

新
版

21世纪

高职高专系列教材

模拟电子学习 指导与习题解答

◎张志良 主编

◎邵 菁 张慧莉 参编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪高职高专系列教材

模拟电子学习指导与习题解答

张志良 主 编
邵 菁 参 编
张慧莉



机械工业出版社

本书是根据张志良主编的《模拟电子技术基础》编写的学习指导书，但也自成体系，可单独使用。书中每章均给出了内容提要、基本要求和学习指导，对模拟电子技术主要内容进行全面、扼要的分析和总结，帮助读者把握教材的基本要求、重点和难点，并通过典型例题、复习思考题解答和习题解答，加深读者对基本概念的理解，提高分析和解决问题的能力。全书共有各种类型不同层次的习题 1068 道，相当于一本习题集。每章有自我检测题，书末给出检测题解答。

本书适合作为高职高专院校“模拟电子技术”课程的教学参考书或自学指导书，并可供工程技术人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子学习指导与习题解答/张志良主编. —北京: 机械工业出版社, 2006.7

(21 世纪高职高专系列教材)

ISBN 7-111-19361-X

I. 模… II. 张… III. 模拟电路-电子技术-高等学校: 技术学校-教学参考资料 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 063821 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 赵丽欣 版式设计: 张世琴 责任校对: 程俊巧

封面设计: 雷明顿 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006 年 8 月第 1 版 · 第 1 次印刷

184mm × 260mm · 19.5 印张 · 477 千字

0 001—5 000 册

定价: 27.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

编辑热线电话 (010) 88379739

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据张志良主编的《模拟电子技术基础》编写的学习指导书，但也自成体系，可单独使用。本书每章均给出了内容提要、基本要求和学习指导，对模拟电子技术主要内容进行全面、扼要的分析和总结，帮助读者把握教材的基本要求、重点和难点，并通过典型例题、复习思考题解答和习题解答，加深读者对基本概念的理解，提高分析和解决问题的能力。每章有自我检测题，书末给出检测题解答，可自我检测评价。

模拟电子技术学习指导或模拟电子技术习题解答类教辅书很多，本书在编写时与其他同类教辅书略有不同之处是：

(1) 内容较浅，但覆盖面较宽。已出版的模拟电子类教辅书中，有的是为硕士研究生入学考试编写的，难度偏高；有的内容覆盖面较窄，题量较少。而本书是针对高职高专层次编写的，书中选编的大多是一些基础性的题目。本书除一般公认内容外，还包含了高频电子电路和晶闸管电路，内容较充实。

(2) 习题量大。书中共编入了不同类型和不同层次的习题 1068 道。其中复习思考题是以问答题的形式编写，可用于学生复习基本概念，也可用于教师课堂提问。是非题、填空题、选择题和分析计算题可用于学生课后作业，以做进一步加深理解、巩固以致掌握基本概念，也可用于测验、考试。

(3) 对模拟电子典型题目，给出了详细的分析，并归纳解题的思路和方法。对学生不易理解和容易混淆的概念，给出了较为详尽的解说，有利于学生自学。

本书适用于高职高专院校“模拟电子技术”课程的教学参考书或自学指导书，也适用于其他专业、其他类型学校同类课程使用，并可供工程技术人员学习参考。

本书由上海电子信息职业技术学院高级讲师张志良主编，邵菁、张慧莉参编。其中第 1、2、3 章由张慧莉编写，第 4、5、6 章由邵菁编写，其余部分由张志良编写。

限于编者水平，书中错误和不妥之处难免，请读者批评指正（编者的 E-mail: zzlls@126.com）。

编 者

模拟电子技术学习方法建议

电子技术飞速发展,电子产品日新月异。模拟电子技术已成为高职高专工科类专业的一门非常重要的专业基础课。但是,要学好模拟电子技术,必须要有合适的教材和好的学习方法。

一、模拟电子技术课程的基本任务和要求

电子技术根据其传输信号的性质可分为模拟电子技术和数字电子技术,其中模拟电子技术是基础,数字电子技术和大规模集成电路是在模拟电子技术的基础上发展起来的。诚然,不学模拟电子技术,也可直接学习数字集成电路和大规模专用集成电路,但不容易深入理解和应用。且数字集成电路和大规模专用集成电路的输入输出端一般也离不开模拟电子技术。因此,学习模拟电子技术是必需和必要的。

但是,模拟电子技术内容丰富,在高职高专有限的教学课时内,怎样才能学好?

有两种不同意见:一种意见认为,可以不学或少学分立元件电路,主要学习集成电路应用;另一种意见认为,仍应以学习分立元件电路为主,通过学习分立元件电路加深理解集成电路的应用。编者倾向于后一种意见。理由是集成电路也是由分立元件集成的,基本工作原理相同,分析集成电路离不开分立元件电路。更何况有些分立元件电路还有其单独应用的价值。

对高职高专应用电子技术专业的学生来讲,模拟电子技术既可看作一门专业基础课,又可看作为一门专业课,因为它已经具备了单独应用的条件和要求。

学习模拟电子技术,可从三个方面入手:半导体器件、基本单元电路和基本功能电路,具体要求可参阅本书每章“基本要求和学习指导”。总体要求是:

- (1) 熟悉常用半导体器件的基本工作原理、特点和主要参数,学会合理选择电路元器件参数。
- (2) 掌握基本单元电路的组成、基本功能、特点和应用。
- (3) 熟悉基本功能电路性能分析,学会其调试、检测和排除一般故障的方法。
- (4) 熟悉典型应用电路和常用模拟集成电路的特点和应用。

二、学习方法建议

模拟电子技术内容广、概念多、关联度强,有大量名词、概念、参数,需要理解,需要记忆。前面内容未学好,后面内容就很难学。真正学好模拟电子技术,还需要加强实验实践,提高动手能力。

学习模拟电子技术与学习其他课程的基本方法是相同的,根据笔者多年的教学经验,总结为以下几方面。

1. 理解

理解是学习的基础, 不理解就没法学下去。对于模拟电子技术来讲, 不理解二极管、三极管等半导体器件的特性和参数, 怎么能应用它们? 不理解基本单元电路的特性, 怎么能把它们组成基本功能电路? 模拟电子技术是一门前后内容联系紧密的课程, 必须理解。为了理解课程内容, 又须做到以下几点:

(1) 课前预习, 利于理解。

高职高专的学习特点是课时较少, 老师讲课速度较快, 且模拟电子技术的有些内容比较抽象难懂, 若不课前预习, 往往会跟不上。若在课前预习, 弄个半懂, 听课效果则会大不相同。

(2) 课后复习, 巩固理解。

大多数同学会有这样的体会: 在课堂上听老师讲课的时候是理解的; 但课后时间一长, 忘了, 变成不理解了。因此课后必须及时复习、巩固和加深理解。

(3) 多做练习, 深入理解。

一般来说, 学生在课堂上的理解往往是肤浅的, 遇到习题和应用时又会一筹莫展。只有做了相关习题和实际应用后, 才能深入理解。本教材针对教学要求及学生可能产生的问题配备了大量的复习思考题和习题, 只有认真做好这些习题, 在练习中加深理解, 就能达到深入理解的效果。

2. 记忆

记忆是学习的支柱, 不记忆模拟电子技术中一些基本和必要的内容, 就无法达到应用的目的。模拟电子技术课程含有大量的、学生从未接触过的名词和概念, 需要学生在理解的基础上记忆。若没有及时理解记忆, 学过的内容就会很快忘记, 无法继续学下去。

3. 多练

要达到理解和记忆的目标, 离不开多练。这里所说的“练”是指自己动手练, 如果自己不动手, 只看老师练, 只看书中例题和习题解答练, 意义就不大。可能开始练时会遇到困难, 可先从模仿练起。本书习题中有不少是模仿练, 练多了自然能生巧。

4. 实验实践

模拟电子技术是一门实践性很强的课程, 学习的最终目的是为了应用, 因此需要多做实验、多实践, 才能进一步深刻理解并巩固已学到的概念和理论知识。往往有这样的情况, 有的学生模拟电子技术课程的考试成绩不错, 但是由于缺乏实验实践, 却不会调试、检测和排除一般故障, 因而就不能达到真正应用的目的。

实验实践至少还有两个好处: 一是帮助理解理论知识; 二是提高学习模拟电子技术课程的兴趣。原来理论上不太清楚的, 一做实验就清楚了; 原来理解不深刻的, 一做实验就理解透彻了; 有了学习兴趣又会反过来促进学习的自觉性和积极性。因此有条件的院校应尽量有计划地由浅入深地多安排学生做一些实验。若最后能用 1~2 周时间开设模拟电子技术课程设计, 搞一些小制作、小设计, 更可起到事半功倍的效果。

由于各院校的模拟电子技术实验装置不尽相同, 读者可根据各院校的实际情况, 选择书中合适的例题和习题进行实验实践。

目 录

前言

模拟电子技术学习方法建议

第 1 章 半导体器件 1

1.1 内容提要 1

1.2 基本要求和学习指导 3

1.3 典型例题 4

1.4 复习思考题解答 8

1.5 习题解答 21

1.6 自我检测题 37

第 2 章 放大电路基础 41

2.1 内容提要 41

2.2 基本要求和学习指导 45

2.3 典型例题 46

2.4 复习思考题解答 52

2.5 习题解答 62

2.6 自我检测题 90

第 3 章 放大电路中的负反馈 93

3.1 内容提要 93

3.2 基本要求和学习指导 95

3.3 典型例题 96

3.4 复习思考题解答 99

3.5 习题解答 102

3.6 自我检测题 111

第 4 章 集成运算放大器 114

4.1 内容提要 114

4.2 基本要求和学习指导 117

4.3 典型例题 118

4.4 复习思考题解答 122

4.5 习题解答 128

4.6 自我检测题 151

第 5 章 功率放大电路 154

5.1 内容提要 154

5.2 基本要求和学习指导 157

5.3 典型例题 157

5.4 复习思考题解答 159

5.5 习题解答 165

5.6 自我检测题 176

第 6 章 直流稳压电源 179

6.1 内容提要 179

6.2 基本要求和学习指导 181

6.3 典型例题 182

6.4 复习思考题解答 184

6.5 习题解答 192

6.6 自我检测题 203

第 7 章 正弦波振荡电路 205

7.1 内容提要 205

7.2 基本要求和学习指导 207

7.3 典型例题 208

7.4 复习思考题解答 209

7.5 习题解答 212

7.6 自我检测题 223

第 8 章 高频电路基础 225

8.1 内容提要 225

8.2 基本要求和学习指导 228

8.3 典型例题 229

8.4 复习思考题解答 230

8.5 习题解答 234

8.6 自我检测题 241

第 9 章 调制与解调 243

9.1 内容提要 243

9.2 基本要求和学习指导 248

9.3 典型例题 249

9.4 复习思考题解答 253

9.5 习题解答 267

9.6 自我检测题 281

第 10 章 晶闸管及其电路 284

10.1 内容提要 284

10.2 基本要求和学习指导 288

10.3 典型例题	288	10.6 自我检测题	296
10.4 复习思考题解答	289	自我检测题解答	297
10.5 习题解答	292		

第 1 章 半导体器件

组成电子产品的基础是半导体器件，半导体器件的基础是 PN 结，半导体器件中最重要的是二极管和三极管（包括场效应管），本章是模拟电子技术的基础和重点。

1.1 内容提要

1. PN 结

(1) 半导体具有独特的导电特性：掺杂特性；热敏和光敏特性。

(2) 本征半导体、N 型半导体和 P 型半导体：纯净的具有晶体结构的半导体材料称为本征半导体；4 价元素掺入微量 5 价元素后形成 N 型半导体，自由电子数 $\gg$ 空穴数；4 价元素掺入微量 3 价元素后形成 P 型半导体，空穴数 $\gg$ 自由电子数。

(3) PN 结具有单向导电性：加正向电压时导通；加反向电压时截止。

(4) PN 结的伏安特性可分为正向和反向两大部分：正向特性和反向特性。正向特性又可分为两段：死区段和导通段；反向特性也可分为两段：饱和段和击穿段。

(5) PN 结击穿可分为电击穿和热击穿，电击穿可逆，热击穿不可逆。击穿电压在 6V 左右，相应击穿电压的温度系数最小。

(6) PN 结具有电容效应，大小在几至十几皮法之间，随外加电压变化而变化，是非线性电容。

2. 普通二极管

(1) 硅管导通时的正向压降比锗管大： $U_{on(\text{硅})} \approx 0.6 \sim 0.7\text{V}$ ； $U_{on(\text{锗})} \approx 0.2 \sim 0.3\text{V}$ 。硅管的反向饱和电流 I_S 比锗管小得多。

(2) 温度对伏安特性的影响：温度每升高 1°C ， U_{on} 约减小 $2 \sim 2.5\text{mV}$ 。温度每升高 10°C ，反向饱和电流约增大一倍。

(3) 二极管的主要特性参数有最大整流电流 I_F 、最高反向工作电压 U_{RM} 、反向饱和电流 I_S 和最高工作频率 f_M 。 I_F 和 U_{RM} 是极限参数，应用时不能超过； I_S 是性能质量参数，越小越好； f_M 也属于极限参数，但只有在高频电路中才予以考虑。

(4) 二极管直流电阻 R_D 是伏安特性工作点 Q 处割线斜率的倒数；交流电阻 r_d 是伏安特性工作点 Q 处切线斜率的倒数。

(5) 二极管正向导通时交流电阻很小，通常可以忽略不计；反向截止时交流电阻很大，相当于开路。因此，理想二极管相当于一个内阻为零的开关，加正向电压导通（正向压降为零），加反向电压截止。

3. 特殊二极管

特殊二极管主要有稳压二极管、发光二极管、光敏二极管和变容二极管等。

(1) 稳压管组成稳压电路时，具有电流调节作用，并通过限流电阻 R 转化为电压调节作用。稳压管的工作条件：一是反偏；二是有合适的工作电流。稳压管的主要参数有稳定电

压 U_Z 、稳定电流 I_Z 、最大耗散功率 P_{ZM} 、动态电阻 r_Z 和电压温度系数 α_Z 。其中 r_Z 是稳压管的质量参数, r_Z 越小, 稳压管稳压特性越好。 U_Z 在 6V 附近的稳压管 α_Z 最小。

(2) 发光二极管 (LED), 是一种能把电能直接转换成光能的半导体器件, 正向导通时能发出不同的颜色, 正向压降在 1.5 ~ 2V 之间; 工作电流为几至几十毫安, 亮度随电流增大而增强。

(3) 光敏二极管无光照时, 暗电流很微小, 一般为 0.1 μ A 左右, 有光照时光电流随光照度增加而增大, 最大为几十毫安。主要用于光的测量, 工作时应反偏。

(4) 变容二极管是利用 PN 结的结电容效应设计出来的, 应工作在反偏状态, 电容值随反向电压增加而减小。主要应用于高频电子线路中的电子调谐、调频和自动频率控制等电路。

4. 双极型三极管

(1) 三极管电流分配关系: $i_E = i_C + i_B$; $i_C = \beta i_B$ 。

(2) 三极管可构成三种基本组态: 共发射极电路、共基极电路和共集电极电路。无论哪一种, 要起到放大作用, 都必须满足发射结正偏、集电结反偏的外部条件。

(3) 三极管的特性曲线有输入特性曲线和输出特性曲线, 可以用三极管特性图示仪直观清晰地测量显示出来。输入特性曲线是输入电流 i_B 与输入电压 u_{BE} 之间的函数关系, 输出特性曲线是输出电流 i_C 与输出电压 u_{CE} 之间的函数关系。

(4) 三极管的工作状态可分为放大、截止和饱和: 放大的条件是发射结正偏、集电结反偏, 特点是 $i_C = \beta i_B$, i_C 与 i_B 成正比关系; 截止的条件是发射结反偏、集电结反偏, 特点是 $i_B = 0$, $i_C = I_{CEO} \approx 0$; 饱和的条件是发射结正偏、集电结正偏, 特点是 i_C 与 i_B 不成比例。

(5) 三极管的主要参数有共射电流放大系数 β 、极间反向电流 I_{CBO} 和 I_{CEO} 、集电极最大允许电流 I_{CM} 、集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 和集—射极反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 。可以分成两大类, 一类是性能质量参数, 另一类是极限参数, 极限参数使用时不能超过。

(6) 三极管 h 参数共有 4 个, 常用的有 3 个: r_{be} 、 β 和 r_{ce} , 其中 r_{be} 、 β 组成三极管简化的 h 参数等效电路。 h 参数的适用范围是交流、低频、小信号。

r_{be} 可用下式计算: $r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_{EQ} \text{ (mA)}}$ 。

5. 场效应管

(1) 场效应管三个电极分别称为漏极 D、栅极 G 和源极 S, 相当于三极管的 C、B 和 E 极。场效应管从结构上可分为结型和 MOS 型 (绝缘栅型); 按导电沟道类型可分为 P 沟道和 N 沟道; 按有无原始导电沟道可分为耗尽型和增强型。

(2) 场效应管的特性曲线有转移特性曲线和输出特性曲线。转移特性是输出电流 i_D 与输入电压 u_{GS} 的函数关系, 输出特性是输出电流 i_D 与输出电压 u_{DS} 的函数关系。

(3) 场效应管主要参数有夹断电压 $U_{GS(off)}$ (结型、耗尽型 MOS 适用) 或开启电压 $U_{GS(th)}$ (增强型 MOS 适用)、饱和漏极电流 I_{DSS} (增强型 MOS 无 I_{DSS} 参数) 和低频跨导 g_m (相当于三极管的 β)。

(4) 场效应管与三极管性能比较, 主要有以下区别:

① 场效应管的输入电阻远高于三极管。三极管的输入电阻为 r_{be} , 约 $10^2 \sim 10^4 \Omega$; 结型场效应管输入电阻约 $10^7 \Omega$; MOS 场效应管输入电阻高达 $10^{15} \Omega$ 。

②由于场效应管只有一种载流子即多数载流子参与导电，无少数载流子参与导电，因此场效应管热稳定性好，噪声小，抗辐射能力强，且具有零温度系数工作点。

③场效应管制造工艺简单，成本低，便于大规模集成。

④场效应管是电压控制元件，用栅源电压 u_{GS} 控制输出电流 i_D （相当于三极管用 i_B 控制 i_C ）。

（5）由于 MOS 场效应管绝缘层很薄，很易产生击穿。因此保存、测试、焊接时应特别注意。任何时候，栅极都不能悬空。

1.2 基本要求和学习指导

1. PN 结

- （1）了解半导体的导电特性；
- （2）了解 P 型半导体和 N 型半导体的形成；
- （3）掌握 PN 结单向导电性；
- （4）理解 PN 结的伏安特性；
- （5）知道 PN 结的电击穿和热击穿；
- （6）知道 PN 结的电容效应。

2. 普通二极管

- （1）了解普通二极管的结构和分类；
- （2）熟悉硅二极管与锗二极管的主要区别；
- （3）知道温度对二极管伏安特性的影响；
- （4）熟悉二极管主要特性参数；
- （5）了解二极管电路图解法；
- （6）熟悉二极管三种等效电路模型，掌握理想二极管模型的分析方法；
- （7）知道二极管的直流电阻和交流电阻；
- （8）学会用万用表检测二极管；
- （9）初步懂得根据电路需要选用二极管。

3. 特殊二极管

- （1）理解稳压管的作用和工作条件；
- （2）熟悉稳压管的特性参数；
- （3）理解稳压管稳压电路；
- （4）知道发光二极管的基本知识；
- （5）了解光敏二极管和变容二极管。

4. 双极型三极管

- （1）了解三极管的结构和分类；
- （2）熟记三极管电流分配关系；
- （3）知道三极管的三种基本组态电路；
- （4）熟悉三极管的输入输出特性曲线及其特点；
- （5）熟悉三极管三种工作状态的条件和特点，知道输出特性曲线上三个工作区域的位置。

置;

(6) 熟悉三极管的主要参数和安全工作区;

(7) 理解三极管 h 参数及简化的 h 参数等效电路, 理解 h 参数使用注意事项, 熟记并掌握 r_{be} 的计算公式;

(8) 学会用万用表检测三极管;

(9) 初步懂得根据电路需要选用三极管。

5. 场效应管

(1) 了解场效应管的分类及每一类场效应管的特点;

(2) 理解场效应管的转移特性曲线和输出特性曲线, 理解各种不同类型场效应管特性曲线的区别;

(3) 熟悉场效应管的主要参数;

(4) 熟悉场效应管的 h 参数等效电路;

(5) 知道场效应管的主要特点 (与三极管比较);

(6) 了解场效应管的安全使用常识。

本章学习的重点是二极管和三极管 (包括场效应管) 的基本特性, 即特性曲线 (伏安特性)、主要参数和等效电路, 必须把这些基本概念弄懂搞清。难点是二极管电路的分析。

1.3 典型例题

【例 1-1】 已知电路如图 1-1 所示, VD 为硅二极管, $R_L = 1.2\text{k}\Omega$, 当 (1) $V_{DD} = 1.5\text{V}$; (2) $V_{DD} = 12\text{V}$ 时, 试分别按理想二极管和恒压降 ($U_{on} = 0.6\text{V}$) 模型求解 I_O 和 U_O 。

解: (1) $V_{DD} = 1.5\text{V}$ 时, 有:

① 理想二极管模型

$$U_O = V_{DD} = 1.5\text{V}$$

$$I_O = \frac{V_{DD}}{R_L} = \frac{1.5}{1200}\text{A} = 1.25\text{mA}$$

② 恒压降模型

$$U_O = V_{DD} - U_{on} = (1.5 - 0.6)\text{V} = 0.9\text{V}$$

$$I_O = \frac{V_{DD} - U_{on}}{R_L} = \frac{1.5 - 0.6}{1200}\text{A} = 0.75\text{mA}$$

(2) $V_{DD} = 12\text{V}$ 时, 有:

① 理想二极管模型

$$U_O = V_{DD} = 12\text{V}$$

$$I_O = \frac{V_{DD}}{R_L} = \frac{12}{1200}\text{A} = 10\text{mA}$$

② 恒压降模型

$$U_O = V_{DD} - U_{on} = (12 - 0.6)\text{V} = 11.4\text{V}$$

$$I_O = \frac{V_{DD} - U_{on}}{R_L} = \frac{12 - 0.6}{1200}\text{A} = 9.5\text{mA}$$

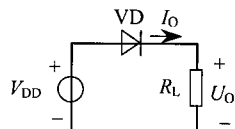


图 1-1 例 1-1 电路

本题说明, 当 $V_{DD} \gg U_{on}$ 时, 两种模型计算结果的相对误差不大, 在工程计算上允许存在, 因此电路中二极管正向压降可忽略不计。当 V_{DD} 与 U_{on} 数值相近时, 分析计算则应考虑二极管正向压降。

【例 1-2】 已知电路如图 1-2a、b 所示, VD 为理想二极管, $E = 4V$, $u_i = 8\sin\omega t V$, 试分别画出输出电压 u_o 的波形。

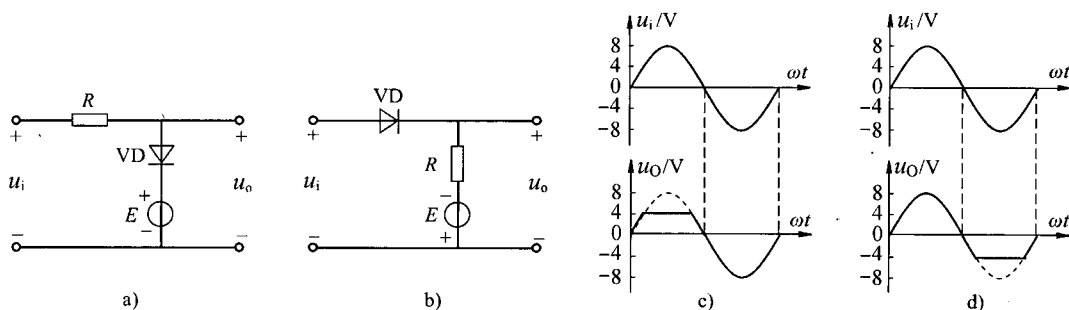


图 1-2 例 1-2 电路及 u_i 、 u_o 波形

解: (1) 对于图 1-2a 电路, 可写出两种 u_o 表达式 (电压与路径无关): $u_o = U_D + E$; $u_o = U_R + u_i$;

当二极管 VD 导通时, $U_D = 0$, $u_o = U_D + E = E = 4V$ 。

当二极管 VD 截止时, 电阻中无电流流过, $U_R = 0$, $u_o = U_R + u_i = u_i = 8\sin\omega t (V)$ 。

因此, 本题转化为判断二极管 VD 导通或截止, 图 1-2a 电路中, 二极管 VD 负极接 $E = 4V$ 正极, 则 VD 端正极电压大于 $4V$ 时, VD 导通, $u_o = 4V$; 小于 $4V$ 时, VD 截止, $u_o = u_i$ 。画出 u_o 波形如图 1-2c 所示。

(2) 对于图 1-2b 同理可得, $u_o = U_D + u_i = U_R + (-E)$

二极管 VD 导通时, $u_o = U_D + u_i = u_i$

二极管 VD 截止时, $u_o = U_R + (-E) = -E = -4V$

图 1-2b 中二极管 VD 负极通过电阻 R 接 $-E = -4V$, 则 VD 端正极电压大于 $-4V$ 时导通, 小于 $-4V$ 时截止, 据此, 画出 u_o 波形如图 1-2d 所示。

【例 1-3】 已知电路如图 1-3a 所示, VD 为理想二极管, 当 (1) $U_{S1} = 8V$, $U_{S2} = 4V$; (2) $U_{S1} = 4V$, $U_{S2} = 8V$ 时, 试分别求 U_F 、 I_1 、 I_2 、 I_3 。

解: (1) $U_{S1} = 8V$, $U_{S2} = 4V$ 时, 二极管 VD 导通, 该电路等效为图 1-3b, 用弥尔曼定理可计算 U_F 。

$$U_F = \frac{\frac{U_{S1}}{R_1} + \frac{U_{S2}}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{\frac{8}{1 \times 10^3} + \frac{4}{2 \times 10^3}}{\frac{1}{1 \times 10^3} + \frac{1}{2 \times 10^3} + \frac{1}{3 \times 10^3}} V = 5.45V$$

$$I_1 = \frac{-(U_F - U_{S1})}{R_1} = \frac{-(5.45 - 8)}{1 \times 10^3} A = 2.55mA$$

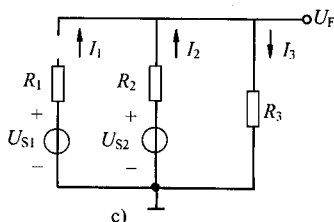
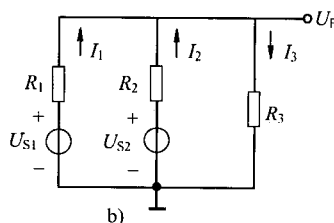
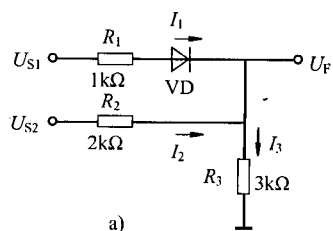


图 1-3 例 1-3 电路

$$I_2 = \frac{-(U_F - U_{S2})}{R_2} = \frac{-(5.45 - 4)}{2 \times 10^3} \text{A} = -0.725 \text{mA}$$

$$I_3 = \frac{U_F}{R_3} = \frac{5.45}{3 \times 10^3} \text{A} = 1.82 \text{mA}$$

(2) $U_{S1} = 4\text{V}$, $U_{S2} = 8\text{V}$ 时, 二极管 VD 截止, 该电路等效为图 1-3c, 二极管支路开路。

$$U_F = \frac{U_{S2} R_3}{R_2 + R_3} = \frac{8 \times 3 \times 10^3}{(2 + 3) \times 10^3} \text{V} = 4.8 \text{V}$$

$$I_1 = 0$$

$$I_2 = I_3 = \frac{U_{S2}}{R_2 + R_3} = \frac{8}{(2 + 3) \times 10^3} \text{A} = 1.6 \text{mA}$$

上述两例说明, 求解含有理想二极管的电路时, 可先判断二极管导通还是截止。若二极管导通, 则用短路导线替代二极管 VD; 若二极管截止, 则将二极管处于开路。然后按一般线性电路分析计算。

【例 1-4】 电路如图 1-4 所示, $\text{VD}_1 \sim \text{VD}_3$ 为理想二极管, 试判断 $\text{VD}_1 \sim \text{VD}_3$ 的通断状态, 并求解 U_F 。

解: 从电路结构初看, 三个二极管均处于正偏状态, 但一旦 VD_2 导通, 因 VD_2 为理想二极管, 导通时两端电压为 0, 相当于短路, $U_F = -5\text{V}$ 。 VD_1 、 VD_3 即处于反偏状态, 截止。因此:

VD_2 导通, VD_1 、 VD_3 截止, $U_F = -5\text{V}$ 。

本题说明, 二极管导通后, 具有钳位作用。

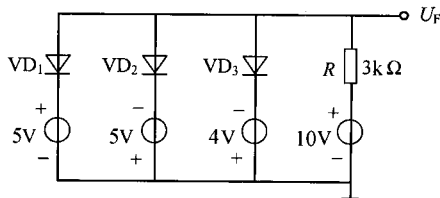


图 1-4 例 1-4 电路

【例 1-5】 已测得三极管各极对地的电压值为 U_1 、 U_2 、 U_3 , 已知其工作在放大区, 试判断其为硅管还是锗管, NPN 型还是 PNP 型? 并确定 E、B、C 三极。

(1) $U_1 = 6.4\text{V}$, $U_2 = 6.6\text{V}$, $U_3 = 1.2\text{V}$;

(2) $U_1 = -1.2\text{V}$, $U_2 = -4.8\text{V}$, $U_3 = -5.5\text{V}$ 。

解: (1) PNP 型锗管, U_1 、 U_2 、 U_3 引脚分别对应 B、E、C 极;

(2) NPN 型硅管, U_1 、 U_2 、 U_3 引脚分别对应 C、B、E 极。

分析此类题目的步骤是:

①确定硅管或锗管, 集电极 C。已知三极管工作在放大区, 则硅管的 U_{BE} 约为 $0.6 \sim 0.7\text{V}$, 锗管约为 $0.2 \sim 0.3\text{V}$ 。据此, 可找到电压差值为该两个数据的引脚。若为 $0.6 \sim 0.7\text{V}$, 则该管为硅管; 若为 $0.2 \sim 0.3\text{V}$, 则该管为锗管, 且该两引脚为 B 极或 E 极, 另一引脚为 C 极。我们看到 (1) 中 U_1 、 U_2 , (2) 中 U_2 、 U_3 符合此条件, 可确定: (1) 为锗管, U_3 引脚对应 C 极; (2) 为硅管, U_1 引脚对应 C 极。

②确定 NPN 型或 PNP 型。此时虽已知道这两个引脚为 B 极或 E 极, 但还不能区分。可将 C 极电压与 B、E 引脚电压比较高低。若 C 极电压高, 则为 NPN 型; 若 C 极电压低, 则为 PNP 型。因为三极管工作在放大区时, 满足 CB 结反偏条件, NPN 型 C 极电压高于 B、E 极; PNP 型 C 极电压低于 B、E 极。(1) 中 U_3 低于 U_1 、 U_2 , 为 PNP 型; (2) 中 U_1 高于 U_2 、 U_3 , 为 NPN 型。

③区分 B 极和 E 极。确定 NPN 型或 PNP 型后，可进一步区分 B 极和 E 极。NPN 型各极电压高低排列次序为 $U_C > U_B > U_E$ ；PNP 型各极电压高低排列次序为 $U_C < U_B < U_E$ 。因此 (1) 中 U_1 为 B 极， U_2 为 E 极；(2) 中 U_2 为 B 极， U_3 为 E 极。

【例 1-6】 已测得电路中几个三极管对地电压值如图 1-5 所示，已知这些三极管中有好有坏，试判断其好坏。若好则指出其工作状态（放大、截止、饱和）；若坏则指出损坏类型（击穿、开路）。

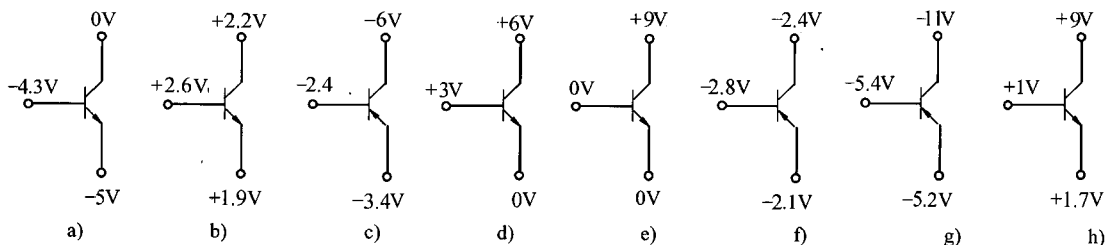


图 1-5 例 1-6 电路

解：a) 放大；b) 饱和；c) 截止；d) 损坏，BE 间开路；e) BE 间击穿损坏或外部短路；或三极管好，处于截止状态；f) 饱和；g) 放大；h) 截止。

分析此类题目的判据和步骤是：

①判断发射结是否正常正偏。凡满足 NPN 硅管 $U_{BE} = 0.6 \sim 0.7V$ ，PNP 硅管 $U_{BE} = -0.6 \sim -0.7V$ ；NPN 锗管 $U_{BE} = 0.2 \sim 0.3V$ ，PNP 锗管 $U_{BE} = -0.3 \sim -0.2V$ 条件者，三极管一般处于放大或饱和状态。不满足上述条件的三极管处于截止状态，或已损坏。a、b、f、g 满足条件；c、d、e、h 不满足条件。

②区分放大或饱和。区分放大或饱和的条件是集电结偏置状态，集电结正偏，饱和，此时 U_{CE} 很小，b、f 满足条件；集电结反偏，放大，此时 U_{CE} 较大，a、g 满足条件。但若 NPN 管 $U_C < U_E$ ，PNP 管 $U_C > U_E$ ，则电路工作不正常，一般有故障。若 $U_C = V_{CC}$ （电路中有集电极电阻 R_C ），说明无集电极电流，C 极开路。

③若发射结反偏，或 U_{BE} 小于①中数据，则三极管处于截止状态或损坏。c、e、h 属于这一情况。

④若满足发射结正偏，但 U_{BE} 过大，也属不正常情况，如 d。

【例 1-7】 已知场效应管的转移特性和输出特性（ i_D 方向为实际方向）如图 1-6 所示，试判断场效应管的类型，并指出其 $U_{GS(off)}$ 或 $U_{GS(th)}$ 。

解：a) 为 P 沟道结型， $U_{GS(off)} = 3.3V$ ；

b) 为耗尽型 NMOS， $U_{GS(off)} = -3.3V$ ；

c) 为耗尽型 PMOS， $U_{GS(off)} = 4.1V$ ；

d) 为增强型 NMOS， $U_{GS(th)} = 1.9V$ ；

e) 为耗尽型 NMOS， $U_{GS(off)} = -4.5V$ ；

f) 为 P 沟道结型， $U_{GS(off)} = 2V$ ；

g) 为增强型 PMOS， $U_{GS(th)} = -3V$ ；

h) 为 N 沟道结型， $U_{GS(off)} = -2V$ 。

判别场效应管类型的方法如下：

①判断结型、耗尽型 MOS 或增强型 MOS： U_{GS} 有正有负是耗尽型 MOS，b、c、e 符合条件； U_{GS} 有 0V（不含有正有负）是结型，a、f、h 符合条件； u_{GS} 无 0V 是增强型 MOS，d、g 符合条件；

②判断 P 沟道或 N 沟道：

对耗尽型（结型也属于耗尽型）： $U_{GS(off)}$ 为负属 N 沟道，b、e、h 符合条件。 $U_{GS(off)}$ 为正属 P 沟道，a、c、f 符合条件。

对增强型： $U_{GS(th)}$ 为正属 N 沟道，d 符合条件。 $U_{GS(th)}$ 为负属 P 沟道，g 符合条件。

③从场效应管特性曲线上寻找 $U_{GS(off)}$ 、 $U_{GS(th)}$ ：夹断电压 $U_{GS(off)}$ 和开启电压 $U_{GS(th)}$ 的定义是使 i_D 趋于 0（例如 $i_D = 10\mu A$ ）所加的 u_{GS} 即为 $U_{GS(off)}$ （结型、耗尽型 MOS 适用）和 $U_{GS(th)}$ （增强型 MOS 适用）。图 1-6 中，虽未标出 $U_{GS(off)}$ 或 $U_{GS(th)}$ 的数值，但转移特性曲线与横轴的交点（实际未交，是无限趋近）即 $U_{GS(off)}$ 或 $U_{GS(th)}$ ；输出特性曲线最下面一条曲线对应的 u_{GS} 值即为 $U_{GS(off)}$ 或 $U_{GS(th)}$ 。

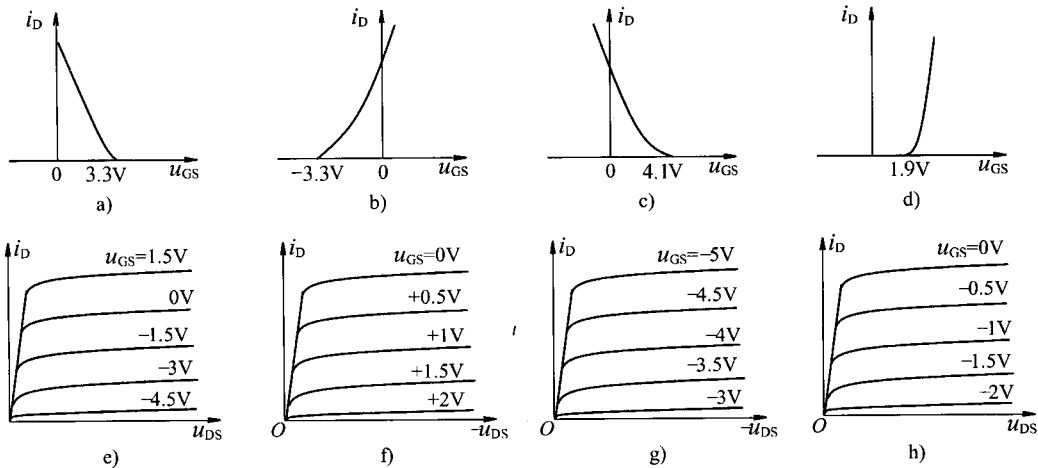


图 1-6 例 1-7 场效应管特性曲线

1.4 复习思考题解答

1.1 半导体有什么独特的导电特性？

答：(1) 掺杂特性。纯净的半导体掺入微量杂质后，电阻率变化很大。

(2) 热敏和光敏特性。半导体在受光和光照后导电能力将明显增强。

1.2 什么叫本征半导体、N 型半导体、P 型半导体？

答：(1) 本征半导体：纯净的具有晶体结构的半导体。在本征半导体中，自由电子数 = 空穴数。

(2) N 型半导体：4 价元素掺入微量 5 价元素，每组成一个共价键就多余出一个电子，自由电子数 $\gg$ 空穴数。

(3) P 型半导体：4 价元素掺入微量 3 价元素，每组成一个共价键就多余出一个空穴，

空穴数 $\gg$ 自由电子数。

1.3 P 型、N 型半导体中的多数载流子和少数载流子是怎样形成的？

答：无论 P 型、N 型半导体，多数载流子由两部分组成：一部分是由本征激发形成，数量很少，且与温度和光照有关；另一部分是由掺杂形成，数量很多，且与温度和光照无关。少数载流子则全部由本征激发形成。

1.4 如何理解 PN 结的单向导电特性？

答：(1) PN 结加正向电压，外电场方向与内电场方向相反，使空间电荷区变窄，多数载流子的扩散运动增强，形成较大的扩散电流，PN 结呈导通状态。外电场越强，扩散电流越大。

(2) PN 结加反向电压，外电场方向与内电场方向一致，使空间电荷区变宽，阻挡层电阻增大，多数载流子很难越过空间电荷区，因此无扩散电流通过，PN 结呈截止状态。

1.5 为什么 PN 结反向电流取决于温度而与外加电压基本无关？

答：反向电流是少数载流子形成的电流，而少数载流子是由本征激发形成的，其数量取决于温度（包括光照），而与外加电压基本无关（外加电压过大，超过 PN 结承受限额，另当别论）。因此反向电流主要取决于温度而与外加电压基本无关。

1.6 为什么锗 PN 结的反向电流远大于硅 PN 结的反向电流？

答：由于硅和锗原子结构上的差异，锗比硅多一层电子，最外层电子离原子核距离较远，原子核对其束缚能力较弱，即锗的最外层电子更容易受本征激发而成为自由电子，因此锗材料半导体中少数载流子的数量远多于硅材料半导体，即锗材料 PN 结的反向电流一般远大于硅材料 PN 结的反向电流。

1.7 试分析 PN 结的伏安特性。

答：PN 结的伏安特性可分为正向和反向两大部分：

(1) 正向特性又可分为两段：

①死区段。对应于图 1-7 中 OA 段，此时 PN 结虽然加正向电压，但外加电压小于 PN 结内电场电压，因此 PN 结仍处于截止状态。死区电压又称为门坎电压或开启电压，用 U_{th} 表示，硅材料 $U_{th} \approx 0.5V$ ，锗材料 $U_{th} \approx 0.2V$ 。

②导通段。对应于图 1-7 中 AB 段，此时外加电压大于 PN 结内电场电压，PN 结处于导通状态。导通电压用 U_{on} 表示，实际上是 PN 结导通时的正向压降，硅材料 $U_{on} = 0.6 \sim 0.7V$ ，锗材料 $U_{on} = 0.2 \sim 0.3V$ 。

(2) 反向特性也可分为两段：

①饱和段。对应于图 1-7 中 OC 段，此时 PN 结处于反偏截止状态，仅有少量反向电流，用 I_s 表示。因反向电流主要取决于温度而与外加电压基本无关，因此 OC 段与横轴基本平行，呈饱和特性，即反向电流基本上不随外加反向电压增大而增大。

②击穿段。对应于图 1-7 中 CD 段，此时由于外加反向电压超出 PN 结能承受的最高电压 U_{BR} ，反向电流急剧增大。

1.8 什么叫电击穿和热击穿？哪一种击穿是可逆的？

答：PN 结击穿可分为电击穿和热击穿。

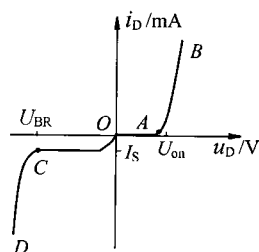


图 1-7 PN 结伏安特性