

电
工
技
术
培
训
读
本



电路与电工测量

尹俊 陈敏 蒋苏红 编



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

电 工 技 术 培 训 读 本

电路与电工测量

尹俊 陈敏 蒋苏红 编



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

电路与电工测量/尹俊, 陈敏, 蒋苏红编. —北京: 化学工业出版社,
2006.3

(电工技术培训读本)

ISBN 7-5025-8335-1

I. 电… II. ①尹…②陈…③蒋… III. ①电路-基本知识②电气测
量-基本知识 IV. ①TM13②TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 014220 号

电工技术培训读本

电路与电工测量

尹 俊 陈 敏 蒋苏红 编

责任编辑: 赵丽霞 刘 哲

文字编辑: 吴开亮

责任校对: 宋 玮

封面设计: 于 兵

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(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

北京市彩桥印刷有限责任公司印装

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 7½ 字数 191 千字

、2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8335-1

定 价: 18.00 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

随着科学技术的发展,电气化程度正在日益提高,电气工作人员的综合素质,直接影响到电气设备的安装、维护和检修质量,关系到工厂企事业单位的正常运行和经济效益。应广大电气工作人员的要求,化学工业出版社组织南京化工职业技术学院、中国石化集团公司南京化学工业有限公司、南京工程学院、南京化工技工学校、江苏海事职业技术学院、中国石化集团公司扬子石化公司培训中心等单位编写了《电工技术培训读本》丛书,包括《电路与电气测量》、《实用电子技术基础》、《电机应用技术》、《电气控制与可编程控制器》、《工厂供配电技术》、《电工材料》、《继电保护与综合自动化系统》、《电气运行与管理技术》、《工厂电气试验》。

为保证本套丛书的质量,成立了《电工技术培训读本》编写委员会,编写人员均为生产一线具有丰富生产经验的工程技术专家、高级技师或具有多年丰富的教育培训教学经验的教师。根据劳动和社会保障部颁发的《职业技能鉴定规范》中电工的“知识要求”,结合工厂企业的生产特点,借鉴当前电工的实际工作经验,为电工的职业教育、职业培训和电工的职业技能鉴定,提供一套具有充实内容的教材和参考书。

全套培训读本在编写过程中,着眼于工厂现状,以目前使用较普遍的和以后预计使用量会增加的电气设备为主,适当地考虑到今后发展和提高的要求。本着突出针对性、典型性、实用性的原则,并注意工人培训的特点,内容精炼、实用,注重理论联系实际,学以致用,且有一定的理论深度。每章有学习目标,提出具体的要求,书后有思考练习题,贯彻以培训为主的原则。本套读本通俗易懂,好学好用。不仅适用于具有初中以上文化程度、没有经过系统专业培训的从事电力系统运行与维护的人员,而且对于从事现场电

气专业设计、安装、运行维修的电工、工程技术人员，也具有一定的参考价值。

本书为《电工技术培训读本》之一，是编者多年从事电路和电工测量教学的体会和在实际中的经验总结。作为一名合格的电气工作人员，在学习必要的电路基本理论、基本定律和基本分析方法的同时，还需掌握电工测量的基本知识和操作技能。因此，大力普及电路和电工测量技术，提高电气工作人员的专业素质，是一项十分重要的工作。全书共分9章，包括直流电路，交流电路，线性动态电路，电工测量的基本知识，电流、电压的测量，功率、电能的测量，频率、相位的测量，电路参数的测量以及磁的测量。内容力求深入浅出，通俗易懂，突出实用性，注意培养工作人员分析和解决电路问题的能力、熟练掌握电工测量的基本方法，最终能够把学到的知识更好地用于工作实践中。

本书由尹俊任主编，陈敏、蒋苏红参加部分章节的编写。全书由尹俊统稿。

本书在编写过程中，由于时间仓促，缺乏经验，不足之处在所难免。恳切希望各使用单位和个人提出宝贵意见和建议。

编 者

2005 年 12 月

目 录

第 1 章 直流电路	1
1.1 电路的基本概念	1
1.1.1 电路的组成	1
1.1.2 电路的作用	1
1.1.3 电路图	1
1.2 电路的基本物理量	2
1.2.1 电流及其参考方向	2
1.2.2 电压及其参考方向	4
1.2.3 电位	5
1.2.4 电动势	6
1.2.5 电能	7
1.2.6 电功率	7
1.3 电路的基本元件	9
1.3.1 电阻元件	9
1.3.2 电感元件	12
1.3.3 电容元件	13
1.3.4 电源元件	14
1.4 电路的工作状态	15
1.4.1 开路	15
1.4.2 短路	16
1.4.3 有载工作状态	16
1.4.4 电气设备的额定值	16
1.5 电路的基本定律	17
1.5.1 欧姆定律	17
1.5.2 基尔霍夫定律	18

1.6 线性电路的基本定理·····	23
1.6.1 叠加定理·····	23
1.6.2 戴维南定理·····	25
思考与练习 ·····	28
第2章 交流电路 ·····	31
2.1 正弦交流电的基本概念·····	31
2.1.1 周期、频率和角频率·····	31
2.1.2 瞬时值、最大值和有效值·····	32
2.1.3 相位、初相位和相位差·····	33
2.1.4 正弦量的三要素·····	34
2.1.5 正弦量的相量表示法·····	35
2.2 正弦交流电路的分析·····	37
2.2.1 纯电阻电路·····	37
2.2.2 纯电感电路·····	38
2.2.3 纯电容电路·····	39
2.2.4 RLC 串联电路 ·····	40
2.3 正弦交流电路的功率及功率因数·····	44
2.3.1 正弦交流电路的功率·····	44
2.3.2 功率因数的提高·····	47
2.4 谐振电路·····	49
2.4.1 串联谐振·····	49
2.4.2 并联谐振·····	52
2.5 三相交流电路·····	55
2.5.1 三相电源的供电方式·····	55
2.5.2 三相负载的连接·····	58
2.5.3 三相电路的功率·····	61
思考与练习 ·····	62
第3章 线性动态电路 ·····	65
3.1 过渡过程的基本概念·····	65
3.1.1 稳态与暂态·····	65

3.1.2	换路定律与电路的初始值	66
3.2	RC 电路的过渡过程	68
3.2.1	RC 电路的充电	68
3.2.2	RC 电路的放电	71
3.3	RL 电路的过渡过程	73
3.3.1	RL 电路接通电源	73
3.3.2	RL 电路脱离电源	75
* 3.4	一阶电路的三要素法	76
	思考与练习	78
第 4 章	电工测量的基本知识	80
4.1	电工测量的方法	80
4.1.1	电工测量的意义	80
4.1.2	电工测量的概念	80
4.1.3	测量方式和测量方法	81
4.2	测量误差	83
4.2.1	测量误差的分类	83
4.2.2	测量误差的消除方法	84
4.2.3	测量误差的表示方法	85
4.3	电工指示仪表	87
4.3.1	电工仪表的分类、标志和型号	87
4.3.2	电工指示仪表的组成	96
4.3.3	电工指示仪表测量机构的主要部分	97
4.3.4	电工指示仪表的工作原理	97
4.4	仪表的误差及准确度	99
4.4.1	仪表误差的分类	100
4.4.2	准确度	100
4.4.3	仪表的灵敏度和仪表常数	101
4.5	数字仪表	102
4.5.1	数字仪表的特点	102
4.5.2	数字仪表的分类	103

思考与练习	104
第 5 章 电流、电压的测量	106
5.1 电流、电压的测量方法	106
5.1.1 直流电流、电压的测量	106
5.1.2 交流电流、电压的测量	110
5.2 磁电系检流计	113
5.2.1 检流计结构	113
5.2.2 检流计的正确使用	113
5.3 万用表	114
5.3.1 万用表的结构	114
5.3.2 电流测量线路	116
5.3.3 电压测量线路	116
5.3.4 电阻测量线路	118
5.3.5 音频电平测量电路	119
5.3.6 万用表的使用	119
5.4 测量用互感器	121
5.4.1 互感器的用途	121
5.4.2 互感器的工作原理	121
5.4.3 互感器的使用	123
5.4.4 钳式电流表	124
5.5 直流电位差计	124
5.5.1 直流电位差计的工作原理	125
5.5.2 直流电位差计的技术性能和分类	126
5.5.3 直流电位差计的应用	126
5.6 数字电压表	127
5.6.1 数字电压表的结构和特点	127
5.6.2 数字电压表的使用	129
5.7 数字万用表	130
5.7.1 数字万用表的基本组成	131
5.7.2 数字万用表的使用	131

5.8 电流表与电压表的选择	136
5.8.1 仪表类型的选择	136
5.8.2 仪表准确度的选择	138
5.8.3 仪表量限的选择	138
5.8.4 仪表内阻的选择	138
5.8.5 仪表工作条件的选择	139
思考与练习	139
第6章 功率、电能的测量	141
6.1 功率的测量方法	141
6.1.1 电动系功率表的结构和工作原理	141
6.1.2 直流功率的测量	142
6.1.3 交流功率的测量	143
6.1.4 功率表的正确使用	146
6.2 低功率因数功率表	148
6.2.1 低功率因数功率表的结构	148
6.2.2 低功率因数功率表的使用	149
6.3 电能的测量方法	150
6.3.1 感应系电能表结构和工作原理	150
6.3.2 三相有功电度表	153
6.3.3 三相无功电度表	155
6.3.4 静止式电子电度表	156
6.3.5 电子式三相电度表	159
思考与练习	162
第7章 频率、相位的测量	163
7.1 频率的测量方法	163
7.1.1 工频、低频和高频的测量	163
7.1.2 电动系频率表	167
7.1.3 数字频率表	167
7.2 相位的测量方法	171
7.2.1 相位的测量	171

7.2.2 电动系单相相位表	172
7.2.3 电动系三相相位表	173
7.2.4 相位表的使用	174
思考与练习	174
第8章 电路参数的测量	175
8.1 电路参数的测量方法	175
8.1.1 直读法	175
8.1.2 电桥法	176
8.1.3 补偿法	176
8.1.4 谐振法	176
8.1.5 间接法	177
8.2 电桥	179
8.2.1 直流电桥	179
8.2.2 交流电桥	184
8.2.3 变压器电桥	185
8.3 带电测温装置	186
8.3.1 工作原理	186
8.3.2 使用方法	187
8.4 兆欧表	187
8.4.1 兆欧表的结构	188
8.4.2 兆欧表的工作原理	188
8.4.3 兆欧表的使用	190
8.5 接地电阻测量仪	192
8.5.1 工作原理	192
8.5.2 ZC8 型接地电阻测量仪	193
8.5.3 钳式接地电阻测量仪	195
8.6 介质损耗的测量	196
8.6.1 测量方法	196
8.6.2 介质损耗的测量仪表	197
思考与练习	208

第 9 章 磁的测量	210
9.1 概述	210
9.1.1 磁场的测量	210
9.1.2 磁性材料的测量	210
9.2 磁场的测量	211
9.2.1 冲击检流计	211
9.2.2 磁通计	212
9.2.3 高斯计	213
9.3 磁性材料的测量	214
9.3.1 直流磁特性曲线的测量	214
9.3.2 交流磁性的测量	215
思考与练习	217
思考与练习部分答案	218
参考文献	220

第 1 章 直流电路

电路是电流通过的路径,是由各种电气设备按一定的方式连接起来的整体。电路也称电网络,简称网络。本章主要讨论电路的基本概念、基本物理量、基本元件和基本定律,并以直流电路为例介绍电路的基本分析方法。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路的组成

人们在工作 and 生活中时常会遇到一些实际电路,它们根据某种需要由各种电气设备和元器件按一定的方式连接而成。如手电筒电路、电力输电线路、集成电路等。通常电路主要由电源、负载和中间环节三部分组成。如图 1-1 所示手电筒电路中的电池、灯泡和开关,分别属于电源、负载和中间环节。

电源是供给电能的设备。其作用是将其他形式的能转变成电能。例如,发电机将机械能转换为电能,电池将化学能转换为电能等。

负载是取用电能的设备。其作用是将电能转换为其他形式的能。例如,电动机将电能转换为机械能,电炉将电能转换为热能,灯泡将电能转换为光能等。

电路中间环节的作用则是实现电能的传输与信号的处理。如导线、开关、熔断器等。

1.1.2 电路的作用

电路的作用有两类:一是进行能量的转换、传输和分配,如电力系统的变压器、输电线等;二是进行信号的加工、传递和处理,如电视机电路、计算机网络等。

1.1.3 电路图

在分析计算、设计安装或修理各种电气设备等实际电路时,常

要使用表示电路连接情况的图，这种用规定的图形表示电路连接情况的图称为电路图，其图形符号应符合国家标准。如图 1-1 所示的最简单的手电筒电路，就可用图 1-2 所示的电路图来表示。

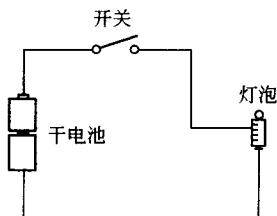


图 1-1 最简单的手电筒电路

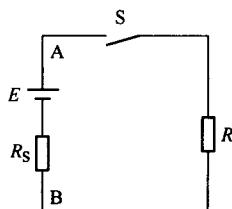


图 1-2 电路图

1.2 电路的基本物理量

电路中的主要物理量包括电流、电压、电位、电动势、电能以及电功率等。

1.2.1 电流及其参考方向

电荷的定向移动形成电流。如金属导体中的自由电子的定向移动，电解液中正、负离子沿着相反方向的移动等，都形成电流。

电流的大小用电流强度来表示，电流强度指单位时间内通过导体横截面的电荷量。电流强度也简称电流。

电流分为两类：一是大小和方向均不随时间变化的电流，称为直流电流，用 I 表示；二是大小和方向均随时间变化的电流，称为交流电流，用 i 表示。

对于直流电流，单位时间内通过导体截面的电量是恒定不变的，其大小为

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

对于交流电流，若在一个无限小的时间间隔 Δt 内，通过导体横截面的电荷量为 Δq ，则该瞬间的电流为

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



在国际单位制 (SI) 中, 电流的单位是安培 (A)。如果在 1 秒 (s) 内通过导体横截面的电荷量是 1 库 (C), 则规定导体中的电流为 1 安 (A)。常用的电流单位还有毫安 (mA)、微安 (μA) 等, 其换算关系为

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

电流的实际方向习惯上是指正电荷移动的方向。如在金属导体中电流的方向与自由电子的定向移动的方向相反, 在电解液中电流的方向与正离子移动的方向相同, 与负离子移动的方向相反。

在简单电路中, 电流的实际方向可由电源的极性直接确定。而在复杂电路中, 电流的实际方向有时事先难以确定。为了分析计算电路的需要, 便引入电流参考方向的概念。

所谓电流的参考方向就是在分析计算电路时, 先任意选定某方向, 作为待求电流的方向, 在电路图中用箭头表示, 并根据此方向进行分析计算。若计算结果为正, 说明电流的参考方向与实际方向相同; 若计算结果为负, 说明电流的参考方向与实际方向相反。图 1-3 表示了电流的参考方向 (图中实线所示) 与实际方向 (图中虚线所示) 之间的关系。



图 1-3 电流的参考方向与实际方向

例 1-1 如图 1-4 所示, 电流的参考方向已标出, 并已知 $I_1 = -1\text{A}$, $I_2 = 1\text{A}$, 试指出电流的实际方向。



图 1-4 例 1-1 图

解 $I_1 = -1\text{A} < 0$, 则 I_1 的实际方向与参考方向相反, 电流

由点 B 流向点 A。

$I_2 = 1\text{A} > 0$ ，则 I_2 的实际方向与参考方向相同，电流由点 B 流向点 A。

1.2.2 电压及其参考方向

如图 1-5 所示的实验电路，导体 A、B 带等量异性电荷，其中

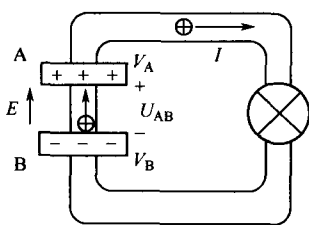


图 1-5 电路示意图

A 带正电，称为正极，B 带负电，称为负极。若用导线将 A、B 两极通过白炽灯相连，白炽灯会发光，说明灯泡中有电流通过，即正电荷在电场力作用下由 A 沿外电路移动到 B 形成电流。电压则是电场力把单位正电荷从 A 移到 B 所做的功，记为

$$U_{AB} = \frac{W}{Q} \quad (1-3)$$

对于交流，则为

$$u_{AB} = \frac{\Delta w}{\Delta q} \quad (1-4)$$

电压的单位为伏特 (V)，常用的单位还有千伏 (kV)、毫伏 (mV) 等。

电压总是针对两点而言的，因此用双下标表示。第一个下标表示正电荷运动的起点，第二个下标表示正电荷运动的终点。电压的实际方向则从起点指向终点。

电压的方向也称极性。在电路图中，一般用极性符号“+”与“-”标注，因此电压的方向为“+”极指向“-”极。同设定电流的参考方向一样，电压也需设定参考方向。当设定的电压参考方向与实际方向相同时，电压值为正；反之，电压值则为负。

例 1-2 如图 1-6 所示，电压的参考方向已标出，并已知 $U_1 = 1\text{V}$ ， $U_2 = -1\text{V}$ ，试指出电压的实际方向。

解 $U_1 = 1\text{V} > 0$ ，则 U_1 的实际方向与参考方向相同，电压由 A 指向 B。



$U_2 = -1\text{V} < 0$ ，则 U_2 的实际方向与参考方向相反，电压由 B 指向 A。



图 1-6 例 1-2 图

特别要指出，电流与电压的参考方向可以任意选择，彼此无关。但为了方便起见，对于负载，一般把电流和电压的参考方向选择为一致，称之为关联参考方向。对于电源，一般把电流和电压的参考方向选择为相反，则称之为非关联参考方向。

1.2.3 电位

在电路中任选一点作为参考点，则电路中某一点与参考点之间的电压称为该点的电位。

和电压不同，电位是针对某一点而言的。一般规定参考点的电位为零，因此参考点也称零电位点。所以，电位也可定义为：电场力把单位正电荷从某一点移到零电位点所做的功就等于该点的电位。用符号 V 或 v 表示。如 A 点的电位记为 V_A 或 v_A 。

电位的单位是伏特 (V)。

电位具有相对性和单值性。电位的相对性是指：电位随参考点选择而异，参考点不同，即使是电路中的同一点，其电位值也不同。电位的单值性是指：参考点一经选定，电路中各点的电位即为一确定值。和电压一样，电位是一个代数量，凡比参考点电位高的各点电位为正，比参考点电位低的各点电位为负。

电路中参考点可任意选定。当电路中有接地点时，则以地为零电位点。若没有接地点时，则选择较多导线的汇集点为参考点。在电子线路中，通常以设备外壳为参考点。参考点用符号“ $\perp$ ”表示。

有了电位的概念后，电压也可用电位来表示，即

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

$$u_{AB} = v_A - v_B$$