

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材·配套教材
国家级精品资源共享课“电子技术基础”系列教材

模拟电子技术基础 学习指导与习题详解 (第2版)

• 毕满清 高文华 主编 • 韩焱 主审



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材·配套教材
国家级精品资源共享课“电子技术基础”系列教材

模拟电子技术基础

学习指导与习题详解

(第2版)

毕满清 高文华 主编
任青莲 李瑞红 曹俊琴 参编
韩 焱 主审

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是由毕满清主编的“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材的《模拟电子技术基础（第2版）》（ISBN 978-7-121-25393-5）配套教材。

全书包括半导体二极管及其基本电路、双极型晶体管及其基本放大电路、场效应管及其基本放大电路、多级放大电路和集成运算放大器、放大电路的频率特性、反馈及负反馈放大电路、集成运放组成的运算电路、信号检测与处理电路、波形发生电路、功率放大电路、直流电源、本科生及研究生试题及答案共12章。

每章内容包括：教学基本要求、主要知识点、典型例题、考研试题解析、自测题及解答、习题及解答。详细解答了毕满清主编的《模拟电子技术基础（第2版）》的自测题和习题，在第12章中给出了部分院校本科生考试试题及答案和研究生入学考试试题及答案，以培养学生的实战技能。

本书力求达到有的放矢、循序渐进、开拓创新、前后呼应与课程紧密结合的目的。本书可作为相关专业教师、本科学生及自学者的教学参考书，也可供攻读硕士研究生的考生和相关技术人员参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础学习指导与习题详解 / 毕满清，高文华主编. —2版. —北京：电子工业出版社，2016.6
ISBN 978-7-121-28982-8

I. ① 模… II. ① 毕… ② 高… III. ① 模拟电路—电子技术—高等学校—教学参考资料
IV. ① TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 125943 号

策划编辑：章海涛

责任编辑：章海涛 特约编辑：何 雄

印 刷：三河市华成印务有限公司

装 订：三河市华成印务有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：20.5 字数：525 千字

版 次：2010 年 6 月第 1 版

2016 年 6 月第 2 版

印 次：2016 年 6 月第 1 次印刷

定 价：39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：192910558（QQ 群）。

第2版前言

本书是由毕满清主编的“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材《模拟电子技术基础（第2版）》（ISBN 978-7-121-25393-5）配套教材。

本书是根据高等学校“模拟电子技术基础”课程教学基本学要求，结合多年来电子技术课程教学实践和经验（特别是建设国家级精品资源共享课“模拟电子技术基础”的实践），以及第2版的使用情况，适应电子技术发展的新形势和教学改革不断深入的需要，并结合慕课的需要，针对加强对学生扎实的基础理论和实践能力的培养而修订的。

本书的编写原则是加强实践，突出训练，拓宽思维，重在指导，并与主教材有机结合的原则。在选材编排上，力求做到由浅入深，循序渐进，引导学生运用基本概念、基本原理和基本分析方法来分析疑难问题，注意培养学生解决实际问题的能力。题材围绕主要知识点、重点、难点来选取的。本书与主教材有机结合，既包括自测题及解答、习题及解答，又包括典型例题和考研试题解析；在题目的解答中，不仅有解题过程，而且强调了解题思路，对一些典型题目还加了点评，指导学习思考，达到举一反三、事半功半的目的。本教材既满足了本科生复习和备考需求，又为硕士研究生入学考试提供了一个复习平台。

本书对于使用毕满清主编的教材《模拟电子技术基础》（第2版）的读者不失为一本优秀的辅导读物，对了解课程知识结构，掌握课程内容重点、难点和考点，提高分析问题和解决问题的能力，检查学习效果不无裨益。

参加本书修订工作的有：中北大学毕满清（第8、9章和第12章的12.1）、李瑞红（第4、5章），太原科技大学高文华（第2、6、7章和第12章的12.2）、任青莲（第1、3、11章）、曹俊琴（第10章），陈燕参与了第12章的编写。毕满清、高文华任主编，负责全书的组织、修改和定稿。

本书由教育部电子信息科学与工程专业教学指导分委员会委员、中北大学博士生导师、国家级精品资源共享课主要负责人韩焱教授担任主审，对书稿进行了非常认真细致的审查，提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于我们的能力和水平有限，加之时间仓促，书中难免会有不妥之处和错误，恳请广大师生和本书读者提出批评和改进意见。

作 者

2016年5月于太原

目 录

第 1 章 半导体二极管及其基本电路	1
1.1 本章教学基本要求	1
1.2 本章主要知识点	1
1.2.1 半导体的基础知识	1
1.2.2 半导体二极管及其基本电路	2
1.2.3 特殊二极管	3
1.3 典型例题和考研试题解析	3
1.3.1 典型例题	3
1.3.2 考研试题解析	6
1.4 自测题及解答	10
1.5 习题及解答	11
第 2 章 双极型晶体管及其基本放大电路	17
2.1 本章教学基本要求	17
2.2 本章主要知识点	17
2.2.1 晶体管的类型及工作状态	17
2.2.2 晶体管的电流关系及放大作用	18
2.2.3 放大电路的分析方法	19
2.2.4 三种组态基本放大电路的判别及各自特点	19
2.3 典型例题和考研试题解析	20
2.3.1 典型例题	20
2.3.2 考研试题解析	28
2.4 自测题及解答	35
2.5 习题及解答	37
第 3 章 场效应管及其基本放大电路	63
3.1 本章教学基本要求	63
3.2 本章主要知识点	63
3.2.1 场效应管的类型及工作状态	63
3.2.2 场效应管工作在恒流区时栅源电压 u_{GS} 与漏极电流 i_D 之间的关系	64
3.2.3 场效应管放大电路分析	64
3.2.4 共源、共漏组态放大电路的比较	65
3.3 典型例题和考研试题解析	66

3.3.1 典型例题	66
3.3.2 考研试题解析	71
3.4 自测题及解答	74
3.5 习题及解答	75
第4章 多级放大电路和集成运算放大器	84
4.1 本章教学基本要求	84
4.2 本章主要知识点	84
4.2.1 多级放大电路	84
4.2.2 集成运算放大器	85
4.2.3 差动放大电路	85
4.3 典型例题和考研试题解析	86
4.3.1 典型例题	86
4.3.2 考研试题解析	94
4.4 自测题及解答	97
4.5 习题及解答	99
第5章 放大电路的频率特性	112
5.1 本章教学基本要求	112
5.2 本章主要知识点	112
5.2.1 频率特性的基本概念	112
5.2.2 放大电路频率特性的分析方法	113
5.3 典型例题和考研试题解析	114
5.3.1 典型例题	114
5.3.2 考研试题解析	118
5.4 自测题及解答	119
5.5 习题及解答	120
第6章 反馈及负反馈放大电路	128
6.1 本章教学基本要求	128
6.2 本章主要知识点	128
6.2.1 反馈及其判别方法	128
6.2.2 负反馈放大电路的方框图与基本关系式	129
6.2.3 反馈对放大电路产生的影响	130
6.2.4 负反馈的正确引入	131
6.2.5 深度负反馈放大电路的近似计算	131
6.2.6 负反馈放大电路的自激振荡	131
6.3 典型例题和考研试题解析	132
6.3.1 典型例题	132
6.3.2 考研试题解析	138

6.4	自测题及解答	146
6.5	习题及解答	148
第 7 章	集成运放组成的运算电路	160
7.1	本章教学基本要求	160
7.2	本章主要知识点	160
7.2.1	集成运放线性应用和非线性应用的特点	160
7.2.2	运算电路及其分析方法	161
7.3	典型例题和考研试题解析	162
7.3.1	典型例题	162
7.3.2	考研试题解析	169
7.4	自测题及解答	171
7.5	习题及解答	172
第 8 章	信号检测与处理电路	182
8.1	本章教学基本要求	182
8.2	本章主要知识点	182
8.2.1	信号检测系统中的放大电路	182
8.2.2	有源滤波电路	183
8.2.3	电压比较器	185
8.3	典型例题和考研试题解析	187
8.3.1	典型例题	187
8.3.2	考研试题解析	193
8.4	自测题及解答	196
8.5	习题及解答	197
第 9 章	波形发生电路	206
9.1	本章教学基本要求	206
9.2	本章主要知识点	206
9.2.1	正弦波振荡电路	206
9.2.2	非正弦波发生电路	208
9.3	典型例题和考研试题解析	209
9.3.1	典型例题	209
9.3.2	考研试题解析	216
9.4	自测题及解答	219
9.5	习题及解答	220
第 10 章	功率放大电路	232
10.1	本章教学基本要求	232
10.2	本章主要知识点	232

10.2.1	功率放大电路的分类及特点	232
10.2.2	互补对称功率放大电路的组成、工作原理和指标计算	233
10.2.3	典型集成功率放大器的电路分析	236
10.3	典型例题和考研试题解析	236
10.3.1	典型例题	236
10.3.2	考研试题解析	239
10.4	自测题及解答	241
10.5	习题及解答	243
第 11 章	直流电源	249
11.1	本章教学基本要求	249
11.2	本章主要知识点	249
11.2.1	直流稳压电源的组成	249
11.2.2	整流电路	250
11.2.3	滤波电路	250
11.2.4	稳压电路	251
11.3	典型例题和考研试题解析	252
11.3.1	典型例题	252
11.3.2	考研试题解析	257
11.4	自测题及解答	261
11.5	习题及解答	262
第 12 章	本科生和研究生试题及答案	267
12.1	本科生期末考试试题及答案	267
	试题一	267
	试题二	272
	试题三	277
	试题四	282
12.2	研究生入学考试试题及答案(模拟部分)	287
	兰州大学电子线路试题(一)	287
	兰州大学电子线路试题(二)	292
	北京理工大学电子技术试题(一)	296
	北京理工大学电子技术试题(二)	300
	北京理工大学电子技术试题(三)	304
	电子科技大学数字电路与模拟电路研究生入学试题	309
	北京邮电大学电子技术试题	313
	参考文献	317

第1章 半导体二极管及其基本电路

1.1 本章教学基本要求

本章介绍了半导体基础知识、半导体二极管及其基本应用和几种特殊二极管，要求：正确理解杂质半导体中载流子的形成、载流子的浓度与温度的关系，以及 PN 结的形成过程；重点掌握 PN 结的特性和半导体二极管的特性、参数及在电路中的应用。

本章的教学基本要求如表 1-1 所示。

表 1-1 第 1 章教学内容与要求

教学内容			教学要求			重点与难点
			熟练掌握	正确理解	一般了解	
半导体基础知识	本征半导体，杂质半导体			√		重点：PN 结的单向导电性 难点：PN 结的形成
	PN 结	形成		√		
		单向导电性	√			
		伏安特性	√			
		电容效应			√	
半导体二极管	结构与类型				√	重点：二极管应用电路分析 难点：二极管各模型的特点及其应用电路中二极管模型的选择
	伏安特性与主要参数		√			
	型号与选择				√	
	模型		√			
	应用（限幅、整流）		√			
特殊二极管	稳压二极管（稳压原理与稳压电路）		√			重点：稳压管稳压条件及稳压电路分析
	发光二极管、光电二极管、变容二极管				√	

1.2 本章主要知识点

1.2.1 半导体的基础知识

1. 本征半导体

高度提纯、结构完整的半导体单晶体叫做本征半导体。常用的半导体材料是硅（Si）和锗（Ge）。本征半导体中有两种载流子：自由电子和空穴，它们是成对出现的，称为电子空穴对。

本征半导体的载流子浓度受温度的影响很大，随着温度的升高，载流子的浓度基本按指数规律增加。但本征半导体中载流子的浓度很低，导电能力仍然很差。

2. 杂质半导体

杂质半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体, N 型半导体中掺入的是微量的五价元素, 其多子是自由电子, 少子是空穴。P 型半导体中掺的是微量的三价元素, 其多子是空穴, 少子是自由电子。杂质半导体呈电中性。

在杂质半导体中, 多子浓度主要取决于掺入杂质的浓度, 掺入杂质越多, 多子浓度就越大。而少子由本征激发产生, 其浓度主要取决于温度, 温度越高, 少子浓度越大。

3. PN 结及其特性

在一块本征半导体上, 一边形成 N 型半导体, 另一边形成 P 型半导体, 在 P 型区和 N 型区的交界处就会形成 PN 结。PN 结是构成其他半导体器件的基础。

(1) PN 结具有单向导电性

外加正向电压时, 电阻很小, 多子扩散形成正向电流, 正向电流很大, PN 结导通; 外加反向电压时, 电阻很大, 少子漂移形成反向电流, 反向电流很小, PN 结几乎截止。

(2) PN 结的伏安特性

PN 结的伏安特性: $I = I_S(e^{U/U_T} - 1)$ (1-1)

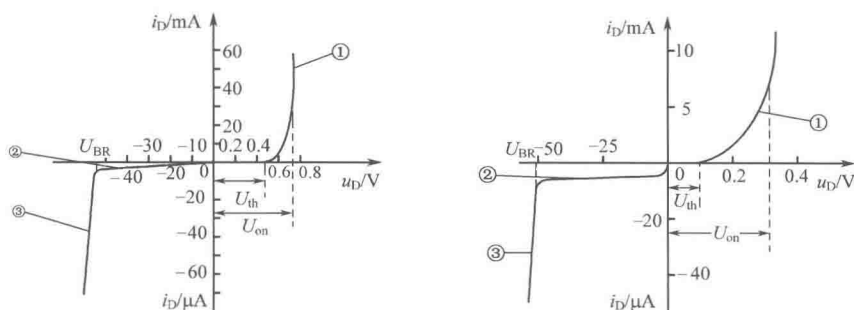
式中, I_S 在数值上等于反向饱和电流; $U_T = KT/q$, 为温度电压当量, 在常温下, $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

1.2.2 半导体二极管及其基本电路

半导体二极管由 PN 结加上电极引线和管壳组成。

1. 伏安特性

半导体二极管具有单向导电性, 它的伏安特性与 PN 结的伏安特性基本相同, 可采用 PN 结的伏安特性来描述二极管的伏安特性, 如图 1-1 所示, 其伏安特性方程如式 (1-1) 所示。



(a) 2CP33 硅二极管的伏安特性曲线

(b) 2AP2 锗二极管的伏安特性曲线

图 1-1 二极管的伏安特性曲线

① 正向特性: 当正向电压 u_D 大于开启电压 U_{th} 后, 随着 u_D 的增加, 正向电流近似按指数规律迅速增长, 正向电阻很小, 二极管呈现充分导通状态。在伏安特性的这一部分, 当电流增加很大时, 二极管的正向压降却变化很小。

工程估算认为: 硅二极管 $U_{th}=0.5\text{V}$ $U_{on}=0.7\text{V}$

锗二极管 $U_{th}=0.2\text{V}$ $U_{on}=0.3\text{V}$

② 反向特性: 当外加反偏电压时, 在一定范围内反向电流很小, 近似为常数, 反向电阻很大, 二极管呈截止状态。

③ 击穿特性: 当反向电压大于击穿电压 U_{BR} 时, 二极管的反向电流急剧增加, 二极管反

向击穿。

2. 主要参数

最大整流电流 I_F ：二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流。

最高反向工作电压 U_R ：二极管运行时允许施加的最大反向电压。

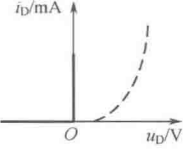
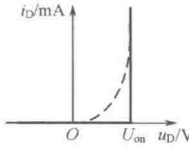
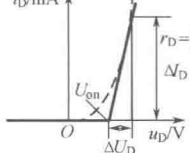
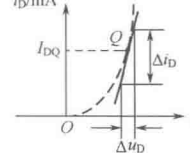
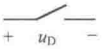
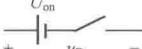
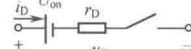
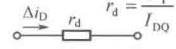
反向电流 I_R ：指在室温和最大反向电压（或其他测试条件）下的反向电流。

最高工作频率 f_M ：指二极管工作的上限频率。

3. 半导体二极管的模型

常用的二极管模型有 4 种，分别适用于不同的情况，如表 1-2 所示。

表 1-2 常用的二极管模型

名称	理想模型	恒压源模型	折线模型	微变信号模型
伏安特性				
等效电路				
特点	$u_D > 0$ 时，二极管导通，相当于开关闭合，导通后 $u_D = 0$ $u_D \leq 0$ 时，二极管截止，相当于开关断开，反向电流 $I_R = 0$	$u_D \geq U_{on}$ 时，二极管导通，导通后 $u_D = U_{on}$ $u_D < U_{on}$ 时，二极管截止，反向电流 $I_R = 0$	$u_D > U_{on}$ 时，二极管导通，导通后 i_D 与电压 u_D 呈线性关系， $u_D = U_{on} + r_D i_D$ $u_D < U_{on}$ 时，二极管截止，反向电流 $I_R = 0$	二极管电路中，除直流信号外，还有微变信号，对微变信号可将二极管等效成一个电阻 r_d ， r_d 与 Q 有关
应用	外加大的电压	$i_D \approx 1\text{mA}$	工作电压较小	交流小信号

4. 半导体二极管的应用

① 限幅：利用二极管的单向导电性将输出信号幅度限定在一定的范围内，即当输入电压超过或低于某一参考值后，输出电压将被限制在某一电平（称为限幅电平），且不再随输入电压变化。

② 整流：正弦交流电压变换为单向脉动电压。

1.2.3 特殊二极管

稳压二极管是利用 PN 结的反向击穿特性来实现稳定电压的，正常使用时，工作在反向击穿状态。

稳压管正常稳压必须满足两个条件：一是必须工作在反向击穿状态（利用正向特性稳压除外）；二是流过稳压管的电流要在最小稳定电流 I_{Zmin} 和最大稳定电流 I_{Zmax} 之间。

1.3 典型例题和考研试题解析

1.3.1 典型例题

【例 1-1】电路如图 1-2 所示，判断图中各二极管是导通还是截止，并计算 A、B 两点之

间的电压 U_{AB} 。设二极管导通电压 $U_{on}=0.7V$ 。

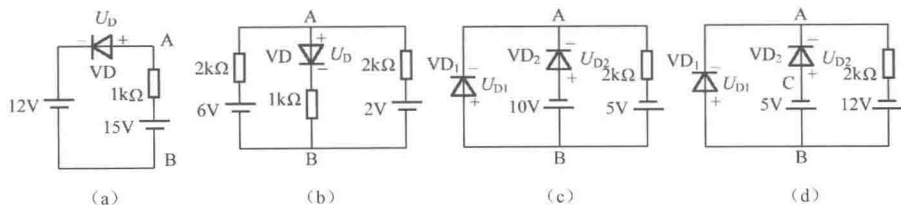


图 1-2 例 1-1 电路

【解 1-1】图 1-2 (a) 中的二极管 VD 导通, $U_{AB}=12.7V$ 。

图 1-2 (b) 中的二极管 VD 导通, $U_{AB}=2.35V$ 。

图 1-2 (c) 中的二极管 VD_1 导通, VD_2 截止, $U_{AB}=-0.7V$ 。

图 1-2 (d) 中的二极管 VD_1 导通, VD_2 截止, $U_{AB}=-0.7V$ 。

【解题思路】首先根据二极管应用电路的特点或题中给出的条件选择二极管的模型, 然后根据选定模型的特点及电路判断二极管的工作状态进而分析电路参数。

二极管工作状态的判断是通过比较二极管两个电极的电位高低或二极管两端电压来确定的。常用的方法是: 先假设二极管断开, 求出二极管阳极和阴极电位或二极管两端电压, 然后判断此电压是否大于或等于二极管导通电压, 进而确定二极管的工作状态。

如果电路中只有一个二极管: 当阳极电位高于阴极电位 (或二极管两端电压大于其导通电压 U_{on}) 时, 二极管正偏导通, 导通时压降为 0 (对于理想二极管) 或 U_{on} (对于恒压源模型的二极管); 当阳极电位低于阴极电位 (或二极管两端电压小于其导通电压 U_{on}) 时, 二极管反偏截止, 流过二极管的电流为零。

如果电路中有两个二极管: 若一个正偏, 一个反偏, 则正偏的二极管导通, 反偏的二极管截止; 若两个二极管都反偏, 则都截止; 若两个二极管都正偏, 正偏电压大的二极管优先导通, 再进一步判断另一只二极管的工作状态。

本题已知二极管的导通电压 $U_{on}=0.7V$, 所以应采用恒压源模型分析。

【解题过程】

(1) 在图 1-2 (a) 中先假设二极管 VD 断开, 求得二极管两端电压为

$$U_D = 15V - 12V = 3V > U_{on}$$

可知二极管工作在导通状态, 导通后二极管两端电压 $U_D = U_{on} = 0.7V$, A、B 两端电压为

$$U_{AB} = U_D + 12V = 0.7V + 12V = 12.7V$$

(2) 在图 1-2 (b) 中假设二极管 VD 断开, 求得二极管两端电压为

$$U_D = 6 - \frac{6-2}{2+2} \times 2 = 4V > 0.7V$$

二极管工作在导通状态, 导通后二极管两端电压 $U_D = U_{on} = 0.7V$, A、B 两端电压为

$$U_{AB} = \frac{6/2 + 0.7/1 + 2/2}{1/2 + 1 + 1/2} = 2.35V$$

(3) 在图 1-2 (c) 中, 二极管 VD_1 、 VD_2 开路时, VD_1 端电压 $U_{D1}=5V$, VD_2 端电压 $U_{D2}=-10V+5V=-5V$, 故 VD_1 导通, A、B 两端电压 $U_{AB}=-0.7V$, VD_2 截止。

(4) 图 1-2 (d) 中, 二极管 VD_1 、 VD_2 开路时, VD_1 端电压 $U_{D1}=12V$, VD_2 端电压 $U_{D2}=-5V+12V=7V$, $U_{D1} > U_{D2}$, 故 VD_1 优先导通, 则 A、B 两端电压 $U_{AB}=-0.7V$, 若以 B 点

为参考点, A 点电位 $U_A = -0.7\text{V}$, C 点电位 $U_C = -5\text{V}$, VD_2 阳极电位低于阴极电位, 将 VD_2 钳制在截止状态。

【点评】判断二极管是否导通, 不能单纯看加于二极管阳极的电压是正还是负, 主要看阳极与阴极之间的电位差。

【例 1-2】在图 1-3 所示电路中, 已知输入电压 $u_i = U_{im} \sin \omega t = 10 \sin \omega t (\text{V})$, $U_1 = U_3 = 5\text{V}$, $U_2 = U_4 = -5\text{V}$, 设二极管的性能理想。分别画出它们的输出电压波形和传输特性曲线 $u_o = f(u_i)$ 。

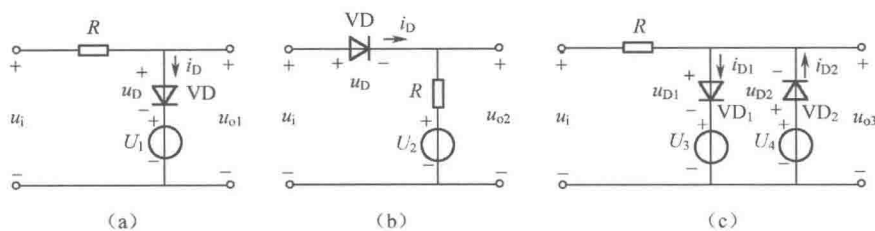


图 1-3 例 1-2 电路

【解 1-2】

【解题思路】因为二极管的性能理想, 应采用理想二极管模型进行分析。以理想二极管模型的特点为切入点分析电路, 先假设二极管断开, 求出二极管两端电压, 当二极管两端电压大于零时, 二极管导通, 导通后二极管两端电压为零; 当二极管两端电压等于或小于零时, 二极管截止, 流过二极管的电流为零。

【解题过程】

(1) 在图 1-3 (a) 所示电路中, 当二极管断开时, 二极管两端电压 $u_D = u_i - U_1 = u_i - 5\text{V}$ 。当 $u_D > 0$, 即 $u_i > 5\text{V}$ 时, 二极管导通, 输出电压 $u_{o1} = U_1 = 5\text{V}$; 当 $u_D \leq 0$, 即 $u_i \leq 5\text{V}$ 时, 二极管截止, 输出电压 $u_{o1} = u_i$ 。传输特性如图 1-4 (a) 所示, 输出电压波形如图 1-4 (b) 所示。

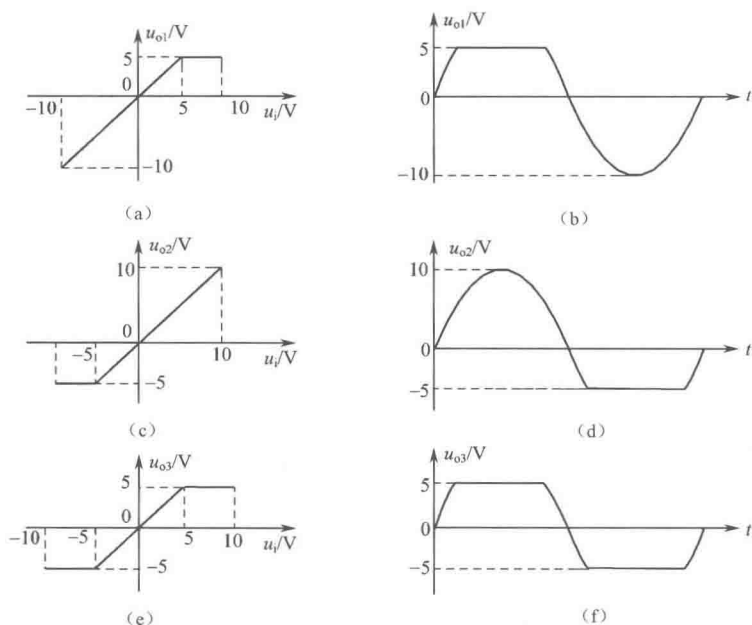


图 1-4 例 1-2 解图

(2) 在图 1-3 (b) 所示电路中, 当二极管断开时, 二极管两端电压 $u_D = u_i - U_2 = u_i + 5\text{V}$ 。当

$u_D > 0$ 即 $u_i > -5\text{V}$ 时, 二极管导通, 输出电压 $u_{O2} = u_i$; 当 $u_D \leq 0$ 即 $u_i \leq -5\text{V}$ 时, 二极管截止, 输出电压 $u_{O2} = U_2 = -5\text{V}$ 。传输特性如图 1-4 (c) 所示, 输出电压波形如图 1-4 (d) 所示。

(3) 在图 1-3 (c) 所示电路中, 当二极管断开时, $u_{D1} = u_i - U_3 = u_i - 5\text{V}$, $u_{D2} = U_4 - u_i = -5\text{V} - u_i$, 当 $u_i \geq 5\text{V}$ 时, 二极管 VD_1 导通, VD_2 截止, 输出电压 $u_{O3} = U_3 = 5\text{V}$; 当 $u_i \leq -5\text{V}$ 时, 二极管 VD_2 导通, VD_1 截止, 输出电压 $u_{O3} = U_4 = -5\text{V}$; 当 $-5\text{V} < u_i < 5\text{V}$ 时, VD_1 、 VD_2 都截止, 输出电压 $u_{O3} = u_i$ 。传输特性如图 1-4 (e) 所示, 输出电压波形如图 1-4 (f) 所示。

【点评】图 1-3 (a) 为上限幅电路, (b) 为下限幅电路, (c) 为双向限幅电路, 只要改变参考电压 (U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4) 的大小即可改变限幅电压的高低, 参考电压均可正可负。对上限幅电路 (a) 要求 $U_{\text{imax}} > U_1$, 下限幅电路 (b) 要求 $U_{\text{imin}} < U_2$, 双向限幅电路要求 $U_{\text{imax}} > U_3 > U_4 > U_{\text{imin}}$ 。

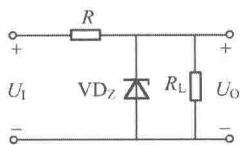


图 1-5 例 1-3 电路

【例 1-3】图 1-5 所示稳压电路中, 稳压管的稳定电压 $U_Z = 6\text{V}$, 最小稳定电流 $I_{Z\text{min}} = 5\text{mA}$, 最大功耗 $P_{ZM} = 125\text{mW}$ 。限流电阻 $R = 1\text{k}\Omega$, 负载电阻 $R_L = 500\Omega$ 。

(1) 分别计算输入电压 U_1 为 12V 、 35V 两种情况下输出电压 U_O 的值。

(2) 若输入电压 $U_1 = 35\text{V}$ 时负载开路, 则会出现什么现象? 为什么?

【解 1-3】

【解题思路】稳压管正常稳压必须满足两个条件: 一是被反向击穿, 即稳压管两端所加反向电压大于或等于其稳定电压; 二是击穿后, 流过稳压管的电流必须满足 $I_{Z\text{min}} < I_Z < I_{Z\text{max}}$ 。

【解题过程】

(1) 根据题意可知流过稳压管的最大稳定电流

$$I_{Z\text{max}} = \frac{P_{ZM}}{U_Z} = \frac{125}{6} \text{mA} = 20.83\text{mA}$$

当 $U_1 = 12\text{V}$ 时, $U_1 \frac{R_L}{R + R_L} = 12 \times \frac{0.5}{1 + 0.5} \text{V} = 4\text{V} < U_Z$, 稳压管未被击穿。故

$$U_O = U_1 \frac{R_L}{R + R_L} = 4\text{V}$$

当 $U_1 = 35\text{V}$ 时, $U_1 \frac{R_L}{R + R_L} = 35 \times \frac{0.5}{1 + 0.5} \text{V} = 11.67\text{V} > U_Z$, 稳压管反向击穿, 流过稳压管的

的电流为

$$I_Z = \frac{U_1 - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_L} = \frac{35 - 6}{1} - \frac{6}{0.5} = 17\text{mA}$$

因为 $I_{Z\text{min}} < I_Z < I_{Z\text{max}}$, 所以稳压管能稳压, 输出电压 $U_O = U_Z = 6\text{V}$ 。

(2) 当 $U_1 = 35\text{V}$, 负载开路时, 稳压管反向击穿, 输出电压 $U_O = U_Z$, 流过稳压管的电流 $I_Z = (U_1 - U_Z)/R = 29\text{mA} > I_{Z\text{max}} = 20.83\text{mA}$, 稳压管将因功耗过大而损坏。

【点评】对稳压管电路, 不能简单地认为 $U_1 > U_Z$ 就一定处于稳压状态, 需要经过计算才能得出正确结论。

1.3.2 考研试题解析

【例 1-4】(中国科学院、中国科学技术大学)

理想二极管电路如图 1-6 (a) 所示, 分析电路并画出电路的电压传输特性 ($U_O \sim U_I$)。

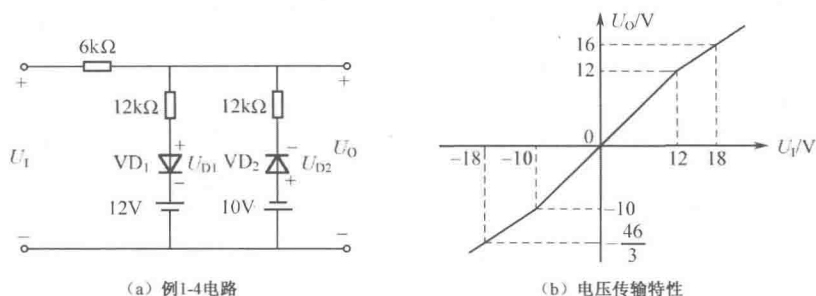


图 1-6 例 1-4 图

【解 1-4】

【解题思路】当电路中有多个二极管时, 计算每个二极管两端电压, 根据二极管的特点求出各个二极管导通与截止的条件, 进而综合分析电路参数。

【解题过程】在图 1-6 (a) 中假设二极管断开, VD_1 两端电压 $U_{D1} = U_I - 12V$, 对于理想二极管, 当 $U_{D1} > 0$, 即 $U_I > 12V$ 时, VD_1 导通。

VD_2 两端电压 $U_{D2} = -U_I - 10V$, 当 $U_{D2} > 0$, 即 $U_I < -10V$ 时, VD_2 导通。

综上分析可得, 当 $U_I < -10V$ 时, VD_1 截止, VD_2 导通, 输出电压

$$U_O = -10 - \frac{-10 - U_I}{12 + 6} \times 12 = \frac{2}{3}U_I - \frac{10}{3}$$

当 $-10V \leq U_I \leq 12V$ 时, VD_1 、 VD_2 都截止, 输出电压 $U_O = U_I$;

当 $U_I > 12V$ 时, VD_1 导通, VD_2 截止, 输出电压 $U_O = 12 + \frac{U_I - 12}{12 + 6} \times 12 = \frac{2}{3}U_I + 4$ 。

电路的电压传输特性 ($U_O \sim U_I$) 如图 1-6 (b) 所示。

【例 1-5】(华中师范大学)

电路如图 1-7 (a) 所示, $R = 1k\Omega$, $U_{REF} = 3V$ 。(1) $U_I = 0V$ 、 $4V$ 、 $6V$ 时, 求相应的输出电压 U_O 的值; (2) 当 $u_i = 6\sin\omega t(V)$ 时, 绘出相应的输出电压 u_o 的波形。

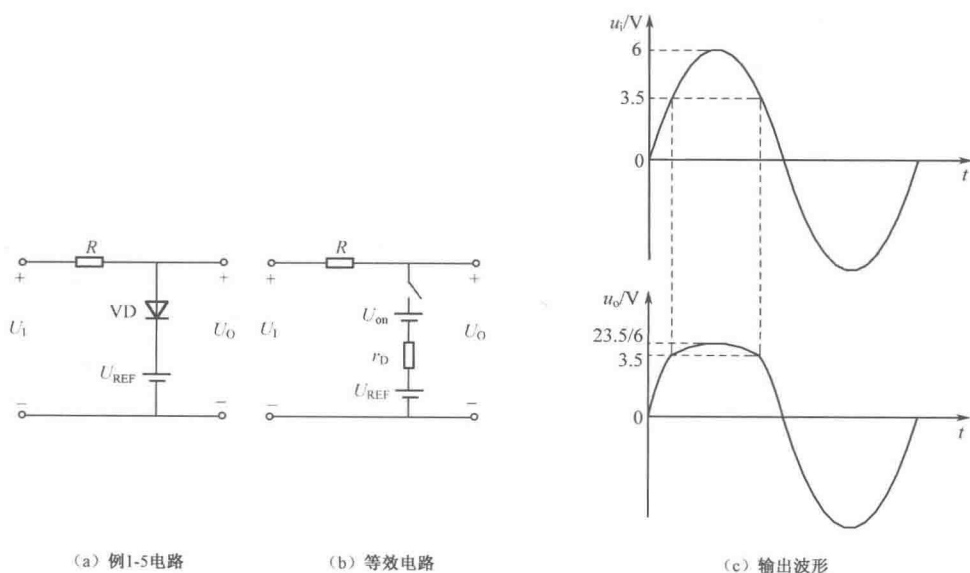


图 1-7 例 1-5 图

【解 1-5】

【解题思路】题中没有给定二极管的参数，根据已知输入电压和参考电压的大小可知，加在二极管两端的电压不高，可以采用二极管的折线模型分析电路。

二极管的折线模型为一个开关串联电压源 U_{on} 和一个电阻 r_D 。其特点是：当二极管外加正向电压大于 U_{on} 后，二极管导通，相当于等效模型中开关闭合，其电流与电压呈线性关系；当二极管外加正向电压小于 U_{on} 时，二极管截止，反向电流为零。

【解题过程】设二极管的 $U_{on}=0.5V$ ， $r_D=200\Omega$ 。图 1-7 (a) 的等效电路如图 1-7 (b) 所示。

(1) 当 $U_I=0$ 时，二极管反偏截止，相当于等效电路中开关断开，相应的输出电压 $U_O=0$ ；当 $U_I=4V$ 时，二极管导通，相当于等效电路中开关闭合，相应的输出电压

$$U_O = U_{on} + U_{REF} + \frac{U_I - U_{on} - U_{REF}}{R + r_D} r_D = 0.5 + 3 + \frac{4 - 0.5 - 3}{1 + 0.2} \times 0.2 \approx 3.58V$$

当 $U_I=6V$ 时，同样二极管导通，相应的输出电压

$$U_O = U_{on} + U_{REF} + \frac{U_I - U_{on} - U_{REF}}{R + r_D} r_D = 0.5 + 3 + \frac{6 - 0.5 - 3}{1 + 0.2} \times 0.2 \approx 3.92V$$

(2) 当 $u_i=6\sin\omega t(V)$ 时，假设二极管断开， $u_D = u_i - U_{REF} = u_i - 3V$ 。

当 $u_D > 0.5V$ ，即 $u_i > 3.5V$ 时，二极管导通，输出电压

$$u_o = U_{on} + U_{REF} + \frac{u_i - U_{on} - U_{REF}}{R + r_D} r_D = 0.5 + 3 + \frac{u_i - 0.5 - 3}{1 + 0.2} \times 0.2 = \frac{1}{6}u_i + \frac{17.5}{6}$$

当 $u_D \leq 0.5V$ ，即 $u_i \leq 3.5V$ 时，二极管截止，相应的输出电压 $u_o = u_i$ 。

综上所述可知，输出电压 u_o 的波形如图 1-7 (c) 所示。

【点评】在分析二极管应用电路时，如果没有给定二极管的具体参数，应根据实际情况选择合适的二极管模型。

【例 1-6】(北京理工大学)

稳压电路如图 1-8 (a) 所示，已知稳压管当 $I_Z=5mA$ 时的稳压电压为 $U_Z=6.8V$ ， $I_{Zmin}=0.2mA$ ，稳压管的动态电阻 $r_Z=20\Omega$ ，供电电源的标称值为 $+10V$ ，但有 $\pm 1V$ 的波动。试问：

- (1) 当负载开路时，在标称电压 $+10V$ 条件下的输出电压 U_O 是多少？
- (2) 当供电电源 V_{CC} 波动 $\pm 1V$ 时，产生的输出电压的变化量 ΔU_O 是多少？
- (3) 当 $R_L=2k\Omega$ 负载接入时，其输出电压 U_O 是多少？
- (4) 当 $R_L=0.5k\Omega$ 时，输出电压 U_O 是多少？
- (5) 确定保证稳压管反向击穿允许的最小负载 R_{Lmin} 值。

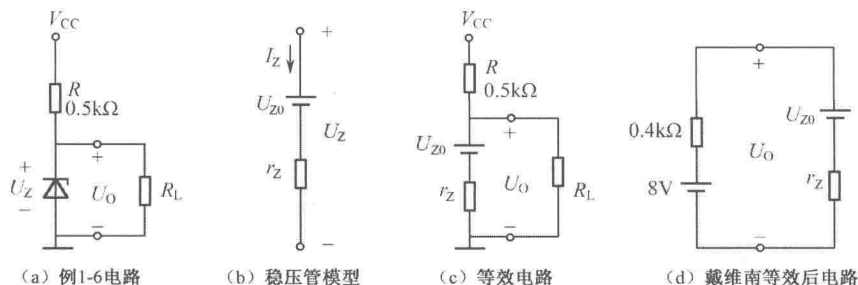


图 1-8 例 1-6 图

【解 1-6】

【解题思路】题中给出了稳压管的动态电阻 r_Z ，必须用考虑动态电阻 r_Z 时的模型等效稳

压管，画出所求解电路的等效电路，再分析电路中的各参数。

【解题过程】

(1) 由已知条件可知，稳压管考虑动态电阻 r_Z 且反向击穿时的模型可用如图 1-8 (b) 所示电路等效。因为 $U_Z = U_{Z0} + I_Z r_Z$ ，所以

$$U_{Z0} = U_Z - I_Z r_Z = 6.8 - 0.005 \times 20 = 6.7V$$

将图 1-8 (a) 中的稳压管用其模型代替，等效电路如图 1-8 (c) 所示。

当负载开路时，在标称电压 +10V 条件下的输出电压

$$U_O = U_{Z0} + \frac{V_{CC} - U_{Z0}}{R + r_Z} \times r_Z = 6.7 + \frac{10 - 6.7}{0.5 + 0.02} \times 0.02 \approx 6.83V$$

(2) 当供电电源 V_{CC} 波动 $\pm 1V$ 时，产生的输出电压的变化量

$$\Delta U_O = \frac{r_Z}{R + r_Z} \times \Delta V_{CC} = \frac{0.02}{0.5 + 0.02} \times (\pm 1) = \pm 0.038V$$

(3) 当 $R_L = 2k\Omega$ 负载接入时， $V_{CC} \times \frac{2}{2 + 0.5} = 8V > 6.7V$ ，稳压管击穿，将稳压管支路的外电路用戴维南定理等效为图 1-8 (d) 所示，可得其输出电压

$$U_O = U_{Z0} + \frac{8 - U_{Z0}}{0.4 + r_Z} \times r_Z = 6.7 + \frac{8 - 6.7}{0.4 + 0.02} \times 0.02 \approx 6.76V$$

(4) 当 $R_L = 0.5k\Omega$ 时， $V_{CC} \times \frac{0.5}{0.5 + 0.5} = 5V < 6.7V$ ，稳压管截止，输出电压

$$U_O = V_{CC} \times \frac{0.5}{0.5 + 0.5} = 5V$$

(5) 保证稳压管反向击穿允许的负载电阻应使电路满足

$$(V_{CC} - 1) \times \frac{R_L}{R_L + 0.5} \geq U_{Z0} + I_{Zmin} \times r_Z$$

得 $R_L \geq 1.46k\Omega$ 。故最小负载 $R_{Lmin} = 1.46k\Omega$ 。

【例 1-7】(中国科学技术大学)

如图 1-9 (a) 所示，设二极管的导通压降 $U_{on} = 0$ ，已知 $U_Z = 3V$ 。求当 U_i 从 -10V 变化到 +10V 时， U_O 及 I_i 如何变化，画出 $U_O \sim U_i$ 、 $I_i \sim U_i$ 图。

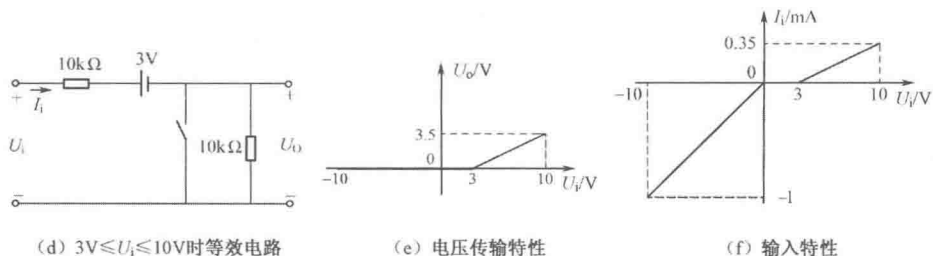
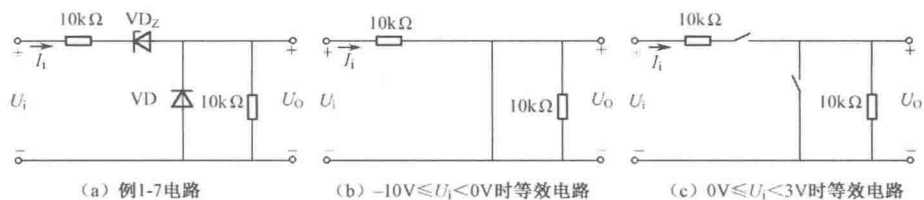


图 1-9 例 1-7 图