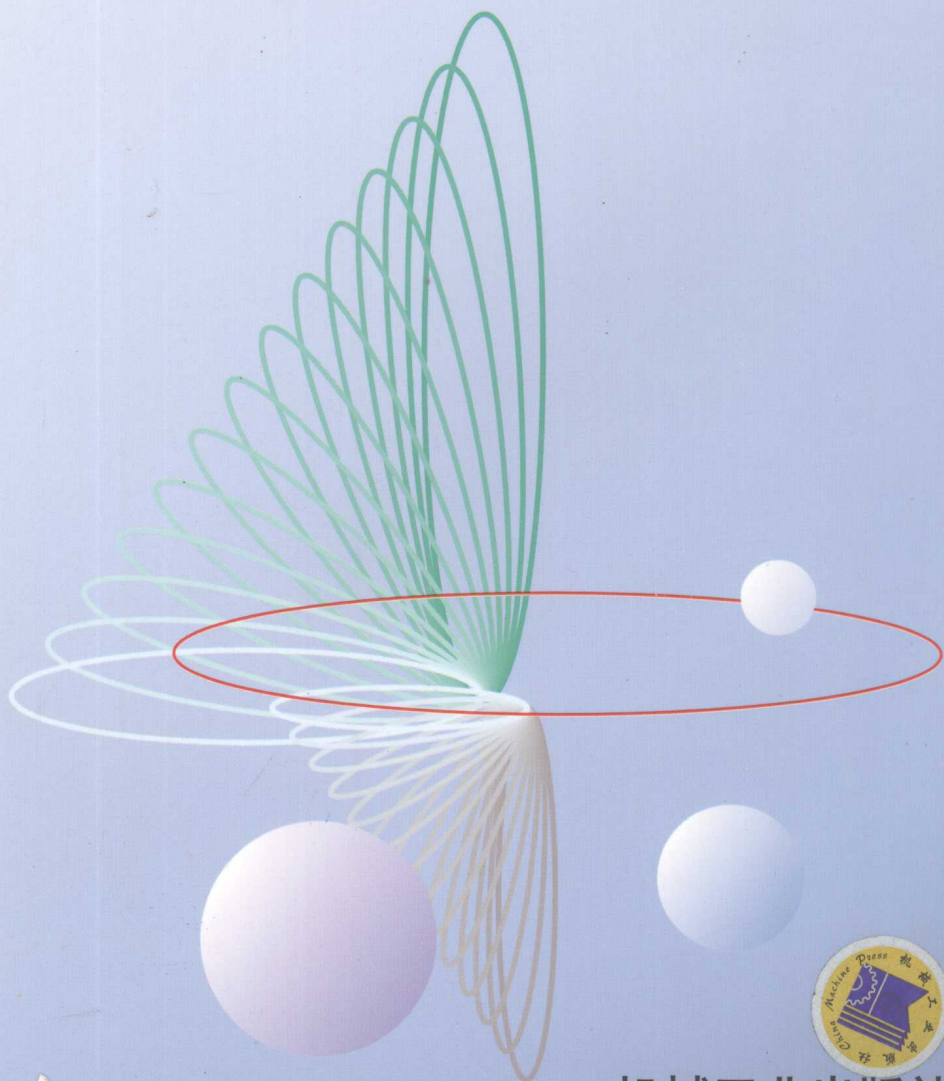


职业技术教育机电类规划教材

电工学

职业技术教育教材编委会电工学科组 组编
丁承浩 主编



机械工业出版社

2433

本书是根据原机械工业部教育司 1997 年 6 月颁发的中等专业学校非电专业“电工学”课程教学大纲编写的机电类“九五”规划教材。全书分为直流电路、正弦交流电路、三相交流电路、磁路与变压器、电动机、常用低压电器和继电—接触器控制线路、供电与用电等七章。本书内容新颖、深浅适度，文字简洁、流畅，注重工程应用。适用于职业技术学院、普通中专、职业高中、成人中专等工科非电类专业学生使用，也可供工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工学/丁承浩主编；职业技术教育教材编委会电工学科组组编. - 北京：机械工业出版社，1999.7
职业技术院校规划教材
ISBN 7-111-07131-X

I. 电… II. ① 丁… ② 机… III. 电工学 - 专业学校 - 教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 18395 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑：于 宁 刘 辉 版式设计：冉晓华 责任校对：孙志筠
封面设计：姚 毅 责任印制：杨 曦
北京蓝海印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行
2005 年 7 月第 1 版第 6 次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·13 印张·314 千字
定价：17.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68326294
封面无防伪标均为盗版

前 言

本套教材是原机械工业部中专基础课教学指导委员会电工学科组 1996 年 10 月在福建高级工业专门学校召开的会议上决定组织编写的,分为《电工学》、《工业电子学》两本书出版。1998 年 1 月编写组成员及学科组全体老师在常州机械学校召开的会议上讨论通过了由两位主编提出的编写大纲。1998 年 10 月在湖南工业职业技术学院完成了全书初稿的审查,并决定 1999 年秋季作为“九五”规划教材出版。

本教材内容及学时安排主要是根据原机械工业部教育司 1996 年 3 月制定的中专教学计划中“电工学与工业电子学教学大纲”编写的。可作为工科中等专业学校四年制教育“机械制造”,“数控机床加工”,“机电技术应用”,“模具设计与制造”,“汽车制造与维修”,“机械设备维修与管理”,“铸造专业”,“金属热处理”,“焊接专业”等机械类专业的“电工学”、“工业电子学”课程教材使用,也可供其他行业的中专、职专机械类专业作为教材选用。

“电工学”作为一门重要的技术基础课,其任务是使学生具有初级工程技术人员必备的分析基础电路的能力;具有选择和使用电动机、低压电器及有关电气控制线路的能力;具有定性分析基本控制线路及安装、维修简单电气控制线路的能力。通过本课程的学习应使学生了解“电工学”在机械类各专业中的地位 and 重要性,使学生能适应 21 世纪新技术、新工艺发展的需要,并能形成一定的相关专业自学能力。

为兼顾本教材对不同专业、不同地区的需要,理论部分保留了叠加定理、功率因数提高等内容;应用部分保留了电力变压器的内容,同时增加了特殊变压器、控制电机、家用电器控制线路等可供选讲的内容。全书计划总学时为 72 学时,不同专业可作内容上必要的取舍,其学时可适当减少。

全书中压缩、兼并和取消了一部分比较陈旧的内容,对传统内容作了精选,保证了必需的常用基础知识。全书中编写的指导思想是强调淡化理论教学,注重应用,注重学生实践能力的培养。为此,书中在原理分析时以定性为主,辅以必要的定量计算。为压缩篇幅精减内容,凡物理课中详细讲授过的电学内容本书只做必要的复习和从应用技术角度上的提高。凡本教材引入的定理均不作严格的证明,公式及重要结论只作必要的简单推导,把重点篇幅放在讲清它们的物理意义、应用条件、相应单位的定义上,以简单的针对性例题概括解决问题的思路、说明应用方法及应注意的问题。

本教材在内容安排上力图做到与新体系、新技术、新产品、新工艺接轨,为此增加了“直流作用下的电感与电容”一节,并介绍了诸如干式变压器、控制电机、国产单相电机的比较,常用家电控制线路等较新的内容。交流电路一章经反复斟酌决定不再引入旋转矢量表示法,而在介绍了交流电的三要素后,引入复数(相量)的概念,只讲清复数(相量)与正弦量的对应关系,并以相量的指数表达式直接过渡到相量图,以解决正弦量的计算问题。这样做的根据是现行中专数学教学计划和教材均安排了复数这一部分内容,本教材希望借助于数学的方法和结论以达到电工教学中事半功倍的效果,我们认为这样安排不一定增加了教材的深度。

IV

带星号的章节为选学内容。本教材全部图形符号、文字符号、电路画法及标注方法均严格按照中国标准出版社 1989 年 2 月版的《电气制图及图形符号国家标准汇编》中的要求执行。

本教材第一、二、三章由天津市机电工业学校丁承浩老师编写；第四、七章由山东省机械工业学校曲怀敬老师编写；第五章由河北省机电学校王占元老师编写；第六章由常州机械学校张平泽老师编写；丁承浩老师担任主编，王占元老师担任副主编。本教材由北京市仪器仪表工业学校蒋湘若老师担任主审；江苏常州机械学校田名义老师担任副主审。天津市机电工业学校郎素萍老师协助审校前三章。

在本书编写过程中承蒙福建高级工业专门学校、常州机械学校、湖南工业职业技术学院和广东顺德工业中专学校热情、周到地安排了有关的会议，在此表示感谢。本教材组稿过程中天津市机电工业学校徐红英、耿肃二位老师协助绘制了部分插图，整理和校对了全部文稿与插图，在此一并表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限，本教材可能存在不妥和错误之处，恳切希望兄弟学校师生批评指正。

编 者

目 录

前言

绪论 1

第一章 直流电路 4

第一节 电路与电路模型 4

第二节 电路的基本物理量及其参考方向 5

第三节 欧姆定律、电阻的伏安特性 8

第四节 电路的有载工作状态、开路与 短路 10

第五节 电阻的联接、等效电阻 13

第六节 电路中电位的计算 17

第七节 基尔霍夫定律及其应用 19

第八节 电压源、电流源及其等效变换 23

第九节 叠加定理 27

第十节 戴维南定理 30

第十一节 直流作用下的电感与电容 32

思考题与习题 38

第二章 正弦交流电路 43

第一节 概述 43

第二节 正弦交流电的三要素 45

第三节 正弦量的相量表示法 49

第四节 同频率的正弦量相加减 52

第五节 理想电阻元件交流电路 54

第六节 理想电感元件交流电路 56

第七节 理想电容元件交流电路 59

第八节 电阻、电感、电容元件串联的交流 电路 61

第九节 电感性负载与电容并联的交流 电路 67

第十节 提高功率因数的重要意义 71

思考题与习题 75

第三章 三相交流电路 79

第一节 概述 79

第二节 三相电源绕组的联结 80

第三节 三相负载的星形联结 82

第四节 三相负载的三角形联结 87

第五节 三相功率 90

思考题与习题 91

第四章 磁路与变压器 93

第一节 磁场的基本物理量 93

第二节 铁磁材料的磁性能 94

第三节 磁路与磁路欧姆定律 97

第四节 变压器的用途与基本结构 99

第五节 单相变压器的空载与负载运行 101

第六节 三相变压器及其铭牌 107

* 第七节 特殊变压器 109

思考题与习题 113

第五章 电动机 115

第一节 直流电动机的工作原理、结构及 分类 115

第二节 直流电动机的使用 119

第三节 三相异步电动机的基本结构 121

第四节 三相异步电动机的工作原理 124

第五节 三相异步电动机的电磁转矩和 机械特性 128

第六节 三相异步电动机的起动 132

第七节 三相异步电动机的调速、反转和 制动 136

第八节 三相异步电动机的铭牌与选择 138

第九节 单相异步电动机 142

* 第十节 常见的控制电机 145

思考题与习题 149

第六章 低压电器与继电—接触器控制

线路 151

第一节 常用低压电器 151

第二节 笼形异步电动机的起动、正反转 控制 160

第三节 笼形异步电动机的多地控制与 联锁控制 163

第四节 行程控制 165

第五节 时间控制 168

第六节 速度控制与压力控制 171

* 第七节 常用生产机械控制线路 174

* 第八节 家电控制线路 179

思考题与习题 183

第七章 供电与用电	188
第一节 电能的产生、输送与分配	188
第二节 安全用电	189
第三节 节约用电	193

思考题与习题	194
附录 习题参考答案	196
参考文献	201

绪 论

一、电工技术的历史、现状与发展

在物理学的各个领域，电学是年轻而又发展非常迅速的学科。从电学成为一门定量的科学到现在不过只有近二百年历史，但它的发展却是惊人的，电学的发展极大地提高了社会生产力，提高了人类的生活质量，加速了现代文明的发展。

电和磁总是相互联系在一起的，我国早在 11 世纪北宋时代就发明了指南针，并将其应用于航海，且发现了磁偏角。直到 12 世纪指南针才由阿拉伯人传入欧洲。

18 世纪末到 19 世纪初，由于生产发展的需要，电磁现象方面的研究得到了很快的发展。1785 年法国科学家库仑从实验中确定了电荷间的相互作用力的定量关系，从此电学才真正成为一门新兴的科学。1820 年丹麦科学家奥斯特发现了电流对磁针有力的作用，揭开了电与磁关系的奥秘，同年法国物理学家安培确定了通有电流的线圈的作用与磁铁相似，发表了安培定律，指出了磁现象的本质。1831 年英国自学成才的科学家法拉第在他 40 岁时发表了著名的电磁感应定律，对电磁现象的研究作出了特殊的贡献，为电工技术奠定了重要的理论基础。与此同时俄国物理学家楞次在 1833 年建立了确定感应电流方向的定则，在电磁现象的理论与实际结合上取得了重大突破，他致力于电机理论的研究，首次阐明了电机的可逆性原理，并与英国的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的俄国物理学家雅可比制造出世界上第一台电动机，从而证明了实际应用电能的可能性。电机工程之所以能飞跃地发展为现实生产力是与俄罗斯工程师多里沃—东勃罗夫斯基的辛勤工作分不开的，他是三相系统的创始人，并发明和制造出三相电动机和三相变压器，首先实现了三相制输送电能。

在同一时期两位德国科学家对电路的理论与实际计算分析作出了重要贡献。1827 年欧姆首先提出了稳恒电流电路中，电流、电压与电阻间的定量依存关系。1847 年基尔霍夫发表了两个电路定律，发展了欧姆定律，为复杂电路的分析计算提供了有力的理论依据。

1873 年在前人辛勤研究的基础上英国物理学家麦克斯韦建立了电磁场的基本教学方程，发表了著名的“麦克斯韦方程组”。他从理论上预测到电磁波的存在，为无线电技术的发展完成了理论基础。1887 年德国科学家赫兹首先发表了电磁波的发生和接收的实验论文，证实了麦克斯韦的理论。七年后意大利人马可尼和俄罗斯人波波夫彼此独立地分别成功进行了无线电通信试验，为现代通信事业开辟了道路。

在电工技术发展的推动下，电子科学技术在生产斗争和科学实验中迅速地成为一种重要的新兴产业。1883 年美国发明家爱迪生发现了热电子效应，1904 年弗莱明利用这个效应制成了电子二极管，并被应用于无线电检波。1906 年美国入德弗雷斯发明了电子三极管，从而建立了早期的电子技术体系。半个多世纪以来电子管在电子技术与电子产业的发展中作出了历史的重要贡献；但它的缺点也是明显的，其体积大，耗电多，制造工艺繁，成本高。1948 年美国著名的贝尔实验室发明了晶体管，随着微电子技术的发展晶体管逐渐解决了工作不稳定、功率不够大等先天性缺点，以它的体积小，成本低，耗电少，很容易做到集成化

等突出优点取代了电子管成为现代工业和人类生活的重要支柱之一。

集成电路 1958 年出现在电子制造业中，并被迅速应用于电视广播业、信息通信业、自动控制系统和各行各业中，集成电路实现了材料、元件、电路三者之间完美的结合与统一，使现代电子技术发展到一个新的阶段，形成了以现代通信业和计算机网络技术为代表的现代信息产业，并得到了非常迅速的发展，在发达国家中其产值已达到举足轻重的地位。随着集成电路制造工艺的进步，集成度越来越高，出现了大规模和超大规模集成电路，甚至可以作到在几平方厘米的芯片上制成一个完整的计算机。

随着微电子技术的崛起和科学研究、生产与管理、现代生活中大量信息处理的需要，电子计算机迅速兴起并日益发展完善成为一门重要的学科。从 1946 年美国制造成有几间屋子大的第一台电子管电子计算机以来，现在已经发展为第四代计算机，其运算速度可达每秒 10 亿次以上。现在科学技术界正在研究开发第五代人工智能计算机和第六代生物计算机，它们可以不依靠程序，而依靠人工智能和生物电流信息工作。从 70 年代微型计算机问世以来，其价格一降再降，体积越来越小，可靠性也越来越高，大大加快了电子计算机的普及速度。现在在我国，计算机已进入各行各业，成为现代办公必不可少的助手。随着互联网的开通，信息传递越来越快，人们在商业贸易洽谈、资料信息检索查阅、远程医疗会诊，甚至交谈、购物中广泛地使用着计算机，计算机已逐渐进入了我国的家庭。

近年来我国的以程控光缆通信和移动通信为代表的通信事业发展很快，特别是改革开放以来我国已进入了世界现代通信产业的大国行列。电话已进入农民家庭，移动电话随处可见，可视电话也已开通。现代通信产业将人们的距离拉近，使现代生活更方便，更快捷。

我国目前已成为世界电力生产大国，由于环保意识的增强和我国政策的调整，一些小型的火力发电厂将逐渐被淘汰。随着刘家峡水电站、二滩水电站等一批大型水电站的建成，三峡工程的加紧施工，大亚湾等一批核电站的建成和安全运行，我国未来将进入一个以水电为主核电为辅的新的洁净能源时代。

数字控制和数字测量也在不断发展并得到日益广泛的应用。数控机床从 1952 年研制成功后发展很快，各式的数控加工中心和工业机器人在高精度的机械加工业、汽车业和各种有特殊要求的加工行业得到广泛应用，多工序数控机床和“自适应”数控机床相继问世，使加工业成为一种新兴的高技术产业。晶闸管的问世及变流技术的日益成熟使半导体技术进入了强电领域，目前在自动控制、调速技术中获得广泛应用。

展望未来的世界，电工技术和随之兴起的电子信息产业将会不断地完善和发展，将给人类带来一个无限美好的 21 世纪。

二、电工技术的特点及学习方法

电工学是研究电磁规律及电能和技术领域中应用的技术基础课。现代一切新的科学技术的发展和人类生活质量的提高都与电有着密切的关系。

电能因为有着自己明显的优越性，所以才会成为现代人类社会发展的必备条件和保证。电能的优越性主要表现在以下几个方面：

(1) 便于转换 人们可以利用水的势能、热能、核能、风能、化学能及光能通过发电机转换为电能；同时，也可以将电能根据需要转换为其它形式的能量，例如利用电动机将电能转换为机械能去驱动机械设备，利用电光源将电能转换为光能，利用电炉将电能转换为热能等。同时，不同型式的电能之间也可以转换，例如利用整流器将交流电能转换为直流电能，

利用振荡器和逆变技术将直流电能转换为交流电能。

此外利用传感器也可以将压力、速度、流量、温度等多种非电学量转换为电学量。

(2) 便于输送 电能可以很方便地被输送到几千公里以外的地方, 我们知道工厂通常建在原料产地或交通方便的地方, 而发电站则大多建于有能源的地方, 动力基地与生产基地在地理位置上的距离成为一个重要矛盾, 而这个矛盾由于电能可以很方便地远距离输送而得到解决。通常把交流电通过变压器将电压升得很高, 然后通过长距离输电线输送出去, 这样可以减少输电过程中的损耗, 提高输电效率。电能送到用电地点再将电压降低以便安全使用。电能不仅输送方便, 分配也很容易, 从民用的几十瓦的电灯到工业上几千千瓦的大电动机, 都可以根据需要进行分配。

(3) 便于控制 电能的使用可以达到高度的自动化, 电路的通断和保护技术已很成熟, 现代工业中可以利用电气控制技术监控设备的运行状态和整个生产过程, 实现程序控制、数字控制或最佳状态控制, 并且能自动检测生产过程中的各项参数, 将其转换为一定的电信号, 实现自动调节和工艺流程的自动化。

在中等专业学校和职业学校中, 电工学在整个教学计划中占有重要的地位, 它是一门实践性很强的技术基础课程。它的教学目的是使学生获得必要的电工技术方面的基本理论、基本知识和基本技能, 为学习后续课程以及今后从事工程技术性工作打下必要的基础。

(1) 学习本课程前, 要具备一定的教学基础, 如对微积分的概念、多元一次方程组的解法、复数的概念与计算、矢量的加法、简单微分方程的解法等都应比较熟悉。

(2) 学习时要注意教师对物理概念、基本理论、基本思路和分析方法的讲解, 自己要思考理解问题是如何提出的和引伸的? 主要解决哪方面什么样的问题? 又是如何解决和应用的? 要特别注意归纳整理解决问题的思路和方法, 要注意各部分内容之间的联系和呼应, 千万不要死记硬背, 要作好每节课的思考题与讨论题, 及时纠正一些错误的概念, 要注意不断培养自己的理解能力和自学能力。

(3) 对电工学这门课程来说, 学生独立地完成一定数量的针对性很强的习题, 对巩固和加深对所学理论的理解是必需的, 要注意通过解题培养和训练自己的分析能力和运算能力。解题前要对所学的内容基本掌握; 解题时要先看懂题意, 搞清已知条件和求解内容的内在联系, 再决定用哪个理论或哪个公式及解题的步骤, 习题要书写清楚整洁, 图要标绘清楚, 答案要注明单位, 养成严格的科学作风。

(4) 在对电工学的学习中通过实验验证所学的理论, 熟悉器件、电路和有关电工仪器仪表, 训练实验技能, 培养严谨的科学作风, 是本课程教学中的一个重要环节, 必须予以足够的重视。实验前务必认真阅读实验指导书, 复习好有关的理论内容; 实验时应积极思考, 先动脑、后动手、多动脑、多动手; 要学会正确使用常用的电工仪表及仪器, 电机和电器等设备, 作到能正确联接电路, 能准确读取数据; 实验后要对实验中的现象和实验数据认真整理分析, 编写出整洁清楚的实验报告。

只要同学们具有正确的学习目的和态度, 在学习中热爱专业, 掌握对学习本课程的特点, 刻苦钻研、踏踏实实, 一定能取得优良成绩。

第一章 直流电路

关于简单电路的基本内容，大部分在物理课中已经讲过，但为了学好本课程，学生对这些内容的理解必须进一步充实和深化，并能在较复杂的情况下充分地扩展和正确应用这些基本理论。故在本章的开始，讨论电路的基本物理量、电路的基本定律、电路的工作状态及电压和电流的参考方向等。接下来重点讨论和介绍复杂电路的概念，并以直流电阻电路为例，扼要地叙述求解这类电路的基本定律——基尔霍夫定律，介绍根据电路的结构特点和问题的不同要求求解这类电路的一些基本方法，如支路法、叠加法、电压源与电流源的等效变换、戴维南定理等几种主要方法。

第一节 电路与电路模型

电路就是电流所通过的路径，它是为某种需要由某些电工设备及元件按一定方式联接起来的一个整体。

电路的复杂程度不同，结构形式和所能完成的任务是多种多样的，比较复杂的电路称为网络。

电路的一种重要作用是实现电能的传输与转换，其典型的例子为电力系统，电力系统包括电源、负载和中间环节这三个重要组成部分。

在电力系统中，发电机是电源，是供应电能的设备。不同类型的发电机组，可以把热能、水的势能、风能或原子能转换为电能。除发电机外，电池也是一种常见的小型电源，它的电能是由化学能转换而来的。在电力系统中电灯、电动机、电炉等用电器都称为负载。它们是消耗电能的设备，这些不同类型的负载分别把电能转换为光能、机械能和热能等。在电源与负载之间变压器和输电线以及必要的控制与保护电器构成了电路的中间环节，它们起到传输与分配电能的作用。典型的电力系统如图 1-1a 所示。

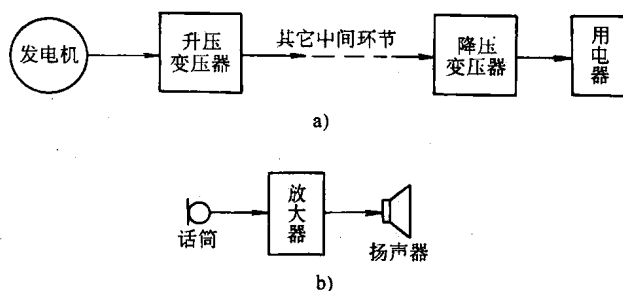


图 1-1 两种典型电路作用的示意图

a) 电力系统 b) 扩音机

电路的另一种作用是传递与处理信号，典型的例子如扩音机，其示意图如图 1-1b 所示。话筒把语言或音乐转换为相应的电压与电流，形成一定的电信号，称为信号源。信号源相当于电源，但与上面所说的发电机、电池等电源不同，信号源输出的电信号的变化规律是取决于所加信息的，而且由于话筒输出的电信号很微弱，不足以推动作为负载的扬声器，所以中间必须用放大器来进行放大，而放大器所需的电能是由另外的直流电源提供的。

电信号通过电路的传递、放大和处理后，最后通过扬声器把放大后的电信号还原为音量

较大的语言和音乐。信号的这种转换和放大，简称为信号的处理。

随着现代科技的发展，电路应用于信号传递与处理日益广泛，如视听设备、微机系统、自动控制系统、数控加工设备等都是电路应用于信号传递与处理的比较复杂的例子。

由实际元件组成的电路，由于其电磁性能比较复杂，所以很难进行定量的分析与计算。

为了便于对实际电路进行定量的分析与计算，我们有必要引入理想电路元件的概念。所谓理想电路元件是指具有单一的、确定的电磁性能的电路元件，是对实际元件电磁性能的科学抽象与概括。在理想电路元件中，主要有电阻元件、电感元件、电容元件、电源等。这些元件分别由相应的图型符号和相应的文字标注及参数来表征，见图 1-2a 所示。而实际元件在一定的外部条件下，突出其起主导作用的电磁性能，而忽略其对电路的次要影响，可以将其理想化地近似看作某个理想电路元件或某几个理想元件的组合。例如一个白炽灯，它除了具有电阻性、消耗电能外，当通过电流时还会产生磁场，就是说它还具有电感性，但电感很小，一般可以忽略不计。所以在直流或工业频率的交流电源作用下，白炽灯就可以视为一个理想电阻元件。又如一个实际线圈在直流电源作用下，可以看作一个理想电阻，在工业频率交流电源作用下，可以等效看作一个理想电阻和一个理想电感的串联组合，而当交流电源的频率更高时又可以看作是其它不同理想元件的不同组合。这说明同一个实际电路元件，在不同的外部条件下，可能呈现不同的主要电磁性能，也就是说应该用不同理想元件的不同组合方式来等效代替。

只有经过科学的抽象与概括，将实际电路等效地表示成理想元件组成的电路，才有可能对其进行定量的分析和计算。全部由理想元件组成的电路，称为电路模型，图 1-2b 是画出的一个最简单的电路模型，灯泡为理想电阻元件，文字标注为 R ；实际电源表示为理想电压源和内阻的串联组合，文字标注分别为电源电动势 E 和内阻 R_0 ；导线和开关组成中间环节，导线视为无阻的理想导体。本教材中以后所分析的电路均为电路模型，这是学习本课程的学生应该注意的问题。

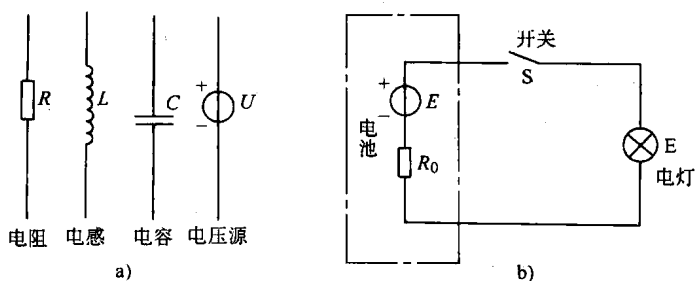


图 1-2 理想电路元件和最简单的电路模型

a) 理想电路元件 b) 最简单的电路模型

第二节 电路的基本物理量及其参考方向

一、电流

带电粒子有规律的定向运动形成电流。金属导体中的自由电子带负电荷，在电场力的作用下，自由电子逆着电场方向定向运动就形成电流。同样，电解液中的正离子带正电荷，在电场力的作用下，正离子沿着电场方向作定向移动也形成电流。这两种带电粒子运动方向虽然相反，但形成的电流方向相同。

电流的强度在数值上等于单位时间内通过某一导体横截面的电荷量，通常就称为电流。设在极短的时间 dt 内，通过导体横截面的微小电荷量为 dq ，则电流为

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

上式表示，电流是随时间变化的，是时间的函数。

如果电流不随时间变化，即 $dq/dt = \text{常数}$ ，则这种电流称为恒定电流，简称直流。直流电流常用大写字母 I 表示，此时电流定义为

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

式中， q 是在时间 t 内通过导体横截面 S 的电荷量，单位为库仑 (C)；时间 t 的单位为秒 (s)。

习惯上规定正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向为电流的实际方向。电流的实际方向是客观存在的，但在分析较复杂的电路时，往往难于事先判断某电路中电流的实际方向。例如图 1-3 中 R_5 中的电流实际上是由 A 流向 B，还是由 B 流向 A，我们无法判断。为此，在分析和计算电路时，可任意选定某一方向作为电流的正方向，或称为参考方向。依此对整个电路进行分析和计算，如计算结果该电流为正值，表示参考方向就是该电流的实际方向。如计算结果为负值，表示参考方向与该电流的实际方向相反。因此，在参考方向选定后，电流的值才有正负之分。

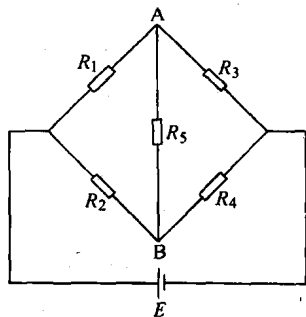


图 1-3 电桥电路

一般情况电路图上所标的电流方向均为参考方向。

电流的单位用安培表示，简称安，记为 A。如果 1 秒 (s) 内通过导体截面的电荷量是 1 库仑 (C) 则此导体中的电流为 1 安 (A)。计量微小的电流时，以毫安 (mA) 或微安 (μA) 表示。

$$1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}, 1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$$

二、电位与电压

电荷在电路中某一点具有一定的电位能，电位能大小等于电场力将电荷由该点移到参考点时所做的功，我们认为电荷在参考点处电位能为零，原则上参考点是可以任意选定的。

我们定义单位正电荷在电路中某点 (如 A 点) 所具有的电位能在数值上为该点的电位，记为 V_A ，有

$$V_A = \frac{W_A}{q} \quad (1-3)$$

式中， V_A 的单位为伏特 (V)； W_A 为电荷在 A 点所具有的电位能，单位为焦耳 (J)； q 为该电荷的量，单位为库仑 (C)。显然有 $V = \text{J/C}$ ，即伏特 = 焦耳/库仑。

电路中同一点由于参考点选择不同，其电位值是不相等的。单位正电荷由 A 点移到参考点时，电场力作功为正时，则 A 点的电位为正值；单位正电荷由 B 点移到参考点时，电场力作功为负时 (外力作功)，则 B 点的电位为负值，参考点即为零电位点。注意在分析同一问题时，参考点一经选定，则不能变动。电位为标量，它有大小和正负，但无方向。

电路中任意两点 (如 A 点与 B 点) 间的电位差，定义为该两点间的电压，记为 U_{AB} 。所以有

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (1-4)$$

很容易看出 A、B 之间的电压，在数值上等于单位正电荷由 A 点移到 B 点的过程中，电场力所做的功。

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} = V_A - V_B \quad (1-5)$$

式中， W_{AB} 表示电荷由 A 移到 B 时电场力所作的功，单位为焦耳 (J)； q 为该电荷的电量，单位为库仑 (C)。 U_{AB} 则为 A、B 间的电压。由电场力做功的规律及电位的定义，显然有

$$U_{AB} = -U_{BA} = -(V_B - V_A) \quad (1-6)$$

电压的单位同样为伏特 (V)，计量较大的电压时用千伏 (kV)；计量较小的电压时用毫伏 (mV) 或微伏 (μ V)

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

电压的实际方向规定为从高电位点指向低电位点，即电压的方向指向电位降低的方向。

在复杂电路中，有时很难确定某两点间电压的实际方向，这时可在这两点间画一箭头作为两点间电压的参考方向。分析计算后根据计算结果的正负和电压的参考方向，便可确定两点间电压的实际方向。所以，只有在参考方向选定后，电压的正负才有其实际意义。

应该注意，两点间的电压与参考点的选择无关。

三、电动势

为了维持电流不断地在联接导体中流通，并保持恒定，则必须使电源两端 ab 间的电压 U_{ab} 保持恒定，也就是要使图 1-4 中，受电场力作用经外电路移动到 b 并积累在负极板 b 上的正电荷，经电源内部重新回到正极板 a。

电荷受到的电源力作为一种非静电外力，可以克服电源内的电场力，使正电荷在电源内部的这种逆电场方向的移动成为可能，在发电机中电源力为电磁力，在电池中电源力则为化学反应而产生的化学力。

我们用电动势这个物理量衡量电源力对电荷做功的能力。

电源的电动势 E_{ba} 在数值上等于电源力把单位正电荷从电源的低电位端 b 经电源内部移到高电位端 a 所做的功，也就是单位正电荷从 b 点（低电位）移到 a 点（高电位）所获得的电位能。在电源力的作用下，电源不断地把其它形式的能量转换为电能。

电动势的实际方向，规定为从低电位点指向高电位点，即电动势指向电位升的方向。电动势的参考方向，总是与电压的参考方向相反。电动势的单位与电位、电压的单位相同，也是伏特 (V)。

四、电能、电功率

由式 (1-4) 很容易得到电能的表示式

$$W = Uq = UIt \quad (1-7)$$

可见电能的数值等于电压、电流及电流所持续时间的乘积。如果电压的单位为伏特 (V)、电流的单位为安培 (A)、时间的单位为秒 (s)，则电能的单位为焦耳 (J)。

单位时间内负载所消耗的电能，称为电功率，用字母 P 表示，单位为瓦 (W) 或千瓦 (kW)

$$P = \frac{W}{t} = UI = I^2R = \frac{U^2}{R} \quad (1-8)$$

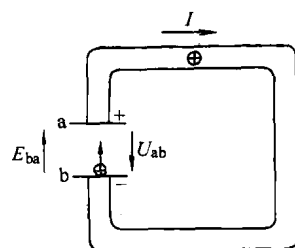


图 1-4 电荷在电路中的回路

1 焦耳 (J) = 1 瓦特 (W) · 1 秒 (s)

在实际应用中常用千瓦小时来表示电能的数量值

$$\begin{aligned} 1 \text{ 千瓦小时} &= 1 \text{ 千瓦 (kW)} \cdot 1 \text{ 小时 (h)} \\ &= 1000 \text{ 瓦 (W)} \times 3600 \text{ 秒 (s)} \\ &= 3600000 \text{ 焦耳 (J)} \end{aligned} \quad (1-9)$$

第三节 欧姆定律、电阻的伏安特性

一、欧姆定律

通过电阻的电流与电阻两端的电压成正比，这就是欧姆定律。它是分析与计算电路的基本定律之一。由于定律的上述表达形式仅适用于不含电源的一段电阻电路，故称为部分电路欧姆定律。如果电路中电压和电流所选的参考方向相同，则欧姆定律的表达式为

$$\frac{U}{I} = R \quad (1-10)$$

或者

$$U = IR \quad (1-11)$$

如图 1-5a 所示。但当电压和电流参考方向选得相反时，欧姆定律的表达式则为

$$U = -IR \quad (1-12)$$

如图 1-5b 和 c 所示。式中 R 即为该段电路的电阻。由式 (1-10) 可见，当所加电压 U 一定时，电阻 R 愈大，电流 I 愈小。这说明电阻具有对电流起阻碍作用的物理性质。

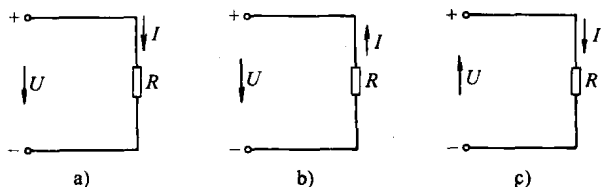


图 1-5 欧姆定律

电阻的单位是欧姆 (Ω)。当电路两端的电压为 1V，通过的电流为 1A 时，则该段电路的电阻为 1Ω 。计量高电阻时，则以千欧 ($k\Omega$) 或兆欧 ($M\Omega$) 为单位。

$$1k\Omega = 10^3\Omega \quad 1M\Omega = 10^6\Omega$$

电阻的倒数 $1/R = G$ ，称为电导，它的单位为西门子 (S)，在电流电压参考方向一致时，欧姆定律也可以表示为

$$I = GU \quad (1-13)$$

在实际应用中常需要对闭合电路进行分析和计算，图 1-6 是一个最简单的含源闭合回路， R_L 为负载电阻， R_0 是电源内电阻， E 为电源电动势。

略去导线的电阻不计，开关闭合时，则电路中的电流

$$I = \frac{E}{R_L + R_0} \quad (1-14)$$

故

$$E = IR_L + IR_0$$

其中 IR_L 为负载端电压， IR_0 为内阻压降。

所以有

$$U = E - IR_0 \quad (1-15)$$

式 (1-15) 称为全电路欧姆定律。其意义是：负载的端电压等于电源电动势减去内阻

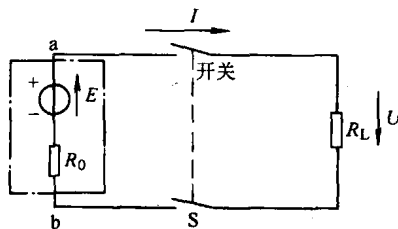


图 1-6 最简单的含源闭合回路

压降。说明当负载愈大（负载电阻 R_L 愈小）时，电流 I 愈大，其内阻压降 IR_0 也愈大，则负载端电压 $U = IR_L$ 则必然愈小。也可以看作电压 U 是由 $+E$ 和 $-IR_0$ 两段电压相加而成。

例 1-1 如图 1-7 所示的一段含源电路，其电压、电流的参考方向如图所示，已知 ab 间电压 $U_{ab} = 4V$ ，电路中电流 $I = 1A$ ，电源电动势 $E = 3V$ ，电阻 R 为 1Ω ，求电阻 $R_1 = ?$

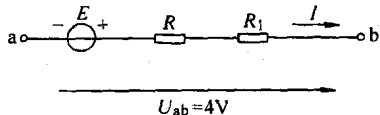


图 1-7 例 1-1 的图

解 根据图示的电流、电压正方向有

$$\begin{aligned} U_{ab} &= -E + IR + IR_1 \\ 4 &= -3 + 1 \times 1 + 1 \times R_1 \\ 4 &= -3 + 1 + R_1 \end{aligned}$$

故

$$R_1 = \frac{6V}{1A} = 6\Omega$$

应该特别注意，在电路中当 U 、 I 参考方向一致时则 $P = UI$ ；而当 U 、 I 参考方向相反时，应取 $P = -UI$ 。这里的正负号是根据电压和电流是否取一致的参考方向而定，而电压和电流数值的本身还有正、负之分，所以实际计算功率时必须考虑这两套正负号。

将上述两套正、负号代入后，如果最后计算结果功率 $P > 0$ ，说明该元件是耗能元件；如最后计算结果功率 $P < 0$ ，则该元件是供能元件。耗能元件为负载元件，供能元件是电源元件。

例如图 1-5a 中，有 $P = UI$ ，如果电压 $U = 4V$ ；电流 $I = 2A$ 则该元件 R 为负载，其功率 $P = 4 \times 2 = 8W$ 。但如 a 中有 $U = 4V$ ， $I = -2A$ 则 $P = 4 \times (-2) = -8W$ ，则该元件 R 为电源元件，功率为 $8W$ 。

在图 1-5b 中，有 $P = -UI$ ，如 $U = 4V$ ， $I = 2A$ 则 $P = -4 \times 2 = -8W$ ，该 R 为供能元件即电源元件。而如 $U = 4V$ ， $I = -2A$ 时，则 $P = -UI$ ， $P = -4 \times (-2) = 8W$ ，该 R 为耗能元件。

二、电阻的伏安特性

式 (1-10) 中所表示的电流与电压的正比关系，是通过实验得到的。我们可以测量电阻两端的电压值和流过电阻的电流值，以电压为横坐标，电流为纵坐标，画出它的电压和电流关系曲线，它是一条通过坐标原点的直线，这就是欧姆定律中电阻 R 的伏安特性，如图 1-8a 所示。

遵循欧姆定律的电阻称为线性电阻，它是一个表示该段电路特性而与电压和电流无关的常数。其图形符号如图 1-8b 所示。

如果某电阻元件的伏安特性是一条曲线，则称此电阻为非线性电阻，显然非线性电阻是不能用式 (1-10) 中欧姆定律来

表示的。图 1-9a 表示一半导体二极管的伏安特性，由图可见半导体二极管中的电流与加在它两端的电压不成正比关系，不遵循欧姆定律，所以它是一个非线性电阻。图 1-9b 表示普通白炽灯的伏安特性。它也是一种非线性电阻元件。实际上包括电阻器在内的所有电阻元件，它们的伏安特性都不是直线，也

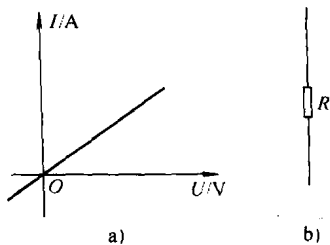


图 1-8 线性电阻的伏安特性及图形符号

a) 伏安特性 b) 图形符号

就是在严格意义上说它们都是非线性元件。但是, 这些元件在一定的工作范围内, 它们的伏安特性近似为直线, 所以在一定的使用区间内这些电阻元件尤其是各种金属膜电阻、线绕电阻等均可认为是线性电阻。非线性电阻的图形符号如图 1-9c 所示。

由非线性电阻组成的电路称为非线性电路, 对非线性电路的分析与计算本书中没有涉及。本书中所研究的电路, 全部由线性元件组成, 即本书中所讨论的全部为线性电路。

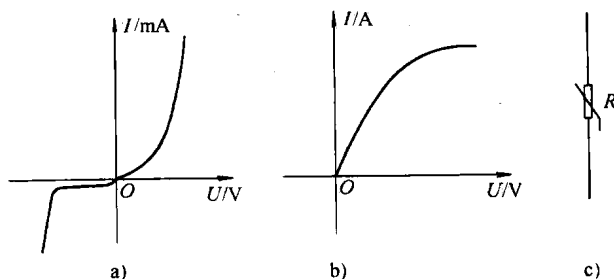


图 1-9 非线性电阻的伏安特性及图形符号

a) 二极管伏安特性 b) 白炽灯伏安特性 c) 图形符号

计算本书中没有涉及。本书中所研究的电路, 全部由线性元件组成, 即本书中所讨论的全部为线性电路。

第四节 电路的有载工作状态、开路与短路

以图 1-6 所表示的含源闭合回路为例, 来讨论电路在有载状态、开路状态、短路状态下, 电流、电压和功率方面的特征, 以及关于电气设备额定值的概念。

一、有载工作状态

在全电路欧姆定律中, 我们已得到图 1-6 电路在开关 S 闭合时有

$$U = E - IR_0$$

由这一关系可以画出表示电源端电压 U 与输出电流 I 之间关系的曲线, 称为电源外特性曲线。如图 1-10 所示, 图中直线的斜率与电源内阻 R_0 有关, 当电源内阻很小即 $R_0 \ll R$ 时, 则

$$U \approx E$$

这是理想电源的情况。这说明当电流变动 (即负载变动) 时, 电源内阻 R_0 愈小, 电源的端电压 U 愈稳定。

式 (1-15) 为最简含源闭合电路的电压平衡方程, 如将该式各项乘以电流 I , 则得到功率平衡方程

$$UI = EI - I^2 R_0 \quad (1-16)$$

$$P = P_E - \Delta P$$

式中, $P_E = EI$, 是电源产生的总功率; $\Delta P = I^2 R_0$, 为电源内阻消耗的功率, 其全部均转换为热量; $P = UI$ 为电源输出的功率, 也就是负载电阻 R_L 所消耗的功率。各量的单位均为瓦特 (W)。

从式 (1-16) 可知, 在一个电路中, 电源产生的功率和负载取用的功率以及内阻上所损耗的功率是平衡的。

例 1-2 如图 1-11 所示, 已知电源电动势 $E = 12\text{V}$, 负载端电压 $U = 10\text{V}$, 电源内阻 $R_0 = 1\Omega$, 求 P_E 、 P 、 ΔP 及内阻压降 U_0 。

解 $U_0 = E - U = (12 - 10)\text{V} = 2\text{V}$

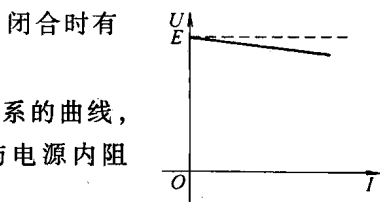


图 1-10 电源的外特性曲线

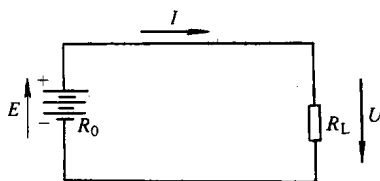


图 1-11 例 1-2 的图

$$I = \frac{U_0}{R_0} = \frac{2V}{1\Omega} = 2A$$

$$P_E = EI = 12V \times 2A = 24W$$

$$P = UI = 10V \times 2A = 20W$$

$$\Delta P = U_0 I = 2V \times 2A = 4W$$

通常负载（例如电灯、电动机等用电器）都是并联运行的。因为电源的端电压是基本不变的，所以负载两端的电压也是几乎不变的。因此当负载增加（并联的负载数目增加，负载的总电阻 R_L 减小）时，负载所取用的总电流和总功率都增加，即电源输出的功率和电流都相应增加，这说明电源输出的功率和电流决定于负载的大小。那末这是否意味着负载可以任意增大呢？由于负载增大而造成的电源输出功率和电流的增大，对电路而言，有没有一个最合适的极限数值呢？要回答这些问题，我们必须引出额定值这个术语。

各种电气设备的电压、电流和功率都有一个额定值。例如一盏电灯上面标注的电压 220V，功率 60W，就是它的额定值。额定值是电器制造厂为了使产品能在给定的工作条件下正常运行，而规定的正常允许值。

大多数电气设备（如灯泡、电炉、电机等）的寿命与绝缘材料的耐热性能及绝缘强度有关。当电流超过额定值过多时，由于发热的速度远远大于散热速度，设备的温度将很快升高，以至使绝缘迅速老化、损坏；而当所加电压超过额定值过多时绝缘材料可能被击穿。对电灯、电炉和电阻器来说，当电压过高或电流过大时，其灯丝或电阻丝也将被烧毁。反之，如果电压和电流远低于其额定值时，将得不到正常合理的工作情况，而且也不能充分利用设备的自身潜力。

制造厂在制定产品的额定值时，一般要经过耐压试验和产品寿命试验等专业试验取得合理的参数，要全面考虑使用的经济性、可靠性以及寿命等因素，特别要保证设备的工作温度不超过规定的允许值。

电气设备或元件的额定值常标在铭牌上或写在其他说明中，在使用时必须充分考虑额定数据。额定电压、额定电流、额定功率和额定电阻分别用 U_N 、 I_N 、 P_N 和 R_N 表示。一般电气产品和元件只标注上述四项中的两项就可以了，因为另外两项可以自行计算。由于习惯，一般电气开关标 U_N 和 I_N ；而电烙铁、电炉等标注 U_N 和 P_N ；一般金属膜电阻和线绕电阻则标注 P_N 和 R_N 而电机专用的铸铁调速电阻则标 I_N 和 R_N 。

这里我们应注意，电气设备使用时的电压、电流和功率的实际值不一定均等于额定值，但应该保证它不超过额定值。

例如一台直流发电机的铭牌标有 230V、40kW，通过计算可知电流为 174A，这些是额定值。但实际使用时，这台发电机在一定电压下并不总发出 40kW 的功率和 174A 的电流。发电机发出多大功率和电流，完全决定于负载的需要，但一般不应超过其额定功率和电流。对电动机也是这样，它的实际功率和电流决定于电动机轴上所带的机械负载的大小，通常并不一定是额定工作状态。

例 1-3 有一额定值为 5W、500Ω 的线绕电阻，试计算其额定电流 I_N 和额定电压 U_N 。

解 已知 P_N 和 R_N ，可以先求额定电流

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{5W}{500\Omega}} = 0.1A$$