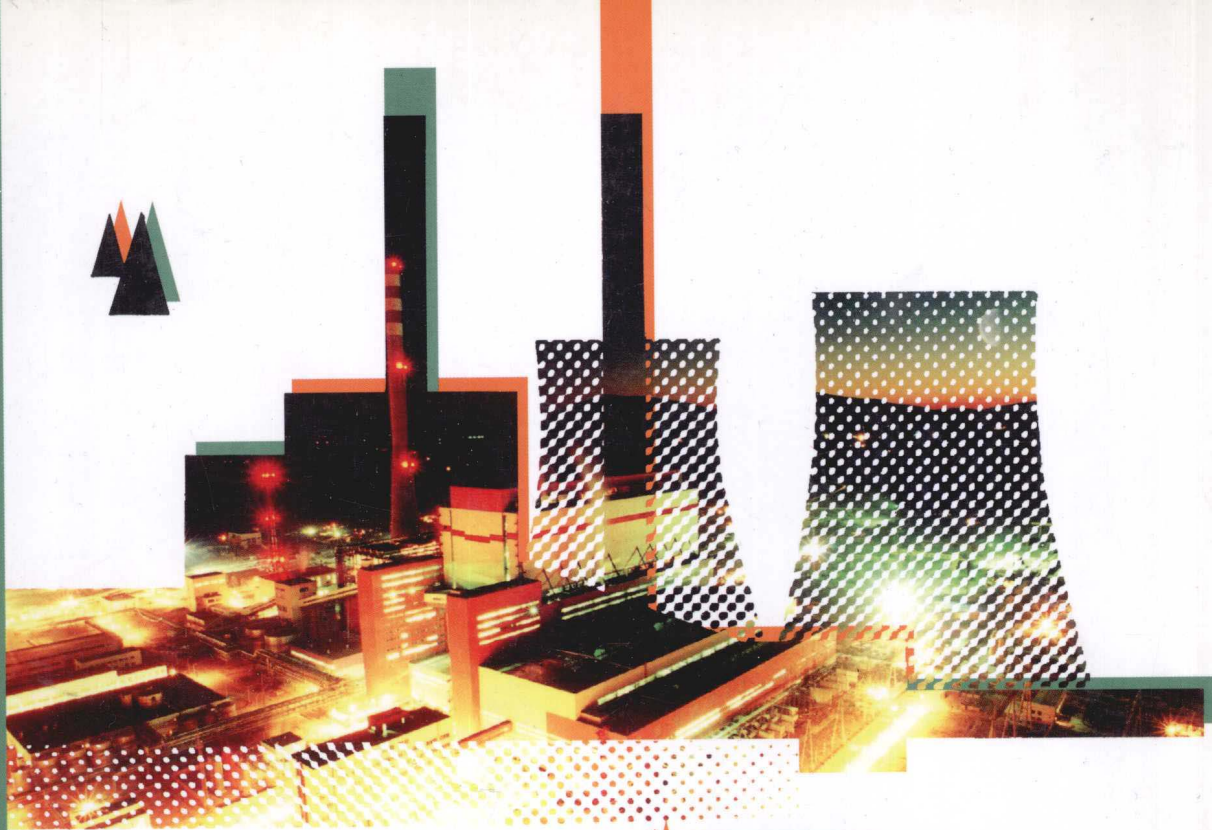


地方电厂岗位运行培训教材



第二版

辽宁省电力工业局 组编 范绍彭 主编

电气运行



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

地方电厂岗位运行培训教材

第二版

电 气 运 行

辽宁省电力工业局 组编 范绍彭 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

近 10 多年来, 全国有一大批地方电厂、企业自备电厂和热电厂的 6~100MW 火力发电机组相继投产, 运行岗位新职工和生产人员迅速增加。为了搞好运行生产人员岗位技术培训和技能鉴定, 按照部颁《国家职业技能鉴定规范·电力行业》、《电力工人技术等级标准》和《火力发电厂运行岗位规范》以及运行规程的要求, 突出岗位重点、注重操作技能、便于考核培训等, 组织专家对 1995 年出版的第一版内容进行了全面修订和出版了《地方电厂岗位运行培训教材》(第二版), 分为锅炉运行、汽轮机运行、电气运行、热工控制与运行和电厂化学 5 册。

本书是《地方电厂岗位运行培训教材(第二版)》(电气运行), 主要介绍电工基础、电气测量、电子技术基础、发电厂及电力系统, 以及 6~100MW 火力发电机组的电气设备, 如发电机、励磁机、电动机、变压器、断路器、隔离开关、互感器、电抗器、消弧线圈、熔断器、电容器、绝缘子、母线、电缆、避雷器、配电设备和低压电器等原理、操作运行和事故处理, 另外还介绍了电气二次回路、继电保护与自动装置等原理接线和安全用电知识。

本书适用于全国地方电厂、企业自备电厂和热电厂 6~100MW 火力发电机组、具有高中及以上文化程度的电气设备运行的生产人员、工人、技术人员、管理干部以及有关电气专业师生等的岗位技能和技能鉴定的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

电气运行/范绍彭主编; 辽宁省电力工业局组编. 2
版. —北京: 中国电力出版社, 2005
地方电厂岗位运行培训教材
ISBN 978-7-5083-3410-3

I. 电… II. ①范…②辽… III. 电力系统运行—技术培训—教材 IV. TM732

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 059293 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

1995 年 4 月第一版

2005 年 8 月第二版 2008 年 7 月北京第十七次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.625 印张 666 千字

印数 65731—68730 册 定价 38.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

近 10 多年来,有一大批地方电厂、企业自备电厂和小型供热发电厂的发电机组相继投产,运行岗位新职工和生产人员迅速增加。尽快提高运行人员的技术水平,是确保地方电厂和电网安全经济运行的当务之急。

为了搞好运行人员技术培训和技能鉴定,参照部颁《国家职业技能鉴定规范·电力行业》、《电力工人技术等级标准》(火力发电部分)和《火力发电厂运行岗位规范》的要求,1993 年受电力工业部水电开发和农村电气化司委托,辽宁省电力工业局组织大连电力学校和一些地方电厂具有丰富现场运行经验和教学经验的工程技术人员和教师,经过三年多的时间,于 1995 年 4 月编写并由中国电力出版社出版了本套《地方电厂岗位运行培训教材(第一版)》,本次是对第一版进行全面修订,并将本套教材分为锅炉运行、汽轮机运行、电气运行、热工控制与运行和电厂化学五个分册。

本套教材根据地方电厂发电设备运行的实际情况和运行人员的特点,从实用性出发,在系统、全面的基础上,依据规范标准,理论突出重点,实践注重技能操作,便于自学、培训和考核,对地方电厂运行工人和生产人员掌握应知专业理论知识和应会操作技能将起很大作用。

本套教材作为从事 6~100MW 火力发电机组运行工作、具有高中文化程度的运行人员培训教材,也可作为电力中等职业学校和技工学校的教材。

为配合本套教材的教学、考核命题以及运行生产人员平时带着问题自学的需要,我们还将对 1996 年底与《地方电厂岗位运行培训教材(第一版)》相配套编写出版的一套《地方电厂运行人员技术等级考核题库(第一版)》进行全面修订,也分为锅炉运行、汽轮机运行、电气运行、热工控制与运行和电厂化学五个分册,并与本套教材的第二版相配套,以满足培训和考核需要。

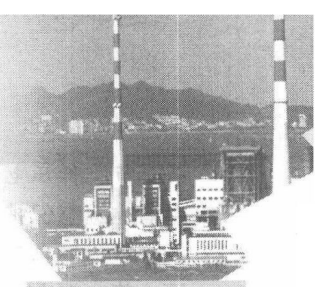
《地方电厂岗位运行培训教材(第二版)》(电气运行)是根据部颁《国家职业技能鉴定规范·电力行业》、《电力工人技术等级标准》(火力发电部分)和《火力发电厂运行岗位规范》的要求,结合地方电厂现状进行编写的,是作为地方电厂、企业自备电厂和热电厂 6~100MW 火力发电机组电气运行岗位技能和技能鉴定的培训教材。

《地方电厂岗位运行培训教材(第二版)》(电气运行)由大连电力学校范绍彭主编,李秀彦参编。本书第一版还有于珍华、华吉正、周宝龙参加了编写工作,本书由辽河油田热电厂王建海审稿,最后由王泽标审定。

由于编者水平和经历有限,书中难免存在不妥之处,希望读者批评指正。

编 者

2005 年 6 月



目录

前言	
第一章 电工基础	1
第一节 直流电路	1
第二节 磁和磁路	9
第三节 单相交流电路	12
第四节 三相交流电路	22
第二章 电气测量	28
第一节 模拟式仪表概述	28
第二节 电流和电压测量	29
第三节 功率和电能测量	34
第四节 万用表和绝缘电阻表	37
第五节 发电厂主要电气设备仪表配置	41
第六节 数字化和智能化仪表简介	42
第三章 电子技术基础	52
第一节 半导体二极管及其整流电路	52
第二节 三极管及其放大和开关作用	55
第三节 门电路	59
第四节 晶闸管电路	61
第五节 集成电路	66
第六节 微机简介	74
第四章 发电厂及电力系统	80
第一节 发电厂生产过程简介	80
第二节 电力系统及其运行一般知识	83
第三节 电气主接线	87
第四节 倒闸操作	96
第五章 发电厂电气设备	107
第一节 发电机	107
第二节 变压器	114
第三节 电动机	120
第四节 高压断路器及其操作机构	129
第五节 隔离开关及其操作机构	142
第六节 互感器	144
第七节 高压熔断器	147
第八节 绝缘子、母线、电缆及电抗器	148
第九节 避雷器	152

第十节 低压电器	153
第六章 继电保护与自动装置	162
第一节 继电保护作用和基本元件	162
第二节 配电线路保护	164
第三节 发电机保护	179
第四节 电力变压器保护	184
第五节 母线与电动机保护	188
第六节 三相一次自动重合闸装置	192
第七节 备用电源自动投入装置	194
第八节 按频率自动减负荷装置	196
第九节 同步发电机自动调节励磁装置	198
第十节 继电保护与自动装置运行	202
第十一节 微机保护简介	205
第七章 二次回路	212
第一节 断路器控制回路	212
第二节 中央信号回路	216
第三节 同期回路	223
第四节 监察回路	226
第五节 直流系统	229
第八章 发电机运行及事故处理	256
第一节 发电机允许运行方式	256
第二节 发电机起动前准备工作	262
第三节 发电机起动、并列和负荷调节	264
第四节 发电机解列和停机	265
第五节 发电机运行监视	266
第六节 励磁机运行维护	267
第七节 发电机运行异常现象及事故处理	271
第八节 发电机冷却系统	278
第九章 变压器运行及事故处理	285
第一节 变压器允许运行方式	285
第二节 变压器负荷能力	286
第三节 变压器冷却方式	288
第四节 变压器并列运行	291
第五节 变压器操作	293
第六节 变压器运行中检查与维护	295
第七节 变压器油运行	297
第八节 变压器运行异常与事故处理	299
第十章 电动机运行及事故处理	311
第一节 电动机允许运行方式	311
第二节 电动机起动及其操作	314
第三节 电动机调速	317

第四节	电动机运行检查维护	324
第五节	电动机事故处理	327
第六节	厂用电动机连锁系统运行方式	332
第十一章	其他设备运行及事故处理	337
第一节	断路器	337
第二节	隔离开关	345
第三节	电抗器	347
第四节	消弧线圈	348
第五节	互感器	350
第六节	电容器	353
第七节	避雷器	356
第八节	绝缘子	358
第九节	电压降低事故处理	359
第十二章	安全用电	360
第一节	常用电工安全用具	360
第二节	对值班人员的安全要求	362
第三节	保证安全工作的组织措施和技术措施	363
第四节	在二次回路上工作及有关测量工作的安全措施	366
第五节	电气防火及防爆	367
第六节	电气设备接地和接零	371
第七节	触电急救	374
附录	常用电气设备新旧图形符号对照	379
附录 1	常用电气一次设备的新旧图形符号对照表	379
附录 2	常用电气二次设备的新旧图形符号对照表	381

第一章

电 工 基 础

第一节 直 流 电 路

一、直流电路基本概念

(一) 电路

一般说电路就是电流所通过的路径。手电筒电路是一个最简单的电路，如图 1-1 所示。这个电路是由于电池、小灯泡、连接导线（铁壳手电筒的连接导线就是外壳）和开关组成。

一个完整电路，主要由以下三个基本部分组成。

1. 电源

它在电路中的作用是将其他形式的能量转换为电能。例如发电机和干电池都是电源，它们分别将机械能和化学能转换成电能。

2. 负荷

它在电路中的作用是将电能转换成其他形式的能量，例如灯泡和电动机等。灯泡将电能转换成光能和热能，电动机将电能转换为机械能。

3. 导线

导线用来连接电源和负荷，起着传输和分配电能的作用。

在实际电路中，为了控制和分配电能需要装有开关；为了保护设备和人身安全需要装有熔断器、继电保护元件等；另外，为了测量电量还装上各种测量仪表，这些电气设备和仪表的装设都是为了便于电路的正常工作。

在实际工作中所遇到的电路要比手电筒的电路复杂得多，但是不管电路的结构是简单的，还是复杂的，它们的基本组成部分都是相同的。

为了便于分析、计算电路，要用规定的图形符号来表示实用电路中的图形，例如，手电筒电路采用规定图形符号表示的电路图如图 1-2 所示。

(二) 电流

按下手电筒的开关 Q ，灯泡就亮了。这是由于开关 Q 合上，电路中便有电流 I 流过而起的作用。电流是指电荷在电场力的作用下定向移动的现象。习惯上，规定正电荷移动的方向为电流

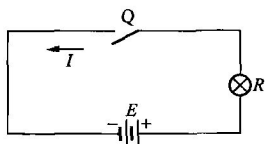


图 1-2 用图形符号表示的手电筒的电路图

E —电源； R —灯泡； S —开关；

I —电流

的正方向。如手电筒电路，电流就是由电池的正极经小灯泡流回电池的负极，见图 1-2 中的箭头指向。电流的大小用单位时间内在导体横截面上通过的电荷量的多少来衡量，称为电流强度，简称电流，用字母 I 表示。如果在时间 t 内通过导体横截面的电荷量为 q ，则电流 I 计算式为

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

电流的单位是安，用字母 A 表示。如果每秒钟有 1 库仑 (C) 的

电荷量通过导体横截面，这时的电流就是 1A，即

$$1\text{A} = \frac{1\text{C}}{1\text{s}}$$

有时电流还用千安 (kA)、毫安 (mA) 或微安 (μA) 作单位。它们之间的关系是

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

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

$$1\mu\text{A} = \frac{1}{1000}\text{mA} = \frac{1}{1000000}\text{A} = 10^{-6}\text{A}$$

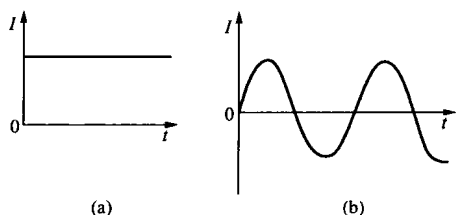


图 1-3 电流波形图

(a) 直流; (b) 交流

按电流随时间变化的情况，电流可分直流电流 I 和交流电流 i ，如图 1-3 所示。由图 1-3 可见，直流电流的大小和方向都不随时间变化，而交流电流的大小和方向都随时间变化。直流电流所流过的电路称为直流电路，交流电流所流过的电路称为交流电路。

(三) 电压与电位

1. 电压

在电场力的作用下使电荷移动，电场力就会对电荷做功，电压就是用来衡量电场力移动电荷做功的能力，如在电场力的作用下将单位正电荷从电场的某一点 (a 点) 移到电场的另一点 (b 点)，电场力所作的功 A_{ab} ，就称为该两点之间的电压，即

$$U_{ab} = \frac{A_{ab}}{q} \quad (1-2)$$

电压的单位是伏，用字母 V 表示。如果电场力将 1C 正电荷从 a 点移到 b 点所作的功为 1J (焦耳) 时，则 a、b 两点之间的电压就是 1V，即

$$1\text{V} = \frac{1\text{J}}{1\text{C}}$$

有时电压还用千伏 (kV) 和毫伏 (mV) 作单位，它们之间的关系为

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

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

电压的正方向，习惯规定电场力移动正电荷的方向，即高电位到低电位的方向，也就是顺电压的方向电位在降低，所以电压又叫电压降。

2. 电位

在电场力的作用下将单位正电荷从电场的某点 (a 点) 移到参考点 (0 点) 所作的功，称为该点的电位。由此可见电位实际上也是电压，是电路中某点与参考点之间的电压，如 a 点的电位就是 a 点与参考点之间的电压 U_{a0} ，电位用字母 V 表示，a 点的电位记作 V_a 。参考点的电位 $V_0 = 0$ 。参考点是可以任意选择的，实际工作中常选大地为参考点。

某点的电位比参考点电位高的，该点电位为正，比参考点电位低的则为负。

电位的单位与电压的单位相同，也用 V 表示。

3. 电压与电位的关系

在电路中，任意两点之间的电位差称为这两点之间的电压，如图 1-4 所示。若选 0 点为参考点，即 $V_0 = 0$ ，a 点电位为 $V_a = U_{a0} = V_a - V_0$ ，b 点电位为 $V_b = U_{b0} = V_b - V_0$ ，同理， $U_{ab} = V_a -$

V_b ; 若选 b 点为参考点, 即 $V_b=0$, a 点电位 $V_a=U_{ab}=V_a-V_b$, 0 点电位为 $V_0=-U_{b0}=V_b-V_0$ 。

【例 1-1】 某一电路如图 1-4 所示, 若以 0 点为参考点, a 点电位为 5V, b 点电位为 3V。若以 b 点为参考点, a 点电位为 2V, 0 点电位为 -3V。试分别求出以 0、b 为参考点时的 U_{ab} 、 U_{b0} 、 U_{a0} 的值。

解 以 0 点为参考点时, 各电压分别为

$$U_{ab} = V_a - V_b = 5 - 3 = 2 \text{ (V)}$$

$$U_{b0} = V_b - V_0 = 3 - 0 = 3 \text{ (V)}$$

$$U_{a0} = V_a - V_0 = 5 - 0 = 5 \text{ (V)}$$

以 b 点为参考点时, 各电压分别为

$$U_{ab} = V_a - V_b = 2 - 0 = 2 \text{ (V)}$$

$$U_{b0} = V_b - V_0 = 0 - (-3) = 3 \text{ (V)}$$

$$U_{a0} = V_a - V_0 = 2 - (-3) = 5 \text{ (V)}$$

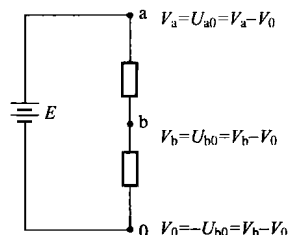


图 1-4 电压与电位关系图

由上可见, 某点的电位与参考点的选择有关, 而某两点间的电压则与参考点的选择无关。

(四) 电动势

为了维持电路中的电流, 就必须维持电路两端的电压。电路中的电源就起维持电路两端电压的作用, 因为在电源内部有一种作用力不断地把正电荷从电源负极 (低电位点) 移到正极 (高电位点)。把电源内部这种推动电荷移动的作用力称为电源力, 电动势就是用来衡量这种电源力做功的能力。在电源力的作用下, 将单位正电荷从电源负极移到正极所作的功, 称为电源电动势, 用字母 E 表示。

电动势的单位与电压相同, 也用 V 表示。

电动势的正方向是从负极指向正极, 也就是从电源的低电位指向高电位。顺着电势的方向电位是升高, 所以电动势又称为电压升。

(五) 电阻

当电流流过导体时, 导体对电流有阻碍作用, 这种阻碍作用就是电阻, 用字母 R 或 r 表示。

电阻的单位为欧, 用字母 Ω 表示。电阻的较大单位为千欧 ($k\Omega$) 或兆欧 ($M\Omega$), 它们之间的关系是

$$1k\Omega = 1000\Omega = 10^3\Omega$$

$$1M\Omega = 1000k\Omega = 10^6\Omega$$

金属导体的电阻大小由实验可知: 导体电阻值的大小与导体长度 l 成正比, 与导体截面 S 成反比, 还与导体的材料有关, 用数学公式表示为

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (\Omega) \quad (1-3)$$

式中 l ——导体长度 (m);

S ——导体截面 (mm^2);

ρ ——电阻率, 它表示长 1m, 截面为 $1mm^2$ 导体的电阻值 ($\Omega \cdot mm^2/m$)。

另外, 导体的电阻值还与温度有关。

(六) 电功与电功率

电流可以使电灯发光、电熨斗发热、电动机带动机器旋转, 实现了电能和光、热、机械能量之间的转换, 这说明电流做了功。电流所做的功称为电功, 用字母 A 表示。如图 1-5 所示的电

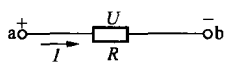


图 1-5 电阻电路图

阻电路中,电阻 R 两端的电压为 U ,通过电阻 R 的电流是 I ,则电功的大小与电压 U 和电流 I 以及通过电流的时间 t 有关,即

$$A = UIt \quad (1-4)$$

电功常用的单位是千瓦·时,用 kWh 表示。

单位时间内电流所做的功称为电功率,用字母 P 表示,即

$$P = UI \quad (1-5)$$

电功率常用的单位为瓦,用字母 W 表示。较大单位用千瓦 (kW) 或兆瓦 (MW),它们之间的关系为

$$1\text{kW} = 1000\text{W} = 10^3\text{W}$$

$$1\text{MW} = 1000\text{kW} = 1000000\text{W} = 10^6\text{W}$$

电功表示在时间 t 内电场力移动电荷所做的功,而电功率表示在 1s 电场力移动电荷所做的功,前者反映做功的多少,后者反映做功的速度。

【例 1-2】 一个 100W 的电灯接在 220V 的电路中,求流过电灯灯丝的电流值。

解 根据式 (1-5) 得

$$I = \frac{P}{U} = \frac{100}{220} = 0.45(\text{A})$$

【例 1-3】 主控室原有 100W 灯泡 12 个,每天使用 3h,为节约用电改为 40W 的日光灯 15 个,每天使用 2.5h,问这样每月 (按 30 天计算) 可节约多少千瓦·时电?

解 原来每天用电量为

$$A_1 = P_1 t_1 = 100 \times 12 \times 3 = 3600(\text{Wh}) = 3.6\text{kWh}$$

改装后每天用电量为

$$\begin{aligned} A_2 &= P_2 t_2 = 40 \times 15 \times 2.5 \\ &= 1500(\text{Wh}) = 1.5\text{kWh} \end{aligned}$$

每天节约的电功为

$$A' = A_1 - A_2 = 3.6 - 1.5 = 2.1(\text{kWh})$$

每月节约的电功为

$$A = 30A' = 30 \times 2.1 = 63(\text{kWh})$$

二、欧姆定律

(一) 一段电路欧姆定律

在图 1-6 所示的电路中,电压与电流的大小有什么关系? 科学家欧姆通过实验证明:电路两端所加电压 U 与电路通过的电流 I 成正比,就是说电压增大时,电流也相应成比例增大,用数学公式表示为

$$\frac{U}{I} = R \quad (1-6)$$

式中的 R 就是电阻,它的大小与电压 U 、电流 I 的大小无关。由式 (1-6) 可知,对不同电路 (即 R 的值不同) 来说,若所加的电压相同时,电路中的电阻 R 越大,则电流越小。

可将式 (1-6) 改写为

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

称式 (1-7) 为一段电路的欧姆定律。在该电路中,电流强度跟电路两端

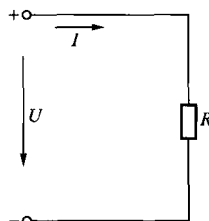


图 1-6 电压与电流关系

电压成正比,跟电路的电阻成反比。根据这个定律,电压、电流和电阻三个量中知道任意两个,就可以求出第三个。电流的单位为 A,电压的单位为 V,电阻的单位是 Ω 。

(二) 全电路欧姆定律

图 1-7 所示的电路,是由一个电源和一个电阻所组成的最简单的全电路。电源内部也存在电阻,称为内电阻,用 r_0 表示,如图 1-7 (b) 所示。

全电路欧姆定律的内容是:全电路中的电流 I 与电源电动势 E 成正比,与全电路的电阻(外电路的电阻 R 和电源内电阻 r_0 之和)成反比,用数学公式表示为

$$I = \frac{E}{R + r_0} \quad (1-8)$$

由式 (1-8) 可得

$$E = IR + Ir_0 = U + Ir_0 \quad (1-9)$$

式 (1-9) 是全电路欧姆定律的另一表达式,它表明电源电动势 E 在数值上等于全电路中各部分电压之和。

在通常情况下,电源电动势 E 与内电阻 r_0 都可认为是不变的,而且内电阻 r_0 与外电路电阻 R 相比较很小。因此,电路中电流的大小主要受 R 变化的影响,下面可分三种情况讨论。

(1) 电路通路时。如图 1-7 所示,由式 (1-9) 可得

$$U = E - Ir_0 \quad (1-10)$$

负载都需要电压恒定,所以电源的内电阻越小越好。

(2) 电路开路时。如图 1-7 所示的 Q 断开,这时电路中的电流为零,则

$$U = E - Ir_0 = E - 0 = E \quad (1-11)$$

所以电路断开时,电路的端电压等于电源电动势。

(3) 电路短路时。如图 1-8 所示,当外电阻 R 被导线短接,即 $R=0$,电路端电压 $U=0$,所以

$$E = I_k r_0 \quad \text{或} \quad I_k = \frac{E}{r_0} \quad (1-12)$$

此时电流 I_k 很大,称为短路电流。因为电流很大,有可能损坏电气设备和导线,所以短路是一种严重的事故,在工作中要特别注意防止短路的发生。

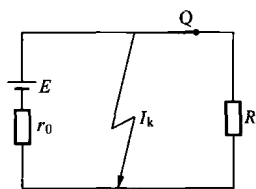


图 1-8 电阻被短路的电路图

【例 1-4】 已知某电阻为 440Ω , 其端电压为 220V , 求流过电阻的电流。

解 根据式 (1-7) 得

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{440} = 0.5(\text{A})$$

【例 1-5】 某电路如图 1-7 所示, $E=110\text{V}$, $R=10.8\Omega$, $r_0=0.2\Omega$, 求电路中的电流 I 、端电压 U 和电源内电阻 r_0 的电压降 Ir_0 。

解 根据式 (1-8)、式 (1-7) 得

$$I = \frac{E}{R + r_0} = \frac{110}{10.8 + 0.2} = 10(\text{A})$$

$$U = IR = 10 \times 10.8 = 108(\text{V})$$

$$Ir_0 = E - U = Ir_0 = 2(\text{V})$$

三、电流热效应

电流的热效应就是电流流过导体后将电能转换成热能的效应。实验证明：电流流过导体产生的热量，与电流 I 的平方、导体的电阻 R 及通电时间 t 成正比，其热量 Q 按下式计算

$$Q = I^2 R t \quad (1-13)$$

式中 I ——电流 (A);

R ——电阻 (Ω);

t ——通电时间 (s);

Q ——导体发热热量 (J)。

一般称式 (1-13) 为焦耳—楞次定律。

例如，所使用的电炉、电烙铁、电熨斗等用电器都是根据电流的热效应来制成的。但电流的热效应也有不利的一面，如发电厂的发电机、电动机、变压器等设备的绕组都是用导线绕制的，导线有电阻，当电流流过绕组时，就会发热。这样，不但消耗了能量（因为热量是由电能转换的），而且会使上述设备的温度升高，加速了绝缘材料（绕组的导线外面都包有绝缘）的老化变质，影响设备的使用寿命。所以制造厂都规定了电气设备的额定值（如额定功率、额定电流等），使用时务必注意。

【例 1-6】 一个电烙铁接在电压为 220V 的电源上，通过电烙铁的电流为 1.36A。试求通电 1h，所产生的热量。

解 根据欧姆定律可将式 (1-13) 写为

$$\begin{aligned} Q &= I^2 R t = U I t = 220 \times 1.36 \times 3600 \\ &= 1077120(\text{J}) = 1077.12\text{kJ} \end{aligned}$$

注：1h = 3600s。

四、电阻连接

电阻的连接形式很多，本节只介绍电阻的串联和并联。

(一) 电阻串联

电阻的串联，就是把电路中的几个电阻一个连着一个成串地连接起来，图 1-9 (a) 就是两个电阻 R_1 和 R_2 串联的电路。在这个电路的两端加上电压 U ，流过电路的电流为 I 。

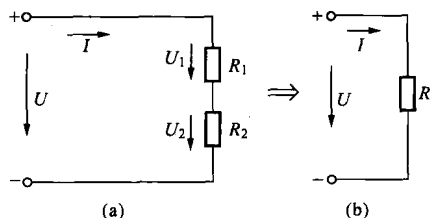


图 1-9 两电阻串联电路图

(a) 两电阻串联；(b) 等值电阻

电阻串联电路有下列特点：

(1) 流过每个电阻的电流都相等。如图 1-9 (a) 中，流过 R_1 和 R_2 的电流是同一个电流，即都是 I 。

(2) 电路两端的总电压等于各电阻上电压之和。在图 1-9 (a) 中，总电压为 U ，电阻 R_1 上的电压为 U_1 ，电阻 R_2 上的电压为 U_2 ，则

$$U = U_1 + U_2 \quad (1-14)$$

(3) 电路的等值电阻（总电阻）等于各串联电阻之和，即

$$R = R_1 + R_2 \quad (1-15)$$

由此可见, 可以用一个电阻 R 来代替两个串联电阻, 在保持电路两端电压为 U 不变时, 电路中的电流仍为 I , 如图 1-9 (b) 所示, 一般把这个电阻称为等值电阻。

(4) 串联电路中, 每个电阻上的电压与电阻成正比, 即

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= IR_1 \\ U_2 &= IR_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

由式 (1-16) 可见, 流过每个电阻的电流相等, 电阻值大的, 两端电压一定高; 反之电压低。

(5) 串联电路中消耗的功率, 等于每个串联电阻消耗的功率之和, 即

$$P = P_1 + P_2 \quad \text{或} \quad I^2 R = I^2 R_1 + I^2 R_2 \quad (1-17)$$

串联电路中, 电阻大的消耗的功率大, 电阻小的消耗的功率小。

【例 1-7】 在三个电阻 R_1 、 R_2 和 R_3 串联电路中, $R_1 = 100\Omega$, $R_2 = 50\Omega$, $R_3 = 200\Omega$, 电流 $I = 0.5A$, 试求串联电路中每个电阻上的电压和总电压。

解 根据式 (1-16) 每个电阻上的电压分别为

$$U_1 = IR_1 = 0.5 \times 100 = 50(V)$$

$$U_2 = IR_2 = 0.5 \times 50 = 25(V)$$

$$U_3 = IR_3 = 0.5 \times 200 = 100(V)$$

电路的等值电阻

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 100 + 50 + 200 = 350(\Omega)$$

电路的总电压

$$U = IR = 0.5 \times 350 = 175(V)$$

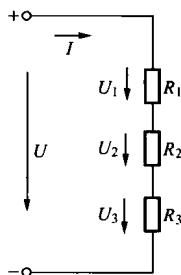


图 1-10 三电阻串联电路图

(二) 电阻并联

电阻的并联, 就是将几个电阻的一端联在一起, 另一端也联在一起。如图 1-11 (a) 就是两个电阻 R_1 与 R_2 并联的电路。在这个电路的两端加上电压 U , 电路中总电流为 I 。

电阻并联电路, 有下列特点:

(1) 各并联电阻两端电压相等。如图 1-11 (a) 中两个并联电阻 R_1 和 R_2 上的电压都等于外加电压 U 。

(2) 并联电路的总电流等于流过各并联电阻的电流之和。如图 1-11 (a) 所示, 电流关系如下

$$I = I_1 + I_2 \quad (1-18)$$

(3) 并联电路等值电阻的倒数等于各并联电阻的倒数之和, 即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1-19)$$

由此可见, 可以用一个等值电阻 R 来代替两个并联电阻, 在保持电路两端电压为 U 不变时, 电路中的电流仍为 I , 如图 1-11 (b) 所示。

(4) 并联电路中, 流过每个电阻的电流与各自的电阻成反比, 即

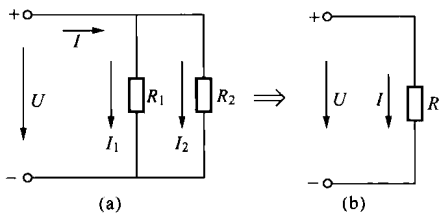


图 1-11 两电阻并联的电路图

(a) 两电阻并联; (b) 等值电阻

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{R_1} \\ I_2 &= \frac{U}{R_2} \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

由式(1-20)可见,加在每个电阻两端的电压相等,电阻值大的,流过电阻的电流一定小;反之电流大。

(5) 并联电路消耗的总功率,等于各并联电阻消耗的功率之和,即

$$P = P_1 + P_2 \quad \text{或} \quad \frac{U^2}{R} = \frac{U^2}{R_1} + \frac{U^2}{R_2} \quad (1-21)$$

并联电路中,电阻大的消耗功率小,电阻小的消耗功率大。

(三) 电阻混联

有串联又有并联电阻所构成的电路称作电阻混联电路。这时,可以根据串联和并联电路的计算方法,逐步把电路简化,便可求出这个电路的等值电路。

【例 1-8】 在图 1-11 (a) 中, $U = 100\text{V}$, $R_1 = 200\Omega$, $R_2 = 50\Omega$, 求电路的总电流和流过各并联电阻 R_1 、 R_2 的电流及各电阻消耗的功率。

解 根据式(1-19)求得等值电阻

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_2}{R_1 R_2} + \frac{R_1}{R_1 R_2} \\ R &= \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{200 \times 50}{200 + 50} = 40(\Omega) \end{aligned}$$

电路总电流为

$$I = \frac{U}{R} = \frac{100}{40} = 2.5(\text{A})$$

流过各并联电阻 R_1 、 R_2 的电流分别为

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{R_1} = \frac{100}{200} = 0.5(\text{A}) \\ I_2 &= \frac{U}{R_2} = \frac{100}{50} = 2(\text{A}) \end{aligned}$$

各电阻消耗的功率分别为

$$\begin{aligned} P_1 &= UI_1 = 100 \times 0.5 = 50(\text{W}) \\ P_2 &= UI_2 = 100 \times 2 = 200(\text{W}) \end{aligned}$$

【例 1-9】 在图 1-12 中, $U = 220\text{V}$, $R_1 = 30\Omega$, $R_2 = 30\Omega$, $R_3 = 15\Omega$, 求总电流 I_1 及流过各并联电阻的电流 I_2 、 I_3 和各个电阻上的电压。

解 先求图 1-12 电路中的等值电阻为

$$R = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 30 + \frac{30 \times 15}{30 + 15} = 40(\Omega)$$

总电流 I_1 为

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{220}{40} = 5.5(\text{A})$$

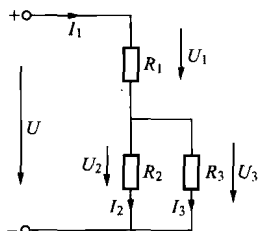


图 1-12 电阻的混联
电路图

各电阻上的电压分别为

$$U_1 = I_1 R_1 = 5.5 \times 30 = 165(\text{V})$$

$$U_2 = U_3 = U - U_1 = 55(\text{V})$$

流过并联电阻 R_1 、 R_2 的电流分别为

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{55}{30} = 1.83(\text{A})$$

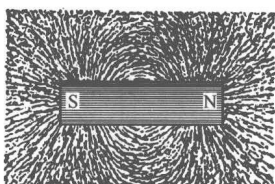
$$I_3 = \frac{U_3}{R_3} = \frac{55}{15} = 3.67(\text{A})$$

第二节 磁 和 电 磁

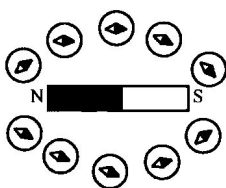
一、电流与磁场

(一) 电流周围磁场

如果在玻璃板（或纸板）上均匀地撒一些铁粉，在玻璃板下面放一根条形磁铁，轻轻敲动玻璃板，就会看到铁粉有规则的排列，如图 1-13 (a) 所示。如果把小磁针靠近条形磁铁，小磁针就会发生偏转，如图 1-13 (b) 所示。由此可见，磁铁周围存在有磁场。如铁粉和小磁针在磁铁周围以规则排列，疏密有致，所以磁场可以用磁力线来表示，如图 1-14 所示。磁力线的方向是从 N 极出发回到 S 极，在磁极内部由 S 极到 N 极，形成闭合回路，磁力线的密和疏表示磁场的强和弱。



(a)



(b)

图 1-13 条形磁铁的磁场

(a) 铁粉规则排列；(b) 小磁针按磁力线排列

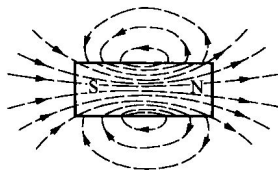


图 1-14 条形磁铁的磁力线

也可以用磁通或磁通密度来表示磁场。通过某一截面的磁力线总根数叫做磁通，用字母 Φ 表示。通过单位面积的磁力线根数叫做磁通密度，简称磁密或磁感应强度，用字母 B 表示。

把一根导线垂直穿过一块纸板，在纸板上均匀撒上铁粉，当有电流通过导线时，也会看到，铁粉有规则的排列，如图 1-15 所示。如果把小磁针放在有电流通过的导线周围，同样也会看到小磁针处在导线周围的不同位置上，小磁针发生不同方向（如以小磁针 N 极为准）的偏转，如图 1-16 所示。

上面的现象说明，通有电流的导线周围和条形磁铁的周围都有磁场。导线周围的磁场是由导线中通过的电流产生的，即电流可以产生磁场。电流周围的磁场是怎样分布的呢？根据实验结果，下面画出四种形状导线电流的磁力线分布，如图

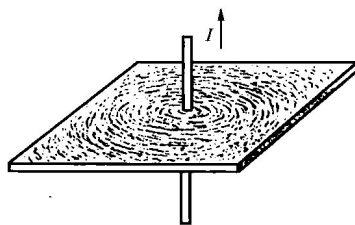


图 1-15 铁粉在通电直导线周围的排列示意图

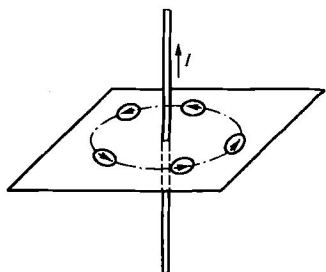


图 1-16 小磁针在通电直导线周围的排列示意图

1-17 所示。

电流与磁场磁力线的方向之间的关系，可以总结为用右手螺旋定则来帮助记忆，如图 1-18 所示。图 1-18 (a) 中拇指伸直表示电流方向，四指的回绕方向表示磁力线的方向；图 1-18 (b) 中四指的回绕方向表示电流的方向，拇指伸直表示磁力线的方向。

(二) 磁场对载流导体的作用

如图 1-19 所示，把自由悬挂着的一根直导线 ab 放在蹄形磁铁的磁场中，并使导线与磁力线方向垂直。未通电时，导线 ab 静止不动；当接通电源，电流方向是由 a 到 b 时，就会看到导线向里面移动，这说明导线受到一个向里面的力。这个力是磁铁的磁场对通电导线的作用力，称它为电磁力。

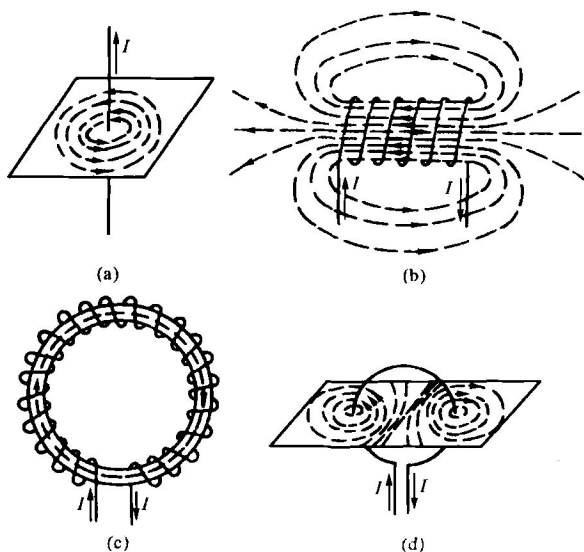


图 1-17 四种形状导线的电流磁力线分布图

(a) 直导线；(b) 螺旋线圈；(c) 环形螺旋线圈；(d) 环形导线

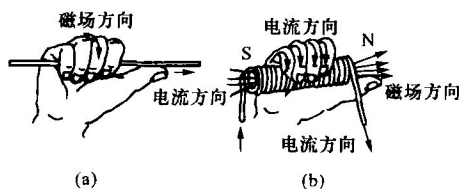


图 1-18 电流与磁力线之间的关系

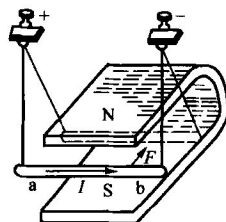


图 1-19 磁场对载流直导线的作用力

如果改变导线中的电流方向，就会看到导线向外面移动。如果不改变导线中的电流方向，而改变磁场方向（将磁铁的 N、S 极位置倒换），也会看到导线运动方向也随之改变。由此可知，电磁力的方向与电流的方向和磁场的方向有关，这个关系可用左手定则确定：将左手伸直展平，使拇指和其余四指垂直，手心对着磁力线方向，四指指向是电流方向，这时拇指所指的方向就是电磁力的方向。如图 1-20 所示。

二、电磁感应

(一) 直导线中的感应电动势

如图 1-21 所示，直导线 ab 处于磁场之中。当导线向右平移或磁铁向左平移时，检流计（图 1-21 中的 P，用来检测小电流的电流表）的指针就正向偏转。当导线向左平移或磁铁向右平移时，检流计的指

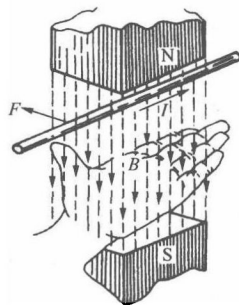


图 1-20 左手定则