

晶体管线性电路

贵体祥

四川人民出版社

INSTIGUAN
XIANXINGDIAN

封面设计：罗小辉

晶体管线性电路

贵体祥

四川人民出版社出版 (成都盐道街三号)

四川省新华书店发行 内江新华印刷厂印刷

开本850×1168毫米1/32 印张24 插页2 字数532千

1980年1月第1版 1980年1月第1次印刷

印数：1—11,000册

书号：15118·34

定价：2.96元

内 容 提 要

本书运用几个特殊电工原理和新的电路等效变换方法，讨论了晶体管线性电路中的若干基本问题。这种方法具有物理概念清楚、简单明了等优点。在分析过程中，力求由浅入深、化繁为简；讨论时重点突出晶体管线性电路的分析技巧、特殊性和发展方向。

全书共分六章。前三章讨论晶体管低频放大器、负反馈放大器和直流放大器等线性基础电路中的热稳定性、反馈特性和放大特性等；后三章重点讨论晶体管在一定条件下的模拟参数以及这些参数随外因的变化关系，分析场效应管电路的计算方法，讨论晶体管高频线性电路的高频特性、高频稳定性和宽频带特性，以及传输线变压器、微带匹配网络的特点和分析方法。从第三章开始介绍了线性集成电路的特点和使用情况。

本书主要供从事电子电路研制工作的技术人员，有关专业的教学人员和其他具有中等文化程度的电路工作者参考。

目 录

1 晶体管低频放大器	1
1.1 网络等效变换原理	1
1.1.1 电流源的转移	1
1.1.2 阻抗网络等效变换	3
1.1.3 替代原理	4
1.2 晶体管单级低频放大器的分析	5
1.2.1 晶体管电路的基本组态	6
1.2.2 晶体管放大器的基本结构	10
1.2.3 发射结模拟电阻的由来和运用	14
1.2.4 共发射极单级放大器的计算	18
1.2.5 射极输出器和“自举”电路的计算	21
1.2.6 共基级放大器和“超耐压”电路的计算	27
1.2.7 最佳增益	32
1.3 偏置电路及温度稳定性	34
1.3.1 温度对工作点的影响	35
1.3.2 三组态放大器不稳定因素的新分析方法	37
1.3.3 常用放大器偏置电路的计算	40
1.3.4 高稳定性偏置电路	43
1.4 放大器的耦合	52
1.4.1 阻容耦合放大器的分析和计算	53
1.4.2 变压器耦合放大器的分析和计算	58
1.4.3 复和管、互补对和直接耦合放大器	62
1.4.4 举 例	72
1.4.5 低频放大器的讨论	80
1.5 低频放大器的新计算方法	86
1.5.1 阻抗转移等效法在电路计算中的运用	86
1.5.2 多级低频放大器新的计算方法	88

2 晶体管负反馈放大器	91
2.1 反 馈	91
2.1.1 反馈的分类	91
2.1.2 正反馈和负反馈的新判断方法	93
2.1.3 负反馈的基本类型	98
2.2 单级负反馈放大器的分析和计算	101
2.2.1 串联电流输出——串联电压输入式负反馈 (串联电流负反馈)放大器	101
2.2.2 并联电压输出——并联电流输入式负反馈 (并联电压负反馈)放大器	108
2.2.3 串联电流输出——并联电流输入式负反馈 (并联电流负反馈)放大器	113
2.2.4 并联电压输出——串联电压输入式负反馈 (串联电压负反馈)放大器	115
2.3 常用两级负反馈电路的分析和计算	118
2.3.1 交替负反馈	118
2.3.2 成对负反馈的新分析法	124
2.3.3 射极输出器的组合负反馈电路	130
2.4 负反馈对电路的影响和负反馈的运用	133
2.4.1 负反馈对电路性能的影响	133
2.4.2 负反馈的运用	138
2.5 低频寄生反馈	150
2.5.1 电源内阻和地线电阻引起的寄生反馈	150
2.5.2 频率低端负反馈的演变	155
2.6 其它形式的负反馈电路	160
2.6.1 各种简单负反馈放大器	160
2.6.2 两种运用广泛的直流负反馈技术	165
2.6.3 变压器电桥负反馈电路的新分析法	167
2.6.4 负反馈放大器的整形介绍	182
附录 2—1 串联深负反馈放大器“环电流”分析法	193
附录 2—2 波特反馈回比——并联负反馈又一分析法	195

3.1 晶体管直流放大器的特殊问题	199
3.1.1 晶体管的温度特性	199
3.1.2 发射结正向偏压 U_{be} 的温度特性	202
3.1.3 反向饱和电流 I_{co} 的温度特性	204
3.1.4 晶体管共发电流放大系数 β_{fe} 的温度特性	206
3.1.5 小 结	207
3.2 简单的晶体管直流放大器	210
3.2.1 直接耦合式晶体管直流放大器	210
3.2.2 一种新颖的直流放大器	215
3.2.3 晶体管直流放大器的温度补偿	217
3.2.4 并联补偿和串联补偿的改进	221
3.3 晶体管平衡差动放大器	225
3.3.1 晶体管平衡差动放大器的分析和计算	225
3.3.2 平衡差动放大器的共模干扰	240
3.3.3 平衡差动放大器的几种改进措施	242
3.4 晶体管直流放大器的典型运用	
之一——线性集成电路	259
3.4.1 线性集成组件的特点	259
3.4.2 线性集成组件的结构和电路符号	263
3.4.3 1瓦集成音频功率放大器——5 G31的分析	266
3.4.4 几种典型线性集成电路介绍	279
3.5 晶体管直流放大器的典型运用	
之二——电子稳压器	292
3.5.1 晶体管稳压器的的工作原理	292
3.5.2 稳压器的分析和计算	296
3.5.3 提高电压增益的“有源负载”稳压器	304
3.5.4 低温度系数稳压器	307
3.5.5 零输出阻抗稳压器	314
3.5.6 双极性稳压器	317
3.5.7 晶体管放大器的偏置电路稳压器	319

3.5.8	几种具有保护电路的稳压器	321
3.5.9	WB724系列集成电路稳压器	324
3.6	晶体管直流放大器的典型运用	
	之三——运算放大器	332
3.6.1	运算电路的工作原理	332
3.6.2	运算放大器的分析	334
3.6.3	基本线性运算放大器部件	337
3.6.4	运算放大器运算精度分析	342
3.6.5	运算放大器电路	344
3.6.6	模拟电子计算机原理	351
3.7	直流放大器的其它运用	364
3.7.1	直流放大器在模拟小信号电路中的运用	364
3.7.2	直流放大器在变换电路中的运用	367
3.7.3	直流放大器在检波、整流、滤波电路中的运用	369
3.7.4	直流放大器在脉冲电路中的运用	370

4 晶体管分析 372

4.1	晶体管模拟参数	372
4.1.1	晶体二极管模拟参数	372
4.1.2	晶体三极管模拟参数	375
4.1.3	三极管模拟电路中的电导	378
4.1.4	晶体管的三个频率区	383
4.1.5	晶体管频率参数	385
4.2	晶体管参数系互换	391
4.2.1	混合 π 参数在三组态等效电路中的转换	391
4.2.2	$[h]$ 参数与混合 π 参数	395
4.2.3	$[y]$ 参数与混合 π 参数	403
4.2.4	高频C区域的 y 参数	406
4.2.5	三组态的 y 参数和三端网络的运用	409
4.3	晶体管参数与工作点的关系	412
4.3.1	四个电导与工作点的关系	412

4.3.2	扩散电容和结电容与工作点的关系	414
4.3.3	举 例	416
4.4	晶体管在电路中的运用	420
4.4.1	选 管	420
4.4.2	晶体管在低频电路中的分析和计算	423
4.4.3	晶体管在高频电路中的分析和计算	426
4.5	场效应晶体管	429
4.5.1	场效应晶体管的工作原理和偏置电路	430
4.5.2	场效应晶体管放大器的新分析方法	442
4.5.3	场效应晶体管在高频电路中的分析	454
4.5.4	场效应晶体管与晶体管的组合电路	456
4.5.5	“恒流源”负载和“自举”负载电路	458
4.6	晶体管电路的若干特点	461
4.6.1	温度与偏置电路	462
4.6.2	参数与工作状态	463
4.6.3	入出阻抗的差别	469
4.6.4	品种的多样化	469
4.6.5	多发射极晶体管的运用	470
附录 4-1	晶体管放大器的噪声	473

5 晶体管谐振放大器 480

5.1	调谐回路分析和计算	480
5.1.1	调谐回路分析	480
5.1.2	调谐回路的选择性	484
5.1.3	调谐回路的通过频带	488
5.1.4	调谐回路的矩形系数	490
5.1.5	调谐回路的耦合系数	495
5.1.6	调谐回路的接入系数	499
5.1.7	调谐回路的插入损耗	502
5.1.8	调谐回路的失谐比	504
5.1.9	调谐回路的电压传输比	505

5.1.10 集中选择性谐振回路(滤波器)	507
5.2 晶体管谐振放大器的稳定性	519
5.2.1 晶体管调谐电路不稳定性的新分析方法	519
5.2.2 中和新分析法	525
5.2.3 级联失配电路的新等效变换方法	530
5.2.4 级联电路	533
5.2.5 调谐放大器的寄生振荡	541
5.3 晶体管中频放大器的分析和计算	545
5.3.1 晶体管中频放大器的要求和种类	545
5.3.2 单调谐中频放大器的分析和计算	548
5.3.3 双调谐中频放大器的分析和计算	552
5.3.4 级联中频放大器	557
5.3.5 场效应晶体管中频放大器	559
5.3.6 多级中频放大器的分析	560
5.3.7 中频放大器的制作举例	564
5.3.8 参差调谐中频放大器	570
5.3.9 特殊滤波器中频放大器	573
5.3.10 集成电路中频放大器	575
5.4 晶体管高频调谐放大器	585
5.4.1 晶体管高频调谐放大器的特点	585
5.4.2 对高频调谐放大器的基本要求	586
5.4.3 中频干扰和镜象干扰	588
5.4.4 单管高频调谐放大器	590
5.4.5 级联高频调谐放大器	599
5.4.6 高频放大器自动增益控制电路(AGC)	604
5.4.7 晶体管 π 型匹配谐振放大器	609
附录5—1 稳定性初步分析	615

6 晶体管宽频带放大器 621

6.1 晶体管宽频带放大器的若干问题	621
6.1.1 宽频带放大器的分析方法	622

6.1.2	宽频带放大器中晶体管电流放大系数 h_{fe}	628
6.1.3	共基电路输入阻抗呈电感性问题	634
6.1.4	共发共集电路输入阻抗呈负阻性问题	636
6.1.5	发射极引线电感问题的讨论	638
6.2	展宽频带方法讨论	641
6.2.1	基极回路补偿	642
6.2.2	发射极回路补偿	645
6.2.3	集电极回路补偿	648
6.2.4	低端频率特性的补偿	655
6.2.5	负反馈宽频带放大器	657
6.2.6	晶体管级联组合宽频带放大器	660
6.2.7	差动宽频带放大器	663
6.2.8	特殊组合宽频带放大器	667
6.3	传输线变压器	670
6.3.1	传输线基本原理	670
6.3.2	传输线变压器和磁耦合变压器	677
6.3.3	传输线变压器的结构	681
6.3.4	传输线变压器负载获得最大功率条件	683
6.3.5	传输线变压器最高截止频率	685
6.3.6	传输线变压器最低截止频率	686
6.3.7	传输线变压器的阻抗变换	687
6.3.8	传输线变压器特征阻抗的确定	693
6.4	常用宽频带放大器电路介绍	695
6.4.1	传输线变压器耦合的晶体管宽频带放大器	695
6.4.2	晶体管视频放大器的初样试验	703
6.4.3	晶体管宽频带高频线性功率放大器初样试验	711
6.4.4	晶体管示波器的y轴放大器介绍	720
6.5	晶体管微波宽频带放大器	737
6.5.1	微带传输线简介	737
6.5.2	微波晶体管的S参数	748
6.5.3	小信号微波晶体管宽频带放大器的初样试验	753

1. 晶体管低频放大器

晶体管低频放大器运用广泛，是研究其他电子电路的基础。在生产中，它的制作简单，容易满足设计要求。而且在定性定量分析时，也不复杂，理论容易由实践来验证。因此，晶体管低频放大器是电子电路的基础之一。本章提出一些分析制作晶体管电路的新方法，其中在以后各章都几乎要遇到的几个简单的电工原理，安排在文字的开头，以引起重视。后面讨论用到时，不再叙述。

1.1 网络等效变换原理

网络等效变换是分析线性电路的重要手段。本节提出运用电流源转移、分压、分流式网络变换和替代原理配合其他电路基本定理分析晶体管电路，具有物理概念清楚，并且可以使较复杂的电路的分析和计算变得简单。下边重点介绍几个用得最多的网络等效变换电路。

1.1.1 电流源的转移

克希霍夫第一定律指出：节点间的电压决定于各节点的总电流。与电流源的分布无关。当节点的总电流保持不变时，改变电路中电流源的分布，不会影响节点之间的电压大小。这就是说，电路变换前后对外仍然是等效的。

在图(1—1)中 J 是电流源。现将电路(a)进行变换,得到图(b)和(c)的电路。这三个电路是等效的。因为变换前后 a 、 b 、 c 、 d 各节点的总电流分布未变,始终保持了从节点 a 流出,从节点 b 流入一量值为 J 的电流。而节点 d 或 c 流入同时又流出同一量值的电流 J ,变换后节点 d 或 c 与变换前的总电流分配一样,仍然未变。因此,图(1—1)中的三个电路是等效的。

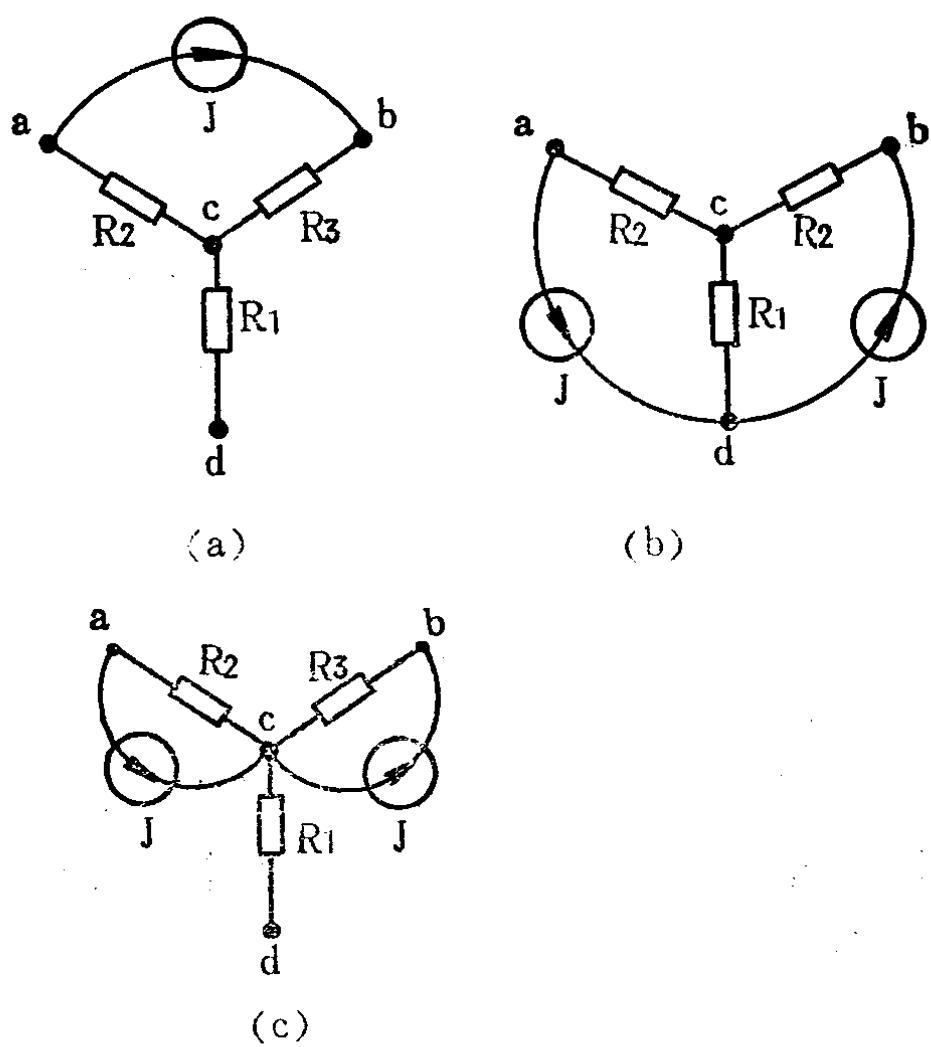


图 1—1

电流源等值转移法则如下:

任意线性电路的节点 a 、 b 之间,若存在一电流源,可以将这电流源进行转移。方法是:首先去掉 a 、 b 之间的电流源,然后用同量值的两个电流源分别从节点 a 和 b 接到任一节点 k ,电流源的

电流方向与未变换前流入流出节点 a 、 b 的方向一致。

1.1.2 阻抗网络等效变换

两个网络，如果它对外的伏安特性相同，那么这两个网络对外是等效的。等效的网络可以互换。

(1) 分流式网络等效变换

图(1—2)是分流式电路。图(a)和(b)的伏安关系对应于同一方程组：

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = Z(\dot{I}_1 + \dot{I}_2) \\ \dot{U}_2 = Z(\dot{I}_2 + \dot{I}_1) \end{cases} \quad (1-1)$$

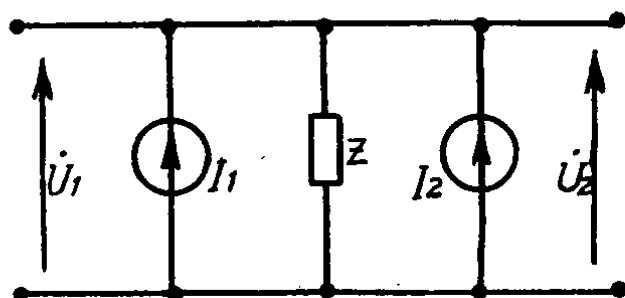
因此，这两个电路是等效的，可以互相代换。在图(1—2)(b)的电路中，输入回路和输出回路互不影响，这就简化了对复杂电路的分析。

(2) 分压式网络等效变换

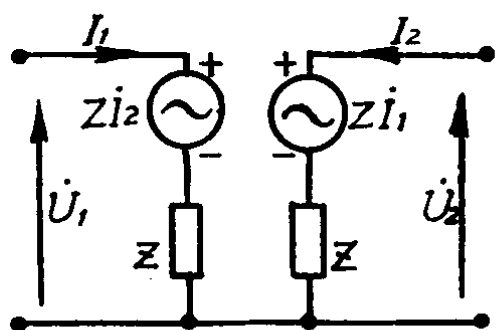
图(1—3)是分压式电路。图(a)和(b)的伏安关系对应于同一方程组：

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = Y(\dot{E}_1 - \dot{E}_2) \\ \dot{I}_2 = Y(\dot{E}_2 - \dot{E}_1) \end{cases} \quad (1-2)$$

因此，图(1—3)(a)和(b)互为等效电路，其中图



(a)



(b)

图 1—2

(1 — 3) (*b*) 所示电路的输入和输出回路的互相影响 看得 清楚，用以分析电路的伏安特性甚为方便。

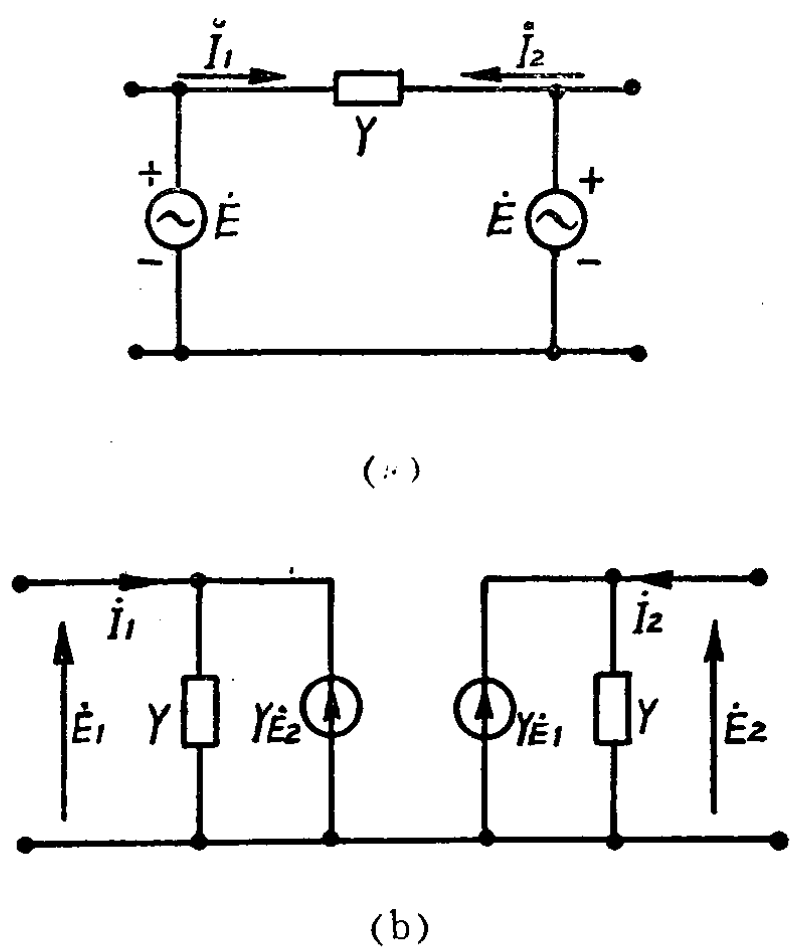


图 1 — 3

1.1.3 替 代 原 理

在电路中，某一支路用另一支路置换后，其支路电流和它两端的电压仍然保持不变，那么，两个支路可以互换，或一支路可用另一支路替代。这就叫替代原理。

在图（ 1 — 4 ）中，图（ *a* ）和图（ *c* ）的 *ab* 支路可以互换，图（ *d* ）和图（ *e* ）的 *ab* 支路也可以互换。

理由如下：

在图（ 1 — 4 ）（ *a* ）中，串入两个大小等于 $\dot{I}R$ 而方向相反

的电势源 $\dot{E}_{Qk}$ 和 $\dot{E}_{Qb}$ ，如图(b)。由于 $\dot{U}_{kb} = -\dot{E}_{Qk} + \dot{E}_{Qb} = 0$ ，故电路图(b)仍然等效于图(a)。

由于 $\dot{U}_{aQ} = \dot{I}R - \dot{E}_{Qk} = \dot{I}R - \dot{I}R = 0$ ，所以将aQ用导线短接后，电路仍然等效，如图(c)所示，从而证明了电路图(a)和(c)的等效性。用同样的方法也可以证明图(d)和(e)的等值性。

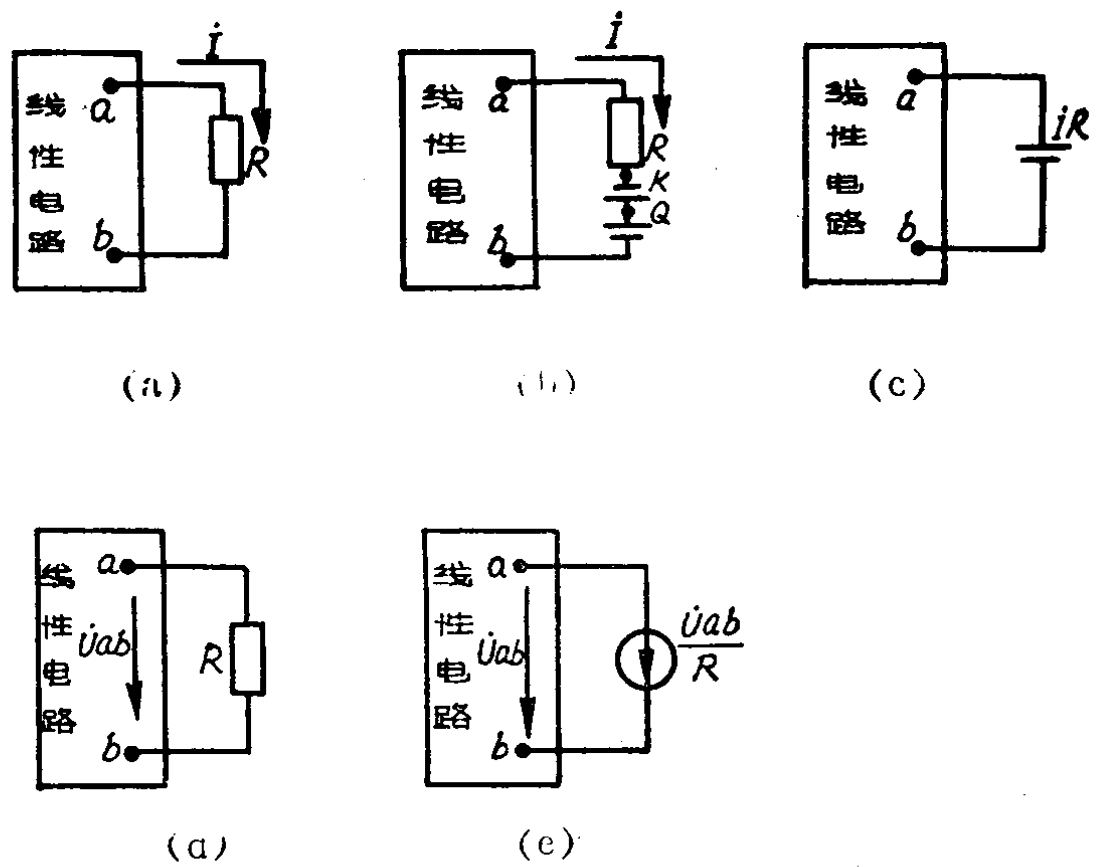


图 1—4

1.2 晶体管单级低频放大器的分析

晶体管单级低频放大器，是晶体管电路基础。本节重点分析晶体管三组态电路。提出用 h 参数或不用 h 参数设计分析电路的方法。

1.2.1 晶体管电路的基本组态

晶体管电路有三种组态。以接地电极作为共端，可以定义为共发电路、共基电路和共集电路（共集电路在习惯上称射极输出器），如图（1—5）所示。

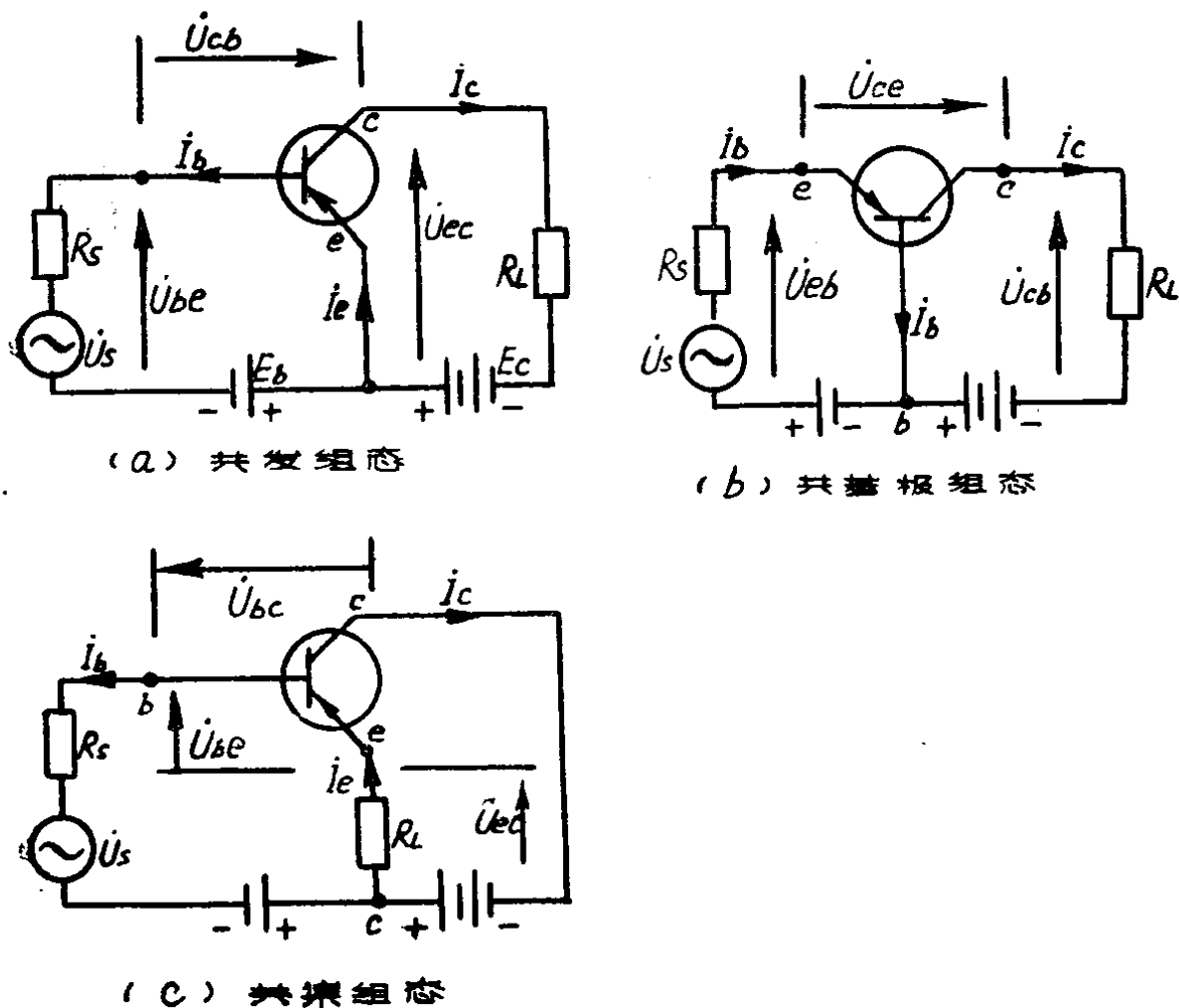


图 1—5

在共发射极组态中：

设电流流入“节点”（晶体管）为正，流出“节点”（晶体管）为负。

根据克希霍夫第一定律：

$$\dot{I}_e - \dot{I}_b - \dot{I}_c = 0 \quad (1-3)$$

设电压以地为参考点，根据克希霍夫第二定律：

$$\dot{U}_{ce} - \dot{U}_{cb} - \dot{U}_{be} = 0 \quad (1-4)$$

一般晶体管的电流自身分配关系是：

$$\begin{cases} \dot{I}_e = (h_{fe} + 1) \dot{I}_b \\ \dot{I}_c = h_{fe} \cdot \dot{I}_b = h_{fb} \dot{I}_e \\ h_{fe} = \frac{h_{fb}}{1 - h_{fb}} ; \quad h_{fb} = \frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} \end{cases} \quad (1-5)$$

其中：

h_{fe} 是共发射极短路电流放大系数（习惯上常用 β 表示）。

h_{fb} 为共基极短路电流放大系数（习惯上常用 α 表示）。

在共发组态中，假定放大器的电压放大倍数、电流放大倍数和功率放大倍数如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{电压放大倍数 } \dot{K}_{ue} : \\ \dot{K}_{ue} = - \frac{\dot{U}_{ce}}{\dot{U}_{be}} \quad (\text{负号标志输入输出电压反相}) \\ \text{电流放大倍数 } \dot{K}_{ie} : \\ \dot{K}_{ie} = \frac{\dot{I}_c}{\dot{I}_b} = h_{fe} \\ \text{功率放大倍数 } K_{pe} \\ \dot{K}_{pe} = | \dot{K}_u | | \dot{K}_i | = \left| \frac{-\dot{U}_{ce}}{\dot{U}_{be}} \right| \cdot \left| \frac{\dot{I}_c}{\dot{I}_b} \right| \end{array} \right. \quad (1-6)$$

共发组态的电流放大倍数 $\dot{K}_i$ 、电压放大倍数 $\dot{K}_u$ 的绝对值均大于 1。

如果在不同的组态下，晶体管的三个电流和三个电压的分配均不变化，也不计及它们内部阻抗不同的影响。

在图(1-5)(b)共基组态中，有 $\dot{U}_{cb} - \dot{U}_{ce} - (-\dot{U}_{be}) = 0$ ，