

模拟电子技术

ANALOG ELECTRONIC

学习指导

■ 孙丽萍 朱 莉 孙 璇 编著

东北林业大学出版社

模拟电子技术学习指导

孙丽萍 朱 莉 孙 璇 编著

东北林业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术学习指导/孙丽萍, 朱莉, 孙璇编著. —哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2005.4

ISBN 7-81076-718-6

I. 模… II. ①孙… ②朱… ③孙… III. 模拟电路-电子技术-高等学校-教学参考资料 IV. TN 710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 038520 号

责任编辑: 杨秋华

封面设计: 彭 宇



NEFUP

模拟电子技术学习指导

Moni Dianzi Jishu Xuexi Zhidao

孙丽萍 朱 莉 孙 璇 编著

东北林业大学出版社出版发行

(哈尔滨市和兴路 26 号)

哈尔滨市动力区哈平印刷厂印装

开本 787×960 1/16 印张 16.5 字数 294 千字

2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月第 1 次印刷

印数 1—1 000 册

ISBN 7-81076-718-6

TM-9 定价: 25.00 元

内 容 简 介

本书是普通高等院校电气类及其各相关工科专业模拟电子技术课程学习指导教材,全书系统而精炼地涵盖了模拟电子技术的基本内容。全书共分10章,主要包括常用半导体器件、基本放大电路、多级放大电路、集成运算放大电路、放大电路的频率响应、放大电路中的反馈、信号的运算和处理、波形的发生和信号的转换、功率放大电路、直流电源。

为了便于读者的学习和参考,书中不仅提炼了涵盖重点、难点知识在内的学习目标、内容概要,而且还提供了典型例题和习题,并附有部分院校的研究生入学考试试题。

本书亦可供其他工科类专业学生和从事信息工程的技术人员参考。

前 言

本书是依据教育部对高等院校模拟电子技术课程教学大纲要求,面向电气类及其各相关工科专业学生的一本学习(考研)指导和教学参考书。

为使读者更好地理解 and 掌握模拟电子技术的基本内容,提高对知识的综合运用能力,编者结合多年课程教学经验编写了此书,其内容系统、精炼,条理清晰,重点突出。本书采用了“学习目标、内容概要、疑难解析、习题与答案”的框架结构。其中,学习目标是结合各章的基本知识要点、重难点要求而提炼得到的,以使读者清楚而快捷地明确关于学习或复习的主线和内容掌握程度;内容概要部分归纳了每章的基本概念和主要内容;作者精心筛选了具有典型性和代表性的例题和习题,通过例题详解和习题练习,加深读者对知识点的掌握,提高解题的能力和技巧,同时针对习题还配备了相应的参考答案。

本书由孙丽萍、朱莉、孙璇编著。全书共分10章,其中第1、3、7章由孙丽萍(东北林业大学)编写;第2、4章由陈立生(东北林业大学)编写;第6、9章由朱莉(东北林业大学)编写;第5、8章由孙璇(黑龙江工商职业技术学院)编写;第10章、附录由王树臣(佳木斯大学)编写。全书由孙丽萍统稿。

本书由东北林业大学韩玉杰教授任主审,同时在本书的框架构思和编写中得到了东北林业大学于龙梅教授的指导,在此向他们表示诚挚的谢意。同时感谢给予编写工作大力支持和帮助的教师和研究生。

由于编者水平有限,编写时间仓促,疏漏和不当之处在所难免,请读者斧正。

编 者

2004年10月16日

目 录

1 常用半导体器件	(1)
1.1 学习目标	(1)
1.2 内容概要	(1)
1.3 疑难解析	(4)
1.4 习题与答案	(15)
2 基本放大电路	(24)
2.1 学习目标	(24)
2.2 内容概要	(24)
2.3 疑难解析	(29)
2.4 习题与答案	(37)
3 多级放大电路	(50)
3.1 学习目标	(50)
3.2 内容概要	(50)
3.3 疑难解析	(55)
3.4 习题与答案	(72)
4 集成运算放大电路	(82)
4.1 学习目标	(82)
4.2 内容概要	(82)
4.3 疑难解析	(86)
4.4 习题与答案	(90)
5 放大电路的频率响应	(99)
5.1 学习目标	(99)
5.2 内容概要	(99)
5.3 疑难解析	(101)
5.4 习题与答案	(114)
6 放大电路中的反馈	(124)
6.1 学习目标	(124)
6.2 内容概要	(124)
6.3 疑难解析	(128)

6.4 习题与答案	(136)
7 信号的运算和处理	(147)
7.1 学习目标	(147)
7.2 内容概要	(147)
7.3 疑难解析	(151)
7.4 习题与答案	(164)
8 波形的发生和信号的转换	(176)
8.1 学习目标	(176)
8.2 内容概要	(176)
8.3 疑难解析	(180)
8.4 习题与答案	(187)
9 功率放大电路	(196)
9.1 学习目标	(196)
9.2 内容概要	(196)
9.3 疑难解析	(199)
9.4 习题与答案	(210)
10 直流电源	(219)
10.1 学习目标	(219)
10.2 内容概要	(219)
10.3 疑难解析	(223)
10.4 习题与答案	(232)
附录 部分学校研究生入学考试模拟电子技术试题	(243)
湖南大学 2000 年硕士研究生入学考试试题	(243)
湖南大学 2001 年硕士研究生入学考试试题	(244)
北京航空航天大学 2001 年硕士研究生入学考试试题	(247)
哈尔滨工业大学 1999 年硕士研究生入学考试试题	(249)
西北工业大学 1999 年硕士研究生入学考试试题	(252)
复旦大学 1999 年硕士研究生入学考试试题	(253)
西安电子科技大学 2000 年硕士研究生入学考试试题	(255)
参考文献	(258)

1 常用半导体器件

1.1 学习目标

本章介绍半导体的基础知识，通过学习应掌握本征半导体、杂质半导体等基本概念和导电机理，PN 结的形成过程及半导体二极管、稳压二极管、半导体三极管、场效应管以及光电器件的结构、工作原理、外部特性曲线和主要参数。

1.2 内容概要

1.2.1 基本概念

1.2.1.1 本征半导体

经过高度提纯后，晶体结构完整的单晶体称为本征半导体。

1.2.1.2 杂质半导体

杂质半导体分为 N 型半导体和 P 型半导体。

(1) N 型半导体（也称为电子型半导体）是在本征半导体中掺入一定量的五价元素而形成，即电子为多数载流子，空穴为少数载流子。

(2) P 型半导体（也称为空穴型半导体）是在本征半导体中掺入一定量的三价元素而形成。空穴为多数载流子，电子为少数载流子。

N 型半导体和 P 型半导体对外不显电性。

1.2.1.3 PN 结

N 型半导体和 P 型半导体，用一种特殊方式结合，在 N 型、P 型半导体的交界面上就形成 PN 结。

1.2.1.4 PN 结的单向导电性

PN 结外加正向电压 (P 区接电源的正极, N 区接电源的负极) → 空间电荷区变窄 → PN 结电阻变小 → 有利于导通。

PN 结外加反向电压 (N 区接电源的正极, P 区接电源的负极) → 空间电荷区变宽 → PN 结电阻变大 → 不导通 (截止)。

1.2.2 半导体二极管

半导体二极管是 PN 结加外引线由管壳封装构成, 其结构分为点接触型、面接触型和平面型二极管。

1.2.2.1 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是只有二极管的正向电压超过一定数值 U_{on} 以后, 二极管的正向电流与端电压呈指数关系。使二极管开始导通的临界电压称为开启电压 U_{on} (硅管 0.5 V, 锗管 0.1 V), 而二极管导通后通常硅管取 0.7 V, 锗管取 0.2 V。二极管的反向电压足够大且未击穿时的电流为反向饱和电流 I_s (硅管 $< 0.1 \mu A$, 锗管为几十微安)。

1.2.2.2 二极管的等效电路

由于二极管特性曲线是非线性, 将给分析电路带来一定的困难, 所以用线性化元件来等效称为二极管的等效模型。等效方式简述如下:

(1) 理想二极管的等效模型。正向导通时, 二极管两端电压降为零; 反向截止时, 二极管通过的电流为零。

(2) 理想二极管串联电压源的等效模型。二极管导通时, 正向压降为一个常值 U_{on} ; 反向截止时, 二极管通过的电流为零。

(3) 折线等效模型。二极管外加正向电压大于 U_{on} , 其特性曲线的切线斜率为 r_D 的倒数; 反向截止时, 二极管通过的电流为零。因此, 等效模型为理想二极管串联电压源 U_{on} 再串联直流电阻 r_D ($r_D = \Delta U / \Delta I$)。

(4) 微变等效模型。在有二极管的电路中, 除直流电源外, 还引入微小的交变信号, 二极管的工作状态将在直流工作点 Q 附近有微小变动, 为分析二极管在直流工作点附近电压和电流微小变化量之间的关系, 可用静态工作点 Q 处切线表示实际的二极管伏安特性曲线上的这一小段。切线斜率 $\tan \theta = \Delta i_D / \Delta u_D$, 其动态电阻 $r_d \approx U_T / I_D$ 。

1.2.3 稳压二极管

稳压二极管是一种特殊的二极管, 工作在反向击穿状态, 利用二极管的

反向击穿特性实现稳压。稳压二极管通常用硅材料制成, 也称硅稳压管。

1.2.4 双极型晶体管

双极型晶体管 (BJT) 又称晶体三极管、半导体三极管, 简称晶体管, 由于靠电子和空穴两种载流子导电, 故称为双极型晶体管。在结构上具有三个掺杂区即发射区、基区、集电区, 并分别引有发射极 e、基极 b 和集电极 c 三个电极, 两个 PN 结即 b、e 间为发射结, b、c 间为集电结。其在结构特点上应是发射区采用高浓度掺杂, 基区薄, 集电区面积大。从类型上分为 NPN 型和 PNP 型、硅管和锗管。

1.2.4.1 三极管的联接方式

共射电流放大系数和共基电流放大系数分别为 β 和 α 。

(1) 共射: $\bar{\beta} = \beta = \Delta I_C / \Delta I_B$;

(2) 共基: $\bar{\alpha} = \alpha = \Delta I_C / \Delta I_E$ 。

共射共基 α 、 β 两者的关系为: $\alpha = \beta / (1 + \beta)$ 、 $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ 。

1.2.4.2 共射接法半导体三极管的特性曲线

(1) 输入特性曲线: $i_B = f(u_{BE}) \mid U_{CE} = \text{常数}$;

(2) 输出特性曲线: $i_C = f(u_{CE}) \mid I_B = \text{常数}$ 。

三极管输入特性曲线: 相当于二极管正向特性曲线, 它实际是三极管发射结正向特性曲线。

三极管输出特性曲线: 是一个曲线族, 把三极管的工作状态分为三个区, 即放大区、饱和区、截止区。

放大区: $U_{CE} \geq 1 \text{ V}$, i_C 只受 I_B 控制与 U_{CE} 无关, $i_C = \beta I_B$, 曲线平行等距。此时发射结正偏, 集电结反偏。

饱和区: 当 $U_{CB} \leq 0$ 或 $U_{CE} \leq U_{BE}$ 时, $i_C \neq \beta I_B$, 是靠近纵轴的区。此时发射结、集电结均处于正偏。

截止区: $I_B \leq 0$, 此时集电极电流近似为零, 集电极电压接近电源电压。此时发射结、集电结均处于反偏。

1.2.5 场效应管

场效应管是一种由 PN 结组成的器件, 它有 P 型和 N 型两种导电沟道, 是靠电场效应来控制电流的半导体器件。

场效应管按其结构可分为结型场效应管和绝缘栅型场效应管; 从工作性能来看, 可分为耗尽型和增强型两类。

1.2.5.1 结型场效应管

结型场效应管的工作原理是 PN 结必须反向偏置, 用控制栅极电压 u_{GS} 的大小来改变 PN 结阻挡层的宽窄, 靠 PN 结宽窄变化改变通道电阻的大小, 达到控制漏极电流的目的。

1.2.5.2 绝缘栅型场效应管

绝缘栅型场效应管是利用栅极电压产生的感应电荷来改变导电沟道的宽窄, 从而控制多数载流子在沟道中的漂移运动所产生的漏电流。

绝缘栅型场效应管又分为增强型和耗尽型两种场效应管。增强型是无外加电压时无导电沟道。耗尽型与增强型不同之处, 是在绝缘层中人为地掺入相应的离子, 在栅极与衬底间形成电场, 该电场足以在衬底形成反型层, 即形成载流子的沟道。其控制漏极电流的过程与增强型一样。

1.2.5.3 场效应管的特性曲线

场效应管的特性曲线主要分为转移特性曲线和漏极特性曲线, 它们均属于输出特性曲线, 可反映当栅源电压对漏极电流的控制能力。场效应管的输出特性可分为三个区域: 可变电阻区、夹断区、恒流区。

可变电阻区: 改变 U_{GS} 即改变了漏极与源极间的电阻, 通常作为压控电阻使用, 即靠近纵轴的区。

夹断区: 也称为截止区, 即靠近横轴的区。

恒流区: 即称为放大区, 当场效应管应用于放大电路时, 应工作在恒流区。

1.3 疑难解析

例 1-1 理想二极管电路如例 1-1 图所示, 试判别电路中的二极管是导通还是截止, 并求出输出电压 u_o 。

解:

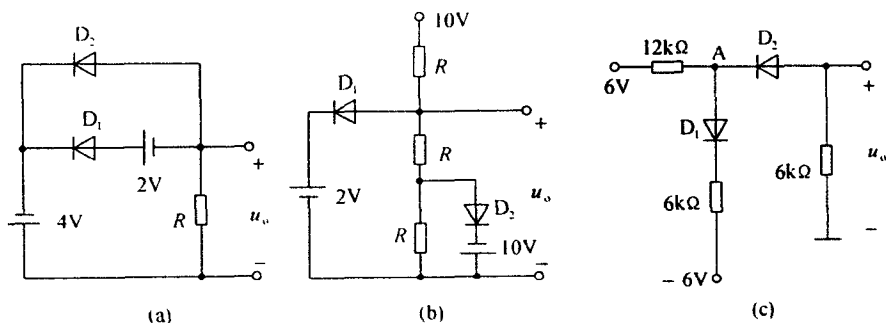
(a) D_1 管导通, D_2 管截止, $u_o = -6\text{ V}$ 。

(b) 由于 D_2 管导通后将使 $u_o = 0$, 因而 D_1 管将不能导通。因此, D_1 截止, D_2 导通, $u_o = 0$ 。

(c) 令 D_1 管导通, D_2 管截止, 则 A 点电位 U_A 为

$$U_A = 6 - \frac{6 - (-6)}{12 + 6} \times 12 = 6 - 8 = -2\text{ V}$$

所以 D_2 截止的设定不成立。重令 D_1 、 D_2 均导通。此时, 按叠加定理求得



例 1-1 图

U_A 为

$$U_A = \frac{6 // 6}{12 + (6 // 6)} \times 6 + \frac{12 // 6}{6 + (12 // 6)} \times (-6) = -1.2 \text{ V}$$

可见, D_1 、 D_2 均导通的设定成立, 且 $u_o = U_A = -1.2 \text{ V}$ 。

例 1-2 二极管电路如例 1-2 图 (a) 所示, 设 D 为理想二极管。

(1) 试画出电路的传输特性 (u_o 与 u_i 特性)。

(2) 假定输入电压如例 1-2 图 (b) 所示, 试画出相应的 u_o 波形。

解:

(1) 当 $u_i < 12 \text{ V}$, 且 $u_i > -10 \text{ V}$, D_1 和 D_2 同时截止, 则 $u_o = u_i$; 当 $u_i \geq 2 \text{ V}$ 时, D_1 导通, D_2 截止, 此时电路可简化成例 1-2 图 (c)。

由例 1-2 图 (c) 可得

$$u_o = 12 \text{ V} + (u_i - 12 \text{ V}) \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 4 \text{ V} + \frac{2}{3} u_i$$

如 $u_i = 16 \text{ V}$, $u_o = 14.7 \text{ V}$ 。

当 $u_i \leq -10 \text{ V}$ 时, 对 D_1 截止, D_2 导通, 此时电路可简化成例 1-2 图 (d)。此时

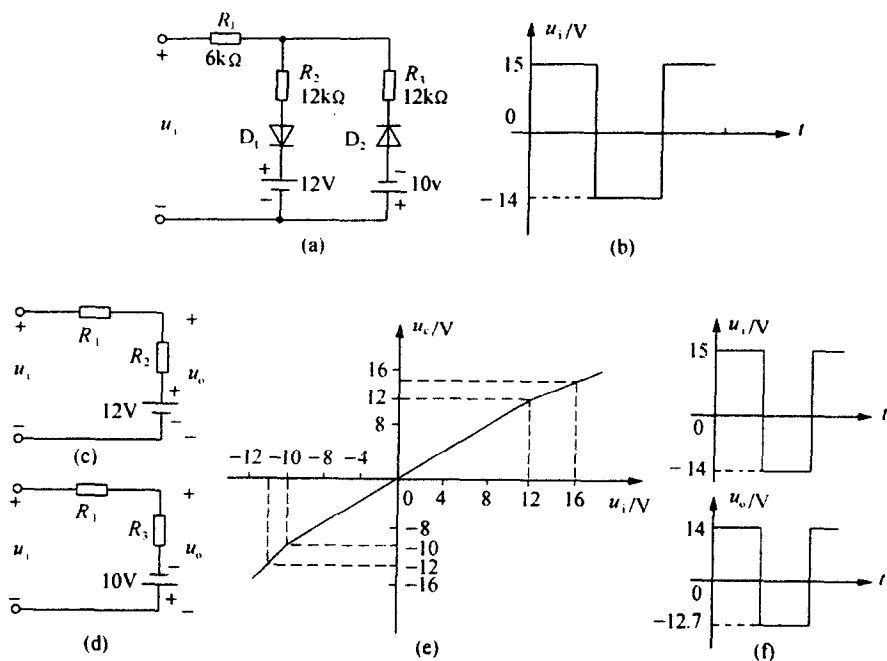
$$u_o = -10 \text{ V} + (u_i + 10 \text{ V}) \frac{R_3}{R_1 + R_3} = -\frac{10}{3} \text{ V} + \frac{2}{3} u_i$$

如 $u_i = -12 \text{ V}$, $u_o = -11.33 \text{ V}$ 。

由上可得传输特性如例 1-2 图 (e) 所示。

(2) 输出波形如例 1-2 图 (f) 所示。

当 $u_i = +15 \text{ V}$ 时, $u_o = 4 \text{ V} + \frac{2}{3} u_i = 14 \text{ V}$;

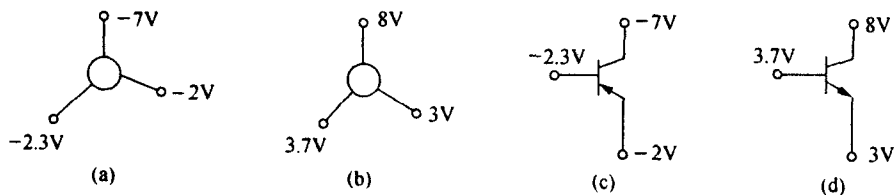


例 1-2 图

当 $u_i = -14 \text{ V}$ 时, $u_o = -\frac{10}{3} \text{ V} + \frac{2}{3} u_i = -12.7 \text{ V}$ 。

例 1-3 已知晶体管工作在线性放大区, 并测得其各极电压如例 1-3 图所示。试画出晶体管的电路符号, 并分别说明是硅管还是锗管。

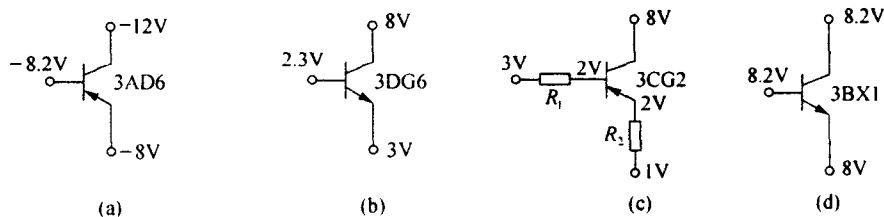
解: 因晶体管工作在放大区, 故发射结正偏, 集电结反偏。对于硅管, 发射结正偏电压应为 0.7 V ; 对于锗管, 发射结正偏电压应为 0.2 V ; 对于 PNP 管, 集电极电位最低, 发射极电位最高; 对于 NPN 管, 集电极电位最高, 发射极电



例 1-3 图

位最低。由此可判别：例 1-3 图 (a) 是 PNP 锗管，电路符号如例 1-3 图 (c) 所示。例 1-3 图 (b) 是 NPN 硅管，电路符号如例 1-3 图 (d) 所示。

例 1-4 已测得晶体三极管各极对地电位如例 1-4 图所示。试判断各晶体三极管处于何种工作状态（饱和、放大、截止或损坏）。



例 1-4 图

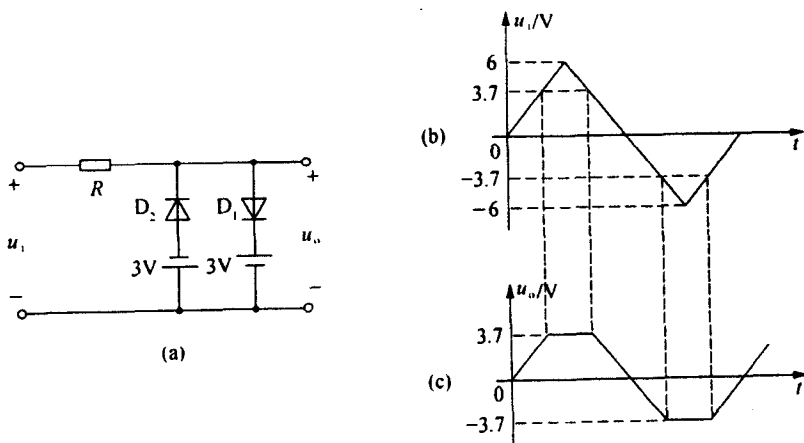
解：在例 1-4 图 (a) 中，3AD6 是锗 PNP 管。 $U_{BE} = 0.2 \text{ V}$ ，即发射结正偏； $U_{CB} = -3.8 \text{ V}$ ，即集电结反偏。所以晶体管工作在放大区。

在例 1-4 图 (b) 中，3DG6 是硅 NPN 管。 $U_{BE} = -0.7 \text{ V}$ ，即发射结反偏； $U_{CB} = 5.7 \text{ V}$ ，即集电结反偏。所以晶体管工作在截止区。

在例 1-4 图 (c) 中，3CG2 是硅 PNP 管， $U_{BE} = 0$ ，而 I_E 和 I_B 不为零，表明发射结短路，晶体管已损坏。

在例 1-4 图 (d) 中，3BX1 是锗 NPN 管。 $U_{BE} = 0.2 \text{ V}$ ，即发射结正偏； $U_{BC} = 0.2 \text{ V}$ ，即集电结零偏。所以晶体管工作在临界饱和区。

例 1-5 二极管双向限幅电路如例 1-5 图 (a) 所示。若输入 u_i 为例



例 1-5 图

1-5图(b)所示的三角波,试画出 u_o 的波形。

解:电路为双向限幅器,其上门限为 3.7 V ,下门限为 -3.7 V 。对应输入的 u_i 波形如例1-5图(c)所示。

例1-6 稳压二极管电路如例1-6图所示,已知稳压管的 $U_Z = -6\text{ V}$,限流电阻 $R = 100\ \Omega$ 。

(1) 当 $R_1 = 200\ \Omega$ 时,稳压管的 $I_Z = ?$ $U_o = ?$

(2) 当 $R_2 = 50\ \Omega$ 时,稳压管 $I_Z = ?$ $U_o = ?$

解:

(1) 由图可知

$$I_R = \frac{E - U_Z}{R} = \frac{-10 - (-6)}{0.1} = -40\text{ mA}$$

$$I_L = \frac{U_Z}{R_L} = \frac{-6}{0.2} = 30\text{ mA}$$

$$I_Z = I_R - I_L = -40 + 30 = -10\text{ mA}$$

$$U_o = U_Z = -6\text{ V}$$

(2) 当 $R_L = 50\ \Omega$ 时,稳压二极管不能击穿,因而

$$U_o = \frac{R}{R + R_L} R_L = \frac{-10}{100 + 50} \times 50 = -3.3\text{ V}$$

$$I_Z = 0$$

例1-7 试根据放大电路的组成原则,判断如例1-7图所示的各电路是否具备放大条件,并说明原因。

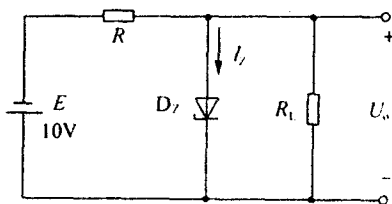
解:例1-7图(a):电源极性接反了,电路无放大作用。

例1-7图(b):由于 C_1 的隔直作用使基极电流 $I_B = 0$,发射结无偏置,信号不能正常放大。

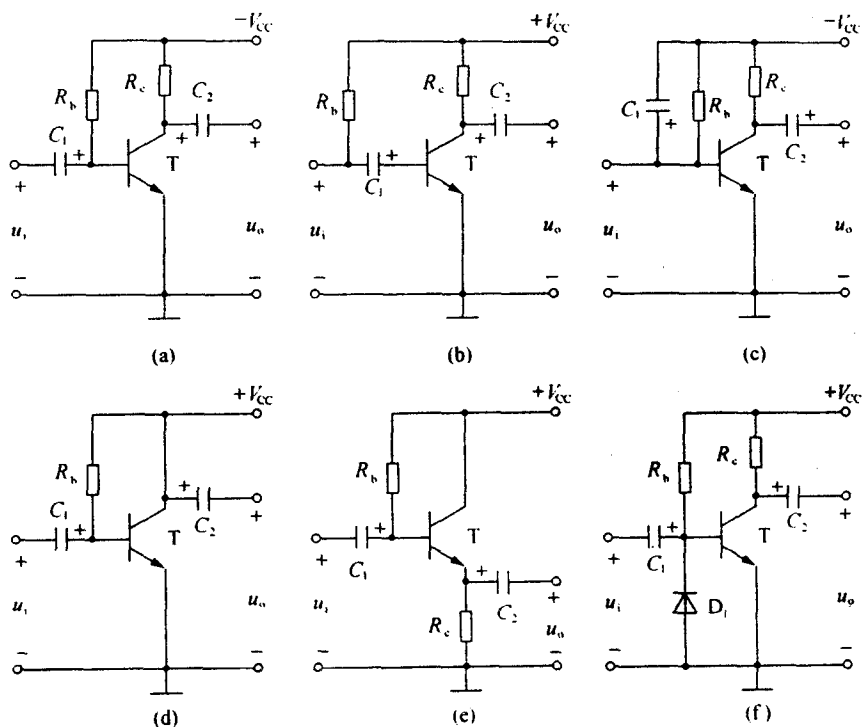
例1-7图(c):输入信号经 C_1 和电源,交流短路,信号无法加到三极管发射结上, $U_{BE} = \text{常数}$,电路无放大作用。

例1-7图(d): $R_C = 0$,信号经放大后虽有 i_c 变化,但 $U_{CE} = V_{CC}$,输出信号为零,电路无放大作用。

例1-7图(e): $I_B = 0$,发射结零偏,集电结反偏。三极管截止,信号不能正常放大。



例1-6图



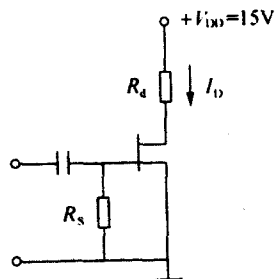
例 1-7 图

例 1-7 图 (f): 符合放大电路组成应遵循的两条原则。电源极性连接正确, 使发射结正偏, 集电结反偏; 信号有输入、输出回路, 二极管反偏不会影响信号输入; 若参数选择合理和静态工作点适当, 保证三极管工作在放大区, 则可实现不失真地放大。这是利用二极管进行温度补偿来稳定静态工作点的电路。

例 1-8 电路如例 1-8 图所示, $I_{DSS} = 3 \text{ mA}$, $U_{GS(off)} = -3 \text{ V}$, 分别求出 $R_d = 0$ 、 $R_d = 3.9 \text{ k}\Omega$ 和 $R_d = 10 \text{ k}\Omega$ 时 I_D , 并分别指出场效应管的工作区域。

解: 对于结型效应管, 若它工作在饱和区, 有

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2 = 3 \text{ mA} \quad (U_{GS} = 0 \text{ V})$$



例 1-8 图

于是, 在 R_d 取不同值时, 可分别计算出 U_{DS} :

$$U_{DS} = V_{DD} - I_D R_d$$

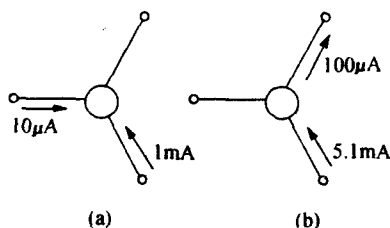
当 $R_d = 0 \Omega$ 时, $U_{DS} = V_{DD} = 15 \text{ V}$;

当 $R_d = 3.9 \text{ k}\Omega$ 时, $U_{DS} = 15 - 3.9 \times 3 = 3.3 \text{ V}$;

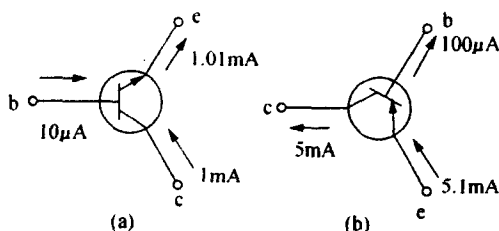
当 $R_d = 10 \text{ k}\Omega$ 时, $U_{DS} = 15 - 10 \times 3 = -15 \text{ V}$ (不合理)。

前两种情况, $U_{GD} = U_{GS} - U_{DS} < U_P$, 所以工作在输出特性曲线的饱和区; 第三种情况, U_{DS} 不可能小于零, 故 $I_D < 3 \text{ mA}$, 所以此时场效应管工作在可变电阻区。此时若忽略 U_{DS} , 则 $I_D = V_{DD}/R_D = 1.5 \text{ mA}$ 。

例 1-9 已知两只晶体管的电流放大系数 β 分别为 50 和 100, 现测得放大电路中这两只管子两个电极的电流如例 1-9 图所示。分别求另一电极的电流, 标出其实际方向, 并在圆圈中画出管子。



例 1-9 图



例 1-9 图解

解: 根据电流之间的分配关系, 可以求出 b、c、e 的位置, 并由电流方向得出是 PNP 型管还是 NPN 型管。

在例 1-9 图 (a) 中, $\beta = 100$, $10 \mu\text{A} = \frac{I_c}{\beta}$, 故 $10 \mu\text{A}$ 、 1 mA 处分别为 b 极和 c 极, 且是 NPN 型管。标示如例 1-9 图解 (a) 所示。

在例 1-9 图 (b) 中, $100 \mu\text{A}$ 、 5.1 mA 处分为 b、e 极, 且是 PNP 型。标示如例 1-9 图解 (b) 所示。

例 1-10 定性画出三种场效应晶体管的转移特性曲线; 指出参数 $U_{GS(\text{off})}$ 对不同管型的含义。

解: 例 1-10 图所示的为三种场效应晶体管不同的转移特性曲线。结型场效应晶体管的夹断电压 $U_{GS(\text{off})}$ 在数值上等于沟道发生预夹断时的 U_{GS} 值; 此后漏极电流近似恒定, 管子进入放大工作区。对于耗尽型 MOS 管, 其夹断电压 $U_{GS(\text{off})}$ 是指沟道消失、管子截止时的 U_{GS} 临界值。

例 1-11 某放大电路中晶体管 (BJT) 三个电极 A、B、C 的电流如例