



普通高等教育“十二五”规划教材  
电子电气基础课规划教材

# Analog Electronic Technology

# 模拟电子技术基础

黄福林 孙 鸣 主 编  
刘 春 朱维勇 李维华 副主编

研究型



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”  
电子电气基础课规划教材

# 模拟电子技术基础

主 编 黄福林 孙 鸣  
副主编 刘 春 朱维勇 李维华  
编 写 徐晓冰 胡存刚 张晨彧  
主 审 朱承高



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书依据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新修订的“模拟电子技术基础”课程教学基本要求,结合本课程组多年的教学成果和教学经验,本着“确保基础,精选内容,注重应用,利于教学”的原则而编写。同时,为便于学生理解和掌握重要概念和内容,利于学生课堂外自学,各章还附有内容提要、自测题、本章小结。

本书可作为普通高等院校电气信息类等专业的教材用书,也可作为相关工程技术人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/黄福林,孙鸣主编. —北京:中国电力出版社,2012.11

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-3747-3

I. ①模… II. ①黄…②孙… III. ①模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 273361 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2012 年 12 月第一版 2012 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.5 印张 374 千字

定价 28.00 元

## 敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



# 前言

本书依据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新修订的“模拟电子技术基础”课程教学基本要求,总结了合肥工业大学电子技术课程组多年的教学实践经验而编写的。本书编写主要考虑了以下几点。

(1) 本课程是入门性质的技术基础课程,教学内容符合“确保基础,精选内容,注重应用,利于入门”的原则。在内容的叙述上,力求物理概念清楚,语言通俗易懂,强化概念,突出应用性,减少烦琐的数学公式推导,便于学生入门和自学。

(2) 本教材借鉴和参考了兄弟院校模拟电子技术基础教材的特长和优点,对教学内容进行了优化和整合,以适应当前基础课程课时普遍大幅减少的情况。着重元器件外部特性,减少内部原理叙述;着重电路定性分析,简化定量计算;着重分析方法介绍,着重典型电路介绍。

(3) 分散难点,逐步深入。本教材不仅在内容叙述上按照这个原则,课后自测题和习题也是这么安排的。课后自测题比较简单,没有什么计算,但紧扣基本概念。习题则是综合性的,有计算,有图形,也有重要概念。

(4) 突出重点,强化概念。模拟电子技术内容比较繁杂,电路种类繁多,初学者往往抓不住重点,难以理解各章内容之间的内在联系。本教材各章给出的内容提要,将本章的基本概念、基本电路和基本方法突出出来,便于学生掌握。

本教材有“\*”的部分内容,是选讲内容,老师可根据总学时数、课程教学要求和同学实际情况酌情处理。

参加本教材编写的老师都是多年在第一线从事电子技术课程教学和科研的,具有丰富的教学实践经验。本书由黄福林、孙鸣担任主编,刘春、朱维勇和李维华担任副主编。黄福林编写了第3章和第8章,并负责制定编写大纲和全书的统稿;孙鸣教授编写第1章,并参与本教材的策划;李维华编写第2章和第9章,朱维勇编写第7章和第10章,徐晓冰编写第6章和第11章,胡存刚编写第4章,张晨彧和黄福林合编第5章,刘春为本书的编写也做了一些工作。

本教材由上海交通大学朱承高教授担任主审,他对本书提出了许多建设性意见和建议。在本教材编写过程中,得到了合肥工业大学电工电子系全体老师的大力支持,也参阅了部分兄弟院校教材的相关内容。编者在这里一并致谢。

限于编者的水平,本书中不妥和错误之处在所难免,请广大读者和同行老师批评指正。作者的电子邮箱:hflhf2011@163.com。如需课堂教学PPT课件或有建议,请联系。

编者

2012年10月

# 本书常用符号说明

## 1. 基本参数的通用符号

|      |       |       |           |          |       |      |       |        |     |     |     |
|------|-------|-------|-----------|----------|-------|------|-------|--------|-----|-----|-----|
| 参数名称 | 电压    | 电流    | 功率        | 电阻       | 电导    | 阻抗   | 电抗    | 电感     | 电容  | 时间  | 周期  |
| 通用符号 | $U、u$ | $I、i$ | $P、p$     | $R、r$    | $G、g$ | $Z$  | $X$   | $L$    | $C$ | $t$ | $T$ |
| 参数名称 | 频率    | 带宽    | 相位        | 角频率      | 放大倍数  | 反馈系数 | 热力学温度 | 效率     |     |     |     |
| 通用符号 | $f$   | $BW$  | $\varphi$ | $\omega$ | $A$   | $F$  | $T$   | $\eta$ |     |     |     |

## 2. 下标字母的含义

|      |             |                                                          |
|------|-------------|----------------------------------------------------------|
| i, i | 输入; 电流      | 例如: $u_i$ 为输入电压, $i_i$ 为输入电流, $R_i$ 为输入电阻, $A_i$ 为电流放大倍数 |
| o    | 输出          | 例如: $u_o$ 为输出电压, $i_o$ 为输出电流, $R_o$ 为输出电阻                |
| u    | 电压          | 例如: $A_u$ 为电压放大倍数                                        |
| L    | 负载          | 例如: $R_L$ 为负载电阻                                          |
| f    | 反馈          | 例如: $u_f$ 为反馈电压, $R_f$ 为反馈电阻, $A_f$ 为有反馈的电压放大倍数          |
| m    | 幅值, 最大      | 例如: $U_{om}$ 为输出电压幅值, $P_{om}$ 为最大输出电压                   |
| M    | 最大, 中频      | 例如: $P_{CM}$ 为集电极最大允许功率, $A_{uM}$ 为中频电压放大倍数              |
| B, b | 基极          | 例如: $i_B$ 为基极电流, $R_b$ 为基极电阻                             |
| C, c | 集电极, 共模     | 例如: $i_C$ 为集电极电流, $R_c$ 为集电极电阻, $u_{ic}$ 为共模输入电压         |
| E, e | 发射极         | 例如: $i_E$ 为发射极电流, $R_e$ 为发射极电阻                           |
| D, d | 漏极, 差模, 二极管 | 例如: $i_D$ 为漏极或二极管电流, $u_{id}$ 为差模输入电压                    |
| G, g | 栅极          | 例如: $U_G$ 为栅极电位, $R_g$ 为栅极电阻                             |
| S, s | 源极, 信号源, 饱和 | 例如: $i_S$ 为信号源或源极电流, $I_{CS}$ 为集电极饱和电流                   |
| H    | 上限          | 例如: $f_H$ 为上限频率                                          |
| L    | 下限          | 例如: $f_L$ 为下限频率                                          |
| REF  | 基准          | 例如: $U_{REF}$ 为基准电压                                      |
| Z    | 稳压管         | 例如: $U_Z$ 为稳压管稳定电压, $I_Z$ 为稳压管稳定电流                       |
| AV   | 平均值         | 例如: $U_{o(AV)}$ 输出电压平均值                                  |
|      |             |                                                          |

### 3. 电压、电流的符号规定

| 电压、电流名称 | 直流    | 交流或交流分量 |       |             | 总量（直流+交流）     |
|---------|-------|---------|-------|-------------|---------------|
|         |       | 瞬时值     | 有效值   | 相量          |               |
| 基极电压    | $U_B$ | $u_b$   | $U_b$ | $\dot{U}_b$ | $u_B=U_B+u_b$ |
| 基极电流    | $I_B$ | $i_b$   | $I_b$ | $\dot{I}_b$ | $i_B=I_B+i_b$ |
| 集电极电压   | $U_C$ | $u_c$   | $U_c$ | $\dot{U}_c$ | $u_C=U_C+u_c$ |
| 集电极电流   | $I_C$ | $i_c$   | $I_c$ | $\dot{I}_c$ | $i_C=I_C+i_c$ |
| 发射极电压   | $U_E$ | $u_e$   | $U_e$ | $\dot{U}_e$ | $u_E=U_E+u_e$ |
| 发射极电流   | $I_E$ | $i_e$   | $I_e$ | $\dot{I}_e$ | $i_E=I_E+i_e$ |

### 4. 其他符号

| 符号            | 定 义           | 符号          | 定 义                |
|---------------|---------------|-------------|--------------------|
| $U_T$         | 温度电压当量        | $r_{be}$    | 双极型晶体管基极-发射极间的输入电阻 |
| $U_{th}$      | 二极管死区电压       | $r_{ce}$    | 双极型晶体管集电-发射极间的输出电阻 |
| $U_{(BR)}$    | 二极管反向击穿电压     | $R_{bb'}$   | 双极型晶体管基区等效体电阻      |
| $U_{RM}$      | 二极管最高反向工作电压   | $C_{b'e}$   | 发射结电容              |
| $U_{GS(th)}$  | 场效应晶体管开启电压    | $C_{b'c}$   | 集电结电容              |
| $U_{GS(off)}$ | 场效应晶体管夹断电压    | $f_T$       | 晶体管特征频率            |
| $U_{(BR)CEO}$ | 集电极-发射极间的击穿电压 | $f_\beta$   | 共发射极截止频率           |
| $I_F$         | 二极管正向工作电流     | $f_0$       | 振荡频率               |
| $I_{DSS}$     | 漏极饱和电流        | $BW_G$      | 集成运放的单位增益带宽        |
| $I_{CBO}$     | 集电极-基极反向饱和电流  | $K_{CMR}$   | 共模抑制比              |
| $I_{CEO}$     | 双极型晶体管穿透电流    | $S_R$       | 集成运放的转换速率          |
| $\beta$       | 共发射极交流电流放大系数  | $\dot{A}_u$ | 电压放大倍数的相量表示        |
| $g_m$         | 低频跨导          |             |                    |



# 目 录

前言

本书常用符号说明

|                    |    |
|--------------------|----|
| 第1章 概述             | 1  |
| 1.1 电信号            | 1  |
| 1.2 电子电路和电子技术      | 2  |
| 1.3 课程特点和学习方法      | 3  |
| 自测题                | 5  |
| 第2章 半导体二极管及其应用电路   | 6  |
| 2.1 半导体的基本知识       | 6  |
| 自测题                | 12 |
| 2.2 半导体二极管及其应用电路   | 12 |
| 自测题                | 19 |
| 2.3 特殊二极管          | 20 |
| 自测题                | 23 |
| 本章小结               | 23 |
| 习题                 | 24 |
| 第3章 双极型晶体管及放大电路基础  | 27 |
| 3.1 双极型晶体管         | 27 |
| 自测题                | 34 |
| 3.2 放大电路的基本知识      | 35 |
| 自测题                | 38 |
| 3.3 放大电路的分析方法      | 39 |
| 自测题                | 49 |
| 3.4 放大电路的三种组态      | 50 |
| 自测题                | 55 |
| 3.5 多级放大电路         | 56 |
| 自测题                | 59 |
| 本章小结               | 60 |
| 习题                 | 61 |
| 第4章 放大电路的频率响应      | 67 |
| 4.1 频率响应的一般概念      | 67 |
| 4.2 晶体管单级放大电路的频率响应 | 71 |

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| 4.3 多级放大电路的频率响应         | 76         |
| 自测题                     | 78         |
| 本章小结                    | 78         |
| 习题                      | 79         |
| <b>第5章 场效应晶体管及其放大电路</b> | <b>82</b>  |
| 5.1 绝缘栅型场效应晶体管          | 82         |
| 5.2 结型场效应晶体管            | 88         |
| 5.3 场效应晶体管的主要参数和特点      | 90         |
| 5.4 场效应晶体管基本放大电路        | 92         |
| 自测题                     | 97         |
| 本章小结                    | 98         |
| 习题                      | 98         |
| <b>第6章 功率放大电路</b>       | <b>102</b> |
| 6.1 概述                  | 102        |
| 6.2 互补对称功率放大电路          | 104        |
| * 6.3 集成功率放大电路          | 109        |
| 自测题                     | 111        |
| 本章小结                    | 112        |
| 习题                      | 112        |
| <b>第7章 集成运算放大电路</b>     | <b>114</b> |
| 7.1 模拟集成放大电路的特点和组成      | 114        |
| 7.2 运算放大器中的电流源电路        | 116        |
| 7.3 差分式放大电路             | 118        |
| 自测题                     | 127        |
| 7.4 通用型运算放大器的典型电路       | 127        |
| 自测题                     | 129        |
| 7.5 集成运算放大器的主要参数        | 130        |
| 自测题                     | 132        |
| 7.6 运算放大器选择和使用中的一些问题    | 133        |
| 本章小结                    | 134        |
| 习题                      | 135        |
| <b>第8章 负反馈放大电路</b>      | <b>139</b> |
| 8.1 反馈的基本概念与分类          | 139        |
| 自测题                     | 143        |
| 8.2 四种负反馈放大电路           | 144        |
| 自测题                     | 149        |
| 8.3 负反馈对放大电路性能的影响       | 150        |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 自测题·····                    | 153        |
| 8.4 负反馈放大电路的近似计算·····       | 154        |
| 8.5 负反馈放大电路应用中的有关问题·····    | 155        |
| 自测题·····                    | 158        |
| 本章小结·····                   | 159        |
| 习题·····                     | 159        |
| <b>第9章 模拟信号的运算电路·····</b>   | <b>163</b> |
| 9.1 理想运算放大器·····            | 163        |
| 自测题·····                    | 164        |
| 9.2 比例运算电路·····             | 165        |
| 自测题·····                    | 168        |
| 9.3 基本运算电路·····             | 169        |
| 自测题·····                    | 173        |
| 9.4 其他运算电路·····             | 174        |
| 自测题·····                    | 178        |
| 本章小结·····                   | 178        |
| 习题·····                     | 179        |
| <b>第10章 信号的产生与滤波电路·····</b> | <b>182</b> |
| 10.1 电压比较器·····             | 182        |
| 10.2 正弦波振荡电路的分析方法·····      | 185        |
| 自测题·····                    | 188        |
| 10.3 RC 正弦波振荡电路·····        | 188        |
| 自测题·····                    | 191        |
| 10.4 LC 正弦波振荡电路·····        | 191        |
| 自测题·····                    | 197        |
| 10.5 非正弦波振荡电路·····          | 197        |
| 10.6 有源滤波器·····             | 200        |
| 自测题·····                    | 207        |
| 本章小结·····                   | 207        |
| 习题·····                     | 208        |
| <b>第11章 直流电源·····</b>       | <b>213</b> |
| 11.1 直流电源的分类和组成·····        | 213        |
| 11.2 单相整流电路·····            | 214        |
| 11.3 滤波电路·····              | 216        |
| 11.4 稳压电路·····              | 218        |
| 11.5 开关型稳压电路·····           | 222        |
| 自测题·····                    | 224        |

|               |     |
|---------------|-----|
| 本章小结.....     | 225 |
| 习题.....       | 225 |
| 自测题参考答案.....  | 228 |
| 部分习题参考答案..... | 231 |
| 参考文献.....     | 237 |

## 第1章 概 述

### 内 容 提 要

本章简要介绍了电信号、电子电路的基本知识与分类,还介绍了模拟电子技术课程的特点与学习方法。

**基本概念:** 信号,电信号,模拟信号,数字信号,电子电路,模拟电子电路,数字电子电路。

### 1.1 电 信 号

#### 1.1.1 信号和电信号

信号是运载信息的工具,是反映客观的信息的物理量,例如工业生产中的温度、压力、亮度、颜色和流量等,因此信号是信息的表现形式,信息是信号的内涵内容。通常,信息需要借助于某些物理量(如光、电)的变化来表示和传递,无线电话、电视和广播就是利用电磁波来传送声音和图像的。

电压、电流和电磁波等电信号具有容易转换处理、传送和控制的特点,因此工程上常常通过各种传感器,将非电信号先转换成电信号的形式,再进行处理和传送。许多信息是通过电信号进行提取、存储、传送、变换和放大的,电信号是应用最为广泛的信号。

通常电信号是指随时间而变化的电压  $u$  或电流  $i$ ,因此在数学上可将它表示为时间  $t$  的函数,即  $u=f(t)$  或  $i=f(t)$ ,并可画出其随时间变化的波形。

电子电路中的信号均为电信号,本教材简称电信号为信号。

#### 1.1.2 模拟信号和数字信号

信号的形式是多种多样的,可以从不同角度进行分类。根据信号是否具有周期性分为周期信号和非周期信号,根据信号对时间的取值分为连续信号和离散信号等。在电子电路中则将信号分为模拟信号和数字信号。

模拟信号是指在时间上和数值上均具有连续性的信号,即对应于任意时间  $t$  均有确定的函数值  $u$  或  $i$ ,并且  $u$  和  $i$  的值是连续变化的,例如正弦波信号就是典型的模拟信号,如图 1.1.1 所示为几种模拟信号波形。

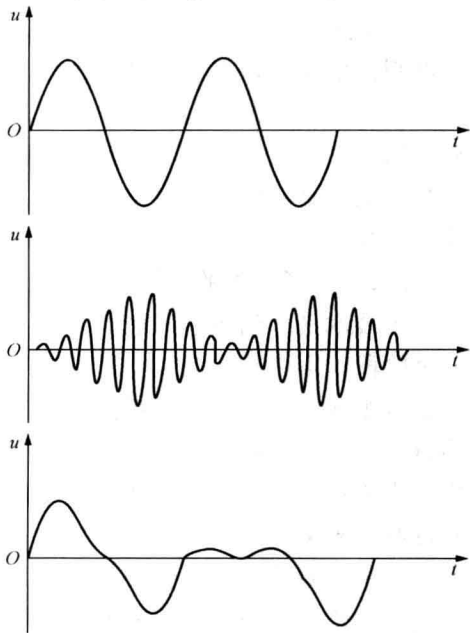


图 1.1.1 模拟信号波形

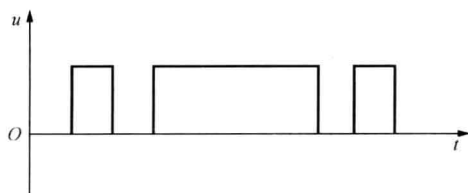


图 1.1.2 数字信号波形

数字信号是指在时间上和数值上均具有离散性的信号， $u$  和  $i$  的变化在时间上和数值上均是不连续的，例如脉冲波信号，其电压波形如图 1.1.2 所示。

自然界中的物理量绝大多数是模拟量，如速度、压力、温度、声音、流量等。由模拟量转换成的电信号通常为模拟信号。在信号处理过程中，模

拟信号和数字信号往往需要互相转换。

在放大电路中常用的电信号为模拟信号。

## 1.2 电子电路和电子技术

当今是信息社会，人们在社会的一切活动中都离不开信息的交流，每天要从周围环境获取大量的信息，例如登录网络、使用手机、收看电视等。许多信息的交流是通过信号的处理、变换和传输来实现的。信号的产生、传输、加工与处理都离不开电子系统。电子系统是由互相依赖、互相作用的若干具有特定功能的电子电路组成的。电子电路分为模拟电子电路（简称模拟电路）和数字电子电路（简称数字电路）。

### 1.2.1 模拟电路和数字电路

处理模拟信号的电子电路称为模拟电路，研究模拟电路的规律和原理的学科称为模拟电子技术。处理数字信号的电子电路称为数字电路或数字逻辑电路，研究数字电路的规律和原理的学科称为数字电子技术。

模拟电路主要包括放大电路、运算电路、滤波电路、波形产生电路和直流电源等。放大电路是模拟电路的基础，是模拟电路的基本电路，其主要作用是放大信号的电压、电流或功率。运算电路主要完成信号的加、减、乘、除、积分、微分、对数、指数等运算。滤波电路用于抑制其他频率，有利传送有用频率。直流电源是把交流电转换为直流电的专门电路。

数字电路主要包括门电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、半导体存储器、可编程逻辑器件、数/模和模/数转换电路等。

数字电路具有比模拟电路体积小、抗干扰能力强的特点，便于集成。但二者各有不同的用途，互相融合，电子设备中常常既有数字电路，也有模拟电路。

### 1.2.2 电子技术的发展和应用

电子技术是一门飞速发展的学科，其发展是伴随着电子器件的发展而发展的，大体可分为三个阶段。第一阶段为真空管阶段，1906 年发明了真空三极管，当时的电子电路主要由真空管等组成，体积大、功耗高。第二阶段是晶体管阶段，1947 年贝尔实验室制成第一只晶体管。由晶体管组成的电路比真空管电路体积小、重量轻、功耗低。1958 年，集成电路诞生，进入集成电路阶段。集成电路是通过一系列特定的加工工艺，将晶体管、二极管等有源器件和电阻电容等无源器件，按照一定的规则连接，集成在一块半导体基片上，具有特定的功能。最初集成的元器件较少，称为小规模集成电路（SSI）；之后发展到可集成几百个元件，称为中规模集成电路（MSI），不久又可以集成上千个，1975 年诞生的超大规模集成电路（VLSI），其单片集成的晶体管数目达到了千万只。

随着集成电路技术的发展,使系统、电路与元器件之间的明显界限被打破,器件、电路和电子系统结合在一起,实现在一小块硅片上。这就形成了固体物理、器件工艺和电子技术三者交叉的新技术学科——微电子技术。随着集成电路技术的广泛渗透,它将是一门更为广泛的边缘性学科。

现代微电子技术的发展水平和产业规模是一个国家经济实力的重要标志。它是一门综合性很强的边缘学科,又是信息领域的重要基础学科。几乎所有的传统产业只要与微电子技术结合,就能重新焕发青春。微机控制的数控机床,与传统机床不可同日而语;先进的现代化汽车,其电子装备占总成本的比例较高。卫星导航、卫星定位、导弹的精确制导等,其核心技术都是电子技术。

### 1.3 课程特点和学习方法

#### 1.3.1 课程的特点

模拟电子技术是电子技术入门性质的技术基础课程,课程的任务是使学生获得模拟电子技术方面的基本理论、基本知识、基本技能,培养学生在电子技术方面分析和解决问题的能力,为以后深入学习电子技术和相关专业打下坚实的基础。在学习本课程时,应注意本课程具有以下几个方面的特点。

##### 1. 入门课程,入门不易

本课程与前续的基础理论课程(如《电路》等)有较紧密的联系,但又有明显的不同。模拟电子技术更接近工程实际,课程的理论体系没有那么严密,更加注重用工程的观点分析处理问题。教材内容跨度大,从半导体的基础知识讲起,一直到集成电路知识以及集成电路模块。内容比较庞杂,基本概念多,技术术语多,元器件种类多,电路类型多,前后内容之间的联系也不是很严密。因此,本课程虽是入门性质的课程,但课程的难点和重要概念在开始的几章就集中出现,使初学者常常产生“入门难”的感觉。和物理、电路等课程的性质有较大区别,往往不习惯。

##### 2. 接近工程实际,采用工程方法

电子器件是非线性的,因此电子电路的分析和设计,采用精确的分析,计算难度很大,工程上也没有必要。由于电子元器件的非线性特性和参数的分散性,元件参数的误差较大,所以工程上通常采用模型法和近似算法对电路进行估算,然后通过实验调试来达到预定的设计要求。

本课程与前续课程《电路》有着密切联系,在电子电路的分析中应用了《电路》中的许多基本理论,但所采用的近似算法同《电路》中的分析计算方法有着较大的差别,学习本课程时要注意区别和调整。在《电路》课程中,理论计算是严格的,前后一致的。但在本课程采用的近似估算法时,在有的电路中,电压  $U_{BE}$  可以忽略;而在另一个电路中,电压  $U_{BE}$  又不能忽略。在有的电路中,某个阻值的电阻  $R$  可以忽略;而在另一个电路中,同样大小的电阻  $R$  不可以忽略。这种灵活的处理方法,初学者不好掌握。

抓住主要因素,忽略次要因素,使复杂问题得到简化,又能满足工程实际需要,这就是工程上处理问题的思想方法,在本课程中有较多体现。

### 3. 理论体系不严密, 更注重实践和应用

电子技术是一门实践性很强的课程, 因为影响电子电路工作的因素很多, 难以用一个简单的模型来全面而精确地模拟。因此, 电路的理论设计正确, 甚至仿真调试正确, 电路也不一定能够按照设计要求正常工作。本课程特别强调理论与实践的紧密结合, 既要注意理论指导实践, 但又不能片面教条, 要注重工程实际, 注重实验技术的学习, 注重动手能力的培养。

#### 1.3.2 课程的学习方法

##### 1. 重视和掌握基本概念

要解决“入门难”的感觉, 必须重视基本概念, 对教材中涉及的技术术语和基本概念, 要反复推敲, 深入理解, 牢牢记住, 熟练掌握。只有熟悉并理解基本概念, 才能灵活应用, 融会贯通。基本概念中, 尤其要注意元器件的物理概念。元器件是非线性的, 严密的理论分析和精确的数值计算都很困难, 因此一般采用简单物理模型和物理特性来研究问题。物理概念虽然没有电路课程中的理论严密, 但分析解决问题很有效。

##### 2. 重视和掌握元器件外部特性

从应用的角度看, 电子元器件的外部电气特性比内部结构和工作原理重要。内部原理稍有所了解即可, 有些元器件的内部相当复杂, 例如某些集成电路, 不需时间去深入研究; 而外部特性必须熟练掌握, 应予重视。

##### 3. 重视和掌握基本电路

电子电路是由晶体管、二极管、电阻和电容等电子元器件按照一定规律连接而成的, 各种复杂的电子电路也都是由若干基本电路组合而成的, 因此, 学习时, 要熟记基本单元电路的结构、特点和功能, 并掌握它们相互的组合规律。

重视基本概念, 重视基本电路, 重视基本分析方法, 入门难问题就能迎刃而解。

##### 4. 重视实验技术和工程思想的学习

影响电子电路工作的因素很多, 既难以用数学公式来分析, 也难以用简单模型来描述。电子电路在设计安装以后, 常常要经过实验和反复调试才能达到设计要求。所以实验技术在本课程中具有相当重要的地位, 必须予以高度重视。学生通过实验, 既能提高实际动手能力, 又能加深对基本概念的理解。本课程开始采用工程思想分析问题, 这和基础理论课程有着明显的区别, 是具有标志性的。工程思想注重实际, 注重主要因素, 不强调理论的严密性, 将复杂问题简单化, 概念要吃透, 计算可简化。我们应当学习掌握工程的思想和方法, 为今后参加实际工作打好基础。

#### 1.3.3 电子电路分析和设计软件介绍

电子设计是人们进行电子产品设计、开发和制造过程中最基础、最关键的步骤。电子设计自动化 (Electronic Design Automation, EDA) 技术已成为当今电子技术领域的重要学科。在电子技术的发展过程中, 电子设计有三个发展阶段。第一阶段为传统人工设计, 采用人工手段完成设计任务; 第二阶段为计算机辅助设计 (CAD), 由人和计算机共同完成设计任务; 第三阶段为电子设计自动化 (EDA), 设计工作主要由计算机自动完成。

EDA 工具使电子电路的设计产生了革命性的变化, 实现了实物设计虚拟化。传统设计是靠实验和实物调试来逐步达到设计目标, 过程烦琐, 时间较长, 设计难度大且成本高, 而 EDA 是在软件环境下设计电路, 虚拟搭建电路, 仿真, 分析、修正, 再仿真, 再分析……

直至设计结果满意。在此基础上搭建的实际电路,极大地缩短了实物调试的时间,降低了设计成本,使设计电路变得不再困难,也减少了对实际经验的依赖程度,适应了电子产品周期短、更新快的特点。

EDA自20世纪70年代发展以来,显示了很强的优越性和良好的发展前景,到了20世纪90年代,EDA跨入了一个崭新的阶段,实现了真正意义上的电路设计自动化。它不但能够实现电路高层次的综合和优化,也可根据设计者的指标对电路结构和参数进行自动综合,对版图面积等进行优化。目前许多EDA软件具有开放式的设计环境,可将各公司的软件集成到统一的计算机平台上,形成系统,使设计者使用更方便。

电子工程师仿真工作室(Electronics Workbench, EWB)是一种功能强大的模拟与数字混合仿真软件,该软件是加拿大IIT公司在20世纪80年代推出的EDA软件。它的仿真功能十分强大,几乎能100%地仿真出真实电路的结果。它还在桌面上提供了各种各样的虚拟仪器,对电子电路的仿真和设计是一个很好的EDA工具。

Multisim是组成EWB的四个模块之一,可以独立使用,若和其他模块配合使用,就可以完成从电路仿真设计到电路版图生成的全过程。Multisim是一个专门用于电子线路仿真和设计的EDA工具软件,它的仿真和电路分析功能比其他电路设计软件都要好。它具有界面直观、操作方便、分析功能强大、易学易用等突出优点。因此,Multisim在我国许多高校得到广泛使用,已成为电子技术课程教学和实验的重要辅助手段。

Multisim7是最新产品,具有更加庞大的元器件模型参数库,更加齐全的仪器仪表库。它具有18种虚拟仪器仪表,学生在计算机上可模拟实验室内的各种实验,不受实验室的条件限制,不受元器件实物的限制,不受实验时间和经费的限制,既可提高设计和分析电路的能力,也能加深对教材内容的理解,还能锻炼动手能力。

### 自 测 题

1. 信号是反映\_\_\_\_\_的物理量,\_\_\_\_\_是信号的内涵和内容。
2. 电信号是指随\_\_\_\_\_而变化的电压和电流。
3. 电子电路中的电信号分为\_\_\_\_\_信号和\_\_\_\_\_信号。
4. 模拟电路是处理\_\_\_\_\_信号的电路。
5. 模拟电路中的基本电路是\_\_\_\_\_电路。
6. 在分析计算模拟电路时,常采用\_\_\_\_\_算法。



## 第2章 半导体二极管及其应用电路

### 内 容 提 要

本章首先介绍了半导体材料的基础知识,然后介绍了二极管的工作原理、特性曲线、主要参数和基本应用电路,最后简要介绍了稳压管等特殊二极管。

**基本概念:**本征半导体,空穴和自由电子,N型半导体和P型半导体,PN结,扩散运动,漂移运动,复合,PN结单向导电性,伏安特性,反向击穿,二极管的等效电路。

**基本电路:**整流电路,限幅电路,低电压稳压电路,稳压管稳压电路。

**基本方法:**二极管和稳压管工作状态的分析方法;二极管电路模型分析法;二极管微变电阻的求解方法。

### 2.1 半导体的基本知识

导体与绝缘体我们并不陌生。在自然界中,人们把易于传导电流的一类物质称为导体,如铜、铝等金属材料。这类物质一般为低价元素,它们的最外层电子容易挣脱原子核的束缚而成为自由电子。绝缘体就是几乎不易传导电流的一类物质,如塑料、橡胶、陶瓷等。这类物质一般为高价元素或高分子物质,它们的最外层电子受原子核的束缚力很强,不易成为自由电子。还有一类物质,其导电性能介于导体和绝缘体之间,被称为半导体,如硅、锗。它们均为四价元素,即每个原子的最外层均有四个价电子。因此,既不像绝缘体那样被原子核束缚得那么紧,也不像导体那样易于挣脱原子核的束缚,其导电性能介于两者之间。除此之外,半导体还具有两个重要特点。①光热效应:当半导体受到外界光和热的刺激时,其导电能力将发生显著的变化;②掺杂效应:在纯净的半导体中加入微量的杂质,其导电能力会显著地增加,并具有可控性。基于这些特点,半导体可以制成各种各样的电子器件。

#### 2.1.1 本征半导体

##### 1. 半导体的共价键结构

硅和锗均具有晶体结构,它们的原子在空间排列成规则的晶格。硅和锗均为四价元素,其最外层原子轨道上具有四个电子,称为价电子,如图2.1.1所示。

价电子不仅受到自身原子核的束缚,同时也受到相邻原子核的吸引。因此,每个价电子不仅围绕自身的原子核运动,同时也围绕相邻的原子核运动。也就是说,两个相邻的原子共用一对价电子。这一对价电子组成所谓的共价键如图2.1.2所示,图中表示的是二维结构,实际上半导体晶体结构是三维的。

##### 2. 半导体的两种载流子

完全纯净的、结构完整的半导体晶体称为本征半导体。在本征半导体中,由于共价键的

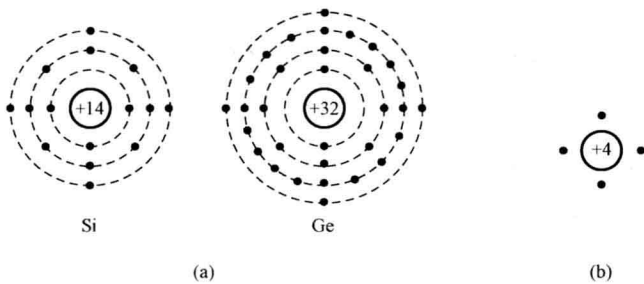


图 2.1.1 硅和锗的原子结构及简化表示  
(a) 硅和锗的原子结构；(b) 简化表示

结合力很强，在热力学温度零度（即  $T=0\text{K}$ ）和没有外界激发的条件下，价电子的能量不足以挣脱共价键的束缚，在晶体中不存在可以自由运动的带电粒子——载流子，半导体不能导电。但是，半导体共价键中的价电子并不像绝缘体中束缚得那样紧。在室温（ $T=300\text{K}$ ）下，就会有少数价电子由于热运动获得足够的能量而挣脱共价键的束缚而成为自由电子，如图 2.1.3 所示，这种现象称为本征激发。

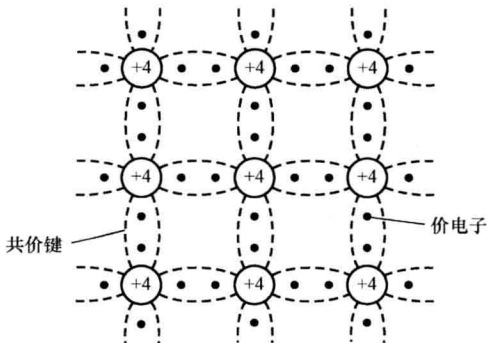


图 2.1.2 四价元素的价电子和共价键

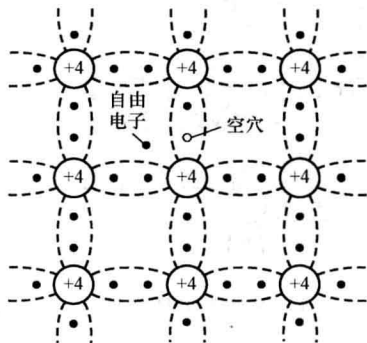


图 2.1.3 本征激发

当价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，共价键中就留下一个空位，这种空位称为空穴。因为原子失去一个价电子而带正电荷，所以说空穴带正电。空穴所带的电量与电子大小相等，但极性相反。

由于共价键中出现了空穴，在外加电场或其他能源的作用下，邻近原子的价电子就会来填补这个空穴，之后其他原子的价电子又会填补这个新的空穴，接着又出现一个空穴，如此继续下去，价电子的逐次递补就好像空穴向反方向运动一样，空穴运动相当于正电荷的运动。由此可见，半导体中存在两种载流子：自由电子和空穴。

因此若在本征半导体两端外加一电场，半导体中将出现两部分电流：一是自由电子做定向运动而形成的电子电流，二是由价电子（共价键中的束缚电子）定向移动形成的空穴电流，两者方向相反。

导体导电只有一种载流子，即自由电子导电，而本征半导体中自由电子和空穴均参与导电，这是半导体导电的特殊性质。空穴的出现和空穴导电是半导体区别于导体的一个重要特点。

在本征半导体内存在两种载流子，带负电的自由电子和带正电的空穴，自由电子和空穴