

业余中等专科学校教材

电 子 技 术

第 二 册 交流放大电路

(修 订 版)

上海市工农教育教材编写组

上海科学技术出版社

业余中等专科学校教材

电 子 技 术

第 二 册 交流放大电路

(修 订 版)

上海市工农教育教材编写组

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海市印刷四厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 6.5 字数 140,000

1979 年 3 月第 1 版

1983 年 6 月第 2 版 1983 年 6 月第 5 次印刷

印数 144,001—211,000

统一书号: 15119·1996 定价: 0.54 元

内 容 提 要

《电子技术》第二册内容为交流放大,共编排四章:第三章低频放大,第四章多级放大,第五章负反馈放大,第六章功率放大,包括基本放大单元电路的分析及有关物理量的估算。在基本概念方面,对于四种基本的负反馈放大器的工作原理、开环增益、闭环增益、反馈系数都作了分析。功率放大器中着重于图解分析,对输出功率、管耗、效率的分析都作了加强。在本册的交流放大分析中,不出现复数,不作繁琐的定量推导,而加强交流等效电路和图解方面的分析。本册作为学习线性集成电路及脉冲数字电路的基础。

目 录

第三章 低频放大器	1
第一节 晶体三极管的结构和放大原理	1
一、三极管的结构	1
二、三极管的放大原理	3
第二节 晶体三极管的特性	8
一、三极管的三种基本接法	8
二、三极管的特性曲线	9
三、三极管的主要参数	14
四、三极管的简易测试	21
第三节 放大器基础	23
一、放大器的简单应用	23
二、基本交流放大电路	27
三、放大电路的静态工作点	28
四、放大电路的工作原理	31
五、放大电路的参数计算	33
六、放大电路的图解分析	42
第四节 三极管偏置电路	50
一、固定偏流电路	51
二、电压负反馈电路	53
三、电流负反馈电路	54
四、温度补偿法	59
第五节 结型场效应管放大电路	60

一、结型场效应管的工作原理	60
二、结型场效应管的特性曲线和参数	63
三、结型场效应管的偏置电路	66
四、结型场效应管放大电路	67
本章小结	68
习题	70
第四章 多级放大器	73
第一节 放大器的级间耦合	73
第二节 放大器的输入和输出电阻	75
一、输入电阻	75
二、输出电阻	76
第三节 多级放大器的放大倍数	77
第四节 阻容耦合放大器的频率响应	83
一、低频段的放大倍数	83
二、高频段的放大倍数	85
第五节 阻容耦合放大器的设计	86
本章小结	91
习题	92
第五章 负反馈放大器	94
第一节 反馈的基本概念	94
一、反馈	94
二、正反馈和负反馈	94
三、反馈深度	95
四、负反馈的连接形式	97
五、负反馈类型的判别	97
第二节 负反馈对放大器性能的影响	100
一、放大倍数的下降	100

二、波形失真的改善	101
三、频响的改善	102
四、输入和输出阻抗的改变	104
第三节 几种典型的负反馈电路	104
一、射极输出器	104
二、电流串联负反馈电路	109
三、电压并联负反馈电路	112
四、电流并联负反馈电路	113
第四节 放大器的安装和调整	114
一、放大器的静态调试	115
二、放大器的动态调试	115
三、放大器的噪声与振荡	118
本章小结	122
习题	124
第六章 功率放大器	125
第一节 概述	125
一、对功率放大器的要求	125
二、功率放大器的种类和型式	127
第二节 单管功率放大器	128
一、单管功率放大器的基本电路和工作原理	128
二、单管功率放大器的图解分析	131
三、单管功率放大器的参数计算	136
第三节 推挽功率放大器	140
一、推挽功率放大器的基本电路和工作原理	140
二、推挽功率放大器的图解分析	142
三、推挽功率放大器的参数计算	144
四、功率放大器的失真	149

五、推挽功率放大器的调试	152
第四节 无输出变压器的推挽功率放大器	154
一、输入变压器倒相式推挽功率放大器	154
二、互补对称式推挽功率放大器	157
本章小结	164
习题	165
实 验	167
一、晶体三极管特性曲线的测试	167
二、水位控制与光电控制	169
三、单管低频放大器	170
四、推挽功率放大器	173
五、OTL 功率放大器	176
附 录	179
一、GB-9 型电子管电压表	179
二、XFD-6 型低频信号发生器	180
三、JT-1 型晶体管特性图示器	182
四、半导体器件型号命名法	190
五、常用晶体三极管参数	192

第三章 低频放大器

在电子线路中，放大器的作用是把微弱的电信号放大到所需要的数值。而低频放大器，是指被放大信号的频率在几十赫至1兆赫左右的小信号放大器。晶体三极管是组成放大器的主要元件之一。它具有放大及开关作用，用途十分广泛。本章讨论晶体三极管的结构、放大原理、特性曲线、参数以及低频放大器的基本工作原理和分析方法。

第一节 晶体三极管的结构和放大原理

一、三极管的结构

晶体三极管是用半导体材料(通常是硅和锗)制成的，所以又叫做半导体三极管，一般简称晶体管。常见的晶体三极管外形如图3-1所示。

晶体三极管的种类很多，但它的基本结构都是在—块半导体上制造二个距离很近的 PN 结，这二个 PN 结把整块半导体分为三个部分：中间的部分很薄，称为基区；二边的部分较宽，分别叫做发射区和集电区。发射区与基区之间的 PN 结称为发射结，集电区与基区之间的 PN 结称为集电结。在发射区、基区和集电区上分别引出三个电极，即为发射极(以 e 表示)、基极(以 b 表示)和集电极(以 c 表示)，见图3-2(a)。如果基区是 P 型半导体，发射区和集电区为 N 型半导体，则

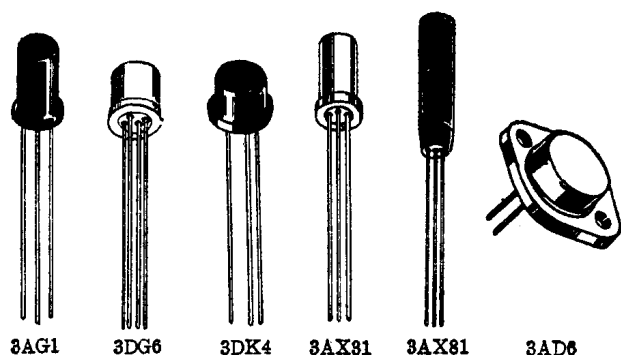


图 3-1 常见晶体三极管的外形图

称为 NPN 型晶体三极管; 而基区为 N 型, 发射区和集电区为 P 型半导体的, 则称为 PNP 型晶体三极管。

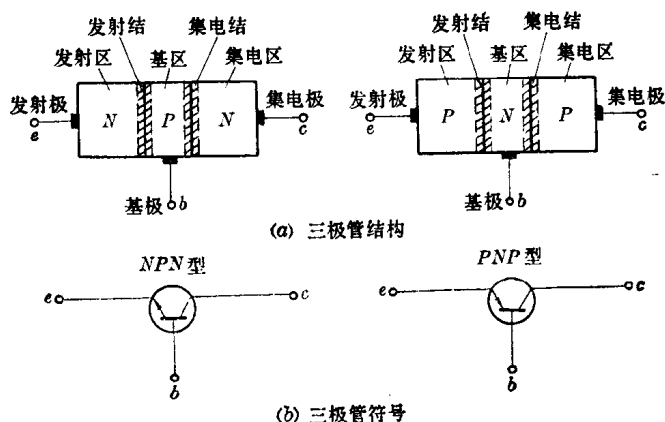
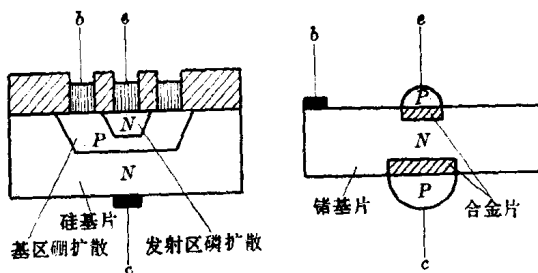


图 3-2 晶体管结构示意图及符号

三极管的符号如图 3-2(b) 所示, 箭头向内的一种是 PNP 型, 箭头向外的一种是 NPN 型, 箭头的意义表示管内电流的流动方向。

常见的晶体三极管, 根据制造工艺的不同, 主要可分为二种: 一种是平面管结构, 如图 3-3(a) 所示。在 N 型硅片氧化



(a) 硅平面管结构; (b) 锗合金管结构

图 3-3 不同制造工艺的三极管结构

膜上, 光刻一窗口, 进行硼杂质扩散, 获得 P 型基区; 然后在 P 型半导体上再光刻一个窗口, 进行高浓度磷扩散, 获得 N 型发射区, N 型基片用做集电极。由于发射结和集电结同处在硅片一个表面上, 所以称为平面管。一般 NPN 硅管, 如 3DG6、3DK4、3DG12 等均属这种结构。另一种是合金管结构, 如图 3-3(b) 所示。在高温下用合金的方法, 分别在 N 型锗片的二边, 烧结成发射结和集电结, 因此称为合金管, 例如 3AX31、3AX81 等锗管都为这种结构。

作为晶体三极管基片的材料, 可以是硅材料, 也可以是锗材料。这样从制造材料上来分, 晶体管又可分为硅管和锗管两大类, 硅管和锗管都各有 NPN 型和 PNP 型。

二、三极管的放大原理

要掌握晶体三极管的工作原理, 应先了解三极管的工作条件和内部电流的运动规律。

1. 三极管的工作电压

晶体三极管是构成放大器的基本器件。要使它能够正常工作, 必须要建立三极管的工作条件。一个电灯要加上一定

的工作电压,才能正常发光。晶体三极管也是如此,如果工作电压接错,管子不但不能工作,甚至会损坏。

通常,我们在晶体三极管的发射极 e 和基极 b 之间,加上一个较小的正向工作电压 U_{be} ,称为基极电压或偏压。 U_{be} 一般在零点几伏(硅管 $0.6\sim 0.7V$,锗管 $0.15\sim 0.3V$);而在发射极 e 与集电极 c 之间加上一个较大的工作电压 U_{ce} ,称为集电极电压,一般在几伏到几十伏。如果从电位角度来看,在放大工作时,对 NPN 型三极管而言,集电极电位高于基极电位,而基极电位又高于发射极电位;对于 PNP 型三极管则相反,即发射极电位高于基极电位,而基极电位又高于集电极电位。图 3-4 示出了二种不同的晶体三极管的工作电压接法。从图中可以看出,不管是 NPN 型还是 PNP 型三极管,它们工作电压的正确接法,应是发射结加正向电压(P 接正, N 接负),集电结加反向电压(P 接负, N 接正)。

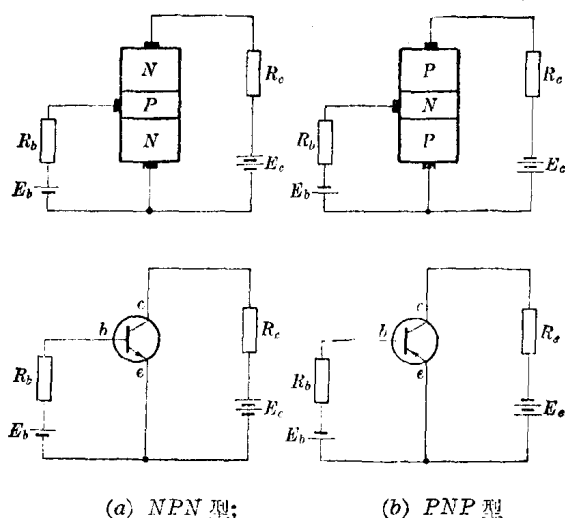


图 3-4 晶体三极管工作电压接法

2. 三极管的电流分配

在三极管上加上工作电压以后,就有电流流过,但电流在晶体管内部到底是怎样流动的,这种流动具有什么特点呢?下面我们以 *NPN* 型三极管为例进行分析,在图 3-5 的电路中,有三个电流流过晶体管,流过发射极、基极和集电极的电流分别用 I_e 、 I_b 和 I_c 表示。这三个电流分别由串联在三个回路中的电流表来测量。为了防止基极电阻 R_b 调得太小而导致过大电流烧坏管子,因此在基极回路里,串联一个固定限流电阻 R 和一个电位器 W ,以限制基极电流。调节电位器 W 可改变基极电流 I_b 的大小,相应地可得到一组集电极电流 I_c 和发射极电流 I_e 的数值,现将测得数据列入表 3-1。

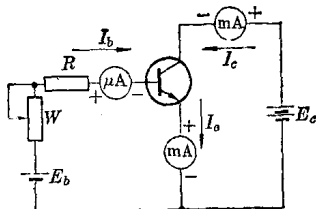


图 3-5 晶体管三个电流的测量

表 3-1

$I_b(\text{mA})$	-0.002	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
$I_c(\text{mA})$	0.002	0.007	0.60	1.20	1.80	2.40	3.00
$I_e(\text{mA})$	0	0.007	0.61	1.22	1.83	2.44	3.05

从表 3-1 可以看出三极管的电流分配关系:

(1) 发射极电流 I_e 等于基极电流 I_b 与集电极电流 I_c 之和,即:

$$I_e = I_b + I_c \quad (3-1)$$

或者说流进管子的电流等于流出管子的电流。

由于基极电流很小,所以集电极电流与发射极电流近似相等,即:

$$I_e \approx I_{e0}$$

(2) 从表中第一纵行看出, $I_e=0$ 时, I_c 与 I_b 的数值大小相等。 $I_e=0$, 表示发射极开路的情况。这时, 三极管变成了由集电结组成的二极管。由于集电结加上反向电压, 从集电极流向基极的电流, 即为集电结的反向漏电流, 所以用负号表示。这电流也称为反向饱和电流 I_{cbo} 。

(3) 从表中的第二纵行看出, 当 $I_b=0$ 时, I_c 并不等于零。这是基极开路的情况, 这时的集电极电流称为穿透电流 I_{ceo} 。

晶体三极管的电流分配关系, 还可以用图 3-6 形象地描述。

由于发射极是 N 型半导体, 基极是 P 型半导体, 这就相当于二极管上加正向电压, 因此就有大量的电子从发射区越过发射结到达基区。由于基区很薄(约几微米到几十微米), 所以电子很容易扩散到基区中靠近集电区的一边。集电结上加的是反向电压, (即集电极 C 接电源 E_c 的正端)对基区中电子有很强的电场引力, 吸引它们越过集电结进入集电区形成

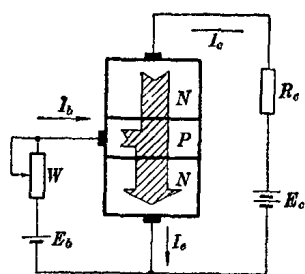


图 3-6 三极管内部电流

集电极电流 I_c , 其中只有极少部分电子在 E_b 电场的作用下, 形成基极电流 I_b 。图 3-6 箭头所示的方向为电流方向(与电子流方向相反)。

$I_e = I_c + I_b$ 这个分配关系式是由晶体三极管本身的内在特性所决定的, 与外加电压, 负载电阻 R_c 无关系。

3. 三极管的放大作用

表 3-1 的实验数据, 不仅表明了晶体管内部电流分配关系, 更重要的还表达出三极管的放大作用。

从表中第三、四纵行可以看出,当基极电流 I_b 从 0.01 mA 变化到 0.02 mA 时,其变化量:

$$\Delta I_b = 0.02\text{ mA} - 0.01\text{ mA} = 0.01\text{ mA}$$

式中 Δ 表示变化量。这时集电极电流 I_c 却从 0.60 mA 变化到 1.2 mA , 其变化量:

$$\Delta I_c = 1.2\text{ mA} - 0.60\text{ mA} = 0.60\text{ mA}$$

这就表明输入电流(此处为基极电流 I_b) 的微小变化会引起输出电流(此处为集电极电流 I_c) 较大的变化。也就是通常所说的电流放大作用。

上面这二个变化量的比值,叫做共发射极交流电流放大系数 β , 即:

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \frac{0.60\text{ mA}}{0.01\text{ mA}} = 60$$

从这个结果可以看出,通过三极管的放大作用,集电极电流 I_c 的变化量为基极电流 I_b 变化量的 60 倍。从表中还可以看出:基极电流的大小还直接影响到集电极电流的大小,这表明了晶体三极管的基极对集电极有控制作用,根据这个特性,晶体管就能用来作放大、开关、振荡等多种用途。

在实际应用中,晶体管除了能获得电流放大外,还常常用来放大交流信号的电压和功率。

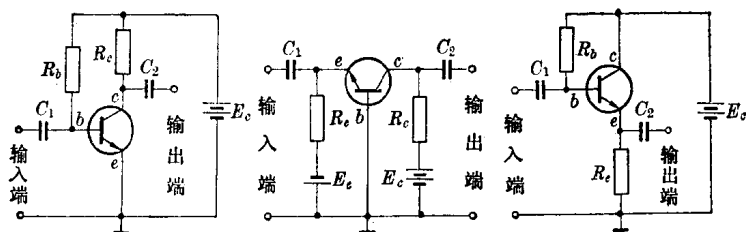
从电压的角度来看:当外加输入电压使基极电压改变 ΔU_b 时,它必然引起基极电流变化 ΔI_b ; 基极电流的变化又导致集电极电流 I_c 变化 ΔI_c ; 而 ΔI_c 流经集电极负载电阻 R_c 产生很大的电压变化 $\Delta U_c = \Delta I_c \cdot R_c$, 因此 ΔU_c 比 ΔU_b 放大了很多倍,这就是晶体三极管的电压放大作用。

功率是电压和电流的乘积。电压、电流或二者同时得到了放大,功率就得到了放大。

第二节 晶体三极管的特性

一、三极管的三种基本接法

晶体三极管有三个电极,在组成电路时,根据输入回路和输出回路公共端的不同,可以分为共发射极、共基极、共集电极三种不同的接法,如图 3-7 所示。



(a) 共发射极接法; (b) 共基极接法; (c) 共集电极接法

图 3-7 晶体管的三种基本接法

(1) 共发射极接法: 以基极为输入端, 集电极为输出端, 发射极为输入回路和输出回路的公共端, 如图 3-7 (a) 所示。

(2) 共基极接法: 以发射极为输入端, 集电极为输出端, 基极为输入回路和输出回路的公共端, 如图 3-7 (b) 所示。

(3) 共集电极接法: 以基极为输入端, 发射极为输出端, 集电极为输入回路和输出回路的公共端, 如图 3-7 (c) 所示。

这里所称的共某一个极的电路, 都是指对交流信号而言。我们在分析交流电路时应把电源看作对交流短路, 所以在图 3-7 (c) 中, 如把 E_c 短路后, 集电极就是地电位, 输入信号即加在基极和集电极之间, 输出信号从发射极和集电极之间取出, 因此集电极是公共端。

图 3-7 是使用 NPN 型管子的交流放大电路, 如果使用

的是 *PNP* 型管，只要将电源的极性和耦合电容(电解电容)的极性反过来连接就可以了。

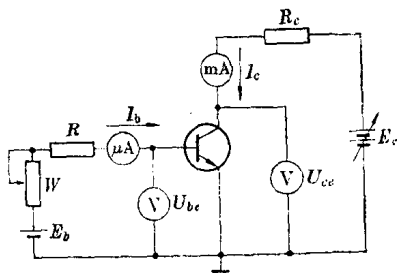
由于目前采用 *NPN* 管组成的共发射极电路是应用最广泛的一种基本电路，所以后面我们把它作为重点来分析。

二、三极管的特性曲线

晶体三极管的特性曲线是用来表示管子各个电极之间的电压和电流相互关系的曲线，它是管子内部特性的外部表现。利用特性曲线可以直观地描述出管子各电极之间电压和电流的变化情况，这对于了解三极管性能及图解分析等方面都是很有用的。

晶体管特性曲线，主要有输入特性曲线和输出特性曲线二种。

图 3-8 是共发射极接法的晶体管静态特性曲线的测试电路。所谓静态是指没有交流信号输入时的电路工作状态。图中电源 E_b 用来供给发射结的正向偏压，基极电阻 R 与 W 串联，以防止 W 调到零时， I_b 过大。 E_c 为可调直流电源，用来供给集电极回路的反向电压。



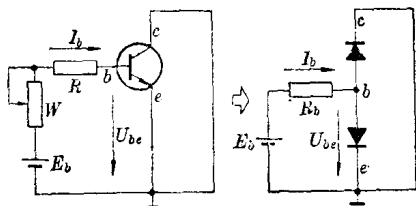
1. 输入特性曲线

图 3-8 晶体管特性测试电路

共发射极电路的输入特性曲线，是指加在晶体管基极与发射极之间的电压 U_{be} 与它所产生的基极电流 I_b 之间的关系曲线。在测定每一条输入特性曲线时，应使集电极和发射极间的电压 U_{ce} 保持不变。输入特性可分二种情况来讨论：

(1) $U_{ce}=0$

$U_{ce}=0$, 相当于集电极与发射极短路, 如图 3-9 所示。它



(a) $U_{ce}=0$ 时的电路; (b) 相当于两个并联的正向二极管

图 3-9 $U_{ce}=0$ 时晶体管的输入特性

列于表 3-2。

表 3-2

$U_{be}(V)$	0	0.37	0.47	0.53	0.56	0.59	0.60
$I_b(\mu A)$	0	5	10	20	30	40	50

如果用直角坐标来表示, 以 U_{be} 为横坐标, I_b 为纵坐标, 可以把表 3-2 逐点描绘出一条曲线, 它就是晶体管在 $U_{ce}=0$ 时的输入特性曲线, 见图 3-10 中曲线 ①, 它和二极管的正向伏安特性曲线很相似。

(2) $U_{ce}=2V$

改变 E_c 使 $U_{ce}=2V$, 调节 W 又可得到下列一组数据, 列于表 3-3。

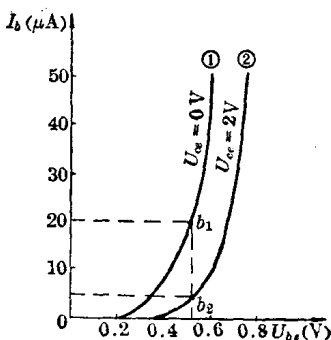


图 3-10 三极管的输入特性曲线