

维修电工

徐春霞 艾克木·尼牙孜〇主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

维 修 电 工

主 编 徐春霞 艾克木·尼牙孜
副主编 葛跃田 浦龙梅
参 编 杜 群 李众育 常荣胜 何银光

机 械 工 业 出 版 社

本书编写过程始终贯穿“以职业标准为依据,以企业需求为导向,以职业能力为核心”的理念,把维修电工技术的理论知识和技能考核点全部囊括进来,内容丰富而全面,涵盖了整个电类专业的所有分支,包括电工基础、电子技术和电动机,电工常用工具及电工材料、电气制图 and 识图、电气控制、电气测量,维修电工相关的机械基础知识以及继电器控制线路、电动机故障检修和典型机床控制线路的工作原理、安装配线、试车和常见故障与处理办法;最后还有关于电工的职业道德和相关法律法规等,共计 12 章内容,全书图文并茂,讲解详细。

本书是维修电工职业技能考核鉴定的培训教材和自学用书,也可供技工学校、职业技术学校师生和有关专业技术人员参考。本书每章有配有标准化练习题和答案,也可供再就业和在岗的广大电气工人和农村电工自学及有关技术人员参考和作为再就业培训部门以及维修电工的培训教材。为方便教学,本书配套的《维修电工》课程精品课网站已经建设完毕,详情请登录克拉玛依职业技术学院网站 (<http://www.kzjsxy.net/>常用链接/精品课程)。

图书在版编目(CIP)数据

维修电工/徐春霞,艾克木·尼牙孜主编. —北京:机械工业出版社, 2011.9

ISBN 978-7-111-35718-6

I. ①维… II. ①徐…②艾… III. ①电工—维修—技术培训—教材
IV. ①TM07

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 174120 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:徐明煜 责任编辑:徐明煜 赵玲丽

版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:陈 沛 责任印制:乔 宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·22.5 印张·647 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-35718-6

定价:58.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

维修电工技能操作方面的教材很多,但是关注职业资格理论考核知识点的教材较少,本教材的编写主要专注于理论考核知识点的突破。在编写模式上,采用分级模块化编写。模块化的组合方式把职业资格证书要涵盖的理论知识点和技能考核点全部囊括进来,详细介绍了职业岗位工作中要求掌握的最实用技术,以满足职业能力培养的要求。在内容安排上,由浅入深,循序渐进,同时为了方便学习者迅速抓住重点,提高学习效率,在教材每个章节都设置了章节测试习题,按照职业资格理论考试的模式,编写了标准化试题,整本书测试习题量达到上千道,使学习者能够快速掌握考核的鉴定点。在使用功能上,注重服务于培训和鉴定。根据职业发展的实际情况和培训需求,教材力求体现职业培训的规律,反映职业技能鉴定考核的基本要求,满足培训对象参加各级各类鉴定考试的需要。

本教材由新疆克拉玛依职业技术学院徐春霞、艾克木·尼牙孜任主编,新疆克拉玛依职业技术学院葛跃田和新疆建设职业技术学院浦龙梅任副主编,参加编写工作的还有新疆克拉玛依职业技术学院杜群、李众育、常荣胜、何银光。全书最后由徐春霞统稿。由于时间仓促,书中难免有不足之处,欢迎读者提出宝贵的意见和建议。

编 者

目 录

前言

第1章 电工基础知识 1

1.1 直流电路 1

1.1.1 电路的组成 1

1.1.2 电路中的基本物理量 2

1.1.3 电阻的等效变换 4

1.1.4 电功与电功率 6

1.1.5 电容器 7

1.1.6 基尔霍夫定律 8

1.1.7 叠加原理 9

1.1.8 戴维南定理 10

1.1.9 电流源与电压源的等效变换 11

1.2 正弦交流电路 12

1.2.1 正弦量的三要素法 12

1.2.2 正弦量的相量表示法 14

1.2.3 单一参数交流电路的电阻、电感和电容 16

1.2.4 RLC 串联的交流电路 18

1.2.5 阻抗的串联与并联 21

1.2.6 功率因数的提高 21

1.3 三相交流电路 22

1.3.1 三相交流电源的产生 22

1.3.2 三相正弦交流电路电源及负载的联结 23

1.3.3 三相电路的功率 25

第2章 磁路与变压器 31

2.1 磁和电磁原理 31

2.1.1 磁场与磁力线 31

2.1.2 电流的磁场 31

2.1.3 磁场中的基本物理量 32

2.1.4 磁场对电流的作用力 33

2.1.5 电磁感应 33

2.2 磁路与磁路欧姆定律 34

2.2.1 磁路 34

2.2.2 磁路欧姆定律 34

2.2.3 电磁的应用 35

2.3 变压器 35

2.3.1 变压器的分类 36

2.3.2 变压器的结构 36

2.3.3 变压器的工作原理 38

2.3.4 变压器的铭牌 39

2.3.5 变压器的维护与故障处理 41

第3章 电工常用工具及电工材料 46

3.1 常用电工工具用途和使用方法 46

3.2 常用量具用途和使用方法 51

3.2.1 游标卡尺 51

3.2.2 千分尺 52

3.3 常用电工材料 53

3.3.1 常用导电材料 53

3.3.2 电热材料 57

3.3.3 电阻合金 57

3.3.4 熔丝 57

3.4 常用绝缘材料 58

3.5 常用磁性材料 62

3.6 润滑剂 63

第4章 电气制图 and 识图 67

4.1 电气制图基本知识 67

4.1.1 电气图的基本组成 68

4.1.2 电气图的结构 68

4.1.3 电气符号的组成 69

4.1.4 电气图的图线规则和表示方法 77

4.2 电工应用识图 81

4.2.1 识图的基本方法和步骤 81

4.2.2 识图举例 82

4.3 电气测绘 86

第5章 电动机 90

5.1 直流电动机 90

5.1.1 直流电动机的结构 90

5.1.2 直流电动机的工作原理 91

5.1.3 直流电动机的换向与励磁方式 92

5.1.4 直流电动机的常见故障及检修 93

5.2 三相异步电动机 101

5.2.1 三相异步电动机的结构 101

5.2.2 三相异步电动机的工作原理 102

5.2.3 三相异步电动机的电磁转矩与机械特性 104

5.2.4 三相异步电动机的铭牌和技术数据 106

5.2.5 三相异步电动机的常见故障与处理办法	108	7.3.1 电流表	177
5.2.6 三相异步电动机的维护与保养	110	7.3.2 电压表	179
5.3 单相异步电动机	111	7.3.3 功率表	180
5.3.1 电容分相式单相异步电动机的结构	111	7.4 万用表	182
5.3.2 电容分相式单相异步电动机的工作原理	112	7.5 钳形电流表、绝缘电阻表和接地电阻测量仪	185
5.4 特种电机	112	7.5.1 钳形电流表	185
5.4.1 伺服电动机	112	7.5.2 绝缘电阻表	186
5.4.2 直流测速发电机	114	7.5.3 接地电阻测量仪	188
5.4.3 无换向器电动机	114	第8章 电子技术基础	194
5.4.4 电磁调速异步电动机	115	8.1 半导体基础知识	194
5.4.5 特种电动机的常见故障及检修	115	8.1.1 半导体二极管和晶体管	194
第6章 电气控制系统	124	8.1.2 半导体二极管	195
6.1 常用低压电器	124	8.1.3 半导体晶体管	198
6.1.1 常用低压电器的分类	126	8.2 基本放大电路	200
6.1.2 常用低压电器的功能和用途	126	8.2.1 共发射极放大电路	200
6.2 电气控制系统的基本控制线路	149	8.2.2 放大电路的分析方法	203
6.2.1 三相笼型异步电动机点动控制线路	150	8.3 反馈放大器	205
6.2.2 三相笼型异步电动机长动控制线路	150	8.3.1 正反馈与负反馈	205
6.2.3 三相笼型异步电动机互锁控制线路	151	8.3.2 电压反馈与电流反馈	206
6.2.4 三相笼型异步电动机顺序控制线路	152	8.3.3 串联反馈与并联反馈	206
6.2.5 三相笼型异步电动机两地控制线路	153	8.3.4 直流反馈与交流反馈	206
6.3 三相异步电动机的起动、调速与制动	154	8.4 直流电源	208
6.3.1 三相异步电动机的起动	154	8.4.1 整流电路	208
6.3.2 三相异步电动机的调速和制动	157	8.4.2 滤波电路	211
第7章 电气测量	167	8.4.3 稳压电路	212
7.1 测量的基本知识	167	8.5 晶闸管基础知识	214
7.1.1 测量方法的分类	167	8.5.1 可控整流电路	218
7.1.2 测量误差	168	8.5.2 晶闸管应用举例	219
7.2 常用测量仪表与电子仪器	169	8.6 单结晶体管触发电路	221
7.2.1 磁电系测量仪表	172	第9章 维修电工基本技能	228
7.2.2 电磁系测量仪表	173	9.1 钳工基本知识	228
7.2.3 电动系测量仪表	174	9.1.1 锉削、锯削和錾削	228
7.2.4 感应系测量仪表	175	9.1.2 钻孔	232
7.2.5 电子仪器的分类及测量特点	176	9.1.3 攻螺纹和套螺纹	233
7.3 电流表、电压表和功率表	177	9.1.4 常用轴承	234
		9.2 焊接的基本操作	236
		9.3 导线的基本连接	237
		9.3.1 绝缘层的处理	237
		9.3.2 铜、铝导线的连接	240
		第10章 常用生产机械的电气控制线路	248
		10.1 机床电气控制线路一般分析方法	248
		10.1.1 阅读机床电气原理图的规则	248

10.1.2	机床电气控制线路安装配线的一般原则	249	10.6.3	20/5t 桥式起重机电气控制装置的试车	301
10.1.3	机床通电前的检查与试车	253	10.6.4	20/5t 桥式起重机常见电气故障及维护	304
10.1.4	机床电气控制线路故障与检修的一般分析方法	254	第 11 章 电气安全与电气生产环境保护知识		320
10.2	CA6140 型卧式车床控制线路	255	11.1	安全用电基础知识	320
10.2.1	CA6140 型卧式车床的工作原理	256	11.2	触电急救	321
10.2.2	CA6140 型卧式车床的安装与配线	258	11.2.1	触电的种类及触电电流对人体的影响	321
10.2.3	CA6140 型卧式车床的试车	258	11.2.2	触电形式	322
10.2.4	CA6140 型卧式车床常见电气故障的检修	259	11.2.3	触电紧急救护	323
10.3	X6132 型卧式万能铣床电气控制线路	261	11.3	接地与接零	325
10.3.1	X6132 型卧式万能铣床的工作原理	262	11.3.1	保护接地与保护接零	326
10.3.2	X6132 型卧式万能铣床的安装与配线	268	11.3.2	接地的使用范围	326
10.3.3	X6132 型卧式万能铣床的试车	269	11.3.3	接地装置的安装	327
10.3.4	X6132 型卧式万能铣床常见电气故障的检修	271	11.4	电气文明生产基本知识	329
10.4	Z3050 型摇臂钻床电气控制线路	273	11.4.1	保证安全文明生产的规章制度	329
10.4.1	Z3050 型摇臂钻床的工作原理	273	11.4.2	电气安全的技术措施	333
10.4.2	Z3050 型摇臂钻床的配线与安装	277	11.5	电气生产环境保护知识	335
10.4.3	Z3050 型摇臂钻床的试车	277	11.5.1	环境和环境污染的概念	335
10.4.4	Z3050 型摇臂钻床常见电气故障的检修	280	11.5.2	电磁辐射污染与电磁噪声污染对人类生存环境的影响	336
10.5	MGB1420 型高精度半自动外圆磨床控制线路	281	11.5.3	电磁辐射污染与电磁噪声污染的控制	337
10.5.1	MGB1420 型高精度半自动外圆万能磨床的工作原理	281	第 12 章 职业道德、质量管理及相关法律法规知识(统编)		341
10.5.2	MGB1420 型高精度半自动外圆万能磨床的安装与配线	285	12.1	职业道德	341
10.5.3	MGB1420 型高精度半自动外圆万能磨床的试车	285	12.2	质量管理知识	343
10.5.4	MGB1420 型高精度半自动外圆万能磨床常见的电气故障检修	286	12.3	相关法律法规知识	344
10.6	20/5t 桥式起重机控制线路	288	12.3.1	劳动法的定义	344
10.6.1	20/5t 桥式起重机的工作原理	289	12.3.2	劳动者的权利和义务	344
10.6.2	20/5t 桥式起重机电气控制装置的安装	297	12.3.3	劳动合同制度	345
			12.3.4	劳动合同的订立、变更和解除	345
			12.3.5	劳动安全卫生制度	346
			12.3.6	社会保险制度	347
			12.3.7	劳动争议处理	347
			12.4	合同法的相关知识	348
			12.4.1	合同的概念	348
			12.4.2	合同的特点	348
			12.4.3	经济合同	348
			12.4.4	技术合同	349
			参考文献		354

第1章 电工基础知识

内容提要

本章内容是电工知识的基础篇，通过本章的学习，使大家掌握一些常用的电工基础知识，逐步对电方面的知识点形成理论概念。

本章安排三部分内容，分别是直流电路、正弦交流电路和三相交流电路。直流电路主要讨论电路的组成、电路的基本物理量、电路中的基本元件，并且引入了电流、电压参考方向的概念，同时应用欧姆定律、基尔霍夫定律、叠加原理和戴维南定理对直流电路进行分析和计算；正弦交流电路中讲述了该电路的基本概念、基本规律，引入了相量法对正弦交流电的分析计算，并在介绍了单一参数——电阻、电感和电容交流电路的特性后，分析了 RLC 串联的交流电路、阻抗串联并联电路的工作原理及如何提高功率因数；在三相交流电路中主要讨论三相电动势的产生、三相负载星形和三角形的联结方式、线电压与相电压、线电流与相电流的关系以及三相电路的功率。

1.1 直流电路

1.1.1 电路的组成

1. 电路的概念

电路就是电流流通的途径。电路一般由电源、负载及中间环节（导线、开关）等基本部分组成。如图 1-1a 所示是一个手电筒实物接线图，图 1-1b 是该手电筒的实际电路图。在电路分析计算中，用假定的二端元件，例如电阻元件来代替实际元件（如灯泡），二端元件的电与磁的性质反映了实际电路元件的电与磁的性质，这个假定的二端元件为理想二端元件。由理想二端元件组成的电路称为理想电路模型，也称电路模型，电路模型图中的设备或元件用国家标准规定的符号表示，如图 1-1c 所示。

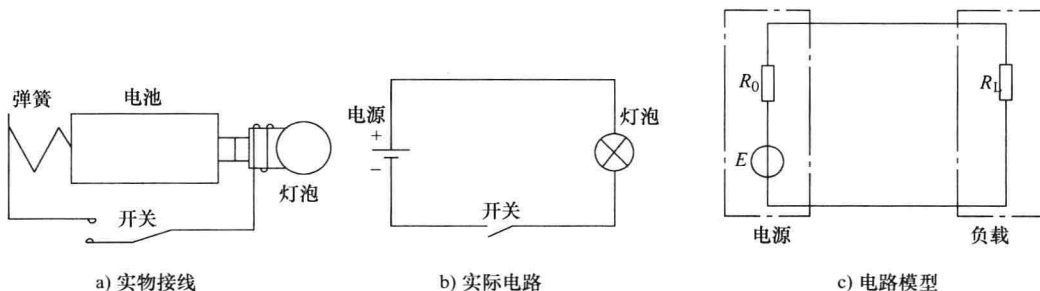


图 1-1 手电筒电路

2. 电路的三种状态

电路通常有三种状态：

(1) 开路 整个电路中某处断开，如开关断开、连接导线断开等。开路处电阻可视为无穷大，电路中无电流通过。开路也称断路，如图 1-2a 所示。

(2) 短路 在电路中，电源或电路的一部分由于某种原因被连接在一起，例如负载或电源

两端被导线连接在一起,称为短路,如图1-2b所示。

(3) 通路 将电路接通,构成闭合回路,电路中有正常的工作电流通过,称为通路,如图1-2c所示。

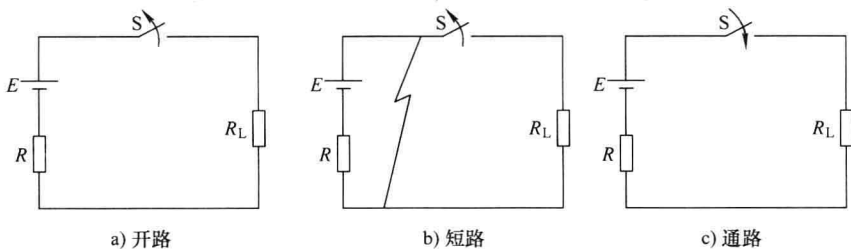


图 1-2 电路三种状态

1.1.2 电路中的基本物理量

1. 电流

电荷有规则的定向移动形成电流。电流是各种不同的带电粒子在电场作用下做有规则的运动形成的,导体中的自由电子、电解液、半导体中的电子与空穴等都属于带电粒子。

电流的大小取决于在一定时间内通过导体横截面电荷量的多少,用电流强度来衡量。假设在 dt 内通过导体横截面的电荷量为 dq 库仑,则电流强度 i 就可用下式表示,即

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

在直流电路中,大小和方向都不随时间变化的电流称为恒定电流,表示为

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

国际单位制 (SI) 中,在 1 秒 (s) 内通过导体横截面的电量为 1 库仑 (C),则导体中的电流就是 1 (A) 安培,简称安。除安培外,常用的电流单位还有千安 (kA)、毫安 (mA) 和微安 (μA),换算关系如下:

$$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A} = 1000 \text{ A}$$

$$1 \text{ A} = 10^3 \text{ mA} = 1000 \text{ mA}$$

$$1 \text{ mA} = 10^3 \mu A = 1000 \mu A$$

电流不仅有大小,而且有方向。习惯上规定正电荷移动的方向为电流的正方向。

在分析电路时,通常要确定电流的正方向,但有时对某段电路中电流的方向往往难以判断,此时可先任意假定电流的参考方向 (正方向),然后列方程求解。当解出的电流为正值时,就认为电流的实际方向与参考方向一致,如图 1-3a 所示。反之,当电流为负值时,就认为电流的实际方向与参考方向相反,如图 1-3b 所示。只有在确定电流参考方向的前提下,电流的正负才有意义。

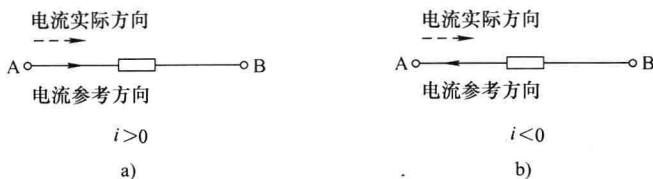


图 1-3 电流的参考方向

2. 电压和电动势

(1) 电压 电压是衡量电场力做功本领大小的物理量。如图 1-4 所示, 在电场中若电场力将单位正电荷 Q 从 a 点移动到 b 点, 所做的功为 A_{ab} , 则 a 、 b 两点之间的电压用带双下标的符号 U_{ab} 表示为

$$U_{ab} = \frac{A_{ab}}{Q} \quad (1-3)$$

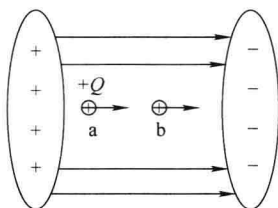


图 1-4 电场力做功

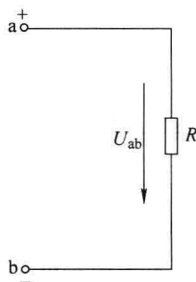


图 1-5 电压的方向

国际单位制 (SI) 中, 电场力将 1 库仑 (C) 的电荷从 a 点移动到 b 点, 所做的功是 1 焦耳 (J), 则 a 、 b 两点之间的电压大小就是 1 伏特 (V), 简称伏。电压常用单位还有千伏 (kV), 毫伏 (mV) 和微伏 (μV), 换算关系如下:

$$1 \text{ kV} = 10^3 \text{ V} = 1000 \text{ V}$$

$$1 \text{ V} = 10^3 \text{ mV} = 1000 \text{ mV}$$

$$1 \text{ mV} = 10^3 \mu V = 1000 \mu V$$

如图 1-5 所示, 电压不仅有大小, 而且有方向。对于负载两端来说, 规定电流流进端为电压的正端, 电流流出端为电压的负端。电压的正方向由正指向负。在分析电路时, 往往难以确定电压的实际方向, 此时可先任意假设电压的参考方向 (正方向), 再根据计算所得值的正负来确定电压的实际方向, 如图 1-6 所示。负载两端的电压一般被称为电压降。

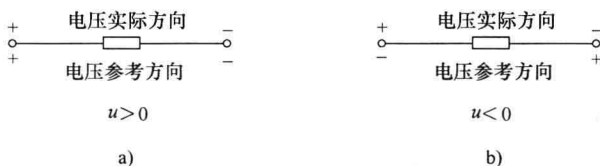


图 1-6 电压的参考方向

(2) 电位 电路中某点与参考点间的电压称为该点的电位。通常把参考点的电位规定为零电位。电位的符号常用带下标的字母 U_a 表示。电位的单位也是伏特 (V)。工程上一般选择大地作为参考点, 即规定大地的电位为零电位。在电子仪器和设备中, 常把金属机壳或电路的公共接点的电位规定为零电位。

电路中任意两点间的电位差称为这两点间的电压, 用 U_{ab} 表示, 即

$$U_{ab} = U_a - U_b \quad (1-4)$$

电位和电压的关系是, 电位是某点对参考点的电压, 电压是任两点间的电位之差; 电位是相对量, 随参考点的改变而改变, 而电压是绝对量, 不随参考点的改变而改变。

(3) 电动势 电动势是衡量电源将非电能转换成电能本领的物理量, 是指在电源内部, 外力将单位正电荷从电源的负极 b 移动到电源正极 a 所做的功。如图 1-7 所示, 用符号 E 表示为

$$E = \frac{A_{ab}}{Q} \quad (1-5)$$

电动势的单位与电压相同,也是伏特(V)。对于一个电源来说,既有电动势,又有端电压,端电压只存在于电源的外部,其正方向由正极指向负极。电动势只存在于电源内部,正方向为负极指向正极。

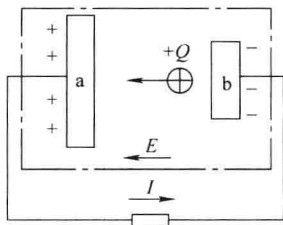


图 1-7 电源的电动势

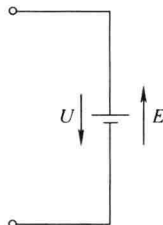


图 1-8 电动势与电压的关系

一般情况下,电源的端电压总是低于电源内部的电动势,只有当电源开路时,电源的端电压才与电源的电动势相等,如图 1-8 所示。

3. 电阻

电阻是反映导体对电流起阻碍作用大小的物理量,用字母 R 表示。电阻的单位是欧姆(Ω),简称欧。

国际单位制(SI)中,导体两端的电压是 1 伏(V),导体内通过的电流是 1 安(A)时,这段导体的电阻就是 1 欧(Ω)。常用的电阻单位还有千欧(k Ω)和兆欧(M Ω),换算关系如下:

$$1\text{ k}\Omega = 10^3\Omega = 1000\Omega$$

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

导体的电阻是客观存在的,它不随导体两端电压大小而变化。即使没有电压,导体仍然有电阻。导体的电阻跟导体长度成正比,跟导体的横截面积成反比,并与导体的材料性质有关。对于长度为 l ,截面积为 s 的导体,电阻的表达式为

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (1-6)$$

式中 ρ ——与导体材料性质有关的物理量,称为电阻率($\Omega \cdot \text{m}$)。

电阻率通常是指在 20°C 时,长 1m 而横截面积为 1 mm^2 的某种材料的电阻值。

电阻的倒数称为电导。电导用符号 G 表示。其与电阻的关系表达式为

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-7)$$

导体的电阻越小,电导就越大。电导大就表示导体的导电性能良好。电导的单位是西门子(S),简称西。

1.1.3 电阻的等效变换

1. 欧姆定律

(1) 部分电路欧姆定律 部分电路欧姆定律是指不包含电源的电路,如图 1-9 所示,流过导体的电流强度与这段导体两端的电压成正比,与导体的电阻成反比,用公式表示为

$$I = \frac{U}{R} \quad (1-8)$$

欧姆定律表明了电路中电流、电压、电阻三者之间的联系，是电路分析的基本定律。

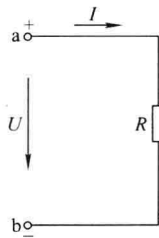


图 1-9 部分电路欧姆定律

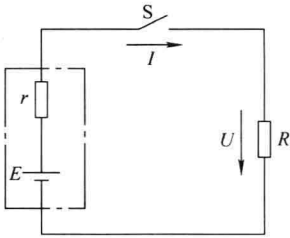


图 1-10 全电路欧姆定律

(2) 全电路欧姆定律 全电路是指由内电路和外电路组成闭合电路的整体，如图 1-10 中的点画线框内代表的电源电路，称为内电路。电源内部一般都有内阻，用字母 r 或 R_0 表示。有时内电阻可以不单独标识出，而是在电源符号旁边注明内电阻的数值。从电源的一端经过负载 R 再回到电源另一端的电路，称为外电路，又称负载电路。

全电路欧姆定律是指在全电路中电流强度与电源的电动势成正比，与整个电路的内、外电阻之和成反比，表达式为

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

由式 (1-9) 可得到

$$E = IR + I_r = U_{\text{外}} + U_{\text{内}} \tag{1-10}$$

式中 $U_{\text{内}}$ ——电源内阻的电压降；

$U_{\text{外}}$ ——电源向外电路的输出电压，也称电源的端电压。

因此，全电路欧姆定律又可描述为电源电动势在数值上等于闭合电路中各部分的电压之和。

2. 电阻的连接

(1) 电阻串联和并联 把两个或两个以上的电阻按顺序首尾相接，使电流只有一条流通途径的连接方式称为电阻的串联；把两个或两个以上的电阻并列地连接在两点之间，使每一个电阻两端都承受相同电压的连接方法称为电阻的并联。其特点见表 1-1。

表 1-1 电阻串、并联的特点

电阻连接方式	等效参数计算	电路中的电压	电路中的电流
串联	电路的等效电阻等于各电阻之和	电路中总电压等于各段电阻电压之和	电路中流过每个电阻的电流都相等
	$R = R_1 + R_2 + \cdots + R_n$	$U = U_1 + U_2 + \cdots + U_n$	$I = I_1 = I_2 = \cdots = I_n$
并联	电路的等效电阻的倒数，等于各并联电阻的倒数之和	电路中各电阻两端的电压相等，并且等于电路两端的电压	电路的总电流等于电阻中的各电流之和
	$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + \cdots + 1/R_n$ 或 $G = G_1 + G_2 + G_3 + \cdots + G_n$	$U = U_1 = U_2 = \cdots = U_n$	$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n$

(2) 电阻的混联 电路中电阻元件既有串联又有并联的连接方式，称为混联。对于某些较为繁杂的电阻混联电路，判别各电阻的串、并联关系比较有效的方法就是画出等效电路图，即把原电路整理成较为直观的串、并联关系的电路图，然后计算其等效电阻，如图 1-11a ~ d 所示。

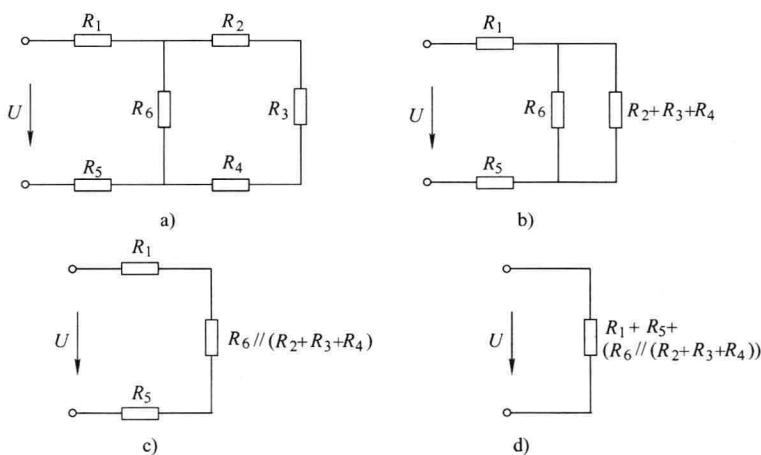


图 1-11 电阻混联的计算

1.1.4 电功与电功率

电流通过金属导体时，导体会发热，这种现象称为电流的热效应。实验表明，电流流过金属导体产生的热量与电流的二次方、导体的电阻及通过电流的时间成正比，即

$$Q = I^2 R t \quad (1-11)$$

在国际单位制中，电流的单位为安（A），电阻的单位为欧（ Ω ），时间的单位为秒（s），则热量的单位为焦耳（J），此关系称为焦耳定律。

1. 电功

电流通过不同的负载时，负载可以将电源提供的电能转变成其他不同形式的能量，电流就要做功。如果 a、b 两点的电压为 U ，则将电量为 q 的电荷从 a 点移到 b 点时电场力所做的功为

$$A = Uq \quad (1-12)$$

由于

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-13)$$

在公式中，电压单位为伏（V），电流单位为安（A），电阻单位为欧（ Ω ），时间单位为秒（s），则电功单位为焦耳（J）。在实际应用中，电功还有一个常用的单位是千瓦·小时（kW·h）。

$$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J} \quad (1-14)$$

2. 电功率

电功表示电场力做功的多少，但不能表示做功的快慢。单位时间电流所做的功称为电功率，它用来表示电场力做功的快慢。电功率用字母 P 表示，即

$$P = \frac{A}{t} \quad (1-15)$$

式中，电功的单位为焦耳（J），时间的单位为秒（s），则电功率的单位为焦耳每秒（J/s）或瓦特（W，简称瓦）。实际应用中，电功率的单位还有千瓦（kW）。

电阻的电功率与其电压、电流、电阻的关系有

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (1-16)$$

1.1.5 电容器

1. 电容器

电容器是用来存储电荷的装置，它由两块金属极板中间夹有绝缘材料构成。

当电容器与直流电源接通时，两块极板就带有等量的异性电荷。电荷量 Q 与电压 U 成正比，即

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1-17)$$

C 是电容器的电容量，简称电容。电容是表示电容器存储电荷能力的物理量，它是电容器的固有参数。它与极板的尺寸及绝缘介质的性能有关，又可以表示为

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \quad (1-18)$$

式中 S ——平行板电容器的面积 (m^2)；

d ——极板间的距离 (m)；

ε ——介质的介电常数 (F/m)。

电容的单位为法拉 (F)，简称法，常用的还有微法 (μF) 和皮法 (pF)，其换算关系如下：

$$1\text{F} = 10^6 \mu\text{F}$$

$$1\mu\text{F} = 10^6 \text{pF}$$

2. 电容器的种类

电容器的种类很多。按结构不同可分为固定、可变、半可变电容器；按介质不同可分为纸质、云母、陶瓷、涤纶、玻璃釉和电解电容器等。电解电容器有正、负极，使用时正极接高电位，负极接低电位。

3. 电容器的主要参数

(1) 标称电容 标称电容是工厂生产的系列电容器的电容量。

(2) 耐压值 耐压值是电容器长期工作时能承受的最高电压，使用时实际电压不能超过耐压值。

(3) 允许偏差 允许偏差是标称电容允许的偏差。

4. 电容器的串联和并联

两个或两个以上的电容器依次相连，只有一条通路的连接方式，称为电容器的串联，如图 1-12 所示。两个或两个以上电容器的一端连在电路中的同一点，另一端也同时连在另一点，使各电容器承受相同的电压，称为电容器的并联，如图 1-13 所示，其特点见表 1-2。

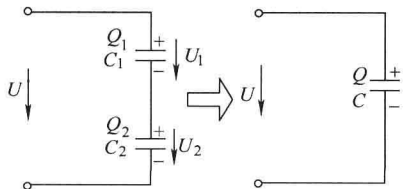


图 1-12 电容器的串联

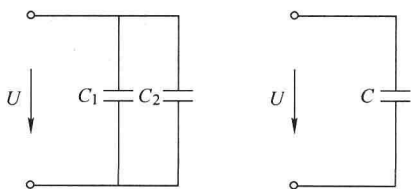


图 1-13 电容器的并联

表 1-2 电容串、并联的特点

电容器的连接方式	等效参数计算	电路中的电压	电路中的电荷量
串联	等效电容的倒数等于各电容倒数之和	总电压等于各电容器上电压之和	每个电容器上的电荷量相等
	$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + \cdots + 1/C_n$	$U = U_1 + U_2 + \cdots + U_n$	$Q = Q_1 = Q_2 = \cdots = Q_n$
并联	等效电容量等于各电容器的电容量之和	各电容两端的电压相同	总电荷量等于各电容器上电荷量之和
	$C = C_1 + C_2 + \cdots + C_n$	$U = U_1 = U_2 = \cdots = U_n$	$Q = Q_1 + Q_2 + \cdots + Q_n$

1.1.6 基尔霍夫定律

运用欧姆定律及电阻串、并联就能对电路进行化简、计算的直流电路，称为简单直流电路。但是在实际应用中，经常会遇到如图 1-14 所示的电路。虽然电阻元件只有三个，可是两个电源接在不同的电路上，三个电阻之间不存在串、并联关系。这种不能用电阻串、并联化简的直流电路称为复杂直流电路。

分析复杂直流电路的方法很多，但它们的依据是电路的两条基本定律——欧姆定律和基尔霍夫定律。基尔霍夫定律既适用于直流电路，也适用于交流电路。为了阐明该定律含义，先介绍电路中的几个基本概念。

支路：电路中流过同一电流的每一个分支称为一条支路。它由一个或几个相互串联的电路元件所构成。图 1-14 中有三条支路： E_1 、 R_1 支路， R_3 支路， E_2 、 R_2 支路。

节点：三条或三条以上支路的汇合点称为节点。图 1-14 中有两个节点，即 A、B。

回路：电路中任一闭合路径都称为回路。图 1-14 中有 ADBCA 回路、ABDA 回路和 ABCA 回路三个回路。

网孔：在回路中间不框入任何其他支路的回路叫网孔，网孔也称为最简单的回路。图 1-14 中有两个网孔分别是 ABDA、ADBCA。

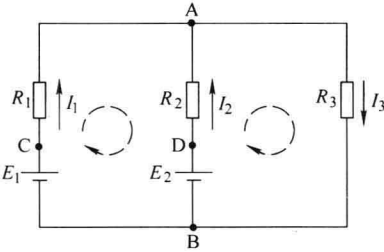


图 1-14 复杂直流电路

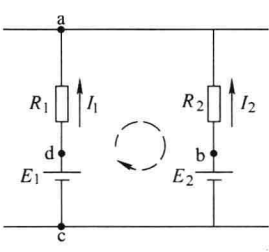


图 1-15 回路

1. 基尔霍夫第一定律

基尔霍夫第一定律（Kirchhoff's Current Law），简称 KCL，规定在任一瞬间，流进某一节点的电流之和恒等于流出该节点的电流之和。该定律可以用来分析电路中某一节点上各支路之间的电流关系，表示为

$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}} \tag{1-19}$$

在图 1-14 中，对于节点 A，有

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 &= I_3 \\ \sum I &= 0 \end{aligned} \tag{1-20}$$

结论：在任一瞬间，对任一节点来说，流入或流出该节点电流的代数和恒等于零。

在分析未知电流时，可先任意假设支路电流的参考方向，列节点电流方程时，假设流入节点的电流为正值，流出节点的电流为负值。根据计算值的正负结果，来确定未知电流的实际方向。有些支路的电流计算结果可能是负值，这是由于所假设的电流方向与实际方向相反所致。

2. 基尔霍夫第二定律

基尔霍夫第二定律 (Kirchhoff's Voltage Law)，简称 KVL，规定在任一时刻，对于电路的任意闭合回路，各段电压的代数和恒等于零，该定律可以用来分析任一回路内各段电压之间的关系，即从回路任意一点出发，以顺时针方向或逆时针方向沿回路循环一周，不管电位升高、降低，只要起点和终点是同一点，该回路中的电压和为零，表示为

$$\sum U = 0 \quad (1-21)$$

如图 1-15 所示，给各支路标明各自的方向，并规定顺时针方向为回路正方向，根据 KVL 可知 $U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} + U_{da} = 0$ ，根据电压与电流的参考方向可以列出

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 + E_2 - E_1 = 0 \text{ 或 } I_1 R_1 - I_2 R_2 = E_1 - E_2$$

整理可得定律的另一种表示形式，即

$$\sum E = \sum IR \quad (1-22)$$

结论：在任一时刻，任一回路中电动势的代数和恒等于电阻上电压降的代数和。其中，电动势的方向与所选回路规定的正方向一致者，取正值，反之则取负值。凡电流的参考方向与回路规定的正方向一致者，该电流在电阻上所产生的电压降取正值，反之则取负值。

1.1.7 叠加原理

所谓叠加原理是指在线性电路中，各支路电流（或电压）等于各电源分别单独作用在该支路所产生的电流（或电压）的代数和，如图 1-16b、c 所示。所谓电源分别单独作用是指某电路中一个电源起作用，而其他电源不起作用，即将不起作用的电压源短路，电流源断路。由图 1-16 分析可知， E_1 、 E_2 两电源共同作用时，电路中产生各支路电流为 I_1 、 I_2 和 I_3 ； E_1 单独作用时，电路中产生各支路电流为 I'_1 、 I'_2 和 I'_3 ； E_2 单独作用时，电路中产生各支路电流为 I''_1 、 I''_2 和 I''_3 。而 I_1 、 I_2 和 I_3 的数值大小应为相对应的 I'_1 、 I'_2 、 I'_3 和 I''_1 、 I''_2 、 I''_3 的代数和。根据图 1-16 可得

$$I_1 = I'_1 - I''_1$$

$$I_2 = -I'_2 + I''_2$$

$$I_3 = I'_3 + I''_3$$

由电源单独作用时所产生的电流与原定电路的电流参考方向相同取正值，反之取负值。

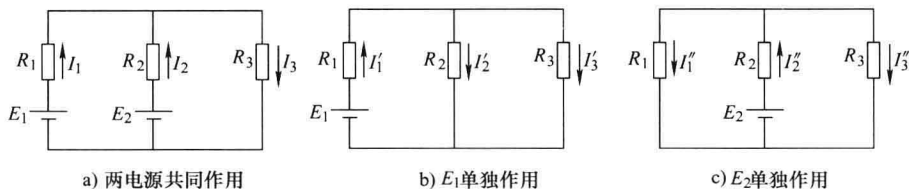


图 1-16 叠加原理

【例题 1-1】在图 1-16 所示电路中， $E_1 = 18\text{V}$ ， $E_2 = 9\text{V}$ ， $R_1 = R_2 = 1\Omega$ ， $R_3 = 4\Omega$ ，用叠加原理求各支路电流。

解：1) E_1 单独作用， E_2 短路时的 I'_1 、 I'_2 和 I'_3 。

$$I'_1 = \frac{E_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{18}{1 + \frac{1 \times 4}{1 + 4}} \text{ A} = 10 \text{ A}$$

$$I'_2 = I'_1 \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 10 \times \frac{4}{1 + 4} \text{ A} = 8 \text{ A}$$

$$I'_3 = I'_1 \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 10 \times \frac{1}{1 + 4} \text{ A} = 2 \text{ A}$$

2) E_2 单独作用, E_1 短路时的 I''_1 、 I''_2 、 I''_3 。

$$I''_2 = \frac{E_2}{R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}} = \frac{9}{1 + \frac{1 \times 4}{1 + 4}} \text{ A} = 5 \text{ A}$$

$$I''_1 = I''_2 \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3} = 5 \times \frac{4}{1 + 4} \text{ A} = 4 \text{ A}$$

$$I''_3 = I''_2 \frac{R_1}{R_1 + R_3} = 5 \times \frac{1}{1 + 4} \text{ A} = 1 \text{ A}$$

3) 求电路中实际的 I_1 、 I_2 和 I_3 。

$$I_1 = I'_1 - I''_1 = (10 - 4) \text{ A} = 6 \text{ A}$$

$$I_2 = -I'_2 + I''_2 = (-8 + 5) \text{ A} = -3 \text{ A}$$

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = (2 + 1) \text{ A} = 3 \text{ A}$$

用叠加原理求解电路,就是把一个多电源的复杂电路化成几个单电源的简单电路来进行计算。不需再设置回路电流或支路电流,计算起来更加方便些。显然,叠加原理适用于分析、求解多电源的线性直流电路。

1.1.8 戴维南定理

凡是具有两个引出端的部分电路,无论其内部结构如何,都可称为二端网络,如图 1-17 所示。图 1-17a 所示内部电路不含电源,称为无源二端网络。图 1-17b 所示内部电路含有电源,称为有源二端网络。

有源二端网络对所要计算的支路,可以用一个电压源和电阻的串联组合来等效替代,其中电阻等于二端网络化成无源网络(电压源短路、电流源开路)后,从两端看进去的电阻,电压源的电压等于二端网络的开路电压,这就是戴维南定理。

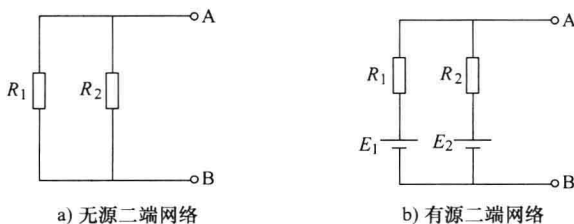


图 1-17 二端网络

如图 1-18a 所示是一个有源二端网络与一个负载电阻 R_L 相连接的电路图,图 1-18b 是根据戴维南定理将有源二端网络等效为电动势 E 和内阻 R_0 ,再与负载电阻 R_L 相串联的电路。

通过等效变换后的电路变成一个简单电路,如求流过负载电阻 R_L 的电流,用下式计算:

$$I = \frac{E}{R_L + R_0} \quad (1-23)$$