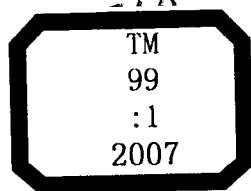


# 电工技术 (上册) 与电子技术

唐庆玉 编著



清华大学出版社



# 电工技术 (上册) 与电子技术

唐庆玉 编著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

《电工技术与电子技术》全书分上、下两册。上册内容是:电路理论及分析方法,正弦交流电路,三相电路,周期性非正弦波形,电路的暂态分析,磁路与变压器,电动机,继电器控制,可编程控制器(介绍西门子 S7-200 型 PLC),Multisim 电路仿真。下册内容是:半导体器件,交流放大电路,集成运算放大器及其应用,功率放大电路,直流稳压电源,晶闸管及可控整流电路,门电路与逻辑代数,组合逻辑电路,触发器及时序逻辑电路,多谐振荡器和单稳态触发器,D/A 转换器和 A/D 转换器,半导体存储器,可编程逻辑器件(PLD,CPLD),模拟电路和数字电路的 Multisim 仿真。

作者主讲的电工学课程于 2003 年被评为北京市精品课程,本书是作者多年从事电工学教学实践和教学改革经验的总结,可作为高等学校非电类专业电工学课程的教科书,也可作为工程技术人员参考书和培训用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

## 图书在版编目(CIP)数据

电工技术与电子技术.上册/唐庆玉编著. —北京:清华大学出版社,2007.3  
ISBN 978-7-302-14697-1

I. 电… II. 唐… III. ①电工技术 ②电子技术 IV. TMTN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 021458 号

责任编辑:张占奎

责任校对:焦丽丽

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

[c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

社 总 机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印 刷 者:北京市昌平环球印刷厂

装 订 者:三河市漂源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:21.5 字 数:497 千字

版 次:2007 年 3 月第 1 版 印 次:2007 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:29.80 元

---

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系  
调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:024482-01

# 作者简介

唐庆玉,1945年生,1970年毕业于清华大学工程化学系,1983年获清华大学电机系硕士学位,1988—1990年在美国亚特兰大佐治亚理工学院做访问学者。

现任清华大学电机系教授,清华大学电机系电工学教研室主任,电工学课程负责人。

主要社会学术兼职有:中国电子学会高级会员,中国电子学会生物医学电子学分会理事,中国仪器仪表学会医疗仪器分会理事,中国电工学研究会理事。

从1978年起一直从事电工学基础课的教学和生物医学工程方面的科研及教学工作,发表科研和教学研究论文80余篇,出版教材3部,获得国家专利2项,获得省、部级科研和教学成果奖多项。



# 前言

电工技术与电子技术(电工学)是高等学校非电类专业的一门专业基础课程,是某些专业的后续课程,如微机原理、单片机原理及应用、仪表测量及控制、汽车电子、核电子学等课程的先修课程。通过该课程的学习,学生可以掌握关于电路的基本理论和分析方法、初步了解电工基本技术(包括三相交流电、变压器、电动机及其控制技术)、模拟电子技术、数字电子技术以及电子设计自动化(EDA)技术。

本书是参照教育部 1995 年颁发的《电工技术》(电工学 I)和《电子技术》(电工学 II)两门课程的基本要求,参考美国 1999—2002 年间出版的有关教材(参考文献[5]~[10]),并结合清华大学电工学精品课建设和教学改革成果编写的。

清华大学电工学课程 2002 年被评为清华大学精品课程,2003 年被评为北京市精品课程。多年来,该课程进行了许多改革,参考美国著名大学的教材和教学大纲,调整了该课程的教学大纲,去除了许多陈旧内容,补充了许多新内容。在课时大大压缩的情况下,仍能做到“宽”和“新”,既符合教育部的基本教学要求,又具有先进性。

本书第 1~第 8 章是传统内容,在继承的基础上保留了其经典成分,并根据技术的发展作了部分补充和修改。第 1 章介绍最基本的电路理论和分析方法。第 2 章介绍正弦交流电路的分析与计算。第 3 章介绍三相电路中电流、电压及功率的计算。第 4 章介绍周期性非正弦波形的分析计算方法。第 5 章介绍电路的暂态分析方法。第 6 章介绍磁路与变压器。第 7 章介绍电动机。第 8 章介绍继电器控制。在第 9 章介绍可编程控制器(PLC)及西门子 S7-200 型 PLC 的原理与应用。第 10 章介绍 Multisim 电路仿真及 Multisim7 仿真软件。

电工技术和电子技术是一门实践性很强的课程,仅仅会做习题还不能很好地掌握,必须理论联系实际,重视实际动手能力的训练。计算机仿真和虚拟仪器的应用可以弥补实验课时和实验室条件的不足,是实现电工学课程研究型教学的良好手段。本书第 10 章介绍了 Multisim7 仿真软件在电路仿真和继电器控制仿真中的应用。在实际教学过程中,建议将仿真穿插在每章内容中,每节课除了布置一般习题外还应布置一道仿真习题,注重训练学生对虚拟仪器的使用。另

外,为便于与第8章内容对照,将第9章可编程控制器的内容安排在上册,但该内容属于数控技术,在学习下册中有关数字电路的内容后再讲授效果会更好。

本书每章都配有适量的思考题和习题,第1~第7章以计算题为主,而第8~第10章以设计题为主,设计题尽量结合实际,以培养学生的创新能力。此外,考虑双语教学的需要,本书还配写有英文习题,方便学生了解国外同类课程的有关内容,掌握英文名词术语和电路符号。书后附有大部分习题的参考答案(图形略)。

本书的编写力求文字简练,条理清楚,一些基本原理多用图形说明,避免冗长的文字叙述,以利于学生课后复习和自学。

编者还为本书编写了配套中文电子课件、英文电子课件、实验指导、习题解答、英文习题及解答等,感兴趣者可登录北京市精品课网站,网址: [http://166.111.92.10/jpkcg/aao\\_70/index.jsp](http://166.111.92.10/jpkcg/aao_70/index.jsp)。这些资源将作为本教材的配套产品出版。

鉴于作者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者予以指正,不胜感谢。

唐庆玉

2007年1月于清华园  
tangqy@tsinghua.edu.cn

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| <b>第 1 章 电路理论及分析方法</b> .....  | 1  |
| 1.1 电路的基本概念 .....             | 1  |
| 1.1.1 电路模型 .....              | 1  |
| 1.1.2 电路元件 .....              | 2  |
| 1.1.3 电压和电流的参考方向 .....        | 5  |
| 1.1.4 电路中电位的概念 .....          | 6  |
| 1.1.5 欧姆定律 .....              | 7  |
| 1.1.6 电路的功率和电能 .....          | 8  |
| 1.2 基尔霍夫定律 .....              | 9  |
| 1.2.1 基尔霍夫电流定律 .....          | 9  |
| 1.2.2 基尔霍夫电压定律 .....          | 11 |
| 1.3 电路的分析方法 .....             | 12 |
| 1.3.1 电阻网络的等效变换 .....         | 12 |
| 1.3.2 电源模型的等效变换 .....         | 17 |
| 1.3.3 支路电流法 .....             | 19 |
| 1.3.4 结点电位法 .....             | 20 |
| 1.3.5 叠加原理 .....              | 22 |
| 1.3.6 戴维宁定理和诺顿定理 .....        | 24 |
| 1.3.7 最大功率传输原理 .....          | 29 |
| 1.4 受控源电路的分析 .....            | 30 |
| 1.4.1 受控源模型 .....             | 30 |
| 1.4.2 含受控源电路的分析方法 .....       | 31 |
| 主要公式 .....                    | 34 |
| 思考题 .....                     | 34 |
| 习题 .....                      | 36 |
| PROBLEMS .....                | 40 |
| <br><b>第 2 章 正弦交流电路</b> ..... | 42 |
| 2.1 正弦电压与电流 .....             | 43 |
| 2.1.1 正弦量的参考方向和交流电源模型 .....   | 43 |

|              |                       |            |
|--------------|-----------------------|------------|
| 2.1.2        | 周期、频率和角频率 .....       | 44         |
| 2.1.3        | 相位、初相位和相位差 .....      | 44         |
| 2.1.4        | 最大值和有效值 .....         | 46         |
| 2.2          | 正弦量的相量表示法和复数表示法 ..... | 46         |
| 2.3          | 正弦交流电路中的元件 .....      | 50         |
| 2.3.1        | 电阻元件 .....            | 50         |
| 2.3.2        | 电感元件 .....            | 51         |
| 2.3.3        | 电容元件 .....            | 55         |
| 2.4          | 正弦交流电路的分析与计算 .....    | 57         |
| 2.4.1        | RLC 串联电路 .....        | 57         |
| 2.4.2        | 阻抗网络与等效阻抗 .....       | 63         |
| 2.4.3        | 复杂正弦交流电路的计算 .....     | 65         |
| 2.5          | 正弦交流电路的功率 .....       | 69         |
| 2.5.1        | 正弦交流电路的功率 .....       | 69         |
| 2.5.2        | 功率因数的提高 .....         | 71         |
| 2.5.3        | 最大功率传输原理 .....        | 73         |
| 2.6          | 电路中的谐振 .....          | 74         |
| 2.6.1        | 串联谐振 .....            | 74         |
| 2.6.2        | 并联谐振 .....            | 79         |
| 2.7          | 电路的频率特性 .....         | 82         |
| 2.7.1        | 传递函数与电路的频率特性 .....    | 83         |
| 2.7.2        | 滤波器与波特图 .....         | 84         |
|              | 主要公式 .....            | 92         |
|              | 思考题 .....             | 92         |
|              | 习题 .....              | 94         |
|              | PROBLEMS .....        | 102        |
| <b>第 3 章</b> | <b>三相电路 .....</b>     | <b>103</b> |
| 3.1          | 三相交流电源 .....          | 103        |
| 3.1.1        | 三相交流电源的产生 .....       | 103        |
| 3.1.2        | 三相交流电源的联接 .....       | 105        |
| 3.2          | 三相电路的负载 .....         | 106        |
| 3.2.1        | 三相负载的星形联接 .....       | 106        |
| 3.2.2        | 三相负载的三角形联接 .....      | 110        |
| 3.3          | 三相电路的功率 .....         | 111        |
| 3.3.1        | 三相电路的功率 .....         | 111        |
| 3.3.2        | 三相电路的功率测量 .....       | 113        |
|              | 主要公式 .....            | 115        |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 思考题 .....                   | 115        |
| 习题 .....                    | 116        |
| PROBLEMS .....              | 118        |
| <br>                        |            |
| <b>第 4 章 周期性非正弦波形 .....</b> | <b>120</b> |
| 4.1 周期性非正弦波形 .....          | 120        |
| 4.2 傅里叶级数 .....             | 121        |
| 4.3 傅里叶频谱 .....             | 124        |
| 4.4 周期性非正弦波形的有效值 .....      | 125        |
| 4.5 周期性非正弦电路的计算 .....       | 126        |
| 4.6 周期性非正弦电路的平均功率 .....     | 128        |
| 4.7 失真度 .....               | 130        |
| 主要公式 .....                  | 131        |
| 思考题 .....                   | 131        |
| 习题 .....                    | 132        |
| PROBLEMS .....              | 135        |
| <br>                        |            |
| <b>第 5 章 电路的暂态分析 .....</b>  | <b>137</b> |
| 5.1 换路定理 .....              | 137        |
| 5.2 一阶 RC 电路的暂态分析 .....     | 139        |
| 5.2.1 经典法 .....             | 139        |
| 5.2.2 时间常数 .....            | 141        |
| 5.3 一阶 RL 电路的暂态分析 .....     | 141        |
| 5.4 三要素法 .....              | 143        |
| 5.5 脉冲激励下的 RC 电路 .....      | 147        |
| 5.5.1 单脉冲激励下的 RC 电路 .....   | 147        |
| 5.5.2 序列脉冲激励下的 RC 电路 .....  | 149        |
| 5.6 含有多个电容的一阶电路 .....       | 150        |
| 5.6.1 多个电容可以等效为一个电容 .....   | 150        |
| 5.6.2 换路后出现电容并联 .....       | 151        |
| 5.6.3 换路后恒压源与电容构成回路 .....   | 152        |
| * 5.7 RLC 二阶电路的暂态过程 .....   | 154        |
| 思考题 .....                   | 157        |
| 习题 .....                    | 158        |
| PROBLEMS .....              | 164        |
| <br>                        |            |
| <b>第 6 章 磁路与变压器 .....</b>   | <b>166</b> |
| 6.1 磁路 .....                | 167        |

|            |                        |            |
|------------|------------------------|------------|
| 6.1.1      | 磁场与电磁场 .....           | 167        |
| 6.1.2      | 磁通与磁感应强度 .....         | 167        |
| 6.1.3      | 直流励磁下的磁路和磁通势 .....     | 168        |
| 6.1.4      | 磁场强度 .....             | 170        |
| 6.1.5      | 安培环路定律 .....           | 170        |
| 6.1.6      | 磁性材料的特性、磁导率和磁化曲线 ..... | 171        |
| 6.1.7      | 直流励磁下的磁路计算 .....       | 173        |
| 6.1.8      | 铁心线圈的电感 .....          | 177        |
| 6.2        | 交流励磁下的铁心线圈 .....       | 178        |
| 6.2.1      | 电压、电流与磁通的关系 .....      | 178        |
| 6.2.2      | 功率损耗和等效电路 .....        | 180        |
| 6.3        | 变压器 .....              | 182        |
| 6.3.1      | 变压器的结构与工作原理 .....      | 182        |
| 6.3.2      | 变压器绕组的极性 .....         | 184        |
| 6.3.3      | 映射阻抗 .....             | 187        |
| 6.3.4      | 实际铁心变压器的等效模型 .....     | 188        |
| 6.3.5      | 变压器的额定参数、外特性及效率 .....  | 189        |
| 6.3.6      | 变压器的应用 .....           | 191        |
| 6.3.7      | 其他类型变压器 .....          | 194        |
|            | 主要公式 .....             | 195        |
|            | 思考题 .....              | 196        |
|            | 习题 .....               | 197        |
|            | PROBLEMS .....         | 201        |
| <b>第7章</b> | <b>电动机 .....</b>       | <b>204</b> |
| 7.1        | 三相异步电动机 .....          | 205        |
| 7.1.1      | 三相异步电动机的结构和转动原理 .....  | 205        |
| 7.1.2      | 三相异步电动机的转矩和机械特性 .....  | 210        |
| 7.1.3      | 三相异步电动机的铭牌和技术数据 .....  | 216        |
| 7.1.4      | 三相异步电动机的使用 .....       | 218        |
| 7.2        | 单相异步电动机 .....          | 223        |
| 7.2.1      | 分相式单相异步电动机 .....       | 224        |
| 7.2.2      | 罩极式单相异步电动机 .....       | 226        |
| 7.3        | 直流电机 .....             | 227        |
| 7.3.1      | 直流电机的结构和工作原理 .....     | 227        |
| 7.3.2      | 直流电动机的机械特性 .....       | 230        |
| 7.3.3      | 直流电动机的调速 .....         | 233        |
| 7.3.4      | 直流电动机的使用 .....         | 235        |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 7.4 控制电机 .....              | 236        |
| 7.4.1 步进电机 .....            | 236        |
| 7.4.2 伺服电机 .....            | 240        |
| 主要公式 .....                  | 242        |
| 思考题 .....                   | 242        |
| 习题 .....                    | 243        |
| PROBLEMS .....              | 246        |
| <br>                        |            |
| <b>第8章 继电器控制 .....</b>      | <b>247</b> |
| 8.1 低压电器 .....              | 247        |
| 8.1.1 开关 .....              | 247        |
| 8.1.2 熔断器 .....             | 248        |
| 8.1.3 自动空气开关 .....          | 248        |
| 8.1.4 按钮 .....              | 249        |
| 8.1.5 行程开关 .....            | 249        |
| 8.1.6 接触器 .....             | 250        |
| 8.1.7 热继电器 .....            | 251        |
| 8.1.8 时间继电器 .....           | 252        |
| 8.1.9 中间继电器及其他控制继电器 .....   | 254        |
| 8.2 基本控制电路 .....            | 254        |
| 8.2.1 起动、停止控制 .....         | 254        |
| 8.2.2 点动控制 .....            | 256        |
| 8.2.3 两地控制 .....            | 257        |
| 8.2.4 正、反转控制 .....          | 257        |
| 8.2.5 行程控制 .....            | 259        |
| 8.2.6 顺序控制 .....            | 260        |
| 8.2.7 时间控制 .....            | 261        |
| 8.3 应用举例 .....              | 262        |
| 思考题 .....                   | 264        |
| 习题 .....                    | 265        |
| PROBLEMS .....              | 268        |
| <br>                        |            |
| <b>第9章 可编程控制器 .....</b>     | <b>269</b> |
| 9.1 PLC 的结构和工作原理 .....      | 269        |
| 9.1.1 PLC 控制系统 .....        | 269        |
| 9.1.2 PLC 的结构 .....         | 270        |
| 9.1.3 PLC 的存储器类型及寻址方式 ..... | 272        |
| 9.2 PLC 的编程语言及工作方式 .....    | 273        |

|               |                                    |            |
|---------------|------------------------------------|------------|
| 9.2.1         | 梯形图 .....                          | 273        |
| 9.2.2         | 语句表 .....                          | 275        |
| 9.2.3         | PLC 的工作方式 .....                    | 275        |
| 9.3           | PLC 的基本指令 .....                    | 276        |
| 9.3.1         | 位逻辑指令 .....                        | 276        |
| 9.3.2         | 逻辑堆栈指令 .....                       | 278        |
| 9.3.3         | 定时器指令 .....                        | 281        |
| 9.3.4         | 计数器指令 .....                        | 283        |
| 9.3.5         | 跳变检测指令 .....                       | 284        |
| 9.3.6         | 置位和复位指令 .....                      | 286        |
| 9.3.7         | 数据传送指令 .....                       | 287        |
| 9.3.8         | 移位和循环移位指令 .....                    | 287        |
| 9.4           | PLC 的应用举例 .....                    | 290        |
| 9.4.1         | 三相异步电动机Y- $\Delta$ 起动 PLC 控制 ..... | 290        |
| 9.4.2         | 十字路口交通灯 PLC 控制 .....               | 290        |
|               | 思考题 .....                          | 294        |
|               | 习题 .....                           | 294        |
| <b>第 10 章</b> | <b>Multisim 电路仿真 .....</b>         | <b>298</b> |
| 10.1          | Multisim7 的使用方法 .....              | 299        |
| 10.1.1        | 操作界面 .....                         | 299        |
| 10.1.2        | 电路的建立与仿真分析方法 .....                 | 306        |
| 10.2          | 基本电路的仿真 .....                      | 308        |
| 10.2.1        | 电路习题解答仿真 .....                     | 308        |
| 10.2.2        | 电路的频率特性仿真 .....                    | 310        |
| 10.2.3        | 电路的暂态过程仿真 .....                    | 312        |
| 10.3          | 继电器控制仿真 .....                      | 313        |
| 10.3.1        | 三相异步电动机控制 .....                    | 313        |
| 10.3.2        | 时间控制 .....                         | 314        |
| 10.4          | 傅里叶分析 .....                        | 315        |
|               | 习题 .....                           | 317        |
|               | PROBLEMS .....                     | 320        |
| <b>附录</b>     | <b>中外电路常用符号对照表 .....</b>           | <b>321</b> |
|               | <b>部分习题答案 .....</b>                | <b>323</b> |
|               | <b>参考文献 .....</b>                  | <b>332</b> |

# 电路理论及分析方法

电路是由电路元件(如电源、电阻、电感、电容等)互相联接形成的系统。对电路进行分析所用的定律、定理、原理及方法统称为电路理论。电路理论是学习电工技术和电子技术的基础。

本章介绍的基尔霍夫定律、戴维宁定理、叠加原理及其他电路分析方法都是分析和计算电路的基础。虽然本章的例题都以直流电路为例,但这些电路理论也同样适用于交流电路。

## 关键术语 Key Terms

|                                         |                                    |
|-----------------------------------------|------------------------------------|
| 电压源/电流源 voltage/current source          | 等效电路 equivalent circuit            |
| 恒压源/恒流源 constant-voltage/current source | 等效电阻 equivalent resistance         |
| 电路模型 circuit model                      | 电源变换 source transformation         |
| 电位差 potential difference                | 支路电流法 branch current method        |
| 电路元件 circuit element                    | 结点电位法 node voltage method          |
| 伏安特性曲线 volt-ampere characteristic       | 叠加原理 superposition theorem         |
| 参考方向 reference direction                | 有源二端网络 active two-terminal network |
| 欧姆定律 Ohm's law                          | 戴维宁定理 Thevenin's theorem           |
| 支路/结点/回路 branch/node/ loop              | 诺顿定理 Norton's theorem              |
| 基尔霍夫电流定律(KCL) Kirchhoff's current law   | 受控源 controlled source              |
| 基尔霍夫电压定律(KVL) Kirchhoff's voltage law   | 恒流源 constant-current source        |
|                                         | 恒压源 constant-voltage source        |

## 1.1 电路的基本概念

### 1.1.1 电路模型

电路是由电路元器件或电气设备通过联接导线按照一定规则联接而成。图 1.1(a)和图 1.1(b)所示分别为手电筒电路和室内照明电

路,它们都是由3部分组成:电源(电池或交流电源)、用电设备(白炽灯泡)及联接导线(包括开关)。当开关合上后,在电源电压的作用下,就有电流流过灯泡,电源提供的电能由灯泡转换成光能和热能。

为了便于对实际电路进行分析和计算,要将实际元件和电气设备模型化,即把它们等效成由理想电路元件组成的电路,并以电路符号和连线画成的电路图来表示。理想电路元件有恒压源、恒流源、电阻、电感和电容,电路图的连线是理想化的导线(电阻值为0)。这种理想化的电路,称为**电路模型**。

例如,将图1.1的实际电路模型化,则不论是手电筒电路,还是照明电路,都可以等效为图1.2的电路模型。其中,电池或交流电源都等效为一个恒压源,并标注上电源的极性和电动势 $E$ 或端电压 $U$ ,白炽灯泡等效为一个电阻性负载 $R$ 。

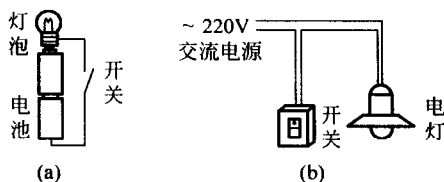


图 1.1 实际电路举例

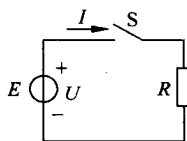


图 1.2 电路模型

一般来说,电路模型通常由3部分组成,即电源、负载和连线(包括开关)。

实际电路的种类有很多,若根据电路的作用来分有两种类型:一是电能的传输和转换;二是信号的传递和处理。图1.1所示的电路属于第一种类型。在本书下册介绍的放大器、滤波器等模拟电路都属于第二种类型。

不管什么类型的电路,电路理论所分析的都是它们的电路模型,电路模型简称电路,用电路图表示。在电路图中,各种电路元件都用规定的符号(包括图形符号和字符符号)来表示。

### 1.1.2 电路元件

电路元件分为无源元件和有源元件两类,无源元件有电阻、电感和电容,分别如图1.3(a)、(b)和(c)所示;有源元件有电压源和电流源,分别如图1.4(a)和(b)所示。本章只介绍电阻、电压源和电流源,电感和电容放在第2章介绍。

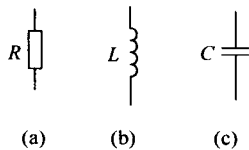


图 1.3 无源元件

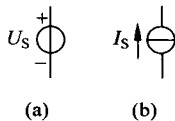


图 1.4 有源元件

#### 1. 电阻

电阻分为线性电阻和非线性电阻。若电阻两端的电压与通过电阻的电流成正比,即比值是一个常数,这样的电阻称为**线性电阻**;若电阻两端的电压与通过电阻的电流不成

正比,即比值不是常数,这样的电阻称为非线性电阻。由线性电阻组成的电路称为线性电路,含有非线性电阻的电路称为非线性电路。除非有特别说明,本书中所提及的电阻都是线性电阻,所提及的电路都是线性电路。

电路元件两端的电压与元件通过的电流的函数关系称为元件的伏安特性(曲线)。

线性电阻的符号及伏安特性曲线如图 1.5 所示。当电压  $U$  和电流  $I$  的参考方向如图 1.5(a)所示时,称电压、电流的参考方向一致,或称为参考方向关联(关于电压、电流参考方向的定义见 1.1.3 节),电压  $U$  和电流  $I$  的关系式为

$$U = RI$$

线性电阻的伏安特性曲线是一条过原点、斜率为  $R$  的直线,如图 1.5(b)所示。

半导体器件的等效电阻是非线性电阻,例如二极管,其伏安特性曲线如图 1.6 所示。从图 1.6 可以看出,曲线上任何一点的电压、电流的比值各不相等,说明二极管的阻值随所加电压而变。因此,含有二极管的电路都属于非线性电路。

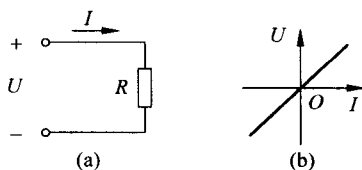


图 1.5 线性电阻的符号及伏安特性曲线

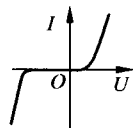


图 1.6 二极管的伏安特性曲线

电阻的单位是欧(姆), $\Omega$ 。当电阻两端的电压为 1V(伏),通过电阻的电流为 1A(安)时,其电阻值为  $1\Omega$ 。大阻值的电阻以  $k\Omega$  ( $1k\Omega=10^3\Omega$ )、 $M\Omega$  ( $1M\Omega=10^6\Omega$ ) 或  $G\Omega$  ( $1G\Omega=10^9\Omega$ ) 为单位。

实际的电阻元件种类有很多,常用的有金属膜电阻和碳膜电阻,还有各种电位器和滑线电阻器等。电阻的主要技术指标有 3 个,即标称阻值、精度和额定功率,3 个指标都有不同系列。标称阻值与实际阻值有一定的误差,用精度表示,精度有  $\pm 1\%$ ,  $\pm 5\%$ ,  $\pm 10\%$  等。金属膜电阻和碳膜电阻的额定功率有  $\frac{1}{8}W$ ,  $\frac{1}{4}W$ ,  $\frac{1}{2}W$ ,  $1W$  等,使用时实际功率不能超过额定值。

## 2. 电压源

### (1) 理想电压源

理想电压源的符号与伏安特性曲线分别如图 1.7(a)和(b)所示,其正、负极用“+”、“-”表示,正极性端的电位高于负极性端的电位。理想电压源的特点是:

① 无论负载如何变化,它的输出电压恒定不变,所以理想电压源又称为恒压源。

② 理想电压源的输出电流由外部电路决定(当外部电路是一个有源网络时,外部电路不但决定理想电压源输出电流的大小,还决定输出电流的方向),也就是说,负载电阻变化时,理想电压源的输出电流也随着变化。理想电压源可以输出无穷大的电流,即能输出无穷大的功率。

电压的单位是伏(特),V。当电场力将 1C 电荷量从一点移动到另一点所做的功为 1J

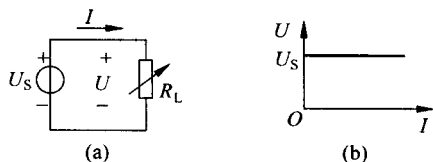


图 1.7 理想电压源的符号及伏安特性曲线

时,则这两点间的电压是 1V。模拟电路中的信号幅度很小,常以 mV( $1\text{mV}=10^{-3}\text{V}$ )和  $\mu\text{V}$ ( $1\mu\text{V}=10^{-6}\text{V}$ )为单位;在电力系统中,电压幅度很高,常用 kV( $1\text{kV}=10^3\text{V}$ )为单位。

## (2) 电压源模型

电压源模型由恒压源串联一个电阻组成,其电路符号和伏安特性曲线分别如图 1.8(a)和(b)所示。其中, $U_s$  为恒压源,串联电阻  $R_o$  称为电压源的内阻或输出电阻。

由图 1.8(a)可知,电压源的伏安特性表达式为

$$U = U_s - R_o I \quad (1-1)$$

当  $R_L = \infty$  时  $I = 0$ ,称为负载开路,此时的输出电压称为开路电压,且  $U_{oc} = U_s$ ; 当  $R_L = 0$  时,  $U = 0$ ,称为负载短路,此时的输出电流称为短路电流,且  $I_{sc} = \frac{U_s}{R_o}$ 。

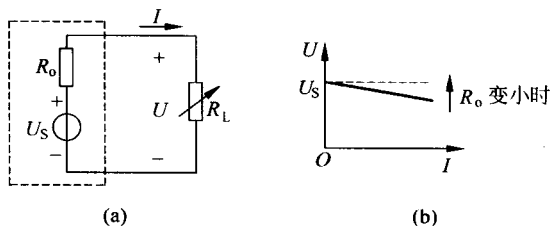


图 1.8 电压源的符号及伏安特性曲线

从电压源模型的伏安特性曲线可以看出:  $R_o$  越大,伏安特性曲线斜率越大;  $R_o$  越小,电压源模型的伏安特性曲线就越靠近恒压源的伏安特性曲线(图 1.8(b)中虚线)。对于内阻较大的电压源,其输出电流越大,输出电压下降就越严重,称该电源带负载的能力不强。当电压源的内阻  $R_o = 0$  时,电压源模型就变成了恒压源模型,因此可认为恒压源是内阻等于 0 的电压源。若恒压源的电压等于 0,则可将其等效成一个阻值为 0 的电阻,即相当于一根连线(短路)。

实际电源的类型有很多,有直流电源和交流电源。直流电源中又有干电池、蓄电池、镍镉可充电电池、直流稳压电源、直流发电机等。虽然这些电源的机理各不相同,但是任何一个实际电源都可以等效为电压源模型。实际电压源的内阻很小,发生短路时输出电流很大,会烧坏电源,所以实际电压源不允许短路。因此,实际电源的输出端都装有熔断器作为短路保护,当发生短路时,熔断器会迅速熔断,从而保护电源不被烧坏。

### 3. 电流源

#### 1) 理想电流源

**理想电流源**的符号及其伏安特性曲线如图 1.9(a)和(b)所示。理想电流源的特点是：

(1) 无论负载电阻如何变化,它的输出电流恒定不变,所以理想电流源又称为**恒流源**。

(2) 理想电流源的输出电压由外部电路决定(当外部电路是一个有源网络时,外部电路不但决定理想电压源输出电压的大小,还决定输出电压的方向),也就是说,当负载电阻变化时,理想电流源的输出电压也随着变化。理想电流源可以输出无穷大的电压,也就是能输出无穷大的功率。

电流的单位是安(培),A。当 1s 内通过导体横截面的电荷量为 1C 时,则电流为 1A。计量微小电流时以 mA( $1\text{mA}=10^{-3}\text{A}$ )和  $\mu\text{A}$ ( $1\mu\text{A}=10^{-6}\text{A}$ )为单位。

#### 2) 电流源模型

**电流源模型**由恒流源并联一个电阻组成,其电路符号和伏安特性曲线分别如图 1.10(a)和(b)所示。其中,  $I_s$  为恒流源,并联电阻  $R_o$  称为电流源的**内阻**或**输出电阻**。

由图 1.10(a)可知,电流源的伏安特性表达式为

$$U = R_o I_s - R_o I \quad (1-2)$$

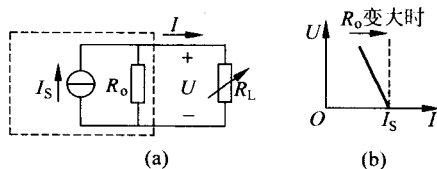


图 1.10 理想电流源的符号及伏安特性曲线

从电流源模型的特性曲线可以看出,  $R_o$  越大, 电流源的特性曲线就越靠近恒流源的特性曲线(图 1.10(b)中虚线)。当  $R_o = \infty$  时, 电流源模型就变成了恒流源模型, 所以认为恒流源是内阻无穷大的电流源。当恒流源的电流等于 0 时, 恒流源就等效成为一个无穷大的电阻, 即相当于开路。

任何一个实际电源, 都可以等效为电流源模型。

#### 1.1.3 电压和电流的参考方向

##### 1. 电压和电流的实际方向

在物理学中规定, 电流的实际方向为正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向。在电路中, 规定电压的实际方向是从高电位指向低电位, 即电压的方向是电位降落的方向, 因此, 电阻两端电压的方向与流过电阻电流的方向一致; 恒压源外部端电压的方向是从