

铁路职业教育铁道部规划教材

电工实训指导书

DIANGONGSHIXUNZHIDAOSHU

TIELU ZHIYE JIAOYU TIEDAOBU GUIHUA JIAOCAI

潘 伟 主编

高职

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介



铁路职业教育铁道部规划教材

(高 职)

电工实训指导书

主 编 潘 伟
主 审 黄北荣

本书为《电工实训指导书》

主编 潘 伟

电子邮箱: 951273133@163.com

电话: 010-21873133

责任编辑: 潘 伟

封面设计: 潘 伟

版式设计: 潘 伟

责任印制: 潘 伟

出版发行: 中国铁道出版社(地址: 北京市西城区右安门西街8号 邮政编码: 100024)

印 刷: 河北新华印刷厂

次: 2008年1月第1版 5008年1月第1次印刷

开 本: 787mm×1095mm 1/16 印张: 12 字数: 325千字

册 数: 1-3000册

书 号: ISBN 978-7-113-08282-8/TM·76

价: 28.00元

中国铁道出版社

2008年·北京

内 容 简 介

本书为铁路职业教育铁道部规划教材,是根据铁道部劳动和卫生司制订的教学大纲和教学计划,并结合学校实际教学情况以及现场工作的需要编写的。本书内容包括电工电子基础知识、电工常用工具及安全用具、电气安全基础知识及触电急救、电气安全技术、电气线路的安全运行、照明电路的安装、电气防火防爆与防雷、常用低压电器、异步电动机及其启动控制电路、电气安全管理等内容。

本书可作为高职电类电工实训指导用书,也可作为考电工证的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电工实训指导书/潘伟主编. —北京:中国铁道出版社,
2008. 1

铁路职业教育铁道部规划教材. 高职

ISBN 978-7-113-08585-8

I. 电… II. 潘… III. 电工技术—高等学校;技术学校—
教学参考资料 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 005960 号

书 名:电工实训指导书

作 者:潘 伟 主编

责任编辑:阚济存 武亚雯 电话:010-51873133 电子信箱:td51873133@163.com

封面设计:陈东山

责任校对:汤淑梅

责任印制:郭向伟

出版发行:中国铁道出版社(地址:北京市宣武区右安门西街8号 邮政编码:100054)

印 刷:河北遵化胶印厂

版 次:2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:15 字数:372 千

印 数:1~3 000 册

书 号:ISBN 978-7-113-08585-8/TM·76

定 价:28.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)51873170 路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504 路电(021)73187

前 言

本书为铁路职业教育铁道部规划教材,是根据铁路高职电气化铁道供电专业教学计划“电工实训”课程教学大纲的要求编写的。符合国家教委制定的《高等工程专科电工实习基本要求》及《特种作业人员安全技术培训大纲及考核标准》的要求。

本教材以满足电工基本功实训教学的需要为出发点,系统地介绍了电工作业人员应掌握的电气安全技术及电工基本知识,强化基本训练,适应高等专科电工实训的特点和需要。本教材共分十一章,主要内容为:电工电子基础知识、电工常用工具及安全用具、电气安全基础知识及触电急救、电气安全技术、电工测量仪表、电气线路的安全运行、照明电路的安装、电气防火防爆与防雷、常用低压电器、异步电动机及其启动控制电路、电气安全管理。

本教材在编写过程中,注意体现高职的特点和现实要求,力求做到图文并茂、深入浅出、简明扼要。本教材突出实际施工技能技巧内容的编排,注重培养学生的动手操作能力,同时考虑到电工作业是特种作业,安全技术要求高,故将安全知识及电气安全技术培训与电工基本功训练放在同等重要的位置上。力求学员通过短期的培训,能通过安全技术理论考核和实际操作技能考核,取得国家颁发的《安装维修电工特种作业操作》资格证书。

本教材在编写过程中参考了多种同类教材和专著,在此向编者表示致谢。由于时间仓促,编者的水平和经验有限,书中难免存在错误和不妥之处,敬请读者指正。

编 者

2008年1月

目 录

第一章 电工电子基础知识	1
第一节 电工基础知识	1
第二节 电子技术基础	15
第二章 电工常用工具及安全用具	21
第一节 电工常用工具及其使用	21
第二节 登高作业安全工具	27
第三节 电工安全用具	31
第三章 电气安全基础知识及触电急救	37
第一节 电气安全概论	37
第二节 电流对人体的作用	38
第三节 电气事故	40
第四节 触电急救	47
第四章 电气安全技术	53
第一节 防止直接接触电击的措施	53
第二节 防止间接接触电击的措施	62
第五章 常用电工仪表	72
第一节 电工仪表的基本知识	72
第二节 电流和电压的测量	74
第三节 钳形电流表	76
第四节 兆欧表	77
第五节 万用表	79
第六节 接地电阻测量仪	82
第七节 电度表	83
第八节 直流单臂电桥	89
第六章 电气线路的安全运行	92
第一节 电气线路的安全要求	92
第二节 电气线路的常见故障	102
第七章 照明电路的安装	106
第一节 电气照明的光源、方式及种类	106
第二节 导线连接及绝缘恢复	108
第三节 塑槽布线安装白炽灯电路	114
第四节 管道布线安装双联开关电路	117
第五节 明码布线安装日光灯电路	122

第六节 管道布线安装白炽灯、插座电路	129
第七节 综合照明线路的安装	131
第八章 电气防火防爆与防雷	143
第一节 燃烧(火灾)、爆炸和危险物品	143
第二节 危险环境	145
第三节 电气火灾和爆炸的原因分析	146
第四节 电气防火防爆技术	148
第五节 电气防火防爆措施	156
第六节 电气火灾	158
第七节 防 雷	160
第九章 常用低压电器	166
第一节 刀开关和组合开关	166
第二节 低压断路器	169
第三节 熔 断 器	174
第四节 主令电器	179
第五节 接 触 器	182
第六节 继 电 器	185
第十章 异步电动机及其启动控制电路	191
第一节 三相异步电动机的工作原理	191
第二节 三相异步电动机的结构	194
第三节 电气控制系统图的绘制原则	200
第四节 三相异步电动机的直接启动及其控制电路	205
第五节 三相异步电动机降压启动控制电路	210
第六节 常用机床电气线路的安装	217
第七节 三相异步电动机的使用与维护	219
第十一章 电气安全管理	222
第一节 组织管理	222
第二节 保证安全的组织措施	223
第三节 保证安全的技术措施	227
第四节 低压带电工作的安全要求	229
第五节 电工持证上岗的规定及培训考核要求	230

第一章

电工电子基础知识

第一节 电工基础知识

一、电路的基本概念

1. 电路的组成和作用

电路就是电流流通的闭合回路,也就是说电流所流经的路径即电路。在闭合电路中,实现着电能的传递和转换。

电路由电源、连接导线、开关电器、负载及其他辅助设备组成。如图 1-1 所示,是一个最简单的电路图,由电源、连接导线、开关和负载四部分组成。

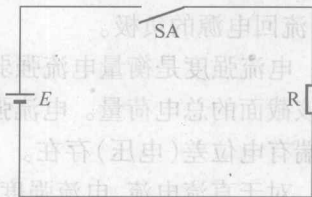


图 1-1 最简单电路

(1) 电源:提供电能的设备,其功能是把其他形式的能转换为电能。如电池把化学能转换为电能、发电机把机械能转换为电能等。干电池、蓄电池、发电机等是最常用的电源。

(2) 连接导线:用来连接电源、负载和其他辅助设备,以构成电流通路的导体。连接导线的作用是将电能传送给负载,常用的连接导体有铝线和铜线。

(3) 开关电器:接通或断开电路的控制元件。当它接通时,可使电路构成闭合的回路。是负载的控制设备,如刀开关、断路器、电磁开关、减压启动器等都属于开关电器。

(4) 负载:又称负荷,电路中消耗电能的设备,即为用电设备,其功能是把电能转变为其他形式的能量,如电炉把电能转变为热能、电动机把电能转变为机械能、电灯把电能转变为光能等。

(5) 辅助设备:在实际生产中,电路中常装有各种继电器、熔断器以及测量仪表等设备,这些设备属于电路的辅助设备,用于实现对电路的控制、分配、保护、监视和测量。

2. 电荷、电场强度、电位、电压、电流、电流强度和电动势

(1) 电荷:物质由分子组成,分子由原子组成,原子带有等量的正电和负电。失去电子或得到电子的微粒称为正电荷或负电荷,带有电荷的物体称为带电体。在电荷的周围存在着电场,电场中的电荷将受到电场力的作用。

(2) 电场强度和电位:表征静电场中各点性质的两个基本物理量。

电场中某点的电场强度即单位正电荷在该点所受到的作用力,单位是 V/m 。

电场中某点的电位是指在电场中将单位正电荷从该点移至电位参考点时电场力所做的功。工程上通常以大地作为电位参考点,参考点的电位为零。电位的单位是 V (伏)。

(3) 电压:电路中既有大小又有方向(极性)的基本物理量。电压的大小为外电路电场力将单位正电荷从某点移动到另一点所做的功,用 U 表示,电压的实际方向规定为从电路的高

电位点指向低电位点,单位与电位相同,也是V(伏),也用kV(千伏), $1\text{ kV}=1\,000\text{ V}$ 。在外电路,电路中A、B两点间的电压的大小,等于电场力将单位正电荷从A点移到B点所做的功。若电场力做正功,则电压 U 的实际方向从A到B。若电场力做负功,则电压 U 的实际方向从B到A。

在电路中,任意两点之间的电位差,称为此两点间的电压。如A点的电位为 V_a ,B点的电位为 V_b 时,AB之间的电压为: $U_{ab}=V_a-V_b$;BA之间的电压为: $U_{ba}=V_b-V_a$ 。

电压有直流电压和交流电压两种。方向和大小都不随时间变化的电压,叫做直流电压。方向和大小都随时间作周期性变化的电压叫做交流电压。干电池、蓄电池及直流发电机输出的是直流电压;电力网、交流发电机输出的是交流电压。直流电压用大写字母 U 表示,交流电压用小写字母 u 表示。

(4) 电流和电流强度

电流也是电路中既有大小又有方向的物理量。电荷在导体中的定向运动形成电流,也可以说,带电微粒的定向移动就是电流。习惯上人们将正电荷运动的方向作为电流的方向,它与电子移动的方向相反,方向不随时间变化的电流称为直流电流;大小和方向随时间作周期性变化的电流称为交流电流。人们认为:电流是从电源的正极出发,经导线、开关、负载及另一根导线,流回电源的负极。

电流强度是衡量电流强弱的物理量。通过导体截面电流强度的大小,等于单位时间内通过该截面的总电荷量。电流强度简称电流,用 I 表示。在导体中,促使电流形成的条件是导体两端有电位差(电压)存在。

对于直流电流,电流强度可表示为

$$I=Q/t$$

式中 I ——电流,A;

Q ——电荷量,C;

t ——时间,s。

电流的常用单位是A(安)、kA(千安)、mA(毫安)和 μA (微安)。它们之间的换算关系如下:

$$1\text{ kA}=1\,000\text{ A}; 1\text{ A}=1\,000\text{ mA}; 1\text{ mA}=1\,000\text{ }\mu\text{A}$$

(5) 电动势

在一个闭合的电路中,可分为一个外电路(包括导线和负载)和一个内电路(电源内部的电路)。在外电路,电流总是从电源的正极经过负载流向电源的负极,电场力做功,将电能转换为其他形式的能。在内电路,电源是如何建立并维持正极与负极之间的电位差呢?这是因为任何一种电源都是一个能量转换装置,在电源内部能量转换过程中,产生一种非静电力,它能把正电荷从负极不断地持续地流通到正极。电源内部这种能把正电荷从电源的负极推动到正极的本领称为电动势。故认为正极对负极有高电位,负极对正极有低电位,电源正极与负极之间的电位差,就是电源两端的电压,又称电动势,电源的电动势用大写字母 E 表示,单位是V(伏),方向规定是从低电位点指向高电位点,即从电源的负极指向正极。

3. 电路中的负载元件

电路中有各种各样的负载,按照加在负载上的电压与通过负载的电流的关系,可将负载分为电阻、电感和电容三种基本元件。实际负载可视为三种元件的组合。

(1) 电阻:导体中的自由电子在移动的过程中,不可避免地发生相互碰撞,并和导体中其

他不带电的质子也发生碰撞,同时还必须克服原子核对它的吸引力,因而会受到一定阻力,也就是说电流在流动过程中会遇到阻力,导体对电流的这种阻力称为电阻,用字母 R 或 r 表示。电阻大的物体导电能力弱,电阻小的物体导电能力强。在纯电阻电路中,电流和电压的相位一致。电阻的常用单位是 Ω (欧)、 $k\Omega$ (千欧) 和 $M\Omega$ (兆欧),其关系为: $1 M\Omega = 10^3 k\Omega = 10^6 \Omega$ 。

实验证明,金属导体的电阻大小与其长度成正比,与其横截面积成反比,并与材料、温度等因素有关。20℃ 时导体的电阻可用下式表示,即

$$R = \rho L / S$$

式中 R ——导体的电阻, Ω ;
 L ——导体的长度, m ;
 S ——导体的截面积, mm^2 ;
 ρ ——导体的电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

导体的电阻率 ρ 决定于导体的材料,电阻率高的材料,导电性能差;电阻率低的材料,导电性能好。常用金属材料的电阻率见表 1-1 所示。

表 1-1 常用金属材料的电阻率

材料名称	电阻率($\Omega \cdot m$)	材料名称	电阻率($\Omega \cdot m$)
银	0.016 5	黄铜	0.07 ~ 0.08
铜	0.017 2	青铜	0.021 ~ 0.4
铝	0.026 2	锰铜	0.42
铁	0.13 ~ 0.3		

物体按照它的导电性能可分为导体和绝缘体。各种金属、酸、碱、盐的水溶液以及人体等,因为有自由电子、离子等带电粒子的存在,比较善于传导电流,所以这类物质称为导体。而橡胶、塑料、玻璃、云母、陶瓷、电木、纸张、空气等物体,在一般情况下;几乎没有自由电子,不善于传导电流,所以这类物体被称为绝缘体。导电性能介于导体和绝缘体之间的物体,称为半导体,例如锗、硅及金属氧化物等常用的晶体管和集成电路等,都是用这些材料做成的。

温度对导体的电阻有影响,同一导体在不同的温度下,它的电阻值不同。绝大多数金属材料温度升高时,电阻将增大;石墨、碳等当温度升高时,电阻则减小;至于康铜及锰铜等合金受温度的影响极小,电阻比较稳定。

(2) 电感:当变化的电流通过线圈时,线圈中会产生感应电动势来阻止电流的变化,这种性质称为线圈的电感,用字母 L 表示。电感的常用单位是 H 、 mH 和 μH ,其间关系为: $1 H = 10^3 mH$; $1 mH = 10^3 \mu H$ 。

由于感应电动势阻止电流的变化,当交流电流流经线圈时还会遇到另一种阻力,这种阻力为感抗,用 X_L 表示,单位是 Ω 。

(3) 电容:被绝缘介质隔离的两个导体能容纳一定量的电荷,其在一定电压的作用下容纳电荷的能力被称为电容,用 C 来表示。电容的常用单位是 F (法)、 μF (微法) 和 pF (皮法),其间关系为: $1 F = 10^6 \mu F$; $1 \mu F = 10^6 pF$ 。由于电容的作用,当交流电流流经电容器时也会遇到另一种阻力,这种阻力称为容抗,用 X_C 表示,单位是 Ω 。

感抗和容抗统称为电抗,用 X 表示,单位为 Ω 。在串联电路中,电抗等于感抗和容抗的差值。交流电流通过具有电阻、电感、电容的电路时,电阻和电抗都有阻碍电流通过的作用,这种阻力称为阻抗,用字母 Z 表示,单位为 Ω 。也就是说,阻抗包含电阻和电抗,可按公式 $Z =$

$\sqrt{R^2 + X^2}$ 计算。

二、欧姆定律和电路的连接

在直流电路中,电压、电流、电阻是最基本的物理量。欧姆定律是反映电路中电压、电流和电阻之间关系的定律,是电路基本定律之一,在工程上应用极为广泛。

1. 部分电路的欧姆定律

图 1-2(a) 所示,电路图是闭合电路中一段电阻电路,在这段电路中不含电动势,则仅有电阻,所以称为一段电阻电路。实验证明,当导体温度不变的情况下,通过导体的电流与加在导体两端的电压成正比,而与其电阻成反比,这个结论叫做部分电路的欧姆定律,即

$$I = U/R$$

式中 I ——流经电路的电流, A;

U ——电路上的电压, V;

R ——电路的电阻, Ω 。

2. 全电路的欧姆定律

包含电源的闭合电路称为全电路。在实际工作中,常会遇到以直流发电机或蓄电池等作电源供给负载的电路,如图 1-2(b) 所示,是由一台直流发电机供给负载的简单电路,这种电路是由内电路和外电路所组成的全电路。

实验证明,在只有一个电源的无分支闭合电路中,电流的大小与电源的电动势成正比,而与内外电路电阻之和($r_0 + R$)成反比,这一结论叫做全电路的欧姆定律。如下式所示

$$I = E/(r_0 + R)$$

从欧姆定律可知,在电路中如果电压保持不变,电阻越小则电流越大;而电阻越大则电流越小。

(1) 当电源两端开路(开关断开,电阻趋近无穷大)时,电流几乎为零,这种电路状态称为开路或断中,电源端电压在数值上等于电源的电动势;

(2) 当 R 逐渐减小时,电路中的电流及内阻上的电压降会随着增大,而端电压则会随着减小;

(3) 当电阻趋近于零($R=0$)时,电源的端电压等于零,电流达到最大值,且比正常值大许多倍,这种电路状态称为短路。

3. 串联、并联和混联电路

串、并、混联电路是电路的基本构成方式。串、并、混联电路的计算方法适用于直流电路,也适用于交流电路。由于有阻抗角的影响,交流电路的计算须为矢量计算。

(1) 串联电路

串联电路是把几个阻抗或电源等一个一个地依次连接起来,使电流只有一条通路。也就是说,凡是将电气设备首尾顺次相连的连接方式即串联。串联电路有以下特点:

① 流过各串联元件的电流相同;

② 串联电路的总电压等于各个阻抗上的电压的矢量和;

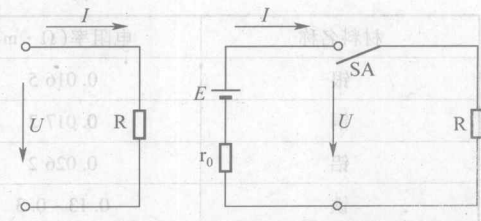


图 1-2 部分电路的欧姆定律

③ 串联电路的总阻抗等于各串联阻抗的矢量和。

在串联电路中,电阻、电感、电容的计算如下。

① 电阻串联:总电阻等于各串联电阻之和,即

$$\Sigma R = R_1 + R_2 + \dots$$

总电压等于各个电阻上的分电压之和,即

$$\Sigma U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots = IR_1 + IR_2 + IR_3 + \dots$$

由此可见,当串联的电阻越多,总电阻值会越大,而串接的电阻越大,其分电压也越大,利用电阻的串联,可达到电路分压的目的。

② 电感串联:总电感等于各串联电感之和,即

$$\Sigma L = L_1 + L_2 + \dots$$

③ 电容串联:总电容的倒数等于各串联电容的倒数之和,即

$$\Sigma 1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots$$

(2) 并联电路

并联电路是把几个阻抗或电源并排地接在同一电压的两个节点之间,使电流同时有几条通路通过。也就是说,凡是把电气设备的首端和首端、尾端和尾端相互连接在一起的连接方式叫并联。并联电路有以下几个特点:

① 各并联支路(或说各阻抗两端)的电压相等,并等于外加电源电压;

② 电路的总电流等于各支路电流的矢量和;

③ 并联电路的总阻抗的倒数等于各支路阻抗的倒数的矢量和。

在电阻并联电路中,电阻、电感、电容的计算如下:

① 电阻并联:总电阻的倒数等于各并联支路电阻的倒数之和,即

$$\Sigma 1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots$$

总电流等于各并联支路电流之和,即

$$\Sigma I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

由此可见,当并联的电阻越多,总电阻值会越小,而支路的电阻越小,其分流电流越大,利用电阻的并联,可达到电路分流的目的。

② 电感并联:总电感的倒数等于各并联支路电感的倒数之和,即

$$\Sigma 1/L = 1/L_1 + 1/L_2 + \dots$$

③ 电容并联:总电容等于各并联支路电容之和,即

$$\Sigma C = C_1 + C_2 + \dots$$

(3) 混联电路

既有电阻串联又有电阻并联的电路称为混联电路,这种电路的计算方法如下:

① 整理化简电路:先把并联电路的电阻用等效电阻来代替,使混联电路变为串联电路,然后救出该电路的总电阻;

② 根据电路的总电压、总电阻计算出该电路的总电流;

③ 计算各部分的电压和电流等。

三、电磁感应

电磁感应现象就是电产生磁、磁产生电的现象。电磁感应技术在变压器、电动机、电度表、无线电设备等电气设备中得到了广泛的应用。

1. 电流的磁场

磁场是一种看不见的、没有不可进入性的空间。磁场的表现之一是引进场域内的磁针发生偏转和取向；表现之二是引进场域内的电流受到力的作用。磁场的强弱是用引进场域内的电流（运动电荷）所受到作用力的大小来衡量的，这一物理量叫做磁感应强度，用 B 表示，单位是 T（特斯拉）或 Wb/m^2 （韦伯/平方米）。磁场是有方向的场，磁感应强度是有方向的物理量。因为磁感应强度与磁场前进方向上某一面积的乘积叫做磁通，所以磁感应强度也叫做磁通密度。磁通用 Φ 表示，单位为 Wb （韦伯），也就是说： $B = \Phi/S$ 。

磁场可由永久磁铁产生，可由电流产生，也可由变化的电场产生。在电气设备中，最常见到的是由电流产生的磁场。电流所产生的磁场方向按右手螺旋定则确定：将右手握拳，伸开大拇指，对于流经长直导线的电流，大拇指表示电流的方向，卷曲的四指表示电流周围磁场的方向；对于流经线圈的电流，卷曲的四指表示电流的方向，大拇指表示线圈内磁场的方向。

有些材料基本上不导磁，也有材料磁导性能很好。为此，引进导磁率和磁场强度，它们与磁感应强度的关系是

式中 $B = \mu H$
 μ ——材料磁导率， H/m ；
 H ——磁场强度， A/m 。

2. 电磁感应

导线切割磁场时，导线中将产生感应电动势。感应电动势的大小为

式中 $e = Blv$
 e ——感应电动势，V；
 B ——磁感应强度，T；
 l ——导体长度，m；
 v ——垂直磁场的切割速度， m/s 。

当线圈范围内的磁通发生变化时，线圈中也将产生感应电动势。感应电动势与磁通变化的速率成正比，其大小为

式中 $e = N \Delta \Phi / \Delta t$
 N ——线圈匝数；
 t ——时间，s；

$\Delta \Phi$ —— Δt 时间内磁通的变化量， Wb 。

如有闭合回路，导线或线圈中的感应电动势将产生感应电流。感应电流所产生的磁场总是阻碍其周围磁场变化的，这一规律叫做楞次定律。楞次定律可用于确定感应电动势的方向。导线中感应电动势的方向亦可由右手定则确定：平伸右手，拇指与并拢的其他四指成 90° ，磁场穿过手心，拇指指向切割方向，则并拢的四指表示感应电流的方向。

3. 载导体受到的磁场力

载导体在磁场中将受到磁场力的作用，力的大小与磁感应强度、流经导体的电流、导体的长度成正比，即

$$F = BIL$$

式中 F ——导体受到的作用力，N；

B ——磁感应强度，T；

I ——流经导体的电流，A；

L ——导体长度, m 。

载流导体所受到作用力的方向可由左手定则确定:平伸左手,拇指与并拢的其他四指成 90° , 磁场穿过手心, 并拢的四指指向导体内电流的方向, 则拇指表示导体受力的方向。载流导体所受作用力的方向总是从磁通密度大的一方指向磁通密度小的一方。例如, 线圈流过电流时所受磁场力的方向总是由里向外的; 平行载流导线之间, 当电流方向相同时磁场力的方向是向里的, 而当电流方向相反时磁场力的方向是向外的。

四、正弦交流电路

1. 正弦交流电路的基本概念

(1) 正弦交流电: 大小和方向都随时间按正弦曲线的规律发生周期性变化的电动势、电压和电流分别称为交变电动势、电压和电流, 通称正弦交流电, 简称交流电。也就是说正弦交流电的特点是“电流和电压的大小、方向随时间按正弦函数的规律变化”。

(2) 交流电路: 在交流电作用下的电路称为交流电路。

(3) 交流电的优点: 比直流电输送方便、价格便宜, 交流电机的结构也较直流电动机简单, 而且成本较低、维护方便, 所以在工业生产和日常生活中获得广泛的应用。

2. 交流电的产生

交流电是由交流发电机产生的。交流发电机的原理如图 1-3 所示。

固定的 N 极和 S 极 (称为定子) 之间, 装有可以转动的圆柱形铁芯, 铁芯上绕有线圈。线圈两端头分别接有集电环, 集电环固定在转轴上且与转轴绝缘, 每个集电环都与一个电刷接触, 电刷不动, 当转子旋转时, 转子线圈切割磁力线而产生感应电动势, 集电环随转轴一起利用电刷和集电环的滑动接触, 将线圈中的感应电动势引到负载上, 形成供电线路。

磁极形状呈马鞍形, 磁感应强度从中性面开始按正弦规律分布, 转子在外力的作用下以 n 的转速旋转, 线圈有效边长度为 L , 匝数为 N , 以中性面为计时起点, 则线圈中产生的电动势为

$$e = 2NB_m \sin(360tn/60) = E_m \sin(\omega t)$$

可见, 从电刷 A、B 端获得了正弦电动势为 e 。 e 与时间 t 的关系见图 1-3(c) 所示的波形。由以上可知, 正弦交流电动势是应用电磁感应的原理产生出来的。

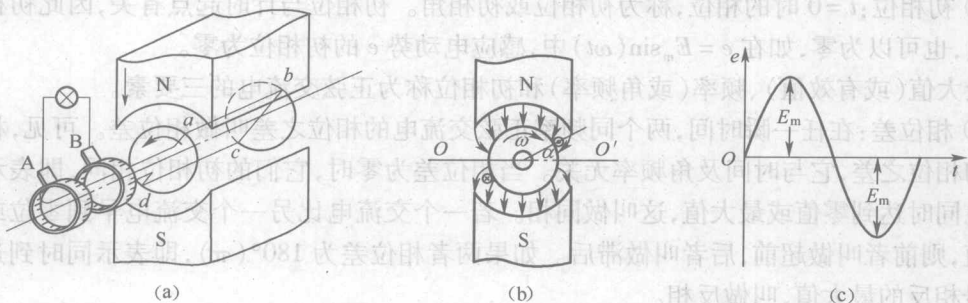


图 1-3 交流发电机原理图

3. 交流电的基本物理量

(1) 瞬时值、最大值和有效值

① 瞬时值: 在交流电路中, 交流电在每一瞬时的电动势、电压和电流的数值叫做电动势、电压和电流的瞬时值, 分别用字母 e 、 u 和 i 表示。

② 最大值:瞬时值中最大的,叫做交流电的最大值,用字母 E_m 、 U_m 、 I_m 表示。

③ 有效值:正弦交流电的大小和方向随时在变,在实用上常用与交流电的热效应相等的直流电流值来表示交变电流值的大小,这个直流电流值就称为交流电流的有效值,用大写字母 I 表示。同理可得交流电动势与交流电压的有效值分别为 E 、 U 。

④ 瞬时值和最大值的关系: $e = E_m \sin(\omega t)$ 。

⑤ 有效值和最大值的关系:正弦交流电的有效值等于最大值的 $1/\sqrt{2}$,即

$$I = 0.707 I_m \quad U = 0.707 U_m \quad E = 0.707 E_m$$

(2) 周期、频率和角频率

周期、频率和角频率都是反映交流电重复变化快慢的物理量。

① 周期:交流电每交变一次(或一周)所需的时间叫做周期,用字母 T 表示。其单位为秒,表示为 s。

② 频率:每秒内交流电交变的周期数或次数叫做频率,用字母 f 表示。其单位名称为赫[兹],表示为 Hz。

③ 角频率:又称角速度,是单位时间内变化的电角度,用字母 ω 表示,单位为 rad/s。

④ 周期、频率和角频率之间的关系

从周期和频率的定义可知,周期和频率为倒数关系,即

$$T = 1/f \quad \text{或} \quad f = 1/T$$

从角频率定义可知,导线旋转一周,角度变化 2π 弧度,所需时间为一周期 T ,即周期、频率和角频率之间的关系为

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f$$

我国的工频交流电,频率为 50 Hz,即每秒变化 50 个周期,其周期为 0.02 s,角频率为 314 rad/s。

(3) 相位、初相位和相位差

① 相位:反映正弦量变化的进程的量,它确定正弦量每一瞬时间的状态, $\omega t + \varphi$ 称为相位角,简称相位。其中, $(\omega t + \varphi)$ 及 ωt 是表示正弦交流电瞬时变化的一个量,称为相位或相角,不同的相位对应不同的瞬时值。

② 初相位: $t = 0$ 时的相位,称为初相位或初相角。初相位与计时起点有关,因此初相位可正可负,也可以为零,如在 $e = E_m \sin(\omega t)$ 中,感应电动势 e 的初相位为零。

最大值(或有效值)、频率(或角频率)和初相位称为正弦交流电的三要素。

③ 相位差:在任一瞬时间,两个同频率正弦交流电的相位之差叫做相位差。可见,相位差就是初相位之差,它与时间及角频率无关。当相位差为零时,它们的初相位相同,即表示两个交流电同时达到零值或最大值,这叫做同相。若一个交流电比另一个交流电早到零位或正的最大值,则前者叫做超前,后者叫做滞后。如果两者相位差为 $180^\circ(\pi)$,即表示同时到达零位或符号相反的最大值,叫做反相。

在同一个正弦交流电路中,交流电流与交流电压之间的相位差称为功率因数角,用字母 φ 表示。功率因数角的余弦 $\cos \varphi$ 称为功率因数,功率因数可按公式 $\cos \varphi = R/Z$ 计算。当交流电流与交流电压之间的相位差为零时,交流电流与交流电压同相,这时 $\cos \varphi = 1$,交流电路为纯电阻电路;当交流电压超前交流电流 $90^\circ(\pi/2)$ 时,相位差 $\pi/2$ 为,这时 $\cos \varphi = 0$,交流电路为纯电感电路;当交流电流超前交流电压 $90^\circ(\pi/2)$ 时,相位差 $\pi/2$ 为,这时 $\cos \varphi = 0$,交流电路为纯电容电路。

应当注意,只有同频率的正弦量之间,才有相位差、超前、滞后等概念。频率不同在相位上不能进行比较,并规定超前或滞后的角度数不超过 π 。

4. 交流电的表示法

(1) 解析法:用三角函数式来表达交流电随时间变化关系的方法。如 $e = E_m \sin(\omega t + \varphi)$ 。

(2) 曲线法:在直角坐标中用正弦曲线来表示交流电的方法,如图1-4(b)所示。

(3) 旋转矢量法:旋转矢量法是利用绕原点以角速度 ω 逆时针旋转的矢量来表示正弦量的方法,此矢量与 X 轴的夹角表示初相角(位),矢量的长度表示交流电的最大值或有效值,如图1-4(a)所示。

由于交流电可以用矢量来表示,使得同频率的交流电的加、减运算变得非常方便。

5. 单一参数交流电路的分析

(1) 纯电阻电路

白炽灯、电炉等可近似看做是纯电阻负载,这种负载没有储能或释能的能力,只会消耗电源能量,由它们组成的电路可以看成纯电阻电路。

在纯电阻交流电路中,加在纯电阻两端的电压与通过它的电流始终是同频率、同相位的正弦量; u 与 i 的矢量图及波形,如图1-4所示。

在纯电阻交流电路中,电压和电流的瞬时值、有效值和最大值的关系都符合欧姆定律。

设: $i = I_m \sin \omega t$,则有

$$u = R \cdot I_m \sin \omega t = U_m \sin \omega t$$

$$U = RI \quad \text{或} \quad U_m = RI_m$$

(2) 纯电感电路

铁芯线圈是电感元件,由它组成的电路可近似看成是纯电感电路。在正弦交流电路中,感抗与电感的关系可以表示为

$$X_L = 2\pi fL = \omega L$$

式中 X_L ——感抗, Ω ;

f ——电源的频率,Hz;

ω ——电源的角频率, $\omega = 2\pi f$,rad/s;

L ——线圈的电感,H。

设电流为参考正弦量,即 $i = I_m \sin \omega t$ 。

当此交变电流通过线圈时,将产生自感电动势

$e = -L \Delta i / \Delta t$,则有

$$u = U_m \sin(\omega t + \pi/2)$$

U 与 I 之间的数值关系为: $U = X_L I = \omega L I$ 或 $U_m = \omega L I_m$ 。在纯电感电路中, u 与 i 的矢量图及波形如图1-5所示。

由此可见, f 越大 X_L 也越大,而电流就越小。在电感电路中,由于电感具有阻碍交变电流变化的作用,使交流电流滞后交流电压。在纯电感的正弦交流电路中,交流电流滞后交流电压 90° ($\pi/2$),或者说交流电压超前交流电流 90° ($\pi/2$)。在直流电路中,由于 f 为零,也就是 $X_L = 0$,纯电感线圈相当短路。所以电感具有“通直流隔交流”的特性。

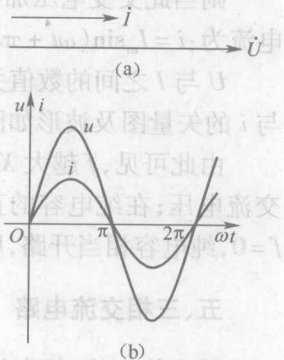


图1-4 交流电表示法

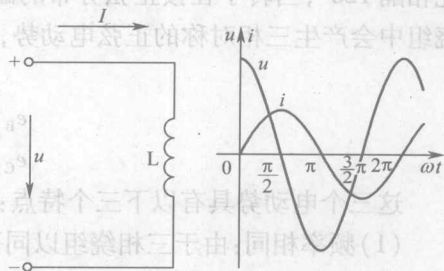


图1-5 电感电路及波形

(3) 纯电容电路

只由电容器作负载的电路,可以看成是纯电容电路。在正弦交流电路中,电容与容抗的关系为

$$X_C = 1/(2\pi fC) = 1/(\omega C)$$

式中 X_C ——电容器的容抗, Ω ;

f ——电源的频率, Hz;

ω ——电源的角频率, $\omega = 2\pi f$, rad/s;

C ——电容器的电容, F。

设电压为参考正弦量,即

$$u = U_m \sin \omega t$$

则当此交变电压加在电容上时,流过电容器上的电流为: $i = I_m \sin(\omega t + \pi/2)$ 。

U 与 I 之间的数值关系为: $U = X_C I$ 、 $U_m = X_C I_m$ 或 $I = \omega C U$ 、 $I_m = \omega C U_m$ 。在纯电容电路中, u 与 i 的矢量图及波形如图 1-6 所示。

由此可见, f 越大 X_C 越小,而电流越大。在电容电路中,由于电容的作用,交流电流超前交流电压;在纯电容的正弦交流电路中,交流电流超前交流电压 $90^\circ (\pi/2)$ 。在直流电路中, $f=0$, 纯电容相当开路,所以电容有“通交流隔直流”的特性。

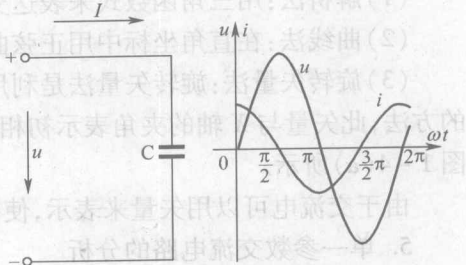


图 1-6 电容电路及波形

五、三相交流电路

最大值相等、频率相同、相位互差 120° 的三个正弦交流电动势称为三相对称电动势。由三相对称电动势所组成的电源称为三相对称交流电源,每一个电动势便是电源的一相。采用三相制供电的电路系统,称为三相交流电路。

1. 三相交流电的产生

图 1-7(a) 表示一个最简单的三相交流发电机的构造,在转子上放置着一个完全相同的绕组 AX、BY、CZ。A、B、C 代表各相绕组的首端, X、Y、Z 代表各绕组的末端。三绕组在空间彼此相隔 120° , 当转子在按正弦分布的磁场中以恒定速度旋转时,根据电磁感应原理,则在三个绕组中会产生三相对称的正弦电动势,其表达式为:

$$e_A = E_m \sin(\omega t)$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

这三个电动势具有以下三个特点:

(1) 频率相同: 由于三相绕组以同一速度切割磁力线,所以电动势的频率相同;

(2) 最大值(或有效值)相等: 由于每相绕组的几何形状、尺寸和匝数均相同,因此电动势的最大值(或有效值)彼此相等;

(3) 相位互差 120° : 由于三相绕组的空间位置互差 120° 的电角度,所以三个电动势之间存在着 120° 的相位差。

三相对称正弦电动势的波形图和相量图如图 1-7(b)(c) 所示。三相电动势或电流最大值出现的次序称为相序。在三相电源中,每相绕组的电动势称为相电动势,每相绕组两端的电压称为相电压。通常规定从始端指向末端为电压的正方向。在任何瞬时,三相对称正弦电动势之和都等于零。

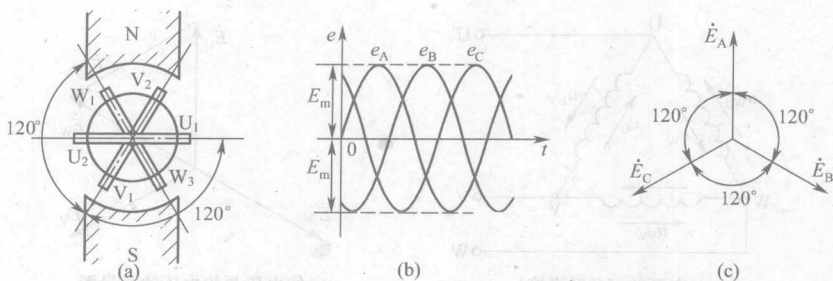


图 1-7 三相对称电动势波形及相量图

2. 三相电源的连接

三相交流电源(包括发电机和变压器)的三相绕组可根据设计接成星形或三角形向外供电。

(1) 三相电源的星形连接

把三相绕组的末端 U_2 、 V_2 、 W_2 连到一起,从三相绕组的首端 U_1 、 V_1 、 W_1 引出连接负载的导线,如图 1-8(a)所示,称为星形连接。三相绕组末端的结点称为电源的中性点,以字母 N 表示其引出的导线称为中性线,又称零线。每相引出的导线称为相线,俗称火线。有中性线的三相供电方式称为三相四线制,不引出中性线的三相供电方式称为三相三线制。

相线与中性线间的电压称为相电压,其瞬时值和有效值分别用 u_U 、 u_V 、 u_W 和 U_U 、 U_V 、 U_W 表示。任意两相线间的电压称为线电压,其瞬时值和有效值分别用 u_{UV} 、 u_{VW} 、 u_{WU} 和 U_{UV} 、 U_{VW} 、 U_{WU} 表示。用相量法分析可得:线电压超前于所对应的相电压 30° ,如 U_{UV} 超前 U_U 为 30° ;线电压是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍,即 $U_{UV} = \sqrt{3} U_U$, $U_{VW} = \sqrt{3} U_V$, $U_{WU} = \sqrt{3} U_W$ 。由于相电压是对称的,所以线电压也是对称的,如图 1-8(b)所示。采用这种接法的特点是电源向负荷提供两种电压,即相电压和线电压,相当于平常所说的 220 V 和 380 V 两种电压。

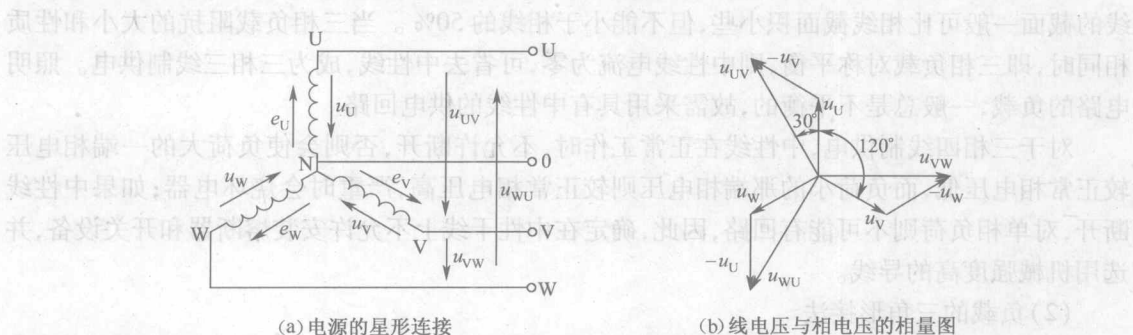


图 1-8 三相电源星形连接

(2) 三相电源的三角形连接

一相绕组的末端与相邻绕组的首端依次连接,组成一封闭的三角形,再从三相电源绕组的首端 A、B、C 引出三根端线,如图 1-9(a)所示,称为三角形连接。由于绕组本身已构成闭合回路,必须使闭合回路内的电动势之和为零。因三相绕组产生的三相对称正弦电动势,可以满足上述条件。但若有一根线头尾接错,则会引起闭合回路中的总电势为一相电势的 2 倍,会致使电源绕组烧毁,所以在连接三角形连接的三相电源绕组前,应正确判定各绕组的首末端。

采用三角形接法时,线电压等于相电压,即 $U_{UV} = U_U$, $U_{VW} = U_V$, $U_{WU} = U_W$ 。电源只能提供