

高压进网作业电工培训教材

湖南省电力行业协会编

(上 册)

中南大学出版社

2003年10月

高压进网作业电工培训教材

湖南省电力行业协会编

(下 册)

中南大学出版社

2003 年 10 月

编 委 会

主 任：陈学军

副主任：陈珍高 罗赤橙 尚 佳 朱泌生

编 委：陈学军 陈珍高 罗赤橙 尚 佳 朱泌生 蒋 冬
 张志飞 付维生 王宇丹

主 编：朱泌生

副主编：王宇丹

撰稿人：付维生 李智芳 安 歧 王 珏 蒋继雄 沈年其
 彭洪范 赵康义 袁荣铸 言子俊 林开银 杨文虎

前 言

为了提高进网作业电工人员的技术素质，维护发、供、用电的公共安全，保障电网的安全、稳定、经济运行，根据进网作业电工培训考核大纲的要求，我们组织编写了《高压进网作业电工培训教材》。

本书内容包括高低压电气理论和电力系统运行知识、作业技能、应知应会与作业安全等，全书分为上下册。上册内容包括：电工基础，电子技术，微型计算机基础知识，电力系统与电力网，电气线路电气工程图的阅读，变电所的二次系统，变电所综合自动化，改善电能质量的技术措施；下册内容包括：同步发电机，高压电器设备及成套装置，过电压保护及接地装置，电工仪表及计量装置，电气试验及状态检修，变压器的工作原理、结构、电压调整、异常运行、故障处理及检查与维护。该书适应于高压进网作业电工的不同工种、不同工级。读者既可通读，也可选学其中有关部分内容。本书可供企事业单位电气管理人员参考，也可作为电气技工学校的参考教材。

参加本书编写的作者都是多年来从事电力工业管理的第一线的技术骨干，在编写时广泛收集资料，反复研讨，特别注重实用性、普遍性。书中如有疏漏、错误和不妥之处，敬请广大读者提出宝贵意见。

编 者

2003 年 10 月

目 录

第一篇 电工及电子技术

第一章 电工基础知识	1
1.1 直流电路的基本知识	1
1.2 直流电路的分析	4
1.3 电磁和电磁感应	7
1.4 正弦交流电	11
1.5 三相正弦交流电路	18
第二章 电子技术	23
2.1 半导体二极管与整流电路	23
2.2 三极管与放大电路	29
第三章 微型计算机基础知识	36
3.1 微型计算机的组成	36
3.2 学用视窗操作系统	40
3.3 汉字输入法介绍	44
3.4 文件处理软件的使用	46

第二篇 电力系统知识

第四章 电力系统与电力网	52
4.1 电能的特点	52
4.2 电力系统的若干基本概念	52
4.3 电力系统的非正常运行状态	54
4.4 电力系统的保护与控制	55
4.5 电力系统的运行管理	56
第五章 电气线路	58
5.1 架空电力线路	58
5.2 电力电缆	111
第六章 电气工程图的阅读	141
6.1 阅读电气工程图的基本知识	141
6.2 电气系统图	172
6.3 二次接线图	176
6.4 电气控制接线图	191
6.5 动力及照明工程图	203
6.6 电力线路工程图	220
6.7 防雷与接地工程图	228
第七章 变配电所的二次系统	234
7.1 概 述	234
7.2 二次回路	234
7.3 信号装置	240

7.4 继电保护	244
第八章 变配电所综合自动化	294
8.1 综合自动化的基本概念	294
8.2 综合自动化系统的基本特征	297
8.3 综合自动化系统的内容、主要功能及信息量	299
8.4 综合自动化系统的硬性结构形式	307
8.5 人机会话与操作	311
8.6 综合自动化系统的运行与使用	313
8.7 综合自动化系统的技术管理与维护	315
8.8 综合自动化系统的调试	317
第九章 改善电能质量的技术措施	322
9.1 概 述	322
9.2 并联无功补偿	322
9.3 串联电容补偿	324
9.4 动态有功与无功补偿	325
9.5 动态电压恢复器	326
9.6 各种补偿装置的性能及评价	327
9.7 并联电容器补偿无功功率的作用及其方式	328
9.8 并联电容器技术数据的计算	330
9.9 电容器组的保护	334
9.10 电容器放电装置	336
9.11 电容器组的控制	338
9.12 并联电容器的安装及电容成套装置	341
第三篇 电气设备及试验	
第十章 同步发电机	347
10.1 同步发电机结构	347
10.2 交流电机旋转磁场及同步发电机的电枢反应和正常运行	353
10.3 同步发电机的励磁系统	358
10.4 同步发电机运行的一般要求及故障处理	362
第十一章 高压电器设备及成套装置	369
11.1 概 述	369
11.2 高压电器基本理论	370
11.3 高压断路器	379
11.4 高压电器的操动机构	398
11.5 负荷开关	407
11.6 隔离开关	413
11.7 熔断器	423
11.8 母线和绝缘子	427
11.9 避雷器	432
11.10 电容器	435
11.11 高压成套装置	440
11.12 组合式变电站	452
第十二章 过电压保护及接地装置	455

12.1	概 述	455
12.2	内部过电压	455
12.3	外部过电压	459
12.4	防雷设备	461
12.5	消谐器	464
12.6	变、配电所的过电压保护	465
12.7	旋转电机的过电压保护	468
12.8	10kV 及以下架空线路和变压器的过电压保护	469
12.9	过电压保护的技术管理工作	470
12.10	接 地	471
第十三章	电工仪表及计量装置	495
13.1	电工仪表分类及误差	495
13.2	电流表和电压表	500
13.3	功率表及功率测量	513
13.4	仪用互感器	520
13.5	电能表与电能计量	532
13.6	兆欧表	544
13.7	万用电表	549
13.8	电 桥	570
13.9	示波器	578
第十四章	电气试验及状态检修	584
14.1	概 述	584
14.2	电气设备的基本试验	586
14.3	异步电动机的试验	599
14.4	电力变压器试验	604
14.5	互感器试验	611
14.6	高压断路器试验	612
14.7	电力电缆试验	615
14.8	并联电容器试验	622
14.9	避雷器试验 (金属氧化物避雷器)	625
14.10	接地装置试验	629
14.11	绝缘油试验	633
14.12	电气安全用具试验	637
14.13	电力设备状态维修的发展与实现	640
14.14	在线监测	642
第四篇	变压器	
第十五章	变压器的工作原理及结构	645
15.1	变压器的用途、分类及变压器的主要参数	645
15.2	变压器的基本结构及变压器的型号表示	647
15.3	变压器的工作原理	650
第十六章	变压器的电压调整	655
16.1	变压器的无励磁调压	655
16.2	变压器的有载调压	657

第十七章 变压器异常运行分析及常见故障处理..... 667

17.1 变压器的异常运行与分析..... 667

17.2 变压器常见故障的处理..... 670

第十八章 变压器的检查与维护..... 672

18.1 变压器的检查..... 672

18.2 变压器的维护..... 672

第一篇 电工及电子技术

第一章 电工基础知识

1.1 直流电路的基本知识

1.1.1 电路和电路图

将有关的电气设备或元件按照一定的方式连接起来所构成的电流所流经的路径，称为电路。图 1-1 所示为最简单的电路。

电路主要由三部分组成：

(1) 电源

电源是一种把其他形式的能量转换为电能的设备，例如发电机把机械能转换为电能，蓄电池把化学能转换为电能等。

(2) 负载

负载是用电设备的总称，它将接受的电能转换为其他形式的能量，例如电灯将电能转换为光能，电炉将电能转换为热能等。

(3) 连接导线

连接导线是连接电源和负载的导体。

电路图：用规定的图形和文字符号来表示实际电气元件，并按照实际电路中各元件的连接情况所画出的图。如图 1-1 所示。

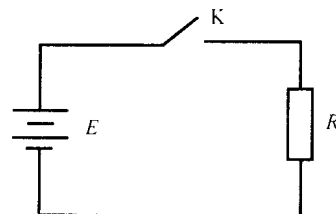


图 1-1 最简单的电路

1.1.2 基本物理量

(1) 电流

电荷的定向运动称为电流，金属导体中的自由电子在电场力作用下的定向运动，电解液中的正、负离子在电场力作用下向着相反方向的运动等都叫做电流。

电流大小用电流强度来表示，它等于单位时间内通过导体横截面的电量，用符号 I 表示，即

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

式中 Q ——通过导体横截面的电量，单位是库仑，C；

t ——通过电量 Q 所用时间，单位是秒，s；

I ——电流强度，单位是安培，A。

较大的电流用千安 (kA) 作单位，较小的电流用毫安 (mA) 或微安 (μA) 作单位，它们之间的关系为：

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

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

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

如果电流的大小和方向都不随时间变化,这样的电流叫做直流,用大写字母 I 表示,如果电流的大小和方向都随时间变化,这样的电流叫做交流,用小写字母 i 表示。

(2) 电压和电位

1) 电压

电场中的电荷受到电场力的作用而作功,在图 1-2 所示的匀强电场中,电荷 Q 在电场力作用下,由 a 移到 b 所做的功为 W_{ab} ,则 a, b 两点间电压的大小为

$$U_{ab} = \frac{W_{ab}}{Q} \quad (1-2)$$

由上式可知, a, b 两点间的电压在数值上等于电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功。

图 1-2 匀强电场中电场力对电荷做功

在国际单位制中,功的单位是焦耳 (J),电量的单位是库仑 (C),电压的单位是伏特 (V)。

电压的单位也可用千伏 (kV),毫伏 (mV) 表示,即

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

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

2) 电位

在电路中任选一点作为参考点,那么电路中某点的电位就是该点到参考点之间的电压,某点的电位就是电场力将单位正电荷从该点移到参考点(参考点的电位规定为零)所做的功,用符号 φ 表示,则 a 点的电位是

$$\varphi_a = U_{ao} \quad (1-3)$$

电位的单位与电压相同,也是伏特 (V)。

a, b 两点电位差又叫做 a, b 两点间的电压,即

$$U_{ab} = U_{ao} - U_{bo} = \varphi_a - \varphi_b \quad (1-4)$$

如果 $\varphi_a > \varphi_b$,即 a 点的电位高于 b 点的电位,则 $U_{ab} > 0$,电压的方向是由高电位指向低电位,电位是降低的,所以电压又叫电位降或电压降。

电场中各点的电位,随着参考点的改变而不同,但是无论参考点如何改变,但任意两点的电位差不变,也就是,电位与参考点的选择有关,而电压与参考点的选择无关。

(3) 电动势

在电场中,将单位正电荷由低电位移向高电位时外力所做的功称电动势,其大小为

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

式中 W ——电场力移动正电荷做的功,单位是焦耳, J;

Q ——电荷量,单位是库仑, C;

E ——电动势,单位是伏特, V。

电动势的方向规定为由低电位指向高电位,即由电源的负极指向正极的方向,也就是电位升高的方向。

电源的符号如图 1-3 所示。

电源两极之间的电压叫做电源的端电压,由图可知电源端电压的方向与它的电动势的方向是相反的。

1.1.3 电阻和电阻定律

根据物质导电能力的强弱,一般可分为导体,绝缘体和半导体。

银,铜,铝等导电能力强属于良导体,玻璃,胶木,陶瓷不能导电属于绝缘体,而硅,锗等的导电能力介于导体和绝缘体之间,属于半导体。

在电场力的作用下,电流在导体中流动时,所受到的阻力,称为电阻,用符号 R 或 r 表示,电

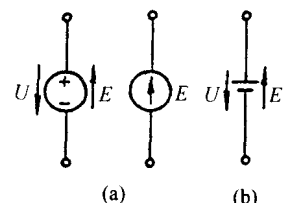
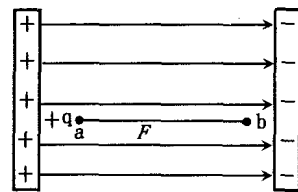


图 1-3 电源的符号

阻的单位为欧 (Ω), 还有兆欧 ($M\Omega$), 千欧 ($k\Omega$), 毫欧 ($m\Omega$), 微欧 ($\mu\Omega$), 即

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

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

$$1\Omega = 10^3m\Omega = 10^6\mu\Omega。$$

导体电阻的大小不仅和导体的材料有关, 还和导体的尺寸有关, 经实验证明, 在温度不变时, 一定材料制成的导体的电阻跟它的长度成正比, 跟它的截面积成反比, 这个实验规律叫做电阻定律, 均匀导体的电阻可用公式表示为

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-6)$$

式中 ρ ——电阻率, 其值由电阻材料的性质决定, 单位是欧米, $\Omega \cdot m$;

L ——导体的长度, 单位是米, m ;

S ——导体的截面积, 单位是平方米, m^2 ;

R ——导体的电阻, 单位是欧, Ω ;

几种常见材料在 $20^\circ C$ 时的电阻率见表 1-1。

表 1-1 $20^\circ C$ 时常见材料的电阻率

用 途	材 料 名	$\rho (\Omega \cdot m)$
导电材料	银	1.65×10^{-8}
	铜	1.75×10^{-8}
	铝	2.83×10^{-8}
	低碳钢	1.3×10^{-7}
电阻材料	铂	1.06×10^{-7}
	钨	5.3×10^{-8}
	锰铜	4.4×10^{-7}
	康铜	5.0×10^{-7}
	镍铬铁	1.0×10^{-6}
	碳	1.0×10^{-6}

导体的电阻不仅和材料性质、尺寸有关, 还和温度有关, 在一般情况下, 电阻随温度的变化不大, 其影响可不用考虑。

1.1.4 欧姆定律

(1) 部分电路欧姆定律

在图 1-4 的电路中, 通过电阻的电流与电阻两端所加的电压成正比, 与电阻成反比, 称为部分电路欧姆定律, 即

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

将上式移项得 $U = IR$

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

值得注意的是, 电阻值不随电压, 电流变化而变化的电阻叫做线性电阻, 由其组成的电路叫线性电路, 阻值随电压, 电流变化而变化的电阻, 叫非线性电阻, 由其组成的电路叫非线性电路, 欧姆定律只适用于线性电路。

(2) 全电路欧姆定律

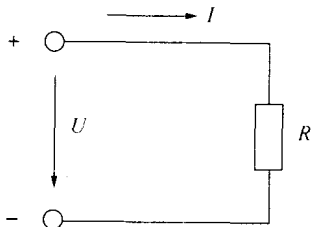


图 1-4 电阻电路

由电源和负载组成的闭合电路叫做全电路如图 1-5 所示, R 为负载电阻, E 为电源电动势, r 为电源的内阻。

在这样的闭合电路中的电流与电源电动势成正比, 与电路中的负载电阻及电源内阻之和成反比, 称为全电路欧姆定律。即

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

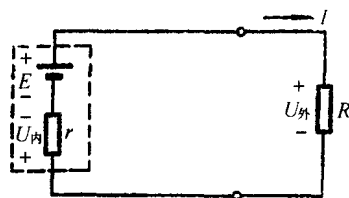


图 1-5 全电路欧姆定律

式中 E ——电源电动势, 单位是伏, V;

R ——负载电阻, 单位是欧, Ω ;

r ——电源内阻, 单位是欧, Ω ;

I ——闭合电路中的电流, 单位是安, A。

当 $R \rightarrow \infty$ (开路), $I \rightarrow 0$, 则 $U_{\text{外}} = E$, 开路时的端电压等于电源的电动势。

当 $R = 0$ 时 (短路), $I = 0$, $U_{\text{外}} = 0$ 。

1.1.5 电能和电功率

(1) 电能

电能就是电场力或外力所做的功, 用符号 W 表示。

对于电源, 它所产生的电能等于电动势与被外力移动的电荷的电量的乘积, 即

$$W = EQ = EIt \quad (1-9)$$

对于负载, 它所吸收的电能等于负载的端电压与被电场力移动的电荷的电量的乘积, 即

$$W_R = UQ = UIt = I^2 R t \quad (1-10)$$

在国际单位制中, 电能的单位是焦耳 (J)。

应用焦耳和卡之间的换算关系, 在时间 t 内电阻 R 中产生的热量为

$$Q_R = 0.239 I^2 R t \text{ (卡)} \quad (1-11)$$

上式为焦耳—楞次定律。

(2) 电功率

在单位时间内电源产生的电能或负载吸收的电能叫做电功率, 用字母 P 表示

$$P = \frac{W}{t} = \frac{UIt}{t} = UI \quad (1-12)$$

功率的单位是瓦特, 简称瓦 (W), 较大的功率的单位是千瓦 (kW), 较小的功率单位是毫瓦 (mW)。它们之间的关系为

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

$$1\text{mW} = 10^{-3}\text{W}$$

1.2 直流电路的分析

1.2.1 电阻的串联, 并联和混联

(1) 电阻的串联

把几个电阻依次联接起来, 组成中间无分支的电路, 叫做电阻的串联电路, 如图 1-6 (a) 所示。

电阻串联电路的特点:

1) 通过各电阻的电流为同一电流。

2) 外加电压等于各个电阻上的分电压之和, 即

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad (1-13)$$

3) 等效电阻等于各串联电阻之和, 即

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (1-14)$$

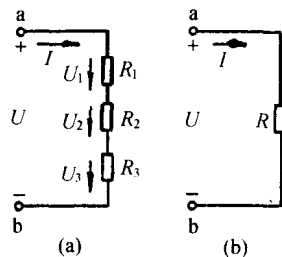


图 1-6 电阻的串联电路

(a) 电阻串联 (b) 等效电阻

4) 各电阻消耗的功率与电阻成正比, 即

$$P_1:P_2:P_3=R_1:R_2:R_3 \quad (1-15)$$

5) 各电阻上电压与总电压关系是:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= \frac{R_1}{R} U \\ U_2 &= \frac{R_2}{R} U \\ U_3 &= \frac{R_3}{R} U \end{aligned} \right\} \quad (1-16)$$

(2) 电阻的并联

把两个或两个以上电阻接到电路中的两点之间, 电阻两端承受的是同一个电压的电路, 叫做电阻的并联电路, 如图 1-7 (a) 所示。

电阻并联电路的特点:

1) 各个电阻上的电压是同一电压。

2) 总电流等于各支路电流之和, 即

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (1-17)$$

3) 总电阻的倒数等于各并联电阻的倒数之和, 即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (1-18)$$

4) 各电阻上消耗的功率与各电阻成反比, 即

$$P_1:P_2:P_3 = \frac{1}{R_1}:\frac{1}{R_2}:\frac{1}{R_3} \quad (1-19)$$

5) 各电阻的电流与总电流的关系

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{R}{R_1} I \\ I_2 &= \frac{R}{R_2} I \\ I_3 &= \frac{R}{R_3} I \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

(3) 电阻的混联

既有电阻串联又有电阻并联的电路叫电阻混联电路, 如图 1-8 所示。

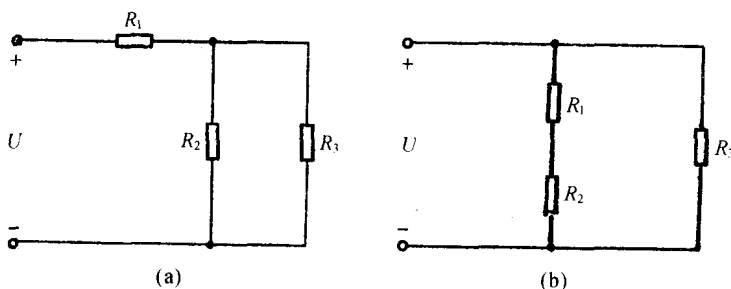


图 1-8 电阻的混联电路

图 1-8 (a) 所示电路电路电阻串并联关系是: R_2 与 R_3 并联后再与 R_1 串联, 其总电阻为

$$R = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

同理也可以分析图 1-8 (b) 所示电路。

1.2.2 基尔霍夫定律

不能用串、并联分析方法简化成无分支路的电路, 称为复杂电路, 复杂电路可用基尔霍夫定律分

析, 首先介绍几个电路名称。

(1) 支路: 电路中没有分支的一段电路叫做支路, 图 1-9 中共有三条支路, acb, adb, aeb 支路。

(2) 节点: 三条或三条以上支路的联接点叫做节点, 图 1-9 中共有 a, b 两个节点。

(3) 回路: 电路中任何一个闭合路径叫做回路, 图 1-9 中共有三个回路, acbda, adbea, acbea 回路。

(4) 网孔: 没有被支路穿过的回路叫做网孔, 图 1-9 共有两个网孔, acbda, adbea 网孔。

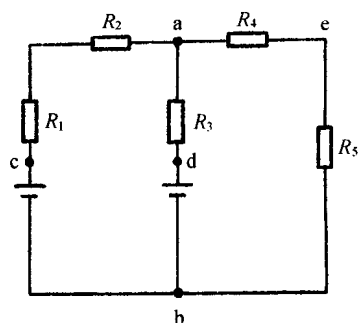


图 1-9 复杂电路

1) 基尔霍夫第一定律——节点电流定律

基尔霍夫第一定律也叫做节点电流定律, 它确定了汇集某一节点各支路电流间的关系, 即对电路中任一节点, 流入节点的电流之和等于流出该节点的电流之和。在图 1-10 所示电路中, I_1, I_3, I_5 流入节点 A, 电荷在节点 A 不可能产生, 消灭或积累, 所以流入节点 A 的电流之和必定等于从节点 A 流出的电流 I_2, I_4 之和, 即

$$I_1 + I_3 + I_5 = I_2 + I_4 \quad (1-21)$$

将上式改写成:

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 + I_5 = 0$$

或 $\sum I = 0$

$$(1-22)$$

这是基尔霍夫第一定律另一种表达方式, 即汇集于电路中任一节点的电流的代数和等于零, 应用上式时, 通常规定流入节点的电流为正, 流出节点的电流为负 (也可作相反的规定)。

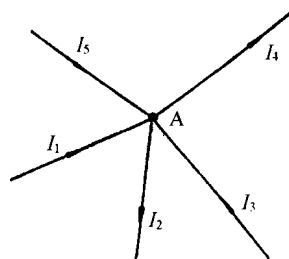


图 1-10 基尔霍夫第一定律

2) 基尔霍夫第二定律——回路电压定律

基尔霍夫第二定律也叫做回路电压定律, 它确定了一个闭合回路中各部分电压间的关系, 电路中任一回路内各段电压的代数和等于零, 即

$$\sum U = 0 \quad (1-23)$$

在写上式时, 通常需要规定一个回路绕行的方向 (顺时针方向或逆时针方向), 凡电压的参考方向 (或实际) 方向与回路绕行方向一致者, 则此电压的前面取正号, 反之取负号。

1.2.3 支路电流法

复杂电路的计算方法中, 支路电流法是最基本的方法, 这种方法是以前支路电流作为未知量, 应用基尔霍夫两个定律, 列出所需要的方程, 而后联立解出各未知支路电流。

应用支路电流法求各支路电流的步骤如下:

(1) 任意标出各支路电流的参考方向和网孔回路的绕行方向。

(2) 根据基尔霍夫第一定律列出独立的节点电流方程, 如果电路有 n 个节点, 那么只有 $(n-1)$ 个独立的节点电流方程。

(3) 根据基尔霍夫第二定律列出独立的回路电压方程, 为保方程的独立性, 一般选择网孔来列方程。

(4) 联立求解方程组, 就得出待求的各支路电流。

【例】在图 1-11 所示两台发电机并联运行, 共同供电给负载, 已知 $E_1 = 130V, E_2 = 117V, R_1 = 1\Omega, R_2 = 0.6\Omega$, 负载电阻 $R_3 = 24\Omega$, 求各支路电流 I_1, I_2, I_3 。

解: ① 选定各支路电流参考方向及回路绕行方向如图 1-11 所示

② 电路中只有 a, b 两个节点, 只能列一个独立的节点电流方程, 列出节点 a 的电流方程为

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

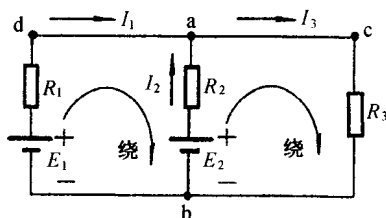


图 1-11

③ 根据基尔霍夫第二定律，列出两个网孔的回路电压方程。

abda 回路的电压方程为

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 - E_1 + E_2 = 0$$

acba 回路的电压方程为

$$I_2 R_2 + I_3 R_3 - E_2 = 0$$

④ 代入已知数据联立方程组

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ I_1 - 0.6 I_2 - 130 + 117 = 0 \\ 0.6 I_2 + 24 I_3 - 117 = 0 \end{cases}$$

解方程得 $I_1 = 10\text{A}$ $I_2 = -5\text{A}$ $I_3 = 5\text{A}$

I_1, I_3 为正值，表明电流的实际方向与参考方向相同， I_2 为负值，表明电流的实际方向与参考方向相反。

1.3 电磁和电磁感应

1.3.1 磁的基本知识

(1) 磁铁和磁力线

具有吸引铁，镍、钴等物质的性质叫做磁性，而具有磁性的物体叫做磁体。磁铁是具有磁性的物体，它分为天然磁铁和人造磁铁两类。

任一磁铁均有两个磁极，一个叫南极（S极），一个叫北极（N极），N极和S极总是成对出现并且强度相等，磁铁的端部磁性最强，越靠近中央磁性越弱，磁极之间有相互作用力，同性磁极相斥，异性磁极相吸。

磁极之间的相互作用力是通过其周围的磁场传递的，在磁铁周围存在着一种特殊物质叫做磁场。

利用磁力线可以形象地描绘磁场，即在磁场中画出一系列曲线，曲线上任意一点的切线方向就是该点磁场方向，条形磁铁的磁力线，如图1-12所示。

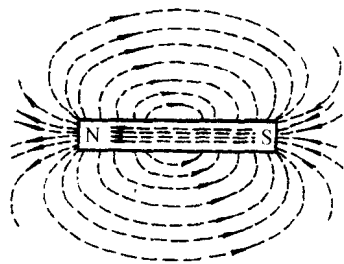


图1-12 条形磁铁磁力线

用磁力线描述磁场时，有以下几个特点：

1) 磁场的强弱可用磁力线的疏密表示，磁力线密的地方磁场强，疏的地方磁场弱。

2) 在磁铁外部，磁力线从N极到S极，在磁铁内部磁力线则是由S极到N极，所以磁力线总是闭合的，不能中断。

3) 磁力线互不相交。

(2) 通电导线和通电线圈的磁场

1) 通电长直导线的磁场方向

通电长直导线的磁场方向的判断方法：右手握住导线并把拇指伸开，拇指指向电流方向，则其余四指环绕的方向就是磁场方向，如图1-13(a)所示，如果通电导线垂直纸面，电流方向离读者而去，磁力线是顺时针方向，如图1-13(b)所示；如果电流方向指向读者，磁力线是逆时针方向，

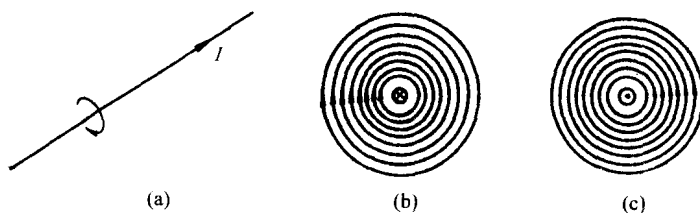


图1-13 通电长直导线的磁场方向

如图 1-13 (c) 所示。

2) 通电线圈的磁场方向

通电线圈的磁场方向判断的方法：右手握住线圈并把拇指伸开，弯曲的四指表示电流的方向，拇指所指的方向就是通电线圈的磁场北极 (N 极) 的方向，如图 1-14 所示。

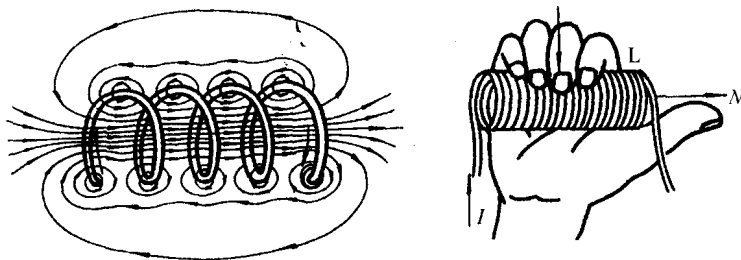


图 1-14 通电线圈的磁场方向

1.3.2 磁场对电流的作用

电流可以产生磁场，反之磁场也会对通电导体产生力的作用，这个力叫做电磁力或电力。

载流直导体在磁场中受力的方向可以用左手定则来确定。如图 1-15 所示，伸出左手拇指与四指垂直，磁力线从手心穿过，伸直的四指与导线中的电流方向一致，拇指所指的方向就是导线的受力方向。

电动力的大小与磁场的强弱，电流的大小和方向，通电导线的有效长度有关，如果通电导线与磁场方向 (磁力线) 平行，那么通电导线不受力，如图 1-16 (a) 所示，如果通电导线与磁场方向成 α 角，如图 1-16 (b) 所示，则磁场对通电导线的作用力为

$$F = BIL \sin \alpha \quad (1-24)$$

式中 B ——磁场的磁感应强度，单位是特斯拉，T；

I ——通过导线的电流，单位是安，A；

L ——导线在磁场中的有效长度，单位是米，m；

α ——通电导线与磁力线的夹角，单位是度，(°)；

F ——导体受到的电磁力，单位是牛，N。

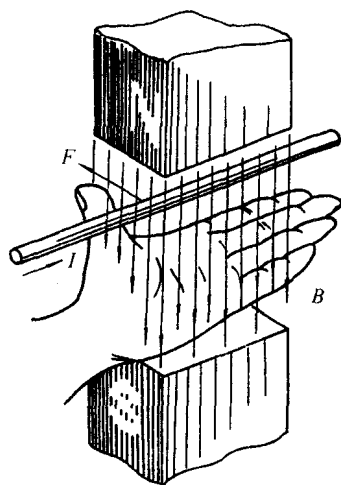


图 1-15 左手定则

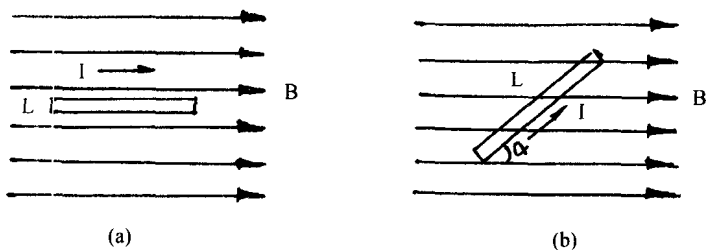


图 1-16 载流直导线在磁场的受力

1.3.3 电磁感应

(1) 导线切割磁力线产生的感应电动势

实验证明：

只要导线和磁场发生了相对运动，或者说导线切割了磁力线，在导线中就会产生感应电动势，由感应电动势所产生的电流叫做感应电流。

导线切割磁力线产生的感应电动势的方向用右手定则来确定，如图 1-17 所示。伸出右手，拇指

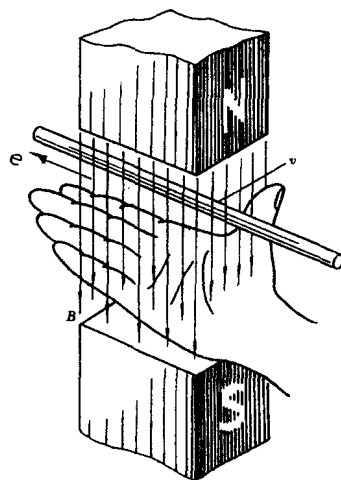


图 1-17 右手定则

与其余四指垂直，让磁力线从掌心穿过，拇指指向导线运动的方向，其余四指所指的方向就是感应电动势的方向。

通过进一步实验发现，当导线在磁场中运动时，感应电动势的大小与下面几个因素有关：

- 1) 导线的有效长度 L 愈长，所产生的感应电动势愈大。
- 2) 导线的运动速度 U 愈大，所产生的感应电动势愈大。
- 3) 磁感应强度 B 愈大，所产生的感应电动势愈大。
- 4) 所产生的感应电动势还与导线运动的方向和磁力线间的夹角 α 有关。

在均匀磁场中，感应电动势 e 的大小，由下式决定

$$e = BLU \sin \alpha \quad (1-25)$$

式中 B ——磁感应强度，单位是特，T；

L ——导线的有效长度，单位是米，m；

U ——导线运动的速度，单位是米每秒，m/s；

e ——感应电动势，单位是伏，V；

α ——导线运动方向与磁力线间的夹角，单位度，($^{\circ}$)。

(2) 楞次定律和电磁感定律

右手定则可以判断导线在磁场中作切割磁力线运动时产生的感应电动势的方向，但它不能判断穿过闭合回路磁通变化时产生的感应电动势的方向。

在图 1-18 中，可以发现，当磁铁插入线圈时，穿过线圈的磁通增加，线圈中产生的感应电流使检流计指针向右偏转，当磁铁拔出时，穿过线圈的磁通减少，线圈又产生感应电流，使检流计指针向左偏转，这说明：线圈中感应电动势的方向与穿过线圈磁通的增加还是减少有关。

大量的实验证明，线圈中感应电流的方向，总是使感应电流的磁场阻碍引起感应电流磁通的变化。这就是楞次定律。

当磁铁插入线圈时，线圈的磁通增加，由楞次定律可知，感应电流产生的磁通要阻碍原磁通增加(用右手螺旋法则判定)，如图 1-18 (a) 所示，当磁铁拔出时，磁通减少，感应电流产生的磁通要阻碍原磁通减少，如图 1-18 (b) 所示。

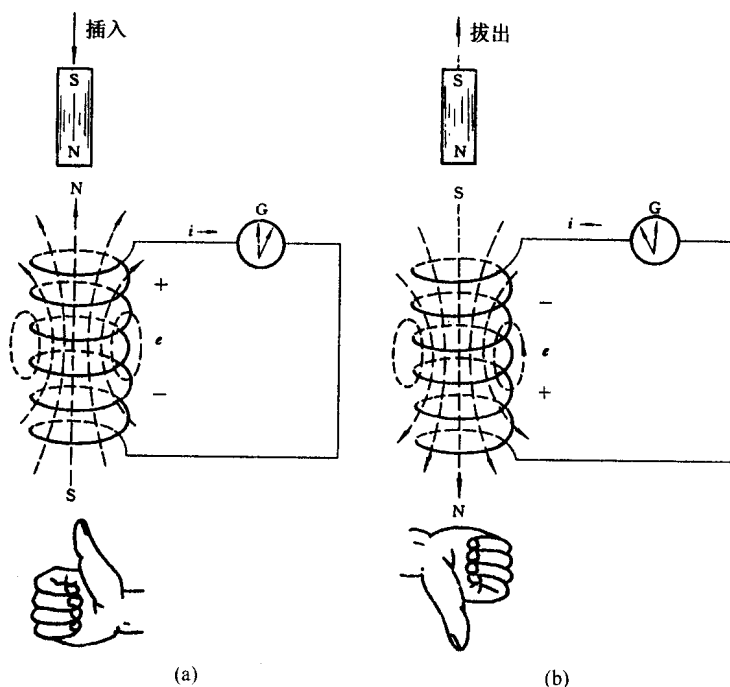


图 1-18 楞次定律的应用