功率增益。增益是无量纲的,工程上为了运算方便,常用分贝表示增益的单位。其定义为

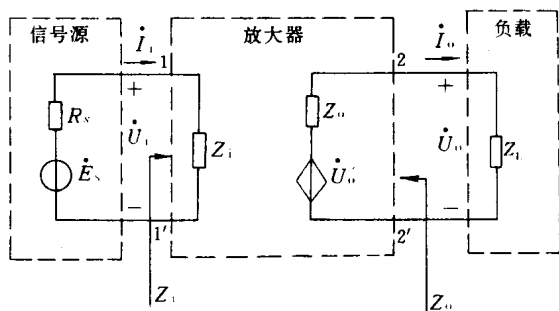


图 2·2-1 放大器的微变等效电路

$$\text{电压增益 } A_u = 20 \lg \frac{U_o}{U_i} \text{ (dB)}$$

$$\text{电流增益 } A_i = 20 \lg \frac{I_o}{I_i} \text{ (dB)}$$

$$\text{功率增益 } A_p = 10 \lg \frac{U_o I_o}{U_i I_i} \text{ (dB)}$$

2. **输入、输出阻抗** 输入阻抗是指从图2·2-1的输入端1-1'看进去的放大电路的输入阻抗,其值为

$$Z_i = \dot{U}_i / \dot{I}_i \quad (2 \cdot 2 \cdot 1)$$

输出阻抗是指从图2·2-1的输出端2-2'看入的放大电路的内阻抗,其值为

$$Z_o = \dot{U}_o / \dot{I}_o \quad (2 \cdot 2 \cdot 2)$$

3. **频率响应** 频率响应表示放大电路对不同频率信号的放大能力,如图2·2-2所示。图中 A_{um} 是电压增益的最大值,对应于 $0.707A_{um}$ 的两个频率 f_L 和 f_H ,分别称为“下限频率”和“上限频率”。 f_H 到 f_L 之间的频带,称为放大电路的“通频带”。

4. **非线性失真系数 D** 由于晶体管的输入~输出特性的非线性,造成放大电路输出波形不同于输入

波形的失真称为“非线性失真”,其大小用非线性失真系数 D 来衡量。设输入信号频率 f_1 的正弦电压为 U_i ,而输出电压中除 f_1 的分量 U_o 外,还产生高次谐波分量 U_{o2} 、 U_{o3} 、 \dots 、 U_{om} ,则 D 定义为

$$D = \frac{\sqrt{U_{o2}^2 + U_{o3}^2 + \dots + U_{om}^2}}{U_{o1}} \times 100\% \quad (2 \cdot 2 \cdot 3)$$

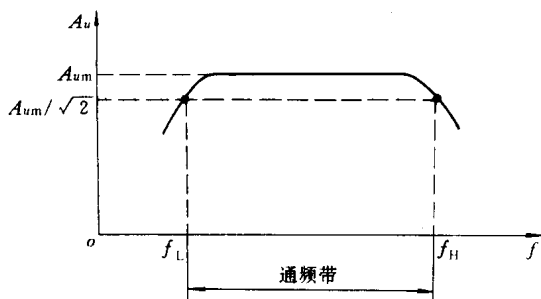


图 2·2-2 放大电路的频率响应曲线

5. **噪声系数** 除晶体管内部载流子的不规则运动和电阻内部自由电子的热骚动所产生的起伏噪声外,还有放大电路直流电源的纹波、放大电路自激振荡产生的啸叫声,都属于噪声,用噪声系数 N_F 来衡量。 N_F 的定义为:放大电路输入端信号功率与噪声功率之比和输出端信号功率与噪声功率之比的比值,通常用分贝表示,即

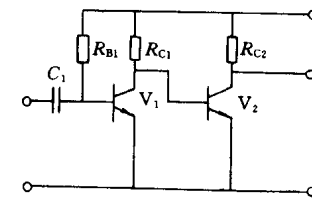
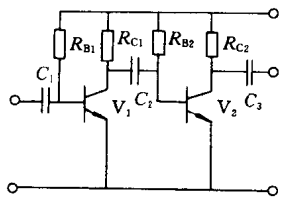
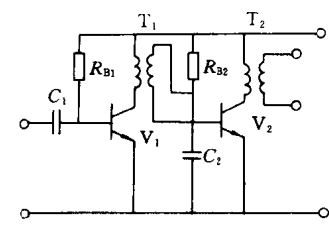
$$N_F = 10 \lg \frac{P_i/P_{Ni}}{P_o/P_{No}} \text{ (dB)} \quad (2 \cdot 2 \cdot 4)$$

式中 P_i ——输入端的信号功率;
 P_{Ni} ——输入端的噪声功率;
 P_o ——输出端的信号功率;
 P_{No} ——输出端的噪声功率。

3 多级放大电路

在多级放大电路中,级间的连接称为耦合。耦合方式和各种多级放大电路的特点见表2·2-3。

表 2·2-3 多级放大电路的耦合方式及其相应的特点

名称	直接耦合	阻容耦合	变压器耦合
电路方式			
特点	频率响应好 传输效率高 各级静态工作点相互影响 存在零点漂移	各级静态工作点互不影响 低频响应受到限制	各级静态工作点互不影响 频带窄 体积和重量大

4 组合式基本电路

1. 级联放大电路 级联放大电路常用的有下面两种：

(1) 共“射”、共“基”级联放大电路。共“基”级常作为高频、视频共“射”级的后级电路，这种电路结构常称为共“射”、共“基”级联电路，如图 2·2-3 所示。

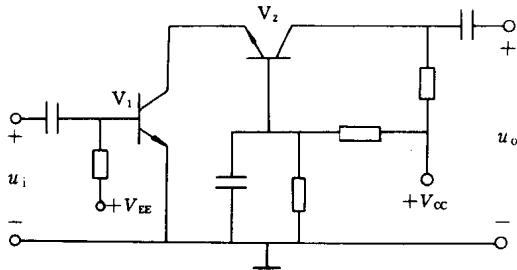


图 2·2-3 共“射”、共“基”级联放大电路

低输入阻抗的共“基”级作为共“射”级集电极回路的负载，可大大地改善与它相级联的共“射”级的高频特性，同时又满足了原放大倍数的要求。

(2) 共“射”共“集”级联放大电路。共“集”电路接在共“射”电路后面，可以改善高频特性和承受较重的负载，若它用在二级共“射”电路之间就起了隔离作用。这种电路结构常称为共“射”共“集”级联放大电路。

2. 射极耦合放大电路 图 2·2-4 所示的电路中，输入信号 u_i 加至 V_1 管的基极，然后经过两管公共射极电阻 R_E 耦合到 V_2 管，故名射极耦合放大电路。

该电路中射极电阻 R_E 越大，两边电路越对称，抑

制零漂的作用就越强。 R_E 阻值也不能过大，否则将使静态工作点下移，影响放大电路的电压放大倍数。为了使 R_E 既有较大的数值，又能保证管子有合适的工作点，因此在发射极电路内接入一个辅助电源 $-V_{EE}$ 。

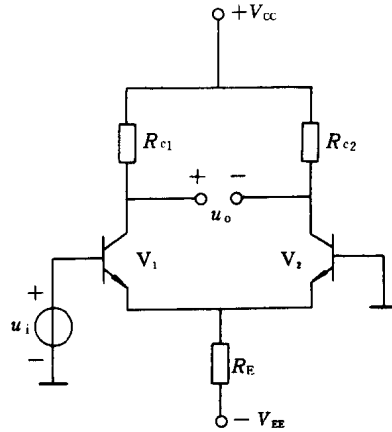


图 2·2-4 射极耦合放大电路

3. 达林顿联接 图 2·2-5 所示的差动放大电路中，每一边由两个 npn 管复合组成，可以等效成一个 npn 管，这样的联接，称为达林顿联接。等效管的电流增益比普通的 npn 管高出 1~2 个数量级，因此在相同 I_c 时，输入偏流降低 1~2 个数量级，输入电阻则提高到兆欧的数量级，其最大缺点是复合管 $V_1 - V_3$ 和 $V_2 - V_4$ 之间不易做到良好的匹配，因此输入失调电压及其温漂均比普通电路大。

4. 互补电路 图 2·2-6 为互补对称电路。该电路中 V_1 、 V_2 管常称为互补管，其特性是对称的，两边电路也是对称的。

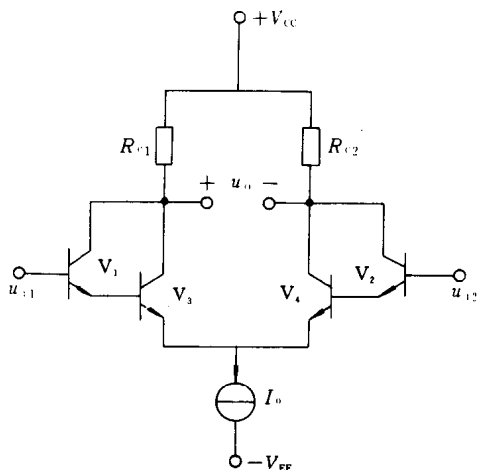


图 2·2-5 达林顿联接差动放大电路

当两管基极上不加电压时，两管截止，没有输出。当两管基极上加以正弦信号时，两管轮流工作，使负载端得到一个完整的正弦波。

但要挑选一对特性对称的互补管比较困难，故实用电路中常采用复合管代替。

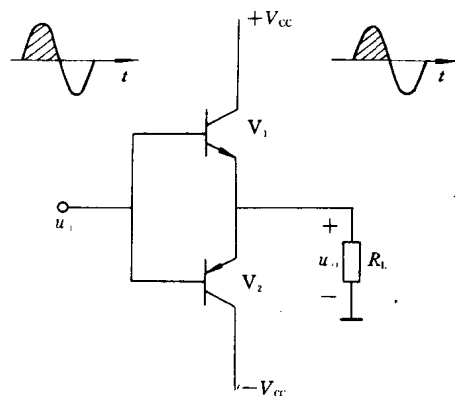


图 2·2-6 互补对称电路

5 反馈放大电路^[8]

把输出信号的一部分或全部按一定的方式送回到输入回路中，以改变放大性能的放大电路即为反馈放大电路。

根据反馈信号与原有输入信号的相位关系，反馈有正反馈和负反馈之分。加反馈后增益减小的是负反馈，反之则为正反馈。

1. 负反馈放大电路的分类 按输出信号（电压或电流）反送到输入回路的方式（串联或并联）不同可分为：

- (1) 电压串联反馈；
- (2) 电压并联反馈；
- (3) 电流串联反馈；
- (4) 电流并联反馈。

图 2·2-7 所示为四种反馈形式的方框图及一个分立元件电路和一个集成运算放大电路的实例。

2. 负反馈放大电路的增益 反馈放大电路的增益表达式可由图 2·2-8 所示的方框图得

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}} \quad (2\cdot2-5)$$

式中 \dot{A}_f —— 反馈放大电路的增益，亦称闭环增益，

$$\dot{A}_f = \dot{X}_o / \dot{X}_i;$$

$$\dot{A} \text{ —— 开环增益, } \dot{A} = \dot{X}_o / \dot{X}_d;$$

$$\dot{F} \text{ —— 反馈系数, } \dot{F} = \dot{X}_f / \dot{X}_o.$$

\dot{X}_o 、 \dot{X}_i 、 \dot{X}_f 分别表示放大电路输出、输入和反馈电量。它们可以是电压或电流，视反馈类型而定。

当 $|\dot{A}\dot{F}| \gg 1$ 时的放大电路，称为深反馈放大电路，它的 $\dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$ 。深反馈放大电路还具有 $X_i \approx X_i$ 、 $X_d \approx 0$ 的特点。

$|1 + \dot{A}\dot{F}|$ 称为反馈深度，是反馈放大电路的一个重要参数。

3. 负反馈对放大电路性能的影响

(1) 提高增益稳定性。闭环增益的相对变化量比开环增益的相对

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{dA}{A} \frac{1}{1 + AF} \quad (2\cdot2-6)$$

变化量减小了 $|1 + AF|$ 倍。

(2) 减小非线性失真。

(3) 展宽通频带。

(4) 抑制放大电路的内部噪声。

(5) 改变放大电路的输入、输出阻抗。

串联负反馈增大输入阻抗；并联负反馈减小输入阻抗。电压负反馈减小输出阻抗；电流负反馈增大输出阻抗。

4. 负反馈放大电路的稳定性 负反馈放大电路在高频或低频端的某个频率 f_0 上，若 $\dot{A}\dot{F}$ 的附加相移 $\Delta\varphi$ 达到 $\pm\pi$ 时，且满足 $|\dot{A}\dot{F}| > 1$ 的条件，则放大电路将产生频率为 f_0 的自激振荡，工作不稳定。为了使其稳定工作，最根本的办法是用电容 C 对放大电路进行相位补偿，如图 2·2-9a 所示。实际上放大电路还由于寄生电感、寄生电容、电源内阻和地线电阻等因素，产生的寄生反馈而导致放大电路不稳定。解决的方法是：

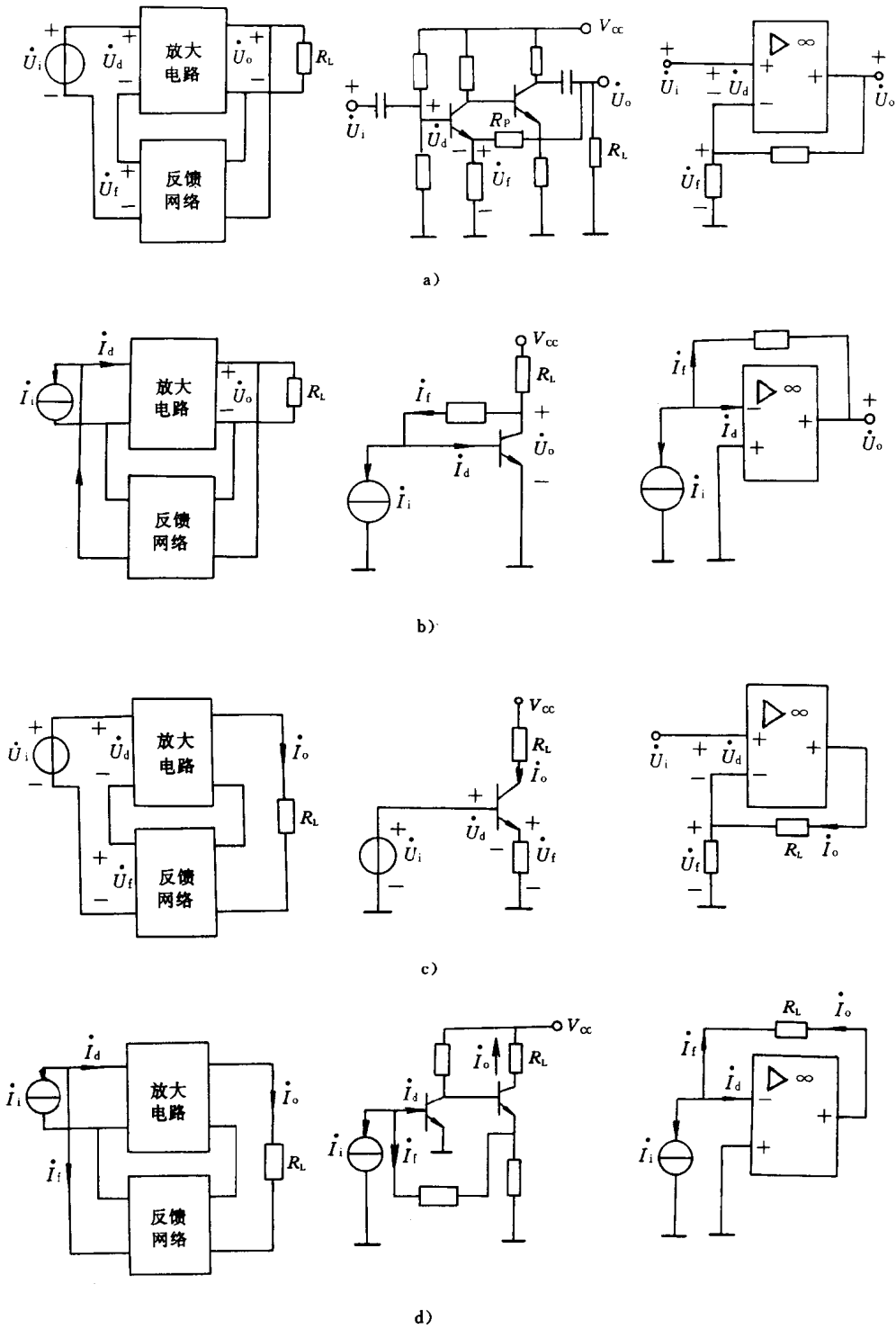


图 2·2-7 四种反馈放大电路

a) 电压串联 b) 电压并联 c) 电流串联 d) 电流并联