



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书

实用电工技术

马志广 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



全国电力职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业培训用书
电力职业技术教育教学改革系列教材

实用电工技术

电力职业技术教育教学改革系列教材
建设委员会

主 任	张效胜				
副 主 任	李启涛	张 伟			
委 员	杨立久	苏庆民	王庆民	王焕金	
	杨新德	朱正堂	侯仰东	郭光宏	
	高洪雨	孙奎明	蔡卫敏	马明礼	
本书主编	马志广				
副 主 编	张义刚				
编 写	周 红	李大林			
主 审	高洪雨				



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。

全书共分十章, 主要内容包括电工基础知识、电气测量技术、常用电工工具和电工材料、低压电器、配电变压器、异步电动机运行及维护、电力拖动及自动控制、室内低压配线及照明安装、电工安全技术和电工技能考核项目汇编。附录介绍了电工实用计算口诀、低压验电笔的巧用和国内外常用电气图形符号等, 以方便读者在学习中查阅。全书内容丰富、深入浅出、通俗易懂。

本书可作为职业院校电工专业 and 在职职工培训教材, 也可供从事电气工作的工程技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

实用电工技术/马志广主编. —北京: 中国电力出版社,
2008

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 7743 - 8

I. 实… II. 马… III. 电工技术—职业教育—教材
IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 117733 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 8 月第一版 2008 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.5 印张 429 千字

定价 28.00 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

前言

本书根据电工岗位实用技能培训和技能鉴定要求编写，既有“必须够用”的理论讲解，又精心设计了具体的实训项目，充分体现了当今职业教育和职工技能培训的特色。在编写中按照国家现行标准、规范编写，注意贯彻 IEC 标准，强调突出岗位实用的特点，深入浅出地介绍了电工岗位应知应会的技术知识、基本技能，强化操作技能和综合能力的训练，培养学生、学员在工程实践中分析问题和解决问题的能力。

由于职业教育和职工技能培训发展迅速，实训内容需要不断更新，现代社会对学校培养的学生也提出了越来越高的要求。因此在编写过程中，参考了许多国内外优秀教材，并总结多年来的教学经验，坚持学以致用，学用结合。本书内容充分体现了新知识、新技术、新方法，紧跟学科发展的最新动态，使受教育者学到的知识与技能跟上时代发展的步伐。

本书第一章和第二章由李大林老师编写，第三章、第五章和第六章由张义刚老师编写，第八章由周红老师编写，第四章、第七章、第九章和第十章由马志广老师编写，全书由马志广老师统稿。本书由高洪雨高级工程师主审。本书在编写过程中，还得到了山东省电力学校许多老师的大力支持，尤其是李政乙、胡晓鹏、滕国文等老师提出了许多宝贵意见，在此一并表示感谢。

由于水平有限，书中难免存有不妥和疏漏之处，敬请广大读者批评指正，以便今后修正完善。

编者

2008 年 7 月

目 录

前言

第一章 电工基础知识	1
第一节 直流电流	1
第二节 电磁与电磁感应	7
第三节 单相交流电路	13
第四节 三相交流电路	26
第二章 电气测量技术	32
第一节 概述	32
第二节 电流和电压的测量	33
第三节 功率和电能的测量	38
第四节 万用表	42
第五节 兆欧表	45
第六节 接地电阻测量仪	46
第七节 电桥	49
第三章 常用电工工具和电工材料	53
第一节 通用电工工具	53
第二节 常用电工安全工具	57
第三节 防护安全用具	63
第四节 导电材料	68
第五节 绝缘材料和磁性材料	71
第四章 低压电器	76
第一节 概述	76
第二节 刀开关和熔断器	80
第三节 低压断路器和组合开关	83
第四节 接触器	86
第五节 继电器	89
第六节 主令电器	94
第五章 配电变压器	97
第一节 变压器的基础知识	97
第二节 变压器的选择和安装	102
第三节 变压器运行维护	107

第六章 异步电动机运行及维护	112
第一节 三相异步电动机	112
第二节 单相异步电动机	115
第三节 电动机运行维护	118
第七章 电力拖动及自动控制	124
第一节 常用电动机控制电路	124
第二节 典型机床电气线路	136
第三节 可编程序控制器	141
第四节 电气控制线路的绘制	150
第五节 电气控制线路检修的一般方法	151
第八章 室内低压配线及照明安装	157
第一节 室内配线	157
第二节 常用电力导线	164
第三节 电力导线的连接与绝缘恢复	169
第四节 照明安装	176
第五节 电能表安装	185
第六节 建筑电气工程图	188
第九章 电工安全技术	199
第一节 电流对人体的伤害	199
第二节 直接接触电的防护	205
第三节 间接接触电的防护	210
第四节 触电的急救处理	217
第十章 电工技能考核项目	224
第一节 触电急救	224
第二节 室内双控照明电路护套线布线	227
第三节 安装两台电动机顺序启动控制电路	230
第四节 三相异步电动机自动往返限制控制电路故障排除	233
第五节 低压电力电缆故障查找	237
第六节 更换 10kV 架空线路悬式绝缘子	241
第七节 剩余电流动作保护器控制回路的接线和测试	244
第八节 经电流互感器接入三相四线式电能表的安装接线	248
附录一 电工实用计算口诀	252
附录二 低压验电笔的巧用	260
附录三 电气工程基本文字符号	262
附录四 电气工程辅助文字符号	267
附录五 国内外常用电气图形符号对照表	268
参考文献	274

电工基础知识

第一节 直流电流

在生产技术和日常生活当中遇到的各种用电设备，它们都是靠电流的作用而运行的。为了产生电流，需要组成电路。其中，直流电路是研究各种电路的基础。

一、电路

1. 电路的组成

图 1-1 是一个简单电路，它由电源、负载、导线和开关四部分组成，如图 1-1 所示。

(1) 电源是供给电能的。电源的能量是由其他形式的能量转换来的，例如，在电池中电能是由化学能转换来的。

(2) 负载是指各种用电设备，如电灯、电炉、电动机等。电源供给的电能通过负载转换为其他形式的能量。例如，在灯泡中电能转换为光能和热能；在电炉中电能转换为热能；在电动机中电能转换为机械能。

(3) 导线可使电源和负载连成通路，达到传导电流（或电能）的目的。常用导线一般用铜或铝制成。

(4) 开关是用来接通和断开电路的电器。

2. 电流

有了电源、负载和连接导线，再合上开关，使电路闭合起来，电路里就有电流通过。

在电源中具有一种推动电荷的原动力，称为电源力。对于电池来说，这种电源力就是化学力，对于发电机来说就是电磁力。

在电源内部，即内电路，电源力把正电荷推向正极（或把负电荷推向负极），同时，由于两极正负电荷的集聚，在两极间建立了电场。当电路闭合时，在外电路也建立了电场，其中自由电子在电场力的作用下，由负极移向正极，即正电荷由电源的正极经过负载流向电源的负极。电荷有规则的定向运动，形成电流。

电路中的电流大小或电流强度是以单位时间通过电路某一截面的电量来衡量的，即

$$I = q/t \quad (1-1)$$

式中： I 表示的电流强度，国际单位是安培（A）； q 表示电量，单位是库仑（C）（1C 相当 6.24×10^{18} 个电子带的电量）； t 表示时间，单位用秒（s）。因此

$$1A = 1C/s$$

电流强度的其他常用单位有

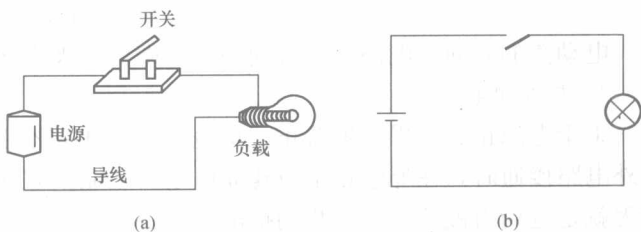


图 1-1 电路和电路图

(a) 实际电路；(b) 电路图

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

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

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

在电路中规定正电荷流动的方向作为电流的方向，它与电场力的方向是一致的。但应当指出，在金属导体里导电的是自由电子，它带负电，因此它的移动方向正好与规定的电流方向相反。

3. 电动势

电源力推动电荷的过程，也就是电源做功的过程。电源力把单位正电荷由负极推向正极所做的功，表明了电源推动电荷的本领，称为电源电动势，用 E 表示，则

$$E = A/q \quad (1-2)$$

如果功 A 的单位用焦耳 (J)，电荷 q 的单位用库仑 (C)，则电动势的单位用伏特 (V)，即

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

电动势的方向与电源力的方向一致，即由负极指向正极的方向。

4. 电压和电位

由于电源正、负极集聚着正、负电荷，因此它不仅在电源内部（即内电路）建立电场；当外电路接通时，在外电路中也建立电场。从能量方面来讲，电场力推动电路中电荷的移动过程就是电场力做功过程。我们把电场力将单位正电荷沿电路由一点推向另一点所做的功称为这两点间的电压。推动单位正电荷做的功越大，电压就越大，做的功越小电压越小。由此可见，电路中的电压表明了电场力推动电荷做功的能力。电压以 U 表示，即

$$U = A/q \quad (1-3)$$

电压的单位也用 V。如果电场力在两点之间推动 1C 的电荷做的功为 1J 的话，则这两点间的电压就是 1V。

电压较大的单位有 kV，较小的单位有 mV。

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

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

电路中每一点都有一定的电位。空间某一点的位置高低是相对的，与所取的参考点有关。电路中某点的电位高低也是相对的，与所取哪一点电位为零（称为参考点）有关。电路中某点的电位等于这一点与参考点之间的电压。或者说，电路某两点间的电压就是这两点的电位差，即 $U_{ab} = V_a - V_b$ ，其中 V_a 、 V_b 分别代表电路中 a、b 两点的电位。电位实际就是电压，是对参考点的电压，所以电位的单位就是电压的单位，即 V。

前面谈到电动势的方向就是电源力的方向，从电位的角度来说，就是从低电位到高电位的方向。电路中电压的方向与电场力方向一致，即从高电位到低电位的方向。可见，电源电动势的方向与其两端电压（称为端电压）的方向正好相反。

【例 1-1】 在电路中 a、b、c 三点的电位分别为 $V_a = 6\text{V}$ ， $V_b = 3\text{V}$ ， $V_c = 0\text{V}$ ，求电压 U_{ab} 、 U_{ab} 。

解 电压

$$U_{ab} = V_a - V_b = 6 - 3 = 3(\text{V})$$

$$U_{ba} = V_b - V_a = 3 - 6 = -3(\text{V})$$

由此可见，电压 U_{ab} 是由高电位到低电位的方向，其值为正；而电压 U_{ba} 是由低电位到高电

位的方向,其值为负。

电压 $U_{ac}=V_a-V_c=V_a-0=V_a=6V$, 即某点与零电位点间的电压就是这一点的电位。

二、导体电阻

一般物质按导电性能可分为导体、绝缘体和半导体。导体又可分为一类导体(以自由电子导电的,如金属)和二类导体(以离子导电的,如酸、碱、盐的水溶液)。下面研究导体的电阻。

1. 金属导体的电阻

导体的电阻具有两重性,它既具有导电的一面,也有阻碍电流的一面。拿金属导体来说,之所以导电是因为其中有自由电子;之所以对电流有阻碍,是因为自由电子在移动的过程中要同金属的原子(或分子)发生碰撞,使电子移动(即电流)受到阻碍,导体就表现出一定的电阻。

由于导体存在电阻,电流通过它就要受到一定限制。作为传导电流的导线要求它的电阻要小一些,但是对于一些用电设备,例如电灯、电烙铁、电炉等,就要使它具有一定的电阻,这样才能达到用电的目的。在实际工作中还会遇到,用电阻来限制或调节电流而特意做的电阻元件和可变电阻器。

电阻的单位是欧姆(Ω)。有时在计量较大的电阻时,还会用到千欧($k\Omega$)和兆欧($M\Omega$),即

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

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

导体的电阻越大,其导电性越差;电阻越小,导电性越好。导体电阻 R 的倒数 $1/R$ 的大小表明导体导电性的好坏,称为电导,以 G 表示,即

$$G=1/R \quad (1-4)$$

电导的单位是西门子(S)。

2. 电阻的计算

导体的电阻在一定的温度下由两方面因素决定,一个是与导体的材料有关,例如金属导体银、铜、铝相比,银的电阻最小,铜的电阻稍大些,铝比铜还大些;另一个与导体的尺寸有关,导体越长,电阻越大,导体越细,电阻越大。

对于一根均匀导线,已知其长度、截面积及其构成材料,则其电阻在常温(20°C)下的数值计算式

$$R=\rho \frac{l}{S} \quad (1-5)$$

式中: R 表示电阻(Ω); l 是导体长度(m); S 是导体的截面(mm^2); ρ 是电阻率,其值是指长 1m, 截面为 1mm^2 的某种材料的导线在 20°C 时的电阻数,它的单位是 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。

几种金属材料的电阻率和电阻温度系统见表 1-1。

表 1-1

几种金属材料的电阻率和电阻温度系数

材 料	银	铜	铝	铁	锰铜合金
20°C 下的电阻率 ρ 值 ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	0.0164	0.0172	0.0283	0.15	0.41~0.48
20°C 下的电阻温度系数 α ($1/^\circ\text{C}$)	0.0041	0.00393	0.004	0.00625	2×10^{-6}

3. 电阻与温度

导体的电阻除与其材料和尺寸有关而外,还与温度有关。对于金属导体来说,通过实验证明,它的电阻是随温度升高而成正比地增加,而且材料不同,增加量也不同。例如,在常温 20°C 下,当温度升高 1°C 时, 1Ω 铜导线的电阻增加 0.00393Ω , 1Ω 铁导线电阻增加 0.00625Ω , 1Ω 锰铜合金导线电阻增加 0.000002Ω 。

我们把在 20°C 下 1Ω 的某种金属导线,当温度升高 1°C 时它的电阻增加量称为这种金属材料的电阻温度系数,并用 α 表示。由表 1-1 中可见,铜的电阻温度系数 $\alpha=0.00393$,这说明,在 20°C 下 1Ω 铜导线,当温度升到 21°C 时,它的电阻不再是 1Ω ,而是 $1+0.00393=1.00393\Omega$ 。

如果已知某种材料的导线在 20°C 下的电阻和它的电阻温度系数,则温度升高后它的电阻 R_t 计算方法如下:先计算由于温度升高电阻的增加量,设 20°C 下的电阻为 R ,当温度升高 1°C 时,电阻增加量为 αR 。当温度由 20°C 升高到 $t^{\circ}\text{C}$,即温度升高了 $(t-20)^{\circ}\text{C}$,电阻增加量应为 $\alpha R(t-20)$ 。再把原有电阻 R 加上,就是 $t^{\circ}\text{C}$ 温度下的电阻值了,即

$$R_t = R + \alpha R(t - 20) \quad (1-6)$$

【例 1-2】 电厂中同步发电机在制造时其内部放置一个铂丝电阻测温元件,已知在 20°C 下它的电阻 $R=49.5\Omega$,电阻温度系数 $\alpha=0.00389(1/^{\circ}\text{C})$ 。在发电机某一运行时刻测得该元件的电阻值为 60.9Ω ,求此时发电机内部的温度。

解 按式 (1-6) 有 $t = \frac{R_t - R}{\alpha R} + 20 = \frac{60.9 - 49.5}{0.00389 \times 49.5} + 20 = 80(^{\circ}\text{C})$

三、欧姆定律

电路中的电流是由电压引起的,而电流通过电路又要受到阻碍,这表明,电流、电压和电阻三个量互相间有关联。通过实验证明,三者的关系为

$$I = U/R \quad (1-7)$$

式中: I 为电流 (A); U 为电压 (V); R 为电阻 (Ω)。

式 (1-7) 表明,通过一个电阻中的电流与加给这个电阻两端的电压成正比,和这个电阻成反比。这一结论称为欧姆定律。

欧姆定律是电工学中基本定律之一,它是电路分析和计算的基础。

四、电功和电功率

电能是由其他形式的能量 (机械能、热能、化学能等) 转换来的,电能又可以转换为其他形式的能量。电流做功就是电能转换为其他能量的过程。

将电压加在电路上产生电场,电场力推动电荷 (产生电流) 要做功。由式 (1-3) 可知,电场力移动电荷所做的功为

$$A = Uq$$

如果将移动的电荷 q 用电流 I 表达,即 $q=It$,则有

$$A = UI t \quad (1-8)$$

就是说,电流的功,即在一段电路中消耗的电能或用电量 A 等于加给这段电路的电压 U 、电路中的电流 I 与通电时间 t 的乘积。式 (1-8) 中,如果电压的单位取 V,电流的单位取 A,时间的单位取 s,则电功单位为 J (焦耳),即 $1\text{J}=1\text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}$ 。

功率,就是做功的速率。通常所说机械设备的出力、容量或工作能力的大小,都是指

其功率。电功率，就是电能做功的速率，它等于电能做功 A 与做功时间 t 之比，用 P 表示，则有

$$P = \frac{A}{t} = \frac{UI t}{t} = UI \quad (1-9)$$

式 (1-9) 表明了电功率的大小取决于电压和电流两个量的乘积。如果电压的单位取 V，电流的单位取 A，则功率的单位是 W (瓦特)，即

$$1\text{W} = 1(\text{V} \cdot \text{A})$$

较大的单位有 kW (千瓦)、MW (兆瓦)

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

发电机或用电设备，其发电量 (发出的电能) 或用电量 (消耗的电能) 可由其功率乘以运行时间来求得，即 $A = Pt$ 。电量的单位一般不使用焦耳，因它太小，通常使用 kW·h (千瓦时)。

电功率是由电压和电流这两个因素共同决定的。如果电压是加在电阻上的，则电流就是流过电阻的，按欧姆定律知 $U = IR$ 或 $I = \frac{U}{R}$ ，代入功率计算 $P = UI$ 中，得电阻上消耗的功率为

$$\begin{cases} P = I^2 R \\ P = \frac{U^2}{R} \end{cases} \quad (1-10)$$

电流通过电阻要发热。在电阻上消耗的电能，转换为热能释放到空间。电流通过电阻的发热量为

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

式 (1-11) 表明：电流在电阻中的发热量 Q 与电流的平方、电阻 R 和通电时间 t 成正比。这一结论叫焦耳—楞次定律。式 (1-11) 中电流单位取 A，电阻单位取 Ω ，时间单位取 s，则发热量单位是 J。

电流通过电阻发热，简称为电热，它是现代工业中的重要加热方法之一，应用较广。但对于不是以发热为目的的电力设备来说，电流通过导体发出热量，不仅造成能量的损耗，而且会使温度升高，严重时可能导致设备的损坏。例如，一般常用的电线，它总具有一定的电阻，如果电流过大，使导线温度过高，严重时有可能损坏导线的绝缘，甚至引起火灾，所以不同截面的导线在使用中都要有一定的电流限制。不仅如此，一切电力设施都要有一定的电流或电压的限制，这个电流或电压称为额定电流和额定电压。在使用电力设备时，首先要注意其铭牌规定的额定电压 (或电流) 保证所加的电压或通过的电流不要超过额定值。

【例 1-3】 标有 “220V、100W” 的灯泡和 “220V、60W” 的灯泡，哪一个是工作电流大，哪一个电阻大？

解 先求电流，因 $P = UI$ ，则

$$I_1 = \frac{P_1}{U} = \frac{100}{220} \approx 0.45(\text{A})$$

$$I_2 = \frac{P_2}{U} = \frac{60}{220} \approx 0.27(\text{A})$$

再求电阻 (在炽热状态下)，根据欧姆定律 $R = \frac{U}{I}$ ，则

$$R_1 = \frac{U}{I_1} = \frac{220}{0.45} \approx 480(\Omega)$$

$$R_2 = \frac{U}{I_2} = \frac{220}{0.27} \approx 820(\Omega)$$

可见,在电压相同的情况下,瓦数大的电阻小,电流大;瓦数小的电阻大,电流小。

五、串联电路

电路的串联和并联是电路中各元件之间最基本的连接方法。

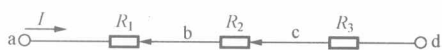


图 1-2 串联电路

如图 1-2 所示,有三个电阻串联在一起。这种由有两个及以上的电阻,一个接一个连接在一起,组成一个没有分支的电路就是串联电路。串联电路有如下几个特点:

(1) 由于串联电路没有分支,各电阻中电流是相同的。即不论是电阻大的地方,还是电阻小的地方,电流大小是一样的。这是因为电荷在电路中不能堆积,也不能在流动中自行消失,即电流具有连续性。

(2) 因为串联电路各段电流是相同的,这样,在电阻大的那段电路上分担的电压大,电阻小的那段电路上分担的电压小。也就是说,各段电压与对应的电阻成正比分配。

因为

$$U_1 = IR_1, U_2 = IR_2, U_3 = IR_3$$

所以

$$U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3$$

(3) 因串联电路各段电流相同,因此,各段功率也与对应的电阻成正比分配。

因为

$$P_1 = I^2 R_1; P_2 = I^2 R_2; P_3 = I^2 R_3$$

所以

$$P_1 : P_2 : P_3 = R_1 : R_2 : R_3$$

(4) 串联电路的总电压等于各段电压之和。

(5) 串联电路的总电阻等于各段电阻之和。这是因为,串联电阻越多,电流通过时遇到的阻力越大,等效于增加了电路的长度。

因为

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

即

$$IR = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

消去 I , 则得

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

(1-12)

六、并联电路

有两个及以上的电阻,它们的首端接在一起,尾端也接在一起,两个节点(有分支的连接点)施以外加电压,形成一个有分支的电路,称为并联电路。如图 1-3 所示,我们以三个电阻并联为例来说明并联电路的特点:

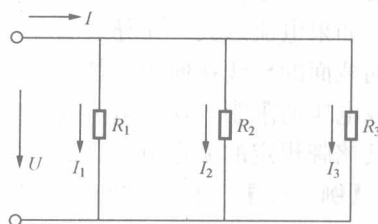


图 1-3 并联电路

(1) 由于各支路首端接在一起,尾端接在一起,承受同一电源的电压,所以各支路的电压是相等的。

(2) 由于各支路电压相等,因此电阻小的支路电流大,电阻大的支路电流小。即并联各支路的电流与对应的电阻成反比分配。因为

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, I_2 = \frac{U}{R_2}, I_3 = \frac{U}{R_3}$$

所以

$$I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3} = G_1 : G_2 : G_3$$

也可以说,各支电流与电导成正比分配。

(3) 由于各支路电压相同,各支路电流又与电阻成反比分配,所以,各支路功率与电阻成反比分配,即

$$P_1 : P_2 : P_3 = \frac{U^2}{R_1} : \frac{U^2}{R_2} : \frac{U^2}{R_3} = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3}$$

(4) 由于电流具有连续性,所以并联电路的总电流等于各支路电流之和,即

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

(5) 并联电路总电阻的倒数等于各支路电阻倒数之和。

参与并联的支路越多,总电阻越小,并且比其中最小的电阻还要小。这很明显,并联支路越多,电流通路越多,等效于增加了电路截面。也可以说,并联电路的总电导等于各支路电导之和,即

$$G = G_1 + G_2 + G_3 \quad (1-13)$$

七、基尔霍夫定律

欧姆定律反映了一个电阻上的电流和电压的规律,应用它可以对串联、并联、混联等简单电路进行分析和计算,但满足不了解决复杂电路问题的需要。这是因为欧姆定律还没有全面反映出电路(包括简单电路和复杂电路)的规律。基尔霍夫定律概括了任意电路的电流和电压的规律。

1. 基尔霍夫第一定律

对任意节点来说,流入节点的电流之和等于流出节点的电流之和,这就是基尔霍夫第一定律。如图 1-4 所示,电路有

$$I_1 + I_3 = I_2 + I_4$$

基尔霍夫第一定律反映了电流连续性这一本质。因为,电荷在电路里流动过程中,既不能堆积,也不能无影无踪的消逝,所以,在一定时间内,有多少电荷流入节点,就有等量的电荷流出该节点。

这个定律可以换一种说法:“流入节点的电流减去流出节点电流等于零”,即

$$I_1 + I_3 - I_2 - I_4 = 0$$

由此得出结论:在电路中任意节点处的电流代数和等于零。用公式表示为

$$\sum I = 0 \quad (1-14)$$

2. 基尔霍夫第二定律

在全电路中电位升高数与电位降低数是相等的。实践证明,沿电路中任意一个闭合回路一周,电位升高的和等于电位降低的和。这就是基尔霍夫第二定律的内容。用公式表示为

$$\sum U = 0 \quad (1-15)$$

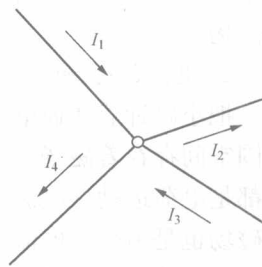


图 1-4 基尔霍夫第一定律

第二节 电磁与电磁感应

生产实际中遇到的大部分电力设备,如发电机、变压器、电动机、电磁式开关和继电器

等,都是基于电磁间的作用原理而工作的。电与磁的现象是密切相关的,有电流就有磁,有磁说明有电流。电与磁不但有联系,而且相互之间有作用,电能与机械能互相转换就是通过电与磁之间的作用而实现的。

一、磁场

1. 磁场和磁力线

磁铁周围有磁力作用的空间称为磁场。磁铁与磁铁或磁铁与铁块间的作用就是通过磁场实现的。与电场一样,磁场也是能量存在的一种形式。

磁场虽然看不见摸不着,但它确实是客观存在的。为了直观了解磁场,常用磁力线来描绘它。

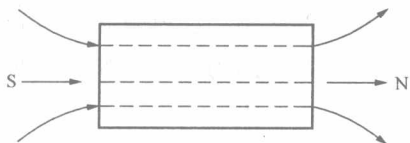


图 1-5 磁力线分布图

为了用磁力线描绘磁场,我们规定放在磁场中某点小磁针 N 极受力的方向,与该点磁力线的方向相一致。于是,磁铁外部的磁力线的方向是由 N 极出来,绕行返回 S 极。而在磁铁内部,磁力线由 S 极回到 N 极,形成闭合曲线,见图 1-5。磁力线不能相交,如果相交说明在交点处有两个磁力作用方向。磁力线是按合力方向描绘的,就是说,如果某点有磁力线通过,只能有一条。

在磁铁的两极处,磁场最强,磁力线最密;远离磁极的地方磁场较弱,磁力线较稀疏。因此,磁力线不仅表示出磁场的方向,而且也直观地表示了磁场各处的强弱程度。在磁场中如果各处的磁力线疏密是一样的,称均匀磁场,否则,磁场中各处磁力线疏密不一,称非均匀磁场。

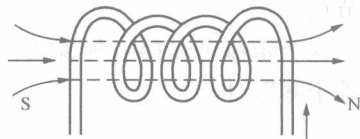
2. 电流的磁场

把小磁针放在通电导体的附近,可以看到它受到作用力而偏转,这一现象揭示了电流的周围空间存在着磁场。人们通过大量的实验认识到,磁和电是紧密联系在一起的,一切磁现象都是电荷运动(电流)的一种表现。不仅通电导线周围磁场是电流建立的,而且永久磁铁的磁场也是由分子电流建立的。

(1) 载流直导体产生的磁场。它的磁力线为一系列以导体为中心的同心圆,这些同心圆所在的平面与导体垂直。如图 1-6 (a) 所示。磁力线方向符合右手螺旋定则:右手大拇指指向电流的方向,四指即磁力线的环绕方向。



(a)



(b)

图 1-6 右手螺旋定则

(a) 载流直导体; (b) 环形载流线圈

(2) 环形载流线圈产生的磁场。它的磁力线是一系列穿过线圈内孔的闭合回线,如图 1-6 (b) 所示。磁力线的方向符合右手螺旋定则:右手四指指向电流方向,大拇指指向磁力线穿过线圈内孔的方向。

二、磁通和磁通密度

磁力线的方向和疏密程度可以表示磁场的方向和强弱,但单靠磁力线直观的分布图形来

分析问题是不足的。为了计算电与磁之间的关系和从数值上衡量磁场的强弱程度,还必须明确磁通和磁通密度两个基本物理量。

磁通是穿过磁场中某一个截面 S 的磁力线的多少;并用 Φ 表示。磁通的单位是韦伯 (Wb)。

在磁场中穿过某一个截面的磁通量大,则这个地方的磁场就强;反之穿过这个截面的磁通量小,则磁场就弱。换句话说,磁场的强弱可以用磁通密度来衡量。

磁通密度又称做磁感应强度,它是个相量,其方向与该处的磁场方向相同,其大小可以用穿过该处与磁场方向垂直的单位面积上的磁通量来衡量,用 B 表示,即

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-16)$$

式中: Φ 表示磁通; S 表示面积。

磁通密度的单位为特斯拉 (T),工程单位用韦伯/米² (Wb/m²)。

三、磁场对电流的作用

通过电流的导线放在磁场中就要受到力的作用,把这个力称为电磁力。电动机通电能够转起来就是电磁力作用的结果。

(1) 载流直导体在均匀磁场中受到的电磁力为

$$F = BIL \quad (1-17)$$

式中: F 为电磁力 (N); B 为磁感应强度 (T); I 为电流 (A); L 为导体与磁力线垂直的有效长度 (m)。

电磁力的方向可用左手定则判断,见图 1-7 (a)。磁力线穿入掌心,四指指向电流的方向,与四指垂直的拇指所指方向即电磁力的方向。

(2) 载流线圈在均匀磁场中受到的电磁力矩。

线圈平面与磁力线平行时,由图 1-7 (b) 可知,此时线圈受到的电磁力矩最大,即

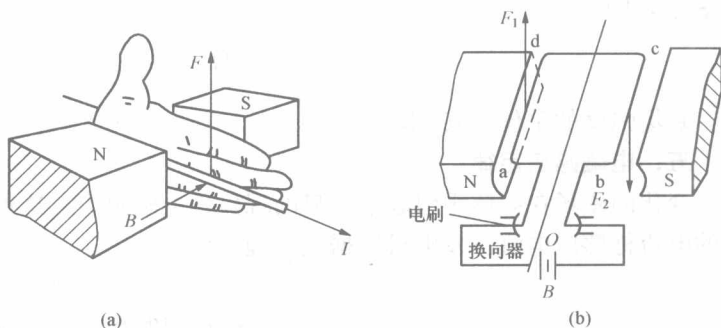


图 1-7 左手定则

(a) 载流直导体; (b) 载流线圈在磁场中受到的电磁力矩

$$M = N \left(F_1 \frac{L_{ad}}{2} + F_2 \frac{L_{dc}}{2} \right) = NBIS \quad (1-18)$$

式中: M 为电磁力矩 (N·m); N 为线圈圈数 (匝); B 为线圈所处磁场的磁感应强度 (T); I 为线圈电流 (A); L_{ad} 、 L_{dc} 分别为线圈长、短边的长度 (m); S 为线圈平面面积 (m²)。

四、磁导率与磁场强度

1. 磁导率

各种物质能够被磁化的强度,或者说磁性的好坏,常用磁导率来说明。真空的磁导率,

又称磁性常数, 由实验测得, 其值是

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

式中: H 是亨利 ($\Omega \cdot \text{s}$) 的简称, 它是电感的单位。

某物质的磁导率 μ 与真空磁导率 μ_0 之比称为物质的相对磁导率, 即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1-19)$$

相对磁导率只是个比值, 没有单位。

$\mu_r > 1$ 的称顺磁性物质; $\mu_r < 1$ 的称反磁性物质; $\mu_r \gg 1$ 的称铁磁性物质。应当指出, 顺磁性和反磁性物质的 μ 都只是稍微大于 1 或小于 1, 就是说其磁性与真空相差无几。例如, 空气的 μ_r 为 1.000003, 铜的 μ_r 为 0.999995。因此, 对于非铁磁性物质来说, 在计算时把它们的相对磁导率 μ_r 取为 1 是完全可以的。但铁磁性物质比较特殊, 其相对磁导率 μ_r 值很大, 可达几百、几千甚至上万, 而且它的大小不是一个固定数, 随物质被磁化的程度而变。

2. 磁场强度

由于物质的磁导率不同, 所以, 同样的电流在不同的物质中建立的磁场的磁感应强度也不同。这样一来, 在计算磁感应强度时, 一定要考虑磁场是在什么物质中建立的, 既要考虑磁导率, 又要考虑建立这个磁场的电流, 即通电导线 (或线圈) 的形状、匝数、电流大小; 还要考虑计算点的位置。显然, 这样考虑比较麻烦, 因此可以引用一个辅助量, 称为磁场强度, 用它来集中代表除磁导率外的其他因素, 这样就可以使磁场计算和分析比较简单。

在磁场中某点的磁感应强度 B 与磁场所在的物质的磁导率 μ 之比, 称为磁场强度, 用 H 表示, 则

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (1-20)$$

磁场强度的单位是安/米 (A/m)。

五、电磁感应定律

变化的磁场在导体中引起电动势的现象称电磁感应。这种电动势称感应电动势, 由它引起的电流称感应电流。发电机即据此原理工作。

1. 直导体的电磁感应

导体在切割磁力线过程中产生的感应电动势 (或电流) 的方向, 与磁通方向、导线运动方向有关, 这个关系可用右手定则来帮助记忆。如图 1-8 所示, 设想将伸开的右手放在磁场中, 让磁力线穿过手心, 大拇指指向导线切割磁力线的运动方向, 这时, 四指就指向导体中感应电动势的方向。

实验表明, 感应电动势 e 的大小与磁通密度 B 、导线长度 l 和切割磁力线的速度 v 成正比, 即

$$e = Blv \sin \alpha$$

式中: α 是导线运动方向与磁通方向之间的夹角。

如果导线垂直切割磁通, 即 $\alpha = 90^\circ$, 这时产生的感应电动势最大, 即

$$e = Blv \quad (1-21)$$

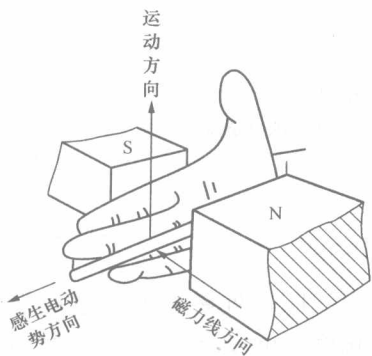


图 1-8 导体切割磁力线产生电动势

电磁感应现象与通电导线在磁场中受电磁力作用的现象有关系。实践证明,任何电荷或带电体在磁场中运动,或它不运动而磁场运动,磁场对它们都有电磁力的作用。导体切割磁力线,使导体在磁场中运动,则其中自由电荷受电磁力的作用被推向导体的一端,导体的另一端便出现等量而异号的电荷,于是在导体两端间建立了电位差,即产生了电动势,这个电动势就是感应电动势。

2. 线圈中的电磁感应

不仅在导体切割磁力线时产生电磁感应,在图 1-9 所示的几种情况下,也产生电磁感应。图 1-9 (a) 中,当将磁铁插入线圈中,或从线圈拔出的过程中,线圈中有感应电动势产生;图 1-9 (b) 中,当一个线圈通电或断电的一瞬间,在另一个线圈中产生感应电动势;图 1-9 (c) 表明,当一个线圈中通有变化的电流(如交流),或改变其中电流的大小时,在另一个线圈中有感应电动势产生。

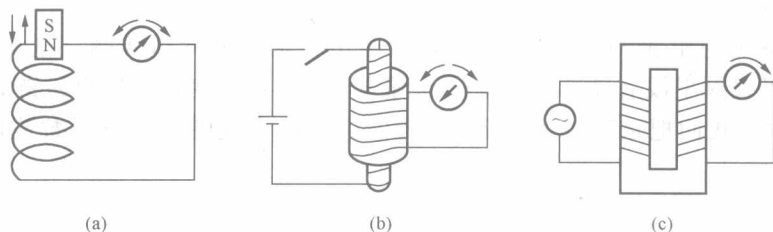


图 1-9 线圈中的电磁感应

通过精确的验证,在单一回路中感应电动势 e 的大小等于穿过这个回路的磁通量变化率,即

$$e = - \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$$

如果线圈的匝数为 N ,则相当于有 N 个单一回路相串联,则其感应电动势为

$$\begin{aligned} e &= - N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = - \frac{\Delta (N\phi)}{\Delta t} \\ &= - \frac{\Delta \psi}{\Delta t} \end{aligned} \quad (1-22)$$

式中: $\psi = N\phi$ 是穿过线圈各匝的磁通的代数和,称为磁链。

式 (1-22) 中的负号表明,感应电动势 e 在回路中的方向总是与外加磁通变化率取相反的符号。如果外加的磁通是增加, $\frac{\Delta \phi}{\Delta t} > 0$, 即为正号,则感应电动势为负的,即感应电流的磁通与外加的磁通方向相反。也就是说,闭合回路中的感应电流方向,总是企图使感应电流本身所产生的通过回路面积的磁通,去补偿或反抗引起感应电流的磁通改变,这一结论称为楞次定律。

楞次定律可以判断任何感应电动势或感应电流的方向。

在磁铁插入线圈的过程中,穿过线圈的磁通是由无到有,由少到多的增加过程,即 $\frac{\Delta \phi}{\Delta t} > 0$, 在这个过程中产生感应电流。这个感应电流的磁通是阻碍外加磁通增加的,它的方向与外加磁通方向相反。既然感应电流的磁通方向已确定,则按右手螺旋定则可确定出感应电流的方向。