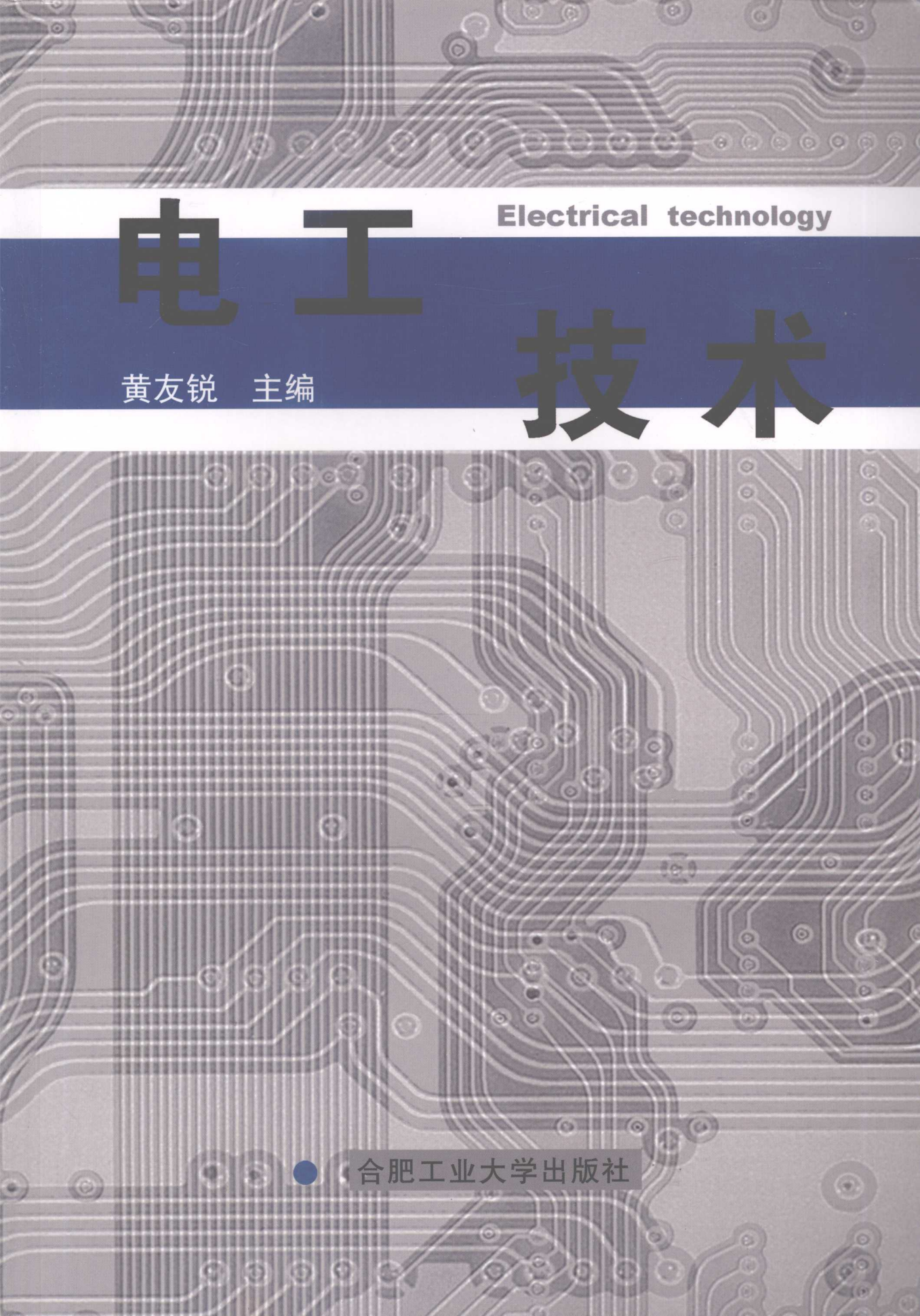


The background of the entire cover is a detailed, grayscale image of a printed circuit board (PCB). It features a complex network of fine, winding lines representing traces, and numerous circular pads of varying sizes, some of which are interconnected. The pattern is dense and covers the entire surface, with a slightly darker horizontal band across the middle where the title is located.

电工

Electrical technology

黄友锐 主编

技术

● 合肥工业大学出版社



中国工业发展报告

中国工业发展报告



电工技术

主 编 黄友锐

副主编 曹成茂 蒋传平

编 委(以姓氏笔画为序)

马德贵 周 莉 黄友锐

曹成茂 蒋传平

电工技术

责任编辑 曹成茂

主 编 黄友锐

版 次 2008年7月第1版
印 次 2008年7月第1次印刷
开 本 185毫米×105毫米 1/16
印 张 14.52

出 版 合肥工业大学出版社
地 址 合肥市屯溪路193号
邮 政 230009
电 话 总编室:0551-5603088

发 行 部:0551-5603088

网 址 www.hutpress.com.cn

E-mail hutpress@163.com

定价:33.00元

ISBN 7-81093-728-0

图书在版编目(CIP)数据

电工技术/黄友锐主编. —合肥:合肥工业大学出版社, 2008. 7

ISBN 978-7-81093-758-0

I. 电… II. 黄… III. 电工技术—高等学校—教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 083922 号

黄友锐 主编

陆向军 责任编辑

(中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 083922 号)

黄友锐 陆向军 责任编辑

陆向军 责任编辑

电 工 技 术

主 编 黄友锐

责任编辑 陆向军

出 版 合肥工业大学出版社
地 址 合肥市屯溪路 193 号
邮 编 230009
电 话 总编室:0551—2903038
发行部:0551—2903198
网 址 www.hfutpress.com.cn
E-mail press@hfutpress.com.cn

版 次 2008 年 7 月第 1 版
印 次 2008 年 7 月第 1 次印刷
开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16
印 张 14.25
字 数 340 千字
发 行 全国新华书店
印 刷 合肥市星光印务有限责任公司

ISBN 978-7-81093-758-0

定价:22.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换

内 容 简 介

本书是按照教育部电工课程教学指导委员会最新制定的“电工技术(电工学 I)课程教学基本要求”组织编写的 21 世纪课程教材,全书共分 10 章。第 1 章介绍电路的基本理论,第 2 章介绍电路的分析方法,第 3 章介绍电路的暂态分析,第 4 章介绍正弦交流电路,第 5 章介绍三相电路,第 6 章介绍变压器,第 7 章介绍异步交流电动机,第 8 章介绍继电器接触器控制系统,第 9 章介绍工业企业供电与安全用电,第 10 章介绍电工测量。本书的主要特点是内容精炼,起点高,知识新,系统性和实用性强。

本书可作为高等学校非电类各专业电工技术课程的教材,也可供有关工程技术人员阅读。

前 言

本书是按照教育部电工课程教学指导委员会最新制定的“电工技术(电工学 I)课程教学基本要求”组织编写的 21 世纪课程教材,可与李良光等编写的“电子技术”(电工学 II)一书配套使用,作为高等学校非电专业理工科《电工技术(电工学 I)》教学教材。

21 世纪的到来,推动着时代的进步,伴随着新技术的日新月异,电工技术也发生了巨大变化。为了适应新世纪信息化时代的需要,本书作者在分析和总结以往教材和教学经验的基础上,根据电工技术课程教学基本要求,对传统的教学内容进行了精选,适当地提高了教材的起点,并增加和加强了部分电工领域的新技术和新内容。本书注意到与普通物理课程的分工,避免了不必要的重复,至于部分内容,例如电路的参数、欧姆定律、磁场的基本物理量等,虽然在普通物理课程中讲过,但是为了加强理论的系统性和满足电工技术的需要,仍列入本书中,使学生在温故知新的基础上,对这些内容的理解能进一步巩固和加深。本书也注意到与后续专业课的分工,书中只研究电工技术的一般规律和常用的电气设备、元件及基本电路。此外,在内容体系上加强了知识结构的系统性和完整性,扩大了知识面,加强了应用性。从而形成了本书的主要特点:内容精炼,起点高,知识新,系统性和实用性强。

全书共 10 章,第 1 章介绍电路的基本理论,第 2 章介绍电路的分析方法,第 3 章介绍电路的暂态分析,第 4 章介绍正弦交流电路,第 5 章介绍三相电路,第 6 章介绍变压器,第 7 章介绍异步交流电动机,第 8 章介绍继电接触器控制系统,第 9 章介绍工业企业供电与安全用电,第 10 章介绍电工测量。标以“*”号的章节为选修内容。

本书由黄友锐担任主编,具体分工如下:第 1 章、第 2 章、第 3 章由周莉编写,第 4 章、第 7 章由曹成茂编写,第 5 章、第 6 章由蒋传平编写,第 8 章由马德贵编写,第 9 章、第 10 章由黄友锐编写。

本书在编辑与出版过程中,得到了许多同志的大力支持和帮助,合肥工业大学出版社为本书的出版给予了大力支持和帮助,在此表示由衷的谢意。

由于编者水平有限,书中错误和不当之处在所难免,敬请读者给予批评指正。

编 者

2008 年 7 月

目 录

第1章 电路的基本理论

1.1 电路的作用与基本组成	(1)
1.2 电路模型	(2)
1.3 电压和电流的参考方向	(3)
1.4 欧姆定律	(4)
1.5 电源有载工作、开路与短路	(5)
1.6 基尔霍夫定律	(9)
1.7 电路中电位的概念及计算	(11)
习 题	(13)

第2章 电路的分析方法

2.1 电阻串并联连接的等效变换	(16)
* 2.2 电阻星形联接与三角形联接的等效变换	(21)
2.3 电源的两种模型及其等效变换	(23)
2.4 支路电流法	(27)
2.5 结点电压法	(29)
2.6 叠加定理	(31)
2.7 戴维宁定理与诺顿定理	(34)
* 2.8 非线性电阻电路的分析	(37)
习 题	(39)

第3章 电路的暂态分析

3.1 储能元件及其等效变换	(45)
3.2 换路定则及初始值的确定	(48)
3.3 RC 电路的响应	(52)

3.4 一阶线性电路暂态分析的三要素法	(58)
3.5 微分电路与积分电路	(62)
3.6 RL 电路的响应	(65)
习 题	(70)

第 4 章 正弦交流电路

4.1 正弦电压与电流	(73)
4.2 正弦量的相量表示法	(77)
4.3 单一参数的交流电路	(79)
4.4 电阻、电感与电容元件串联的交流电路	(87)
4.5 阻抗的串联与并联	(94)
4.6 交流电路的频率特性	(97)
4.7 功率因数的提高	(108)
4.8 非正弦周期电压和电流	(111)
习 题	(115)

第 5 章 三相电路

5.1 三相交流电	(120)
5.2 负载星形联结的三相电路	(124)
5.3 负载三角形联结的三相电路	(129)
5.4 三相功率	(130)
习 题	(132)

第 6 章 变压器

6.1 磁路及其分析方法	(134)
6.2 变压器	(143)
习 题	(150)

第 7 章 异步交流电动机

7.1 三相异步电动机的构造	(152)
7.2 三相异步电动机的转动原理	(153)

7.3 三相异步电动机的电路分析	(158)
7.4 三相异步电动机的转矩与机械特性	(160)
7.5 三相异步电动机的使用	(164)
7.6 单相异步电动机	(170)
习 题	(172)

第8章 继电接触器控制系统

8.1 常用控制电器	(175)
8.2 笼型电动机直接启动的控制线路	(185)
8.3 笼型电动机正反转的控制线路	(187)
习 题	(188)

第9章 安全用电

9.1 工业企业配电	(190)
9.2 安全用电	(191)
9.3 电气设备的接地和接零	(194)
习 题	(198)

第10章 电工测量

10.1 电工测量仪表的分类	(199)
10.2 电工仪表的结构和工作原理	(201)
10.3 电流和电压的测量	(204)
10.4 万用表	(206)
10.5 电功率和电能的测量	(208)
10.6 兆欧表	(212)
* 10.7 用电桥测量电阻、电容和电感	(213)
习 题	(215)

参考文献	(217)
------------	-------

第1章 电路的基本理论

本章从电路模型入手,对描述电路的基本物理量——电压、电流和电位的概念进行了复习并讨论了电压、电流的参考方向问题。阐述了电路理论中的基本定律——基尔霍夫定律,最后对电路的各种工作状态做了简单分析。

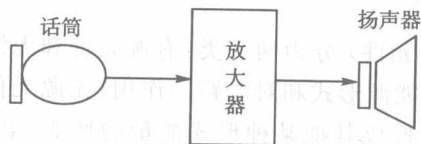
1.1 电路的作用与基本组成

人们在工作 and 生活中会遇到很多实际电路,实际电路是为了完成某种预期目的而设计、安装和运行的,由电路部件和电路器件相互连接而成的电流通路装置。简单地说:电路是电流的通路,它是为了某种需要由某些电工设备或元件按一定方式组合起来的。

电路的结构形式和所能完成的任务是多种多样的,最典型的例子是电力系统,其电路示意图如图1-1(a)所示。它的作用是实现电能的传输和转换,其中包括电源、负载和中间环节三个组成部分。



(a) 电力系统



(b) 扩音器

图 1-1 电路示意图

发电机是电源,是供应电能的设备。在发电厂内可把热能、水能或核能转换为电能。除发电机外,电池也是常用的电源。

电灯、电动机、电炉等都是负载,是取用电能的设备,它们分别把电能转换为光能、机械能和热能等。

变压器和输电线是中间环节,是连接电源和负载的部分,它起传输和分配电能的作用。

电路的另一种作用是传递和处理信号,常见的例子如扩音机,其电路示意图如图1-1(b)所示。先由话筒把语言或音乐(通常称为信息)转换为相应的电压和电流,它们就是电信号,而后通过电路传递到扬声器,把电信号还原为语言或音乐。由于由话筒输出的电信号比较微弱,不足以推动扬声器发音,因此中间还要用放大器来放大。信号的这种转换和放大,称为信号的处理。

在图1-1(b)中,话筒是输出信号的设备,称为信号源,相当于电源,但与上述的发电

机、电池这种电源不同,信号源输出的电信号(电压和电流)的变化规律是取决于所加的信息的。扬声器是接受和转换信号的设备,也就是负载。

信号传递和处理的例子是很多的,如收音机和电视机,它们的接收天线(信号源)把载有语言、音乐、图像信息的电磁波接收后转换为相应的电信号,而后通过电路把信号传递和处理(调谐、变频、检波、放大等),送到扬声器和显像管(负载),还原为原始信息。

不论电能的传输和转换或者信号的传递和处理,其中电源或信号源的电压或电流称为激励,它推动电路工作;由激励在电路各部分产生的电压和电流称为响应。所谓电路分析,就是在已知电路的结构和元件参数的条件下,讨论电路的激励与响应之间的关系。

1.2 电路模型

实际电路都是由一些按需要起不同作用的实际电路元件或器件组成,诸如发电机、变压器、电动机、电池、晶体管等,它们都是物理实体。在电源频率不高的情况下,不仅具有一定的磁场,而且释放出热能;在频率较高时,还存在一定的电场。在分析电路时,若把实际电路元件的所有电磁性质都加以考虑,是非常困难的,而且也是没有必要的。

为了便于对实际电路进行分析和用数学描述,将实际电路元件理想化,即在一定条件下突出其主要的电磁性质,忽略次要因素,把它近似地看作理想电路元件或理想电路元件的组合。例如一个白炽灯,它除了具有消耗电能的性质(电阻性)外,当通有电流时还会产生磁场,就是它还具有电感性。但电感微小,可忽略不计,可认为白炽灯是一个电阻元件。

由一些理想电路元件所组成的电路,就是实际电路的电路模型,它是对实际电路电磁性质的科学抽象和概括。

理想电路元件(以下简称电路元件)分为两大类:有源元件和无源元件。有源元件有电压源和电流源,它们反映了电路的能源形式和对电路的作用;无源元件有电阻元件、电感元件和电容元件,分别反映将电能转换成其他某种形式能量的性能。电路元件分别由相应的符号和参数来表征,如图 1-2 所示。

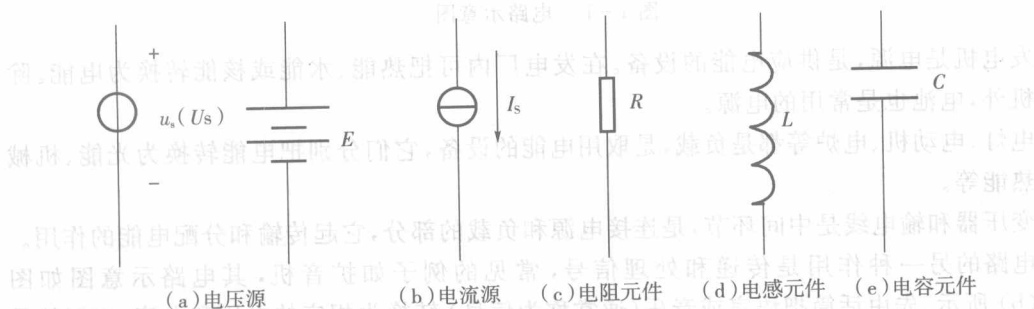


图 1-2 电路元件符号

常用的手电筒是最简单的电路,其实际电路元件有干电池、电珠、开关和筒体,电路模型如图 1-3 所示。电珠是电阻元件,其参数为电阻 R ;干电池是电源,由一个电压源 U_s 和电阻 R_s 的组合表征;筒体是连接干电池和电珠的中间环节(包括开关),其电阻忽略不计,认为

是一无电阻的理想导体。本书所分析的都是指电路模型,简称电路。在电路图中,各种电路元件用图 1-2 所示规定的图形符号表征。

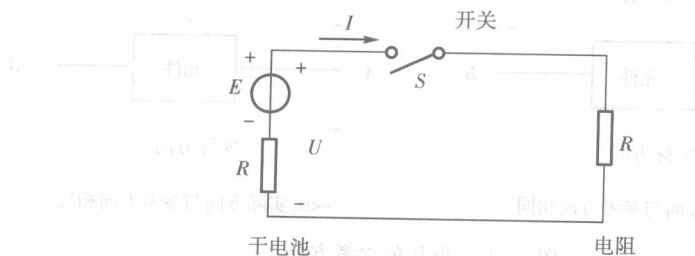


图 1-3 手电筒电路模型

1.3 电压和电流的参考方向

在电路分析中,当涉及某个元件或部分电路的电压和电流时,因为电压和电流的实际方向可能不容易从电路中判定出来,也可能是随时间变动的,此时有必要指定电压或电流的参考方向。该参考方向又称为正方向。

1.3.1 电流的参考方向

通常我们规定正电荷移动的方向或负电荷移动的相反方向为电流的方向(实际方向)。电流的方向是客观存在的。电流通过导线或元件的方向只有两种可能,选定其中一个方向作电流的方向,此即电流的“参考方向”。在参考方向下,电流的正、负可反映其电流实际流向。若 $i > 0$,表明电流实际方向与参考方向相同;若 $i < 0$,表明电流实际方向与参考方向相反。电流的参考方向可任意指定,不一定就是电流的实际方向,在电路中用箭头表示,也可用双下标表示,如 i_{AB} ,如图 1-4 所示。

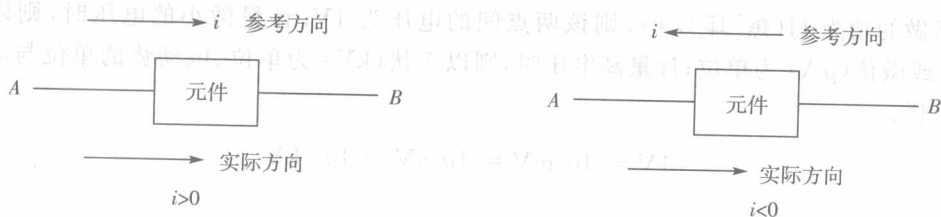


图 1-4 电流的参考方向

1.3.2 电压的参考方向

电压和电动势都是标量,但为了便于分析电路,与电流一样,我们也说它们具有方向。电压的方向规定为由高电位(“+”极性)端指向低电位(“-”极性)端,即为电位降低的方向。电源电动势的方向规定为在电源内部由低电位(“-”极性)端指向高电位(“+”极性)端,即为电位升高的方向。两点间电压实际方向亦有两种可能,可任选一种方向为电压的参考方向,在参考方向下,电压的正、负可反映其电压实际方向。若 $u > 0$,表明电压实际方向与

参考方向相同;若 $u < 0$, 表明电压实际方向与参考方向相反, 如图 1-5 所示。

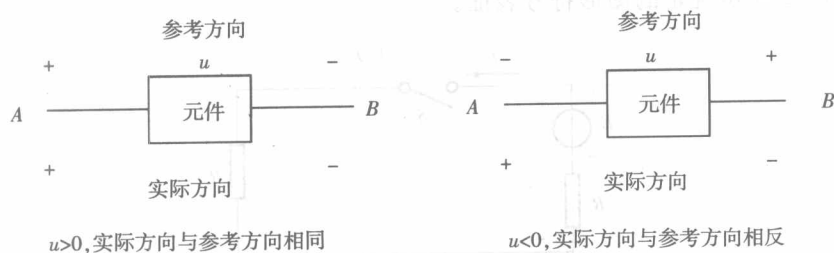


图 1-5 电压的参考方向

1.3.3 关联参考方向

当电压的参考方向指定后, 指定电流从标以电压参考方向的“+”极性端流入, 并从标“-”极性端流出, 即电流的参考方向与电压的参考方向一致, 反之为非关联参考方向, 如图 1-6 所示。

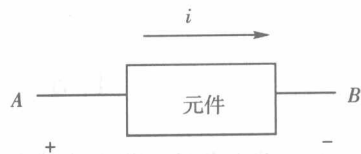


图 1-6 关联参考方向

在分析和计算电路时, 一般在电路图中先标出电压或电流的参考方向, 若已知实际方向, 则选参考方向与实际方向一致。该方向一旦选定, 在以后的电路分析和计算过程中, 不能中途更改。

我国法定计量单位是以国际单位制(SI)为基础的。在国际单位制中, 电流的单位是安培(A)。当 1s(秒)内通过导体横截面的电荷[量]为 1C(库[仑])时, 则电流为 1A。计量微小的电流时, 以毫安(mA)或微安(μ A)为单位。

$$1\text{A} = 10^3\text{mA} = 10^6\mu\text{A}$$

在国际单位制中, 电压的单位是伏[特](V)。当电场力把 1C 的电荷[量]从一点移到另一点所做的功为 1J(焦[耳])时, 则该两点间的电压为 1V。计量微小的电压时, 则以毫伏(mV)或微伏(μ V)为单位; 计量高电压时, 则以千伏(kV)为单位。电动势的单位与电压的单位一样。

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

1.4 欧姆定律

通常流过电阻的电流与电阻两端的电压成正比, 这就是欧姆定律。它是分析电路的基本定律之一。对图 1-7(a) 的电路, 欧姆定律可用下式表示

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

式中, R 即为该段电路的电阻。

由上式可见,当所加电压 U 一定时,电阻 R 愈大,则电流 I 愈小,电阻具有对电流起阻碍作用的物理性质。在国际单位制中,电阻的单位是欧[姆](Ω)。当电路两端的电压为 1V ,通过的电流为 1A 时,则该段电路的电阻为 1Ω 。计量高电阻时,则以千欧($\text{k}\Omega$)或兆欧($\text{M}\Omega$)为单位。

根据在电路图所选电压和电流的参考方向的不同,在欧姆定律的表示式中可带有正号或负号。当电压和电流的参考方向一致时[图 1-7 (a)、(d) 中],则得

$$U = IR$$

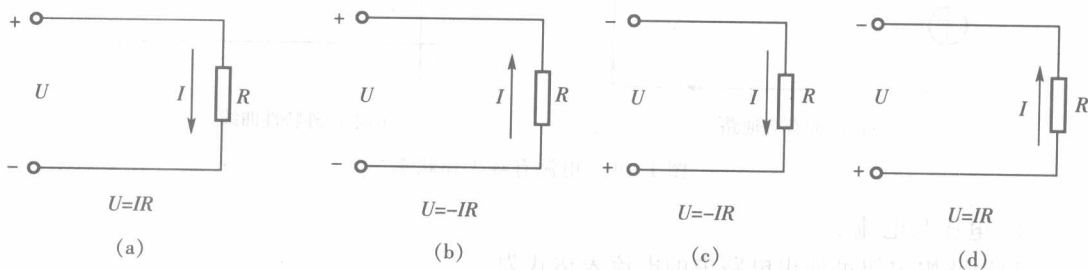


图 1-7 欧姆定律

当两者的参考方向选得相反时[图 1-7(b)、(c) 中],则得

$$U = -IR$$

【例 1-1】 应用欧姆定律对图 1-8 所示电路列出式子,并求电阻 R 。

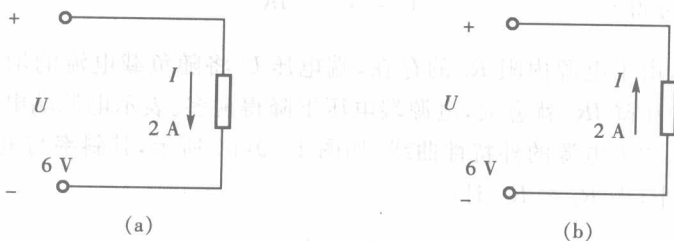


图 1-8

【解】 对图(a) 有, $U = IR$ 所以 $R = \frac{U}{I} = \frac{6}{2} = 3(\Omega)$

对图(b) 有, $U = -IR$ 所以 $R = -\frac{U}{I} = -\frac{6}{-2} = 3(\Omega)$

注意:电阻 R 恒大于或等于零。

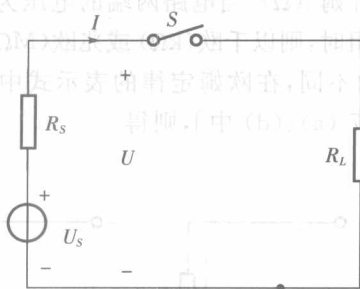
1.5 电源有载工作、开路与短路

现以最简单的直流电路(图 1-9) 为例,分别讨论电源有载工作、开路与短路时的电流、电压和功率。

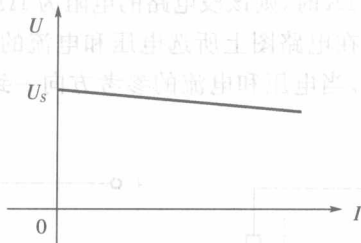
1.5.1 电源有载工作

将图 1-9 中的开关 S 合上,接通电源与负载,电路中就有了电流及能量的输送和转换,

电路的这一状态称为电源有载工作状态或通路状态。下面分别讨论几个问题。



(a) 电源有载通路



(b) 电源外特性曲线

图 1-9 电源有载工作状态

1. 电压与电流

利用欧姆定律可列出电路中的电流表达式为

$$I = \frac{U_s}{R_s + R_L} \quad (1-1)$$

负载电阻两端的电压为

$$U = IR_L$$

由以上两式可得

$$U = U_s - IR_s \quad (1-2)$$

由上式可见,由于电源内阻 R_s 的存在,端电压 U 将随负载电流的增大而降低,电流愈大,电源内阻上的压降 IR_s 就愈大,电源端电压下降得愈多。表示电源端电压 U 与输出电流 I 之间关系的曲线,称为电源的外特性曲线。如图 1-9(b) 所示,其斜率与电源的内阻有关。一般电源的内阻很小,当 $R_s \ll R_L$ 时,

则

$$U \approx U_s$$

上式表明,当负载变动时,电源端电压变化不大,说明电源带负载能力强。

2. 功率与功率守恒

将式(1-2)等式两边同乘以电流 I ,得电路的功率平衡式为

$$UI = IU_s - I^2 R_s$$

$$P = P_s - \Delta P \quad (1-3)$$

式中, $P_s = IU_s$ 是电源产生的功率; $\Delta P = I^2 R_s$ 是电源内电阻上损耗的功率; $P = UI = I^2 R_L$ 是电源输出或负载吸收的功率。

任何电路功率总是平衡的,电源所产生的功率一定等于负载所取用的功率与内阻上损耗的功率之和。因此,可用功率平衡来检验电路分析的结果是否正确。

在国际单位制中,功率的单位是瓦[特](W)或千瓦(kW)。1秒(s)内转换1焦耳(J)的能量,则功率为1瓦(W)。

3. 电路元件为电源或负载的判别

在分析电路时,经常要判别哪个电路元件是电源(或起电源的作用),哪个电路元件是负载(或作为负载使用)。具体方法如下:

当电路元件的电压、电流参考方向为关联参考方向时,若分析结果知 $P = UI > 0$,则该元件为负载;若 $P = UI < 0$,则该元件为电源。

当电路元件的电压、电流参考方向为非关联参考方向时,若分析结果知 $P = UI > 0$,则该元件为电源;若 $P = UI < 0$,则该元件为负载。

或用以下思路判断:当电压、电流的参考方向为关联参考方向时,取功率表达式为 $P = UI$,若分析结果得 $P > 0$,则说明该元件吸收功率,作负载。

若分析结果得 $P < 0$,则说明该元件吸收负功率或发出正功率,作电源。

当电压、电流的参考方向为非关联参考方向时,取功率表达式为 $P = -UI$ 。

若分析结果得 $P < 0$,则说明该元件发出功率,作电源。

若分析结果得 $P > 0$,则说明该元件吸收功率,作负载。

【例 1-2】 在图 1-10 所示电路中,已知: $I = 2\text{A}$, $U_1 = 10\text{V}$, $U_2 = 6\text{V}$, $U_3 = -4\text{V}$,问哪些元件是电源?哪些元件是负载?

【解】 由图知,元件 1 上的电压和电流为非关联参考方向,且有

$P_1 = U_1 I = 10 \times 2 = 20(\text{W}) > 0$,所以元件 1 为电源。

元件 2 上的电压和电流为关联参考方向,且有

$P_2 = U_2 I = 6 \times 2 = 12(\text{W}) > 0$,所以元件 2 为负载。

元件 3 上的电压和电流为非关联参考方向,且有

$P_3 = U_3 I = -4 \times 2 = -8(\text{W}) < 0$,所以元件 3 为负载。

可见:负载吸收的总功率 = 电源发出的总功率

【例 1-3】 在图 1-11 所示电路中, U_{S1} 、 U_{S2} 、 I 均为正值,问提供功率的电源是哪个?

【解】 由电路图中电压电流的参考方向知:

电源 U_{S1} 的功率为 $P_{U_{S1}} = -U_{S1} I < 0$,释放功率,电压源 U_{S1} 提供功率,作电源。

电源 U_{S2} 的功率为 $P_{U_{S2}} = U_{S1} I > 0$,吸收功率,电压源 U_{S2} 消耗功率,作负载。

4. 电气设备的额定值

电气设备的额定值是指导用户正确使用电气设备的技术数据。这些技术数据是根据生产过程的要求和条件的需要设计制定的,

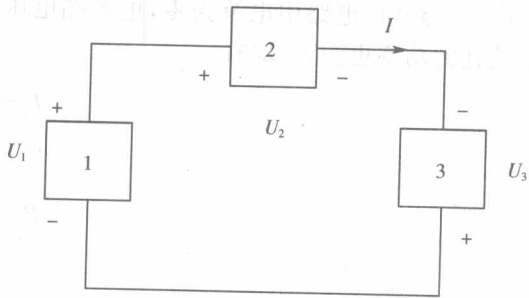


图 1-10 例 1-2 图

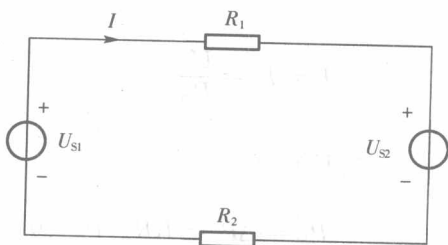


图 1-11 例 1-3 图

通常标在电气设备的铭牌上或在说明书中给出。

额定值是电气设备在正常运行时的规定使用值,它具有如下含义:

(1) 额定值反映电气设备的使用安全性;

(2) 额定值表示电气设备的使用能力。

各种电气设备的电压、电流和功率都有一个额定值,例如一只灯泡,其上数据有:220V,60W,这就是它的额定值。额定值是制造厂为了使产品能在给定的工作条件下正常运行而规定的正常允许值。这样,我们可以知道实际使用中,电气设备的电压、电流和功率不一定就等于额定值。它可有三种运行状态:当实际值高于额定值时,设备易损坏;当实际值低于额定值时,得不到正常合理的运行状况,而且也不能充分利用设备的能力。只有当电气设备实际运行值等于或大致等于额定值时,才能经济、合理、安全地工作。

电气设备的绝缘材料是根据其额定电压设计选用的。施加的电压太大,超过额定值,绝缘材料就可能被击穿。

1.5.2 电源开路状态

当图 1-9 中的开关 S 打开时,电路的工作状态称为开路状态。

电源开路时,电路中电流为零,电源端电压等于电源的电动势,电源输出功率为零,负载上消耗的功率也为零。即有

$$I = 0$$

$$U = U_s$$

$$P = 0$$

1.5.3 电源短路状态

如图 1-12 所示,当负载两端 c、d 两点由于某种原因联在一起,这种状态称为电源短路状态。电源一旦被短路,外电阻可看成零,电流很大,称为短路电流,用 I_s 表示。电源输出电压为零,电源的电动势全部降在电源的内阻上,电源所产生的电能全部消耗在其内阻上,输出功率为零。即有

$$I = I_s = \frac{U_s}{R_s}$$

$$U = 0$$

$$P_s = \Delta P = I_s^2 R_s, P = 0$$

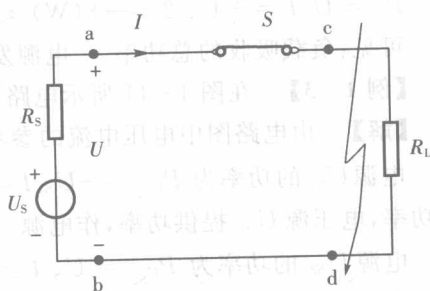


图 1-12 电源短路状态

除了为了某种目的进行短路实验外,短路通常是电力系统故障,应尽力避免。