

普通高等教育“十二五”规划教材



电 路

DIANLU
(上册)

王培峰 主 编

- 知识够用，难度合理
- 注意衔接，循序渐进
- 重视实践，学以致用
- 配套齐全，易学易教



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材



电 路

DIANLU

(上册)

主 编 王培峰

副主编 段辉娟 朱玉冉

编 写 周芬萍 孟 尚

主 审 赵玲玲

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材，是根据教育部新颁布的电路理论基础课程和电路分析基础课程的教学基本要求，并结合目前教学实际编写的。全书共分6章，主要内容包括电路模型和电路定律、电阻电路的等效变换、线性电阻电路的一般分析、电路定理、相量法和正弦稳态电路及其分析。每章设有“教学目标及要求”“基本概念”“引入”等环节，注意与以前理论知识的衔接，循序渐进；章末配有典型的习题，供学生巩固所学知识。为了便于教学与自学，本书配有免费电子课件、电子教案及部分习题答案，凡是选本书作为教材的单位，均可登录 <http://jc.cepp.sgcc.com.cn> 注册下载。

本书可作为高等院校电气类、电子信息类及自动化类专业“电路”课程教材，也可作为高等职业院校及成人函授相关专业教材，还可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路. 上册/王培峰主编. —北京: 中国电力出版社, 2015. 2
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5123-6821-7

I. ①电… II. ①王… III. ①电路—高等学校—教材
IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 010533 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 2 月第一版 2015 年 2 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.75 印张 280 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

电类基础课教材编写小组

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 组 长 | 王培峰 | | | |
| 成 员 | 马献果 | 王计花 | 王冀超 | 吕文哲 |
| | 曲国明 | 朱玉冉 | 任文霞 | 刘红伟 |
| | 刘 磊 | 安兵菊 | 许 海 | 孙玉杰 |
| | 李翠英 | 宋利军 | 张凤凌 | 张会莉 |
| | 张成怀 | 张 敏 | 岳永哲 | 孟 尚 |
| | 周芬萍 | 赵玲玲 | 段辉娟 | 高观望 |
| | 高 妙 | 焦 阳 | 蔡明伟 | |

(以姓氏笔画为序)

序

电工、电子技术为计算机、电子、通信、电气、自动化、测控等众多应用技术的理论基础,同时涉及机械、材料、化工、环境工程、生物工程等众多相关学科。对于这样一个庞大的体系,不可能在学校将所有的知识都教给学生。以应用技术型本科学生为主体的大学教育,必须对学科体系进行必要的梳理。本系列教材就是试图搭建一个电类基础知识体系平台。

2013年1月,教育部为加快发展现代职业教育,建设现代职业教育体系,部署了应用技术大学改革试点战略研究项目,成立了“应用技术大学(学院)联盟”,其目的是探索“产学研一体、教学做合一”的应用型人才培养模式,促进地方本科高校转型发展。河北科技大学作为河北省首批加入“应用技术大学(学院)联盟”的高校,对电类专业基础课进行了试点改革,并根据教育部高等学校教学指导委员会制定的“专业规划和基本要求、学科发展和人才培养目标”,编写了本套教材。本套教材特色如下:

(1)教材的编写以教育部高等学校教学指导委员会制定的“专业规划和基本要求”为依据,以培养服务于地方经济的应用型人才为目标,系统整合教学改革成果,使教材体系趋于完善,教材结构完整,内容准确,理论阐述严谨。

(2)教材的知识体系和内容结构具有较强的逻辑性,利于培养学生的科学思维能力;根据教学内容、学时、教学大纲的要求,优化知识结构,既加强理论基础,也强化实践内容;理论阐述、实验内容和习题的选取都紧密联系实际,培养学生分析问题和解决问题的能力。

(3)课程体系整体设计,各课程知识点合理划分,前后衔接,避免各课程内容之间交叉重复,使学生能够在规定的课时数内,掌握必要的知识和技术。

(4)以主教材为核心,配套学习指导、实验指导书、多媒体课件,提供全面的教学解决方案,实现多角度、多层面的人才培养模式。

本套教材由王培峰任编写小组组长。主要包括电路(上、下册,王培峰主编)、模拟电子技术基础(张凤凌主编)、数字电子技术基础(高观望主编)、电路与电子技术基础(马献果等编)、电路学习指导书(上册,朱玉冉主编;下册,孟尚主编)、模拟电子技术学习指导书(张会莉主编)、数字电子技术课程学习辅导(任文霞主编)、电路与电子技术学习指导书(马献果等编)、电路实验教程(李翠英主编)、电子技术实验与课程设计(安兵菊主编)、电工与电子技术实验教程(刘红伟主编)等。

提高教学质量,深化教学改革,始终是高等学校的工作重点,需要所有关心高等教育事业人士的热心支持。为此谨向所有参与本系列教材建设的同仁致以衷心的感谢!

本套教材可能会存在一些不当之处,欢迎广大读者提出批评和建议,以促进教材的进一步完善。

电类基础课教材编写小组

2014年10月

前 言

为了适应教育教学改革的发展,培养高素质的人才,根据国家“十二五”规划教材建设的要求,编写了本书。

“电路”课程是电类各专业学生接触的第一门专业基础课。作为入门课程,应该使学生掌握进行科学研究最基本、最一般的方法。通过本课程的学习,学生不仅要掌握电路的基本理论,学会对电路进行分析计算,更重要的是提高分析问题、解决问题的能力。为此,本书在以下几个方面做了努力:

(1) 注重经典电路理论和近代电路理论的发展,注意保持电类专业的特色。随着教学改革的深入,“电路”课程的教学学时总体下降。因此,删繁就简是电路课程教学的发展趋势。在保持经典电路理论体系的同时,要求部分内容的解算过程从简,突出重点、明确思路。

(2) 突出应用。电路分析理论课程不仅理论严谨,而且具有广泛的实用性和工程应用性,所以,本书在重点章节设计了应用实例来讲述理论在实际中的应用,从而使学生了解电路分析理论是如何与实际应用紧密相连的。

(3) 为了便于学生更好地学习和把握“电路”课程的主要内容和重点,每一章均附有本章的“教学要求及目标”;在大部分节设置“基本概念”和“引入”模块,便于学生更好、更快地学习本课程。

(4) 为使学生深入掌握所学理论知识,提高学生科学的思维能力和分析计算能力,本书设置了丰富的例题,部分例题给出多种解法,并且每章附有习题,以提高学生分析和解决实际问题的能力。

(5) 为适应教学改革和目前课堂教学学时压缩的需要,本书在编写时,对电路分析的基本内容均给予系统和详细的讲解,既注重内容全面,又注意全书结构简单。在使用本书过程中,可以根据各个专业的不同需要,适当删减章节,加“*”内容是扩展内容,可根据教学实际酌情选讲。

本书建议授课学时为56学时,实验参考学时约为32学时。具体学时安排可依照各学校具体情况自主灵活地制订教学计划。

为配合本书教学,另外编写有《电路学习指导书》,可作为本书的教学和学习参考书。

本书由王培峰担任主编,段辉娟、朱玉冉担任副主编,参加编写的还有周芬萍、孟尚。具体编写分工如下:王培峰编写第1、2章,段辉娟编写第3章,朱玉冉编写第6章,周芬萍编写第5章,孟尚编写第4章。全书由王培峰负责编写提纲和统稿。

本书由赵玲玲精心审阅,并提出了宝贵意见,在此谨致以衷心的感谢。

编者在编写本书时,查阅和参考了众多文献资料,获得了许多教益和启发,也得到了许多老师的帮助,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,恳请读者提出宝贵意见,以便修改。

编 者

2014年8月

目 录

| | |
|----------------------------|----|
| 序 | |
| 前言 | |
| 0 绪论 | 1 |
| 0.1 电路理论的历史与发展概况 | 1 |
| 0.2 高等院校电路课程的地位和特点 | 4 |
| 1 电路模型和电路基本定律 | 5 |
| 1.1 电路和电路模型 | 5 |
| 1.2 电流、电压和电位 | 7 |
| 1.3 电功率和电能 | 10 |
| 1.4 电阻、电感和电容元件 | 12 |
| 1.5 独立源和受控源 | 17 |
| 1.6 基尔霍夫基本定律 | 21 |
| 1.7 实际应用举例——混合电池（超级电容器件） | 25 |
| 小结 | 25 |
| 习题 | 26 |
| 2 电阻电路的等效变换 | 28 |
| 2.1 等效变换的概念 | 28 |
| 2.2 电阻串并联及 $Y-\Delta$ 等效变换 | 30 |
| 2.3 电源的等效变换 | 38 |
| 2.4 无源单口网络的输入电阻 | 42 |
| 2.5 实际应用举例——直流电压表 | 44 |
| 小结 | 45 |
| 习题 | 46 |
| 3 线性电阻电路的一般分析 | 49 |
| 3.1 图的基本概念 | 49 |
| 3.2 独立的基尔霍夫定律方程 | 52 |
| 3.3 支路电流法和支路电压法 | 54 |
| 3.4 网孔电流法和回路电流法 | 56 |
| 3.5 节点电压法 | 61 |
| 3.6 实际应用举例——安全用电 | 67 |
| 小结 | 68 |
| 习题 | 70 |
| 4 电路定理 | 74 |
| 4.1 叠加定理和齐次定理 | 74 |

| | | |
|----------|---------------------|------------|
| 4.2 | 替代定理 | 79 |
| 4.3 | 戴维南定理、诺顿定理和最大功率传输定理 | 83 |
| * 4.4 | 特勒根定理 | 91 |
| * 4.5 | 互易定理 | 95 |
| * 4.6 | 对偶原理 | 98 |
| 4.7 | 实际应用举例——D/A 转换电路 | 100 |
| | 小结 | 102 |
| | 习题 | 104 |
| 5 | 相量法 | 108 |
| 5.1 | 复数 | 108 |
| 5.2 | 正弦量 | 113 |
| 5.3 | 相量法基础 | 119 |
| 5.4 | 电路定律的相量形式 | 123 |
| 5.5 | 实际应用举例——线圈等效参数的测量 | 129 |
| | 小结 | 130 |
| | 习题 | 131 |
| 6 | 正弦稳态电路及其分析 | 134 |
| 6.1 | 阻抗与导纳 | 134 |
| 6.2 | 正弦稳态电路的一般分析方法 | 145 |
| 6.3 | 正弦稳态电路的功率 | 150 |
| 6.4 | 正弦稳态电路的最大功率传输 | 157 |
| 6.5 | 串联谐振 | 160 |
| 6.6 | 并联谐振 | 167 |
| 6.7 | 实际应用举例 | 171 |
| | 小结 | 174 |
| | 习题 | 175 |
| | 参考文献 | 177 |

0 绪 论

0.1 电路理论的历史与发展概况

电路理论作为一门独立的学科已有 200 多年。在这纷纭变化的 200 多年里, 电路理论从用莱顿瓶和变阻器描述问题的原始概念和分析方法, 逐渐演变成为一门抽象化的基础理论学科。它不仅成为整个电气科学技术中不可缺少的理论基础, 而且在开拓和发展新的电气理论和技术方面起着重要的作用。

电路理论是一个极其美妙的领域, 在这一领域内, 数学、物理学、信息工程、电气工程与自动化等学科找到了一个和谐的结合点, 其深厚的理论基础和广泛的实际应用使其具有旺盛持久的生命力。因而, 对于许多相关的学科来说, 电路理论是一门非常重要的基础理论课。

1. “电路”的诞生与初期发展

电, 这个词来源于古希腊语“琥珀 (elektron)”, 琥珀是一种树脂化石。大约在公元前 600 年, 古希腊人第一次产生了电场, 其方法是用一块丝绸或毛皮与琥珀棒摩擦。后来, 科学家指出, 其他一些材料 (如玻璃、橡胶等) 也具有类似琥珀的特性。人们注意到, 有一些带电的材料被带电的玻璃片所吸引, 而另一些却被排斥, 这说明存在两种不同的电。本杰明·富兰克林称这两种电 (或电荷) 为正电和负电 (或正电荷和负电荷)。法国科学家查利·奥古斯丁·库仑和英国科学家卡文迪什在 18 世纪研究了这种靠摩擦产生的静电, 发现了这种电所遵循的规律, 称为库仑定律。1800 年, 意大利物理学家伏特发现: 当把两个不同的电极 (如锌和铜) 浸入电解液中, 就会产生电位差, 这就是电池的原理。后人采用伏特作为电压的单位, 以纪念这位杰出的科学家。1820 年, 奥斯特发现, 罗盘指针在载导体旁会发生偏转, 于是他断定: 电荷的流动产生了磁。这一发现揭开了电学理论的新的一页。1825 年, 安培提出了描述电流与磁之间关系的安培定律, 同时毕奥和沙伐尔也用实验表明了电流与磁场强度的关系。后人为纪念安培, 取其名作为电流的单位。1827 年, 德国物理学家欧姆在他的论文《用数学研究电路》中创立了欧姆定律。1831 年, 英国科学家法拉第经十年致力于互感的研究, 终于成功地证明: 如果贯穿线圈的磁链随时间发生变化, 则将在线圈中感应出电流。这个结论被称为法拉第电磁感应定律。同时他还发现, 电路中感应电动势的特性决定于与电路交链的磁通的大小及变化率。在电磁现象的理论与实用问题的研究上, 德国物理学家海因里希·楞次做出了巨大的贡献。1833 年, 他建立了确定感应电流方向的定则 (楞次定律) 后, 开始致力于电机理论的研究, 并提出了电机可逆性原理。1844 年, 楞次与英国物理学家焦耳分别独立地确定了电流热效应定律 (焦耳—楞次定律)。1834 年, 与楞次一道从事电磁现象研究工作的德国发明家雅可比制造出世界上第一台电动机。然而, 真正使电机工程得以飞跃发展的是三相系统的创始者俄罗斯工程师多里沃·多勃罗沃尔斯基, 他不仅发明和制造了三相异步电动机和三相变压器, 而且首先采用了三相输电线。法拉第发现电磁感应现象后, 就用“场”的一些初步但极为重要的概念来解释他的发现, 但令

人遗憾的是,由于法拉第不精通数学,因此未能从他的发现中进一步去建立电磁场理论,但自此电与磁的研究分别在“路”与“场”这两大密切相关的阵地上展开。

电磁场科学理论体系的创立要归功于伟大的物理学家、数学家麦克斯韦。1864年,麦克斯韦集前人之大成,创立了麦克斯韦方程组,以严格的数学形式描述了电与磁的内在联系,同时还发表了存在电磁波的伟大预言。他的理论和预言在1887年被赫兹用实验证明,从而开创了无线电及电子科学的新纪元。

德国物理学家基尔霍夫为电路理论奠定了基础。1847年,刚满23岁的大学生基尔霍夫发表了划时代论文——《关于研究电流线性分布所得到的方程的解》,文中提出了分析电路的第一定律(电流定律KCL)和第二定律(电压定律KVL),同时还确定了网孔回路分析法的原理。从电路理论发展进程及其所包含的内容来看,人们常把欧姆(1827年)和基尔霍夫(1847年)的贡献作为这门学科的起点。

从这个起点至20世纪50年代这一段时期被称为“经典电路理论发展阶段”;从20世纪60年代至70年代这一段时期,称为“近代电路理论发展阶段”;20世纪70年代以后的时期被称为“电路与系统理论发展阶段”。

2. 经典电路理论发展阶段

经典电路理论发展阶段历经约100年,在这100年中,除了前面提到的欧姆和基尔霍夫的贡献之外,重要的成果还有:1832年,亨利发现了自感现象;1843年,惠斯通发明了惠斯通电桥;1853年,亥姆霍兹首先使用等效电源定理分析电路,但这个定理直到1883年才由戴维南正式提出并发表,因此后人称其为戴维南定理;1873年,麦克斯韦在他的巨著*Treatise on Electricity and Magnetism*(这是电气科学技术史上的第一部专著)中确立了节点分析法原理;1894年,斯坦梅茨将复数理论应用于电路计算;1899年,肯内利解决了Y- Δ 变换;1904年,拉塞尔提出了对偶原理;1911年,海维赛德提出了阻抗概念,从而建立起正弦稳态交流电路的分析方法;1918年,福特斯库提出了三相对称分量法,同年巴尔的摩提出了电气滤波器概念;1920年,瓦格纳发明了实际的滤波器,同年坎贝尔提出了理想变压器概念;1921年,布里辛格提出了四端网络及黑箱概念;1924年,福斯特提出了电抗定理;1926年,卡夫穆勒提出了瞬态响应概念;1933年,诺顿提出了戴维南定理的对偶形式——诺顿定理;1948年,特勒根提出了回转器理论,回转器于1964年由施诺依用晶体管首次实现;特勒根还于1952年确立了电路理论中除了KCL和KVL之外的另一个基本定理——特勒根定理。以上这些重要的成果基本组成了经典电路理论的实体。

20世纪30年代以后,还有不少人在电路学科的发展过程中做出重大贡献,特别是吉耶曼和考尔等。他们在20世纪30年代的著作对建立电路理论这门独立的学科起着奠基的作用,在20世纪40年代和50年代的著作被认为是这门学科发展史上的重要里程碑。1953年,麻省理工学院的吉耶曼教授发表了其重要著作*Introductory Circuit Theory*,书中引入网络图论的基本原理来系统列写电路分析方程,对电路进行时域和频域分析,着重强调时间响应、自然频率、阻抗函数特性和零点、极点的概念及网络综合理论等。全书虽然主要限于对线性、时不变、双向和无源元件及其所构成的集中参数电路进行论述,但这正反映了经典电路理论阶段的主体内容。因此可以说,吉耶曼的著作是对20世纪50年代之前电路理论发展中较为成熟的主流方面所做的一个很好的总结和概括。

3. 近代电路理论发展阶段

第二次世界大战后,电力系统、通信系统和控制系统的研究及应用都取得了巨大的进展,尤其是后两者的进展更为迅速。控制技术和通信技术从实际应用逐步上升为新的理论体系——“控制论”和“信息论”。与此同时,半导体电子学和微电子学、数字计算机、激光技术及核科学和航天技术等新兴尖端技术也以惊人的速度发展,使得在整个电气工程领域从20世纪50年代末期开始了“电子革命”和“计算机革命”。所有这些促使电路理论从20世纪60年代起不得不在内容和概念上进行不断的调整和革新,以适应科学技术“爆炸”的新时代,于是就形成了近代电路理论。这一阶段大致具有如下特征:

(1) 在时域分析方面,引用了施瓦兹《分布理论》著作中的成果,严格提出了电路冲击响应的概念。同时,继将全响应分解为稳态分量和瞬态分量之后,又将全响应分解为零状态响应和零输入响应。在此基础上导出了卷积积分,阐明了电路在任意波形输入下的响应。在频域分析方面,引入了信号分析的相应研究,并且进一步运用和扩展了傅里叶分析,通过现代科学分析中非常重要的工具——卷积定理,将电路的时域和频域的关系紧密结合。这样一来,整个网络分析的面目为之一新。

(2) 在电路理论研究方面,系统地应用拓扑学特别是一维拓扑学的成果,这不仅极大地丰富了电路理论的内容,提高了其理论水平,还为电路的计算机辅助分析和设计提供了坚实的理论基础。

(3) 将动力学体系与电路理论相结合,引出了电路的状态、状态变量和状态空间的概念。状态方程的建立与输入—输出方程的建立具有同等重要的意义,而“状态”概念的应用为解决非线性电路和时变电路问题给出了新的途径。

(4) 在电路的激励和信号研究方面,除了考虑连续时间信号外,还必须考虑离散和干扰下的随机信号。于是,在数学工具上就由拉普拉斯变换发展到Z变换,由微分方程发展到差分方程。

(5) 近代电路理论站在集合论的高度,把电路看成是特定拓扑结构的支路集和节点集,从而应用空间的概念,借助于矩阵和张量的工具对基尔霍夫定律进行描述,这为古典的基尔霍夫定律注入了新的活力。

(6) 在计算方法方面,采用了“系统的步骤”,以此与计算机的辅助分析方法相适应,使昔日难以入手的多端网络问题、时变网络及非线性网络问题变得易于解决。

近代电路理论从20世纪60年代开始,至70年代已形成,这十几年的进展相当于过去的几十年,这种高速度的发展是在社会生产力急剧发展的推动之下产生的,其发展的结果是社会生产中的电气化、自动化和智能化水平迅速提高。

4. 电路与系统理论发展阶段

在近代电路理论向前发展的同时,20世纪60~70年代首先在自然科学和技术的领域内形成了严谨而完整的“系统”概念,随后“系统理论”成为受到普遍重视的研究领域。其实,系统理论是起源于电路理论的。最初,人们在对电力系统和通信系统进行分析设计时,不仅需要从微观方面仔细地研究、发展和更新构成系统的每个部件和元件,还需要从宏观出发,在整体上研究系统结构的合理性、可靠性和稳定性等,这就自然而然地使某些系统理论的原始概念和方法伴随着电路理论的发展和深化而诞生。如今,系统理论已成为独立于其他学科的一门高度抽象概括且被广泛应用的基础理论,是各科学技术领域所共有的理论财富。

然而,对于电路理论及其工作者,是无法撇开系统概念去单独研究电路的,因为电路本身就是一个系统。但是系统又不能与电路完全等同,系统比电路更具有一般性,而电路比系统更具有典型性。电路所考虑的是元件的拓扑、参数,电路的物理量及电路的内在电气结构;而系统所考虑的是从输入到输出的整体性能及其外在的物理行为。电路理论与系统理论相结合,可以把系统理论的概括性和抽象方法用于电路,使电路理论的研究站得更高;也可以把电路理论的精确性和计算方法用于各种非电系统,使系统问题的研究更加切实。正是由于电路理论与系统理论在研究问题的科学思想上相互渗透、相互馈递,在研究问题的方法上又相互协调和相互统一,因此在20世纪70年代,科学界正式提出了建立概念体系更扩展的“电路与系统”(CAS)学科。这一举动是由学科的内在发展规律所决定的。事实证明,这一结合不仅保持了系统理论与电路理论的根源关系,使电路理论焕发出青春活力,使系统理论进一步得到发展,同时互相结合而发挥出来的无比强大的创造力更是引人瞩目。

综上所述,电路理论的发展分为经典电路理论、近代电路理论和电路与系统理论这三个主要历史阶段。其中近代电路理论不仅是经典电路理论的继续、扩展和更新,也是电路与系统学科中一部分非常重要的基础理论。目前,我们正处于电路与系统理论不断向前发展的时期,电路与系统学科的主攻方向可分为与“电”直接有关的电路理论及其工程应用、概括的系统科学及其应用两个方面。这两个方面所研究的内容极其广泛,但就目前来看,电路与系统学科更多偏重于研究和探索这些理论在工程应用中的新问题,因此,它是属于电气科学技术基础理论范畴内的一门学科。从现状展望未来,就会发现,电路理论已成为现代科学技术基础理论中一门十分活跃、举足轻重且具有广阔发展前景的学科。

0.2 高等院校电路课程的地位和特点

1. 课程地位

“电路”课程是高等院校工科电气信息类专业学生必修的第一门专业基础课,是后续专业基础课和专业课的基础;同时也是电类专业学生知识结构重要的组成部分,在人才培养中起着十分重要的作用。因此,学好本课程对今后的学习与工作具有非常重要的意义。

本课程以高等数学为工具,在大学物理课电学知识的基础上,以直流、交流稳态及暂态电路为主要研究对象,通过对电路系统建立物理模型和列写数学方程式的方式,进行电路分析与计算。

2. 课程特点

“电路”课程是一门研究电路理论的基础课程,以电路分析为主,探讨电路的基本概念、基本定理和定律,并讨论各种计算方法。它是电类专业的一门重要的技术基础课,课程理论严谨、逻辑性强,对培养和提高学生的辩证抽象思维能力和严肃认真的科学作风,树立理论联系实际的工作观点和提高学生分析问题、解决问题的能力,以及加强基本技能训练等方面均起着重要的作用。

1 电路模型和电路基本定律

随着科学技术的飞速发展,现代电工电子设备的种类日益繁多,其规模和结构日新月异。但无论怎样设计和制造,大多数电工电子设备均是由各种基本电路组成的。所以,学习电路的基础知识,掌握分析电路的规律与方法,是学习电路的重要内容,也是进一步学习电机、电器和电子技术的基础。本章重点介绍有关电路的基本概念、基本元件及其特性和电路基本定律。

【教学要求及目标】

| 知识要点 | 目标与要求 | 相关知识 | 掌握程度评价 |
|------------|-------|----------------|--------|
| 电路及其模型 | 理解 | 电源、负载 | |
| 电流、电压的参考方向 | 理解和掌握 | 微分、实际方向、代数量 | |
| 电功率 | 熟练掌握 | 电场力做功的特点 | |
| 电路基本元件及其特性 | 熟练掌握 | 欧姆定律、法拉第电磁感应定律 | |
| 基尔霍夫定律 | 熟练掌握 | 电荷守恒定律、能量守恒定律 | |

1.1 电路和电路模型

【基本概念】

电源: 能够提供电能的装置,就是电源。例如,干电池、蓄电池、发电机等都是电源。

负载: 电动机能把电能转换为机械能,电阻能把电能转换为热能,电灯泡能把电能转换成热能和光能,扬声器能把电能转换成声能。电动机、电阻、电灯泡、扬声器等都是负载。负载是将电能转换为其他形式能的用电设备。

【引入】

在日常生活中使用的手电筒就是一种简单的电路(见图1-1)。干电池是电源,灯泡是负载,闭合开关,干电池向灯泡供电,灯泡发亮,电能转换为光能和热能。由此可见,电源(干电池)和负载(灯泡)是电路的两个重要的组成部分,电路还包括金属连片(导线)、开关等中间环节。

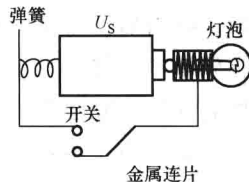


图1-1 手电筒照明实际电路

1.1.1 电路

1. 电路及其组成

简单地讲,电路是电流通过的路径。实际电路通常由各种电路实体部件(如电源、电阻器、电感线圈、电容器、变压器、仪表、二极管、晶体管等)组成。每一种电路实体部件具

有各自不同的电磁特性和功能。按照人们不同的需要,把相关电路实体部件按一定方式进行组合,就构成了一个个电路。某个电路元器件数量很多且电路结构较为复杂,通常把这些电路称为电网络。

手电筒照明电路、单个照明灯电路等是实际应用中较为简单的电路,而电动机电路、雷达导航设备电路、计算机电路、电视机电路等则是较为复杂的电路。但无论简单还是复杂,电路的基本组成部分都离不开三个基本环节:电源、负载和中间环节。

电源是向电路提供电能的装置。它可以将其其他形式的能量(如化学能、热能、机械能、原子能等)转换为电能。在电路中,电源是激励,是激发和产生电流的因素。负载是取用电能的装置,其作用是将电能转换为其他形式的能量(如机械能、热能、光能等)。在生产与生活中经常用到的电灯、电动机、电炉、扬声器等用电设备,都是电路中的负载。中间环节在电路中起着传递电能、分配电能和控制整个电路的作用。最简单的中间环节即开关和连接导线,一个实用电路的中间环节通常还有一些保护和检测装置。复杂的中间环节可以由许多电路元件组成的网络系统。

图 1-1 所示的手电筒照明电路中,干电池作为电源,灯泡作为负载,金属连片和开关作为中间环节将灯泡和电池连接起来。

2. 电路的种类及功能

工程应用中的实际电路,按照其功能的不同可概括为两大类。一类是完成能量的传输、

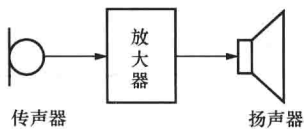


图 1-2 扩音器电路

分配和转换的电路。如图 1-1 中,干电池通过金属连片将电能传递给灯泡,灯泡将电能转化为光能和热能。这类电路的特点是大功率、大电流。另一类是实现对电信号的传递、变换、储存和处理的电路。如图 1-2 所示的扩音器电路,其工作过程可

描述为:传声器将声音的振动信号转换为电信号,即相应的电压和电流,经过放大器放大处理后,通过电路传递给扬声器,再由扬声器还原为声音。这类电路特点是小功率、小电流。

1.1.2 电路模型

实际电路的电磁过程是相当复杂的,难以进行有效的分析计算。在电路理论中,为了便于对实际电路进行分析和计算,通常在工程实际允许的条件下对实际电路进行模型化处理,即忽略次要因素,抓住足以反映其主要电磁特性,抽象出实际电路器件的“电路模型”。

例如,电阻器、灯泡、电炉等,这些电气设备接受电能并将电能转换为光能或热能,光能和热能显然不可能再回到电路中,因此把这种在能量转换过程不可逆的电磁特性称为耗能。这些电气设备除了具有耗能电特性之外,当然还有一些其他电磁特性,但在研究和分析时,即使忽略其他电磁特性,也不会影响整个电路的分析计算结果。因此,可以用一个只具有耗能电特性的“电阻元件”作为电路模型。

将实际电路器件理想化而得到的、只具有某种单一电磁性质的元件,称为理想电路元件,简称电路元件。一种电路元件体现某种基本现象,具有某种确定的电磁性质和精确的数学定义。常用的有表示将电能转换为热能的电阻元件、表示电场性质的电容元件、表示磁场性质的电感元件及电压源元件和电流源元件等。理想电路元件的图形符号如图 1-3 所示。本章后面将分别讲解这些常用的电路元件。

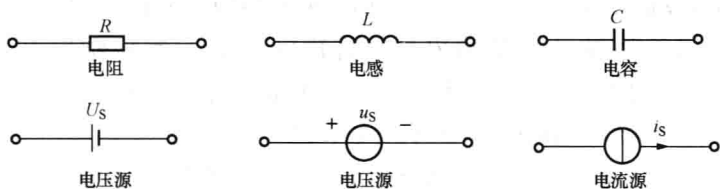


图 1-3 理想电路元件的图形符号

由理想电路元件相互连接组成的电路称为电路模型。例如，在图 1-1 所示的电路中，干电池对外提供电压的同时，内部电阻也消耗电能，所以干电池用电源电压 U_S 与内阻 R_S 的串联来表示；灯泡除了具有消耗电能的性质（电阻性）之外，通电时还会产生磁场，具有电感性。但电感微弱，可忽略不计，于是可认为灯泡是理想电阻元件，用 R_L 表示。图 1-4 所示为图 1-1 所示电路的电路模型。

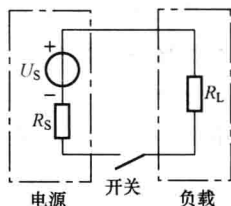


图 1-4 手电筒电路的电路模型

1.2 电流、电压和电位

【基本概念】

电荷：带正、负电的基本粒子称为电荷，其中带正电的粒子称为正电荷，带负电的粒子称为负电荷。带电是某些基本粒子的属性，它使基本粒子互相吸引或排斥。物质原子中，电子带负电，质子带正电。

微分：在数学中，微分是对函数局部变化率的一种线性描述。微分可以近似地描述为当函数自变量的取值做足够小的改变时，函数值是怎样改变的。例如，电荷 q 的变化量 Δq 趋于无穷小时，则记作微元 dq ，即 $dq = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \Delta q$ 。

导数：导数是微积分学中重要的基本概念，一个函数在某一点的导数，描述了这个函数在这一点附近的变化率。例如，在运动学中，物体的位移对于时间的导数就是物体的瞬时速度，即 $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$ 。

【引入】

荧光灯中的电压总是相线（俗称“火线”）高于中性线（俗称“零线”）吗？电流总是从相线流入灯管，从灯管流入中性线吗？为了弄清楚这些问题，我们需要从电路基本物理量的概念入手。电路中的基本物理量是电流和电压。无论是电能的传输和转换，还是信号的传递和处理，都是这两个量变化的结果。因此，弄清楚电流与电压及其方向，对进一步掌握电路的分析与计算是十分重要的。

1.2.1 电流及其参考方向

1. 电流

电荷的定向移动形成电流。电流的大小用电流强度来衡量，电流强度也简称电流。其定义为单位时间内通过导体横截面的电荷量，用公式表示为

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

式中, i 为随时间变化的电流, dq 为在 dt 时间内通过导体横截面的电荷量。

在国际单位制中, 电流的单位为安培, 简称安 (A)。实际应用中, 大电流用千安 (kA) 表示, 小电流用毫安 (mA) 或微安 (μA) 表示。它们的换算关系为

$$1\text{kA} = 10^3\text{A} = 10^6\text{mA} = 10^9\mu\text{A}$$

在外电场的作用下, 正电荷沿着电场方向运动, 而负电荷逆着电场方向运动 (在金属导体内, 自由电子在电场力的作用下定向移动形成电流), 习惯上规定: 正电荷运动的方向为电流的实际方向。

电流有交流和直流之分: 大小和方向都随时间变化的电流称为交流电流, 方向不随时间变化的电流称为直流电流, 大小和方向都不随时间变化的电流称为稳恒直流。

2. 电流的参考方向

简单电路中, 电流从电源正极流出, 经过负载, 回到电源负极。在分析复杂电路时, 一

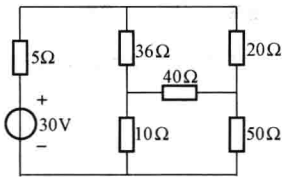


图 1-5 桥式电路

般难于事先判断出电流的实际方向。例如, 在图 1-5 所示的桥式电路中, 流过 40Ω 负载电阻的实际电流方向难以确定, 而列方程、进行定量计算时需要为电流约定方向。对于交流电流, 其方向随时间改变, 更无法用一个固定的方向表示, 因此引入电流的参考方向, 也称为正方向。

参考方向可以任意设定, 如用一个箭头表示某电流的假定正方向, 就称为该电流的参考方向。当电流的实际方向与参考方向一致时, 电流的数值就为正值 ($i > 0$), 如图 1-6 (a) 所示; 当电流的实际方向与参考方向相反时, 电流的数值就为负值 ($i < 0$), 如图 1-6 (b) 所示。需要注意的是, 未规定电流的参考方向时, 电流的正负没有任何意义, 如图 1-6 (c) 所示。

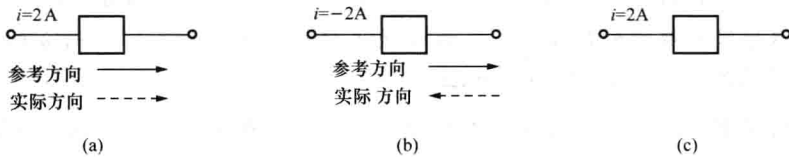


图 1-6 电流参考方向的表示方法

1.2.2 电压及其参考方向

1. 电压

在图 1-7 所示的闭合电路中, 在电场力的作用下, 正电荷要从电源正极 a 经过导线和负载流向负极 b (实际上是带负电的电子由负极 b 经负载流向正极 a), 形成电流, 而电场力就对电荷做了功。

电场力将单位正电荷从 a 点经外电路 (电源以外的电路) 移到 b 点所做的功, 称为 a 、 b 两点之间的电压, 记作 U_{ab} 。因此, 电压是衡量电场力做功本领大小的物理量。

若电场力将正电荷 dq 从 a 点经外电路移到 b 点所做的功是 $d\omega$, 则 a 、 b 两点间的电压为

$$u_{ab} = \frac{d\omega}{dq} \quad (1-2)$$

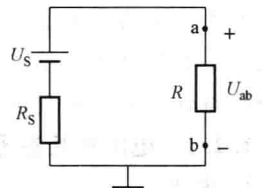


图 1-7 定义电压示意图

在国际制单位中,电压的单位为伏特,简称伏(V)。实际应用中,大电压用千伏(kV)表示,小电压用毫伏(mV)或者微伏(μV)表示。它们的换算关系为

$$1\text{kV} = 10^3\text{V} = 10^6\text{mV} = 10^9\mu\text{V}$$

电压的实际方向规定为从高电位指向低电位,在电路图中可用箭头来表示。

2. 电压的参考方向

在比较复杂的电路中,往往不能事先知道电路中任意两点间的电压。为了分析和计算方便,与电流的参考方向规定类似,在分析计算电路之前,必须对电压标以极性[见图1-8(a)],或用箭头表示电压降落的方向[见图1-8(b)]。如果采用双下标标记时,电压的参考方向意味着从第一个下标指向第二个下标。例如图1-8中元件两端电压记作 u_{ab} 。若电压参考方向选择为由b点指向a点,则应写成 u_{ba} ,两者仅差一个负号,即 $u_{ab} = -u_{ba}$ 。



图1-8 电压参考方向的表示方法

分析和求解电路时,先按选定的电压参考方向进行分析、计算,再由计算结果中电压值的正负,来判断电压的实际方向与任意选定的电压参考方向是否一致,即若电压值为正,则实际方向与参考方向相同;若电压值为负,则实际方向与参考方向相反。

1.2.3 电位及其计算

为了方便分析问题,常在电路中指定一点作为参考点,假定该点的电位是零,用符号“上”表示,如图1-7所示。在生产实践中,常把地球作为零电位点,凡是机壳接地的设备,机壳电位即为零电位。有些设备或装置,机壳并不接地,而是把许多元件的公共点作为零电位点。

电路中其他各点相对于参考点的电压即各点的电位,因此,任意两点间的电压等于这两点的电位之差,可以用电位的高低来衡量电路中某点电势能的大小。

电路中各点电位的高低是相对的。参考点不同,各点电位的高低也不同,但是电路中任意两点之间的电压与参考点的选择无关。电路中凡是比参考点电位高的点是正电位,比参考点电位低的点是负电位。

【例1-1】 求图1-9所示电路中a点的电位。



图1-9 例1-1电路

解 对于图1-9(a),有

$$V_a = -4 + \frac{30}{50 + 30} \times (12 + 4) = 2\text{V}$$

对于图1-9(b),因 20Ω 电阻中电流为0,故

$$V_a = 0$$

【例1-2】 电路如图1-10所示,分别求开关S断开和闭合时A、B两点的电位 V_A 、 V_B 。