

高等学校试用教材

电子线路

第二册

南京工学院无线电工程系
《电子线路》编写组编

人民教育出版社

DG6216

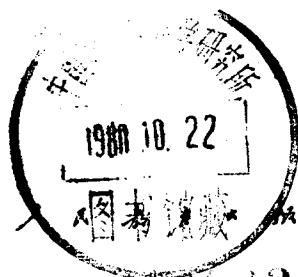
73.45
390
2

高等学校试用教材

电子线路

第二册

南京工学院无线电工程系
《电子线路》编写组编



1010662

本书是按一九七七年高等学校工科基础课电工、无线电教材编写会议上,“电子线路”小组讨论修订的“电子线路教材编写大纲”编写的。可作为高等院校无线电技术类试用教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员阅读。

本书介绍了半导体器件的工作原理和电路模型、各种线性和非线性电子线路的工作原理、分析方法及设计原则。全书共分五册:第一册是半导体器件及放大电路的基础部分,第二册是小信号放大电路部分,第三册是功率放大电路和正弦振荡电路部分,第四册是频率变换电路部分,第五册是电源电路和电子管及其电路部分。

本册介绍了直流放大器、集成运算放大器、小信号谐振放大器、宽频带放大器等典型的小信号放大电路的工作原理、性能指标及设计原则。并简要地讨论了小信号放大器的内部噪声及其测量方法。

本册加强了线性集成电路的基础,并采用极零点方法分析了宽频带放大器。

高等学校试用教材

电 子 线 路

第 二 册

南京工学院无线电工程系

《电子线路》编写组 编

*

人民邮电出版社出版

新华书店北京发行所发行

沈阳市第一印刷厂印装

开本 787×1092 1/32 印张 12.10/16 字数 304,000

1979年3月第1版 1980年3月辽宁第2次印刷

印数 36,001—74,000

书号 15012·0151 定价 1.05元

第二册 目 录

第二篇 小信号放大电路

第六章 直流放大器

内容提要	1
§ 6-1 直流放大器的特殊问题	1
6-1-1 概述	1
6-1-2 级间耦合问题	4
6-1-3 零点漂移问题	7
§ 6-2 差分放大器基本原理和分析	12
6-2-1 电路工作原理	12
6-2-2 差模等效电路及其参数	18
6-2-3 共模等效电路及其参数	20
6-2-4 同时存在差模和共模输入信号的放大问题——差值特性	22
6-2-5 差分放大电路设计	27
6-2-6 差分放大器性能改进	31
§ 6-3 差分放大器的失调、漂移和传输特性	38
6-3-1 差分放大器的失调和漂移	38
6-3-2 差分放大器的传输特性	49
*§ 6-4 调制式直流放大器	56
6-4-1 调制式直流放大器工作原理	56
6-4-2 调制器原理	58
6-4-3 解调器原理	64
6-4-4 双通道直流放大器工作原理	66
复习思考题	68
参考文献	69

第七章 集成运算放大器

内容提要	70
------	----

1010002

· 1 ·

*§ 7-1 半导体模拟集成电路的制造工艺	71
7-1-1 隔离技术	72
7-1-2 电路元件的制造工艺	74
7-1-3 电路元件的性能	78
§ 7-2 集成运算放大器电路	79
7-2-1 集成运算放大器的主要性能参数	81
7-2-2 输入级	87
7-2-3 偏置电路	91
7-2-4 电平位移电路和双端变单端电路	96
7-2-5 有源集电极负载电路	99
7-2-6 输出级及过载保护电路	101
7-2-7 集成运算放大器电路举例	103
*7-2-8 集成运算放大器电路性能的实例分析	107
§ 7-3 集成运算放大器的应用	111
7-3-1 集成运算放大器的理想化	111
7-3-2 反相放大器、同相放大器和跟随器	112
7-3-3 集成运算放大器在数学运算电路中的应用	119
7-3-4 集成运算放大器性能参数的测试电路	124
§ 7-4 集成运算放大器的运算误差	130
7-4-1 施加负反馈的集成运算放大器运算误差的一般表达式	130
7-4-2 调零和偏流补偿技术	137
§ 7-5 集成运算放大器的频率响应及相位补偿技术	141
7-5-1 集成运算放大器的开环频率响应	141
7-5-2 集成运算放大器作负反馈放大时的稳定工作条件	145
7-5-3 集成运算放大器的相位补偿技术	147
7-5-4 其他的稳定措施	157
复习思考题	159
参考文献	161

第八章 小信号谐振放大器

内容提要	162
§ 8-1 概述	162
§ 8-2 半导体管的高频参数和等效电路	165
8-2-1 共发混合 Π 型等效电路	166
8-2-2 高频 Y 参数及其等效电路	177

§ 8-3 单调谐回路谐振放大器	185
8-3-1 单回路谐振放大器的增益、选择性和通频带	185
8-3-2 匹配时单回路谐振放大器接入系数的确定	195
8-3-3 谐振放大器的稳定性	197
8-3-4 降低增益保证放大器稳定工作	203
8-3-5 中和	205
8-3-6 其他接法的单回路放大器	208
8-3-7 谐振放大器的增益控制	212
§ 8-4 双回路谐振放大器	217
§ 8-5 调谐在同一频率的多级谐振放大器	227
8-5-1 多级单回路谐振放大器的级联	227
8-5-2 多级双回路谐振放大器的级联	230
§ 8-6 参差调谐多级谐振放大器	231
8-6-1 双参差调谐放大器	232
8-6-2 三参差调谐放大器	236
§ 8-7 场效应管小信号谐振放大器	237
8-7-1 场效应管的高频等效电路	237
8-7-2 场效应管谐振放大器的特点	241
8-7-3 场效应管谐振放大器电路	243
*§ 8-8 谐振放大器的设计	244
§ 8-9 采用集中选频的放大器	250
复习思考题	253
参考文献	255

第九章 宽频带放大器

内容提要	256
§ 9-1 线性系统响应特性的分析方法	257
9-1-1 网络函数·极零点	257
9-1-2 一阶系统	260
9-1-3 二阶系统	265
9-1-4 三阶系统	284
§ 9-2 三种基本组态宽频带放大器	288
9-2-1 共发宽频带放大器	289
9-2-2 共基宽频带放大器	299
9-2-3 共集宽频带放大器	304
§ 9-3 单级式宽频带放大器	310

9-3-1 具有 $R_o C_o$ 电流串联负反馈的宽频带放大器	310
9-3-2 具有 Z_F 电压并联负反馈的宽频带放大器	319
9-3-3 采用补偿网络的单级共发宽频带放大器	323
§ 9-4 负反馈对和组合电路	328
9-4-1 电流负反馈对宽频带放大器	328
9-4-2 电压负反馈对宽频带放大器	334
9-4-3 组合电路宽频带放大器	336
§ 9-5 多级宽频带放大器与实例	341
9-5-1 多级宽频带放大器	341
9-5-2 宽频带放大器实例	344
*§ 9-6 小信号放大电路分析方法小结	346
复习思考题	349
参考文献	351

第十章 噪声及其测量

内容提要	352
§ 10-1 概述	352
10-1-1 外部干扰的来源及其消除的一般原则	352
10-1-2 内部噪声	354
§ 10-2 起伏噪声	356
10-2-1 电阻的热噪声	357
10-2-2 电路中电阻热噪声的计算	360
10-2-3 半导体三极管和场效应管噪声	366
§ 10-3 噪声系数及其测量	370
10-3-1 噪声系数的定义	371
10-3-2 额定功率和额定功率增益	374
10-3-3 级联四端网络的噪声系数	376
10-3-4 噪声系数的测量	378
§ 10-4 放大器的噪声系数	383
10-4-1 半导体三极管的噪声系数	383
10-4-2 场效应管的噪声系数	387
10-4-3 无源有耗四端网络的噪声系数	389
10-4-4 放大器的噪声系数	390
复习思考题	391
参考文献	393
第二册 名词索引	394

第二篇 小信号放大电路

第六章 直流放大器

内 容 提 要

直流放大器的作用是放大直流信号或随时间变化极为缓慢的信号。所以,放大器级间采用直接耦合。但是,由此而产生了直流放大器中一个特殊的零点漂移问题。为了克服温度漂移的影响,出现了多种形式的电路,其中最重要的就是差分放大器(或称差动放大器),其次是调制式直流放大器。由于差分放大电路具有对称平衡的特点,能有效地抑制漂移的影响,因此无论在分立元件直流放大器或模拟集成电路中都得到广泛应用,所以它是本章讨论的重点。

在内容安排上,首先分析了漂移的形成及其影响;然后重点讨论差分放大器的基本工作原理、分析方法、主要工作特性以及性能的改进;最后,扼要介绍了调制式直流放大器的基本工作原理和双通道直流放大的概念。

§ 6-1 直流放大器的特殊问题

6-1-1 概述

前面几章我们讨论了低频交流信号的放大问题。在这类放大器中,级与级之间由于采用隔直流的电容或变压器作为耦合元件,

因此对直流信号是没有放大能力的。但是, 在科研和生产的实际应用中, 例如, 在各种自动控制系统、电子测量仪器、计算装置以及遥测设备中, 却经常须把待测的极微弱直流电压或变化极为缓慢、近似直流的电压信号(包括由各种被测非电量转换而成的电信号)进行放大, 以便使相应的记录设备能够进行记录、显示; 或者用来推动执行机构、实现自动控制的目的。因此必须采用直流放大器。图 6-1-1a 就是一种简单的直流放大电路。它和交流放大器的主要差别是采用直接耦合的方式而不采用耦合电容, 从而保证了直流放大器的下限频率为零, 如图 6-1-1b 所示。可见, 它对直流和上限频率 f_H 以下的各频率分量都具有放大作用。直流放大器的上限频率一般为几十至几百赫。至于那些既要求放大直流信号, 又要求放大频带很宽的交流信号的宽频带放大器将在第九章专门讨论。

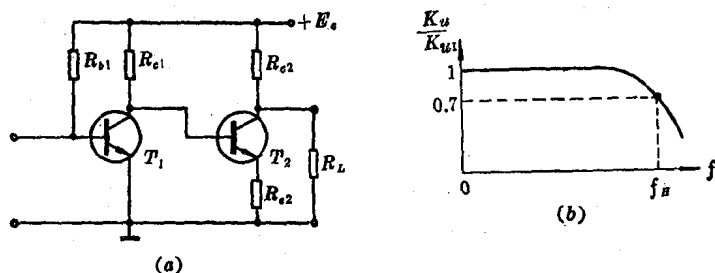


图 6-1-1 直流放大器
(a) 电路; (b) 幅频特性

直流放大器对于信号的放大作用、工作点选择、电路性能计算等和交流放大器是基本一致的, 因此, 我们可以利用前面的分析结果。但由于直流放大器要放大直流信号的这个特点, 因此它具有本身的一些特殊问题。

一、级间耦合

前面已讲到由于要放大直流信号, 放大器的输入端、输出端以

及级间耦合都不采用隔直流元件(如电容器、变压器),而是直接相连(如图 6-1-1a),或采用对直流导电的电阻性元件(如电阻、二极管、稳压管等)相连。因此,这类直流放大器有时也称为直接耦合放大器。

由于采用了直接耦合,后级的注入电流就和前级的集电极工作电压有关。因此,各级的直流工作点不象交流放大器那样独立无关,而是相互牵制的。这就产生了级间电平如何恰当配置以保证有合适的工作点和足够的动态范围的问题。

二、零点漂移

多级直流放大器中,在输入端不加信号时,由于温度、电源电压等变化引起各级工作点的静态电位的缓慢变化,都会通过它后面的各级放大,使末级输出电压偏离零值(或某一额定值)而上下漂动,象有输入信号时那样具有一定的输出量。这种现象就称为零点漂移。显然,这是一种假信号或称干扰。这种工作点的缓慢变化,在阻容耦合的交流放大器中虽也存在,但因有电容的隔直流作用而不会被逐级放大,所以影响不大。但在直流放大器中,由于直接耦合,影响就非常严重。很明显,第一级所产生的漂移影响最大,放大器的增益越大影响也越大。尤其是在输入有用信号比较微弱时,零点漂移所形成的干扰会把有用信号淹没掉,使放大器无法工作,失去了对这种弱信号的放大能力。因此,减小零点漂移就成为研制直流放大器中的一个主要问题,在解决这个主要问题的过程中,促进了直流放大技术的不断发展。

目前,直流放大器主要有下列两种类型:

1) 直接耦合式直流放大器 级间直接相连或用对直流导电的电阻性元件耦合的放大器。这类电路中,以差分放大器(或称差动式直流放大器)性能最好,应用最广。

2) 调制式直流放大器 首先用调制器把直流信号转变为交

流信号,然后用交流放大器进行放大,最后利用解调器检出放大的直流信号。这样可有效地减小漂移。这种直流放大器中的调制器又称为斩波器,因此调制式直流放大器也称为斩波放大器。

随着对漂移指标要求的不断提高,还出现了一些其他的电路方案。双通道直流放大器就是其中的一种。

六十年代中期发展起来的集成运算放大器,由于微小型化、高可靠性以及漂移小等优越性,已得到了广泛应用。今后,它将越来越多地取代用分立元件组成的直流放大器。但是,由于集成运算放大器的基本电路形式仍是差分放大电路,因此,本章着重讨论差分放大器的基本原理、主要性能和改进措施等,作为进一步学习集成运算放大器的必要基础。

6-1-2 级间耦合问题

前面已经提到了直流放大器由于采用直接耦合而产生了前后两级的电位牵制问题。因此,对于级间耦合回路的要求是:一方面要把信号有效地传送到下一级,不致造成明显的损失;另一方面又要保证每一级有合适的静态工作点,使放大器工作在线性放大区,并有足够的动态范围。还须指出,由于直接耦合,因此在确定前一级静态工作点时,要考虑到后级输入电流的影响。

从上列要求出发,下面简单介绍直流放大器中常用的几种耦合方式以及级间电位的配合问题。

一、级间耦合方式和电位配置

图6-1-2所示是两只NPN硅管的直接耦合放大电路。在第二级发射极接入电阻 R_{e2} ,用来提高发射极电位,从而也提高了 U_{ce1} 、满足两级之间电位配合的要求,保证两只管子都有合适的工作点和动态范围。但由于 R_{e2} 的接入使第二级产生电流负反馈,增益要降低。为了改进上述缺点,可以用一个或几个二极管串接来代

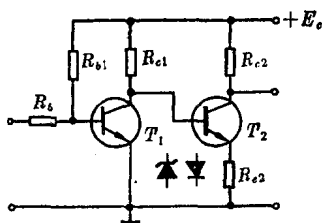


图 6-1-2 同类型管直接耦合电路

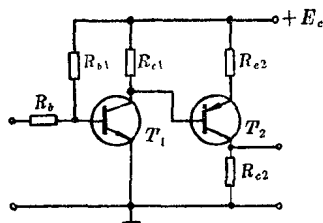


图 6-1-3 NPN-PNP 互补式电路

替 R_{e2} 。从 § 1-6-2 的讨论可知半导体二极管具有非线性伏安特性，它的正向压降（硅管约 0.6~0.7 伏）与流过二极管的电流几乎无关，即交流内阻很小。因此，它的接入能提高 U_{e2} 和 U_{ce1} 值而不致使第二级增益降低。

同理，也可采用稳压值合乎要求的稳压管代替 R_{e2} ，便于灵活配置电位。为了满足稳压管所要求的稳定工作电流，有时要经合适的限流电阻接通电源来设置工作电流，因为工作电流若太小，会增加稳压管的交流内阻，降低放大器增益。

有时也可利用稳压管（或用几个二极管串接）作为级间耦合元件，起到耦合信号和配置电位的作用。

图 6-1-3 是利用硅 NPN 和硅 PNP 管直接耦合的互补式电路。这样连接可以使 T_1 的管压降 U_{ce1} 不会太低，同时又保证了两个管子都有比较大的动态工作范围。由于锗管反向电流较大，温度特性不好， T_2 一般采用硅 PNP 管。在这电路中，如果在 T_2 的发射极回路中串接发射极电阻 R_{e2} ，则便于调整两级的工作点，同时对第二级的工作点起稳定作用。有时也可以接入二极管或稳压管来调节工作点。由于这种互补式电路能较好地解决电位配合问题，因此在多级放大器中常被采用。

上面介绍的几种直接耦合放大电路在不接输入信号源和输出负载 R_L 输入和输出端时的初始直流电位均不为零。这样的放大

电路作为一些专用设备中的中间各级放大是可行的，因为在专用设备中放大器的输入信号源与负载是固定的。可以事先考虑到初始电位不为零这一条件来设计整个系统，但作为通用设备中的直流放大器（例如，直流毫伏计、示波器等设备的放大器）是不合适的。因为，若放大器的输入端或输出端的初始电位不为零，将造成它与信号源和它与负载之间工作电位的互相牵制，造成测量误差，甚至破坏放大器的正常工作状态。因此，作为一个通用的直流放大器，在电路设计上应保证输入端与输出端的初始电位均为零。这样，在接入不同内阻的信号源或接入不同负载时就不会产生由于工作点偏移所造成的假信号，也就是说初始电位保持不变，达到零输入时零输出的要求。

二、直接耦合直流放大器电路实例

图 6-1-4 是一种能满足上述要求的简单的直接耦合直流放大电路实例，图中采用 NPN - PNP 管互补式电路； T_2 发射极接入稳压管；采用正负两组电源供电以及其他措施，以便达到输入端和输出端的初始电位均为零电位的要求。

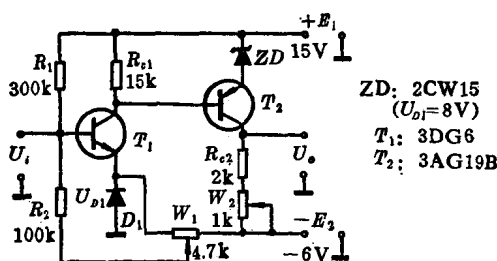


图 6-1-4 简单的直接耦合放大器

在电路中，利用负电源 E_2 通过电位器 W_1 给二极管 D_1 一个正向电流，使在 D_1 上建立一个电压 U_{D1} 。 D_1 可选用与 T_1 同一类型三极管的 eb 结，用以保证特性相似，使 U_{be1} 与 U_{D1} 接近，而

且有较好的温度补偿作用以减小电路的漂移。由于两者极性相反,就可以通过调节 W_1 使 T_1 的基极达到初始电位为零。在输出端,由于采用了正负两组电源供电,就能做到既使 T_2 的集电极初始电位为零又能保证 T_2 有正常的工作电压和电流。电位器 W_2 是为了将输出端的初始电位准确调整到零电位用的。 T_2 的管压降 $U_{ce2} = E_1 - U_z = 15 - 8 = 7$ 伏。通过上述电位的恰当配合,本电路电压放大倍数可达 1000 倍;输出电压动态范围达 ± 5 伏。

6-1-8 零点漂移问题

前面已经说明,由于温度、电源电压等因素的变化会导致直流放大器的零点漂移,这种漂移是一种不规则的随机干扰。要改善直流放大器的漂移性能,必须研究和分析直流放大器产生漂移的外部因素和内部因素,找到解决问题的途径。产生零点漂移的外部因素有温度、电源电压、湿度、振动等,但主要是温度的影响,其次是电源电压。由于外因的变化影响到三极管内部载流子的运动规律发生变化,从而产生了漂移。

衡量直流放大器零点漂移的程度与衡量放大器的噪声类似,不是看输出漂移电压的绝对值有多大,而是看漂移电压与有用信号电压之比。因此,通常把放大器输出端的漂移电压除以放大器的电压放大倍数,折算成为输入端的漂移电压值来评价一个放大器的漂移性能的好坏。只有当有用信号电压比漂移电压大得多的条件下,信号的放大才有实际意义,否则无法分辨是信号还是漂移。

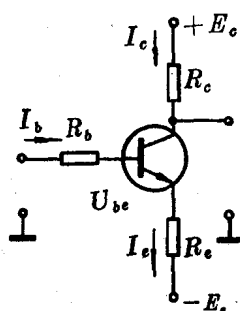
通常,直流放大器的漂移指标有以下两种:

1) 温度漂移 是指温度变化一度时,放大器输出端所产生的漂移电压折合到输入端的值(单位为微伏/度),简称温漂,这是最常用的一个指标。

2) 时间漂移 是指在一指定的时间内(例如八小时内)由于各种因素造成的漂移折合到输入端的最大漂移值。

一、单管放大器由于温度变化引起的漂移

在第三章里, 我们已经分析了单管放大器由于温度影响而产生的工作电流的漂移。在此基础上, 可以进一步求出折算到输入



端的漂移电压表达式。讨论这个关系式, 对于改进直流放大器的漂移具有实际意义。

图 6-1-5 是供分析用的单管放大器简化原理图, 图中: R_b 是基极回路外接电阻; R_e 是发射极外接电阻。现令

$$R_B = R_b + r_{bv}$$

图 6-1-5 单管放大电路

(r_{bv} 是三极管基区体电阻)

$$R_E = R_e + r_e \quad (r_e \text{ 是发射结正向电阻})$$

则图 6-1-5 所示单管放大器当温度变化 ΔT 时折算到输入端的等效漂移电压为①

$$\Delta U_p = \left[-\frac{dU_{be}}{dT} + (R_B + R_E) I_b \frac{d\beta}{\beta dT} + (R_B + R_E) I_{CBO} \frac{dI_{CBO}}{I_{CBO} dT} \right] \Delta T \quad (6-1-1)$$

其中: $\frac{dU_{be}}{dT}$ —— U_{be} 的温度系数;

$\frac{d\beta}{\beta dT}$ —— β 的温度系数(相对值);

$\frac{dI_{CBO}}{I_{CBO} dT}$ —— I_{CBO} 的温度系数(相对值)。

① 将式(3-6-11)中的 $\alpha, \Delta\alpha$ 转换成 $\beta, \Delta\beta$, 并将式(3-6-7)代入此式, 算出输出漂移电压 $(-\Delta I_c R_c)$, 再除以 $K_u \left(K_u = \frac{-\beta R_c}{R_b + (1+\beta) R_e} \right)$ 而得此式。

在给定电路参数时,便可应用此式估算出等效漂移电压的大小。

现在,我们对此公式作定性的讨论,从中找到改善漂移的途径。

1) 公式第一项表示由于三极管 U_{be} 受温度变化所产生的漂移。由于 U_{be} 是串接在放大器输入回路之中,因此由这一项所引起的输入漂移就等于 U_{be} 自身的漂移值 ΔU_{be} 。在硅管电路中,由于 I_{CBO} 小,因此由 ΔU_{be} 引起的漂移相对讲来就成为主要的了。

2) 公式第二项表示由于电流放大倍数 β 受温度变化影响所产生的漂移。可见,它和输入回路的串联电阻 $(R_B + R_E)$ 和基极电流 I_b 的乘积成正比。因此,采用低电流工作对减小这一项漂移是有效的。同时,减小 I_b 有利于减小管耗、保持管内温度稳定和提提高放大器的输入阻抗。在实际使用中,第一级放大器的 I_b 有时用到毫微安数量级。其次,降低输入回路的串联电阻 R_B (包括减小信号源内阻) 和 R_e 有利于改善漂移。另外,由于在三极管生产上, β 的温度系数离散性比较大,因此应挑选 β 的温度性能较稳定的管子。

3) 公式第三项是由于 I_{CBO} 受温度变化影响而产生的漂移,它正比于 $(R_B + R_E)$ 和 I_{CBO} 的乘积。可见,采用阻值低的 R_b 和 R_e , 选用 I_{CBO} 小的管子是有利于改善漂移的。由于硅管的 I_{CBO} 只有几十毫微安,比锗管小二、三个数量级,而且硅管的 I_{CBO} 随温度变化的相对变化量也低于锗管,因此,硅管的 I_{CBO} 的影响通常可以忽略不计,而锗管的 I_{CBO} 则是漂移的主要原因,尤其是在 R_b 较大时,这一项就是主要的漂移了。所以,直流放大器总是选用硅管为好。

下面,我们举例比较在两种不同的 R_b 数值下,硅、锗两种管子所组成的单管放大器由于温度变化所产生的漂移电压。

例题 在图 6-1-6 所示的单管放大电路中, 若集电极电流 $I_c=2\text{mA}$, 试求在 $R_b=10\text{k}\Omega$ 和 $R_b=100\Omega$ 两种不同条件下, 温度从 25°C 升高到 45°C 时, 两种不同类型管子的输入端等效漂移电压。假设两种管子的电参数如下:

硅管 3DG6B

$$\frac{dU_{be}}{dT} = -2.5\text{mV}/^\circ\text{C} \quad \frac{d\beta}{\beta dT} = 1\% \quad \frac{dI_{CBO}}{I_{CBO} dT} = 11\%$$

$$\beta = 50 \quad I_{CBO} = 5\text{nA} (T_0 = 25^\circ\text{C} \text{ 时})$$

$$r_{bb'} = 300\Omega$$

锗管 3AX31B

$$\frac{dU_{be}}{dT} = -2.5\text{mV}/^\circ\text{C} \quad \frac{d\beta}{\beta dT} = 1\% \quad \frac{dI_{CBO}}{I_{CBO} dT} = 15\%$$

$$\beta = 50 \quad I_{CBO} = 5\mu\text{A} (T_0 = 25^\circ\text{C} \text{ 时})$$

$$r_{bb'} = 300\Omega$$

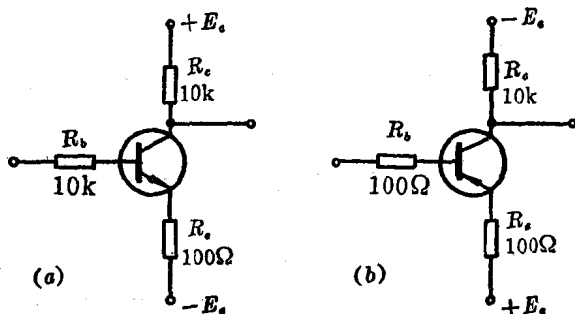


图 6-1-6 单管放大电路

(a) 硅 NPN(3DG6B); (b) 锗 PNP(3AX31B)

解 根据 $I_c=2\text{mA}$ 可得

$$r_e = \frac{26\text{mV}}{I_c} = \frac{26\text{mV}}{2\text{mA}} = 13\Omega$$

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{2 \times 10^{-3}}{50} = 4 \times 10^{-5}\text{A} = 40\mu\text{A}$$

然后将有关参数代入公式(6-1-1), 求出等效漂移电压, 现将计算结果列于表 6-1, 以供比较。