

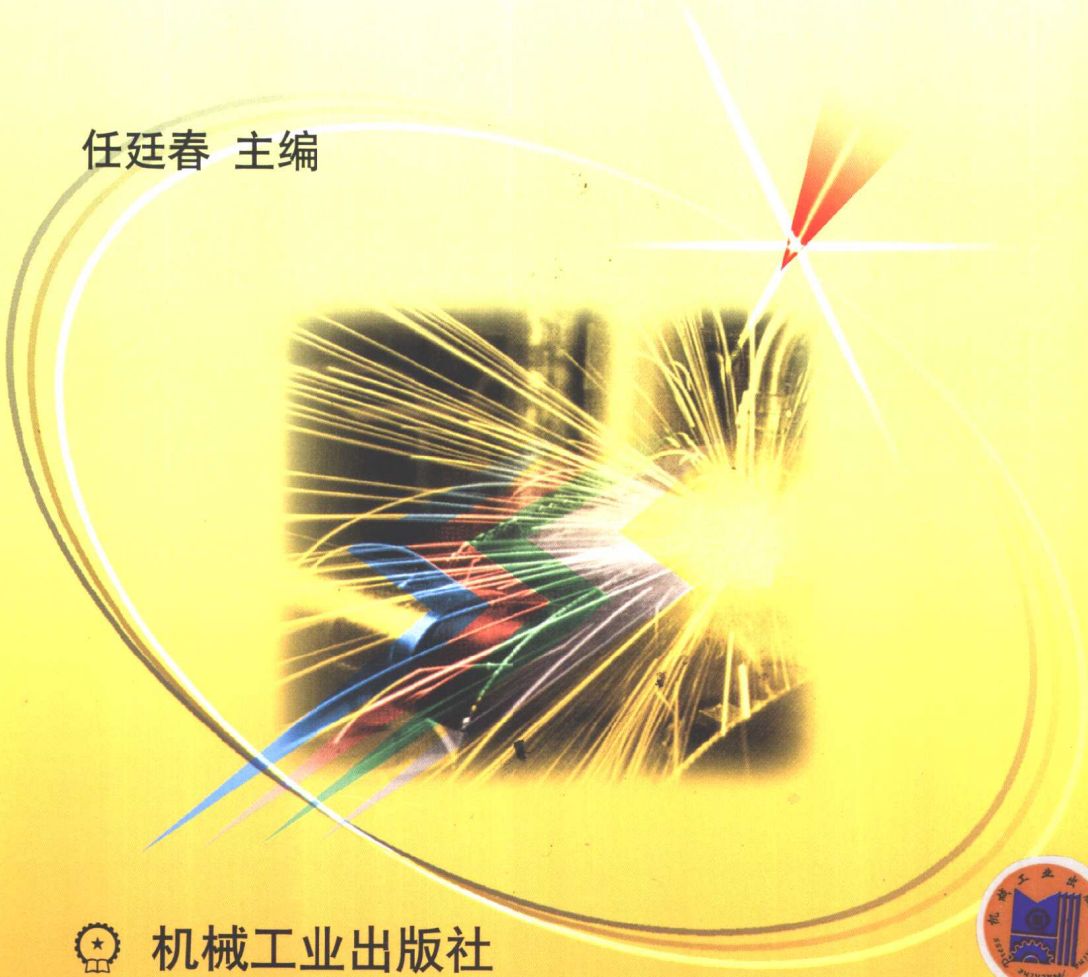


中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

焊接电工

(焊接专业)

任廷春 主编



机械工业出版社



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

焊 接 电 工

(焊 接 专 业)

主 编 任廷春
副 主 编 栾居里 王现荣
参 编 许志安 周耀辉 李春兰 邵欣源
责任主审 崔占全
审 稿 郑世科 付瑞东



机 械 工 业 出 版 社

本书是根据教育部 2001 年 5 月组织编写审定的中等职业学校焊接专业“焊接电工”课程教学大纲编写的中等职业教育国家规划教材。

本书包括直流电路、交流电路、磁路与变压器、半导体元件及应用、低压控制电器与电路、焊接电弧基础知识、弧焊变压器、硅弧焊整流器、晶闸管弧焊整流器、新型弧焊电源（脉冲弧焊电源、晶体管式弧焊电源、逆变式弧焊电源、矩形波交流弧焊电源）、弧焊电源选择与使用、弧焊设备（埋弧焊机、二氧化碳焊机、钨极氩弧焊机、等离子弧焊机）等十二章。

本书主要供中等职业学校焊接专业师生作教材使用，对焊接工程技术人员也有一定的参考价值。

图书在版编目（CIP）数据

焊接电工/任廷春主编 —北京：机械工业出版社，2002.7

中等职业教育国家规划教材．焊接专业

ISBN 7-111-10414-5

I 焊… II. 任… III. 焊接－电工－专业学校－教材 IV. TG4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2002）第 039210 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：邓海平 版式设计：冉晓华 责任校对：韩 晶

封面设计：姚 毅 责任印制：闫 焱

北京第二外国语学院印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·16 75 印张·415 千字

0001—3000 册

定价：20.00 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）68993821、68326677-2527

封面防伪标均为盗版

中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》（教职成〔2001〕1 号）的精神，我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从 2001 年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲（课程教学基本要求）编写，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为教材选用提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

二〇〇一年十月

前 言

本书是根据教育部 2001 年 5 月组织编写审定的中等职业学校焊接专业“焊接电工”课程教学大纲编写的中等职业教育国家规划教材。

中等职业学校培养的是高素质劳动者和中初级人才。中等职业教育强调淡化理论、加强实训,强调公共课够用、专门课实用、实训课会用,强调教材应体现实用性、先进性和广泛适用性,不强调知识的系统性、完整性。为此,我们将原中专焊接专业的“电工学”、“工业电子学”、“弧焊电源”、“焊接方法与设备”几门课程的内容进行了精选,编写出“焊接电工”这本教材。

本书讲述了直流电路、交流电路、磁路与变压器、半导体元件及应用、低压控制电器与电路的基础知识,对焊接电弧的基础知识作了必要的叙述,重点讨论了弧焊变压器、弧焊整流器、常用弧焊设备的组成、工作原理、特点、选择使用与维护,对近期出现的新型电源也作了简介。本书主要供中等职业学校焊接专业师生作教材使用,对焊接工程技术人员也有一定的参考价值。

参加本书编写的有沈阳市机电工业学校任廷春、栾居里,邵欣源,河北省机电学校王现荣,渤海船舶职业学院许志安、周耀辉、李春兰等同志。任廷春为主编,栾居里、王现荣为副主编。第一章由栾居里编写,第二章由任廷春、周耀辉、李春兰合编,第三章由栾居里、周耀辉、李春兰合编,第四、五章由周耀辉、李春兰合编,第六、十二章由王现荣编写,第七、九章由许志安编写,第十一章由王现荣、许志安合编,实验部分由邵欣源编写,其余部分由任廷春编写。全书最后由任廷春整理定稿。

本书责任主审为崔占全,审稿人为郑世科,付瑞东。

本书在编审过程中承蒙机械工业出版社教材编辑室、北京机械工业学校有关同志的大力支持,沈阳市机电工业学校田地、吴鹰两同志在计算机文字录入、修改过程中给予热情帮助,在此向他(她)们表示衷心感谢。此外,本书在编写过程中查阅大量参考文献,也在此向原作(编)者表示深深的谢意。

由于编者水平所限,加之时间紧迫,书中难免存在缺点和错误,恳请读者不吝赐教。

编 者
于辽宁沈阳

目 录

前言		第六节 典型控制电路	100
绪论	1	习题	106
第一章 直流电路	5	第六章 焊接电弧基础知识	108
第一节 电路和电路模型	5	第一节 焊接电弧的物理本质	108
第二节 电路的基本物理量	6	第二节 焊接电弧的结构和特性	111
第三节 电路的元件	9	第三节 交流电弧	120
第四节 电路的工作状态	13	第四节 对弧焊电源的要求	123
第五节 基尔霍夫定律	16	习题	132
第六节 电阻的联接	18	第七章 弧焊变压器	134
第七节 支路电流法	20	第一节 弧焊变压器的原理及分类	134
习题	21	第二节 正常漏磁式弧焊变压器	136
实验 验证基尔霍夫定律	23	第三节 增强漏磁式弧焊变压器	142
第二章 正弦交流电路	25	第四节 弧焊变压器的维护及故障排除	152
第一节 正弦交流电的三要素和相量表示法	25	习题	153
第二节 单一参数正弦交流电路	29	实验 弧焊电源外特性与调节特性的测定	154
第三节 电阻、电感、电容元件串联的交流电路	34	第八章 硅弧焊整流器	157
第四节 三相交流电路	39	第一节 硅弧焊整流器的组成及分类	157
习题	44	第二节 磁饱和电抗器	158
第三章 磁路及变压器	48	第三节 无反馈磁饱和电抗器式弧焊整流器	162
第一节 磁场的基本物理量	48	第四节 全部内反馈磁饱和电抗器式弧焊整流器	168
第二节 铁磁材料的磁性能及能量损耗	49	第五节 部分内反馈磁饱和电抗器式弧焊整流器	177
第三节 磁路与磁路定律	52	习题	183
第四节 交流铁心线圈电路	55	实验 磁饱和电抗器输出特性的测定	183
第五节 变压器	57	第九章 晶闸管式弧焊整流器	185
习题	65	第一节 概述	185
第四章 半导体元件及其应用	67	第二节 主电路	186
第一节 半导体元件	67	第三节 外特性控制电路	190
第二节 半导体三极管交流放大电路	76	第四节 晶闸管式弧焊整流器的故障排除	196
第三节 整流及稳压电路	81	习题	197
习题	86	第十章 新型弧焊电源	198
第五章 常用低压电器与电路	88	第一节 脉冲弧焊电源	198
第一节 常用开关及按钮	88	第二节 晶体管式弧焊电源	203
第二节 交流接触器	91	第三节 逆变式弧焊电源	207
第三节 继电器	93	第四节 矩形波交流弧焊电源	216
第四节 行程开关	97		
第五节 电磁气阀及压力开关	98		

习题	219	稳定性	248
第十一章 弧焊设备	221	第十二章 弧焊电源的选择与使用	250
第一节 埋弧焊设备	221	第一节 弧焊电源的选择与安装	250
第二节 熔化极气体保护焊设备	231	第二节 弧焊电源的使用	255
第三节 钨极氩弧焊设备	239	第三节 节约用电和安全用电	258
第四节 等离子弧焊与切割设备	245	习题	261
习题	247	参考文献	262
实验 CO ₂ 气体保护焊短路过渡电弧的			

绪 论

一、弧焊电源与设备在电弧焊中的作用

电弧焊是焊接方法中应用最为广泛的一种焊接方法。据一些工业发达国家的统计，电弧焊在焊接生产总量中所占的比例一般都在 60% 以上。根据其工艺特点不同，电弧焊可分为焊条电弧焊、埋弧焊、气体保护焊和等离子弧焊等多种。

不同材料、不同结构的工件，需要采用不同的电弧焊工艺方法，而不同的电弧焊工艺方法则需用不同的电弧焊机。例如，操作方便、应用最为广泛的焊条电弧焊，需要由对电弧供电的电源装置和焊钳组成的手弧焊机；锅炉、化工、造船等工业广为使用的埋弧焊，需要由电源装置、控制箱和焊车等组成的埋弧焊机；适用于焊接化学性活泼金属的气体保护电弧焊，需要由电源装置、控制箱、焊车（自动焊）或送丝机构（半自动焊）、焊枪、气路和水路系统等组成的气体保护电弧焊机；适用于焊接高熔点金属的等离子弧焊，则需要由电源装置、控制系统、焊枪或焊车（自动焊）、气路和水路系统等组成的等离子弧焊机。

显然，弧焊电源与设备性能的优劣，在很大程度上决定了焊接过程的稳定性。没有先进的弧焊电源与设备。要实现先进的焊接工艺和焊接过程自动化是难以办到的。因此，应该对弧焊电源与设备的基本理论、结构、性能特点进行深入的分析，真正了解和正确使用弧焊电源与设备，进而研制出新型的弧焊电源与设备，使焊接质量和生产效率得到进一步提高。

二、弧焊电源的分类、特点及用途

弧焊电源种类很多，其分类方法也不尽相同。常用的是按弧焊电源输出的焊接电流波形分类。

焊接电流有交流、直流和脉冲三种基本类型，相应的弧焊电源有交流弧焊电源、直流弧焊电源和脉冲弧焊电源三种类型，每种类型的弧焊电源根据其结构特点不同又可分为多种型式，如图 0-1 所示。

1. 交流弧焊电源

交流弧焊电源包括工频交流弧焊电源（弧焊变压器）、矩形波交流弧焊电源。

(1) 工频交流弧焊电源 又称弧焊变压器，它把电网的交流电变成适合于电弧焊的低电压交流电，它由变压器、调节装置和指示装置等组成。弧焊变压器具有结构简单、易造易修、成本低、磁偏吹小、空载损耗小、噪声小等优点。但其输出电流波形为正弦波，因此，电弧稳定性较差，功率因数低，一般用于焊条电弧焊、埋弧焊和钨极惰性气体保护电弧焊等方法。

(2) 矩形波交流弧焊电源 它是利用半导体控制技术来获得矩形波交流电流的。由于输出电流过零点时间短，电弧稳定性好，正负半波通电时间和电流比值可以自由调节，因此特别适合于铝及铝合金钨极氩弧焊。

2. 直流弧焊电源

(1) 弧焊发电机 一般由特种直流发电机、调节装置和指示装置等组成。按驱动的动力不同，弧焊发电机可分为两种：以电动机驱动并与发电机组成一体的称为弧焊电动发电机

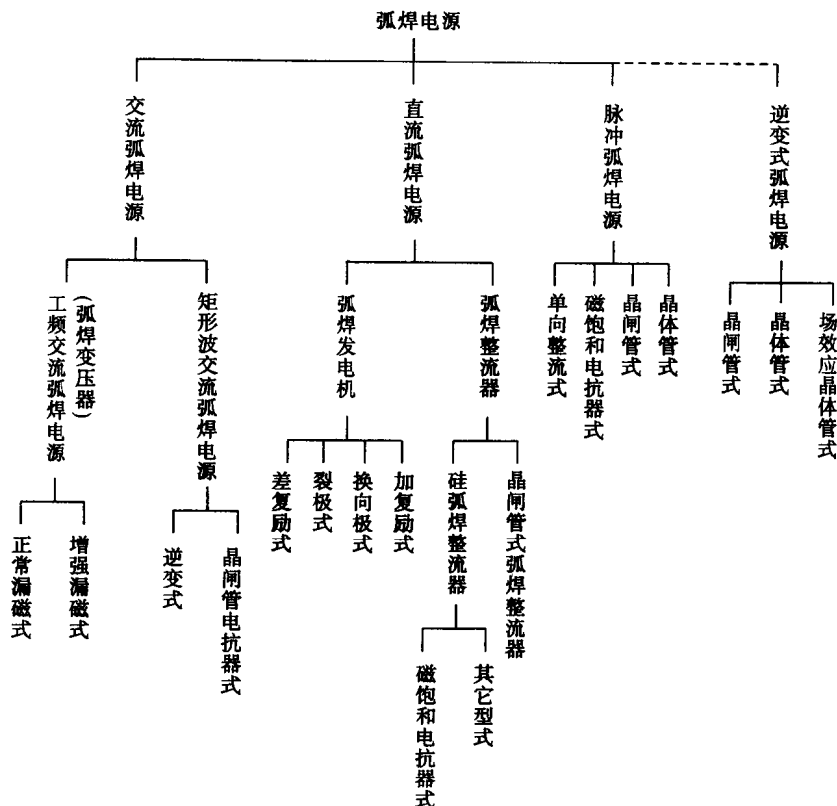


图 0-1 弧焊电源分类

(目前已停止生产); 以柴(汽)油驱动并与发电机组成一体的, 称为弧焊柴(汽)油发电机。它与弧焊整流器相比, 制造复杂, 噪声及空载损耗大, 效率稍低, 价格高; 但其过载能力强, 输出脉动小, 受电网电压波动的影响小, 一般用于碱性焊条电弧焊。

(2) 弧焊整流器 由主变压器、整流器及为获得所需外特性的调节装置、指示装置等组成。它把电网交流电经降压整流后获得直流电。与弧焊发电机相比, 它具有制造方便、价格低、空载损耗小、噪声小等优点, 而且大多数弧焊整流器可以远距离调节焊接工艺参数, 能自动补偿电网电压波动对输出电压和电流的影响。它可作为各种弧焊方法电源。

(3) 逆变式弧焊电源 它把单相(或三相)交流电经整流后, 由逆变器转变为几百至几万赫兹的中高频交流电, 经降压后输出交流或直流电。整个过程由电子电路控制, 使电源获得符合要求的外特性和动特性。它具有高效节能、重量轻、体积小、功率因数高等优点, 可应用于各种弧焊方法, 是一种很有发展前途的普及型弧焊电源。

顺便指出, 逆变式弧焊电源既可输出交流电, 又可输出直流电, 但目前常用后一种形式, 因此又可把它称为逆变式弧焊整流器。

3. 脉冲弧焊电源

焊接电流以低频调制脉冲方式馈送，一般由普通的弧焊电源与脉冲发生电路组成。它具有效率高、输入线能量较小、线能量调节范围宽等优点。它主要用于气体保护电弧焊和等离子弧焊，对于焊接热敏感性大的高合金材料、薄板和全位置焊接具有独特的优点。

三、弧焊电源与设备的现状及发展

焊接技术的发展是与近代工业和科学技术的发展紧密相联系的。弧焊电源与设备又是弧焊技术发展水平的主要标志，它的发展与弧焊技术的发展也是相互促进、密切相关的。

1802年俄国学者发现了电弧放电现象，并指出利用电弧热熔化金属的可能性。但是，电弧焊真正应用于工业，则是在1892年出现了金属极电弧焊接方法以后。当时，电力工业发展较快，弧焊电源本身也有了很大的改进。到20世纪20年代，除弧焊发电机外，已开始应用结构简单、成本低廉的弧焊变压器。

随着生产的进一步发展，不仅需要焊接的产品数量增加了，而且许多产品对焊接质量的要求也提高了，加之焊接冶金科学的发展，20世纪30年代，在薄药皮焊条的基础上研制成功了焊接性能优良的厚药皮焊条，更显示了焊接方法的优越性。这个时期，由于机械制造、电机制造工业及电力拖动、自动控制等新科学技术的发展，也为实现焊接过程机械化、自动化提供了物质条件和技术条件，于是在20世纪30年代后期，研制成功了埋弧焊。20世纪40年代初，由于航空、核能等技术的发展，迫切需要轻金属或合金，如铝、镁、钛、锆及其合金等。这些材料的化学性能活泼，产品对焊接质量的要求又很高，氩弧焊就是为了满足上述要求而发展起来的新的焊接方法。20世纪50年代又相继出现了二氧化碳焊等各种气体保护电弧焊，以及随后出现的焊接高熔点金属材料的等离子弧焊。

各种焊接方法的问世，促进了弧焊电源与设备的飞速发展，20世纪40年代开始出现了用硒片制成的弧焊整流器。到了20世纪50年代末，由于大容量的硅整流器件、晶闸管的问世，为发展新的弧焊整流器开辟了道路。20世纪70年代以来，又相继成功研制了脉冲弧焊电源、逆变式弧焊电源、矩形波交流弧焊电源。

弧焊电源与设备的飞速发展，不仅表现为种类的大量增加，还表现在广泛应用电子技术、控制技术（PID控制、模糊控制、人工神经网络技术和智能控制）、计算技术等方面的理论知识和最新成就，来不断提高弧焊电源与设备的质量，改善其性能。例如，采用单旋钮调节，即用一个旋钮就可以对电弧电压、焊接电流和短路电流上升速度等同时进行调节，并获得最佳配合；通过电子控制电路获得多种形状的外特性以适应各种弧焊工艺的需要；采用多种电压、电流波形，以满足某些弧焊工艺的特殊需要；采用电压和温度补偿控制；设置电流递增和电流衰减环节，以防止引弧冲击和提高填满弧坑的质量；采用计算机控制，具有记忆、预置焊接参数和在焊接过程中自动变换焊接参数等功能，使弧焊电源与设备智能化。

目前，我国弧焊电源与设备制造、研究的状况，与正在蓬勃发展的国民经济的需要不相适应，产品的品种、数量、质量、性能和自动化程度还远远不能满足使用部门的要求，与世界工业发达国家比较，尚存在较大差距。为了适应我国社会主义四个现代化的需要，必需努力从事弧焊电源与设备的研制，充分利用电子技术、计算机技术和大功率电子器件，不断提高产品质量；大力发展高效、节能、性能良好的新型弧焊电源与设备，积极研制微机控制的弧焊电源与设备，从而把弧焊电源与设备的发展推向一个新阶段。

四、本课程的性质和任务

本课程以“数学”、“物理”等课程为基础，是焊接专业理论性和实践性较强的一门专业

课。学生学完本课程后，应能达到以下要求：

- 1) 能对一般交直流电路和三极管放大、整流电路进行分析和计算。
- 2) 能选择低压电器和读懂一般低压控制电路图。
- 3) 了解焊接电弧的特性，掌握交流电弧特点及稳定燃烧条件。
- 4) 掌握常用弧焊电源与设备的基本结构和工作原理，熟悉其性质特点，并且有正确选择、安装和使用的能力。

第一章 直流电路

本章首先介绍了电路的基本概念，分别对电路的物理量、电路的元件作了介绍；重点讨论了基尔霍夫定律，并对电路的工作状态和电阻串并联电路进行了分析；讨论了用支路电流法求解复杂电路电流的方法，最后阐述了电阻电容器电路的充放电过程。

本章虽然是以直流电路为研究对象，但从中引出的概念、定律和分析方法也适用正弦交流电路及其它各种线性电路。

第一节 电路和电路模型

一、电路的组成和作用

电路是电流的流径，是为了实现某种需要由各种电气设备和元件按一定方式联接而成的。电路由电源、负载和中间环节三个部分组成。

电源是产生或提供电能的装置，其作用是将其其它形式的能量转换为电能，如发电机、信号源、干电池等。

负载即用电设备，是电能的主要消耗者，是用电设备的统称。其作用是将电能转换成其它形式的能量，如电动机、电炉、电焊机、电灯等。

电源与负载之间的部分是中间环节，它包括连接导线、控制电器和测量装置等，在电路中它起着传递、控制和分配电能的作用。

实际电路种类很多，但按其功能不同，常见电路可分为两大类，即电力电路（或称强电路）和信号电路（或称弱电电路）。

电力电路主要用来实现电能的传输和转换，如供电系统、电力拖动、照明电路等。其用途是完成能量之间的相互转换，图 1-1a 所示的手电筒电路就是一个最简单的电力电路。

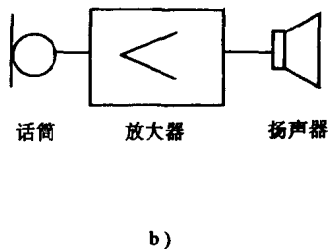
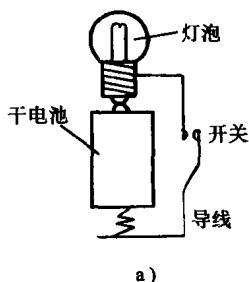


图 1-1 电路示例

信号电路通过电路实现信号的传递和处理，例如收音机、电视机、扩音机电路等，是通过接收天

线，把载有音乐、图像、文字的电磁波信号接收后，转换成相应的电信号，通过电路把这些信号进行相应的处理，传送到扬声器、显像管，还原为原始信息。图 1-1b 扩音机电路，通过话筒把声音信号转换为相应电信号，经放大器放大，扬声器将放大的信号还原成声音。

根据电路中供电电源种类的不同，电路又可分为直流电路和交流电路。直流电路由直流电源供电。理想直流电源的特点是输出电压的大小和方向不随时间变化。交流电路由交流电源供电，其电源输出电压大小和方向随时间而变。本章讨论直流电路的基本理论和计算，在

第二章中讨论单相和三相正弦交流电路。

二、电路模型

实际电路是由多种电器元件组成的，每一种器件在工作中表现出较为复杂的电磁性质，往往兼具两种以上的电磁特性。例如一个白炽灯，它除具有消耗电能的电阻特性外，还具有一定的电感性，在电路的分析和计算时，如果对电器元件考虑其全部的电磁特性，电路的分析将变的复杂。为了便于对实际电路进行分析和数学描述，突出元件的主要电磁特性，忽略次要因素，可把实际元件理想化（或称为模型化）。例如，白炽灯便可以用只具有消耗电能性质而没有电感性的理想电阻元件近似地表征。

这样用一个或几个具有单一电磁特性的理想电路元件组成的电路，构成实际电路的电路模型。图 1-2 是手电筒照明电路的电路模型。其中，灯泡是电路的负载，理想化为电阻元件，其参数为 R ；干电池是电源元件，理想化为电压源 U_s 和内阻 R_s 的串联的组合模型；筒体和开关是连接电池和灯泡的中间环节，其电阻可以忽略不计，认为是一无电阻的理想导体。

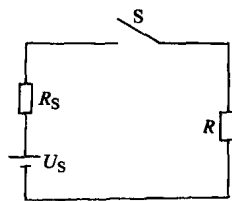


图 1-2 手电筒的电路模型

为了叙述简便，在以后的章节中理想电路元件简称为电路元件，分析的直接对象都是指电路模型。

第二节 电路的基本物理量

一、电流

带电粒子在外力的作用下作有规则的定向移动，便形成电流。金属导体中的电流是导体中的自由电子在电场力的作用下，定向移动而形成的。习惯上规定正电荷的运动方向为电流的方向。电流的大小是以单位时间内通过导体横截面的电荷量来衡量的。即

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

式中， i 表示随时间变化的电流在某一时刻的瞬时值， dq 是在时间 dt 内通过导体横截面的电荷量。

当 dq/dt 为一常数时，表示电流不随时间的变化而变化，称为恒定电流，简称为直流，用字母 I 表示。即

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

电流的国际计量单位（SI）为安培，简称安（A），还可以用千安（kA）、毫安（mA）、微安（ μA ）作单位，它们之间的换算关系为：

$$1 \text{ 千安 (kA)} = 10^3 \text{ 安 (A)} = 10^6 \text{ 毫安 (mA)} = 10^9 \text{ 微安 (}\mu A\text{)}$$

电流的方向是客观存在的。但是在分析和计算较为复杂的电路时，往往事先不能确定电路中电流的实际方向。对于交流电路中的交流电流，其方向是随时间变化的，也无法用一个固定的箭标来表示它们的实际方向。为此，在分析电路时，总是任意选定某一方向为电流参考方向，如图 1-3 所示。而选择的电流参考方向并不一定与电流的实际方向相同。

定义：如果电流的实际方向与电流参考方向相同，则此电流为正值；如与所选电流参考

方向相反, 则电流为负值, 见图 1-3a、b。

电流参考方向除用箭标表示外, 还可
用双下标表示。图 1-3a 中电流参考方向
为 a 指向 b, 可用 I_{ab} 表示, 当参考方向选择
b 指向 a 时, 电流可表示为 I_{ba} , 两者
之间关系

$$I_{ab} = -I_{ba} \quad (1-3)$$

当电流参考方向选定后, 其电流值有
正负之分, 我们可以在选定的电流参考方向下, 根据电流的正负来确定某一时刻电流的实际
方向。

二、电压、电位和电动势

电路分析中用到的另一个电量是电压。电压是衡量电
场力作功能力的物理量, 导体中要形成电流, 必须要有电
场的作用。图 1-4 中电源的两个极板 a 和 b 分别带有正、
负电荷, 在两个极板间存在着电场, 其方向 a 指向 b。当
用导线把负载与电源的正负极连接成一个闭合回路时, 电
源正、负极板上的正、负电荷在电场力的作用下, 从正极
a 经导线和负载流向 b (实际是自由电子由负极移向正
极), 形成电流。

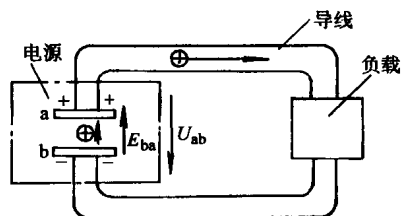


图 1-4 电压与电动势

定义: 电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所作的功, 称为 a、b 两点间的电压, 用符
号 U_{ab} 表示。

在国际单位制 (SI) 中, 电压的单位为伏特, 简称伏 (V)。除伏特外, 常用的电压单位
还有千伏 (kV)、毫伏 (mV) 和微伏 (μV), 它们之间的换算关系为:

$$1 \text{ 千伏 (kV)} = 10^3 \text{ 伏 (V)} = 10^6 \text{ 毫伏 (mV)} = 10^9 \text{ 微伏 } (\mu V)$$

为了分析电路方便, 常指定电路中的任意点为参考点。

定义: 电场力把单位正电荷由 a 点移到参考点所作的功, 称为 a 点的电位, 用符号 V_a
表示。通常把参考点的电位规定为零电位, 电位的单位也是伏特 (V)。

可以证明: 电路中任意两点间的电压等于两点电位差。即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-4)$$

上式同时表明, 电压的实际方向是从高电位点指向低电位点。电路中某点的电位, 即是
该点与参考点之间的电压。

当电路中任意两点间的电压实际方向不能
判断或电压方向随时间变化时, 可以选取任意
点的极性为正, 另一点为负, 称为电压的参考
极性。也可用箭标来表示电压的参考方向, 如
图 1-5 所示。分析电路时, 可根据计算所得结
果的正、负来确定电压的实际方向, 判别方法
与电流相同。

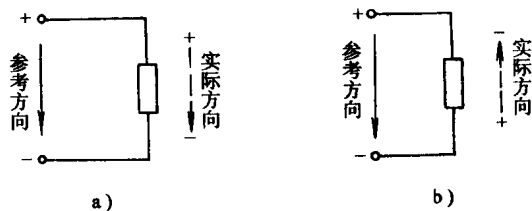


图 1-5 电压的参考方向
a) 电压为正 b) 电压为负

为了维持电流连续在电路中通过,在电源内部应存在着外力(在电池中外力由化学作用产生,在发电机中由电磁感应产生),把流到低电位 b 极的正电荷,移到高电位 a 极,外力作了功,把非电能转换成电能。外力把单位正电荷由 b 极移到 a 极所做的功,定义为电源的电动势,用符号 E 表示。

电动势是描述电源的物理量,其方向在电源内部由负极指向正极,也可用箭标在电路图中表明,如图 1-4 所示。在国际单位制中,电动势单位为伏特 (V)。

电压参考方向的选定与电流参考方向的选定是独立无关的,但为了分析电路的方便,常把电路元件上的电压参考方向和电流的参考方向选择一致,称为关联参考方向,如图 1-6a 所示。当电压和电流的参考方向选择相反时,则称为非关联参考方向,如图 1-6b 所示。

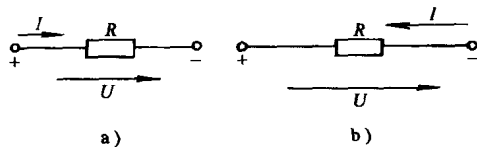


图 1-6 电压和电流的参考方向
a) 关联参考方向 b) 非关联参考方向

三、电功率和电能

电功率定义为单位时间内能量的变化,也就是能量对时间的导数,即

$$P = \frac{dW}{dt}$$

在直流电路中,若已知电路中某元件两端电压和电流,并且电压与电流为关联参考方向时,功率用符号 P 表示则

$$P = UI \quad (1-5)$$

当计算所得功率值为正,即 $P > 0$,表示元件实际吸收或消耗功率;当计算出功率为负,即 $P < 0$,表示元件实际产生的功率。

如果电压和电流为非关联参考方向,功率表达式为

$$P = -UI \quad (1-6)$$

这样规定后,得到结果 $P > 0$ 仍表示实际吸收或消耗功率; $P < 0$ 表示元件产生的功率。

在国际单位制 (SI) 中,功率的单位是瓦特,简称瓦 (W)。功率还可用千瓦 (kW),毫瓦 (mW) 作单位,它们之间的换算关系为

$$1 \text{ 千瓦 (kW)} = 10^3 \text{ 瓦 (W)} = 10^6 \text{ 毫瓦 (mW)}$$

当已知设备的功率为 P ,则 t 秒钟内消耗的电能

$$W = Pt \quad (1-7)$$

若功率的单位取瓦 (W),时间的单位取秒 (s),则电能的单位为焦耳,简称焦 (J)。实际应用中,电能的单位用千瓦时 (kW·h) 为单位,俗称一度电。

$$1 \text{ 度} = 1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

例 1-1 如图 1-7 所示,电路中电流的参考方向已选定。已知 $I_a = 10 \text{ A}$, $I_b = -10 \text{ A}$, $I_c = 5 \text{ A}$, $I_d = -5 \text{ A}$,试指出电流的实际方向。

解: $I_a > 0$, I_a 的实际方向与参考方向相同,电流由 a 流向 b ,大小为 10 A 。 $I_b < 0$, I_b 的实际方向与参考方向相反,电流由 b 流向 a ,大小为 10 A 。 $I_c > 0$, I_c 的实际方向

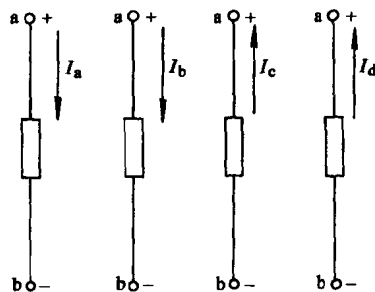


图 1-7 例 1-1 图

与参考方向相同电流由 b 流向 a，大小为 5A。 $I_d < 0$ ， I_d 的实际方向与参考方向相反，电流由 a 流向 b，大小为 5A。

例 1-2 在图 1-8 中，五个元件代表电源或负载，电压和电流的参考方向如图所示。已知： $I_1 = -2\text{A}$ ， $I_2 = 3\text{A}$ ， $I_3 = 5\text{A}$ ， $U_1 = 70\text{V}$ ， $U_2 = -45\text{V}$ ， $U_3 = 30\text{V}$ ， $U_4 = 40\text{V}$ ， $U_5 = -15\text{V}$ 。试计算各元件的功率，并判断哪些元件是电源？哪些元件是负载？并检验功率的平衡。

解：对于元件 1、2、3 电压和电流为关联参考方向，则它们的功率：

$$P_1 = U_1 I_1 = 70 \times (-2) \text{ W} = -140 \text{ W}$$

$$P_2 = U_2 I_2 = (-45) \times 3 \text{ W} = -135 \text{ W}$$

$$P_3 = U_3 I_3 = 30 \times 5 \text{ W} = 150 \text{ W}$$

对于元件 4、5 电压和电流为非关联参考方向，则有

$$P_4 = -U_4 I_1 = -40 \times (-2) \text{ W} = 80 \text{ W}$$

$$P_5 = -U_5 I_2 = -(-15) \times 3 \text{ W} = 45 \text{ W}$$

由计算结果可知：元件 1、2 功率为负，表示这两个元件产生功率，为电源；元件 3、4、5 功率为正，表示这三个元件消耗功率，为负载。

电源产生功率为 $(140 + 135) \text{ W} = 275 \text{ W}$ ，负载消耗功率为 $(150 + 80 + 45) \text{ W} = 275 \text{ W}$ 。可见在一个电路中，电源产生的功率和负载消耗的功率总是平衡的。

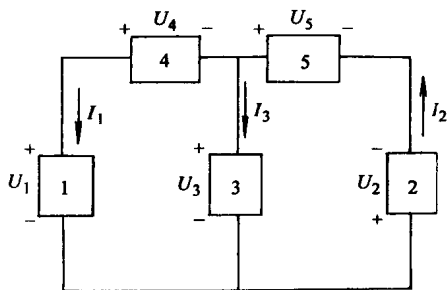


图 1-8 例 1-2 图

第三节 电路的元件

一、电阻元件

电阻元件是实际电阻器的理想化模型，常见的实际电阻器有金属膜电阻器、绕线电阻器及电阻炉和白炽灯等。虽然它们的外形及用途不同，但它们在电路中表现出来的主要性质是相同的，即在电路中有对电流的阻碍作用，并消耗电能。电阻元件有时简称电阻，用 R 表示。电路图中电阻元件符号如图 1-9 所示。

由实验可知，电阻元件中通过电流与其两端电压成正比，即满足欧姆定律。如果电阻元件两端电压 U 和电流 I 为关联参考方向，如图 1-10a 所示，则欧姆定律为

$$U = RI \quad (1-8)$$

若电压 U 和电流 I 为非关联参考方向，如图 1-10b 所示，则欧姆定律为

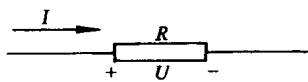


图 1-9 电阻的符号

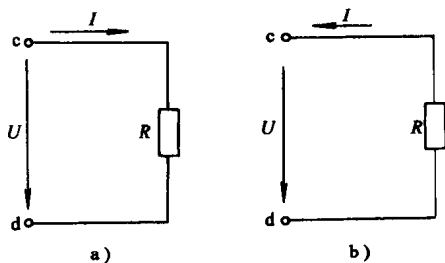


图 1-10 欧姆定律
a) 关联参考方向 b) 非关联参考方向

$$U = -RI \quad (1-9)$$

在国际单位中,电阻的单位为欧姆 (Ω)。除欧姆外,常用的电阻单位还有千欧 ($k\Omega$)、兆欧 ($M\Omega$)。它们之间的换算关系为

$$1 \text{ 兆欧 (M}\Omega\text{)} = 10^3 \text{ 千欧 (k}\Omega\text{)} = 10^6 \text{ 欧姆 (}\Omega\text{)}$$

当把电阻元件两端电压值取为横坐标,流过电流值取为纵坐标,画出 U 与 I 的关系曲线,称为电阻元件的伏安特性曲线。如果伏安特性曲线是一条通过原点的直线,如图1-11所示,称此电阻元件为线性电阻元件。

为叙述方便,在以后章节中,如无特殊说明,电阻元件均指线性电阻元件,简称电阻。这样“电阻”这一名词有时指电阻元件,有时指元件的参数。

当电压和电流为关联参考方向时,电阻元件消耗的功率为电阻两端电压与电流的乘积,即

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R} \quad (1-10)$$

由上式可知,电阻 R 为正实常数,功率 P 与电压 U^2 或 I^2 成正比,故功率 P 总是大于零的,所以任何时刻电阻元件均消耗电功率。它是一种耗能元件。

例 1-3 已知某白炽灯的额定电压是 220V,正常发光时的电流为 0.18A。试求白炽灯电阻。

解: 根据欧姆定律

$$\text{白炽灯电阻} \quad R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.18} \Omega = 1222 \Omega$$

二、电感元件

由物理学可知,当把导线绕制成线圈且通过电流时,在线圈中会产生磁场,该磁场具有一定的能量。在电工技术中,把这样的线圈称为电感线圈,电感元件就是从实际电感线圈中抽象出来的理想化元件。

当电感线圈通过电流 i 时,在线圈中产生磁通 Φ ,如图 1-12a 所示。若磁通 Φ 与线圈的 N 匝都交链,则

$$\Psi = N\Phi \quad (1-11)$$

Ψ 称为线圈的磁链,由于 Φ 与 Ψ 是由线圈本身通过电流 i 产生的,故称为自感磁通和自感磁链。磁链的大小和方向与线圈电流大小和方向有关,当 Φ 的方向与 i 的正方向符合右手螺旋定则,且线圈周围的介质为非铁磁物质时,电感元件的自感磁链 Ψ 与电流 i 的比值为

$$L = \frac{\Psi}{i} \quad (1-12)$$

式中 L 称为电感元件的自感或电感。当 L 为一常数时,元件称为线性电感元件。其电路图形符号如图 1-12b 所示。

在国际单位制中, L 单位为亨利 (H)。有时用毫亨 (mH) 和微亨 (μH) 作为电感的单位,它们之间的换算关系为

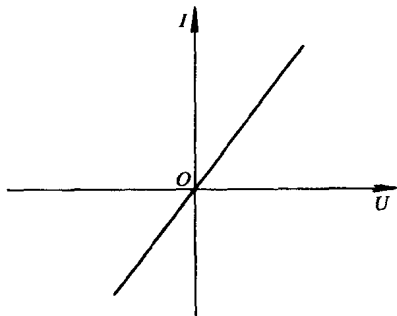


图 1-11 线性电阻元件伏安特性

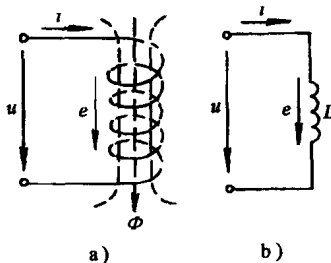


图 1-12 电感元件及其符号
a) 电感元件 b) 电感元件符号