

胡国文 胡乃定 编著

高等学校适用教材



民用建筑 电气 技术与设计

第二版



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

高等学校适用教材

民用建筑电气技术与设计

(第二版)

胡国文 胡乃定 编著
王长勇 朱学来

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

3

内 容 提 要

本书是在 1993 年 3 月第一版的基础上,总结提高、进行较大幅度的修改、增删而成。为了适应 21 世纪我国对工程应用型技术人才的培养要求,进一步适应高等工程本、专科专业教育的教学改革要求,本书在修订过程中,本着适当加强基础和为应用服务的指导思想,使本书更具有系统性、适用性和应用性;注意工程设计和应用能力的提高;注意最新知识的介绍;力图使本书紧跟形势发展的要求。

全书共分为 11 章。主要内容有:电路理论、电机和变压器、民用建筑常用电工测量仪表及其基本理论知识、电子技术基础、民用建筑 and 施工常用的低压电器和电气设备(如电梯、水泵、空调等)的电气自动控制、民用建筑供电与线路敷设、照明技术与设计、民用建筑弱电系统及其设计、民用建筑消防、安全用电和防雷与接地、民用建筑的总体电气设计等内容,同时还简要介绍了现代智能建筑。每章书后均附有思考题与习题,书后附有部分习题参考答案,还新增了课程设计指导与参考选题。

本书是高等院校建筑工程类、非电专业的专业基础课教材,也可作为建筑电气类和电气工程类相关专业的选修课教材,同时也可作为大专、高等职业技术教育等院校有关专业的教材或参考书以及从事工民建专业、土建和建筑电气及电气工程类专业技术人员的培训教材或参考书。

书 名:民用建筑电气技术与设计

作 者:胡国文 胡乃定 王长勇 宋学来 编著

出版者:清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者:北京国马印刷厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:33.75 字数:776 千字

版 次:2001 年 7 月第 2 版 2001 年 7 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-04532-1/TM·34

印 数:0001~5000

定 价:38.00 元

前 言

本书第一版自 1993 年 3 月出版问世以来,至今已 6 个年头。6 年来得到了广大读者的大力支持、爱护和帮助,已成为许多高校建筑工程类专业以及建筑电气和电气工程类等专业的专业基础课或选修课的首选教材。至今已连续多次印刷,累计已公开出版发行 5 万余册。

6 年来各门学科都已发生了许多新的变化。民用建筑电气技术是以电能、电气设备和电气技术为手段来创造、维持和改善人们居住或工作的生活环境的电、光、声、冷和暖环境的一门跨多学科的综合性的技术科学。随着建筑技术的迅速发展和现代化建筑的不断出现,对建筑电气技术的要求已越来越高,建筑电气所涉及的范围也愈来愈宽广,所跨的学科进一步加深加宽。它已不仅仅是单一的供配电、照明、防雷和接地,已逐步发展成为以近代物理学、电工学、机械电子学、光学、声学、自动控制、计算机技术等科学为基础的一门新兴学科。随着形势的发展,还将有许多新的要求和新的变化,正在向综合应用方向发展。

本书的第一版经过多年来的使用,随着科学技术的日新月异和建筑业的不断发展,我们深感原书有许多不足和不够完善之处。为了适应 21 世纪我国对工程应用型技术人才的培养要求,适应形势不断发展的需要,进一步适应高等工程教育和高等职业技术教育建筑类专业以及建筑电气和电气工程类等本、专科专业的教学要求。我们在第一版使用的基础上,收集了部分读者的意见,对第一版全书作了较大幅度的修改。从而使本书(第二版)进一步适应建筑工程类非电专业“电工学”课程的教改要求;进一步加强了本书的系统性、适用性和实用性,侧重设计和应用能力的提高;同时适当加强了基础理论部分、注意引进了一些最新的技术和基本理论知识。在编写过程中,我们尽可能正确处理好基础与应用之间的关系,使基础理论紧紧为应用服务;注意加强工程设计和应用能力的提高;注意最新知识的介绍。其目的是让读者通过本书的学习能获得应用现代电气技术于民用建筑中的初步工程设计能力。

本书所作的修改主要有:

1. 为了进一步体现技术的实用性,适当增加了一些实例,使图文与实例并举。同时删除了过时的器件和产品介绍。

2. 为了进一步适应本、专科专业的教学要求,本书从提高理论性、系统性和适用性的角度出发,对一些内容进行了充实和提高,对有关章节进行了较大幅度的修改,并增加了较多的新内容。

3. 从系统性角度出发,对有关章节的内容进行了压缩、调整和合并,并调整了有关章节的顺序。修改变动较大的有:二、三、四、五、六、九、十、十一等章,其他各章也都作了相应修改和增删。

4. 增加的新内容主要有:民用建筑常用电工测量仪表(第二章);数字电路技术与集成数字电路器件(第三章);新型高低压开关设备和高层建筑供电及施工现场供电(第四

章);常用建筑施工机械和生活供水水泵及空调系统的电气控制(第六章);照明负荷分析计算法(第七章);现代民用建筑的智能保安系统(第八章);自动消防系统的电气设计(第九章);建筑电气施工图的识读与绘制和现代智能化民用建筑及其电气设计简介等内容(第十一章)。

5. 为了提高本课程的学习效果,在第十一章中增加了民用建筑电气设计的一个实例,在本书末增加了课程设计指导与参考选题。

6. 对全书的习题进行了筛选,并对其中大部分思考题与习题作了解答,书后附有大部分计算题及部分思考题的答案。

全书修改后分为十一章,具体见本书目录。主要内容有:电路基础、电机电器和常用电工测量仪表及其基本理论知识、电子技术基础、建筑施工常用电气设备和民用建筑常用电气设备的电气自动控制、民用建筑供电与线路敷设、照明技术与设计、弱电系统与设计、民用建筑消防系统及设计、安全用电和防雷与接地、民用建筑的总体电气设计及课程设计与参考选题等内容。

本书主要可作为高等院校工业与民用建筑、建筑装饰等建筑工程类非电专业的教学用书,也可作为建筑电气类和电气工程类专业的选修课教材,可根据需要选用书中的部分内容,同时也可作为大专、高等职业技术教育等院校有关专业的教材或选修课教材,同时也可作为从事工民建专业土建和电气工程类专业技术人员的培训教材或参考书。

全书建议按 50~70 课时讲授,实验和课程设计可另行安排。也可根据本、专科各专业教学计划进行取舍或选讲其中部分内容。每章之末均有小结、思考题和习题,书后附有部分习题答案,供读者复习巩固使用。书中图形符号均按 GB4728 等新图标进行编写,同时书中有关地方和书末附录附有部分新旧国标图形、符号对照表,以供参考。

本书第一、三、八章由盐城工学院王长勇同志修改和编写;第二、四章由盐城工学院胡乃定同志修改和编写;第五、十章由盐城工学院朱学来同志修改和编写;第六、七、九、十一章、课程设计指导与参考选题、附录及前言由盐城工学院胡国文同志修改和编写。本书的主编是胡国文和胡乃定,胡国文同志负责全书的统稿及图形、符号的标准化审查。

本书的第一版在编写过程中,曾得到了:清华大学宗孔德教授、中国工程院院士清华大学电机系韩英铎教授的很多指导和帮助,江苏省教育厅高校教学处领导的支持;清华大学建筑设计研究院、东南大学建筑设计研究院等单位的有关同志的支持。为此,对上述各位以及提出宝贵意见的许多读者致以衷心的感谢!

在第二版编写中,我们虽作了较大努力,得到了改进和提高,但由于我们水平有限,加之此次修改时间仍显短促,书中的缺点和错误将在所难免,恳切希望使用本书的广大师生、读者朋友批评指正。

编 者

1999 年 2 月

目 录

第一章 电路基础	1
1.1 电路的基本概念	1
1.2 电路的基本定律和基本分析方法	7
1.3 正弦交流电的基本概念.....	16
1.4 单相交流电路.....	23
1.5 三相交流电路.....	35
本章小结	46
思考题与习题	48
第二章 民用建筑常用变压器和异步电动机及电工测量仪表	53
2.1 电力变压器.....	53
2.2 特殊用途的变压器.....	66
2.3 三相异步电动机.....	72
2.4 单相异步电动机	101
2.5 常用电工测量仪表及其使用方法	108
本章小结.....	119
思考题与习题.....	122
第三章 电子技术基础	127
3.1 晶体二极管及整流电路	127
3.2 稳压管及简单直流稳压电路	137
3.3 晶体三极管及其放大电路	140
3.4 直流放大电路与集成运算放大器	156
3.5 可控硅及其整流电路	164
3.6 数字电路基础	177
本章小结.....	195
思考题与习题.....	196
第四章 民用建筑供电	202
4.1 电力系统的基本概念	202
4.2 变电所和配电所	208
4.3 电力负荷的分级和计算	227
4.4 民用建筑低压供配电	239
4.5 高层民用建筑供配电	244
4.6 自备电源和事故照明	246

4.7 建筑施工现场供电	247
本章小结	251
思考题与习题	252
第五章 民用建筑的配电线路及其敷设	254
5.1 低压配电系统的配电要求和配电方式	254
5.2 低压架空线路的结构与敷设	258
5.3 电缆线路的结构与敷设	262
5.4 室内低压线路的结构与敷设	266
5.5 常用配电导线选择	270
5.6 常用低压配电箱及其选择、布置和安装	276
本章小结	281
思考题与习题	282
第六章 民用建筑常用低压电器及常用电气设备的电气控制	284
6.1 常用低压电器及其选择	284
6.2 异步电动机的继电接触典型控制环节	304
6.3 建筑施工常用电气设备的电气控制	309
6.4 电梯及其电气控制	317
6.5 供水水泵及其电气控制	321
6.6 室内空调系统及其电气控制	330
本章小结	338
思考题与习题	340
第七章 民用建筑电气照明技术与设计	342
7.1 照明技术的基本概念	342
7.2 民用建筑的照明种类和照度标准	345
7.3 常用照明电光源	347
7.4 电光源和灯具的选择、布置、安装及照明节能	352
7.5 照度计算	360
7.6 民用建筑照明供电与照明设计	369
本章小结	381
思考题与习题	381
第八章 民用建筑弱电系统与设计	383
8.1 有线通信系统和无线传呼系统及其设计	383
8.2 民用建筑有线广播系统	388
8.3 公用天线电视系统(CATV)与卫星通信及有线电视系统	389
8.4 防盗与保安系统及其应用	395
8.5 现代民用建筑中的智能保安系统	401
本章小结	404

思考题与习题	405
第九章 民用建筑消防系统及其电气设计	406
9.1 概述	406
9.2 火灾探测与消防监控及自动报警系统	408
9.3 防排烟系统与消防给水系统	413
9.4 自动喷水灭火系统及其电气控制	420
9.5 气体自动灭火系统及其电气控制	425
9.6 自动消防系统的电气设计	427
本章小结	429
思考题与习题	430
第十章 安全用电与民用建筑物的防雷保护和接地	431
10.1 触电事故与安全用电	431
10.2 电气、电子设备的接地和接零	435
10.3 民用建筑的防雷保护与接地	441
10.4 接地和接零装置的设计、安装和施工	449
本章小结	456
思考题与习题	457
第十一章 民用建筑的总体电气设计	458
11.1 民用建筑电气设计概述	458
11.2 建筑电气设计阶段与具体设计步骤及举例	461
11.3 建筑电气设计施工图的识读与绘制	474
11.4 建筑电气工程概算和预算简介	482
11.5 现代智能化民用建筑及其电气设计简介	488
本章小结	497
思考题与习题	498
课程设计指导与参考选题	500
部分思考题与习题参考答案	507
附录 I 常用电力变压器、电动机及交流接触器主要技术数据	512
附录 II 常用照明电光源技术参数	515
附录 III 常用绝缘导线允许载流量表	517
附录 IV 常用自动开关技术数据	519
附录 V 建筑电气平面图部分常用图形符号及文字符号(新旧国标对照)	521
主要参考书目	530

第一章 电路基础

本章介绍电路的基本概念、基本定律和基本分析方法,以及正弦交流电路的基本概念、单相正弦交流电路和三相正弦交流电路等内容。通过本章的学习,掌握必要的建筑电气基本理论和基本知识,为后续内容的学习打下基础,为民用建筑的电气设计提供必要的基础知识。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 电路的组成与功能

1. 电路的组成

电流的流通过径称电路。电路通常由电源、负载以及连接电源和负载的中间环节三部分组成,其形式是多种多样的。图 1-1(a)是一个最简单的电路,它由一节电池,一只灯泡,一个开关以及连接导线组成。其等效电路如图 1-1(b)所示。当开关 Q 闭合时,电路中就有电流通过,灯泡发光。

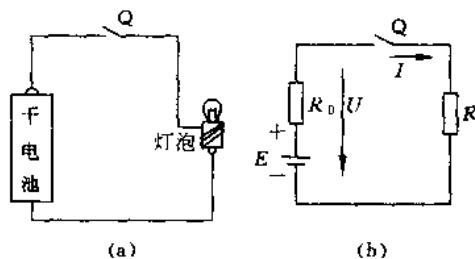


图 1-1 简单照明电路及其电路模型

电源是提供电路中所需电能的装置,它可将其他形式的能量转换为电能。电源有电池、发电机和整流电源等。

负载是电路中消耗电能的器件或设备,是将电能转换为其他形式能量的装置,如电灯、电动机、卷扬机、水泥搅拌机、电镀槽和扬声器等。

中间环节是传送、分配和控制电能的部分,主要包括将电源与负载连接成闭合回路的导线、熔断器和开关等。

一般把电源内部的电流通路称为内电路;把负载和中间环节构成的电流通路称为外电路。

2. 电路的功能

电路的功能主要有两个:一是实现电能的传送和转换。例如:发电厂的发电机把热能、原子能或其他形式的能量转换为电能;通过输电线路输送到建筑工地;再转换为机械

能(如搅拌机、打夯机等)、热能(如烘干机、加热器等)、光能(工地照明)等。二是实现信息的处理与传递。例如:钢筋混凝土构件受压时要发生变形,敏感元件把感受到的变形,变成某种相应的电信号传送给测量仪表,由该仪表测出的电量间接地反映出构件有关部位的受力情况。

1.1.2 电路模型

在电工技术中,组成电路的实际元器件种类繁多,它们的电磁性质也比较复杂。为了分析问题方便,人们将实际的电路元器件进行科学的抽象:在一定的条件下将其近似地看成理想的电路元件(或理想元件的组合),理想的电路元件具有单一的电或磁的性质,可以用简单的数学式子描述。与实际电路相对应,由理想元件所组成的电路就是电路模型。用一些规定的图形符号表示各种理想的电路元件,即可画出相应的电路模型。对于图 1-1(a)所示的简单照明电路,其电路模型如图 1-1(b)所示。

1.1.3 电路的基本物理量

1. 电流

电路中带电粒子(电子或离子)作定向运动叫做电流。电流的方向被规定为正电荷的运动方向。为了衡量电流的大小,引进了电流强度这个物理量,在工程中简称电流。电流强度是指在单位时间内通过导体某横截面的电荷量。若在极短时间 dt 内,通过导体横截面的电荷量为 dq ,则通过导体的电流为

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

上式表示电流是随时间变化的,即为时间的函数,用小写字母 i 或符号 $i(t)$ 表示。

如果电流的大小和方向都不随时间变化,即 dq/dt 为常数,则称为恒定电流,简称直流,用大写字母 I 表示,式(1-1)可改写为

$$I = \frac{q}{t} \quad (1-2)$$

式中: q 是在时间 t 内通过导体截面 S 的电荷量。在国际单位制(SI)中,电流强度的单位为安培(A),简称安。在每秒钟内通过导体横截面的电荷量为 1 库仑(C)时,则电流为 1 安培。计量微小的电流时,以毫安(mA)或微安(μA)为单位。1 安(A) = 10^3 毫安(mA), 1 毫安(mA) = 10^3 微安(μA)。

2. 电压与电位

电压是衡量电场力对电荷作功能力的物理量。电荷在电场中做定向运动的原因,是由于电场力对这些电荷的作用。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 经外电路从 a 点移到 b 点所做的功 W ,即

$$U_{ab} = \frac{W}{q} \quad (1-3)$$

在国际单位制中,电荷的单位是库仑(C),简称

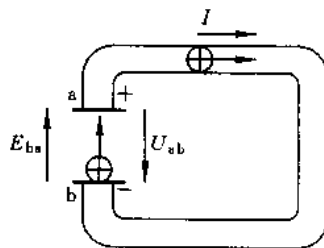


图 1-2 电荷的回路

库。功的单位是焦耳(J),电压的单位则为伏特(V),简称伏。当电场力把1库仑的电荷从一点移到另一点所做的功为1焦耳时,则该两点的电压为1伏特。计算微小电压时,则以毫伏(mV)或微伏(μV)为单位,1伏(V)= 10^3 毫伏(mV),1毫伏(mV)= 10^3 微伏(μV)。计量高电压时,则以千伏(kV)为单位,1千伏(kV)= 10^3 伏(V)。

通常,当电压随时间变化时,即电压为时间的函数,则称为交流电压。此时用小写字母 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,它是指电场中或电路中某一点 a 相对于某一参考点的电位,以符号 U_a 表示。它实际是指从该点到事先就确定好的参考点的电压,在数值上等于电场力将单位正电荷从 a 点沿任意路径移动到参考点所做的功。参考点的电位通常规定为零。这样,就可以用电位这一物理量来描述电场中某一点的性质。因此必须明确:所谓电场(或电路)中某一点的电位,意味着已选定了零电位的参考点。两点间的电压也称两点间的电位差,如 $U_{ab}=U_a-U_b$ 。电位的单位也是伏特(V)。

需要指出的是:电压有方向性,电压的方向总是规定为从高电位指向低电位。

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非静电力在电源内部将单位正电荷 q 不断从其负极(低电位端)b 移动到正极(高电位端)a 所做的功 W 。电动势以符号 E 表示,则

$$E_{ba} = \frac{W}{q} \quad (1-4)$$

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),即电位升高的方向,这一点正好与电压相反,必须加以区别。

如果电动势的大小和方向随时间变化,即为时间函数,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。规定了电压和电动势的方向以后,电路中电流方向也相应地被确定了。在电源内部(内电路),电流在非静电力作用下总是从低电位(电源负极)流向高电位(电源正极);在外电路,电流在电源电压作用下总是从高电位(电源正极)流向低电位(电源负极)。

在电路中,特别是电子线路的分析中,常常需要计算电位。在进行电位计算时,首先必须选择好参考点,即零电位点。所谓计算电路中某一点的电位,就是计算该点与参考点之间的电位差。但必须注意,电路中参考点的选择是任意的,而计算电路中任意两点之间的电位差,与参考点的选择无关。但是,一旦电路中的某参考点选定后,就不可再变动。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 如图 1-3 的电路,A 点电位 $U_A = -12\text{ V}$, 电流 $I = -2\text{ A}$, 电动势 $E_1 = 5\text{ V}$, $E_2 = 3\text{ V}$ 。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,电流仍为 $I = -2\text{ A}$, 问 C 和

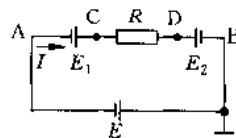


图 1-3 例 1-1 的电路

B 两点之间电压。

解 ① 各点电位即该点对参考点的电压。参考点常以接地符号“⊥”表示。电力系统中，“⊥”常指接大地；电子电路中，接地符号“⊥”常指接公共线，一般与底板、机壳相连。图中 $E=12\text{ V}$ ，各点电位为

$$U_B = 0$$

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

$$\begin{aligned} U_C = U_{CB} &= U_{AB} - U_{AC} = U_A - U_{AC} = -12 - (-E_1) \\ &= -12 - (-5) = -7\text{ V} \end{aligned}$$

② C 和 B 两点之间的电压，即两点之间电位差，为：

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

$$R = \frac{U_{CB}}{I} = \frac{U_C - U_B}{I} = \frac{-7 - 3}{-2} = 5\ \Omega$$

③ 当选择 A 点为参考点时有：

$$U_C = U_A + U_{CA} = 0 + 5 = 5\text{ V}$$

$$\begin{aligned} U_B &= U_{CA} + U_{DC} + U_{BD} = E_1 + (-IR) + (-E_2) \\ &= 5 + 2 \times 5 - 3 = 12\text{ V} \end{aligned}$$

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

在上述两种不同参考点下， U_{CB} 的计算结果是一样的，这说明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，但参考点必须按照正确的方法来选择。

1.1.4 电流和电压的正方向(参考方向)

在分析实际电路时，电流（或电压）的方向往往事先是不知道的，或者由于电流的实际方向时刻在变化（如交流电路），因而很难在电路图中用一个箭头标出电流的实际方向，于是引出了电流的正方向，或称参考方向的概念。

电流的正方向是任意假定的，在电路计算前预先用箭头表示出电流的正方向。如计算结果所得电流为正值，表明电流的实际方向和假定的正方向是一致的；如计算所得电流为负值，表明电流的实际方向和正方向恰好相反，如图 1-4 所示。由此可见，在正方向选定后，电流实际值有正、负之分。今后，除特别说明外，本书电路图上电流的方向都是指正方向（即参考方向），所选的正方向并不一定要和实际方向一致。

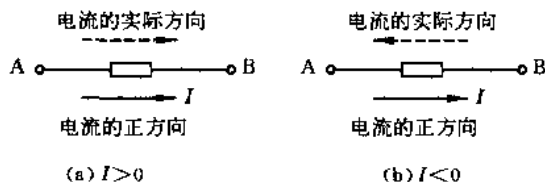


图 1-4 电流的正方向和实际方向

同样，电压也常用正方向表示。其正方向的选取方法和电流一样，也是可以任意的，不一定与实际方向一致，不同的是电压的正方向除了可用箭头表示外，还可以用极性表

示。图 1-5 中(a)和(b)都是表示电压的正方向,只是表示方式不同而已。

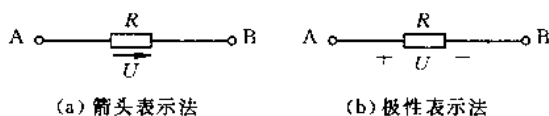


图 1-5 电压方向的两种表示法

此外,电压常用双下标表示;但电流不好用同一的双下标符号表示,因为电路图上两点之间可能有几条电路并联,若用双下标符号表示电流,就不知指这几条电路中哪一条的电流。

和电流、电压的情况一样,对于电动势也要规定参考方向,既可用箭头表示,也可用一对“+”、“-”号表示。但要注意,当用箭头表示时,电源电动势的方向规定为:在电源内部由低电位指向高电位端,即为电位升高的方向(见图 1-2)。而电压的方向规定为由高电位端指向低电位端,即电位降低的方向,不要弄错。

对一段电路或一个电阻元件而言,其电压的正方向和电流的正方向原则上可以独立地进行任意选定。图 1-6(a)中电压和电流两个量的正方向选成一致,称之为关联正方向;反之,图 1-6(b)中所选的电压正方向和电流正方向相反,称之为非关联正方向。但在分析电路时,为了方便起见,通常采用“关联正方向”的原则,也就是让电压和电流的假定正方向保持一致的原则。这样,某段电路只要标出电流或电压的一个正方向,另一个就不言而喻了。

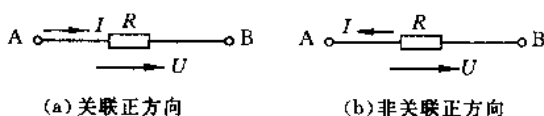


图 1-6 关联正方向和非关联正方向

1.1.5 电路的工作状态

负载、开路和短路是电路的三种状态。

1. 负载状态

负载状态是电源与负载接通成闭合电路(如图 1-7 中的刀开关 Q 合上)时的工作状态。这时由于电源电动势 E 的作用,在电路中有电流 I 通过,方向见图 1-7。电路在负载状态时,其特征可用下列各式表示:

$$I = \frac{E}{R_0 + R_L}$$

$$U = IR_L = E - IR_0$$

$$P = UI = EI - I^2 R_0$$

式中: EI ——电源产生的功率;

UI ——外电路消耗的功率;

$I^2 R_0$ ——电源内阻消耗的电功率。

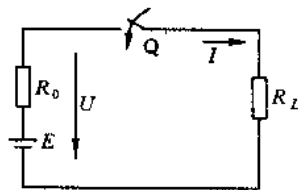


图 1-7 负载状态

上式表明负载吸收的功率(UI)等于电源产生的电功率(EI)减去电源内部的功率消耗(I^2R_0)。功率方程式说明了电路在负载状态下的能量转换情况,是符合能量守恒定律的。

电路中的电源和用电设备的电压、电流、功率等参数都有规定的值,通常称为额定值,常用下标 N 表示,如 U_N, I_N, P_N 等。使用时不能超过额定值,否则将会烧坏电源或用电设备。对应于额定值时的状态叫额定负载状态,相对于此状态的情况还有欠载状态和过载状态。

2. 开路状态

如图 1-7 中的开关 Q 断开时的状态叫开路状态。开路状态相当于电路负载电阻为无穷大,电路中的电流等于零,此时电源不向负载供给电功率,这种情况称为电源空载。电源空载时端电压 U_∞ 称为断路或开路电压。开路时的电压就等于其电源的电动势,即: $U_\infty = E$ 。

3. 短路状态

当电源的两端 a 和 b 未经负载,直接由导线接通成闭合回路的状态为短路状态,如图 1-8(a) 所示。电源短路时,外电阻极小(导线电阻近似为零),电动势几乎全部降落在内阻 R_0 上,而内阻 R_0 是很小的,所以短路电流 I_s 将很大。这时电源输出全部消耗在内阻上,电源将遭受机械与热损伤乃至损坏。

如上所述,电源短路时的关系有:

$$I = I_s = E/R_0$$

$$U = 0$$

$$P_E = I_s^2 R_0 \text{ (电源自身消耗功率)}$$

$$P = 0 \text{ (电源对外供出功率为零)}$$

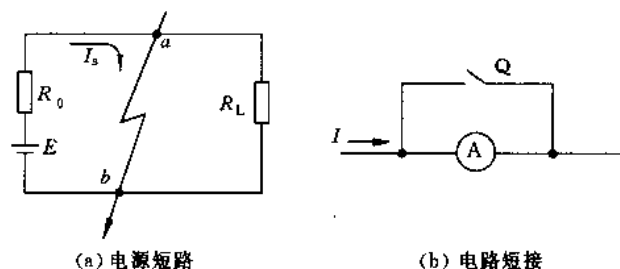


图 1-8 电路的短接

电源短路是一种严重事故,必须设法避免。电源短路往往是由于绝缘损坏或接线错误或操作不慎等造成的。为了防止短路造成的严重后果,通常在电源出口处的电路中接入熔断器或自动断路器,以便在发生短路时,能迅速将故障电路切除。

短路也可能发生在负载端或线路的任何地方,所有短路事故都应避免。但有时为了某种需要,人为地将电路中的某一段或某一个元件两端短路,如图 1-8(b) 所示。当刀开关 Q 闭合时,电流通过旁路刀开关 Q 而不经电流表。即相当于表计退出。我们把这种

短路称为有用短路。为了区分“事故短路”与“有用短路”，通常把后者称为“短接”。

1.2 电路的基本定律和基本分析方法

1.2.1 欧姆定律

通过电阻的电流与该电阻两端的电压成正比，这就是欧姆定律。它是电路的基本定律之一，应用时常分为下述几种形式。

1. 一段无源电路的欧姆定律

闭合回路中的一段电路，如果不含电动势而仅含有电阻，那么这段电路被称为一段电阻电路或一段无源电路，如图 1-9 所示。

根据在电路图所选的电压和电流正方向的不同，欧姆定律的表达式带有正号或负号。当选定的电压和电流正方向一致时，如图 1-9(a) 所示，则有

$$U = IR \quad (1-5a)$$

当选定的电压和电流正方向相反时，如图 1-9(b) 所示，则有

$$U = -IR \quad (1-5b)$$

需要注意的是：一个式子中有两套不同意义的正负号。一种是根据电压和电流的正方向确定的，如(1-5a)和(1-5b)两式中的正负号；另一种是根据电压(或电流)的实际方向与参考方向的相同与否而确定的电压(或电流)本身的正负号。如图 1-9 中“+”和“-”表示电压的实际极性，即实际上“+”端电位高，“-”端电位低，因此在图 1-9(a) 中的 U 和 I 均为正值，而在图 1-9(b) 中的 U 为正值， I 为负值。所以在应用欧姆定律进行电路计算时，要注意两套正负号的正确使用。首先按电压和电流的正方向列出式子，确定电压和电流符号前的正、负号，然后把电压和电流本身的正值或负值代进去，详见例 1-2。

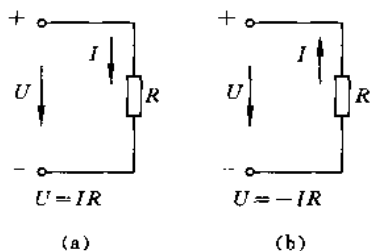


图 1-9 一段无源电路

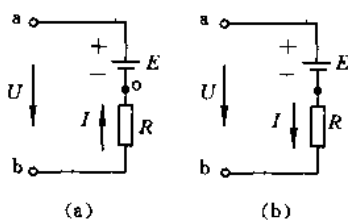


图 1-10 一段有源电路

2. 一段有源电路的欧姆定律

一段含有电源的电路称为一段有源电路，如图 1-10 所示，各电量的正方向如图中所示。根据电位的概念，由图 1-10(a) 可得： $U = U_{ao} + U_{ob} = E - IR$ ，则 $I = (E - U)/R$ 。同理，由图 1-10(b) 可得： $U = E + IR$ ，则 $I = (-E + U)/R$ 。根据这两种情况，可将一段有源电路的欧姆定律写成下列一般形式：

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

式中： U ——一段有源电路的端电压；

E ——电路内的电动势；

R ——电路内的电阻(包括电源内阻)。

电动势 E 和电压 U 前面的正、负号确定的原则是：当电动势的正方向和电压的正方向分别与电流的正方向一致时取正号，相反时则取负号。

3. 全电路欧姆定律

图 1-11 是最简单的闭合电路， R 是负载电阻， R_0 是电源内阻。根据一段电路欧姆定律可知： $U = IR = E - IR_0$ ，则有

$$I = \frac{E}{R + R_0} \quad (1-7)$$

这就是全电路欧姆定律。通常电动势 E 及内阻 R_0 可视为常数。因此，负载电阻 R 是影响电流大小的惟一因素。因为电源有内阻，所以当电流增大时，电源端电压 $U = E - IR_0$ 有所降低。

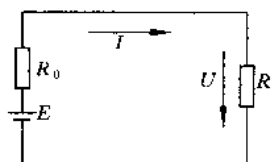


图 1-11 单回路电路

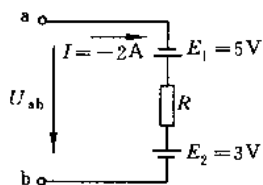


图 1-12 例 1-2 的电路

例 1-2 计算图 1-12 中电阻 R 值。已知： $U_{ab} = -12\text{ V}$ (通过本例掌握电路计算过程中两套正负号的用法)。

解 根据一段有源电路的欧姆定律一般表达式(1-6)可得

$$R = \frac{+E_1 - E_2 + U_{ab}}{I} = \frac{5 - 3 - 12}{-2} = 5\ \Omega$$

1.2.2 基尔霍夫定律

这个定律分成两个部分：基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。在阐述基尔霍夫定律之前，先介绍一下与定律有关的几个名词。

① **支路** 电路中的每一分支称为支路，一条支路流过相同电流。在图 1-13 中共有三条支路 acb ， adb ， aR_3b 。

② **节点** 电路中三条或三条以上支路相联接的点称为节点。在图 1-13 中共有两个节点： a 和 b 。

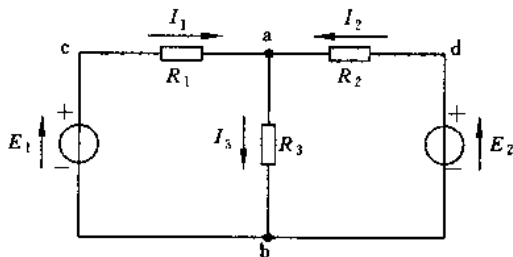


图 1-13 电路举例

③ 回路 回路是由一条或多条支路所组成的闭合回路。图 1-13 中共有三个回路：adbca, abca 和 abda。

1. 基尔霍夫电流定律(节点电流定律)

它应用于电路中的节点,描述了联接在同一节点上的各支路电流间的关系。该定律指出:在任一瞬间,流入一个节点的电流之和等于从这个节点流出的电流之和。以图 1-13 所示的电路为例,对节点 a 可以写出 $I_1 + I_2 = I_3$, 改写后得

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

$$\sum I = 0 \quad (1-8)$$

由式(1-8)得出了节点电流定律的又一表述:在任一瞬间,通过一个节点的电流的代数和恒等于零。这一结论体现了电流连续性原理,如果规定流进节点的电流取正号,则流出节点的电流为负号。

例 1-3 在图 1-14 中,已知: $I_1 = 2 \text{ A}$, $I_2 = -3 \text{ A}$, $I_3 = -4 \text{ A}$ 。求 I_4 。

解 设流向节点的电流为正,流出节点的电流为负,根据基尔霍夫电流定律得

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

$$(+2) - (-3) + (-4) - I_4 = 0$$

则

$$I_4 = 1 \text{ A}$$

由本例可见两套正负号的用法,式中 I 前的正负号是由基尔霍夫电流定律根据电流的正方向确定的,而括号内数字前的正负号则是表示电流本身数值的正负,这两者切不可混淆。

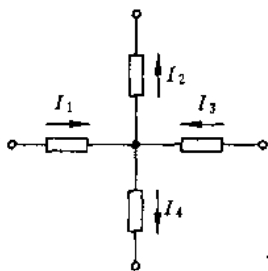


图 1-14 例 1-3 的电路

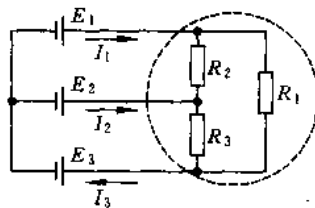


图 1-15 广义节点

基尔霍夫电流定律也可以推广到电路中的任意封闭面,可把封闭面称为广义节点。广义节点电流定律指出:在任一瞬间,通过任一封闭面的电流的代数和恒等于零。如图 1-15 所示的电路,封闭面将 R_1 , R_2 , R_3 包围在里面。根据广义节点电流定律可得:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

2. 基尔霍夫电压定律(回路电压定律)

基尔霍夫电压定律也称回路电压定律,它应用于回路中,可用它来确定回路中各段电压之间的关系。

该定律指出:从回路中任一点出发以顺时针的方向(或逆时针的方向)沿回路绕行一周,则在这个方向上的电位升之和应该等于电位降之和。以图 1-16 所示电路为例可写出

$$U_1 + U_4 = U_2 + U_3$$