

Z IDONGHUA JI YIBIAO
JISHU JICHU

自动化及仪表 技术基础

薄永军 李 駟 主编



化学工业出版社

Z IDONGHUA JI YIBIAO
JISHU JICHU

自动化及仪表 技术基础

薄永军 李 骥 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是针对工艺类或非自动化及仪表类专业人员,在少课时学习要求的前提下,较全面地介绍电工学、电子学、自动化及仪表方面的有关知识。

本书分两篇共十章,第一篇的两章主要介绍电工电子学的基本知识和最常用的电气设备与安全知识;第二篇介绍了自动化及仪表技术的各方面知识,既在第3章综述和汇总了相关基本知识,又分别介绍了测量及仪表知识、部分新型显示仪表、控制规律及仪表,还对简单控制系统作了较全面介绍,对其他各类控制系统、典型化工过程控制方案作了说明。最后通过几个综合实训课题培养基本动手能力和识读、操作能力。

本书满足对工艺类人员能力的培养要求,篇幅小、内容精、通俗易懂,适用于无电工电子学的基础,希望尽快掌握一些仪表、过程控制有关知识的学员,也可作为培训教材或参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

自动化及仪表技术基础/薄永军,李骥主编. —北京:
化学工业出版社, 2008.5

ISBN 978-7-122-02631-6

I. 自… II. ①薄…②李… III. 自动化仪表 IV. TH86

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第053231号

责任编辑:刘哲
责任校对:李林

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)
印装:化学工业出版社印刷厂

720mm×1000mm 1/16 印张13½ 字数309千字 2008年7月北京第1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:28.00元

版权所有 违者必究

前 言

目前,高等职业教育蓬勃发展,为企事业单位培养了大批的技能型人才,在强调“以能力为本位,以技能为核心”的同时,也注重对人才的综合素质和全面能力的培养。当前,日新月异的自动化及仪表技术已经成为过程生产的重要手段,也是各专业人员掌握本专业技能要求的基础上需要了解掌握的一项重要技术。

对不少非自动化及仪表类专业的人员,在现代化生产的今天,了解仪表及自动化的有关内容、普及相关知识,尤其是经常接触的一些仪表知识是非常必要的,但在开设相关课程时,讲授课时数要求减少,技能训练要求加强,对能力(技能)的要求较高,本书就是针对少课时教学要求,对工艺类或非自动化及仪表类专业人员普及仪表知识,为其进一步了解生产、拓展专业能力打下一定的基础而编写的。本书适用于无任何电工、电子的基础,又希望在短时间内(一学期的课程)掌握一些仪表、自动控制的有关知识,以便在工作中辅助工艺类相关工作,为成为技术骨干或知识拓展打下基础。本书打破原有各版教材知识结构,创新知识主链,凝练知识内容,以“必用、够用”为原则,精炼、经典地介绍了相关内容。

本书融合了电工、电子、自动化及仪表等内容,适用于非自动化及仪表专业类人员的知识普及或高职层次相关专业使用。篇幅小,内容精,通俗易懂,加入一定的技能实训,使教学能在一个学期的70~80学时内完成。书中精选相关知识中基本的、常用的、技能性强的内容作为教材重点,注重以典型实例引出相关知识、简化概念,每篇含一到两个技能实训,以突出常用技能的训练。

本书由天津渤海职业技术学院薄永军、李骥主编,其中,绪论、第3章、第6章、第7章、第9章由薄永军编写,第4章、第5章、第10章由李骥编写,第1章、第2章由吴镜锋编写,第8章由姜秀英编写。全书由薄永军定稿,朱凤芝审阅。

因编者水平有限,书中难免存在不足,欢迎各位使用者、同行专家批评指正。

编者

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 电工、电子学基础

第1章 电工学基础	4
-----------------	---

1.1 电路基本概念及定律	4
1.1.1 电路模型与基本物理量	4
1.1.2 电路元件	6
1.1.3 电路基本定律	7
1.1.4 等效电路与电路计算	8
1.2 正弦交流电路	9
1.2.1 正弦交流电的基本概念	9
1.2.2 单相交流电路	10
1.2.3 三相交流电路	15
1.3 电器与安全用电	19
1.3.1 常用低压电器	19
1.3.2 变压器	23
1.3.3 电动机与简单控制电路	27
1.3.4 安全用电知识	34
1.4 电工测量仪表	37
1.4.1 电工测量仪表的分类	37
1.4.2 电流、电压及功率的测量	38
1.4.3 万用表	41
习题	44

第2章 电子学基础	46
-----------------	----

2.1 常用电子元件	46
2.1.1 半导体基本知识	46
2.1.2 二极管	47
2.1.3 晶体管	48
2.2 基本电子电路	51
2.2.1 基本放大电路	51
2.2.2 集成运算放大器	55

2.2.3 直流稳压电源	58
2.3 数字电路	61
2.3.1 基本逻辑电路及用途	62
2.3.2 计数器与寄存器	67
2.3.3 模-数转换与数-模转换	69
习题	70

第二篇 自动化及仪表技术

第3章 自动化及仪表基本知识	72
----------------------	----

3.1 自动化概述	72
3.1.1 自动化系统及仪表的分类	73
3.1.2 自动检测系统概述	74
3.1.3 自动信号联锁保护系统概述	75
3.2 自动控制系统概述	76
3.2.1 自动控制系统的组成与分类	76
3.2.2 过渡过程和品质指标及其影响因素	78
3.3 对象特性描述	81
3.4 控制流程图的读识	83
习题	85

第4章 测量及检测仪表	86
-------------------	----

4.1 检测仪表与控制系统	86
4.1.1 典型检测仪表与控制系统	86
4.1.2 检测仪表系统结构分析	87
4.2 检测技术基础知识	87
4.2.1 测量的基本知识	87
4.2.2 检测仪表的基础知识	88
4.3 检测技术及传感器	91
4.3.1 传感器的组成及分类	91

4.3.2	传感器的信号转换作用	93
4.3.3	检测方法及其基本概念	93
4.4	压力传感器及检测仪表	94
4.4.1	压力传感器及检测仪表的分类及特点	94
4.4.2	弹簧管压力表	96
4.4.3	DDZ-Ⅲ型力矩平衡式压力变送器	96
4.4.4	其他差压变送器	97
4.4.5	压力检测仪表的选择及安装	98
4.5	物位检测及仪表	99
4.5.1	物位检测的基本概念	99
4.5.2	差压式液位计	100
4.5.3	浮力式液位计	102
4.5.4	其他物位检测仪表	102
4.6	流量检测仪表	103
4.6.1	流量检测的基本概念	103
4.6.2	差压式流量计	104
4.6.3	其他流量仪表	106
4.6.4	各种流量检测元件及仪表的选用	109
4.7	温度检测仪表	109
4.7.1	温度的基本概念	109
4.7.2	热电偶温度计	110
4.7.3	热电阻温度计	113
4.7.4	温度变送器	114
4.8	传感器与检测电路的一般结构形式	114
4.8.1	传感器输出信号的特点	114
4.8.2	传感器信号的处理方法	115
4.8.3	传感器接口与检测电路的一般结构形式	115
	习题	116
* 第5章	显示仪表	117
5.1	常规显示仪表	117

5.1.1	显示仪表结构分析	117
5.1.2	电位差计式自动平衡原理	117
5.1.3	电桥式自动平衡原理	118
5.1.4	差动变压器式自动平衡原理	119
5.2	数字式显示仪表原理	120
5.3	数字测量显示控制仪介绍	122
5.4	TFT 真彩色无纸记录仪	128
	习题	130
第6章	控制规律与自动控制仪表	131
6.1	基本控制规律	131
6.1.1	双位控制	131
6.1.2	比例 (P) 控制	132
6.1.3	积分控制	135
6.1.4	微分控制	136
6.2	常用控制仪表	139
6.2.1	DDZ 型电动控制器	140
6.2.2	可编程控制器	142
6.3	执行器	146
6.3.1	气动执行器	146
6.3.2	阀门定位器与电/气转换器	151
6.3.3	电动执行器	151
	习题	152
第7章	简单控制系统	153
7.1	概述	153
7.1.1	简单控制系统的组成	153
7.1.2	控制方案的确定	154
7.1.3	控制系统的方案实施	157
7.2	控制系统的投运与操作	157
7.2.1	控制系统的投运	157
7.2.2	控制系统的故障分析、判断与处理	159
7.3	控制器的参数整定	160
7.3.1	经验凑试法	160
7.3.2	衰减曲线法	161
7.3.3	参数整定中应注意的问题	162

习题	163	控制	191
* 第 8 章 其他控制系统	164	9.3.3 精馏塔的其他控制 方案	192
8.1 串级控制系统	164	习题	192
8.1.1 串级控制系统的组成及 工作过程	164	第 10 章 综合训练	193
8.1.2 特点及应用场合	167	10.1 常用电工工具及使用 训练	193
8.1.3 回路和变量的选择	167	10.1.1 常用电工工具	193
8.2 其他复杂控制系统	167	10.1.2 导线的连接、焊接及 绝缘的恢复	193
8.2.1 均匀控制系统	167	10.2 照明线路安装训练	196
8.2.2 比值控制系统	170	10.2.1 训练目的	196
8.2.3 前馈控制系统	171	10.2.2 训练器材	196
8.2.4 分程控制系统	173	10.2.3 日光灯照明电路的 结构	196
8.2.5 多冲量控制系统	174	10.2.4 训练内容及步骤	197
8.3 计算机控制系统概述	175	10.2.5 荧光灯照明电路常见 故障分析	198
8.3.1 集散控制系统	178	10.3 智能数字显示仪表调校	199
8.3.2 现场总线控制系统	182	10.3.1 调校训练目的	199
习题	184	10.3.2 调校训练仪器及 装置	199
* 第 9 章 典型单元控制方案	185	10.3.3 调校步骤	199
9.1 流体输送设备的自动 控制	185	10.3.4 数据处理	200
9.1.1 离心泵的自动控制 方案	185	10.3.5 调校训练报告	200
9.1.2 压气机的自动控制 方案	186	10.4 单容水箱液位定值控制 系统	200
9.2 传热设备的自动控制	187	10.4.1 训练目的	200
9.2.1 两侧均无相变化的换 热器控制方案	187	10.4.2 训练设备	201
9.2.2 载热体进行冷凝的加 热器自动控制	188	10.4.3 训练原理	201
9.2.3 冷却剂进行汽化的冷 却器自动控制	189	10.4.4 训练内容与步骤	201
9.3 精馏塔的自动控制	190	10.4.5 参数设置	203
9.3.1 精馏塔的提馏段温度 控制	190	10.4.6 训练报告	203
9.3.2 精馏塔的精馏段温度		部分习题参考答案	205
		主要参考文献	206

绪 论

在工业生产,尤其是石油化工、化工生产中,生产过程大多是在密闭的管道和设备中进行的,是由生产设备、动力装置、自动化仪表设备来完成的。大多数物料是以液体或气体的状态连续地进行各种变化,通常具有高温、深冷、高压、易燃、易爆、有毒、腐蚀等特点,生产过程中,要对温度、压力、流量、物位及物体成分等参数进行实时检测和控制,才能保证安全稳定的连续生产,保证合格的产品质量。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仪表来实现。作为专业技术人员,除掌握必要的工艺生产专业知识外,应了解一些动力装置的正确操作方法、日常供电和用电的基本常识,熟悉、掌握自动化基本知识以及常见电气设备和自动化仪表的性能,具有常用工业电器的使用能力、工程识图的能力、操作自动化仪器仪表的能力、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等。只有正确地使用和操作这些设备和仪表,才能确保工艺生产的安全运行,完成岗位的工作任务。

一、自动化及仪表

生产过程自动化是一门综合性的技术学科,它把自动控制、仪器仪表及计算机等专业的理论与技术服务于生产工艺过程。在生产过程中,由于实现了自动化,人们通过自动化装置来管理生产,自动化装置与工艺及设备已结合成为有机的整体,因此,越来越多的工艺技术人员认识到:学习仪表及自动化方面的知识,对于管理与开发现代化生产过程是十分必要的。

为了了解自动化的基本要素,先来看一个例子。图 0-1 所示是一个贮槽液位的人工控制与自动控制的示意图。

贮槽在生产中常用作中间容器或成品罐,前一个工序来的物料流入槽中,而槽中的物料又送至下一个工序去加工或包装,显然,流入量(或流出量)的波动会引起槽内液位的波动,严重时会溢出或抽空。解决这个问题的办法,常以贮槽的液位为操作

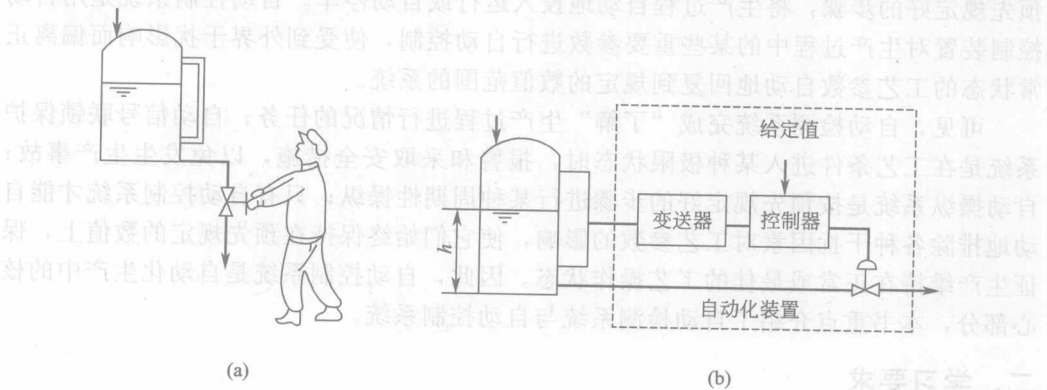


图 0-1 贮槽液位控制示意图

指标，以改变出口阀门开度为控制手段，如图 0-1(a) 所示。当液位上升时，将出口阀门开大，反之，当液位下降时，就关小出口阀门。为使贮槽液位上升和下降都有足够的余地，可选择玻璃管液位计中间的某一点为正常工作时的液位高度，通过控制出口阀门开度而使液位保持在这一高度上，就不会出现液位过高而溢流至槽外或液体抽空而出现事故。把上述过程实现自动控制，如图 0-1(b) 所示，就要自动测量液位的值（变送器），分析判断其高低并驱动阀门的自动开关（控制器）。同时，为了人机交流的方便，应进行必要的指示、记录；在出现危险情况时，应有预警装置，能够在必要时自动采取应急措施。总之，在实现自动控制中，应科学、合理、人性化地考虑生产、人员、设施的多种需求。

在生产过程的自动控制系统中，需要测量与控制的参数是多种多样的，主要的有热工

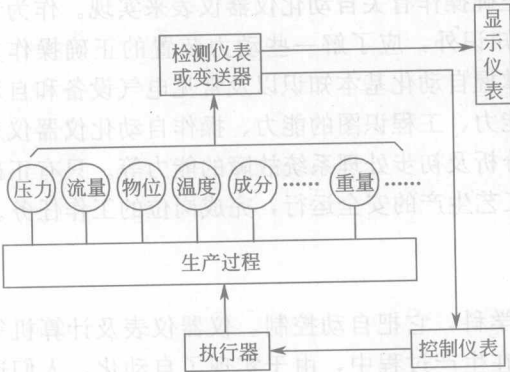


图 0-2 各类仪表之间的关系

量（压力、流量、物位、温度等）和成分（或物性）量。自动化仪表按其功能不同，大致可分成四大类，即检测仪表（包括各种参数的测量和变送）、显示仪表（包括模拟量显示和数字量显示）、控制仪表（包括气动、电动控制仪表及数字式控制器）和执行器（包括气动、电动、液动等执行器）。这四类仪表之间的关系如图 0-2 所示。

利用上述各类仪表，依据控制要求，可以构成自动检测、自动保护、自动操纵和自动控制等自动化系统。

自动检测系统是利用各种检测仪表自动连续地对相应的工艺参数进行检测，并能自动指示或记录的系统。自动报警与联锁保护系统是对一些关键的生产参数设有自动信号报警与联锁保护的系统，当参数接近临界数值时，系统会发出声、光报警，提醒操作人员注意；如果工况接近危险状态时，联锁系统立即采取紧急措施，以防止事故的发生和扩大。自动操纵系统可以根据预先规定的步骤自动地对生产设备进行某种周期性操作，从而极大地减轻了操作人员的重复性体力劳动。自动开停车系统可以按照预先规定好的步骤，将生产过程自动地投入运行或自动停车。自动控制系统是用自动控制装置对生产过程中的某些重要参数进行自动控制，使受到外界干扰影响而偏离正常状态的工艺参数自动地回复到规定的数值范围的系统。

可见，自动检测系统完成“了解”生产过程进行情况的任务；自动信号联锁保护系统是在工艺条件进入某种极限状态时，报警和采取安全措施，以免发生生产事故；自动操纵系统是按预先规定好的步骤进行某种周期性操纵；只有自动控制系统才能自动地排除各种干扰因素对工艺参数的影响，使它们始终保持在预先规定的数值上，保证生产维持在正常或最佳的工艺操作状态。因此，自动控制系统是自动化生产中的核心部分，本书重点介绍了自动检测系统与自动控制系统。

二、学习要求

本书分为两篇，第一篇是电工、电子学基础，第二篇是自动化及仪表技术，包括

自动化及仪表技术知识、典型控制单元知识等，且增加了几个综合实训的课题供教学中使用。在内容上，从“必需、够用”出发，力求简明扼要、深入浅出，注重以实例引出有关知识、以“龙头”知识为主导，降低理论要求，减少微观分析和理论、公式推导，注重特性和应用的介绍。也打破学科体系的完整性，整合了教学内容，力求与生产实际相结合。

通过本书的学习，目的是了解掌握生产中常用电气设备、检测控制仪表以及生产过程自动化的基础知识，为今后在工作中正确使用和操作电气设备、仪器仪表打下基础，也为拓展专业知识、全面了解生产、成为专业技术骨干奠定基础。

本书所涉及的内容及学习要求如下。

(1) 电工学基础、电子学基础

介绍电工学和电子学的基本概念和简单的电路计算方法，了解和熟悉必要的相关知识，作为后续学习、理解电气及仪表有关电路的重要基础，也为以后工作中的知识拓展作铺垫。同时也介绍了生产中常用的电气安全知识。

(2) 自动化仪表

含测量仪表、显示仪表、控制仪表和执行器等。通过学习，应能了解主要工艺参数（压力、流量、物位及温度等）的测量方法及相关检测仪表的特性、结构及使用方法，熟悉常用控制仪表的作用原理、结构及同检测仪表的配合使用；能根据工艺要求，正确地选择和使用常见的测量仪表及控制仪表。以典型的电气设备或仪表为龙头，兼及同类仪表，一般不进行内部电路分析，对工作原理和机械结构作适度介绍。学习重点应放在掌握常用设备和仪表的用途及用法方面。

(3) 自动控制系统知识

以熟练掌握简单控制系统为核心，进而解读其他类型控制系统；介绍生产过程自动控制系统的常用术语、一般构成、动作过程，简述常见生产过程的基本特性和常用控制方法，以及过程控制仪表对控制系统的作用及其操作方法；也介绍了工程常用图形符号及工艺控制流程图的读识方法。通过学习，应能了解自动化的初步知识，理解基本控制规律，懂得控制器参数对控制质量的影响；能根据工艺的需要，和自控设计人员共同讨论和提出合理的自动控制方案，能为自控设计提供正确的工艺条件和数据，能在生产开停车过程中初步掌握自动控制系统的投运及控制器的参数整定。

(4) 典型单元控制方案

介绍生产中几个典型设备的基本原理、常用控制方案及动作原理，通过学习，可熟悉生产中典型设备的工艺过程，综合运用前面学习的知识。

其中，标“*”的第5章、第8章、第9章为选学内容。

第一篇 电工、电子学基础

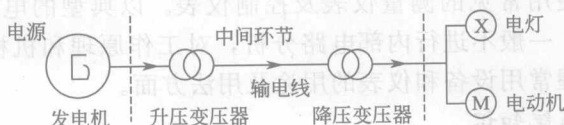
第1章 电工学基础

1.1 电路基本概念及定律

1.1.1 电路模型与基本物理量

(1) 电路

电路即电流的流通路径，它是由一些电气设备或元件为了实现某一功能而按一定方式组合起来的。实际电路组成方式多种多样，但通常由电源（或信号源）、负载和中间环节（包括开关和导线等）三部分组成，如图 1-1 所示。



(a) 电力系统



(b) 扩音机

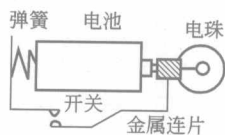
图 1-1 电路示意图

电源是将其他形式的能量转换成电能的装置。负载也称用电器，是将电能转换为其他形式能量的器件或设备，如电炉、电动机、扬声器等。中间环节是传输、分配、控制电能的部分，如变压器、输电线、放大器、开关等。

电路按其功能可分为两类：一类是用于电能的传输和转换，如电力系统；另一类是用于信号的传递和处理，如扩音系统。

(2) 电路模型

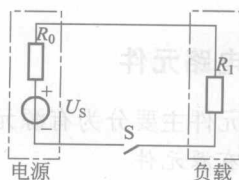
实际电路中电气元件的品种繁多，在电路分析中为了简化分析和计算，通常在一定条件下，把它近似地看作理想电路元件。用一个理想电路元件或几个理想电路元件的组合来代替实际电路中的具体元件，称为实际电路的模型化，即电路模型。图 1-2 所示就是手电筒的电路模型。后面在电路分析中讨论的电路都是电路模型。



(a) 实际电路



(b) 电路原理图



(c) 电路模型

图 1-2 手电筒电路

(3) 电路的基本物理量

① 电流 电荷有规则的定向运动称为电流，习惯上规定以正电荷移动的方向为电流的方向。在电路分析中，往往很难事先判定电流的实际方向，这就引入了参考方向的概念，即任意假设某一支路中的电流方向（参考方向），把电流看作代数量，若计算结果为正，则表示电流实际方向与参考方向相同；若计算结果为负，则表示电流实际方向与参考方向相反。

用来衡量电流大小的物理量是电流强度，简称电流，用字母 I 或 i 表示。它表示单位时间内通过导体横截面的电量，可表示为

$$I = \frac{Q}{t}$$

电流的单位是安培，以字母 A 表示。此外常用单位还有千安 (kA)、毫安 (mA)、微安 (μA)，其换算关系为：

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

电流一般分交流电和直流电两大类。凡大小和方向都随时间变化的电流，称为交流或交变电流；凡方向不随时间变化的电流，称为直流电流。

② 电位 从物理中知道，带电体的周围存在着电场，电场对在场内的电荷有力的作用。电场力把单位正电荷从电场中的某点移到参考点所做的功，称为该点的电位，用字母 φ 表示。参考点的电位规定为零，因而低于参考点的电位是负电位，高于参考点的电位是正电位。

电位的单位是伏特，简称伏，用字母 V 表示，除伏特外，常用单位还有千伏 (kV)、毫伏 (mV)、微伏 (μV)，它们之间的换算关系为：

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

③ 电压 又称电位差，其方向是由高电位处指向低电位处，但在复杂电路中，电压的实际方向是难以事先判断的，因此仍要引入参考方向的概念。电压的单位也是伏特。 a 、 b 两点间的电压可表示为：

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$$

例 1-1 已知 $\varphi_a = 20\text{V}$, $\varphi_b = -40\text{V}$, $\varphi_c = 10\text{V}$, 求 U_{ab} 和 U_{bc} 各为多少？

解：根据电压的定义可得

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 20 - (-40) = 60(\text{V})$$

$$U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c = -40 - 10 = -50(\text{V})$$

④ 电动势 在电源内部衡量非电场力做功本领大小的物理量称为电动势。用符号 E 表示，单位为伏特。电源电动势仅存在于电源内部，方向由电源的负极指向电

源的正极。

1.1.2 电路元件

电路元件主要分为有源元件和无源元件。

(1) 有源元件

有源元件在电路中提供电能,如电源,用电动势和内电阻串联电路表示电源,如图 1-3 所示。电源外部开路时,电源端电压大小等于电源电动势。

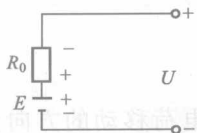


图 1-3 电源内电路

(2) 无源元件

无源元件是指耗能和储能元件,如电阻、电感、电容等。

实际电路中负载元件种类很多,但归纳起来分为三类:一是消耗电能的,如各种电阻器、电灯、电炉等;二是存储磁场能量的,如各种电感线圈;三是存储电场能量的,如各种类型的电容器。

① 电阻 是反映导体对电流阻碍作用大小的物理量,用字母 R 表示。其单位是欧姆,简称欧,用字母 Ω 表示。除欧姆之外,常用的电阻单位还有千欧 ($k\Omega$) 和兆欧 ($M\Omega$),其换算关系为:

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

导体的电阻是客观存在的,对于长直金属导体,其电阻为:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

式中, L 是导体的长度; S 是导体的横截面积; ρ 是导体的电阻率。

② 电感 电感是衡量线圈产生自感磁通本领大小的物理量。把线圈中每通过单位电流所产生的自感磁通数,称作电感量,简称电感,用 L 表示,即

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

国际规定:当线圈通过 1A 的电流,能够产生 1 韦伯 (Wb) 的自感磁通,则该线圈的电感就叫 1 亨利,简称亨,用字母 H 表示。在实际使用中,常采用较小的单位毫亨 (mH)、微亨 (μH),它们的换算关系为:

$$1H = 10^3mH, 1mH = 10^3\mu H$$

对空心线圈,当结构一定时, L 为常数,这样的电感叫线性电感。对有铁芯的线圈, L 不是常数,叫非线性电感。

③ 电容 两个导体之间充以绝缘介质就构成一个电容器。组成电容器的两个导体叫极板。电容器任一极板上所储存的电量 Q 与两极板间的电压 U 比值叫做电容器的电容量,用字母 C 表示,即

$$C = \frac{Q}{U}$$

如果在两极板间加 1V 电压,每极板所储存的电量为 1 库仑 (C),则其电容量为 1 法拉 (F)。常用较小的单位还有微法 (μF)、皮法 (pF)。其换算关系为:

$$1F = 10^6\mu F, 1\mu F = 10^6pF$$

1.1.3 电路基本定律

(1) 欧姆定律

① 部分电路欧姆定律 如图 1-4 所示, 在电压与电流参考方向一致时, 流过导体的电流与这段导体两端的电压成正比, 与这段导体的电阻成反比, 其表达式为

$$I = \frac{U}{R}$$

② 全电路欧姆定律 全电路是指含有电源的闭合电路, 如图 1-5 所示。图中的虚线框内代表一个电源。 E 代表电源电动势, R_0 代表电源内阻。

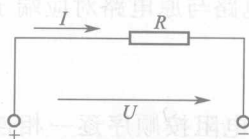


图 1-4 部分电路

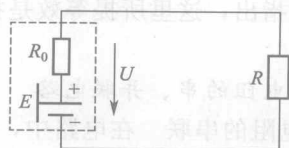


图 1-5 全电路

全电路欧姆定律的内容是：全电路中的电流与电源的电动势成正比，与整个电路（即内、外电路）的电阻成反比。其表达式为：

$$I = \frac{E}{R + R_0}$$

(2) 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律主要用于解决复杂电路的分析和计算。首先介绍一下有关电路结构的几个名词。

支路——电路中通过同一电流的每个分支叫做支路。

节点——电路中三条或三条以上支路的连接点称为节点。

回路——电路中的任一闭合路径称为回路。

在图 1-6 中，有三条支路、两个节点和三个回路。

① 基尔霍夫第一定律（节点电流定律） 在任一瞬间，流入任一节点的电流之和恒等于流出该节点的电流之和。其数学表达式为

$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}} \quad \text{或} \quad \sum I = 0$$

② 基尔霍夫第二定律（回路电压定律） 在任一瞬间，沿任意闭合回路绕行一周，在绕行方向上的电位升之和等于电位降之和。数学表达式为

$$\sum U_{\text{升}} = \sum U_{\text{降}} \quad \text{或} \quad \sum U = 0$$

可见，根据这一定律列方程时，首先要设定各支路电流的正方向和回路的绕行方向。

例 1-2 设有两台直流发电机并联工作，共同供给 $R=24\Omega$ 的负载电阻（其电路如图 1-6 所示）。其中一台的理想电压源电压 $U_{S1}=130\text{V}$ ，内阻 $R_1=1\Omega$ ；另一台的理想电压源电压 $U_{S2}=117\text{V}$ ，内阻 $R_2=0.6\Omega$ ，试求负载电流 I 。

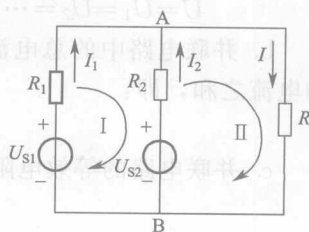


图 1-6 复杂电路

解：设各支路电流参考方向和回路绕行方向如图 1-6

所示, 根据基尔霍夫电流定律和电压定律分别列写电流方程和电压方程如下:

$$I_1 + I_2 - I = 0$$

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 = U_{S1} - U_{S2}$$

$$R_2 I_2 + RI = U_{S2}$$

将已知数据代入方程组可解得 $I = 5\text{A}$ ($I_1 = 10\text{A}$, $I_2 = -5\text{A}$)。

上述以支路电流为未知量, 利用基尔霍夫定律列写方程组进行求解的方法, 称为支路电流法。

1.1.4 等效电路与电路计算

首先指出, 这里所提等效是指外部等效, 即等效电路与原电路对应端子间伏安关系相等。

(1) 电阻的串、并联电路

① 电阻的串联 在电路中, 若两个或两个以上的电阻按顺序逐一相连, 使电流只有一条通路, 这种连接方式叫电阻的串联, 如图 1-7 所示。

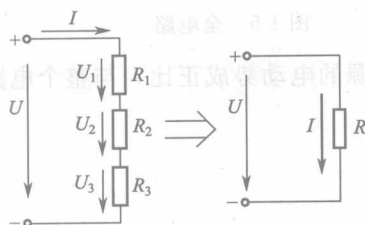


图 1-7 三个电阻的串联

电阻串联电路有以下特点。

a. 串联电路中流过每个电阻的电流相等, 即

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

式中的脚标 n 表示第 n 个电阻 (以下相同)。

b. 电路两端的总电压等于各电阻两端的电压之和, 即

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

c. 串联电路的等效电阻 (即总电阻) 等于各串联电阻之和, 即

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

d. 在串联电路中, 各电阻上分配的电压与各电阻值成正比, 即分压公式为

$$U_n = \frac{R_n}{R} U$$

② 电阻的并联 两个或两个以上电阻接在电路中相同的两点之间的连接方式, 叫电阻的并联, 如图 1-8 所示。

电阻并联电路有以下特点。

a. 并联电路中各电阻两端的电压相等, 且等于电路两端的电压, 即:

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$$

b. 并联电路中的总电流等于各电阻中的电流之和, 即:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

c. 并联电路的等效电阻 (即总电阻) 的倒数, 等于各并联电阻的倒数之和, 即:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

d. 在电阻并联支路中, 各支路分配的电流与支路的电阻值成反比, 即:

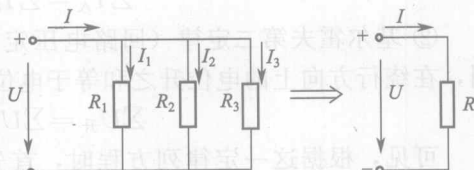


图 1-8 三个电阻的并联

$$I_n = \frac{R}{R_n} I$$

式中, $\frac{R}{R_n}$ 称为分流比。

(2) 电路中电位的计算

在分析电子电路时, 经常用到电位, 电位的概念前已提及, 这里主要介绍电位的计算方法:

- ① 选定参考点 (零电位点);
- ② 标出电路中各元件两端的极性, 计算各元件两端的电压;
- ③ 选择路径 (可选最简路径) 进行计算。

要计算某点的电位, 可从这点出发, 通过一定的路径绕到参考点, 该点的电位就等于此路径上全部电压的代数和 (压降取正, 压升取负)。

例 1-3 在图 1-6 中, 若选 B 点为参考点, 试计算 A 点电位。

解: 本例中可选择三条不同的路径来计算 A 点电位, 分别是

$$\varphi_A = RI = 24 \times 5 = 120(\text{V})$$

$$\varphi_A = -R_1 I_1 + U_{S1} = -1 \times 10 + 130 = 120(\text{V})$$

$$\varphi_A = -R_2 I_2 + U_{S2} = -0.6 \times (-5) + 117 = 120(\text{V})$$

1.2 正弦交流电路

1.2.1 正弦交流电的基本概念

(1) 交流电的基本概念

所谓交流电是指大小和方向都随时间变化的电动势 (电压或电流)。电力工程上所用的交流电大多是按正弦规律变化的, 称为正弦交流电。习惯上所谓交流电也就是指正弦交流电。

(2) 正弦交流电的基本物理量

正弦电流、正弦电压和正弦电动势都可以用数学式表示为:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$$e = E_m \sin(\omega t + \varphi)$$

可见, 一个正弦交流电的变化快慢可用角频率表示; 变化的幅度可用最大值表示; 变化的起点可用初相表示。因此, 角频率、最大值、初相可确定一个正弦量变化的重要特征, 通常称为正弦交流电的三要素, 如图 1-9 所示。

① 周期、频率和角频率 正弦交流电每变化一周所需的时间称为周期, 用字母 T 表示, 单位是秒 (s)。比秒小的单位有毫秒 (ms)、微秒 (μs) 和纳秒 (ns), 换算关系为:

$$1\text{s} = 10^3\text{ms} = 10^6\mu\text{s} = 10^9\text{ns}$$

交流电在 1s 内变化的周期数叫频率, 用字母 f 表示, 单位是赫兹 (Hz)。比赫兹大的单位是千赫 (kHz) 和兆赫 (MHz), 换算关系为:

$$1\text{MHz}=10^3\text{kHz}=10^6\text{Hz}$$

很显然，周期和频率是互为倒数的关系，即

$$f=\frac{1}{T} \quad \text{或} \quad T=\frac{1}{f}$$

此外，正弦量还用角频率 ω 表示变化的快慢，即交流电在 1s 内变化的角度，单位是弧度/秒 (rad/s)。所以，角频率与频率和周期的关系为

$$\omega=2\pi f=\frac{2\pi}{T}$$

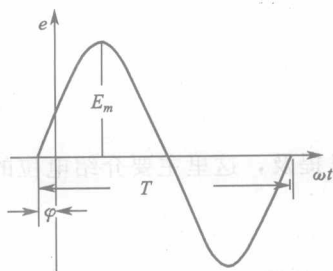


图 1-9 正弦交流电的三要素

我国规定工农业及生活中所用的电源频率为 50Hz，

简称工频，其周期为 0.02s。

② 瞬时值和最大值 交流电的大小是随时间变化的。把交流电在某一时刻的大小称为瞬时值，分别用字母 e 、 u 和 i 表示。最大的瞬时值为最大值，也称为振幅或峰值，分别用字母 E_m 、 U_m 、 I_m 表示。

③ 初相位与相位差 正弦交流电的变化是连续的，并没有固定的起点和终点。计时起点的不同，正弦量在 $t=0$ 时初始值就不同，到达幅值所需要的时间也就不同。 $t=0$ 时的相位角称为初相位或初相，如图 1-10 所示。我们把两个同频率交流电的相之差，用字母 φ 表示，即：

$$\varphi=(\omega t+\varphi_1)-(\omega t+\varphi_2)=\varphi_1-\varphi_2$$

可见，两个同频率交流电的相位差就等于它们的初相之差。若两个正弦量相位差为正，则表示 e_1 超前 e_2 ；若两者相位差为负，则表示 e_1 滞后 e_2 。若两者初相相等，即相位差为零，则称为同相；若两者相位差为 180° ，则称为反相。

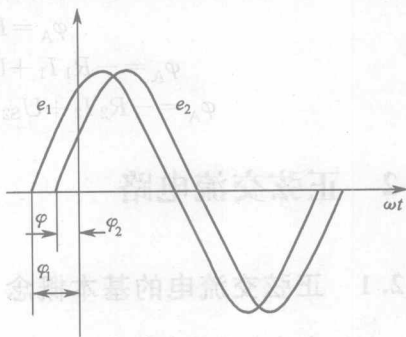


图 1-10 相位关系

④ 交流电的有效值 交流电的大小是不断变化的，很难用某个数值作为衡量交流电大小的标准，为了方便计算和测量，常用一个称为有效值的量。所谓交流电的有效值，就是指在相同的条件下，相同的时间内，让交流电和直流电分别流经相同的电阻，如果它们所产生的热量相等，则把此直流电的数值定义为该交流电的有效值。换言之，把热效应相等的直流值定义为交流电的有效值。分别用 I 、 U 、 E 代表交流电流、电压和电动势的有效值。通过计算，正弦交流电的有效值与最大值的关系为

$$I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}\approx 0.707I_m, \quad U=\frac{U_m}{\sqrt{2}}\approx 0.707U_m, \quad E=\frac{E_m}{\sqrt{2}}\approx 0.707E_m$$

一般无特殊说明时，交流电的大小都是指有效值。如交流电表测出的数值，各种用电器、仪表上所标注的电流、电压数值，都是指有效值。

1.2.2 单相交流电路

由负载和单相交流电源组成的电路称为单相交流电路。与直流电路不同的是：分析各种交流电路，不但要确定电路中电压与电流之间的大小关系，而且要确定它们之