

高等学校水利学科教学指导委员会组织编审

高等学校水利学科专业规范核心课程教材·农业水利工程

电工学与电气设备

主 编 河海大学 潘文霞
副主编 河海大学 赵晋泉
主 审 武汉大学 陈慈萱



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校水利学科教学指导委员会组织编审

高等学校水利学科专业规范核心课程教材·农业水利工程

电工学与电气设备

主 编 河海大学 潘文霞
副主编 河海大学 赵晋泉
主 审 武汉大学 陈慈萱



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

全书共分 10 章, 内容包括电路分析基础、正弦交流电路、电路的暂态过程、变压器的基本原理和运行特性、交流电机工作原理与控制特性、电力系统概述、各种电气一次设备基本原理与运行特性、电气主接线与自用电接线、电力系统继电保护的基本原理与概念、电气设备的布置等。为了适应本科教学需要, 本书重点阐述电工学与电气工程的基本概念与主要原理, 同时也兼顾了电气设备最新发展技术和应用。

本书是高等学校水利学科农业水利工程和水利水电工程等专业的通用教材, 也可作为其他相关专业的教学用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工学与电气设备/潘文霞主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2008

高等学校水利学科专业规范核心课程教材. 农业水利工程

ISBN 978-7-5084-5923-3

I. 电… II. 潘… III. ①电工学—高等学校—教材②电气设备—高等学校—教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 150662 号

书 名	高等学校水利学科专业规范核心课程教材·农业水利工程 电工学与电气设备
作 者	主 编 河海大学 潘文霞 副主编 河海大学 赵晋泉 主 审 武汉大学 陈慈萱
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
刷 印	北京市兴怀印刷厂
规 格	175mm×245mm 16 开本 17.75 印张 410 千字
版 次	2008 年 11 月第 1 版 2008 年 11 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	30.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

高等学校水利学科专业规范核心课程教材

编 审 委 员 会

主 任 姜弘道（河海大学）

副主任 王国仪（中国水利水电出版社） 谈广鸣（武汉大学）

李玉柱（清华大学） 吴胜兴（河海大学）

委 员

周孝德（西安理工大学）

刘 超（扬州大学）

任立良（河海大学）

杨金忠（武汉大学）

梅亚东（武汉大学）

姜 峰（大连理工大学）

王元战（天津大学）

张展羽（河海大学）

陈建康（四川大学）

孙明权（华北水利水电学院）

陈 楚（水利部人才资源开发中心）

李建林（三峡大学）

朝伦巴根（内蒙古农业大学）

余锡平（清华大学）

袁 鹏（四川大学）

胡 明（河海大学）

郑金海（河海大学）

康海贵（大连理工大学）

黄介生（武汉大学）

冯 平（天津大学）

侍克斌（新疆农业大学）

孙春亮（中国水利水电出版社）

秘 书 周立新（河海大学）

丛书总策划 王国仪

农业水利工程专业教材编审分委员会

主 任 杨金忠（武汉大学）

副主任 张展羽（河海大学）

刘 超（扬州大学）

委 员

黄介生（武汉大学）

杨培岭（中国农业大学）

马孝义（西北农林科技大学）

史海滨（内蒙古农业大学）

张忠学（东北农业大学）

迟道才（沈阳农业大学）

文 俊（云南农业大学）

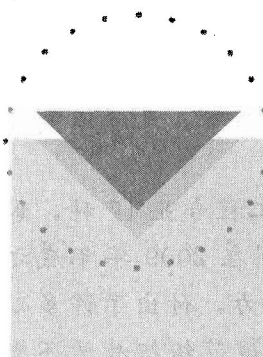
田军仓（宁夏大学）

魏新平（四川大学）

孙西欢（太原理工大学）

虎胆·吐马尔白（新疆农业大学）

杨路华（河北农业大学）



总 前 言



随着我国水利事业与高等教育事业的快速发展以及教育教学改革的不断深入,水利高等教育也得到很大的发展与提高。与1999年相比,水利学科专业的办学点增加了将近一倍,每年的招生人数增加了将近两倍。通过专业目录调整与面向新世纪的教育教学改革,在水利学科专业的适应面有很大拓宽的同时,水利学科专业的建设也面临着新形势与新任务。

在教育部高教司的领导与组织下,从2003~2005年,各学科教学指导委员会开展了本学科专业发展战略研究与制定专业规范的工作。在水利部人教司的支持下,水利学科教学指导委员会也组织课题组于2005年底完成了相关的研究工作,制定了水文与水资源工程,水利水电工程,港口、航道与海岸工程以及农业水利工程四个专业规范。这些专业规范较好地总结与体现了近些年来水利学科专业教育教学改革的成果,并能较好地适用不同地区、不同类型高校举办水利学科专业的共性需求与个性特色。为了便于各水利学科专业点参照专业规范组织教学,经高等学校水利学科教学指导委员会与中国水利水电出版社共同策划,决定组织编写出版“高等学校水利学科专业规范核心课程教材”。

核心课程是指该课程所包括的专业教育知识单元和知识点,是本专业的每个学生都必须学习、掌握的,或在一组课程中必须选择几门课程学习、掌握的,因而,核心课程教材质量对于保证水利学科各专业的教学质量具有重要的意义。为此,我们不仅提出了坚持“质量第一”的原则,还通过专业教学组讨论、提出,专家咨询组审议、遴选,相关院、系认定等步骤,对核心课程教材选题及其主编、主审和教材编写大纲进行了严格把

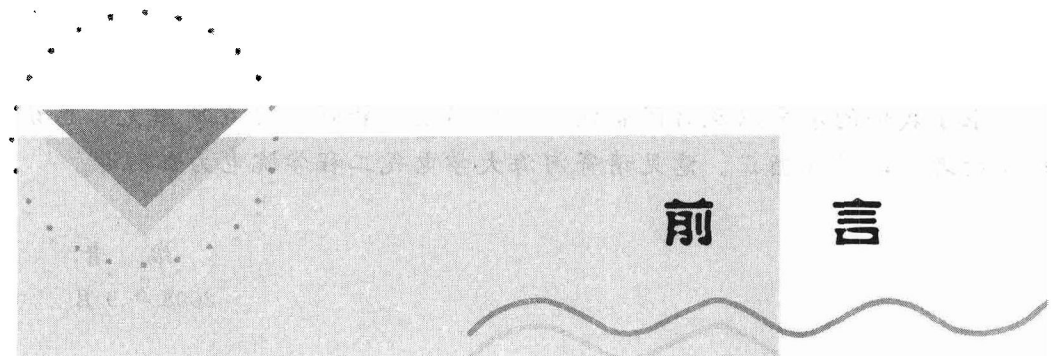
关。为了把本套教材组织好、编著好、出版好、使用好，我们还成立了高等学校水利学科专业规范核心课程教材编审委员会以及各专业教材编审分委员会，对教材编纂与使用的全过程进行组织、把关和监督。充分依靠各学科专家发挥咨询、评审、决策等作用。

本套教材第一批共规划 52 种，其中水文与水资源工程专业 17 种，水利水电工程专业 17 种，农业水利工程专业 18 种，计划在 2009 年年底之前全部出齐。尽管已有许多人为本套教材作出了许多努力，付出了许多心血，但是，由于专业规范还在修订完善之中，参照专业规范组织教学还需要通过实践不断总结提高，加之，在新形势下如何组织好教材建设还缺乏经验，因此，这套教材一定会有各种不足与缺点，恳请使用这套教材的师生提出宝贵意见。本套教材还将出版配套的立体化教材，以利于教、便于学，更希望师生们对此提出建议。

高等学校水利学科教学指导委员会

中国水利水电出版社

2008 年 4 月



前 言

本书是水利学科专业规范核心课程“十一五”系列教材之一。本书依据专业规范和基本要求编写大纲，并通过了水利学科教学指导委员会的审议、审定。本书可作为高等院校水利学科农业水利工程和水利水电工程等专业的教材，也可作为其他有关专业的教学用书。

全书分为两部分，共 10 章。第一部分为电工学部分，包括第 1~5 章；第二部分为电气设备部分，包括第 6~10 章。在电工学部分中，第 1 章介绍了电路的基本概念、原理和分析方法；第 2 章介绍了交流电路的基本概念和分析方法；第 3 章介绍了含动态元件电路的暂态过程；第 4 章介绍了变压器的基本原理与运行特性；第 5 章介绍了交流电机的基本原理及其控制特性。在电气设备部分中，第 6 章对电力系统的一些基本概念进行了介绍；第 7 章分类介绍了各种电气一次设备；第 8 章介绍了电气主接线形式和自用电接线；第 9 章以继电保护为对象对电力系统二次设备及其基本原理和概念进行了介绍；第 10 章介绍电气设备的布置，突出了水利水电工程和农田水利工程各专业学生对于水电站和泵站电气设备布置的要求。编者力图使教材内容更全面系统、先进实用，适合在校学生和自学者学习使用。

本书由河海大学电气工程学院具有相关课程教学经验的教师编写完成。其中第 1、3、6 章由赵晋泉编写，第 2、8 章由史林军编写，第 4、7、10 章由潘文霞编写，第 5、9 章由刘皓明编写。全书由潘文霞担任主编、赵晋泉担任副主编。

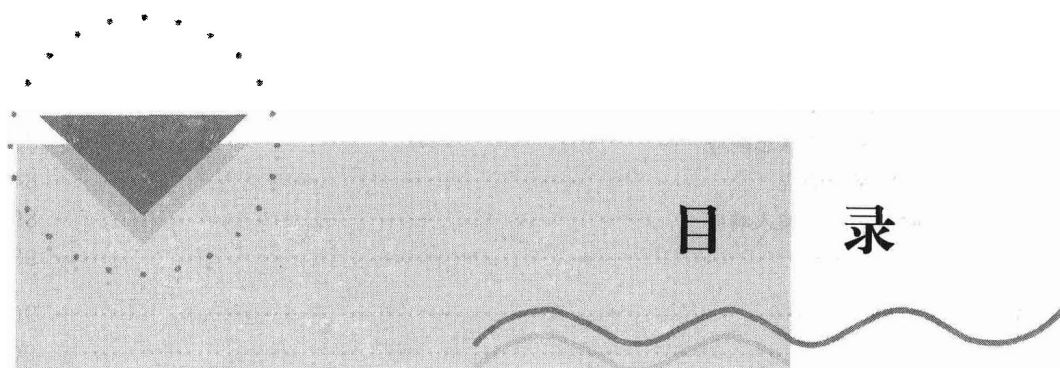
本书承武汉大学陈慈萱教授仔细审阅并提出了很多宝贵的修改意见，

谨致以衷心的感谢。在本书的编写过程中，得到了河海大学电气工程学院领导、电力工程系各位教师的大力帮助，在此表示衷心的感谢。

限于我们的水平以及时间仓促，书中不妥和错误之处在所难免，恳请广大读者予以批评指正。意见请寄河海大学电气工程学院电力工程系。

编 者

2008 年 9 月



总前言

前言

第 1 章 电路分析基础	1
1.1 电路的基本概念	1
1.2 电路中的参考方向	3
1.3 电路元件	5
1.4 电路的工作状态	10
1.5 基尔霍夫定律	12
1.6 电路的等效变换	15
1.7 支路电流法和节点电压法	25
1.8 电路的基本定理	29
1.9 非线性电阻电路	34
习题	35
第 2 章 正弦交流电路	40
2.1 正弦交流电的基本概念	40
2.2 正弦量的相量表示	43
2.3 单一元件的交流电路	45
2.4 串联交流电路	52
2.5 并联交流电路	56
2.6 复杂交流电路分析	57
2.7 交流电路的功率因数	58
2.8 电路中的谐振及其频率特性	60
2.9 三相交流电路	65
习题	71

第3章 电路的暂态过程	76
3.1 换路定则与初始值确定	76
3.2 一阶电路的零输入响应	78
3.3 一阶电路的零状态响应	81
3.4 一阶电路全响应	84
3.5 二阶电路的零输入响应	89
习题	93
第4章 变压器	96
4.1 磁路	96
4.2 变压器工作原理	99
4.3 三相变压器	104
4.4 变压器的运行	106
4.5 其他常用变压器	108
习题	109
第5章 交流电机及其控制	111
5.1 交流电机概述	111
5.2 三相异步电动机的等效电路	118
5.3 三相异步电动机的电磁转矩与工作特性	125
5.4 三相异步电动机的起动	132
5.5 三相异步电动机的制动	137
5.6 三相异步电动机的调速	140
5.7 同步发电机	144
习题	151
第6章 电力系统概述	153
6.1 电力系统基本概念	153
6.2 电力系统中性点的运行方式	158
6.3 电力系统的接线方式	159
6.4 电力系统短路	161
习题	164
第7章 电气一次设备	165
7.1 电气一次设备概述	165
7.2 高压断路器	175
7.3 隔离开关和接地开关	189
7.4 互感器	191
7.5 熔断器	196
7.6 防雷保护装置	198
习题	204

第 8 章 电气主接线及自用电接线	205
8.1 概述	205
8.2 主接线的基本形式	206
8.3 电气主接线设计	216
8.4 自用电及接线	219
习题	222
第 9 章 继电保护	223
9.1 继电保护概述	223
9.2 测量变换器	227
9.3 常用继电器	229
9.4 电网电流保护	232
9.5 发电机—变压器组保护	237
9.6 电动机保护	243
9.7 微机保护	247
9.8 厂站计算机监控	252
习题	255
第 10 章 电气设备的布置	257
10.1 配电装置概述	257
10.2 水电站电气设备的布置	265
10.3 泵站电气设备的布置	267
习题	269
参考文献	270

第 1 章

电路分析基础

电路是电工学及电气设备的基础，是继续后续章节学习的先修内容。

本章主要讨论电路的基本概念、电压和电流的定义和参考方向、三种理想电路元件及其特性、电路的等效变换、基尔霍夫定律、电路的基本定理和非线性电路等。这些内容是分析和计算电路的基础。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 实际电路

电在日常生活、工农业生产和科学研究中得到了广泛应用。在收音机、电视机、计算机、手机、录像机、通信系统和电力网络中都可以见到各种各样的电路。电路是各种元器件为某种目的，按一定方式连接而组成的整体，其基本特征是电路中存在着电流的通路。由于电的应用很广泛，所以电路的具体形式是多种多样、千变万化的。根据电路的作用，一般可将电路分为两类。一类用于实现电能的传输和转换，例如输电网络将电厂中发电机发出的电能传送到工厂、农村和千家万户的各个用电器件，将电能转换为光能、热能和机械能等。这类电路的电压较高，电流和功率较大，习惯上常称为“强电”电路。另一类用于进行电信号的传递和处理，例如电视接收天线将接收到的含有声音和图像信息的高频电视信号，通过高频传输线送到电视机中，这些信号经过选择、变频、放大和检波等处理，恢复出原来的声音和图像，在扬声器中发出声音并在显像管屏幕上呈现图像。这类电路通常电压较低，电流和功率较小，习惯上常称为“弱电”电路。

由电阻、电容、线圈、变压器、晶体管、运算放大器、导线、电池和发电机等电气器件和设备连接而成的电路，称为实际电路，如图 1-1 所示。在实际电路中，电能或电信

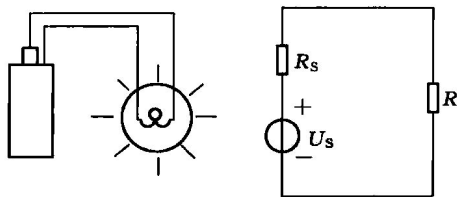


图 1-1 实际电路与电路模型

号的发生器称为电源，用电设备称为负载。电压和电流是在电源的作用下产生的，因此电源也称为激励源。由激励在电路中产生的电压和电流称为响应。有时，根据激励和响应之间的因果关系，把激励称为输入，响应称为输出。

1.1.2 理想电路元件与电路模型

一个实际元件往往呈现多种物理性质。例如一个用导线绕制的线圈，当有电流通过时不仅会产生磁通，形成磁场，而且还会发热，消耗电能。也就是说线圈不仅具有电感性质，而且具有电阻性质。此外，线圈的匝与匝之间还存在分布电容，具有电容性质。为了便于对各种实际元件进行分析和数学描述，常采用一些理想电路元件来表征其特性，称为实际元件的模型。将实际电路中的各种实际元件都由其相应的模型表示后，就构成实际电路的电路模型。也就是说，电路模型是由一些理想电路元件相互连接而构成的整体，是实际电路的一种等效表示。

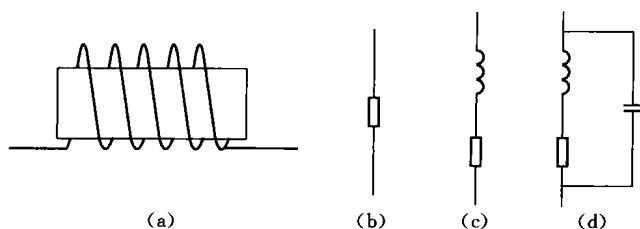


图 1-2 实际线圈与不同的理想元件模型

(a) 实际线圈；(b) 通直流时模型；(c) 通低频交流时模型；(d) 通高频交流时模型

在不同的条件下，同一实际器件可能采用不同的模型。如图 1-2 (a) 所示实际线圈，在直流情况下可以用一个电阻元件取代，忽略其电感性质和电容性质，如图 1-2 (b) 所示；在较低频率下，就要用电阻元件和电感元件的串联组合模拟，如图 1-2 (c) 所示；而在较高频率下，还需要并联一个电容元件来计及电容效应，如图 1-2 (d) 所示。模型取得恰当，对电路的分析和计算结果就与实际情况接近；模型取得不恰当，则会造成很大误差，有时甚至导致完全错误的结论。当然，如果模型取得太复杂就会增加分析的困难；反之，如果取得太简单，就可能无法反映所需求解的真实情况。

1.1.3 电流和电压

电路中带电粒子在电源作用下的运动形成电流。电流既可以是正电荷，也可以是负电荷或者两者兼有的定向运动的结果。习惯上规定正电荷移动的方向为电流的实际方向。电荷量对时间的变化率称为电流强度，简称电流，即

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

式中： i 为电流，单位是安培，记为 A； q 为电量，单位是库仑，记为 C； t 为时间，单位是秒，记为 s。

如果电流的大小和方向都不随时间变化，则称为直流电流，简称直流 (direct current，简写作 DC 或 dc)；如果电流的大小和方向都随时间作周期性变化，则称为

交流电流，简称交流（alternating current，简写作 AC 或 ac）。直流电流常用大写的 I 表示。表 1-1 列出了部分国际单位制的词头。

表 1-1 部分国际单位制词头

词头原文（法）	中文名称	符号	含义
Giga	吉	G	10^9
Mega	兆	M	10^6
Kilo	千	k	10^3
milli	毫	m	10^{-3}
micro	微	μ	10^{-6}
nano	纳	n	10^{-9}
pico	皮	p	10^{-12}

电路中的另一个重要物理量是电压，也称为电位差。电路中任意两点 a 、 b 间的电压表明了单位正电荷由 a 点转移到 b 点时所获得或失去的能量，即

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-2)$$

式中： u 为电压，单位是伏特，简称伏，记为 V； W 为电能量，单位是焦耳，记为 J。

直流电压常用 U 表示。

电工学中另一个重要概念是电位。在电路中任选一点为参考点，且设参考点的电位为零，则电路中任一点的电位就等于该点到参考点的电压。电位通常用符号 V 加下标表示，如 a 点的电位表示为 V_a ，而任意两点间的电压可以用电位差来表示，如 a 、 b 两点间的电压可表示为

$$u_{ab} = V_a - V_b \quad (1-3)$$

电位的单位与电压单位相同，也用伏特表示。电路中各点电位值随参考点的不同而不同；电路中任意两点间的电压大小与参考点的选择无关。电路中电位具有相对性而电压具有绝对性。

1.1.4 电功率和能量

在电路的分析和计算中，能量和功率的计算是十分重要的。这是因为电路在工作状况下总伴随有电能与其他形式能量的转换。此外，电气设备本身都有功率的限制，在使用时要注意。

由式 (1-2)，从 t_0 到 t 的时间内，元件吸收的电能可求得为

$$W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u dq$$

根据式 (1-1)，可得 $dq = idt$ ，代入得

$$W = \int_{t_0}^t u(\tau) i(\tau) d\tau \quad (1-4)$$

功率是能量对时间的导数，因此元件吸收的电功率为

$$p(t) = u(t) i(t) \quad (1-5)$$

式中： p 为功率，单位是瓦特，简称瓦，记为 W。

如果电压和电流是随时间变化的，那么功率也是随时间变化的。如果电压和电流不随时间变化，那么功率也不随时间变化，此时式 (1-5) 可记为：

$$P = UI$$

1.2 电路中的参考方向

在电路分析中，由于某个元件的电流或电压的实际方向可能是未知的，也可能是

随时间变动的,因此有必要预先指定电流或电压的参考方向。图1-3表示一个电路的一部分,图中矩形框表示一个二端元件,导线上标示的箭头表示电流的参考方向,它不一定是电流的实际方向,图中下边虚线箭头表示流过元件的实际电流方向。如果电流 i 的实际方向是由左到右,如图1-3(a)所示,它与参考方向一致,则电流为正值,即 $i>0$ 。如果电流 i 的实际方向是由右到左,如图1-3(b)所示,与参考方向相反,则电流为负值,即 $i<0$ 。指定参考方向后,电流数值变为代数量。

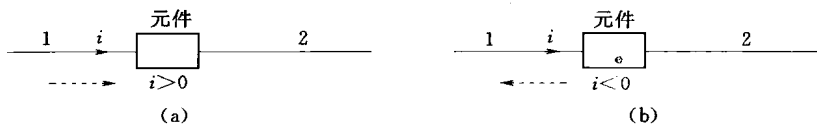


图1-3 电流的参考方向

(a) 实际方向与参考方向相同; (b) 实际方向与参考方向相反

同理,对电路两点之间的电压也可指定参考方向或参考极性。在表达两点之间的电压时,用正极性+表示高电位,负极性-表示低电位,而正极指向负极的方向就是电压的参考方向。指定电压的参考方向后,电压数值就是一个代数量。在图1-4(a)中,电压的参考方向是由A指向B,也就是假定A点的电位高于B点;如果A点的电位确实高于B点的电位,即电压的实际方向是由A到B,两者一致,则 $u>0$ 。如果实际电位是B点高于A点,则 $u<0$ 。电压的参考方向还可以用双下标来表示,如 u_{AB} 表示A与B之间的电压,其参考方向是A指向B。

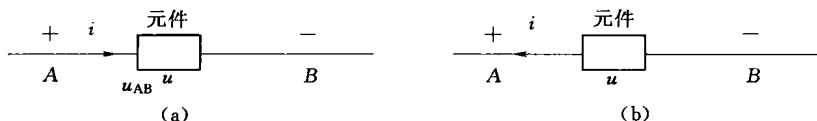


图1-4 电压的参考方向及其关联参考方向

(a) 关联参考方向; (b) 非关联参考方向

一个元件的电流或电压参考方向可以独立地任意指定。如果指定流过元件的电流的参考方向是从标以电压正极性的一端指向负极性的一端,即两者的参考方向一致,则把电流和电压这种参考方向称为关联参考方向;当两者不一致时,称为非关联参考

方向。在图1-4(a)中,电流的参考方向是由A到B,与电压的参考方向相同,是关联参考方向;在图1-4(b)中,电流的参考方向是由B到A,与电压的参考方向相反,是非关联参考方向。需要说明的是,由式(1-5)知,当一个元件采用关联参考方向时,其功率大于零表示其吸收功率,功率小于零表示其发出功率;而当它采用非关联参考方向时,其功率大于零表示其发出功

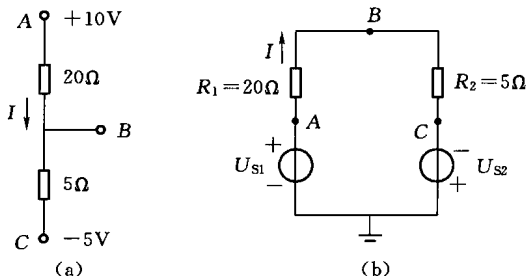


图1-5 例1-1图

率, 而功率小于零表示其吸收功率。因此, 习惯上对电阻元件常采用关联参考方向, 而对于电源元件常采用非关联参考方向。

【例 1-1】 如图 1-5 (a) 所示电路, 求 B 点电位。

解: 图 1-5 (a) 所示电路为用标注电位方式的简化电路图, 其完整的电路图如图 1-5 (b) 所示, 其中 $U_{S1}=10\text{V}$, $U_{S2}=5\text{V}$, 参考方向已经标出。电流的参考方向已在图中标出, 由 A 指向 B 。这两种电路画法都要求掌握。由欧姆定律可知, 电流为

$$I = \frac{U_{AC}}{R_1 + R_2} = \frac{V_A - V_C}{R_1 + R_2} = \frac{10 - (-5)}{20 + 5} = 0.6(\text{A})$$

$$B \text{ 点电位为 } V_B = U_{S1} - IR_1 = 10 - 0.6 \times 20 = -2(\text{V})$$

$$\text{或 } V_B = IR_2 - U_{S2} = -5 + 0.6 \times 5 = -2(\text{V})$$

【例 1-2】 如图 1-6 所示电路中, $U=200\text{V}$, $I=5\text{A}$, 内电阻 $R_{S1}=1\Omega$, $R_{S2}=2\Omega$ 。求 U_{S1} 和 U_{S2} , 并检查功率平衡情况。

解: 如图 1-6 所示, 两个内电阻的电压取与电流相关联的参考方向。电源 U_{S1} 取非关联参考方向, U_{S2} 取关联参考方向。由 $U=U_{S1}-\Delta U_1$, 得

$$U_{S1} = U + \Delta U_1 = 200 + 1 \times 5 = 205(\text{V})$$

同理, 由 $U=U_{S2}+\Delta U_2$, 可得

$$U_{S2} = U - \Delta U_2 = 200 - 2 \times 5 = 190(\text{V})$$

电源 U_{S1} 发出的功率为

$$P_{S1} = U_{S1}I = 205 \times 5 = 1025(\text{W})$$

内电阻 R_{S1} 消耗的功率为 $P_{R1} = \Delta U_1 I = I^2 R_1 = 5 \times 5 = 25(\text{W})$

电源 U_{S2} 发出的功率为 $P_{S2} = -U_{S2}I = -190 \times 5 = -950(\text{W})$

内电阻 R_{S2} 消耗的功率为 $P_{R2} = \Delta U_2 I = I^2 R_2 = 10 \times 5 = 50(\text{W})$

结果表明, $P_{S1} + P_{S2} = P_{R1} + P_{R2}$ 。表明电路中电源发出的总功率等于电阻消耗的总功率, 满足功率平衡。同时表明电源 U_{S2} 发出功率为负, 实际上是吸收功率, 在电路做负载用。这个例子说明, 电源输出的功率大小取决于外电路, 并可能为负, 起负载作用。

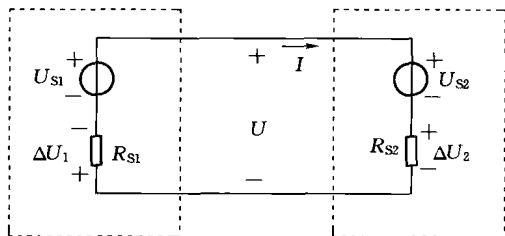


图 1-6 例 1-2 图

1.3 电 路 元 件

电路元件是电路中最基本的组成单元。电路元件通过其端子与外部相连接, 元件的特性也通过与端子有关的物理量描述。电路元件可分为无源元件和有源元件。无源元件包括电阻元件、电容元件和电感元件。

1.3.1 电阻元件

电阻元件, 简称电阻, 在电路中是消耗电能的元件, 电阻 R 定义为

$$R = U/I$$

式中: U 为电阻元件两端的电压; I 为通过电阻元件的电流; R 是一个正实常数。