

高职高专智能建筑规划教材

电气安全

陈晓平 主编

电气安全

陈晓平 主编

TM 08/085

出版社

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高职高专智能建筑规划教材

电 气 安 全

主 编 陈晓平

副主编 马占敖

参 编 李 强

主 审 刘西建



机 械 工 业 出 版 社

本书是高等专科学校和高等职业学院建筑电气专业的一门必修课教材。内容分为电气安全基础、直接接触电击防护、安全接地系统、电气设备安全、建筑物防雷保护、电气环境安全。

通过本教材的学习,了解建筑物内电气危害产生的途径和种类,理解分析电气危害的基本原理,掌握电气防护、过电压防护和雷电防护的基本方法,认识电气环境安全的重要性,为从事与电气工程有关的各项工作打下良好的基础。本书具有学以致用、拓宽专业面的特点,使电气工程的有关理论与电气安全技术相结合,侧重于应用,实用性强。

本书除了作为建筑电气专业的教材外,还可用作相近专业的选修教材,以及有关专业人员的培训教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电气安全/陈晓平主编 —北京:机械工业出版社,2004.1

高职高专智能建筑规划教材

ISBN 7-111-13473-7

I. 电... II. 陈... III. 电气设备—安全技术—高等学校:技术学校—教材 IV. TM08

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第000417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:贡克勤 周娟

责任编辑:王玉鑫 李建秀 版式设计:霍永明 责任校对:张媛

封面设计:张静 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004年1月第1版第1次印刷

787mm×1092mm $1/16$ ·15印张·367千字

0 001—4 000册

定价:21.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

智能建筑规划教材编委会

主 任	吴启迪		
副主任	徐德淦	温伯银	陈瑞藻
委 员	程大章	张公忠	王元凯
	龙惟定	王 忱	张振昭

序

20 世纪,电子技术、计算机网络技术、自动控制技术和系统工程技术获得了空前的高速发展,并渗透到各个领域,深刻地影响着人类的生产方式和生活方式,给人类带来了前所未有的方便和利益。建筑领域也未能例外,智能化建筑便是在这一背景下走进人们的生活。智能化建筑充分应用各种电子技术、计算机网络技术、自动控制技术、系统工程技术,并加以研发和整合成智能装备,为人们提供安全、便捷、舒适的工作条件和生活环境,并日益成为主导现代建筑的主流。近年来,人们不难发现,凡是按现代化、信息化运作的机构与行业,如政府、金融、商业、医疗、文教、体育、交通枢纽、法院、工厂等,他们所建造的新建筑物,都已具有不同程度的智能化。

智能化建筑市场的拓展为建筑电气工程的发展提供了宽广的天地。特别是建筑电气工程中的弱电系统,更是借助电子技术、计算机网络技术、自动控制技术和系统工程技术在智能建筑中的综合利用,使其获得了日新月异的发展。智能化建筑也为其设备制造、工程设计、工程施工、物业管理等行业创造了巨大的市场,促进了社会对智能建筑技术专业人才的急速增加。令人高兴的是众多院校顺应时代发展的要求,调整教学计划、更新课程内容,致力于培养建筑电气与智能建筑应用方向的人才,以适应国民经济高速发展需要。这正是这套建筑电气与智能建筑系列教材的出版背景。

我欣喜地发现,参加这套建筑电气与智能建筑系列教材编撰工作的有近 20 个兄弟学校,不论是主编者或是主审者,均是这个领域有突出成就的专家。因此,我深信这套系列教材将会反映各兄弟学校在为国民经济服务方面的最新研究成果。系列教材的出版还说明一个问题,时代需要协作精神,时代需要集体智慧。我借此机会感谢所有作者,是你们的辛劳为读者提供了一套好的教材。

吴启迪

写于同济园

2002 年 9 月 28 日

前 言

本书是全国“高职建筑电气技术规划”教材之一，是根据编审组通过的《电气安全》编写大纲编写的教材。

电气安全包括人身安全和电气设备安全两个方面。研究电气安全就是要研究保障这两方面安全的措施。电气安全是安全领域中与电气相关联的科学技术与管理工程。电气安全具有应用广、涉及范围宽、发展迅速等特点。

电能是现代化能源，现在已经广泛应用于国民经济的各个部门和人们日常生活中。在应用电能的过程中，就会遇到各种不同的用电安全问题。电可以造福于人类，但也可以给人类构成威胁，因此，掌握电气安全技术，正确进行电气设计，电气设备安装、运行维护，就可以避免因电气装置设计不完善或错误操作而带来的人身触电伤亡和电气设备损坏等各种电气事故。本书能使人们了解电气危害产生的途径和种类，理解电气危害的基本原理，掌握电气防护，过电压防护和雷电防护的基本方法，认识电器环境安全的重要性，为从事与电气工程有关的各项工作打下良好的基础，以帮助人们在日常的生活和生产中安全地接触电气设备，安全地工作和安全地用电。

本书的内容分为六章。其中第一、二、三章由江苏大学陈晓平编写；第四章由同济大学李强编写；第五、六章由吉林建筑工程学院马占教编写。本书由陈晓平任主编。本书承蒙长安大学建工学院刘西建副教授认真审阅。在编写过程中，得到了同济大学程大章教授、江苏大学陈志刚副教授的热情帮助和支持，在此一并表示衷心的感谢。

由于电气安全涉及面宽，涉及到多种学科，而作者水平有限，书中不妥当乃至错误之处有所难免，敬请读者批评指正。

目 录

序

前言

第一章 电气安全基础 1

第一节 电工学基础 1

第二节 电气事故 24

第三节 电流对人体的作用 28

第二章 直接接触电击防护 37

第一节 绝缘 37

第二节 加强绝缘 46

第三节 屏护和间距 49

第四节 安全电压 54

第五节 电气隔离 57

第六节 漏电保护 59

第三章 安全接地系统 67

第一节 IT 系统 67

第二节 TT 系统 78

第三节 TN 系统 81

第四节 接地装置 94

第五节 保护导体 109

第四章 电气设备安全 115

第一节 用电设备的环境条件 115

第二节 手持电动工具和移动式电气设备 123

第三节 电气照明 127

第五章 建筑物防雷保护 132

第一节 雷电基本知识 132

第二节 建筑物防雷装置 136

第三节 建筑物的防雷措施 149

第四节 防雷击电磁脉冲的建筑物措施 158

第六章 电气环境安全 168

第一节 电气火灾的预防 168

第二节 静电的产生与消除 180

第三节 电磁污染与电磁兼容 194

参考文献 231

第一章 电气安全基础

本章介绍电工学基础、电气事故种类、电流对人体的作用。通过本章学习，掌握必要的电工学基本理论和基本分析方法，理解触电事故的类型及其分布规律等用电安全的基本内容，为搞好电气安全提供必要的基础知识。

第一节 电工学基础

一、电路及其基本定律

1. 电路及其模型

为了实现电能或电信号的产生、传输、变换、加工及利用，人们将所需的电器元件或电工设备，按一定的方式联接起来，这样构成的整体称为电路，也称为电网络。实际的电器元件和设备的种类是很多的，如各种电源、电阻器、电感器、电容器、变压器、电动机等，它们中发生的物理过程是复杂的。因此，为了研究电路的特性和功能，必须进行科学的抽象，用一些模型来代替实际电器元件和设备的外部功能，这种模型即称为电路模型。

构成电路模型的元件称为理想电路元件，或称电路元件。理想电路元件只是实际电器元件和设备的理想化，它能反映出实际电器元件和设备的主要电磁性能。实际电器元件和设备的电磁性能按性质可以分为储存电场能量的、储存磁场能量的、供给电能的、消耗电能的元件。因此，电路中的参数就有：反映消耗电能的电路参数叫做电阻 R ；反映储存磁场能量的电路参数叫做电感 L ；反映储存电场能量的电路参数叫做电容 C 。由于电阻器、电感器、电容器这三种元件在任何时刻对外界都不提供净能量，因此又叫做无源元件。不是无源元件的就叫做有源元件，两种基本的有源元件是电压源和电流源。图 1-1 是电阻、电感、电容、电压源、电流源的电路模型图形符号。由这些基本模型元件构成了电路的整体模型。

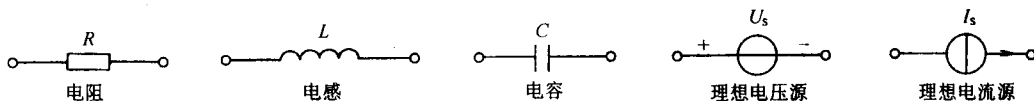


图 1-1 电路的基本模型元件

2. 电路的基本物理量

电路的作用是进行能量的转换、传递、分配和控制，为了便于分析、计算，必须引入一些物理量，以表示电路的状态及各部分的相互关系。这些物理量主要是电流、电压、电位，电动势和电功率。

(1) 电流 电荷在电场力作用下运动形成电荷流动，其流动量的大小（强弱）用电流大小来衡量。电流等于单位时间内通过导体某横截面的电量用字母 i 表示，即

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

式中 dq ——极短时间 dt 内通过导体某横截面的电荷量。

习惯上规定, 正电荷运动的方向为电流的方向。在国际单位制 (SI) 中, 电流的单位是安培, 简称安 (A)。在电路分析中, 除使用安培这个单位外, 还经常计算度量大的电流, 用千安 (kA) 表示, 度量小的电流用毫安 (mA) 或微安 (μA) 等单位表示。它们的关系如下

$$1\text{kA} = 10^3\text{A} \quad 1\text{mA} = 10^{-3}\text{A} \quad 1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A} \quad (1-2)$$

对于大小和方向都不随时间变化的恒定电流称为直流电流, 用大写字母 I 来表示。随时间变化的电流用小写字母 i 表示, 称为交变电流 (即交流电流)。以后, 不随时间变化的量, 一般用大写字母表示, 随时间变化的量, 一般用小写字母表示。直流电流 I 与电量 q 的关系为

$$I = q/t \quad (1-3)$$

式中 q ——在时间 t 内通过导体横截面的电荷量。

在简单的直流电路中, 各元件中电流的实际方向很容易判断, 因此在电路图上标明它的实际方向并不困难。但当电路比较复杂时, 某些电流的实际方向往往很难直接看出。对于交流电路, 电流的方向随时间变化, 根本无法在电路图上用符号来表示它的实际方向。为了解决这一困难, 就需要引入电流参考方向的概念。对于电流这种具有两个可能的方向的物理量, 可以任意选定其中一个方向作为参考方向, 在电路图中用一个实线箭头来表示, 而且规定: 当电流的实际方向与参考方向一致时, 电流为正值; 当电流的实际方向与参考方向相反时, 则电流为负值。这样一来, 就把电流看成是一个代数量, 它既可以是正的, 也可以是负的。一般在电路图中所标出的方向为参考方向。

(2) 电压与电位 电压是衡量电场力对电荷做功能力的物理量。电荷在电场力中能定向运动的原因是由于电场力对这些电荷做了功。如图 1-2 所示, 电路中任意两点 a 和 b 之间的电压 U_{ab} , 在数值上等于电场力将单位正电荷 q 从 a 点移动到 b 点所做的功 W , 即

$$U_{ab} = \frac{W}{q} \quad (1-4)$$

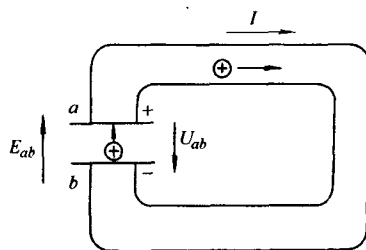


图 1-2 电荷的移动回路

在国际单位制中, 电荷的单位是库仑 (C), 功的单位是焦耳 (J), 电压的单位则为伏特, 简称伏 (V)。当电场力把 1C 的电量从一点移到另一点所做的功为 1J 时, 则该两点间的电压为 1V。计算微小电压时, 用毫伏 (mV) 或微伏 (μV) 为单位, 而计算高电压时, 用千伏 (kV) 为单位。它们的关系如下:

$$1\text{kV} = 10^3\text{V} \quad 1\text{mV} = 10^{-3}\text{V} \quad 1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V} \quad (1-5)$$

通常, 当电压随时间变化时, 则为时间的函数, 用小写字母 u 或符号 $u(t)$ 表示。若电压的大小和方向与时间无关, 则称为直流电压, 用大写字母 U 表示。

电位也叫电势, 它是表示电场中或电路中某一点性质的物理量, 并且总是相对于某一确定的参考点而言的。

电路中某点 a 的电位用 V_a 来表示, 它在数值上等于电场力将单位正电荷自该点沿任意路径移动到参考点所做的功。实际上也就是该点到参考点之间的电压, 而参考点的电位通常规定为零。

显而易见，对于电位这个概念来说，参考点的选择是至关重要的。因为

第一，电位是一个相对的物理量，不确定参考点，电位的讨论便失去了意义。

第二，在同一电路中，当选定的参考点不同时，同一点的电位也不同。

第三，在同一电路中，参考点一旦确定以后，电路中其余各点的电位也都唯一、单值地确定，这便是电位的单值性原理。

那么，如何来确定参考点呢？原则上可以任意选定，以方便为原则。在物理学中，总是选择无限远或大地为参考点。在电工学中，如果被研究的电路里有接地点，通常就选择接地点作为参考点，用符号 $\perp$ 表示。在电子设备中可将公共线与机壳相连作为电位的参考点，用符号 $\perp$ 表示。在一般原理性电路中，可选取多条导线汇集的公共点作为参考点。

需要指出的是：电压有方向性，电压的正方向规定为从高电位指向低电位。当两点间电压的实际方向或极性不易判断或随时间改变时，可以任意选定一点的极性为“+”，另一点的极性为“-”。这样任意选定的极性叫做电压的参考方向（用实线箭头来表示）。当电压的实际极性（或实际方向）和参考极性（或参考方向）一致时，电压为正值，反之电压为负值。这样一来，也就把电压看成是一个代数量，它既可以是正的，也可以是负的。电压参考方向表示如图 1-3 所示。

在图 1-3 中，规定 a 点为高电位点，标以“+”号， b 点相对于 a 点为低电位点，标以“-”号， a 、 b 两点间的电压参考方向为 a 点指向 b 点。电压的参考方向也可以采用双下标来表示，例如图 1-3 中电压的参考方向可以表示为 U_{ab} 。

(3) 电动势 电动势是描述电源内部做功本领的物理量。如图 1-2 所示，电动势在数值上等于电源的非静电力将单位正电荷 q 从其负极（低电位端） b 移动到正极（高电位端） a 所做的功 W 。电动势用符号 E 表示，则

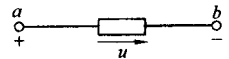


图 1-3 电压参考方向的表示

$$E_{ab} = \frac{W}{q} \quad (1-6)$$

电动势的单位与电压相同，为伏特（V），但其方向规定为从电源的低电位端（负极）指向高电位端（正极），是电位升高的方向，这一点正好与电压相反，注意加以区别。

如果电动势的大小和方向随时间变化，即为时间的函数，则用小写字母 e 或 $e(t)$ 表示。如果电动势的大小和方向与时间无关，即为常数，则此电动势称为直流电动势，以大写字母 E 表示。

应当注意，对于一个电源来说，电动势的实际方向正好和它两端电压的实际方向相反，但两者的实际极性以及大小却是完全相同的。也就是说，电动势和电压在物理意义上虽然是不一样的，但在电路图上，它们所表现的效果却是相同的，即它们都表现为两端点之间的电位差。

下面通过一个实例来说明电位的计算方法，同时也加深对电位的理解。

例 1-1 电路如图 1-4 所示， A 点电位 $U_A = -12V$ ，电流 $I = -2A$ ，电动势 $E_1 = 5V$ ， $E_2 = 3V$ 。求：

- 1) B 、 C 、 D 各点的电位。
- 2) C 、 B 两点之间的电压及电阻 R 。
- 3) 若选 A 点为参考点时，仍有电流 $I = -2A$ ，问 C 和 B 两点之间的电压为多少伏。

解 1) 各点电位就是该点对参考点的电压图 1-4 中的参考点以“⊥”符号表示。从图中可知 $E = -U_A = 12\text{V}$, 各点电位为

$$U_B = 0\text{V}$$

$$U_D = U_{DB} = E_2 = 3\text{V}$$

$$U_C = U_{CB} = U_{CA} + U_{AB} = [5 + (-12)]\text{V} = -7\text{V}$$

2) C 和 B 两点之间的电压, 即两点之间的电位差为

$$U_{CB} = U_C - U_B = (-7 - 0)\text{V} = -7\text{V}$$

$$\text{电阻 } R = \frac{U_{CD}}{I} = \frac{U_C - U_D}{I} = \frac{-7 - 3}{-2}\Omega = 5\Omega$$

3) 当选择 A 点为参考点时有

$$U_C = U_{CA} = 5\text{V}$$

$$U_B = U_{BA} = E = 12\text{V}$$

$$U_{CB} = U_C - U_B = (5 - 12)\text{V} = -7\text{V}$$

U_{CB} 计算结果与 2) 中一样, 所以电路中任意两点之间的电位差 (即电压) 与参考点的选择无关。

(4) 电功率 使用电路的目的就是为了进行电能与其他形式能量之间的转换, 因此, 经常还会用到另一重要的物理量——电功率。

如图 1-5 中, 正电荷 q 从电路中 A 点移到 B 点, 根据电压的定义很容易得到电场力所做的功

$$W = V_{AB} q \quad (1-7)$$

因为 $q = It$, 所以式 (1-7) 也可以写成

$$W = U_{AB} It \quad (1-8)$$

单位时间内电场力所做的功, 叫做电功率, 用 P 来表示, 则

$$P = \frac{W}{t} = U_{AB} I \quad (1-9)$$

在国际单位制中, 电压的单位是伏特, 电流的单位是安培, 功率的单位是瓦特, 简称瓦 (W)。

1W 功率等于每秒消耗 (或产生) 1J 的功。除了瓦单位之外, 还可以用千瓦 (kW) 或毫瓦 (mW) 作单位, 其间的关系为

$$1\text{kW} = 10^3\text{W} \quad 1\text{mW} = 10^{-3}\text{W} \quad (1-10)$$

除了电功率之外, 有时还需要计算一段时间内电路所消耗 (或产生) 的电能 (电功), 用 W 表示

$$W = Pt \quad (1-11)$$

工程上, 电功的单位不是用焦耳, 而是经常用千瓦时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$) 表示。千瓦时俗称“度”。

3. 电路的基本定律

基尔霍夫定律是进行电路分析的基本定律, 它又分为基尔霍夫电流定律 (KCL) 和基尔

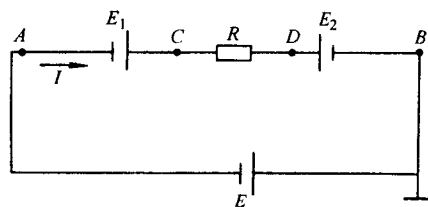


图 1-4 例 1-1 电路图

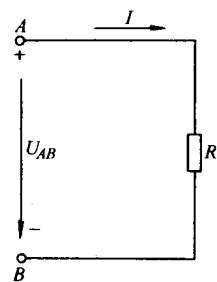


图 1-5 功率的计算

霍夫电压定律 (KVL)。前者适用于节点, 说明电路中各电流之间的约束关系; 后者适用于回路, 说明电路各部分电压之间的约束关系。

由一个或一个以上的元件串接成的分支称为支路, 支路中流过的是同一电流。三条或三条以上的支路的联接点称为节点。回路是由支路构成的闭合路径。图 1-6 所示电路中共有 6 条支路、4 个节点、7 个回路。

(1) 基尔霍夫电流定律 基尔霍夫电流定律 (KCL) 又称为基尔霍夫第一定律, 其具体内容是: 对电路中的任一节点, 在任一瞬时流入该节点电流的总和必等于流出该节点电流的总和, 即

$$\sum i_i = \sum i_o \quad (1-12)$$

式中 i_i ——流入节点的电流;

i_o ——流出节点的电流。

如果流入电流 i_i 取正号, 而流出电流 i_o 取负号, 则式 (1-12) 又可写为

$$\sum i = 0 \quad (1-13)$$

式 (1-13) 表示对任一节点、任一瞬时流入该节点电流的代数和等于零。需要注意的是: 在列写式 (1-13) 的 KCL 方程时, 是按电流的参考方向来判断电流是流入节点还是流出节点的, 式 (1-13) 中的正负号仅仅与电流的参考方向有关, 而与电流的实际方向无关。至于电流实际的流动方向, 可根据电流的参考方向以及计算出来的电流代数数量的正负号来确定。当然, 在列写式 (1-13) 的 KCL 方程时, 也可以规定流出任一节点的电流为 “+” 号, 而流入该节点的电流为 “-” 号。

例如, 在图 1-6 中, 对节点 a 应用公式 (1-12) 有

$$I_5 = I_1 + I_6 \quad (1-14)$$

而应用式 (1-13), 并规定流入节点 a 的电流为 “+” 时, KCL 方程可写为

$$-I_1 + I_5 - I_6 = 0 \quad (1-15)$$

或者规定流出节点 a 的电流为 “+” 时, 则对应的 KCL 方程为

$$I_1 - I_5 + I_6 = 0 \quad (1-16)$$

从式 (1-14)、式 (1-15)、式 (1-16) 三个方程可以看出, 它们的实质是相同的。

基尔霍夫电流定律 (KCL) 是电流连续性的表现, 是电路中的一个普遍适用的定律, 既不管电路是线性的还是非线性的, 也不管各支路上接的是什么样的元器件, 它都适用。

基尔霍夫电流定律不仅适用于电路的节点, 还可以推广应用到电路中任意假设的封闭面, 有时也称这种封闭面为广义节点。例如, 图 1-7 所示的是某电路的一部分, 用一个假想的封闭面将该部分电路包围, 则有三个支路穿过该封闭面与电路的其他部分相连。封闭面内有三个节点, 在这些节点处, 分别有:

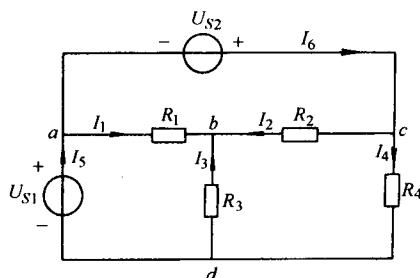


图 1-6 支路、节点与回路举例

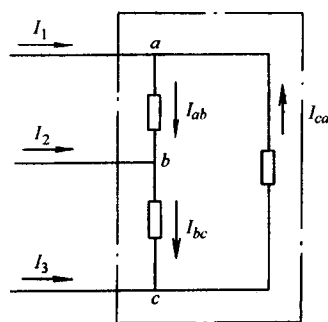


图 1-7 基尔霍夫定律推广

$$\text{节点 } a \quad I_1 - I_{ab} + I_{ca} = 0 \quad (1-17)$$

$$\text{节点 } b \quad I_2 + I_{ab} - I_{bc} = 0 \quad (1-18)$$

$$\text{节点 } c \quad I_3 + I_{bc} - I_{ca} = 0 \quad (1-19)$$

将以上三式相加得

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (1-20)$$

或

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

可见, 流过任一封闭面的电流代数和也等于零。注意在式 (1-21) 中, 显然电流不可能都是正的 (或负的), 其中至少有一个是负的 (或正的), 或者说至少有一个电流是流出 (入) 封闭面的。这表明, 流出封闭面的电流等于流入封闭面的电流。

(2) 基尔霍夫电压定律 基尔霍夫电压定律 (KVL) 又称为基尔霍夫第二定律, 其具体内容是: 在任一瞬时, 沿任一闭合回路所有支路电压的代数和恒等于零, 即

$$\sum u = 0 \quad (1-22)$$

在运用式 (1-22) 时, 首先需要任意指定一个回路绕行的方向。凡是支路电压 (或元件电压) 的参考方向与回路绕行方向一致者, 在该式中此电压前面取 “+” 号; 如果支路电压 (或元件电压) 参考方向与回路绕行方向相反者, 则前面取 “-” 号。同理, 在列写式 (1-22) 的 KVL 方程中支路电压 (或各元件电压) 时本应指它的实际方向, 但由于我们采用参考方向来分析电路, 所以在 KVL 方程中是按电压参考方向来进行列写的。

例如, 图 1-8 所示是某电路中的一个闭合回路, 绕行方向如图所示, 按图中标出的各元件电压的参考方向, 基尔霍夫电压定律可写为

$$U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} - U_{ed} - U_{fe} - U_{af} = 0 \quad (1-23)$$

或者

$$U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} = U_{af} + U_{fe} + U_{ed} \quad (1-24)$$

式 (1-24) 表明, 电路中任两节点间电压值是确定的, 不论沿那条路径, 两节点间的电压值是相同的, 所以基尔霍夫电压定律实质上是电压与路径无关这一性质的反映, 也体现了电压的单值性。

基尔霍夫电压定律是电路中任一闭合回路内各支路电压必须服从的约束, 它是与支路元件的性质无关的。因此, 不论是线性电路还是非线性电路, 它都是普遍适用的。

如果在回路中, 只有线性电阻和电压源, 结合欧姆定律, 可将式 (1-22) KVL 方程表达式换成用

电流、电阻、电压源来表达的另一种更加实用的形式。在上述例子中, 根据图 1-8 所示的各元件的电压、电流的参考方向, 有

$$\left. \begin{aligned} U_{ab} &= R_1 i_1; U_{bc} = U_{S2}; U_{cd} = R_2 i_2; \\ U_{ed} &= R_3 i_3; U_{fe} = U_{S4}; U_{af} = R_4 i_4 \end{aligned} \right\} \quad (1-25)$$

于是将式 (1-25) 代入式 (1-23) 得

$$R_1 i_1 + U_{S2} + R_2 i_2 - R_3 i_3 - U_{S4} - R_4 i_4 = 0$$

移项后得

$$R_1 i_1 + R_2 i_2 - R_3 i_3 - R_4 i_4 = -U_{S2} + U_{S4}$$

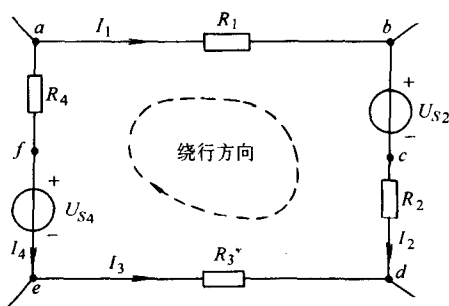


图 1-8 基尔霍夫电压定律示例

即

$$\sum R_K i_K = \sum U_{SK} \quad (1-26)$$

式(1-26)是基尔霍夫电压定律的另一种表现形式,即沿任一回路,电阻上电压降的代数和等于该回路中各电源电动势的代数和。其中,凡是支路电流的参考方向与回路绕行方向一致者, $R_K i_K$ 前面取“+”号,相反者, $R_K i_K$ 前取“-”号。电压源的电动势的方向(从“-”极指向“+”极)与回路绕行方向一致者 U_{SK} 前面取“+”,相反者, U_{SK} 前取“-”号。这也表明了在一回路中电压降等于电动势升。

基尔霍夫定律是电路的基本定律。下面举例说明它们运用的方法。

例 1-2 在图 1-9 的电路图中,已知 $U_{S1} = 3V$, $U_{S2} = 2V$, $U_{S3} = 5V$, $R_2 = 1\Omega$, $R_3 = 4\Omega$, 求各支路电流。

解 首先任意选定各支路电流的参考方向,如图 1-9 中所示。沿回路 1 的绕行方向,根据基尔霍夫电压定律列出方程

$$R_2 I_2 = U_{S1} - U_{S2}$$

$$\text{所以 } I_2 = \frac{U_{S1} - U_{S2}}{R_2} = \frac{3 - 2}{1} A = 1A$$

沿回路 2 的绕行方向,根据基尔霍夫电压定律列出方程

$$-R_3 I_3 = U_{S1} + U_{S3}$$

$$\text{得 } I_3 = \frac{U_{S1} + U_{S3}}{-R_3} = \frac{5 + 3}{-4} A = -2A$$

根据基尔霍夫电流定律,对于节点 a 有

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

$$\text{得 } I_1 = I_2 - I_3 = [1 - (-2)]A = 3A$$

本题的另外解法如下:因为两点间电压与路径无关,故有

$$U_{ab} = U_{S1} = 3V, U_{ab} = R_2 I_2 + U_{S2}, U_{ab} = -U_{S3} - R_3 I_3$$

解得

$$I_2 = \frac{U_{ab} - U_{S2}}{R_2} = \frac{3 - 2}{1} A = 1A$$

$$I_3 = \frac{-U_{ab} - U_{S3}}{R_3} = \frac{-5 - 3}{4} A = -2A$$

$$I_1 = I_2 - I_3 = [1 - (-2)]A = 3A$$

从计算结果中可以知道各支路电流的大小,也可以知道各支路电流的实际方向。电流 I_1 和 I_2 的实际方向与图中标出的参考方向相同,电流 I_3 为负值说明 I_3 的实际方向与图中参考方向相反。

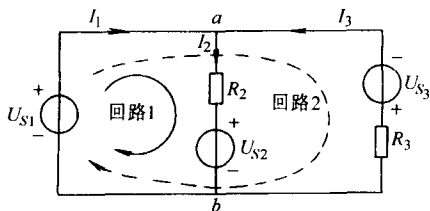


图 1-9 例 1-2 电路图

二、单相交流电路

1. 正弦交流电的三要素

单相交流电路是由一个交变电源、负载、联接导线及电路的控制、保护设备等组成。如果这个电路中的电压和电流在大小与方向都随时间按正弦规律变化,则称为正弦交流电路。由于正弦交流电易于产生、输送和使用,所以在许多领域中得到广泛的应用,建筑电气同样离不开正弦交流电。

为了形象地说明正弦交流电,用图 1-10 来表示正弦电流的波形,对应图中所示的正弦电流的数学表达式为

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (1-27)$$

任何一个正弦交流电都可以用角频率(或频率或周期)、幅值(或有效值)、初相位(或初相角)来确定。只要这三者确定了,正弦交流电也就唯一对应地确定了。所以角频率、幅值和初相位就称为确定正弦交流电的三要素。下面就以正弦电流为例来分别介绍正弦交流电的三要素。

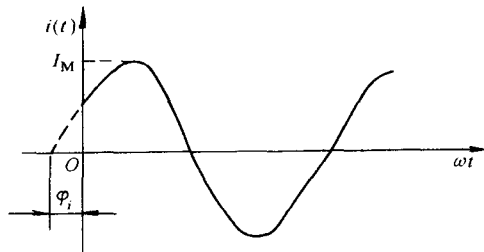


图 1-10 正弦交流电波形

(1) 角频率、频率和周期 正弦交流电的大小和方向随时间不断地变化,为了反映这种变化的快慢,通常可引入角频率、频率和周期这三个量中的某一个量来进行描述。现分述如下:

角频率——正弦交流电每秒钟所变化的弧度数称为角频率,用 ω 来表示,单位为弧度/秒 (rad/s)。

频率——正弦交流电单位时间 (1s) 内变化的次数称为频率,用 f 来表示,单位为赫兹 (Hz)。

周期——正弦交流电变化一周所需的时间称为周期,用 T 来表示,单位为秒 (s)。

根据上面的定义,可得到周期和频率的关系,即周期与频率互为倒数关系为

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{或} \quad T = \frac{1}{f} \quad (1-28)$$

我国规定工业用电频率(简称工频)是 50Hz,也就是每秒钟交流电变化 50 周,对应于工频的周期则为 0.02s。

由于正弦交流电一周内变化了 $2\pi\text{rad}$,所以角频率与频率、周期的关系为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (1-29)$$

对于 $f = 50\text{Hz}$ 的工频正弦交流电,其角频率为 $\omega = 2\pi f = 314\text{rad/s}$ 。角频率、频率、周期都是衡量一个正弦交流电变化快慢的物理量。

(2) 幅值和有效值 按正弦规律变化的正弦交流电(也称正弦量)在任一瞬间的数值,称为瞬时值,一般用小写字母表示。如正弦电流、电压的瞬时值分别用 i 及 u 来表示。瞬时值中的最大值称为幅值,也称为最大值。正弦电流、电压的最大值分别用带有下标 m 的大写字母 I_m 、 U_m 来表示。正弦量的最大值反映了正弦交流电大小变化的范围。

我们平时所说的电压高低和电流大小既不是指瞬时值,也不是指幅值,而指的是有效值。有效值是从交流量做功与直流量做功等效的观点定义的。

不论是直流电还是交流电,当它们流过电阻时都会产生热效应,我们就利用电流的热效

应来确定交流电的有效值。将直流电 I 和周期性变化的交流电 i 分别通过同一个电阻 R ，如在一个相等的时间（如一个周期）内，该电阻产生的热量相等，也就是说这个直流电流做的功和这个交流电流做的功是等效的，就把这个直流电流 I 的数值定义为该交流电流 i 的有效值。

根据上述，可得

$$\int_0^T i^2 R dt = I^2 RT \quad (1-30)$$

由式 (1-30) 得出周期交变电流的有效值为

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (1-31)$$

由式 (1-31) 可见，交流电的有效值等于电流瞬时值的二次方在一个周期内的平均值再求平方根，因此有效值又叫做方均根值。

当周期性交变电流为正弦量时，即 $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$ ，则

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [I_m \sin(\omega t + \varphi_i)]^2 dt} \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} I_m = 0.707 I_m \end{aligned} \quad (1-32)$$

同理可得

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m \quad (1-33)$$

可见，正弦量的最大值是其有效值的 $\sqrt{2}$ 倍，因此有效值可以代替最大值（幅值）作为正弦交流电的一个要素。

在实际工作中，一般所讲的交流电的大小都是指有效值。例如电动机的额定电压 380V 或 220V，以及交流电流表、电压表的读数都是指有效值。

(3) 初相位 随时间而变化的正弦量，如正弦电流可用下式表示

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (1-34)$$

其波形如图 1-10 所示。由式 (1-34) 可知，正弦电流的瞬时值除了与其幅值 I_m 有关外，还与 $(\omega t + \varphi_i)$ 有关。在不同的时刻，对应不同的电角度，从而得到不同的瞬时值，所以正弦量中的 $(\omega t + \varphi_i)$ 反映了正弦量在交变过程中瞬时值的变化过程。我们把 $(\omega t + \varphi_i)$ 称为正弦量的相位。相位又是随时间而变化的角度，所以又叫相位角。

当 $t = 0$ 时，正弦量的相位称为初相位，又称初相角。初相位用来确定正弦量的初始值 ($t = 0$ 时的值)。如式 (1-34) 中的正弦电流

$$i(0) = I_m \sin \varphi_i \quad (1-35)$$

式中 $i(0)$ —— 正弦电流的初始值。

要确定一个正弦量，必须确定其起点 ($t = 0$ 即初始点) 的值。初始值不同，到达幅值或某一特定值所需的时间也不同。例如式 (1-27) 的正弦电流和对应图 1-10 中的 φ_i 角，如何确定初相角 φ_i 的大小和正负，这与所选择的时间起点有关。通常规定正弦量由负值变化到正值经过的零点为该正弦量的零点，由正弦量零点到计时起点 (即 $t = 0$ 时间坐标的原点) 之间对应的电角度即为初相位。由于正弦量是重复出现的周期性变化量，所以一般初相位都

用绝对值小于 180° 以内的角度来表示。初相角的正、负可以这样确定：当正弦量的初始瞬时值为正时， φ_i 角为正；初始瞬时值为负时， φ_i 角为负。或从正弦零点所在位置来看，如果正弦零点在纵轴的左侧时， φ_i 角为正；在纵轴右侧时 φ_i 角为负。两种判断方法结果是一样的。

对于正弦交流电来说，频率反映其变化的快慢，幅值反映其大小变化的范围，初相位反映其计时初始的状态。用这三个量便可以把任一个正弦量随时间变化的基本特征完全描述出来，所以把这三个量称为正弦交流电的三要素。

2. 正弦量的相量表示法

前面已经指出，一个正弦量是由它的有效值、角频率和初相位三要素来决定的，它可以用三角函数式表示，也可以用波形图表示。但是如果利用其三角函数式进行各种数学运算，比如进行正弦量的加减，可以想像是异常麻烦的。借助波形图逐点将波形加减，同样很不方便，误差也较大。因此，必须寻找简捷的运算方法。

数学知识告诉我们，同频率的正弦量加减，其结果仍然是同频率的正弦量，正弦量的求导与积分，结果也是同一频率的正弦量。可以证明，在线性电路中，当某一频率的正弦电源供电时，其电路中各部分的电压与各支路的电流都是与电源同一频率的正弦量。这样，要确定线性电路中的各部分正弦电流和电压，只要确定它们的有效值和初相位两个量就行了，因为电路中所有稳态响应的频率与电源激励的频率相同。

众所周知，由两个实数决定的物理量可以用复数表示。既然线性电路所求的正弦量可以用有效值和初相位两个量来确定，因此对正弦量也可以用复数表示。所谓相量就是表示正弦量的一个特殊的复数。相量表示法就是用复数来表示正弦量的有效值和初相位。

在介绍相量法之前，首先扼要复习一下复数运算。一个复数 A 可以用几种形式表示：

(1) 代数形式

$$A = a_1 + ja_2 \quad (1-36)$$

式中 a_1 、 a_2 ——实数， a_1 称为 A 的实部， a_2 称为 A 的虚部；

$j = \sqrt{-1}$ 称为虚单位（它在数学中用 i 代表，而在电工学中， i 已用来表示电流，故改用 j 代表）。

(2) 三角形式

$$A = a \cos \varphi + ja \sin \varphi = a(\cos \varphi + j \sin \varphi) \quad (1-37)$$

式中 a ——复数 A 的模，模总是正值， $a = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}$ ；

φ —— A 的辐角， $\tan \varphi = a_2/a_1$ 。

复数在复平面上可用矢量表示，如图 1-11 所示。

(3) 指数形式

利用欧拉公式

$$e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi$$

则可将复数的三角形式变换成为指数形式，即

$$A = ae^{j\varphi} \quad (1-38)$$

(4) 极坐标形式

在电工学中，还常常把复数写成极坐标形式

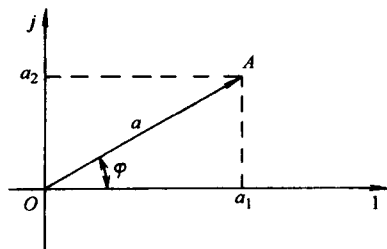


图 1-11 复数的矢量表示