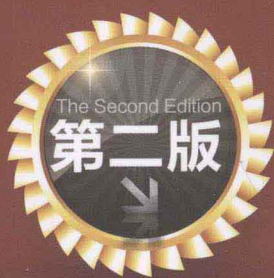




教育部高职高专规划教材

工业电器与自动化

GONGYE DIANQI YU ZIDONGHUA



陆建国 主编

朱凤芝 主审



化学工业出版社

教育部高职高专规划教材

工业电器与自动化

(第二版)

陆建国 主编

朱凤芝 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要对工艺类专业所涉及的电工学基础、电子学基础、电机与电器、工业检测仪表、过程控制仪表和生产过程自动化基础等内容及一些相关知识进行了较全面的介绍。

本书将传统的“电工学”“化工仪表及自动化”进行课程综合化，可配合高职高专工艺类专业完成专业学生的培养目标，可作为高职高专石油、化工、轻工、林业冶金、造纸等相关专业的教材，也可作为工艺操作人员的参考用书。

全书共分两大篇（十单元），第一篇主要描述电工电子基础知识及工业电器的使用；第二篇重点介绍工业仪表及过程自动化基本知识及其应用；通过十七个项目的实施，使学生（员）在培养电器与控制技术应用技能的过程中掌握有关应用知识。

本书配套有多媒体电子光盘，光盘中的内容包括书中各章节的电子教案以及大量的多媒体素材，用图片和动画的形式对各知识难点深入讲解。有助于教学和学生自学。

图书在版编目（CIP）数据

工业电器与自动化/陆建国主编. —2版. —北京：
化学工业出版社，2013.7
教育部高职高专规划教材
ISBN 978-7-122-17720-9

I. ①工… II. ①陆… III. ①电器-自动化-高等职业
教育-教材 IV. ①TM5

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 137614 号

责任编辑：廉 静
责任校对：蒋 宇

文字编辑：孙凤英
装帧设计：王晓宇

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 17 $\frac{3}{4}$ 字数 473 千字 2013 年 9 月北京第 2 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686）

售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：35.00 元

版权所有 违者必究



前言

FOREWORD

本书根据教育部对高职教育的有关要求，内容和形式上都有了新的改革尝试。将工艺类专业传统的“电工学”和“化工仪表及自动化”进行了课程综合化，以适应教学改革以及新时期市场对人才新的要求。全书共分两大篇（十单元），第一篇主要描述电工电子基础知识及工业电器的使用；第二篇重点介绍工业仪表及过程自动化基本知识及其应用；每个单元知识点系统完整、力求够用为度，配以“项目载体”进行学生能力的训练，并附有习题与思考题，是一门真正体现“基于工作过程导向”的教学做一体化教材，在教学方法上倡导“做中学、学中做”工学结合的课程模式。

教学过程中，力求以学生为主体，项目为载体，任务引领，教师指导，由浅入深，由易到难，训练学生正确使用工业常用电器和工业仪表以及过程控制技术的应用能力。值得一提的是本书从形式上有新的突破，本教材随附电子教案，使教学过程变得简捷明了、教学效果明显提高。同时，形式上的安排使得教师根据工艺类专业人才培养方案（教学计划）可以方便地取舍第一篇和第二篇的内容。

本书由常州工程职业技术学院陆建国教授编写第一单元（电工基础）、第三单元（常用电机与电器）、第四单元（安全用电）；天津渤海职业技术学院吉红副教授编写第二单元（常用电子器件及其应用）；江苏常州新东方化工发展有限公司李君华工程师编写第五单元（被控对象）；南京化工职业技术学院王恒强实验师编写第六单元（检测仪表及应用）；天津渤海职业技术学院闰昆讲师编写第七单元（控制仪表及应用）；广西工业职业技术学院秦宇讲师、常州工程职业技术学院陆建国教授编写第八单元（常用控制系统）；湖州职业技术学院高志宏教授编写第九单元（计算机控制系统）；常州工程职业技术学院刘书凯讲师编写第十单元（信号报警与联锁保护系统）；常州机电职业技术学院陆楠主编并制作电子教案，电子教案请登录：www.cip.com.cn 下载。

本书由常州工程职业技术学院陆建国教授、湖州职业技术学院高志宏教授、天津渤海职业技术学院朱凤芝教授、江苏常州新东方化工发展有限公司李华君工程师组成团队进行课程设计。陆建国任主编、高志宏副主编、朱凤芝主审，陆楠主编并制作电子教案。

本书在编写中得到江苏常州新东方化工发展有限公司、常州市巴龙化工有限公司等企业技术人员的大力支持，也得到化学工业出版社的亲切关怀，在此一并表示感谢！

由于编者水平有限，书中难免存在错误，欢迎批评指正。

编者
2013年4月

目录

CONTENTS

绪论	/1
一、课程的改革思路 and 具体做法	/1
二、课程的性质、任务	/1
三、课程总体目标	/2
四、学习方法	/3

第一篇 工业电器基础

电器篇 导言	/4
第一单元 电工基础	/6
第一节 直流电路	/6
第二节 电磁特性	/12
第三节 交流电路特性	/16
第四节 训练项目	/25
项目一 基尔霍夫定律电路板的制作	/25
项目二 日光灯的安装	/26
第五节 习题与思考题	/29
第二单元 常用电子器件及其应用	/31
第一节 常用电子器件	/31
第二节 基本电子电路	/36
第三节 应用举例	/44
第四节 训练项目	/48
项目一 串联型稳压电源的安装与调试	/48
项目二 抢答器的设计与制作	/51
第五节 习题与思考题	/58
第三单元 常用电机与电器	/59
第一节 常用低压电器	/59
第二节 异步电动机	/63
第三节 变压器	/74

第四节	项目训练	/79
项目	三相异步电动机控制电路安装与调试	/79
第五节	习题与思考题	/82
第四单元	安全用电	/83
第一节	电工测量	/83
第二节	安全用电	/86
第三节	训练项目	/92
项目	触电急救与电气消防演习	/92
第四节	习题与思考题	/95

第二篇 工业控制基础

控制篇	导言	/96
第五单元	被控对象	/101
第一节	对象的特性	/101
第二节	训练项目	/104
项目	典型生产过程对象的认知	/104
子任务一	离心泵工艺分析	/105
子任务二	传热设备工艺分析	/106
子任务三	精馏塔工艺分析	/107
子任务四	热水锅炉工艺分析	/108
第三节	习题与思考题	/109
第六单元	检测仪表及应用	/110
第一节	测量概述	/110
第二节	压力检测及仪表	/113
第三节	物位检测及仪表	/119
第四节	流量检测及仪表	/122
第五节	温度检测及仪表	/127
第六节	传感器	/133
第七节	训练项目	/137
项目一	弹簧管压力表的应用与调校	/137
项目二	温度检测系统的构建与联校	/140
项目三	液位变送器的使用与调校	/143
第八节	习题与思考题	/146
第七单元	控制仪表及应用	/147
第一节	常用控制规律	/147
第二节	基本控制器及其应用	/154
第三节	执行器	/161
第四节	训练项目	/167
项目一	差压变送器的应用	/167
项目二	PID调节器的应用	/169
项目三	执行器的应用	/170
第五节	习题与思考题	/172

第八单元	常规控制系统	/174
第一节	概述	/174
第二节	简单控制系统及其控制方案的确定	/178
第三节	控制器的参数整定	/183
第四节	简单控制系统的投运及应用举例	/186
第五节	复杂控制系统	/189
第六节	控制流程图识图	/197
第七节	典型过程控制系统	/201
第八节	训练项目	/207
项目	简单控制系统的参数整定和投运	/207
子任务一	ATS 软件操作方法	/207
子任务二	简单控制系统的参数整定和投运	/208
第九节	习题与思考题	/211
第九单元	计算机控制系统	/213
第一节	计算机控制系统概述	/213
第二节	集散型控制系统	/214
第三节	现场总线控制系统	/224
第四节	可编程控制器及控制技术	/229
第五节	训练项目	/235
项目	典型集散控制系统操作	/235
第六节	习题与思考题	/240
第十单元	信号报警与联锁保护系统	/241
第一节	继电保护基础知识	/241
第二节	自动信号报警及电路	/243
第三节	自动联锁保护及电路	/247
第四节	训练项目	/249
项目	ESD 紧急停车系统操作	/249
第五节	习题与思考题	/261

附 录

附录一	常用压力表的规格及型号	/263
附录二	标准化热电偶电势-温度对照表	/264
附录三	热电阻欧姆-温度对照表	/268
附录四	热电偶、热电阻型号与主要规格	/273

参考文献

绪 论

一、课程的改革思路和具体做法

高等职业教育作为普通高等教育的一支生力军，在整个国民经济中发挥着越来越大的重要作用。社会越来越需要既懂得一定知识，又具有高新技术、较强动手能力的“技术应用”型人才，而人才的培养离不开课程和教材的深化改革。本教材依托化工、制药、环保工程、水泥、造纸等流程行业进行了课程综合化，将传统的“电工学”、“过程自动化”整合成一门技术基础课，从形式上也进行了创新，随纸质教材附带电子教案，以适应高职高专教学改革和教学信息化的需要。

本教材的编写，旨在配合高职高专工艺类专业完成专业学生的培养目标，在以往教材的基础上进行了一些改革，融入了一些高职教学的特色。

(1) 为强调实践教学，重能力培养，每个单元设置了训练项目，是一门真正体现“基于工作过程导向”的教学做一体化教材，教学方法中倡导“做中学、学中做”工学结合的课程模式。教学过程中，力求以学生为主体，以项目为载体，任务引领，教师指导，由浅入深，由易到难，训练学生正确使用工业常用电器和工业仪表以及过程控制技术的应用能力。

(2) 以企业常用的单相电器和典型的三相电器为载体，训练学生工业电器技术的应用能力。

(3) 在校企合作过程中结合实际生产工艺，选择一套装置进行电器应用和自动化技术的运用能力的培养，习惯上按如下步骤进行：首先是对照装置研究各种图纸，特别是带控制点的工艺流程图（简称控制流程图），以了解工艺状况，了解有哪些控制系统、检测系统、信号报警及连锁系统以及这些系统要达到的目的；然后了解这些系统的实施工具及这些工具的使用方法；最后学习整个装置的操作（开、停车等）。

(4) 教材内容力求去旧立新，工厂少用或现已不用的过程控制仪表全部剔除，而广泛使用的知识和技能训练要保留，力求新知识多引入，通过典型项目训练学员的自动化技术应用能力。

(5) 力求打破学科教学体系，从实际出发，以满足工艺专业的需求。

(6) 充分利用多媒体教学这种既直观又易懂的教学方式。电子教案力求围绕文字教材主线，便于教学需求。

二、课程的性质、任务

本课程是工艺类专业的一门技术基础课，倡导知识系统，内容够用为度，重能力培养。

随着科技的进步和技术的发展，现代化工业生产使行业间已经没有了清晰的分水岭，现代化使各专业技术人员之间的界限越来越模糊，所以工艺人员与相关的其他工种工作人员之间要有一定的知识和技能重叠区。作为现代工艺人员除了具备工艺专业的知识和应用能力外，还应具有工业电器的使用和工程识图的能力；操作自控仪器、仪表的能力；自动控制系统开、停车能力；判断、分析及初步处理系统故障的能力；与自控人员合作及实施技改的能力。围绕这些能力的培养，本教材安排了相关内容。通过本课程的学习，要使学生掌握生产过程中常用的电器特性和使用特点及过程控制的基本知识和基本技能；了解过程控制工具的

特性、简单工作原理和正确的使用方法，使学生初步具备参数整定、系统投入运行及系统故障的判断处理等操作技能。

三、课程总体目标

通过本课程的学习和训练，使学生能正确使用工业常用电器，能根据工艺要求选用、安装、调试、调校仪表，能集成、调试、运行典型“简单”和“复杂”控制系统。

（一）能力目标

（1）会使用常用高压电器（例如变压器、三相电动电机等），能处理电气、电子线路、控制电器的一般故障。

（2）能够根据工艺与控制要求合理选用常用的温度、压力、流量和物位检测仪表。

（3）明确工艺要求，能够读懂、并能规范地绘制常用带控制点的工艺流程图。能根据仪表技术说明书的要求正确使用常用检测仪表，能对变送器实施正确的调零、零点迁移、量程扩展操作；能根据现场仪表技术说明书的维护要求，能对现场仪表的常见故障和线路故障合理分析，并加以排除。

（4）能根据工艺和控制要求，合理选择控制规律。

（5）能根据工艺要求，正确选择执行器并熟悉简单控制系统。

（6）能根据被控变量和系统特点，合理设置 PID 相关参数。较熟练地运用经验试凑法、临界比例度法、衰减曲线法三种工程整定方法，对简单控制系统实施投运、调试和运行，使系统在稳定性、准确性和快速性的三项指标基本优化，满足工艺要求。

（7）会调试串级控制系统。

（8）会处理紧急事故，操作运行自动报警和联锁保护系统。

（9）会进行 DCS 控制系统硬件选型、基本组态；会简单、串级控制系统的调试与投运；会 DCS 控制系统的上电、运行、停车等；会 DCS 控制系统的 PID 参数整定；会做好调试记录。

（二）知识目标

（1）掌握电路的组成，单相、三相电路；三相异步电动机、变压器、常用电子电路的特点和使用方式。

（2）掌握常用工业过程控制系统的组成、原理与特点，熟悉其适用场合。理解被控变量、操纵变量对系统性能的影响，掌握被控变量与操纵变量的合理确定方法。

（3）掌握常用过程检测仪表的结构与测量原理与使用特点；理解各种 PID 控制规律对系统的作用，掌握其使用方法。

（4）掌握 DCS 的基本概念和基本组成；掌握 DCS 体系结构及各层次的主要功能；了解 DCS 现场控制站的主要组成部分、基本功能；了解操作站的基本构成及功能；了解通信网联络的基础知识；掌握系统配置原则及 I/O 卡件选择原则；熟悉系统的维护和调试方法；了解一种 DCS 软件系统的主要内容；了解一种 DCS 的组态功能；掌握一种组态软件对简单控制系统和串级控制系统的组态；掌握一种流程图制作软件的基本用法；掌握操作站实时监控画面的调用方法。

（三）素质目标

教学过程中，力求以学生为主体，以项目为载体，任务引领，教师指导，由浅入深，由易到难，实施“项目化”教学方式，锻炼同学们的安全、环保、合作、竞争、领导、服从、答辩方面的素质。

四、学习方法

本课程实践性很强，学习过程中，提倡眼、脑、手并用，在条件允许的情况下，提倡多深入工厂观察、了解，建立感性认识，带着问题进入课堂，有目的地学习各部分知识，在用眼、用脑的同时还要多动手，对所学的过程控制仪表，要做到“面熟”、“手熟”，通过各种实验、多媒体教学，实现知识的“回放”，再深入工厂，实现知识的“归位”和技能的“强化”。学习中不可死记硬背，不可脱离实际，学习某一块仪表不是目的，重要的是，通过某一部分内容的学习总结出共性的东西，以便举一反三、触类旁通。培养在实践中发现问题、提出问题的能力；培养将理论运用到实践、用理论指导实践的能力；培养动手能力；培养自学能力、自我发展能力，这些就是本课程的最终目的。

第一篇

工业电器基础

电器篇导言



在工业生产中，电的应用极为广泛。电气化的程度已成为衡量一个国家生产技术和综合国力的主要标志之一。

电之所以得到广泛应用其有下列一些重要特点。

一、电的特点

(1) 转化容易。作为能量，电能可以方便地由水电、热能、化学能、原子核能、光伏材料及太阳能、风能等转换而来，成为廉价的动力来源。

(2) 传输方便。作为能量，高电压远距离传输电能时损失小、效率高；并且容易分配到各个工业电器及常用负载上。

(3) 便于控制和测量。电能和电信号的有关量值便于准确而迅速地进行控制和测量，利用电信号还可以对电量以及各种非电量进行遥控和遥测，这些都为自动化生产提供了必要的有利条件。

二、常用的工业电器及电子设备

常用的工业电器及电子设备很多，考虑到本教材主要面向“工艺类”专业高职技能型人才的培养，主要介绍常用的电源、动力设备、传输设备、基本电子设备的特点及使用注意事项，主要以三相电机、单相电源、三相电源以及照明电路和基本电子电路为典型载体，训练学员的工业电器选择、安装及使用能力的培养。

三、工业电器篇课程目标

(一) 能力目标

(1) 能执行电气安全操作规程；能采用安全措施保护自己及工作安全；会进行触电及电气火灾的现场处理。

(2) 会使用与保养电钻、紧固工具、电工刀、剥线器、压接钳、电烙铁、弯管机等电工

工具；会使用与保养验电笔、兆欧表、万用表等电工仪表；会使用与保养电流表、电压表、电能表、功率表等测量仪表。

(3) 会进行简单直流电路连接、测试，证明常用“电路分析定律”。

(4) 会用电工测量工具判断单相和动力供电系统。

(5) 能进行内外线路的敷设与安装。

(6) 会进行典型工业电器（三相异步电动机）的常规使用；会采取常用触电保护措施。

(7) 会进行三相异步电动机的拆装与维修。

(8) 会进行小型变压器的绕制。

(9) 能识别常用低压电器的电路图形、文字符号及基本结构；能根据设计要求选择、使用熔断器、低压断路器、开关、交流接触器、继电器（热继电器、中间继电器、空气阻尼式等）；能检测、调整热继电器和时间继电器。

(10) 能绘制三相异步电动机常用控制电气图；并制作控制电路板；调试、检修。

(11) 会执行安装工艺；会地线布置与连接。

(12) 能进行典型机床电气线路的故障诊断与检修。

(二) 知识目标

(1) 掌握电路的组成及其电参量的基本概念。

(2) 掌握常用电路分析定律及其应用。

(3) 熟悉单相正弦交流电的基本概念；了解 RLC 电路特点。

(4) 熟悉三相交流电路的基本概念和使用特点。

(5) 了解常用工业电器及其使用特点。

(三) 素质拓展目标

(1) 认识常用电工技术学习的基本方法，培养一定的逻辑思维能力，善于从不同的角度发现问题，积极探索解决问题的方法。

(2) 养成独立思考的学习习惯，能对所学内容进行较为全面的分析和比较，总结和概括，学会举一反三，灵活应用，培养电气维修技术的综合应用能力。

(3) 善于借鉴他人经验，发挥团队协作精神，培养学生的团队意识、组织协调能力、创新思维能力。

(4) 养成“安全用电”的良好习惯。

第一单元

电工基础



关键词

直流电路、交流电路、电源、负载、电路中间环节、交流电路的有效值。

学习目标

知识目标

熟悉电路的组成、电参量的含义及表示方式；
掌握单相交流电的组成及三要素；了解 RLC 电路特点；
了解自感、互感现象；
熟悉三相交流电路及连接方式。

能力目标

会使用常用电工仪器仪表；
能设计简单直流电路并通电调试，会用常用电路定律分析电路；
能根据电路图安装日光灯调试并会排除常见故障。

第一节 直流电路

一、电路的组成及物理量

(一) 电路的组成

电在各行各业有着广泛的应用。电的应用主要分为两种形式，一是作为能源加以利用，通过电源与用电设备进行能量的传输、分配和转换，将电能转换为光能、热能和机械能等形式，例如，常见的照明电路、工厂电力系统等；另一种是作为信号加以利用，能够实现信号的产生、传递和处理，将电信号转化为声音和图像等形式，主要应用于通信和医学领域。

在实际应用中，将电器件和电设备按照一定的方式连接在一起形成各种电路（电流流通的路径）。电路由电源、负载和中间环节（包括连接导线、控制保护设备）组成。对于一个完整的电路，其负载和中间环节称为外电路，电源内部称为内电路。

1. 电源

图 1-1 所示的电路是生活中最常见的照明电路。图中的电池即为电源，是电路中提供能量的设备，它将其他形式的能转换为电能。发电机、电池等都是常用的电源。

2. 负载

图 1-1 中的电灯泡为负载，它消耗电能，将电能转换为热能，使灯丝白炽化而发光，用来照明。负载是将电能转换为其他形式能量的设备。电动机、电炉等都是常用的负载。

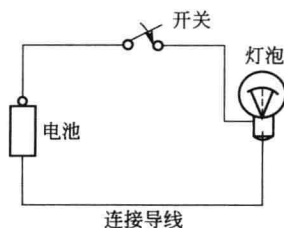


图 1-1 电路组成示意图

电源与负载的区别主要是能量转换的方向不同。

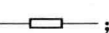

3. 中间环节



图 1-1 中的开关和连接导线为中间环节。当开关闭合时通过导线将电池与灯泡连接起来,使电流通过,导致灯泡发光,实现照明。在电路中间环节中,导线用来传输和分配电能,控制、保护设备实现对电路的通断控制和保护功能。

(二) 电路的常用元件符号

分析电路时,往往是对电路模型进行分析计算,而不是实际电路。可将电路中的理想元件用常用的元件符号代替,使电路图得到简化。常见的电路元件符号如下。

电源: ; 灯泡: 

电阻: ; 电容: 

开关: ; 熔断器: 

按照上面介绍的电路元件符号,则图 1-1 可以简化为图 1-2 的电路元件符号图。

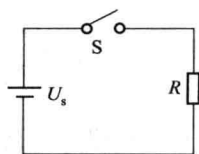


图 1-2 电路元件符号

(三) 电路的物理量及参考方向

1. 电流

电荷有规律地定向运动形成电流,电流不仅有大小,也有方向。

单位时间内通过导体横截面积的电量为电流强度,简称电流,用符号 I 或 i 表示。在国际单位制中,电流的单位为 A (安培),常用单位还有 mA (毫安)、 μA (微安),其换算关系为: $1\text{A}=10^3\text{mA}$, $1\text{A}=10^6\mu\text{A}$ 。

规定正电荷运动的方向为电流的方向。在较为复杂的电路中往往难于事先确定电流的实际方向。所以分析电路时,一般先假定电流方向,用箭头标出,该方向称为电流的“参考方向”。按照标注的“参考方向”计算电路,当电流为正值时,表示电流的实际方向与参考方向一致;反之,则表示电流的实际方向与参考方向相反。因此,在指定的电流参考方向下,根据电流的正负,就可以确定电流的实际方向。所以在分析电路时,首先必须在电路中标注出“参考方向”。

2. 电压与电位

(1) 电压 电压是衡量电场做功能力大小的物理量。电场中(或电路中)任意两点 a 、 b 之间的电压,等于电场力将电荷从 a 点移到 b 点所做的功与电荷的比值,即: $U_{ab} = \frac{W_{ab}}{q}$ 。

电压用符号 U 或 u 表示,在国际单位制中,电压的单位为 V (伏特)。常用单位还有 mV (毫伏)、kV (千伏),其换算关系为: $1\text{V}=10^3\text{mV}$, $1\text{kV}=10^3\text{V}$ 。

电压的方向是由高电位指向低电位,即电位降的方向。

电荷在电场力的作用下移动而做功,必然会有能量的消耗。单位正电荷在电场中不同位置具有不同的能量,这一能量称为电位能。高电位正电荷的能量大;低电位正电荷的能量小。因此,在电场力的作用下,正电荷总是从电位高的地方向电位低的地方移动。

(2) 电位 电位在物理学中又称为电势。在电路中任选一点为参考零点,则电路中任意一点相对于参考点之间的电压即为该点的电位,其单位也是 V (伏特)。两点间的电压,高电位端为“+”极,低电位端为“-”极。

分析较复杂电路时,往往事先无法确定电压的极性,故需先指定电压的参考极性(或参考方向)。电压的“参考方向”可以用箭头表示,也可以用“+”、“-”极表示,还可用双下标表示,例如 U_{ab} ,表示 a 点为“+”极, b 点为“-”极。电路中电压的“参考方向”选定后,当电压为正值时,表示电压的实际方向与参考方向一致,反之,表示电压的实际方



图 1-3 关联参考方向

为电阻电压的“+”极性端, 电流流出端为电阻电压的“-”极性端。图 1-3(b) 为“电源”的关联参考方向, 电流从电源的“+”极流出, 从电源的“-”极流入。

电压与电位有着密切的联系, 电路中两点 a 、 b 之间的电压等于两点电位之差, 即 $U_{ab} = U_a - U_b$ (U_{ab} 为 a 、 b 两点之间电压, U_a 为 a 点电位, U_b 为 b 点电位)。但电压与电位也有区别, 电压与电路的参考点选择无关, 而电位却与电路中参考点的选择有着密切的关系。

【例 1-1】 电路如图 1-4 所示, 求分别以 d 点和 c 点为参考点时各点的电位, 并估算电压 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{cd} 、 U_{da} 的值。

解: (1) 以 d 点为参考点。

$$U_d = 0$$

$$U_b = 4\text{V}$$

$$U_{ab} = U_a - U_b = 9 - 4 = 5\text{V}$$

$$U_{cd} = U_c - U_d = 1 - 0 = 1\text{V}$$

$$U_a = 5 + 4 = 9\text{V}$$

$$U_c = -3 + 4 = 1\text{V}$$

$$U_{bc} = U_b - U_c = 4 - 1 = 3\text{V}$$

$$U_{da} = U_d - U_a = 0 - 9 = -9\text{V}$$

(2) 以 c 点为参考点。

$$U_c = 0 \quad U_a = 5 + 3 = 8\text{V}$$

$$U_{ab} = U_a - U_b = 8 - 3 = 5\text{V}$$

$$U_{cd} = U_c - U_d = 0 - (-1) = 1\text{V}$$

$$U_b = 3\text{V} \quad U_d = -4 + 3 = -1\text{V}$$

$$U_{bc} = U_b - U_c = 3 - 0 = 3\text{V}$$

$$U_{da} = U_d - U_a = -1 - 8 = -9\text{V}$$

从本题中可以看出: 参考点变化时, 各点的电位也会发生变化, 而各点的电压保持不变, 即电位与参考点有关, 而电压无关。

3. 电动势

电动势是衡量外力做功的物理量, 外力克服电场力把单位正电荷从负极移到正极所做的功被称为电动势, 一般用符号 E 表示, 单位为 V (伏特), 如图 1-5 所示。

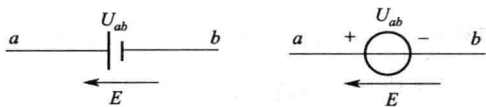


图 1-5 电动势示图

电动势的方向是由电源负极指向正极。电动势的方向指向电位升, 而电压的方向指向电位降。

4. 电阻与电导

电阻是反映某一导体对电流阻碍作用大小的物理量, 这一阻碍作用的大小由电阻值来表征, 用符号 R 表示。在国际单位制中 (SI 制中) 电阻的单位是 Ω (欧姆), 简称为欧。电阻还常用 $\text{k}\Omega$ (千欧) 和 $\text{M}\Omega$ (兆欧) 表示, 它们之间的转化关系为:

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

电阻是实际电路中电阻器的理想化模型, 实际电路中的白炽灯、电炉、甚至某些半导体元件, 也可看作电阻。电阻在电路工作中要消耗电能, 并将电能转化为热能、光能等其他形式的能。

导体的电阻与导体的材料和几何形状有关, 对于一个电阻率为 ρ 的材料制成的长度为 l , 均匀截面 S 的导线电阻值为: $R = \rho \frac{l}{S}$ 。

电阻的倒数称为电导，它也是反映导体导电能力的物理量，电导一般用字母 G 表示，即 $G = \frac{1}{R}$ ，在 SI 制中，电导的单位为 S（西门子），简称为西。

【例 1-2】 直径为 2.6mm、长度为 1km 的铜线的电阻是多少？其电导是多少？

解：直径为 2.6mm 的导线截面积

$$S = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 = 3.14 \times \left(\frac{2.6 \times 10^{-3}}{2} \right)^2 = 5.31 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

已知铜的电阻率为 $\rho = 1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}^2$

铜的电阻为 $R = \rho \frac{l}{S} = 1.7 \times 10^{-8} \times \frac{10^3}{5.31 \times 10^{-6}} = 3.2 \Omega$

铜线的电导为 $G = \frac{1}{R} = \frac{1}{3.2} = 0.3125 \text{ S}$

5. 功率

电流流过电路时，不断发生能量的转换。有的元件吸收电能，将电能转换成其他形式的能量，有的元件将其他形式的能转换为电能，向电路供出能量。为了表征电路中某一段吸收或产生能量的速率，引入了电功率的概念。电功率一般用字母 P 表示，在 SI 制中 P 的单位是 W（瓦特），简称为瓦，也常用 kW（千瓦）来表示，其换算关系为 $1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$ 。

在直流电路中功率表示为：

$$P = UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R$$

二、欧姆定律

（一）部分电路欧姆定律

德国物理学家欧姆经过精确实验发现导体中电流 I 的大小与加在导体两端的电压 U 成正比，其比值为电阻 R ，这个关系称为部分电路欧姆定律。

即：
$$R = \frac{U}{I} \text{ 或 } U = RI$$

如图 1-6 所示，电阻两端电压为 U ，通过电阻的电流为 I ，则其电阻为： $R = \frac{U}{I}$ 。

应用部分电路的欧姆定律时必须注意以下几点。

(1) 电流、电压、电阻三个物理量必须属于同一电路，并在同一时刻才有上述关系。

(2) 这段电路中不含有电源，否则不能用上式进行计算。

(3) 电阻元件必须是线性电阻（所谓线性电阻，就是在额定工作电压下，无论电压如何变化，电阻的阻值特性不变），电流才和电压成正比关系。如图 1-7 所示。

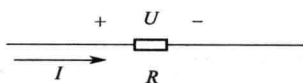


图 1-6 部分电路示意图

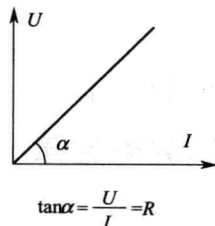


图 1-7 伏安特性曲线