

何希才 编著

电子电路

学习要点与 例题精解



北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.com.cn>

电子电路学习要点与例题精解

何希才 编著

北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.com.cn>

内 容 简 介

本书包含各类电子电路的学习要点、例题精解、练习题及其解答。各类电路的内容包括晶体管及其基本放大电路、低频放大电路、调谐放大电路、反馈放大电路、功率放大电路、振荡电路、调制与解调电路、集成运算放大器和直流稳压电源等。书中还提供了历届全国大学生电子设计竞赛试题,供学生及有关教师参考。

本书内容丰富、实用性强,可供无线电技术、自动化、信息与通信等专业师生及自学电子技术的人员参考,还可对参加全国大学生电子设计竞赛的同学提供有益的帮助。

图书在版编目(CIP)数据

电子电路学习要点与例题精解/何希才编著. —北京:
北京航空航天大学出版社,2003.1
ISBN 7-81077-186-8

I. 电… II. 何… III. 电子电路—高等学校—教
学参考资料 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 074548 号

电子电路学习要点与例题精解

何希才 编著

责任编辑 金友泉

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail:pressell@publica.bj.cninfo.net

北京密云华都印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:14.5 字数:371 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月第 1 次印刷 印数:6 000 册

ISBN 7-81077-186-8 定价:21.00 元

前 言

在社会生活、生产中的各个领域都渗透着电子技术。因此,学习电子技术的基本知识已成为各种从业人员所必需的。除了学习理论知识以外,最重要的是将理论知识学习和实践很好地结合,并在不断实践和总结的基础上加以提高。做习题也是一个学习和巩固理论知识的不可缺少的环节。在学习基本原理的基础上再做一些习题,就可以起到巩固概念、熟练运算和启发思考的作用。

学习电子技术除了在校学生外,还有很多自学的读者。他们在做完习题后,希望有一个正确的解答。因此,这本习题解答会对他们有所帮助。

本书的写法力求实用性,几乎包括电子电路的主要内容,不针对某一本教材而编写,具有通用性,便于读者学习。每一节内容都按照学习要点、例题精解、练习题和练习题解答的顺序编写。其中,学习要点指出本节应掌握的重点内容,是做习题的理论知识的指导;例题精解起到了巩固理论知识并对其作进一步深入地思考,每道例题都是针对某一种概念或理论知识而设置;练习题是为读者提供自我测试的参考;练习题解答则建议读者先自己独立解答练习题,然后再去参考练习题答案,这样有助于读者更快掌握电子技术的基本内容。

本书还提供了历届大学生电子设计竞赛试题。这些竞赛试题都是专家们结合实际认真思考提出的,对目前高校学生学习电子技术具有指导意义。每道竞赛题包括的内容比较全面,可作为学校课程设计、毕业实践的参考题目。

本书的解答不是惟一的,对于同一道题会有不同的解法,本书的解答只能作为参考。

在编写过程中得到李宏毅、赵清明、徐宏福、张德文、陈诗再、黄柳桃等同志的帮助与支持,在此表示感谢。由于编者水平有限,若解答中存在错误和问题,希望广大读者批评指正。

编 著

2002年2月

3-1116801

目 录

第 1 章 晶体管及其基本放大电路

1-1 学习要点	1
1-2 例题精解	7
1-3 练习题	17
1-4 练习题解答	20

第 2 章 低频放大电路

2-1 学习要点	24
2-2 例题精解	25
2-3 练习题	30
2-4 练习题解答	32

第 3 章 调谐放大电路

3-1 学习要点	36
3-2 例题精解	38
3-3 练习题	41
3-4 练习题解答	42

第 4 章 功率放大电路

4-1 学习要点	45
4-2 例题精解	50
4-3 练习题	57
4-4 练习题解答	58

第 5 章 反馈放大电路

5-1 学习要点	61
5-2 例题精解	63
5-3 练习题	77
5-4 练习题解答	79

第 6 章 振荡电路

6-1 学习要点	87
----------------	----

6-2 例题精解	90
6-3 练习题	112
6-4 练习题解答	115

第 7 章 调制与解调电路

7-1 学习要点	129
7-2 例题精解	131
7-3 练习题	145
7-4 练习题解答	148

第 8 章 集成运算放大器

8-1 学习要点	158
8-2 例题精解	160
8-3 练习题	165
8-4 练习题解答	167

第 9 章 直流稳压电源

9-1 学习要点	170
9-2 例题精解	179
9-3 练习题	195
9-4 练习题解答	198

附 录 全国大学生电子设计竞赛试题

附录 1 第一届电子设计竞赛试题 (1994 年)	207
附录 2 第二届电子设计竞赛试题 (1995 年)	208
附录 3 第三届电子设计竞赛试题 (1997 年)	211
附录 4 第四届电子设计竞赛试题 (1999 年)	215
附录 5 第五届电子设计竞赛试题 (2001 年)	220

第 1 章 晶体管及其基本放大电路

1-1 学习要点

1. 晶体三极管的类型

晶体三极管由两个 PN 结构成,有三个电极,分别称为发射极 e、基极 b 和集电极 c。按三极管所用的半导体材料分有硅管和锗管;按导电性分有 NPN 管和 PNP 管;按三极管的频率分有低频管和高频管;按三极管的功率分有小功率管、中功率管和大功率管等。常用的晶体三极管是 PNP 型锗合金管和 NPN 型硅平面管,其符号如图 1-1 所示。晶体三极管的两个 PN 结称为发射结和集电结;三个区域称为发射区、基区和集电区。PNP 型和 NPN 型管在图形符号上的区别是发射极的箭头方向不同,箭头方向表示发射结正向接法时的电流方向。在实际中,NPN 型硅管应用较多,因此,本书以 NPN 管为例进行分析,所得结论和公式对 PNP 管也适用,但要注意 PNP 管的电压和电流方向与 NPN 管是相反的。

2. 晶体三极管的基本联接方式

晶体三极管是一种电流控制器件,即通过基极电流或发射极电流去控制集电极电流。因此,要使三极管正常工作并有放大作用,管子的发射结必须正向偏置,集电结必须反向偏置。三极管的主要用途之一是用于构成放大器,作为放大器有两个输入端和两个输出端。因此,三极管必有一个电极要作为输入和输出的公共端,即有三种联接方式或称三种组态——发射极作为公共端时构成的放大器称为共发射极电路,相应的还有共基极电路和共集电极电路,如图 1-2 所示。最常用的是共发射极电路,因此,本书讨论的内容以这种电路为主。共发射极电路的电压增益大(几十至几百),电流增益大(几十至一百以上),输入输出电压相位相反,输入与输出电阻中等,用于一般放大。共集电极电路的电压增益小(小于或等于 1),电流增益大(几十至一百以上),输入输出电压同相位,输入电阻大、输出电阻小,用于信号跟随。共基极电路的电压增益大(几十至几百),电流增益小(小于或等于 1),输入输出电压同相位,输入电阻小、输出电阻大,用于高频放大。

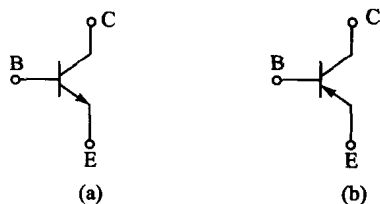


图 1-1 晶体三极管的符号

的公共端,即有三种联接方式或称三种组态——发射极作为公共端时构成的放大器称为共发射极电路,相应的还有共基极电路和共集电极电路,如图 1-2 所示。最常用的是共发射极电路,因此,本书讨论的内容以这种电路为主。共发射极电路的电压增益大(几十至几百),电流增益大(几十至一百以上),输入输出电压相位相反,输入与输出电阻中等,用于一般放大。共集电极电路的电压增益小(小于或等于 1),电流增益大(几十至一百以上),输入输出电压同相位,输入电阻大、输出电阻小,用于信号跟随。共基极电路的电压增益大(几十至几百),电流增益小(小于或等于 1),输入输出电压同相位,输入电阻小、输出电阻大,用于高频放大。

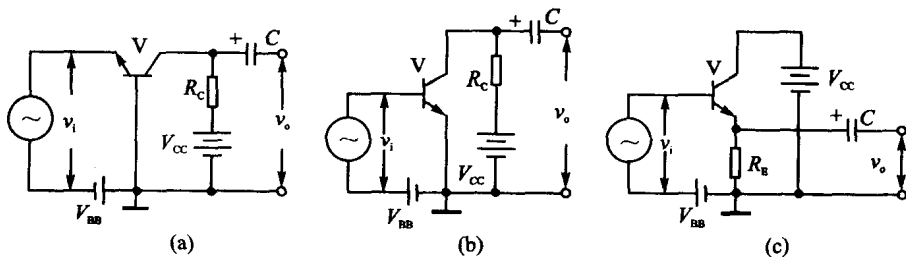


图 1-2 晶体三极管的联接方式

3. 晶体三极管的伏安特性曲线

晶体三极管的特性曲线有输入特性曲线和输出特性曲线两种。其中,输入特性曲线是指以输出电压 V_{CE} 作为参考量,输入电流 I_B 和输入电压 V_{BE} 之间的关系,如图 1-3 所示。

如图 1-4 所示为晶体三极管输出特性曲线。它是指以输入电流 I_B 作参考量时输出电流 I_C 和输出电压 V_{CE} 之间关系的曲线。由曲线可知,它分为饱和区、放大区和截止区。截止区是 $I_B = 0$ mA 时的输出特性曲线以下的区域,在这个区域内没有电流放大作用,各极电流几乎均为零;饱和区是每条曲线拐点连线左侧的区域,在这个区域内三极管的两个 PN 结均处于正向偏置状态,此时的三极管也没有放大作用;放大区是每条曲线的平直部分所构成的区域,在此区域内三极管具有放大作用。曲线平直段之间的间隔大小反映基极电流对集电极电流的控制能力的大小;间隔越大,电流放大系数越大;曲线平坦而且距离相等,说明在此范围内放大系数几乎恒定。

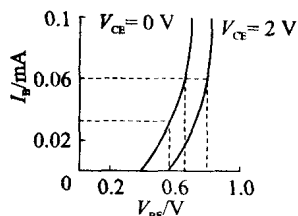


图 1-3 三极管输入特性曲线

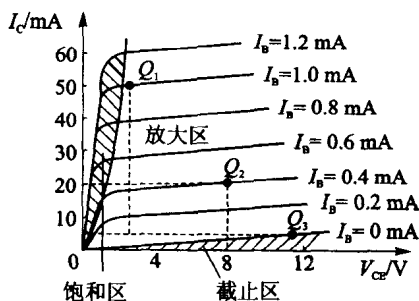


图 1-4 三极管输出特性曲线

4. 晶体三极管的主要参数

晶体三极管的主要参数有:电流放大系数 α 、 β ,极间反向电流 I_{CBO} 、 I_{CEO} ,极限参数 I_{CM} 、 P_{CM} 和 BV_{CEO} 。

晶体三极管的电流关系是 $I_E = I_C + I_B$,其间的比例关系基本固定。

I_C 与 I_B 之比为常数,即为共发射极直流电流放大系数

$$\bar{\beta} = I_C / I_B$$

I_C 与 I_E 之比为共基极直流放大系数

$$\bar{\alpha} = I_C / I_E$$

而将集电极电流变化量 ΔI_C 与基极电流变化量 ΔI_B 之比称为共发射极交流电流放大系数

$$\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$$

将集电极电流变化量 ΔI_C 与发射极电流变化量 ΔI_E 之比称为共基极交流电流放大系数

$$\alpha = \Delta I_C / \Delta I_E$$

理论上讲 $\bar{\beta}$ 与 β 、 $\bar{\alpha}$ 与 α 是不一样的,但三极管处于低频放大时二者非常接近,以后讨论中不再加以区分。

I_{CBO} 为反向饱和电流。当发射极开路时,从集电极到基极间的电流,一般很小。对小功率硅管小于 $1 \mu A$,锗管为几 μA 到几十 μA ,但受温度变化影响较大。

I_{CEO} 为穿透电流。当基极开路时,集电极与发射极之间加上规定电压后,从集电极到发射极之间的电流。它是衡量三极管质量好坏的重要参数之一,其值越小越好。

I_{CM} 是集电极最大允许电流。一般将 β 值下降到正常值的1/3时所对应的集电极电流定义为 I_{CM} 。

P_{CM} 是集电极最大允许耗散功率。该参数决定了晶体管的温升(硅管的最高结温约为150℃,锗管约为70℃),使用时不能超过,且要注意散热条件。

BV_{CEO} 是集电极—发射极间的击穿电压。这是指在基极开路条件下,加在集电极—发射极间的最大允许电压,使用时应保证 $V_{CE} < BV_{CEO}$ 。

5. 晶体三极管的偏置电路

用晶体三极管放大器放大交流信号时,一般是在其直流电流上叠加交流信号,在输出端通过电容隔断直流取出放大后的交流信号。这样,为放大交流信号而增设直流电流的通路称为直流偏置,由此决定晶体三极管的静态工作点。

现分析如图1-5所示的晶体管共发射极电路的偏置情况。在基极—发射极间和基极—集电极间加偏置使其为正偏置和反向偏置。电阻 R_B 是控制基极电流 I_B 的基极电阻,电流源 i_B 表示信号源(与偏置电路无关)。

由图1-5得到以下关系式

$$V_{CE} = V_{CC} - R_L I_C$$

根据上式可作出如图1-6所示的 AB 直线,称为负载线, R_L 为负载电阻。基极电流 I_B 作为参数,负载线与 I_C/V_{CE} 特性曲线的交点称为工作点。如 $I_B = I_{B2}$ 时,与负载线交点 Q_2 就是工作点。若基极电流 I_B 改变,工作点也会改变。若工作点选在负载线的中间(如 Q_2 点),即输出无失真的信号波形;但工作点选为 Q_1 或 Q_3 的位置,输出信号波形就会产生失真。

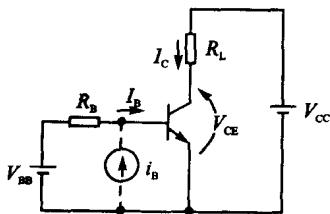


图 1-5 晶体管共发射极电路

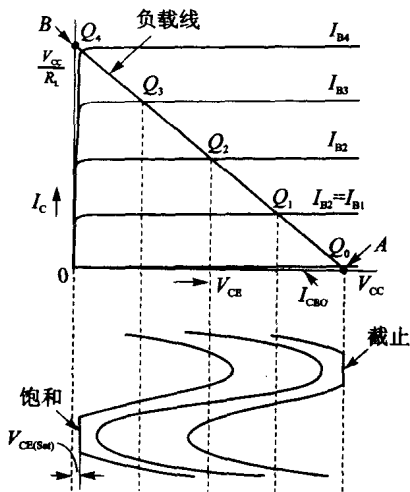


图 1-6 负载线与输出响应

图1-5所示的固定偏置电路需要双电源 V_{CC} 和 V_{BB} ,另外,由于温度变化等会引起偏置变动的不利情况。为此,要设计一个即使温度等外部条件发生变化时也能稳定工作的偏置电路,实例如图1-7所示。

图1-7(a)是简单的偏置电路,它易受温度的影响使其工作点不稳定。当基极电位高于发射极时,基极—发射极间为正向偏置,有基极电流 I_B 流通。这时,硅晶体管的 V_{BE} 约为0.6V,锗晶体管约为0.3V。基极电流 $I_B = (V_{CC} - V_{BE})/R_B$,其值固定且与集电极电流 I_C 无

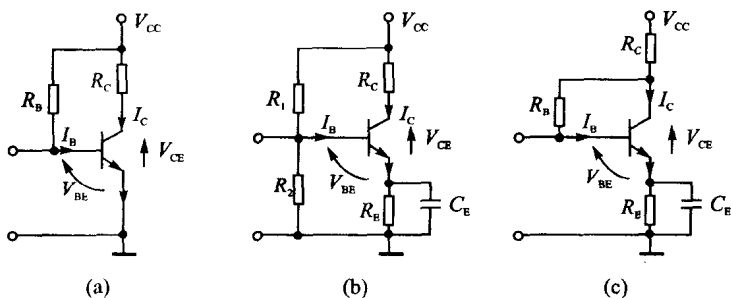


图 1-7 晶体管的偏置电路

关。若 $V_{CC}=12\text{ V}$, $R_B=200\text{ k}\Omega$, 则 $I_B=60\text{ }\mu\text{A}$ 。另外, 对于集电极若有 $V_{CC}=R_C I_C+V_{CE}$ 的关系, 则集电极电流 $I_C=(V_{CC}-V_{CE})/R_C$ 。这样, 通过 A 点 $(0, V_{CC}/R_C)$ 与 B 点 $(V_{CC}, 0)$ 可作出负载线 AB, 且与特性曲线交点 Q 为工作点, 如图 1-8 所示。

从基极向输入端看图 1-7(b) 的等效电路如图 1-9 所示, 它等效为内阻 R_B 和电源 V_B 的电压源。其中, $V_B=[R_2/(R_1+R_2)]V_{CC}$, $R_B=R_1//R_2=R_1 R_2/(R_1+R_2)$, 则有 $R_B I_B+R_E(I_B+I_C)+V_{BE}=V_B$, 所以, $I_B=(V_B-R_E I_C-V_{BE})/(R_E+R_B)$ 。在集电极侧, 由于 $I_B \ll I_C$, 则有 $I_C=V_{CC}/(R_E+R_C)-V_{CE}/(R_E+R_C)$ 。图 1-7(b) 可按照图 1-7(a) 同样的方法作出负载线, 对于图 1-7(c) 也是一样。

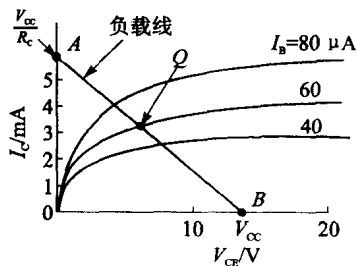


图 1-8 工作点的确定

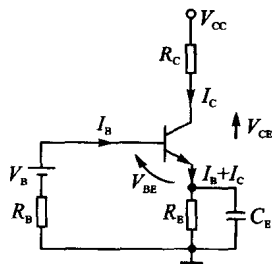


图 1-9 等效电路

6. 场效应管的类型

场效应管是电压控制器件, 有结型和绝缘栅型两大类: 结型又有 P 沟道和 N 沟道两种类型; 绝缘栅型(MOS 管)也有 N 沟道和 P 沟道两种, 根据工作方式的不同又分为增强型和耗尽型两类。结型场效应管的电路符号如图 1-10 所示, 三个电极分别称为漏极 D、栅极 G 和源极 S。N 沟道的结型场效应管与 P 沟道的工作原理相同, 本书以 N 沟道为例进行分析。

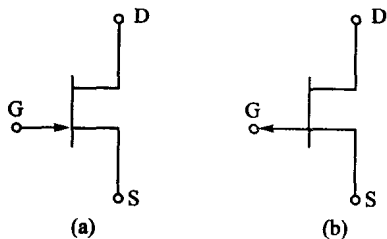


图 1-10 结型场效应管的电路符号

绝缘栅场效应管有 4 种类型, 电路符号如图 1-11 所示。在绝缘栅场效应管中, 目前用得最多的是 MOS 管。MOS 管的衬底 B 和源极 S 通常是接在一起的。本书以 N 沟道增强型和耗尽型 MOS 管为例进行分析。

场效应管与晶体三极管的性能经比较有以下几点: 场效应管的输入阻抗高, 典型值为 $10^{10}\text{ }\Omega$, 而一般晶体三极管的输入阻抗只有 $10^3\text{ }\Omega$ 左右; 场效应管的

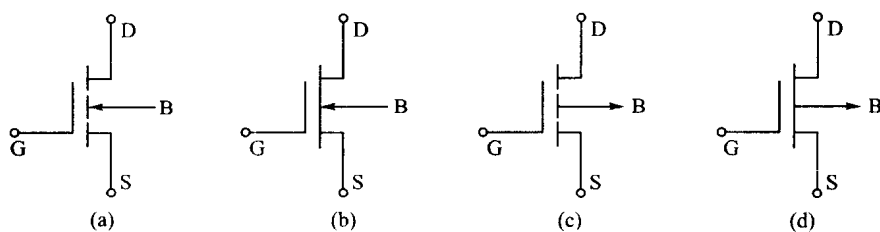


图 1-11 绝缘栅场效应管的电路符号

输入动态范围大,可以有几 V 的变化范围,而一般晶体三极管小于 1 V;场效应管的温度稳定性好,抗辐射能力强,它有一个零温度系数工作点,即当栅极电压选在某一合适的数值时,漏极电流不受温度变化的影响;场效应管的噪声系数比晶体三极管小;有些场效应管的源极和漏极可以互换,栅极电压可正可负,灵活性较大;场效应管在低电压小电流工作时表现为一个压控电阻的特性,即场效应管的沟道电阻随 V_{GS} 而改变。与晶体三极管比较,其主要缺点是频率响应和工作速度稍差些。

7. 场效应管的特性曲线

场效应管的基本特性是转移特性(输入特性)和输出特性(漏极特性)。图 1-12(a)是 N 沟道结型管的转移特性曲线,它反映栅源之间电压 V_{GS} 和漏极电流 I_D 之间的关系,并以漏源间电压 V_{DS} 为参考量。图 1-12(b)是 N 沟道结型管的输出特性曲线,它反映漏源之间电压 V_{DS} 和漏极电流 I_D 之间的关系,并以栅源间电压 V_{GS} 为参考量。特性曲线分为 3 个区:Ⅰ区为可变电阻区,它是由每条曲线的上升段组成的;Ⅱ区为放大区或称饱和区,它是由每条曲线的平直段组成的;Ⅲ区为击穿区,它是由每条曲线的再次上升段组成的。

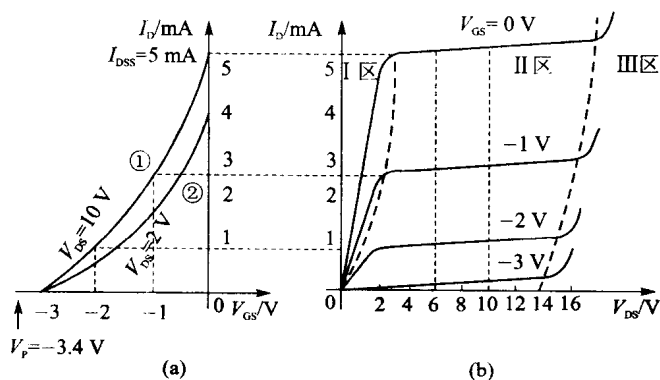


图 1-12 N 沟道结型管的特性曲线

N 沟道结型管的主要参数有夹断电压 V_P ,即在 V_{DS} 为某一固定数值的条件下,使 I_D 几乎为零时栅源之间所加的电压;饱和漏极电流 I_{DSS} ,即在 V_{DS} 为某一定值的条件下,栅源之间短路时的漏极电流;输入电阻 R_{GS} ,即 $R_{GS} = V_{GS} / I_G$;栅源击穿电压 BV_{GS} ,即栅源之间允许加的最大电压;跨导 g_m ,即在 V_{DS} 为某一定值条件下, ΔI_D 与 ΔV_{GS} 的比值, $g_m = \Delta I_D / \Delta V_{GS}$ 。

图 1-13(a)是 N 沟道耗尽型管的转移特性曲线,与结型管类似,但有 V_{GS} 取正值的部分。图 1-13(b)是 N 沟道耗尽型管的输出特性曲线,与结型管类似,不同的是最上面一条曲线的参考电压为某一正值。图 1-14 示出 N 沟道增强型管的特性曲线,其中图(a)为转移特性曲

线,图(b)为输出特性曲线。

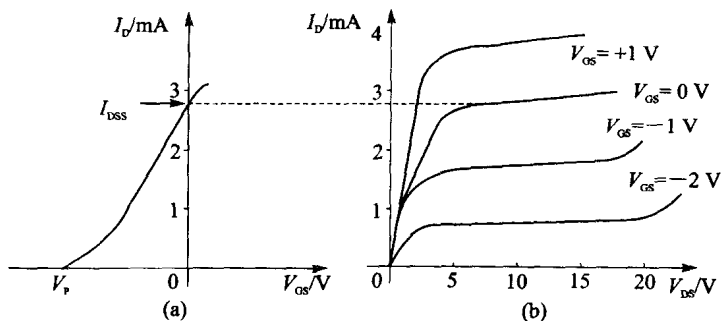


图 1-13 N 沟道耗尽型管的特性曲线

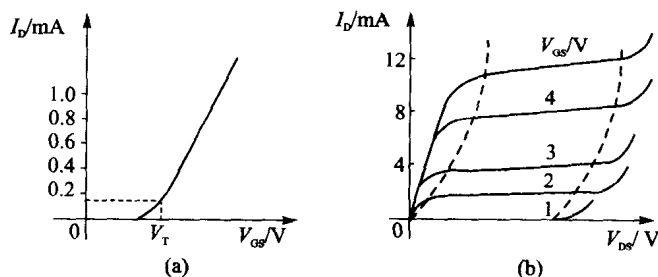


图 1-14 N 沟道增强型管的特性曲线

耗尽型管的主要参数有 V_P 、 I_{DS} 、 BV_{GS} 、 g_m 和 R_{GS} 等,意义与结型管相同,只是 R_{GS} 更大。增强型管主要参数是 g_m 和 V_T 等,而 V_T 称为开启电压或阈值电压。

8. 场效应管的偏置电路

(1) 结型场效应管的偏置电路

图 1-15 示出结型场效应管的偏置电路,图(a)为固定偏置电路;图(b)为自偏置电路。电路中,漏源极间电压 V_{DS} 与漏极电流 I_D 之间关系如下: $V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D$ 。图 1-16 示出场效应管的负载线和工作点之间的关系曲线,若 $V_{DD} = 16\text{ V}$, $R_D = 20\text{ k}\Omega$,则可作出负载线 AB。若工作点 Q 选在负载线 AB 的中间,则相应的 $I_{DQ} = 0.4\text{ mA}$, $V_{GS} = -0.35\text{ V}$ 。由此可知,栅极偏置电压 $V_{GG} = 0.35\text{ V}$,电阻 R_G 中几乎无直流流通,因此要选用 $1\text{ M}\Omega$ 高的电阻值。

场效应管工作于饱和区, I_D 对于 V_{GS} 的特性如式所示: $I_D = I_{DSS} (1 - V_{GS}/V_P)^2$ 。式中,若 I_{DSS} 与 V_P 已知,就可求出栅极偏置电压,即 $V_{GG} = -V_{GS} = -V_P (1 - \sqrt{I_{DQ}/I_{DSS}})$ 。

场效应管的直流特性受温度影响较大,使 I_{DSS} 、 V_P 的离散性偏大,因此, I_D 的稳定性较差。由于图 1-15(a)采用的固定偏置电路还需要双电源,故不实用。

而在图 1-15(b)的自偏置电路中,利用流过 R_S 中电流 I_D 在其产生的电压降求出 V_{GS} ,即 $V_{GS} = -R_S I_D$ 。根据 $V_{DS} = V_{DD} - (R_D + R_S) I_D$ 作出负载线。

例如, $R_D + R_S = 20\text{ k}\Omega$ 时的负载线如图 1-16 所示。若 $I_{DQ} = 0.4\text{ mA}$,则 $I_D - V_{GS}$ 曲线与 $I_D = 0.4\text{ mA}$ 的交点 Q' 与原点连线的斜率为 $-1/R_S$,可求得 R_S 和 R_D 的阻值,即 $R_S = 0.35/0.4 = 0.88\text{ k}\Omega$, $R_D = 20 - 0.88 = 19.12\text{ k}\Omega$ 。

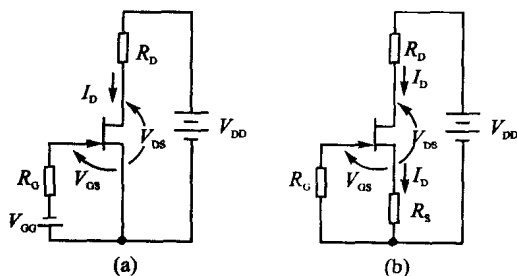


图 1-15 结型场效应管的偏置电路

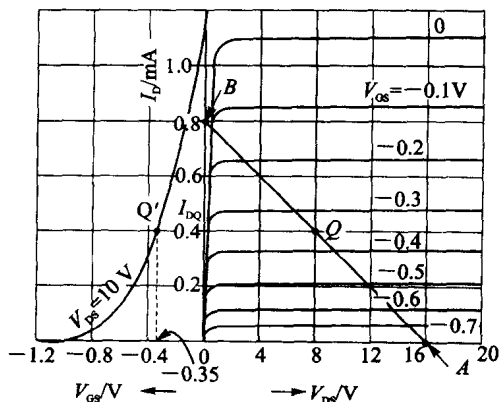


图 1-16 场效应管的负载线和工作点之间的关系曲线

(2) 增强型场效应管的偏置电路

图 1-17 是增强型场效应管的偏置电路。其中,图(a)为固定偏置电路, V_{DS} 和 V_{GS} 的极性相同,而 $V_{GS} = [R_2 / (R_1 + R_2)] V_{DD}$, $V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D$;根据此式和场效应管的特性曲线可求出电阻值 R_1 和 R_2 ,通常采用 $1\text{ M}\Omega$ 左右高阻值的电阻。图(b)为电流反馈的偏置电路,补偿场效应管特性变化时引起的工作点的变动。

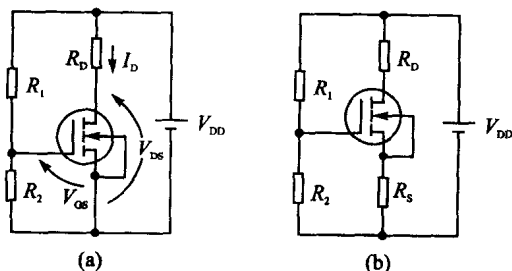


图 1-17 增强型场效应管的偏置电路

1-2 例题精解

例题一

【题意】 理解晶体三极管的工作状态。

【题目】 判断下列晶体三极管的工作状态：

(1) 锗 PNP 管, $V_B = 2\text{ V}$, $V_E = 1.7\text{ V}$, $V_C = -3\text{ V}$;

(2) 锗 NPN 管, $V_B = 1.2\text{ V}$, $V_E = 0.9\text{ V}$, $V_C = 6\text{ V}$;

(3) 硅 PNP 管, $V_B = -1.7\text{ V}$, $V_E = -1\text{ V}$, $V_C = -6\text{ V}$; 硅 NPN 管, $V_B = 1.2\text{ V}$, $V_E = 0.6\text{ V}$, $V_C = 1\text{ V}$ 。

【解答】 在判断晶体三极管工作状态时,依据如下两点:第一,晶体管有三个工作区:饱和工作区,即发射结正偏,集电结正偏;放大工作区,即发射结正偏,集电结反偏;截止工作区,即发射结反偏,集电结反偏。第二,不同材料晶体管的发射结正向偏压不同,硅管 $|V_{BE}| \approx 0.6 \sim 0.7\text{ V}$,锗管 $|V_{BE}| \approx 0.2 \sim 0.3\text{ V}$ 。根据以上两点可判断出以下工作状态:

- (1) 发射结反偏,集电结反偏,故晶体管工作在截止状态。
- (2) 发射结正偏,集电结反偏,故晶体管工作在放大状态。
- (3) 发射结正偏,集电结正偏,故晶体管工作在饱和状态。

例题二

〔题意〕 加深对晶体三极管放大作用的理解。

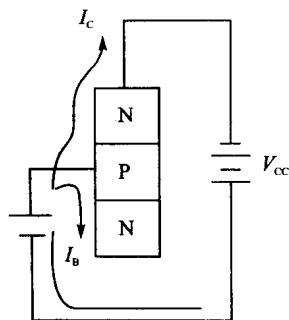


图 1-18 晶体三极管 V_{CC} 的接法

〔题目〕 若将图 1-18 中的电源 V_{CC} 的极性接反，使集电结的 PN 结也处于正偏置，这时集电极电流 I_C 将比 V_{CC} 极性未接反时大得多，这样是否对放大有利？

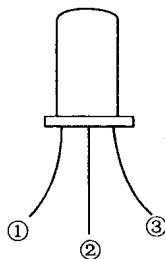
〔解答〕 若将 V_{CC} 的极性接反，使集电结也处于正偏置，则 I_C 要比反偏时大得多，但这时 I_B 的变化将对 I_C 没有什么影响，也就是不再能体现 I_B 对 I_C 的控制作用。即使 I_C 较大，也不能起放大作用。所以，放大作用的大小不在于 I_B 和 I_C 绝对值的大小，而在于二者变化量之比。将集电结反偏后，到达集电极的载流子绝大多数都是由发射极来的，因此，基极就能很好地发挥控制作用。

例题三

〔题意〕 了解工作在放大区时，晶体三极管各极电位之间关系。

〔题目〕 测得工作在放大电路中晶体三极管(图 1-19)各电极的电位关系为①脚 $V_1 = -6\text{ V}$ ，②脚 $V_2 = -11.3\text{ V}$ ，③脚 $V_3 = -12\text{ V}$ 。试回答下列问题：(1)是硅管还是锗管？(2)是 NPN 管还是 PNP 管？(3)指出管脚标号和 E、B、C 的对应关系？

〔解答〕 工作在放大区时，晶体三极管的 $|V_{BE}| \approx 0.7\text{ V}$ (硅管) 或 0.2 V (锗管)； $|V_{CE}| > |V_{BE}|$ ；对于 NPN 管 $V_1 < V_B < V_C$ ，对于 PNP 管 $V_E > V_B > V_C$ 。



图中， V_2 与 V_3 相差 0.7 V ，根据上述条件可知，这个三极管为硅管，图 1-19 晶体三极管引线②或③是基极或发射极，引线①是集电极。因①的电位最高，即集电极电位最高，又因为 $V_3 < V_2 < V_1$ ，可知是一个 NPN 管。引线③、②、①分别为 E、B、C 三个电极。

例题四

〔题意〕 加深对晶体管参数的理解。

〔题目〕 有两个晶体三极管，一个管子的 $\beta = 200$ ， $I_{CEO} = 200\text{ }\mu\text{A}$ ；另一个管子的 $\beta = 50$ ， $I_{CEO} = 10\text{ }\mu\text{A}$ ，其余参数大致相同。试问作为放大电路选用哪一个管子较宜？

〔解答〕 若只从放大作用来看，则选用前一种管子较合适；若从放大作用的稳定性来考虑，则选用后一个管子要好些。在一般情况下，宁可选用 β 值不太大但 I_{CEO} 值很小的管子。因为放大倍数不足时可采用其它方式解决，但性能不稳定，则整个电子设备往往不能正常工作。除此之外， I_{CEO} 也是衡量管子寿命的一个指标。当管子趋于失效时， I_{CEO} 值往往增大；所以， I_{CEO} 小，说明管子的寿命可能要长一些。

例题五

〔题意〕 用晶体三极管的静态特性曲线求其偏置电压等。

〔题目〕 在图 1-20 所示的晶体三极管偏置电路中,试求:

- (1) 偏置电压 $V_{BE} = ?$
- (2) 工作点时的基极电流 $I_B = ?$ 集电极电流 $I_C = ?$
- (3) 工作点时的集电极发射极间电压 $V_{CE} = ?$
- (4) 于工作点处集电极发射极间电压 $V_{CE} = 4 \text{ V}$ 时,求其偏置电压 $V_{BE} = ?$

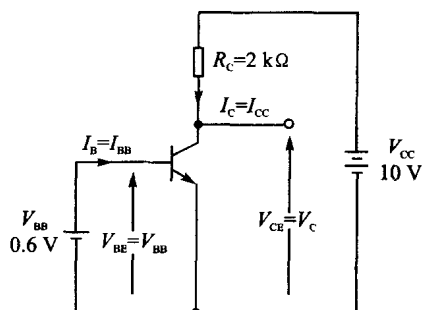


图 1-20 晶体三极管偏置电路

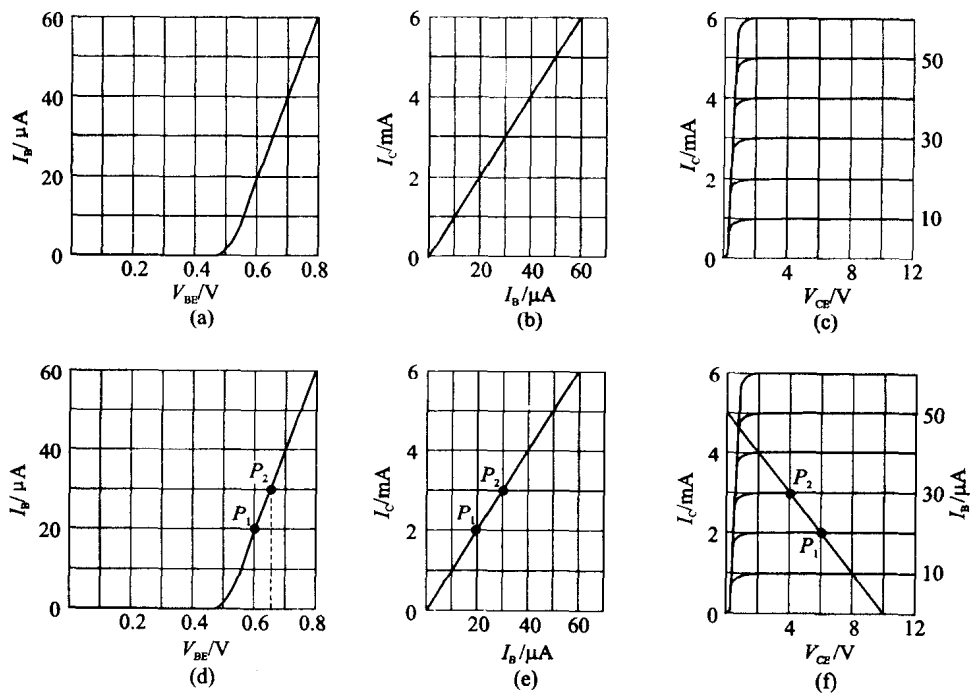


图 1-21 晶体三极管的静态特性曲线

〔解答〕

(1) 根据图 1-20 求得 $V_{BE} = V_{BB} = 0.6 \text{ V}$ 。

(2) 根据图 1-21(d)所示特性曲线, $V_{BE} = 0.6 \text{ V}$ 与曲线交点 P_1 所对应的基极电流 $I_B = 20 \mu\text{A}$; 根据图 1-21(e)所示特性曲线, $I_B = 20 \mu\text{A}$ 与曲线交点 P_1 所对应的集电极电流 $I_C = 2 \text{ mA}$ 。

(3) 根据图 1-21(f)所示特性曲线, 负载线 ($I_C = 0$ 时, $V_{CE} = 10 \text{ V}$; $V_{CE} = 0$ 时, $I_C = V_{CC}/R_C = 10 \text{ V}/2 \text{ k}\Omega = 5 \text{ mA}$) 与交点 P_1 所对应的集电极发射极间电压 $V_{CE} = 6 \text{ V}$ 。

(4) 再根据图 1-21(f) 所示曲线与负载线交点 P_2 相交点 ($V_{CE}=4\text{ V}$) 时, P_2 点对应的集电极电流 $I_C=3\text{ mA}$ 即可。再根据图 1-21(e) 所示曲线, 要使集电极电流 $I_C=3\text{ mA}$, 基极电流 $I_B=30\text{ }\mu\text{A}$ 即可。再根据图 1-21(d) 所示曲线, 为使基极电流 $I_B=30\text{ }\mu\text{A}$, 需要 $V_{BE}=0.65\text{ V}$ 偏置电压 (P_2 点对应的电压)。

例题六

【题意】 理解晶体三极管共射等效电路的电压源与电流源之间的变换。

【题目】 对于图 1-22 所示的晶体三极管共射电路, 试回答下述问题:

(1) 试将电压源图(a)变换为电流源图(b)。

(2) 对于图(b)试推导下式

$$i_B = \frac{1}{r_B + (1+\beta)r_E} v_B - \frac{(1+\beta)r_E/r_C}{r_B + (1+\beta)r_E} v_C$$

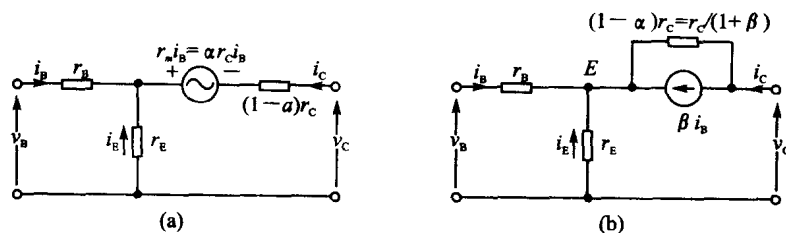


图 1-22 晶体三极管共射电路的等效电路

【解答】

(1) 为要将电压源变换为电流源, 因 $r_m = \alpha r_C$, $\beta = \alpha/(1-\alpha)$, 则有 $r_m i_B / [(1-\alpha)r_C] = \alpha i_B / (1-\alpha) = \beta i_B$, 又因为 $\beta = \alpha/(1-\alpha)$, 即 $(1-\alpha) = 1/(1+\beta)$, 则电流源如图(b)所示。

(2) 考虑图(b)的 E 点电位, 则式

$$v_B - i_B r_B = -i_E r_E = -(i_C - \beta i_B)(1-\alpha)r_C + v_C \quad (1-1)$$

成立。式中, 由于 $i_E = -(i_C + i_B)$, 则 $v_B - i_B r_B = (i_C + i_B)r_E$, 所以

$$i_B(r_B + r_E) = v_B - i_C r_E \quad (1-2)$$

又由于 $-i_E r_E = (i_C + i_B)r_E$, 则式(1-1)变成 $(i_C + i_B)r_E = -(i_C - \beta i_B)(1-\alpha)r_C + v_C$, 可整理为

$$i_C[(1-\alpha)r_C + r_E] = [\beta(1-\alpha)r_C - r_E]i_B + v_C \quad (1-3)$$

式中, 若 $(1-\alpha)r_C \gg r_E$ (通常 r_E 为 r_C 的 $1/10^5$ 左右), 则

$$i_C(1-\alpha)r_C \approx \beta(1-\alpha)r_C i_B + v_C$$

$$\text{即} \quad i_C \approx \beta i_B + \frac{v_C}{(1-\alpha)r_C} \quad (1-4)$$

将式(1-4)代入式(1-2)中, 则有

$$i_B(r_B + r_E) = v_B - \left[\beta i_B + \frac{v_C}{(1-\alpha)r_C} \right] r_E \quad (1-5)$$

式中, $\beta = \alpha/(1-\alpha)$, 即 $\alpha = \beta/(1+\beta)$, 若将此代入式(1-5), 则式(1-5)变成

$$i_B(r_B + r_E) = v_B - \left[\beta i_B + \frac{v_C}{(1 + (\beta/1 + \beta))r_C} \right] r_E$$

因为, $i_B(r_B + r_E + \beta r_E) = v_B - (1 + \beta) \frac{r_E}{r_C} v_C$, 则有

$$i_B = \frac{1}{r_B + (1 + \beta)r_E} v_B - \frac{(1 + \beta)r_E/r_C}{r_B + (1 + \beta)r_E} v_C \quad (1-6)$$

例题七

【题意】 分析与推导晶体三极管共基电路的发射极电流。

【题目】 对于图 1-23 所示的晶体三极管共基电路, 试推导出发射极电流 i_E 的下述表达式, 式中设 $r_B \ll r_C$ 。

$$i_E = \frac{v_E}{r_E + r_B(1 - \alpha)} - \frac{r_B}{r_C} \cdot \frac{v_C}{r_E + r_B(1 - \alpha)}$$

【解答】 对于图 1-23 中的 A 点电位为

$$v_E - i_E r_E = r_B i_B = r_C (i_C - \alpha i_E) + v_C \quad (1-7)$$

又因为 $i_C = i_E - i_B$, 由式(1-7)有 $r_B i_B = r_C (i_E - i_B - \alpha i_E) + v_C$, 即为 $(r_B + r_C) i_B = (1 - \alpha) r_C i_E + v_C$ 。

由于 $r_C \gg r_B$, 若忽略 r_B , 则有

$$r_C i_B = (1 - \alpha) r_C i_E + v_C \quad (1-8)$$

将式(1-8)等号两边乘以 r_B , 则变成 $r_C r_B i_B = r_B (1 - \alpha) r_C i_E + r_B v_C$ 。

又因为 $r_B i_B = v_E - i_E r_E$, 由式(1-7), 则有

$$r_C (v_E - i_E r_E) = r_B (1 - \alpha) r_C i_E + r_B v_C$$

因此 $-[r_C r_E + r_B (1 - \alpha) r_C] i_E = -r_C v_E + r_B v_C$

所以

$$i_E = \frac{v_E}{r_E + r_B(1 - \alpha)} - \frac{r_B}{r_C} \cdot \frac{v_C}{r_E + r_B(1 - \alpha)}$$

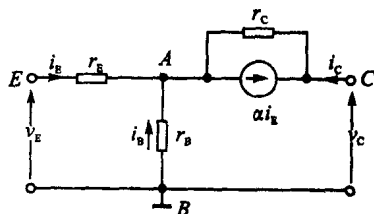


图 1-23 晶体三极管共基等效电路

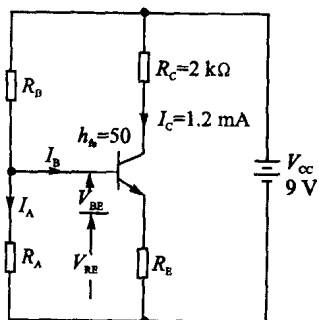


图 1-24 电流反馈偏置电路

例题八

【题意】 理解和计算电流反馈偏置电路。

【题目】 在图 1-24 所示的电流反馈偏置电路中, 试求 R_A 、 R_B 、 R_E 的电阻值。设电路中, $V_{BE} = 0.12 \text{ V}$, $I_A = 10 I_B$, $V_{RE} = 0.2 V_{CC}$, $h_{fe}(\beta) = 50$, $V_{CC} = 9 \text{ V}$ 。

【解答】 因为 $I_B = I_C / h_{fe} = 1.2 / 50 = 0.024 \text{ mA}$, $V_{RE} = 0.2 V_{CC} = 0.2 \times 9 = 1.8 \text{ V}$, 又 $V_{RE} = R_E I_E$, 所以

$$R_E = V_{RE} / I_E = V_{RE} / (I_B + I_C) = 1.8 \text{ V} / (0.024 + 1.2) \text{ mA} \approx 1.47 \text{ k}\Omega$$

因为 $I_A = 10 I_B = 0.24 \text{ mA}$, $V_{RA} = I_A R_A = V_{BE} + V_{RE}$, 所以

$$R_A = (V_{BE} + V_{RE}) / I_A = (0.12 + 1.8) \text{ V} / 0.24 \text{ mA} = 8 \text{ k}\Omega$$

又因为 $(I_B + I_A) R_B = V_{CC} - V_{RA}$, 所以

$$R_B = (V_{CC} - V_{RA}) / (I_B + I_A) = [9 - (0.12 + 1.8)] / (0.024 + 0.24) = 7.08 \text{ V} / 0.264 \text{ mA} \approx 26.8 \text{ k}\Omega$$

例题九

〔题意〕 理解电流反馈偏置电路中电流反馈的作用。

〔题目〕 在图 1-24 所示的电流反馈偏置电路中,试说明电流反馈的作用。

〔解答〕 电路中,当环境温度变化时集电极电流 I_C 增大,则发射极电阻 R_E 的电压降 V_{RE} 增加,基极发射极间偏置电压自动减小,从而抑制了 I_C 的增大,保持电路稳定工作。

现将变化情况说明如下:偏置电压 $V_{BE} = V_{RA} - V_{RE} = R_A I_A - R_E (I_C + I_B)$,若温度变化使集电极电流 I_C 增大时,使 V_{BE} 减小。这样, I_C 的变化通过偏置电压 V_{BE} 进行反馈,工作时常保持 I_C 为恒定值。

例题十

〔题意〕 理解温度变化对固定偏置电路的影响。

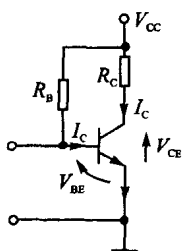


图 1-25 固定偏置电路

〔题目〕 在图 1-25 所示的固定偏置电路中,试叙述稳定系数 $S(I_{C0})$ 及 $S(V_{BE})$ 。当晶体三极管的 $\beta_0 = 200$,由于温度升高使 I_{C0} 增加,即 $\Delta I_{C0} = 10 \mu A$ 时,试求集电极电流的增量 ΔI_C 为多大?

〔解答〕 集电极电流 I_C 为

$$I_C = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0} \cdot \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} + \frac{I_{C0}}{1 - \alpha_0} = \beta_0 \cdot \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} + (1 + \beta_0) I_{C0} \quad (1-9)$$

由于 $V_{CC} \gg V_{BE}$,则可忽略 V_{BE} 受温度的影响。然而, I_{C0} 受温度的影响非常大。由式(1-9)求得稳定系数 $S(I_{C0})$,则有

$$S(I_{C0}) = \frac{\partial I_C}{\partial I_{C0}} = 1 + \beta_0 \approx \beta_0$$

现设 $\beta_0 = 200$, $\Delta I_{C0} = 10 \mu A$,则

$$\Delta I_C = S(I_{C0}) \Delta I_{C0} \approx \beta_0 \Delta I_{C0} = 200 \times 10 \mu A = 2 \text{ mA}$$

例题十一

〔题意〕 了解场效应晶体管(FET)放大电路的工作点。

〔题目〕 试求图 1-26(a)所示的场效应晶体管放大电路的工作点(I_D 、 V_{DS} 、 V_{GS})。图(b)为场效应晶体管的特性。 I_D 为漏极电流, V_{DS} 为漏源间电压, V_{GS} 为栅源间电压, V_P 为夹断电压。

〔解答〕 FET 栅极电压 V_G 为

$$V_G = V_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 20 \text{ V} \times \frac{500 \text{ k}\Omega}{1.5 \text{ M}\Omega + 500 \text{ k}\Omega} = 5 \text{ V}$$

$V_{GS} = 5 \text{ V}$ 之点即为图(b)中 A 点,而 $R_S = 2 \text{ k}\Omega$ 的偏置线的斜率为 $-1/R_S$ 变成 $\overline{AB}$ 线($R_S = \overline{AC}/\overline{BC} = 8 \text{ V}/4 \text{ mA} = 2 \text{ k}\Omega$)。工作点即为图(b)中 Q 点, Q 点对应的 $I_D \approx 3.3 \text{ mA}$, $V_{GS} \approx -1.6 \text{ V}$ 。另外,因为 $V_{DD} = R_D I_D + V_{DS} + R_S I_D$,所以, $V_{DS} = V_{DD} - (R_D + R_S) I_D$,将其值代入,则有 $V_{DS} = 20 \text{ V} - (3 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega) \times 3.3 \text{ mA} = 3.5 \text{ V}$ 。因此求得的工作点为 $I_D = 3.3 \text{ mA}$, $V_{DS} = 3.5 \text{ V}$, $V_{GS} = -1.6 \text{ V}$ 。