

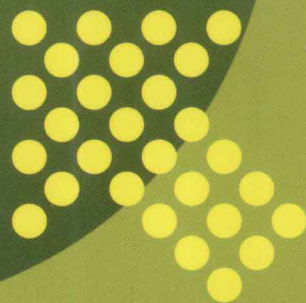
21世纪高等学校规划教材



DIANGONG DIANZI JISHU

# 电工电子技术

张晓杰 主 编  
张宇波 周 焱 副主编



理工类专业适用



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

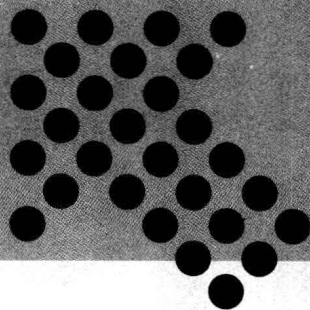
21世纪高等学校规划教材



DIANGONG DIANZI JISHU

# 电工电子技术

主 编 张晓杰  
副主编 张宇波 周 焱  
编 写 杨 帆 弓亚超 胡 玥  
      刘晓芳 葛广军 徐安峰  
主 审 李晓明



理工类专业适用



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书是 21 世纪高等学校规划教材。

全书共分 13 章，主要内容包括直流电路、电路的暂态分析、正弦交流电路、三相交流电路、变压器、电动机及其控制、半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器及其应用、波形产生与直流稳压电源、数字集成电路、模拟量和数字量的转换、EDA 技术。

本书在突出电路的基本理论、基本分析方法的同时，注意理论的应用，内容通俗易懂，理论联系实际。本书可作为高等学校非电类专业的教科书，还可作为其他工科专业和各类注册工程师、工程技术人员电工学参考书及函授教材。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电工电子技术/张晓杰主编. —北京: 中国电力出版社, 2011. 8

21 世纪高等学校规划教材. 理工类专业适用

ISBN 978-7-5123-2017-8

I. ①电… II. ①张… III. ①电工技术-高等学校-教材②电子技术-高等学校-教材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 163419 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2011 年 11 月第一版 2011 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21 印张 513 千字

定价 36.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

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

# 电子电气基础课程教材编审委员会

|       |           |          |     |            |
|-------|-----------|----------|-----|------------|
| 主任委员  | 王志功       | 东南大学     |     |            |
| 副主任委员 | 张晓林       | 北京航空航天大学 | 胡敏强 | 东南大学       |
|       | 王泽忠       | 华北电力大学   | 戈宝军 | 哈尔滨理工大学    |
|       | 马西奎       | 西安交通大学   | 刘新元 | 北京大学       |
|       | 孟 桥       | 东南大学     |     |            |
| 秘书长   | 李兆春       | 中国电力出版社  |     |            |
| 委     | (按姓氏笔画排列) |          |     |            |
|       | 于守谦       | 北京航空航天大学 | 公茂法 | 山东科技大学     |
|       | 王 殊       | 华中科技大学   | 王万良 | 浙江工业大学     |
|       | 王小海       | 浙江大学     | 王建华 | 西安交通大学     |
|       | 王松林       | 西安电子科技大学 | 邓建国 | 西安交通大学     |
|       | 付家才       | 黑龙江科技学院  | 刘润华 | 中国石油大学（华东） |
|       | 刘耀年       | 东北电力大学   | 朱承高 | 上海交通大学     |
|       | 宋建成       | 太原理工大学   | 张正平 | 贵州大学       |
|       | 张彦斌       | 西安交通大学   | 李 承 | 华中科技大学     |
|       | 李 青       | 中国计量学院   | 李 琳 | 华北电力大学     |
|       | 李守成       | 北京交通大学   | 李国丽 | 合肥工业大学     |
|       | 李哲英       | 北京联合大学   | 李晓明 | 太原理工大学     |
|       | 李晶皎       | 东北大学     | 杨 平 | 上海电力学院     |
|       | 陈后金       | 北京交通大学   | 陈庆伟 | 南京理工大学     |
|       | 陈意军       | 湖南工程学院   | 陈新华 | 山东科技大学     |
|       | 宗 伟       | 华北电力大学   | 范蟠果 | 西北工业大学     |
|       | 段哲民       | 西北工业大学   | 段渝龙 | 贵州大学       |
|       | 胡虔生       | 东南大学     | 赵旦峰 | 哈尔滨工程大学    |
|       | 赵荣祥       | 浙江大学     | 唐庆玉 | 清华大学       |
|       | 徐淑华       | 青岛大学     | 袁建生 | 清华大学       |
|       | 郭陈江       | 西北工业大学   | 高会生 | 华北电力大学     |
|       | 崔 翔       | 华北电力大学   | 梁贵书 | 华北电力大学     |
|       | 曾孝平       | 重庆大学     | 曾建唐 | 北京石油化工学院   |
|       | 韩 璞       | 华北电力大学   | 韩学军 | 东北电力大学     |
|       | 雷银照       | 北京航空航天大学 |     |            |

## 序

进入 21 世纪,“985 工程”和“211 工程”的实施,推动了高水平大学和重点学科的建设,在高校中汇聚了一大批高层次人才,产生了一批具有国际先进水平的学术和科学技术研究成果。然而高校规模的超高速增大,导致不少学校的专业设置、师资队伍、教材资源和教学实验条件不能迅速适应发展需要,教学质量问题日益突现。高校教材,作为教学改革成果和教学经验的结晶,其质量问题自然备受关注。

需要指出的是,很多高等学校教材经过多年的教学实践检验,已经成为广泛使用的精品教材。同时,我们也应该看到,现用的教材中有不少内容陈旧、未能反映当前科技发展的最新成果,不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要。这就要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进、开拓创新,在内容质量和出版质量上均有新的突破。

根据教育部教高司 2003 年 8 月 28 日发出的 [2003] 141 号文件,在教育部组织下,历经数年,2006~2010 年教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会按照教育部的要求,致力于制定专业规范或教学质量标准,组织师资培训、教学研讨和信息交流等工作,并且重视与出版社合作,编著、审核和推荐高水平电子电气基础课程教材。

“电工学”、“电路”、“信号系统”、“电子线路”、“电磁场”、“自动控制原理”、“电机学”等电子电气基础课程是许多理工院校的先修课程,也是电子科学与技术、电气工程及其自动化等专业学科的基石,在科学研究领域和产业应用中发挥着极其重要的作用。此类教材的编写,应提倡新颖的立意,“适用、先进”的编写原则和“通俗、精炼”的编写风格,以百花齐放的形式和较高的编写质量来满足不同学科、不同层次的师生的教学要求。

本电子电气基础课程教材编审委员会即是基于此目的而设立的,希望能够鼓励更多的优秀教师参与其中,为高质量教材的编写和出版贡献出聪明才智 and 知识经验。



2009 年 10 月于东南大学

# 前 言

本书是 21 世纪高等学校规划教材, 依据教育部颁布的高等工科院校电工学课程教学基本要求, 并根据近年来在电工学课程教学改革的实际情况和教学方面的实践经验编写。

电工学课程是高等理工科院校非电类专业学生的必修课程, 其主要任务是为学生学习专业知识和从事工程技术研究打好理论基础, 并使学生受到必要的基本技能的训练。随着近几年各类注册工程师考试的兴起, 电工学作为考试内容的一部分也受到足够的重视; 另外, 电子信息技术迅速发展并且在非电类专业领域的应用也越来越广泛, 因此, 编写教材时既重视基本理论, 又增加了一些新内容。本书对传统的电工学内容进行了精选, 保留了必需的基础知识及各种社会考试需要的内容, 删去了一些不常用的内容, 增加了近年来一些新的技术, 主要内容包括直流电路、电路的暂态分析、正弦交流电路、三相交流电路、变压器、电动机及其控制、半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器及其应用、波形产生与直流稳压电源、数字集成电路、模拟量和数字量的转换、EDA 技术, 共 13 章。在内容的编写上本书的指导思想如下。

(1) 保证基础, 降低深度, 突出基本原理、基本分析方法和应用。例如: 增加例题, 降低对解题方法的要求, 以够用为度; 对习题进行了合理的安排, 减少偏难习题, 加强基本题。

(2) 增加可读性、拓宽知识面。在大部分章节的后面, 增加了有关电工学方面的应用或阅读材料, 以配合学习和阅读。

(3) 直流电路部分增加了节点分析法, 保证每节有足够的例题, 目的是为后续章节学习打下良好基础。

(4) 缩减了变压器和电动机及其控制、模拟电子部分, 加强了运算放大电路、数字电路部分, 增加了 EDA 技术。

书中标有星号 (\*) 的章节属参考内容, 可以根据实际需要讲授或读者自行阅读。

本书由河南城建学院张晓杰任主编, 郑州大学张宇波、河南城建学院周焱任副主编。全书共 13 章, 其中第 1、7 章由张晓杰编写, 第 2 章由河南城建学院杨帆编写, 第 3 章由河南城建学院弓亚超编写, 第 4 章由河南城建学院胡玥编写, 第 5 章及附录部分由河南城建学院刘晓芳编写, 第 6 章由河南城建学院葛广军编写, 第 8、10 章由河南城建学院徐安峰编写, 第 11、12 章由周焱编写, 第 9、13 章由张宇波编写。

本书由太原理工大学李晓明教授主审, 李晓明教授从教材的结构、内容, 一直到完成后的书稿都进行了认真审阅, 谨在此表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限, 书中错误和不妥之处在所难免, 殷切期望使用本书的教师、学生和其他读者给予批评指正。

编 者

2011 年 7 月

## 目 录

|                   |    |
|-------------------|----|
| 序                 |    |
| 前言                |    |
| 第 1 章 直流电路        | 1  |
| 1.1 电路和电路模型       | 1  |
| 1.2 电路的物理量        | 3  |
| 1.3 电路的基本状态       | 7  |
| 1.4 电压源与电流源及其等效变换 | 10 |
| 1.5 基尔霍夫定律        | 15 |
| 1.6 支路电流法         | 19 |
| 1.7 节点电压法         | 22 |
| 1.8 叠加定理          | 24 |
| 1.9 等效电源定理        | 26 |
| * 1.10 受控电源电路     | 31 |
| * 1.11 应用         | 32 |
| 习题 1              | 35 |
| 第 2 章 电路的暂态分析     | 40 |
| 2.1 暂态分析的基本概念     | 40 |
| 2.2 储能元件          | 40 |
| 2.3 换路定律          | 44 |
| 2.4 RC 电路的暂态分析    | 45 |
| 2.5 RL 电路的暂态分析    | 49 |
| 2.6 一阶电路暂态分析的三要素法 | 52 |
| * 2.7 应用          | 54 |
| 习题 2              | 54 |
| 第 3 章 正弦交流电路      | 57 |
| 3.1 正弦交流电路的基本概念   | 57 |
| 3.2 正弦量的相量表示法     | 59 |
| 3.3 单一参数的交流电路     | 62 |
| 3.4 阻抗的串联与并联      | 67 |
| 3.5 交流电路的功率       | 71 |
| 3.6 功率因数的提高       | 72 |
| 3.7 串联谐振与并联谐振     | 74 |
| * 3.8 应用          | 77 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 习题 3 .....                 | 79  |
| <b>第 4 章 三相交流电路</b> .....  | 82  |
| 4.1 三相电源 .....             | 82  |
| 4.2 三相负载 .....             | 85  |
| 4.3 三相功率 .....             | 90  |
| 4.4 电气安全 .....             | 91  |
| * 4.5 应用 .....             | 94  |
| 习题 4 .....                 | 96  |
| <b>第 5 章 变压器</b> .....     | 98  |
| 5.1 变压器的用途和结构 .....        | 98  |
| 5.2 单相变压器的工作原理 .....       | 100 |
| 5.3 变压器的运行特性 .....         | 104 |
| 5.4 三相变压器简介 .....          | 105 |
| 5.5 特殊变压器 .....            | 107 |
| * 5.6 应用 .....             | 109 |
| 习题 5 .....                 | 112 |
| <b>第 6 章 电动机及其控制</b> ..... | 114 |
| 6.1 三相异步电动机的结构和工作原理 .....  | 114 |
| 6.2 三相异步电动机的特性和额定值 .....   | 117 |
| 6.3 三相异步电动机的起动、调速与制动 ..... | 120 |
| 6.4 单相异步电动机 .....          | 123 |
| * 6.5 直流电机 .....           | 125 |
| * 6.6 其他用途的电动机 .....       | 127 |
| * 6.7 电动机的选择 .....         | 129 |
| 6.8 常用低压电器 .....           | 130 |
| 6.9 常用电动机控制电路 .....        | 135 |
| * 6.10 可编程序控制器 .....       | 141 |
| * 6.11 应用 .....            | 145 |
| 习题 6 .....                 | 146 |
| <b>第 7 章 半导体器件</b> .....   | 147 |
| 7.1 半导体的基础知识 .....         | 147 |
| 7.2 半导体二极管 .....           | 150 |
| 7.3 半导体三极管 .....           | 152 |
| 7.4 绝缘栅场效应管 .....          | 156 |
| 7.5 晶闸管 .....              | 160 |
| * 7.6 应用 .....             | 161 |
| 习题 7 .....                 | 163 |
| <b>第 8 章 基本放大电路</b> .....  | 166 |

|               |                          |            |
|---------------|--------------------------|------------|
| 8.1           | 基本放大电路的组成 .....          | 166        |
| 8.2           | 共发射极放大电路 .....           | 169        |
| 8.3           | 共集电极放大电路 .....           | 178        |
| 8.4           | 多级放大电路 .....             | 179        |
| * 8.5         | 应用举例 .....               | 185        |
| * 8.6         | 场效应管放大电路 .....           | 188        |
|               | 习题 8 .....               | 190        |
| <b>第 9 章</b>  | <b>集成运算放大器及其应用</b> ..... | <b>193</b> |
| 9.1           | 集成运算放大器 .....            | 193        |
| 9.2           | 放大电路中的负反馈 .....          | 197        |
| 9.3           | 基本运算电路 .....             | 201        |
| 9.4           | 电压比较器 .....              | 206        |
| * 9.5         | 应用 .....                 | 208        |
|               | 习题 9 .....               | 209        |
| <b>第 10 章</b> | <b>波形产生与直流稳压电源</b> ..... | <b>212</b> |
| 10.1          | 正弦波振荡电路 .....            | 212        |
| 10.2          | 多谐振荡器 .....              | 218        |
| 10.3          | 整流电路 .....               | 221        |
| 10.4          | 滤波电路 .....               | 224        |
| 10.5          | 稳压电路 .....               | 227        |
| * 10.6        | 应用举例 .....               | 230        |
|               | 习题 10 .....              | 232        |
| <b>第 11 章</b> | <b>数字集成电路</b> .....      | <b>235</b> |
| 11.1          | 集成门电路 .....              | 235        |
| 11.2          | 组合逻辑电路 .....             | 238        |
| 11.3          | 双稳态触发器 .....             | 248        |
| 11.4          | 时序逻辑电路 .....             | 256        |
| 11.5          | 集成定时器 .....              | 267        |
| * 11.6        | 应用举例 .....               | 272        |
|               | 习题 11 .....              | 274        |
| <b>第 12 章</b> | <b>模拟量和数字量的转换</b> .....  | <b>278</b> |
| 12.1          | 数/模 (D/A) 转换器 .....      | 278        |
| 12.2          | 模/数 (A/D) 转换器 .....      | 282        |
|               | 习题 12 .....              | 286        |
| <b>第 13 章</b> | <b>EDA 技术</b> .....      | <b>287</b> |
| 13.1          | EDA 技术概述 .....           | 287        |
| 13.2          | VHDL 硬件描述语言 .....        | 289        |
| 13.3          | 常用 VHDL 设计程序 .....       | 302        |

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| * 13.4 设计实例 .....         | 310     |
| 习题 13 .....               | 318     |
| 附录 A  国标集成电路型号命名方法 .....  | 319     |
| 附录 B  部分数字集成电路引脚排列图 ..... | 320     |
| <br>部分习题答案 .....          | <br>322 |
| <br>参考文献 .....            | <br>326 |

## 第1章 直 流 电 路

本章介绍电路的基本概念,电压、电流参考方向的概念,吸收、发出功率的计算方法和表达式,还介绍了独立电源、受控源,着重讨论电路的基本知识、基本定律以及电路的分析和计算方法。本章的内容不仅适用于直流电路,也适用交流电路,而且是今后学习电子电路的必要基础。

### 1.1 电路和电路模型

#### 1.1.1 电路

简单地讲,电路是电流流过的路径。随着科学技术的发展,电工技术和电子技术的应用越来越广泛,电路的具体形式多种多样、千变万化。为实现应用目的,将若干电路器件或装置按一定方式相互连接,就构成了电路。

电路是为某种需要,按一定方式由若干电路元件相互连接所组成的整体。

实际电路的结构形式多种多样,其作用通常可分为两类:一类实现能量的传输和转换;另一类实现信号的传递和处理。

图1-1所示为一个简单的照明电路,电池把化学能转换成电能,经过导线的传输和开关的控制,灯泡再把电能转换成热能和光能。而电动机电路中,是把电能转换为机械能。这类电路一般传输简单、电压较高、电流较大,习惯上称为强电电路,主要是实现能量的传输和转换。

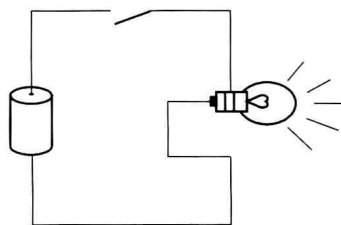


图 1-1 简单照明电路

图1-2所示为一个收音机电路,调整天线线圈( $L_1$ )和

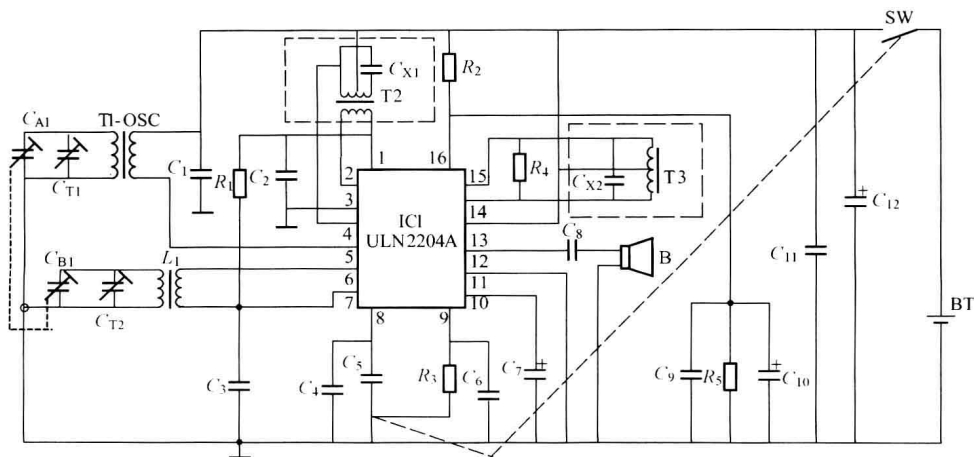


图 1-2 收音机电路

可变电容 ( $C_{\text{B1}}$ ) 可以选出空中传来的载有声音信息的无线电波众多信号中的一个需要信号, 也就是所说的某个广播电台, 再经过放大和处理, 最后由扬声器 (B) 将广播电台播出的声音信号重现。这类电路在电子技术和非电量测量中经常遇到, 虽然也存在能量的传输和转换, 但主要关心的是信号传递速度和处理的效果。习惯上称电压较低、电流较小的电路为弱电电路。

组成电路的元件, 按其在电路中的作用不同分为电源、负载、中间环节三个基本组成部分。

(1) **电源**。电源是将其他形式的能量转换为电能的设备, 例如蓄电池、发电机等; 也可以是信号源, 例如, 在电子技术、控制技术中把非电量转换成电信号的各种信号发生器。

(2) **负载**。负载是用电设备或接收电信号的设备。例如, 电动机把电能转换为机械能、压力传感器把电信号转换为压力、扬声器把电信号转换为声音等。

(3) **中间环节**。中间环节是指连接电源和负载部分的导线、开关设备和保护设备等, 在电路中起到连通电路和传输电能、电信号的作用。

### 1.1.2 电路模型

组成电路的实际元件种类繁多, 各具特性。为便于对实际电路元件进行分析和数学描述, 将实际电路元件进行科学抽象, 突出其主要电磁特性, 忽略其次要特性, 在一定条件下将实际电路元件等效为理想电路元件。

由理想电路元件相互连接所组成的电路称为电路模型。

图 1-1 所示的简单照明电路由电源、负载及导线组成, 其实际的电路模型如图 1-3 所示。电源用理想电压源  $E$  和电阻元件  $R_0$  的串联组合作为模型, 电阻元件  $R$  作为灯泡的电路模型, 连接导线用理想导线 (电阻为零) 表示。

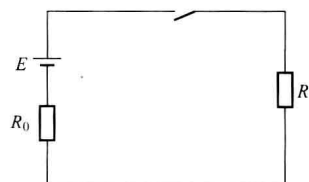


图 1-3 实际的电路模型

用理想电路元件等效实际器件的过程就是建立其模型 (简称建模)。建模时必须考虑工作条件, 根据不同要求把给定工作情况下的主要物理现象及功能反映出来。例如一个用导线绕成的线圈: 一方面当有电流通过时会产生磁通, 形成磁场; 其次, 因为导线的电阻不为零, 线圈还会消耗能量; 另外, 在导线中因电阻存在, 线圈的匝与匝之间还存在分布电容。由此, 线圈具有电感、电阻、电容三种性质。在直流的情况下, 忽略其电感、电容性质, 则称线圈为仅具有电阻性质的元件, 为理想电阻元件; 在较低频率下, 就要用理想电阻元件和电感元件的串联组合作为模型; 在较高频率下, 其模型还需要包含理想电容元件。可见, 在不同的条件下, 同一个实际器件可能采用不同的模型。

电路模型是由理想电路元件相互连接而构成的整体, 理想电路元件是实际电路元件的等效表示, 因此电路模型有时也称为等效电路。本书所涉及的电路一般不是实际电路, 而是指由理想元件构成的电路模型。这为实际电路的分析计算带来很大方便, 如果建模恰当, 其分析和计算结果就与实际情况接近。

### 1.1.3 分析电路实质

电路中的电压和电流是在电源的作用下产生的, 因此, 把电源称为激励; 由激励在电路中产生的电压和电流就称为响应。根据激励和响应之间的因果关系, 又把激励称为输入, 响

应称为输出。分析电路的实质就是研究电路的工作过程、性能、特性等，也就是分析输入和输出的函数关系。

## 1.2 电 路 的 物 理 量

电路的特性通过一些物理量（如电流、电压、电动势和功率等）来描述。在这些物理量（变量）中，电流和电压是基本物理量，其他为复合物理量。

### 1.2.1 电流及其参考方向

在电源作用下，电荷有规则地移动就形成了电流。习惯上，将正电荷的移动方向规定为电流的实际方向，那么负电荷的流向与电流的实际方向相反。目前已经清楚导线中的电流是由带负电荷的电子运动而产生的，但习惯上〔这种习惯约定由美国科学家和发明家富兰克林（1706~1790）提出〕仍沿用正电荷运动形成电流的说法。因此，对电流定义为：**电流是电荷对时间的变化率。**

其数学表示式为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

式中：电流的单位为 A（安培）；电荷的单位为 C（库仑）；时间的单位为 s（秒）。

如果电流不随时间而变化，则称为直流电（DC）。直流电是不随时间变化的恒定电流。恒定电流用符号  $I$  表示。

正弦电流（或称交流电）是最常用的随时间变化的电流。交流电（AC）是随时间按正弦规律变化的电流。常用家用电器，如空调、冰箱、洗衣机、微波炉等，都使用交流电。随时间变化的电流用小写字母  $i$  表示。

在进行电路的分析和计算时，需要知道电流的方向。电流的实际方向为正电荷移动的方向。对于简单的电路，电流的实际方向很容易确定，如图 1-4（a）所示，在电源内由负极流向正极，在外电路中由电源正极经过 a、b 点流向电源负极。而一些复杂的电路，如图 1-4（b）所示电路中，电阻  $R_5$  中电流的实际方向难以确定。对于交流电，电流的实际方向是随时间不断变化的，更难以在电路中标明电流的实际方向，为分析和计算电路的方便，引入了电流参考方向的概念。

**电流参考方向为任意假设的正电荷移动方向（或称正方向）。**

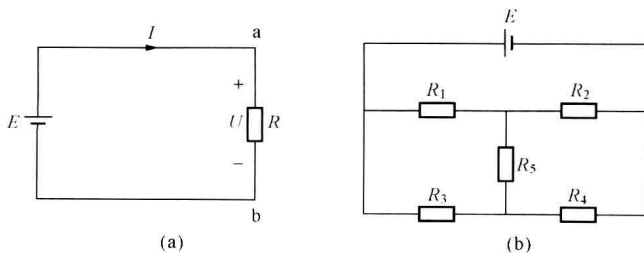


图 1-4 电流的方向

（a）简单电路；（b）复杂电路

在对电路进行分析和计算时,先对所讨论的电路任意指定一参考方向。如果计算结果电流为正值( $i>0$ ),表示实际方向与任意指定的方向相同;如果计算结果电流为负值( $i<0$ ),表示实际方向与任意指定的方向相反,如图1-5所示。

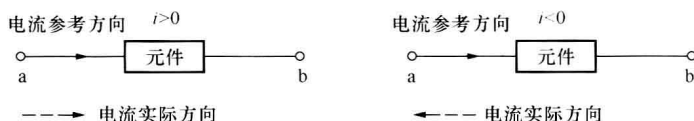


图1-5 电流的参考方向与实际方向的关系

电流数值的正负,只反映电流的参考方向与实际方向的关系,这时电流是作为一个代数量。在实际的应用中,电流的计算结果无论为正还是为负,没有必要再把实际方向标注在电路上,有了参考方向和计算结果,电流的实际方向就十分清楚了。另外,电流的实际方向是确定的,不会因为参考方向的不同而改变。本书后续章节中,电路中所标注的电流方向都是参考方向。

在电路中,电流的参考方向用箭头表示,如图1-5所示,也可用双下标表示,如 $i_{ab}$ 表示参考方向由a指向b。

### 1.2.2 电压及其参考方向

电场力把单位正电荷从电路的一点移到另一点所做的功称为电路中两点间电压,即

$$u(t) = \frac{dw}{dq} \quad (1-2)$$

式中:电压的单位为V(伏特);能量的单位为J(焦耳);电荷的单位为C(库仑)。

一般情况下,电压是任意的时间函数,用小写字母 $u(t)$ 表示两点间的瞬时电压。直流电路中,电压用大写字母 $U$ 表示。

电场力将单位正电荷从电路的一点移到参考点所消耗的能量,称为该点的电位。参考点可以任意选择,参考点的电位为零。在电路的分析中,常选取电路的某一点作为参考点,则电路中任一点的电位为该点到参考点的电压。在一个确定的电路中,两点间的电压是不会变化的,而电位会随着参考点的改变发生变化。

电工技术中,电气设备外壳与大地相连,大地作为参考点,用符号“ $\perp$ ”表示。电子技术中,元件的公共连接点或公共线作为参考点,用符号“ $\perp$ ”表示。

根据电场力的特点,规定电压的实际方向为高电位指向低电位,即电位降低的方向。

同电流的情况一样,对于简单的电路,电压的实际方向很清楚,对于比较复杂的电路,电压的实际方向就难以确定,因此必须预先给电压任意指定参考方向(或称参考极性)。如果计算结果电压值为正值( $u>0$ ),表示实际方向与任意指定的方向相同。如果计算结果电压值为负值( $u<0$ ),表示实际方向与任意指定的方向相反,如图1-6所示。

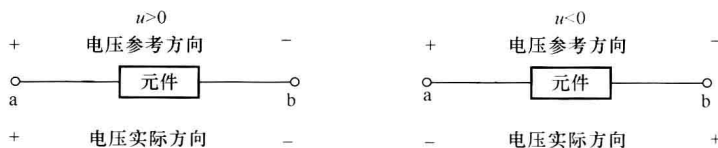


图1-6 电压的参考方向与实际方向的关系

电压数值的正负，只反映电压的参考方向与实际方向的关系，这时电压是作为一个代数量。但为了分析方便，如果实际方向为已知，就常以其实际方向作为参考方向。

在电路中，电压的参考方向可用正（+）、负（-）极性表示，正极指向负极的方向就是电压的实际方向，有时也可用箭头表示或用双下标表示电压，如  $u_{ab}$  表示 a 和 b 之间电压参考方向由 a 指向 b。

一个元件的电流和电压的参考方向分别可以任意指定。如果指定流过元件电流的参考方向由电压参考方向的正极指向负极，即电流参考方向与电压参考方向相一致，则把符合这一关系的电流和电压参考方向称为关联参考方向。当二者相反时，称为非关联参考方向。

为分析方便，如果电路中电流、电压或电动势的实际方向为已知，就以实际方向作为参考方向。在图 1-4 (a) 中，流过电阻  $R$  的电流参考方向从上到下，电阻  $R$  两端的电压参考方向也从上到下，两者的参考方向一致，所以是关联参考方向。流过电动势  $E$  的电流的参考方向从下到上，电压的参考方向从上到下，两者的参考方向相反，所以是非关联参考方向。

关于参考方向，需要注意：

(1) 任一电路元件上的电流和电压的参考方向都可以分别独立地加以指定，参考方向可以任意假定而不会影响计算结果。如果与指定的参考方向相反时，则计算出的电流、电压值仅相差一负号，最后得到的实际结果仍然相同。

(2) 电流值和电压值的正与负都只有在设定了它们的参考方向的前提下才有意义。如果电流、电压为正值，说明它们的实际方向分别与所假设参考方向相同，否则相反。

(3) 描述任一电路元件或整个电路的电压、电流关系的任何方程也只有在选定了参考方向后才能明确建立。参考方向一旦选定，在电路计算过程中就不要再随意更改，以免造成混乱。

### 1.2.3 电动势

电源内的局外力（如电池中的化学力）将单位正电荷从电源负极（低电位端）移到正极（高电位端）所消耗的能量，称为**电动势**。显然，电动势的单位与电压单位相同，也是伏（V）。直流电路中用大写字母  $E$  表示电动势，若电动势为时间的函数，则可用小写字母  $e(t)$  表示。

电动势的实际方向规定为由电源负极指向正极，即电位升高的方向，如图 1-4 (a) 所示。在指定电动势的参考方向下，电动势为代数量，其数值的正或负，仅反映参考方向与实际方向的关系。

### 1.2.4 功率与能量

如图 1-7 所示，设通过电路元件的电流为  $i$ ，两端电压为  $u$ ，参考方向如图中所示， $u$  和  $i$  为关联参考方向。由式 (1-2) 可知，电场力将电荷  $dq$  从高电位移至低电位所做的功为

$$dw = u dq \quad (1-3)$$

功率是单位时间内消耗或吸收的能量，数学表达式为

$$p(t) = \frac{dw}{dt} \quad (1-4)$$

由式 (1-1)、式 (1-3) 和式 (1-4)，有

$$p(t) = u(t)i(t) \quad (1-5)$$

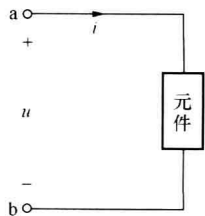


图 1-7 元件的功率

式(1-5)可表述为:被元件吸收或元件发出的功率是元件两端的电压与流过该元件电流的乘积。功率是个代数量,  $p(t) > 0$ , 元件(或电路)消耗(或吸收)功率;  $p(t) < 0$ , 元件(或电路)发出(或提供)功率。

式(1-5)中表达的功率是随时间变化的量, 称为瞬时功率。在直流电路中功率用大写字母  $P$  表示。功率的单位为 W (瓦)。

在应用式(1-5)计算元件的功率时, 需先指定电压和电流的参考方向, 当电压和电流的参考方向为关联参考方向时, 若  $p > 0$ , 该元件吸收功率; 若  $p < 0$ , 该元件发出功率。

**【例 1-1】** 电路如图 1-8 所示, 已知  $U_{ab} = -20\text{V}$ ,  $I = -1\text{A}$ ,  $E_1 = 5\text{V}$ ,  $E_2 = 10\text{V}$ 。计算  $R$  的值, 并求各元件的功率, 说明元件是吸收功率还是发出功率。

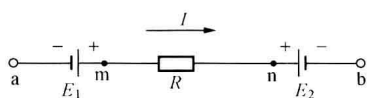


图 1-8 [例 1-1] 图

**解** 要计算  $R$  的值, 根据欧姆定律, 需要求出流过  $R$  的电流和两端的电压, 流过的电流  $I$  为已知, 本题的关键是如何计算电阻  $R$  两端的电压, 若  $m$ 、 $n$  两点的电位已知, 那么电阻  $R$  两端的电压即为  $U_{mn}$ 。

设  $a$  点为参考点, 则

$$U_a = 0\text{V}$$

$$\text{由 } U_{ab} = U_a - U_b$$

$$U_b = U_a - U_{ab} = 0 - (-20) = 20\text{ (V)}$$

因  $m$  点电位比  $a$  点电位高及  $E_1 = 5\text{V}$ , 得

$$V_m = U_a + E_1 = 0 + 5 = 5\text{ (V)}$$

因  $n$  点电位比  $b$  点电位高及  $E_2 = 10\text{V}$ , 得

$$V_n = U_b + E_2 = 20 + 10 = 30\text{ (V)}$$

从而有

$$U_{mn} = U_m - U_n = 5 - 30 = -25\text{ (V)}$$

根据欧姆定律

$$R = \frac{U_{mn}}{I} = \frac{-25}{-1} = 25\text{ (}\Omega\text{)}$$

元件  $E_1$ : 电流和电压为非关联参考方向, 则有

$$p = ui = 5 \times (-1) = -5\text{ (W)} < 0\text{ (吸收功率)}$$

元件  $R$ : 电流和电压为关联参考方向, 则有

$$p = ui = (-25) \times (-1) = 25\text{ (W)} > 0\text{ (吸收功率)}$$

元件  $E_2$ : 电流和电压为关联参考方向, 则有

$$p = ui = 10 \times (-1) = -10\text{ (W)} < 0\text{ (发出功率)}$$

在判断电路中的元件是吸收或发出功率时, 首先采用公式  $p = ui$  进行计算, 然后根据电压和电流的参考方向是关联参考方向或非关联参考方向及  $p > 0$  或  $p < 0$  进行判断。

由式(1-4)得, 从  $t_0$  到  $t$  的时间内, 元件吸收或发出的能量为

$$W = \int_{t_0}^t p(t) dt = \int_{t_0}^t u(t) i(t) dt$$

能量的单位为 J (焦耳, 简称焦), 工程中常用 kWh (千瓦·时) 作为计量电能的单位,  $1\text{kWh} = 3.6 \times 10^6\text{J}$  (俗称 1 度电)。

### 1.3 电路的基本状态

电路使用过程中,在不同的工作条件下处于不同的状态,电路的基本状态有通路、开路和短路三种。

#### 1.3.1 通路

如图 1-9 所示,实际电源表示为电动势为  $E$  的理想电源与电阻  $R_0$  的串联组合,  $R_L$  表示负载电阻。

若开关  $S$  闭合,电路中就有了电流的流动,电路的这一状态称为通路。此时,电路中的电流为

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L} \quad (1-6)$$

电源的端电压为

$$U = E - IR_0 \quad (1-7)$$

因为电动势  $E$  和电阻  $R_0$  恒定不变,所以式 (1-7) 表明,电源的端电压等于电源的电动势与其内阻上电压降之差。

电源的端电压取决于电流的大小,与负载电阻有关。当电流  $I$  减小时,电源的端电压  $U$  将上升。如果式 (1-7) 用坐标曲线表示,纵坐标表示电源的端电压,横坐标表示电流,则称此曲线为电源的伏安特性曲线或电源的外特性曲线,如图 1-10 所示,可见电源的伏安特性曲线是一条向下倾斜的直线。

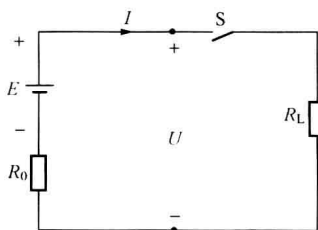


图 1-9 通路

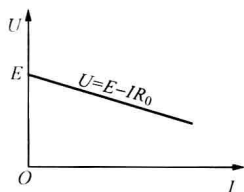


图 1-10 实际电源的伏安特性曲线

在式 (1-7) 两边同乘电流  $I$ , 得

$$\begin{aligned} UI &= EI - I^2 R_0 \\ \text{即 } P &= P_E - \Delta P \\ P_E &= P + \Delta P \\ P_E &= EI \\ P &= UI \\ \Delta P &= I^2 R_0 \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中:  $P_E$  为电源产生的功率;  $P$  为负载消耗 (或从电源取用) 的功率;  $\Delta P$  为电源内阻消耗的功率。

式 (1-8) 表明, 电源产生的全部功率一部分输送给负载, 另一部分消耗在内阻上。通路时, 电源的状态称为有载或负载状态。

实际的电路中, 电源的内阻和连接导线都有功率消耗, 这些能量被转换成热能散发到周