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

工业电器与自动化

开　俊　主编
尹廷金　主审

化学工业出版社
教材出版中心
·北京·

本书叙述了电工、电子技术、电动机及控制、变压器和安全用电等基本知识；介绍了过程检测仪表、过程控制仪表、可编程控制器、常规控制系统和新型集散控制系统的组成、基本工作原理和使用方法；同时介绍了与之相关的基本实验、综合实验及典型单元仿真操作等实践内容。

本书遵循“必须、够用”为度的职业教育原则，以培养技能应用型人才为目标，深入浅出、突出实际、选材新颖，重在提高学生的应用能力。

本书可作为职业院校化学工艺及相关专业的教材，也可供从事石油化工、轻工、制药、冶金和电力等行业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工业电器与自动化/开俊主编．—北京：化学工业出版社，2006.6
中等职业教育国家规划教材
ISBN 7-5025-9035-8

Ⅰ．**工…** Ⅱ．**开…** Ⅲ．**电器-自动化-专业学校-教材** Ⅳ．TM5-39

中国版本图书馆 CIP **数据核字**（2006）**第** 071090 **号**

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
工业电器与自动化
开　俊　主编
尹廷金　主审
责任编辑：张建茹
文字编辑：徐卿华
责任校对：陈　静　宋　夏
封面设计：关　飞

*

化学工业出版社
教材出版中心 **出版发行**
（**北京市朝阳区惠新里** 3 **号　邮政编码** 100029）
购书咨询：(010)64982530
(010)64918013
购书传真：(010)64982630
http://www.cip.com.cn

*

新华书店北京发行所经销
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
三河市延风装订厂装订
开本 787mm×1092mm　1/16　**印张** 16¾　**字数** 404 **千字**
2006 **年** 8 **月第** 1 **版**　　2006 **年** 8 **月北京第** 1 **次印刷**
ISBN 7-5025-9035-8
定　价：25.00 **元**

版权所有　违者必究
该书如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责退换

前　言

本书以教育部最新审定的中等职业教育国家重点专业（化学工艺专业）骨干课程《工业电器与仪表》教学大纲为编写依据，作为国家面向21世纪中等职业教育教材。

根据教材编写中要体现出新知识、新工艺、新技术、新方法的“四新”原则，以及反映时代要求，具有一定的先进性和前瞻性原则，本书在教学内容的安排上同以往教材相比有较大的改变。针对培养化学工艺专业生产一线中初级专门人才的实际需要，以满足工艺专业岗位人员的实际能力需要为出发点，从适应当今自动化技术发展的需要，适应各种新技术所带来的变化的需要出发，努力突破以学科为本位的思维模式，对过去相对独立的课程体系和知识进行了重新分析和整合，并将一些新技术的发展和应用系统、有机地融合进教学内容中。

全书从《电工学》、《电子技术基础》、《过程检测仪表》、《过程控制仪表》、《过程控制系统》等方面精选内容，分3篇共13章进行介绍。第1篇主要介绍电工、电子学的基本常用术语、基本概念和常识性知识，同时对工业生产中常见电气设备的结构和使用做了介绍。在第2篇中除了对一些过程检测仪表、过程控制仪表、生产过程自动化的基本知识和基本操作等传统知识作介绍外，还融入了新型智能仪表、可编程控制器、新型集散控制系统、总线控制系统等新技术方面的内容，以适应当代技术发展的趋势。

为贯彻以人为本、以能力培养为本的教育指导思想，本书在教学内容的安排中，对理论知识部分，本着以够用为度的原则，尽可能减少理论推导分析及电路分析，着力降低理论要求；同时为提高学生的动手能力和综合应用能力，特将基本实验和综合实验单独列出，作为全书的第3篇内容。

本书由开俊主编，蔡夕忠、张洪参与改编工作。其中绪论部分，第1～6章和基本实验1～4，综合实验1、2由开俊执笔；第7、8、10、11章和基本实验5、6，综合实验3、4由蔡夕忠执笔；第9章由张洪执笔。

本书在改编过程中，得到了全国化工中等职业教育教学指导委员会的关怀和广大职业院校及化学工业出版社的大力支持。改编工作中参考了相关资料，主要参考资料附后，在此一并表示感谢。

限于作者水平，本书不妥之处希望得到读者的批评指正。

编　者

2006年6月

目　　录

绪论 …… 1

第 1 篇　工业电器基础

1　电工技术基础 …… 6
1.1　直流电路特性 …… 6
1.2　电磁特性 …… 13
1.3　交流电路特性 …… 17
本章小结 …… 27
习题 1 …… 28
2　电子技术基础 …… 29
2.1　基本电子元件及特性 …… 29
2.2　整流与滤波电路 …… 33
2.3　交流放大电路 …… 35
2.4　直流放大器与稳压电路 …… 38
2.5　线性集成电路与运算放大器 …… 40
2.6　脉冲与数字电路 …… 42
2.7　模/数与数/模转换 …… 47
本章小节 …… 47
习题 2 …… 48
3　变压器 …… 49
3.1　变压器的结构及工作原理 …… 49
3.2　变压器的分类 …… 51
3.3　变压器的铭牌 …… 53
本章小结 …… 55
习题 3 …… 55
4　异步电动机 …… 56
4.1　三相异步电动机的结构 …… 56
4.2　三相异步电动机的工作原理 …… 58
4.3　三相异步电动机的额定值及铭牌 …… 59
4.4　三相异步电动机的启动、制动及正反转控制 …… 61
4.5　单相异步电动机 …… 65
4.6　常用低压电器 …… 67
4.7　电动机的运行维护 …… 72
本章小结 …… 74
习题 4 …… 74
5　电工量的检测与仪表 …… 75
5.1　检测过程及检测误差 …… 75
5.2　电流、电压、功率、电能测量及仪表 …… 78

5.3 万用表 …… 85
5.4 数字式仪表 …… 87
本章小结 …… 90
习题5 …… 91
6 安全用电及节约用电 …… 92
6.1 化工企业供电 …… 92
6.2 电气安全 …… 93
6.3 触电急救 …… 98
6.4 节约用电 …… 98
本章小结 …… 100
习题6 …… 100

第2篇 工业自动化系统

7 过程控制系统概述 …… 101
7.1 过程控制系统的作用及组成 …… 101
7.2 过程控制系统的品质指标 …… 106
7.3 控制系统中控制器的选择 …… 111
7.4 简单控制系统的投运及参数整定 …… 117
7.5 简单控制系统实例 …… 121
本章小结 …… 124
习题7 …… 125
8 常见控制方案 …… 126
8.1 复杂控制系统简介 …… 126
8.2 安全保护系统 …… 134
本章小结 …… 138
习题8 …… 139
9 过程检测仪表 …… 140
9.1 过程检测仪表的分类 …… 140
9.2 压力、物位检测仪表 …… 140
9.3 流量检测仪表 …… 144
9.4 温度检测仪表 …… 148
9.5 变送器 …… 152
本章小结 …… 153
习题9 …… 155
10 过程控制装置 …… 156
10.1 过程控制仪表概述 …… 156
10.2 过程控制仪表的使用 …… 158
10.3 可编程控制器概述 …… 163
10.4 执行器 …… 177
本章小结 …… 181
习题10 …… 182

11 集散控制系统简介 …… 183
11.1 计算机控制与计算机控制系统的组成 …… 183
11.2 集散控制系统的特点及构成 …… 187
11.3 典型集散控制系统的操作 …… 188
11.4 现场总线控制系统 …… 204
本章小结 …… 207
习题 11 …… 207

第 3 篇 应用与实践

12 基本实验 …… 209
12.1 直流电路基本特性实验 …… 209
12.2 三相交流电路负载连接演示实验 …… 212
12.3 三相异步电动机的启动及控制实验 …… 216
12.4 电工量检测及万用表使用实验 …… 219
12.5 串级控制系统操作实验 …… 221
12.6 PLC 控制器应用实验 …… 223
13 综合实验 …… 225
13.1 日光灯电路的安装及功率因数的提高实验 …… 225
13.2 温度检测系统组成实验 …… 229
13.3 控制系统参数整定和投运实验 …… 231
13.4 典型化工单元控制系统（仿真）操作实验 …… 234

附 录

附录一 常用热电偶分度表 …… 251
附录二 常用热电阻分度表 …… 257

主要参考文献 …… 259

绪　论

（1）本课程的性质与任务

现代化学工业作为一个技术密集型行业，生产过程的电气化和自动化程度日益提高，新型电气设备及工业自动化仪表得到广泛应用。借助于自动检测、控制仪表对生产装置和生产过程的温度、压力、流量、物位以及物体成分等变量进行实时检测和控制，将能保证在密闭的管道和设备中进行的化工生产的整个过程安全稳定，保证合格的产品质量。

化工生产过程通常具有高温、深冷、高压、易燃、易爆、有毒、腐蚀等特点，无一例外都是由生产设备、动力装置、自动化仪表设备来构成的，工艺操作人员要维持生产的安全稳定进行，必须通过正确操作有关自动化仪器设备来实现。作为工艺专业岗位人员，除掌握必要的工艺生产专业知识外，必须了解生产中一些动力装置的正确操作方法，了解日常供电和安全用电的基本常识，熟悉、掌握化工厂中常见电气设备和检测控制仪表的性能以及操作方法，具有工业电器的使用和工程识图能力，操作自控仪器及仪表的能力，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，以便正确地使用和操作这些设备和仪表，确保工艺生产的安全正常进行，完成工艺专业岗位的任务。

本课程属工艺专业的主干课程，是化工类专业学生必修的、具有较强综合性的一门技术课程。通过学习、实验、实训等教学环节，了解、掌握化工厂中常用电气设备、检测控制仪表以及生产过程自动化的基础知识，为今后正确使用和操作电气设备、仪器仪表打下基础。

本课程的内容涉及电工学基础、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课程内容，将传统的“电工学”及“过程自动化”整合成一门技术基础课。为配合工艺类专业完成专业的培养目标，本教材在原《工业电器与仪表》的基础上进行了一些改革，内容上做了调整更新。

（2）课程框架与内容

根据教育部《关于大力加强职业教育的意见》精神，为满足化工类专业教学的需要，贯彻以人为本、以能力为本的教育指导思想，本教材在吸取传统教材精华的基础上，从工艺专业岗位人员实际能力需要出发，对相关教学内容进行优化整合。具体来说，主要有以下几个方面的考虑。

① 教材框架分为理论和实践两大部分，着力降低理论要求，不再进行微观分析和理论公式推导，注重特性和实用技术介绍。实践部分设置了较多的实验内容，注重实践性和实用性。内容阐述上力求简明扼要，通俗易懂，深入浅出，启发性与实用性体现明显。内容选择上力求与生产实际相结合，适应职业教育培养岗位型、实用型、应用型人才的改革思想。

② 教材内容力求去旧立新，除广泛使用的知识保留外，尽可能删减陈旧内容，工厂少用或现已不用的过程控制仪表全部剔除，突出新知识、新技术、新工艺和新方法的介绍。

③ 对于基础电工学和电子学部分，仅介绍基本概念和简单电路计算方法，不在深层

次上作进一步分析，主要使学生了解电工学和电子学的基础知识。

④ 对教材中所涉及的电气设备和仪表，均不进行内部电路分析，对工作原理和机器结构部分也仅作介绍，重点放在常用电气设备和仪表的正确使用及操作方面，突出实际操作能力的培养。

⑤ 生产过程自动化方面的内容，以满足正确使用电气设备和检测控制仪表的知识需要为前提，从满足教学的“必须、够用”出发，选择整合教学内容。

⑥ 集散控制系统和可编程控制器在现代化工生产中的应用日益增多，发展日新月异，但各企业所用的集散系统和可编程控制器的类型并非完全统一。就教材而言，不可能将所有类型的集散控制系统和可编程控制器内容全部予以罗列，仅对使用较为普遍的集散控制系统和可编程控制器作介绍。

综合上述原则考虑，本课程的内容有以下几方面的内容。

① 电工学、电子学知识　以岗位操作中所必备的电工学、电子学基础知识为要点，介绍一般电路的组成、简单电路的基本计算方法、电磁感应现象、基本电子元器件的特性与作用、简单放大电路的组成及作用等一些常识性概念。掌握此部分内容对后续的常用电器和仪表部分的学习有重要作用。

② 常用工业电气设备　此部分内容包括变压器原理及作用、电动机的使用与控制、常见电工量测量方法及常用电工测量仪表的使用、常用低压电器的使用、安全用电和节约用电常识等。

③ 工业检测及控制仪表　此部分主要介绍工业生产过程中温度、压力、物位、流量、物质成分等工业参数测量方法，介绍相关检测仪表的特性、结构及使用方法，讲述常用工业控制仪表的作用原理、结构及同工业检测仪表的配合使用。教学重点放在仪表的操作使用上。

④ 生产过程自动化基础　结合工艺参数测量和检测仪表、控制仪表的使用，讲述生产过程自动控制系统的常用术语、系统一般构成、过程控制系统的动作过程。简述常见工业生产过程的基本特性和常用调节控制方法，重点讲述过程控制仪表对控制系统的作用及其操作方法。介绍工程常用图符、带检测点工艺流程图和常见信号报警电路的识读方法。

⑤ 新型控制仪器和新型控制系统介绍　此部分内容为选修内容，旨在通过对一些新型控制仪表和新型控制系统的介绍，拓宽学生的知识面，达到素质培养的目的。通过对典型可编程控制器（PLC）的特性、组成、发展与操作使用的介绍和对典型集散控制系统（DCS）的特性、组成、操作使用的介绍，使学生基本了解新型控制仪表和新型控制系统的一般操作使用方法与发展趋势。

（3）课程内容概述

化工生产过程中，为保证产品质量，保证生产正常、安全、高效、低耗地进行，就必须将能影响产品质量和生产过程的压力（p）、物位（L）、流量（F）、温度（T）及物质成分（A）等几大热工变量控制在规定的范围内。由于化工生产过程的容器和设备常常是密闭的，生产条件也多处于高温、深冷、高压或真空等超常状态，且多数工艺介质还具有易燃、易爆、有毒、有腐蚀性等性质，因此，化工生产过程的控制多数情况下是人力难以达到的，需借助于电气化和自动化手段，在生产设备上配备一些自动控制装置，取代操作人员的手工作业，使生产在一定程度上自动地进行。这种用自动控制装置来管理生产过程的办法，称为生产过程的自动控制，简称过程自动化。

① 过程控制系统的分类　过程控制系统一般分为生产过程的自动检测、自动控制、自动报警与联锁、自动操纵四大类。

□过程自动检测系统。利用各种检测仪表自动连续地对相应的工艺变量进行检测，并能自动指示或记录的系统，称为过程检测系统。

□过程自动控制系统。用自动控制装置对生产过程中的某些重要变量进行自动控制，使受到外界干扰影响而偏离正常状态的工艺变量，自动地回复到规定的数值范围的系统。

过程的自动控制系统可分为定值控制系统、程序控制系统、随动控制系统三种，生产过程中“定值控制系统”使用最多，因此常以定值控制系统为例来讨论过程自动控制系统。

□过程自动报警与联锁保护系统。对一些关键的生产变量，应设有自动信号报警与联锁保护系统。当变量接近临界数值时，系统发出声、光报警，提醒操作人员注意。变量接近临界值、工况接近危险状态时，联锁系统立即采取紧急措施，自动打开安全阀或切断某些通路，必要时紧急停车，以防止事故的发生和扩大。

□过程自动操纵系统。按预先规定的步骤，自动地对生产设备进行周期性操作的系统。

② 过程控制仪表的分类　过程控制仪表是实现过程控制的工具，种类繁多，功能不同，结构各异，按不同的角度可以有不同的分类方法。

□按功能不同，可分为检测仪表、显示仪表、控制仪表和执行器。

检测仪表　包括各种变量的检测元件、传感器和变送器。

显示仪表　有模拟量和数字量及屏幕显示形式。

控制仪表　包括气动、电动控制仪表和计算机控制装置。

执行器　有气动、电动、液动等类型。

这些仪表之间的关系如图 0-1 所示。

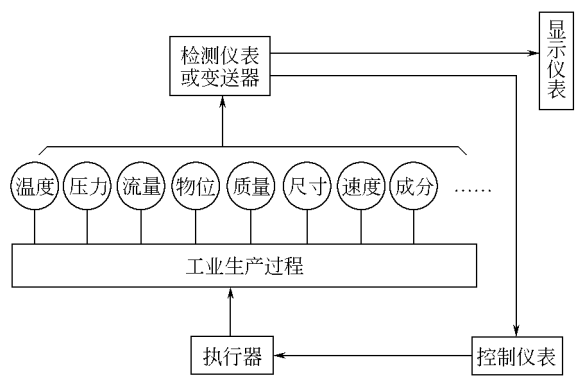


图 0-1　过程控制仪表的关系图

习惯上，常将显示仪表列入检测仪表范围，将执行器列入控制仪表范围，后续章节里将分别予以介绍。

□按使用的能源不同，可分为气动仪表和电动仪表。

气动仪表　以压缩空气为能源，性能稳定，可靠性高，防爆性能好，且结构简单，特别适合于石油、化工等有爆炸危险的场所。气信号传输速度慢、传送距离短、仪表精度低，不能满足现代化生产的要求，因此很少使用。但由于其天然的防爆性能，所以气动薄膜调节阀的应用仍然非常广泛。

电动仪表　以电为能源，信息传递快，传送距离远，是实现远距离集中显示和控制的理想仪表。

□按结构形式不同，可分为基地式仪表、单元组合仪表、组件组装式仪表等。

基地式仪表　集检测、显示、记录和控制等功能于一体。功能集中，价格低廉，比较适合单变量的就地控制系统。

单元组合仪表　所谓单元组合仪表是根据检测系统和控制系统中各组成环节的不同功

能和使用要求，将整套仪表划分成能独立实现一定功能的若干单元（变送、控制、显示、执行、设定、计算、辅助、转换八大单元），各单元之间采用统一信号进行联系（气动仪表标准信号为 0.02～0.1MPa，电动仪表标准信号为 4～20mA DC）。使用时可根据控制系统的需要，对各单元进行选择和组合，构成多种多样的、复杂程度各异的检测系统和控制系统。单元组合仪表也称积木式仪表。

组件组装式仪表　是一种功能分离、结构组件化的成套仪表（或装置）。

□按信号形式不同，可分为模拟仪表和数字仪表。

模拟仪表　模拟仪表的外部传输信号和内部处理的信号均为连续变化的模拟量（如 4～20mA 电流，1～5V 电压等），前已提及的单元组合仪表均属模拟仪表。

数字仪表　数字仪表的外部传输信号有模拟信号和数字信号两种，但内部处理信号均为数字量（0，1），如可编程调节器等。

（4）过程控制技术及仪表的发展

伴随着过程控制系统的发展，实现过程控制的工具也在不断地更新换代，自动化水平不断提高。20 世纪 70 年代中期的 DDZ-Ⅲ型仪表，是继集成电路之后出现的，以集成运算放大器为主要放大元件、24V DC 为能源，采用国际标准信号制的 4～20mA DC 为统一标准信号组合型仪表。它在体积基本不变的情形下，大大增加了仪表的功能。工作在现场的 DDZ-Ⅲ型仪表均为安全火花型防爆仪表，配上安全栅，构成安全火花防爆系统，相当安全，在化工、炼油等行业得到了广泛的应用，并曾一度占主导地位，至今，一些中小企业及大企业的部分装置仍在使用。进入 20 世纪 80 年代后，由于微处理器的发展，又出现了 DDZ-S 型智能式单元组合仪表，它以微处理器为核心，能源、信号都同于 DDZ-Ⅲ型，其可靠性、准确性、功能等都远远优于 DDZ-Ⅲ型仪表。

由于各种高新技术的飞速发展，自 20 世纪 80 年代开始，我国开始引进和生产以微型计算机为核心，控制功能分散、显示操作集中，集控制、管理于一体的集散控制系统（DCS），从而将过程控制仪表及装置推向高级阶段。同时，可编程控制器（PLC）也从逻辑控制领域向过程控制领域伸出触角，以其优良的技术性能和良好的性能/价格比在过程控制领域中占据了一席之地。此外，现场总线（Field Bus）这种用于现场仪表与控制系统和控制室之间的一种开放式、全分散、全数字化、智能、双向、多变量、多点、多站的通信系统，使现场设备除能完成过程基本控制功能外，还增加了非控制信息监视的可能性，越来越受到控制人员的欢迎。

过程控制系统的发展用“突飞猛进”和“日新月异”来形容毫不过分，新型控制系统和新型控制工具还在不断推出，可以说，生产过程控制技术是极有挑战性的学科领域。

（5）关于本课程的学习方法

本课程教学内容的选择是从培养学生具有正确使用常用工业电器，掌握工业控制仪表使用技能这一目标出发来选取整合的，所涉及的知识范围涵盖面较宽，各部分内容本身也未考虑各学科体系的完整性，着重培养和训练学生对各有关电气设备和工业检测控制仪表的操作使用。总体说来，应重点放在技能操作的学习上，但各部分的侧重点又有一些差异和区别。

学习电工学、电子学基础知识时，应结合实验中和日常生活中所见到的各种电现象进行学习，利用所学的基础知识对有关电现象进行解释，学以致用，融会贯通。同时注意常用技术术语的理解和掌握。

对于常用工业电气设备部分（变压器、电动机、常用电工测量仪表），学习时应先弄懂各设备结构、基本工作原理和作用，继而掌握各设备的使用、控制方法。应结合触电的危害性来理解安全用电的重要性，了解安全用电的常识性规则，掌握安全用电方法。

在学习工业检测控制仪表这部分内容时，重点应放在学习仪表的操作使用上。此部分内容因涉及多种检测仪表和控制仪表，初次接触时可能有零散之感，因此学习中应注意检测仪表和控制仪表这两类仪表之间的联系，抓住仪表之间的共同性和各自的特殊性，了解各种仪表中的旋钮和开关的功能作用并掌握其操作方法。

对于控制系统的学习，应从理解典型工艺生产过程的特性着手，站在系统的高度，围绕采用什么方法改善系统特性、维持系统稳定这一问题，来理解控制规律及具体操作。应熟悉工程常用图符，学会带检测点工艺流程图和信号报警及信号联锁电路图的读图方法。

对教材中可编程控制器和集散控制系统部分的学习，应主要了解可编程控制器的功能、特点，熟悉典型仪器的使用操作方法。了解集散控制系统的框架构成及发展情况，结合典型化工单元的仿真操作实训，熟悉掌握集散控制系统的基本操作方法。

在学习中应注重理解基础上的实际操作，切忌死记硬背。在有条件的情况下，注意观察各种电气设备和仪器仪表的结构，在了解各种设备、仪器仪表的动作原理的基础上，熟悉并掌握设备、仪器仪表的操作方法。在学习过程中，提倡眼、脑、手并用，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”。通过深入实际，具体实践，实现知识的彻底“归位”。

学习中不可脱离实际，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。注意仔细观察实际操作中所遇到的各种问题并加以细致分析，坚持理论和实践相结合的学习原则，走“理论学习—实际操作—分析总结—继续实践”的路子，方能不断提高自己的学习成效，增强个人综合能力和全面素质。

第 1 篇　工业电器基础

1　电工技术基础

【学习目标】

□了解电路组成的基本概念和电路基本定律；

□掌握简单电路的计算公式及计算方法。

1.1　直流电路特性

1.1.1　电路的组成

实际应用中，将电器件和用电设备按一定的方式连接在一起形成的各种电流通路均称为电路。无论是简单电路还是复杂电路，一般说来，都包括电源、负载、控制设备及连接导线这几部分。

电源是电路中电能的来源，其作用是将其他形式的能量转换成电能，供给电路中的用电设备；负载是指电路中各用电设备，它消耗电能，使电能转换成其他形式的能量；连接导线的作用是将电源和各负载连接在一起，形成通路；控制设备的作用则在于控制电路的通与断。

图 1-1 是最简单的直流电路，它由干电池、灯泡、输电导线和开关构成，图中干电池作为电源，灯泡作为负载，开关作为控制设备，输电导线作为连接导线，将其连接组成一简单直流回路。当开关闭合时，回路中有电流流动，灯泡发光；而开关断开后，电流无法形成回路，灯泡熄灭。

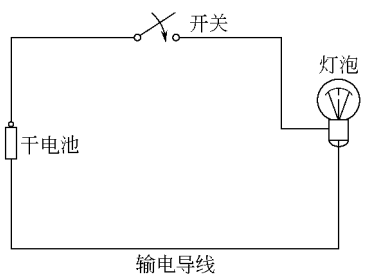


图 1-1　简单直流电路

如图 1-1 所示，电路应由以下四个部分组成。

（1）电源

电路中提供电能的装置，其作用是将其他形式的能量转换成电能，如发电机、干电池、蓄电池等。电源有电压源（向负载输出电压）和电流源（向负载输出电流）之分，干电池、蓄电池是一种直流电压源，有极性固定不变的正、负极。

（2）负载

电路中使用电能的装置，其作用是把电能转换成其他形式的能量，如灯泡、风扇、电动机等。

（3）连接导线

用来连接电源和负载，输送和分配电能，常用的导线有铜导线和铝导线。

（4）开关

用来控制电路的运行。

电路分析中，通常将负载、连接导线等中间环节和开关等统称为外电路，将电源内部称为内电路。电源和负载有本质的区别：电路中把非电能转换成电能的设备称为电源，把电能转换成非电能的设备则称为负载。

对电源而言，电源两极以外的电路称为外电路，电源内部的电路称为内电路。一个闭合的电路是由外电路和内电路两部分组成的。

1.1.2 电流、电压和电阻

（1）电流

金属导线中的电流是由带电荷的自由电子定向移动而形成的，习惯上，通常把正电荷移动的方向作为电流的方向。在外电路，电流从电源的正极流向负极，而在内电路中（即电源内部），电流从电源的负极流向正极。

电流可分为直流电流和交流电流两种。电流方向保持不变的电流称为直流电流，简称直流（电流的方向和大小都保持不变的电流叫做恒定电流，通常也称为直流）。电流的大小和方向随时间作周期性变化，且一周期内平均值等于零的电流称为交变电流，简称交流。电流用字母 I 表示，电流的大小以单位时间内通过导体横截面的电量多少来衡量，对于恒定电流来说，若以 q 表示在时间段 t 内通过导体截面上的总电量，则电流的大小为

$$I=\frac{q}{t} \tag{1-1}$$

电量的单位为库仑（C），时间的单位为 s（秒），则电流的单位为安培，简称 A（安）。即：如果导体的横截面积上每秒有 1C 的电量通过，就称其为 1A 的电流。电流很小时，可使用较小的电流单位 mA（毫安）或 μA（微安）。

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

（2）电压

在电工学中，电压的概念是这样来定义的：电场中任意两点之间电压的数值等于电场力在该两点间移动单位正电荷所做的功。在图 1-2 中，有一点电荷 q 在电场中自 a 点沿任一路径移动到 b 点，电场力所做功为 A_{ab}，则 a、b 两点之间的电压定义为

$$U_{ab}=\frac{A_{ab}}{q} \tag{1-2}$$

在 SI 制中，功的单位为 J（焦耳），电量的单位为 C（库仑），电压的单位为 V（伏特），并有 $1\text{V}=10^{3}\text{mV}=10^{6}\mu\text{V}$。

习惯上，人们规定电压降的方向为电压方向，符号 U_{ab} 即表示电压方向是由 a 点指向 b 点。若图 1-2 中电荷 q 是从 b 点移动到 a 点，则电场力做负功，即 $A_{ba}=-A_{ab}$，所以从 b 点指向 a 点的电压为

$$U_{ba}=\frac{A_{ba}}{q}=-\frac{A_{ab}}{q}=-U_{ab} \tag{1-3}$$

电路分析中，电压指电场中两点电位之差。方向判定上，对于电源，电压的方向由电



图 1-2 电压做功示意图

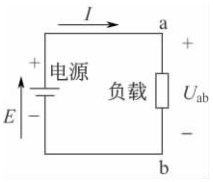


图 1-3 电压的方向

源的正极指向负极；对于负载，电流流进端为电压的正极，电流流出端为电压的负极，如图 1-3 中的 U_{ab} 所示。

（3）电位

物理学中电位又称为电势。在电场或电路中任选一点作为参考零点，则电场或电路中某点的电位定义为该点到参考零点之间的电压。显然，参考零点电位为零电位，通常选择大地或某公共点（如机器外壳）作为零电位点。

图 1-4 所示电路中，设 o 点为接地点，则各点电位为

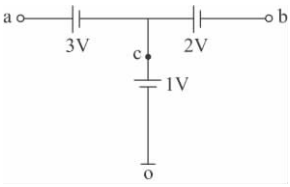


图 1-4　一个例子

$$V_o = 0\text{V}$$
$$V_c = 1\text{V}$$
$$V_a = 3\text{V} + 1\text{V} = 4\text{V}$$
$$V_b = -2\text{V} + 1\text{V} = -1\text{V}$$

某点电位为负时，说明该点电位比零电位还要低。

由电位的定义可以看出，电压与电位之间有以下的联系和区别。

① 电压即电位差，$U_{ab} = V_a - V_b$。所以，电位与电压的单位相同。

② 电压方向即高电位指向低电位方向。若 $V_a > V_b$，则 $U_{ab} > 0$；若 $V_a < V_b$，则 $U_{ab} < 0$，说明此时电压方向实际上是由 b 点指向 a 点。

③ 电位与参考点选择有关，而电压与参考点选择无关。在图 1-4 中，$V_a = 4\text{V}$，$V_b = -1\text{V}$，则 $U_{ab} = V_a - V_b = 5\text{V}$。若选择 c 点为参考点，则 $V_a = 3\text{V}$，$V_b = -2\text{V}$，$U_{ab} = 3 - (-2) = 5\text{V}$。

应注意，电路中参考点一经选定，则各点的电位就不再改变，即一电路中只能固定一点作为参考点，而不能选择多个参考点，电位具有单值性。

（4）电动势

负载工作时要消耗电能。为让负载持续工作，必须不断向电路补充电能，此项工作由电源来完成。电源把其他形式的能量转化为电能，如利用化学作用，干电池、蓄电池把化学能转化为电能；或依靠电磁感应作用，发电机把机械能转化为电能。电源把其他形式的能量转化为电能本领的大小，用 E（电动势）这个物理量来反映。

电动势是标量，但它与电流一样规定有方向：从电源负极经电源内部到电源正极的方向，如图 1-3。

电源的电动势等于电源没有接入电路时两极间的电压。没有接入电路的干电池，两极间电压为 1.5V，则干电池的电动势为 1.5V。电动势的单位与电压的单位相同。

（5）电阻

电流通过导体时，因不断和导体内原子或分子碰撞而受到阻碍作用，反映导体对电流阻碍作用大小的物理量称为电阻。

设加在某导体两端上的电压为 U，通过该导体的电流为 I，则比值

$$R = \frac{U}{I} \tag{1-4}$$

定义为该导体电阻。SI 单位制中，电阻的单位为 Ω（欧姆）。除欧姆外，还常使用较大的电阻单位：kΩ（千欧）和 MΩ（兆欧），它们之间的转换关系为

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

导体的电阻是客观存在的，它不随导体两端的电压大小而变化，没有电压，导体仍然有电阻。实验证明，当导体的材料均匀时，导体的电阻与构成导体的材料性质及几何形状有关，即导体的电阻与它的长度 L 成正比，与它的横截面积 S 成反比，这一结论称为电阻定律。其数学表示式为

$$R=\rho\frac{L}{S} \tag{1-5}$$

式中 R——导体的电阻；

ρ——导体的电阻率。

导体的电阻率与材料性质有关，不同的导体材料，其电阻率不同，电阻率的单位是 $\Omega\cdot m$。在实际工作中，常用 m 作为导体的长度单位，用 mm^2 作为导线横截面积的单位，此时的电阻率的单位为 $\Omega\cdot mm^2/m$。

（6）电导

电导是反映介质导电能力的一个物理量，其数值为电阻的倒数，即

$$G=\frac{1}{R}=\frac{I}{U} \tag{1-6}$$

在 SI 单位制中，电导的单位为 S（西门子），简称西，且有 $1S=1\Omega^{-1}$。

导体的温度发生变化时，其电阻值也随之发生变化，一般金属导体的电阻随温度升高而增大，但碳电阻却随温度的升高而降低。导体的导电能力较强，绝缘体则不能导电。金属是电的良导体，橡胶、塑料、油漆、陶瓷等介质叫做绝缘体，导电性能介于导体与绝缘体之间的叫做半导体，收音机、电视机中的二极管、三极管、集成电路等元器件都是用半导体制成的。

还有一类物质，在较高的温度时是导体或半导体，甚至是绝缘体，可是当温度降到某一特定值 T_c 时，它的直流电阻突然下降为零，这一现象称为零电阻效应。人们把这类物质称为超导体，这种失去电阻的性质称为超导性，出现零电阻的温度 T_c 称为转变温度或临界温度。

（7）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，向电路提供能量。为表征电路中某一段吸收或产生能量的速率，于是引入电功率的概念。

电功率一般用字母 P 表示，在 SI 单位制中 P 的单位是 W（瓦特），简称瓦，也常用 kW（千瓦）来表示，其换算关系为 $1kW=10^3W$。

在直流电路中，功率表示为

$$P=UI=\frac{U^2}{R}=I^2R \tag{1-7}$$

1.1.3 欧姆定律和基尔霍夫定律

1.1.3.1 部分电路欧姆定律

图 1-5 所示为一段不含电源的电阻电路，又称均匀电路。若电阻元件的阻值不随外加电压（或电流）而变化，电流、电压参考方向一致时，实验证明，通过这段电阻电路的电流强度与两端的电压值成正比，而与该段电路的电阻值成反比。即存在如下关系：

$$I=\frac{U}{R} \tag{1-8}$$

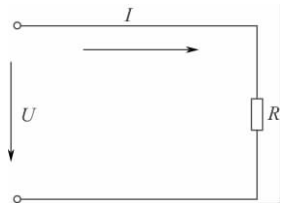


图 1-5　不含电源的电阻电路

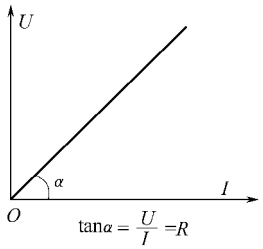


图 1-6　电阻的伏安特性曲线

因这一关系是德国物理学家欧姆于 1827 年在实验中发现的，故称这一关系式为欧姆定律。

应当说明，只有当导体的电阻不随电流或电压变化时，电流才和电压成正比关系。电流和电压的这一关系可以用图 1-6 所示的伏安特性曲线来描述，图中，横轴代表电流，纵轴代表电压，遵守欧姆定律，导体的伏安特性曲线都是经过坐标原点的一条直线。

部分电路的欧姆定律应用时注意以下几点。

① 电流、电压、电阻三个物理量必须属于同一段电路，并在同一时刻才有上述关系。

② 这段电路中，不能含有电源，没有任何电动势，否则不能用上述公式计算。

③ 并不是所有电路都遵守欧姆定律。遵守欧姆定律的电路叫线性电路，不遵守欧姆定律的电路叫非线性电路。

1.1.3.2　**全电路欧姆定律**

图 1-7 为含有一个电源的简单电路。电路中电源的电动势为 E，电源内部具有电阻 r_0，称为内电阻，电路中外电阻为 R。通过实验得知，在全电路中（包括内、外电路），电流 I 与电源电动势 E 成正比，与外电路电阻和内电阻之和（$R+r_0$）成反比，即有下述关系成立：

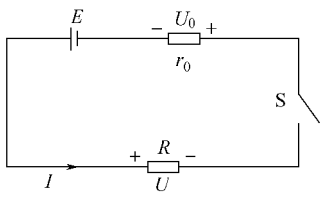


图 1-7　含有一个电源的电路

$$I=\frac{E}{R+r_0} \tag{1-9}$$

因为　$U=IR$

所以　$E=U+Ir_0$

或　$U=E-Ir_0$ (1-10)

其中，U 为电路端电压；Ir_0 为电源内的电压降。这一关系称为全电路欧姆定律。

对于同一个电源，E 和 r_0 都是不变的，因此，当增大电阻 R 的数值时，由上式可知，电路端电压 U 也相应增大。R 很大时，内阻的电压降 Ir_0 很小，$U\approx E$。电路开路时，$R\to\infty$，$I\to 0$，则 $U=E$，所以，在电路开路时，端电压等于电源的电动势。外电路电阻很小，$R\to 0$，端电压 $U\to 0$，这种情况叫做短路，此时，$I\to E/r_0$。由于一般电源的内阻都很小，因此短路时电流很大，以致烧毁电源。为防止短路情况发生，通常的做法是在电路中安装熔断器，一旦电流过大时，熔断器断开，形成开路，从而保护电源。另应注意，决不可将一根导线或一块电流表直接接到电源上（因电流表的内阻很小），那样将导致短路。

应用全电路欧姆定律时，必须考虑电源具有内电阻，计算时除非指明内电阻因阻值太小可以忽略不计外，一般情况下不应忽略。

【例 1-1】　电路如图 1-8 所示，$I=10\text{mA}$，$R_1=10\text{k}\Omega$，$R_2=20\text{k}\Omega$，则 R_1 与 R_2 上消

耗的功率为多少？电源的电动势为多少？电源产生的功率为多少？

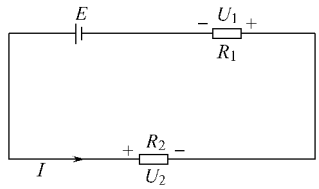


图 1-8 全电路欧姆定律

【解】 R_1 上消耗的功率为

$$P_1=I^2R_1=(10\times10^{-3})^2\times10\times10^3=1\ (\mathrm{W})$$

R_2 上消耗的功率为

$$P_2=I^2R_2=(10\times10^{-3})^2\times20\times10^3=2\ (\mathrm{W})$$

电源电动势为

$$E=I(R_1+R_2)=10\times10^{-3}\times(10\times10^3+20\times10^3)=300\ (\mathrm{V})$$

电源产生的功率为

$$P=IE=10\times10^{-3}\times300=3\ (\mathrm{W})$$

1.1.3.3 电路的串联、并联及基尔霍夫定律

实际应用中，一个电源常常要向多个负载供电，如教室里装有多盏灯、多台风扇等，它们既可以同时工作，也可以单独工作，且相互间不受影响。此时负载怎样与电源相连？其相互间关系又如何？

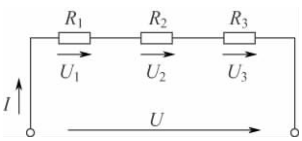


图 1-9 串联电路

（1）电阻串联电路

把两个或两个以上的电阻依次相连，使电流只有一条通路的连接方式，称为电阻的串联，如图 1-9 所示。

（2）电阻串联电路的特点

电阻串联电路具有如下特点。

① 通过各电阻的电流相等，即 $I=I_1=I_2=I_3$。

② 串联电路两端的总电压等于各电阻两端电压之和，即 $U=U_1+U_2+U_3$。

③ 串联电路的总电阻等于各串联电阻之和，即 $R=R_1+R_2+R_3$。

④ 串联电路中，各电阻上分配的电压与各电阻值成正比，即 $U_n=\dfrac{R_n}{R}U$。

⑤ 串联电路中，各电阻消耗的功率与电阻值成正比，即 $P_1:P_2:P_3=R_1:R_2:R_3$。

（3）电阻并联电路

两个或两个以上电阻，接在电路中相同的两点之间，称为电阻的并联连接，如图 1-10 所示。

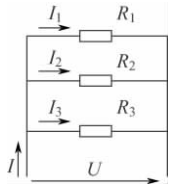


图 1-10 并联电路

（4）电阻并联电路的特点

电阻并联电路具有如下特点。

① 并联电路中各电阻两端的电压相等，均等于电路两端的电压，即 $U=U_1=U_2=U_3$。

② 并联电路中的总电阻的倒数等于各并联电阻的倒数之和，即 $\dfrac{1}{R}=\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2}+\dfrac{1}{R_3}$。

③ 并联电路中，各支路电流与支路的电阻成反比，即 $I_n=\dfrac{R}{R_n}I$。

④ 并联电路中，各电阻消耗的功率与电阻值成反比，即 $P_1:P_2:P_3=\dfrac{1}{R_1}:\dfrac{1}{R_2}:\dfrac{1}{R_3}$。

由于并联电路中各负载上电压相等，工作情况互不影响，因此绝大多数的工业负载、民用负载都采用并联电路。

【例 1-2】 在图 1-11 所示电路中，$R_1=6\Omega$，$R_2=4\Omega$，$R_3=12\Omega$，电路端电压为 18V。