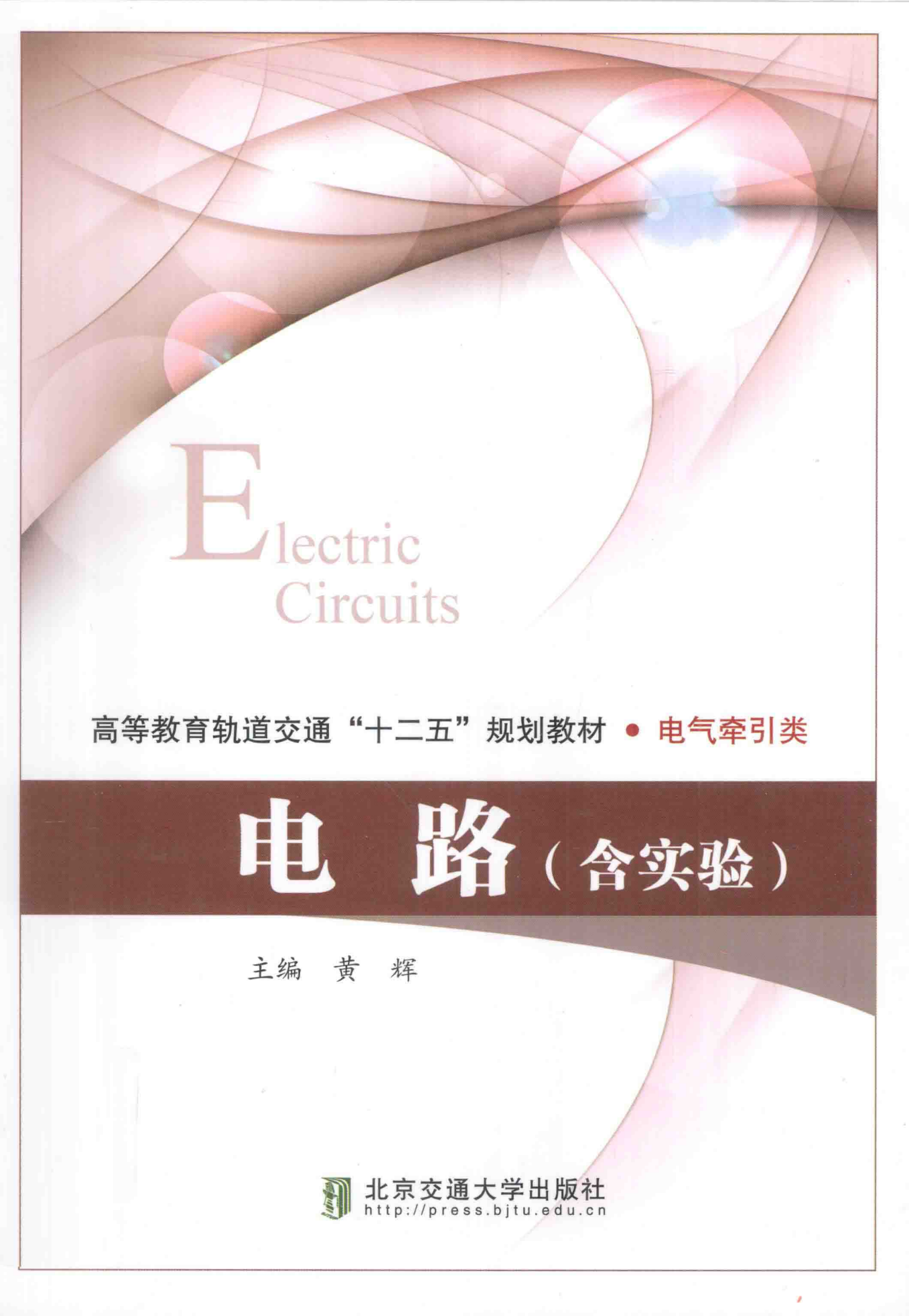




E^{lectric} Circuits

高等教育轨道交通“十二五”规划教材 • 电气牵引类

电 路 (含实验)

主编 黄 辉



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

高等教育轨道交通“十二五”规划教材·电气牵引类

电 路

(含实验)

黄 辉 主编

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是针对“电气工程及其自动化(铁道电气化方向)”课程特色,按照远程教育的特点、对象所编写的教材。

本书分8章,主要内容有电路基本概念与基本定律、基本电路元件、电阻电路的等效变换、电路的一般分析方法与电路定理、正弦稳态电路的分析、含有耦合电感电路的分析、三相电路、一阶电路的时域分析。为便于学习,每章后均配有内容概要、学习重点和难点、复习参考题。此外,本书还配备两套模拟试题供学生们检验学习效果。

本书可作为高等学校电气工程学科“电路”课程的授课教材,也可供相关工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

电路:含实验/黄辉主编. —北京:北京交通大学出版社, 2012. 10

(高等教育轨道交通“十二五”规划教材)

ISBN 978 - 7 - 5121 - 1199 - 8

I. ①电… II. ①黄… III. ①电路 - 高等学校 - 教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 215414 号

责任编辑:吴嫦娥 特邀编辑:李晓敏

出版发行:北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010 - 51686414

印刷者:北京瑞达方舟印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185 × 260 印张:11 字数:275 千字

版 次:2012 年 10 月第 1 版 2012 年 10 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978 - 7 - 5121 - 1199 - 8/TM · 45

印 数:1 ~ 3 000 册 定价:25.00 元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010 - 51686043, 51686008; 传真:010 - 62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

高等教育轨道交通“十二五”规划教材·电气牵引类

编 委 会

顾 问：施仲衡

主 任：司银涛

副 主 任：陈 庚 姜久春

委 员：（按姓氏笔画排序）

王立德 方 进 刘文正

刘慧娟 吴俊勇 张晓冬

周 晖 黄 辉

编委会办公室

主 任：赵晓波

副 主 任：孙秀翠

成 员：（按姓氏笔画排序）

吴嫦娥 郝建英 徐 琤 高 琦

出版说明

为促进高等轨道交通专业电力牵引类教材体系的建设,满足目前轨道交通类专业人才培养的需要,北京交通大学电气工程学院、远程与继续教育学院和北京交通大学出版社组织以北京交通大学从事轨道交通研究教学的一线教师为主体、联合其他交通院校教师,并在有关单位领导和专家的大力支持下,编写了本套“高等教育轨道交通‘十二五’规划教材·电气牵引类”。

本套教材的编写突出实用性。本着“理论部分通俗易懂,实操部分图文并茂”的原则,侧重实际工作岗位操作技能的培养。为方便读者,本系列教材采用“立体化”教学资源建设方式,配套有教学课件、习题库、自学指导书,并将陆续配备教学光盘。

本系列教材可供相关专业的全日制或在职学习的本专科学生使用,也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

本系列教材得到从事轨道交通研究的众多专家、学者的帮助和具体指导,在此表示深深的敬意和感谢。本系列教材从2012年1月起陆续推出,首批包括:《电路》、《模拟电子技术》、《数字电子技术》、《工程电磁场》、《电机学》、《电传动控制系统》、《电力系统分析》、《电力系统继电保护》、《高电压技术》、《牵引供电系统》、《城市轨道交通供电》。

希望本套教材的出版对轨道交通的发展、轨道交通专业人才的培养,特别是轨道交通电气牵引专业课程的课堂教学有所贡献。

编委会
2012年8月

总 序

我国是一个内陆深广、人口众多的国家。随着改革开放的进一步深化和经济产业结构的调整,大规模的人口流动和货物流通使交通行业承载着越来越大的压力,同时也给交通运输带来了巨大的发展机遇。作为运输行业历史最悠久、规模最大的龙头企业,铁路已成为国民经济的大动脉。铁路运输有成本低、运能高、节省能源、安全性好等优势,是最快捷、最可靠的运输方式,是发展国民经济不可或缺的运输工具。改革开放以来,中国铁路积极适应社会的改革和发展,狠抓制度改革,着力技术创新,抓住了历史发展机遇,铁路改革和发展取得了跨越式的发展。

国家对铁路的发展始终予以高度重视,根据国家《中长期铁路网规划》(2005—2020年):到2020年,中国铁路网规模达到12万千米以上。其中,时速200千米及以上的客运专线将达到18万千米。加上既有线提速,中国铁路快速客运网将达到5万千米以上,运输能力满足国民经济和社会发展的需要,主要技术装备达到或接近国际先进水平。铁路是个远程重轨运输工具,但随着城市建设和经济的繁荣,城市人口大幅增加,近年来城市轨道交通也正处于高速发展时期。

城市的繁荣相应带来了交通拥挤、事故频发、大气污染等一系列问题。在一些大城市和一些经济发达的中等城市,仅仅靠路面车辆运输远远不能满足客运交通的需要。城市轨道交通节约空间、耗能低、污染小、便捷可靠,是解决城市交通的最好方式。未来我国城市将形成地铁、轻轨、市域铁路构成的城市轨道交通网络,轨道交通将在我国城市建设中起着举足轻重的作用。

但是,在我国轨道交通进入快速发展的同时,解决各种管理和技术人才匮乏的问题已迫在眉睫。随着高速铁路和城市轨道新线路的不断增加以及新技术的开发与引进,管理和技术人员的队伍需要不断壮大。企业不仅要对新员工进行培训,对原有的职工也要进行知识更新。企业急需培养出一支能符合企业要求、业务精通、综合素质高的队伍。

北京交通大学是一所以运输管理为特色的学校,拥有该学科一流的师资和科研队伍,为我国的铁路运输和高速铁路的建设作出了重大贡献。近年来,学校非常重视轨道交通的研究和发展,建有“轨道交通控制与安全”国家级重点实验室、“城市交通复杂系统理论与技术”教育部重点实验室,“基于通信的列车运行控制系统(CBTC)”取得了关键技术研究的突破,并用于亦庄城轨线。为解决轨道交通发展中人才需求问题,北京交通大学组织了学校有关院系的专家和教授编写了这套“高等教育轨道交通‘十二五’规划教材”,以供高等学校学生教学和企业技术与管理人员培训使用。

本套教材分为交通运输、机车车辆、电气牵引和土木工程四个系列，涵盖了交通规划、运营管理、信号与控制、机车与车辆制造、土木工程等领域，每本教材都是由该领域的专家执笔，教材覆盖面广，内容丰富实用。在教材的组织过程中，我们进行了充分调研，精心策划和大量论证，并听取了教学一线的教师和学科专家们的意见，经过作者们的辛勤耕耘以及编辑人员的辛勤努力，这套丛书得以成功出版。在此，我们向他们表示衷心的感谢。

希望这套系列教材的出版能为我国轨道交通人才的培养贡献绵薄之力。由于轨道交通是一个快速发展的领域，知识和技术更新很快，教材中难免会有诸多的不足和欠缺，在此诚请各位同仁、专家予以不吝批评指正，同时也方便以后教材的修订工作。

编委会
2012年8月

前 言

电路是研究电路理论的基础课程。它的任务是通过学习使学生掌握电路的基本概念、基本理论和电路的基本分析方法，为学习后续课程提供必要的基础理论知识，为进一步研究电路理论打好基础。

为了适应远程教育学生的学习特点，本书尽量深入浅出，尽可能把复杂的信息以清楚、直接的方式呈现出来。本书的目标是：通过对电路的系统学习，能让学生建立起对概念的充分理解，同时重视概念的理解与解题方法之间的关系，从而为学生以后的工程实践打好基础。

本书对内容进行精选，保证必需的常用基础知识，只讨论集总参数线性电路。参考教学时数（包括本书全部内容）约 60 学时。

本书由黄辉、王喜莲、马晓春、叶晶晶等老师编写完成。主要内容分 8 章，第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 4 章由黄辉编写；第 5 章和第 6 章由王喜莲编写；第 7 章由马晓春编写；第 8 章由叶晶晶编写。全书由黄辉统稿。

由于编者水平有限、编写时间仓促，书中如有疏漏和不妥之处，恳请读者予以批评指正。意见请寄北京交通大学电气学院电工电子教学基地（邮编：100044）；电子邮箱为：bjtudianlukecheng@163.com。

编 者
2012 年 8 月

目 录

第 1 章 电路基本概念与基本定律	1	4.2 结点电压法	46
1.1 电路模型	1	4.3 网孔电流法	50
1.2 电路分析的基本变量	3	4.4 叠加定理	53
1.3 基尔霍夫定律	9	4.5 替代定理	55
复习参考题	12	4.6 戴维宁定理与诺顿定理	56
第 2 章 基本电路元件	14	4.7 最大功率传输定理	59
2.1 概述	14	复习参考题	60
2.2 电阻元件	14	第 5 章 正弦稳态电路的分析	64
2.3 电容元件	18	5.1 正弦交流电的基本概念	64
2.4 电感元件	21	5.2 正弦量的相量表示法	67
2.5 独立源元件	25	5.3 电路基本元件 VCR 及电路	
2.6 受控源元件	28	定律的相量形式	69
复习参考题	29	5.4 阻抗与导纳	72
第 3 章 电阻电路的等效变换	32	5.5 正弦稳态电路的计算	75
3.1 基本概念	32	5.6 正弦稳态电路的功率	78
3.2 电阻的混联	33	5.7 正弦稳态电路的最大功率	
3.3 桥形结构与惠斯通电桥	34	传输	82
3.4 电阻的 Δ -Y等效变换	34	5.8 功率因数的提高	83
3.5 电压源、电流源的串联与		5.9 谐振电路	85
并联	38	复习参考题	88
3.6 实际电源的两种模型及其等效		第 6 章 含有耦合电感电路的分析	91
变换	39	6.1 互感	91
3.7 输入电阻	40	6.2 含有耦合电感电路的计算	93
复习参考题	41	6.3 变压器原理	96
第 4 章 电路的一般分析方法与电路		6.4 理想变压器	98
定理	44	复习参考题	101
4.1 基本概念	44		

第7章 三相电路	103	复习参考题	144
7.1 三相交流电路	103	附录A 部分复习参考题答案	147
7.2 三相线电压与相电压和线 电流与相电流的关系	106	附录B 电路实验	153
7.3 三相电路的计算	108	B.1 实验要求	153
7.4 对称三相电路的功率	111	B.2 实验一 元件伏安特性的 测量	154
7.5 不对称三相电路	115	B.3 实验二 电路基本定律、 定理的验证	156
7.6 安全用电	117	B.4 实验三 日光灯及功率因数 提高的电路设计	157
复习参考题	123	B.5 实验四 三相交流电路	157
第8章 一阶电路的时域分析	126	附录C 模拟试题	159
8.1 引言	126	C.1 模拟试题一	159
8.2 换路定则和初始条件	127	C.2 模拟试题二	160
8.3 一阶电路的零输入响应	130	参考文献	163
8.4 一阶电路的零状态响应	136		
8.5 一阶电路的全响应	141		

第1章

电路基本概念与基本定律

【本章内容概要】

概述电路理论，一般性地描述电路分析的意义，介绍电压、电流等电路变量，引入参考方向的概念，并介绍电流和电压与功率和能量的关系；介绍集总电路中基本定律——基尔霍夫定律。

【本章学习重点与难点】

学习重点：参考方向、基尔霍夫定律。

学习难点：参考方向。

1.1 电路模型

1.1.1 概述

电气系统包括通信系统、计算机系统、控制系统、电力系统和信号处理系统，遍布日常生活的每一个角落，无论在家庭、学校、车间，还是汽车、飞机，到处都能找到它的身影。电气工程专业与生产、传送、测量电信号的系统有关，它将自然现象的物理模型与数学工具结合在一起，并运用这些模型系统来满足实际的需要。电气工程领域涉及面广，但每一分支都有其共同的部分——电路。

实际电路是为完成某种预期目的而设计、安装、运行，由电路部件（如蓄电池、电阻器、电容器等）和电路器件（如晶体管、运算放大器等）相互连接而成的电流通路装置。实际的电路元件种类繁多、电磁关系比较复杂，有的难以用数学公式表达，不便分析计算。比如，常见的白炽灯是利用灯丝的电阻特性消耗电能，将其转化成热能，加热后的灯丝再将热能转化为光能，但是，一旦有电流流过白炽灯时还会产生磁场，因而还兼有电感的性质；再比如，导线是用来提供电能通道的，但导线内必然存在电阻，且有变化电流流过时，在导线的周围还会产生变化的磁场等。考虑到这些对分析电路带来的困难，有必要在一定的条件下将实际的部件近似化，忽略其次要性质，用足以表征其主要性能的模式——“理想电路元件”及其组合来表示。

因此，为了便于分析计算，工程上通常对实际的电路元件近似化、理想化，用“理想电路元件”及其组合代表实际电路元件，再用“理想导线”将这些理想元件的端子连接起来，这样，实际电路就抽象成电路模型。

简单照明电路的实际电路如图1-1（a）所示，它由电池、开关和灯泡以实际导线连接而成。其电路模型如图1-1（b）所示，其中，电池由电压源 U_s 与电阻元件 R_0 的串联组合表

示；实际开关近似为理想开关 S ；灯泡用电阻元件 R 表示；忽略实际导线中较小的电阻值，将其近似为电阻为零的理想导线。

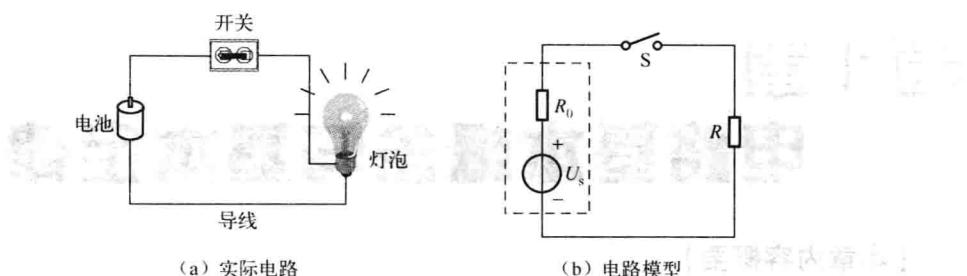


图 1-1 简单照明电路的实际电路与电路模型

将实际电路转变为由理想元件构成的电路模型，这一过程称为电路建模（建立模型）。建模时必须考虑实际电路的工作条件，结合准确度要求，把实际电路的主要物理现象和功能反映出来。在建模时应注意以下两点：第一，在一定的条件下，不同的器件可以具有同一种模型。如电阻器、白炽灯、电炉等，这些器件在电路中设置工作点、采样、消耗电能，但都可用理想的电阻元件作为它们的模型。第二，在不同工作条件、不同准确度要求下，同一个器件或实际电路对应的电路模型往往不同，比如，一个线圈在工作频率较低时，用理想的电感元件作为模型；若要考虑线圈的能耗，则使用理想的电阻元件和理想的电感元件的串联形式作为模型；而在工作频率较高时，则应考虑线圈绕线之间相对位置的影响，这时的模型中还应包含理想的电容元件。

本书对建模不作介绍，直接以由理想电路元件构成的电路模型为研究对象，同时在不引起混淆的情况下，将电路模型、理想电路元件分别简称为电路、电路元件。另外，虽然电路理论包括电路分析、综合和设计，但本书主要着眼于电路分析，主要任务是探讨电路的基本定律和定理，并讨论各种分析方法，对结构、参数已知的电路进行分析计算，求解其电路性能。电路分析为以后的电路综合与设计建立必要的理论基础，是电路故障诊断和电路设计的前提条件。

1.1.2 电路分类

根据不同的分类标准，电路可以有不同的类别。

1. 集总参数电路与分布参数电路

根据电路几何尺寸与工作频率对应的波长的关系来确定。一个电路被称为集总参数电路的条件是：电路元件和电路本身的几何尺寸远小于其正常工作频率所对应的电磁波波长（通常小于波长的 $1/10$ ）；若不满足此条件，电路即为分布参数电路。比如，工作在工频（50Hz）情况下，电磁波的波长 $\lambda = c/f = 3 \times 10^8 / 50 = 6 \times 10^6 \text{ m}$ ，即 6 000 km。此波长远大于实验室中电路的尺寸，因此，除了电力系统的传输线以外，日常使用的电路在工频情况下均可视为集总参数电路；但是对于计算机电路，其工作频率目前已高于 1 000 MHz，此时电磁波的波长 $\lambda = c/f = 3 \times 10^8 / 10^9 = 0.3 \text{ m}$ ，因此用集总参数电路来描述就难以准确表达，应该用分布参数电路来模拟。

2. 线性电路与非线性电路

根据组成电路的元件是否包含非线性元件来确定。如果元件的参数与流经它的电流和施加在其两端的电压的大小、方向无关,那么此元件就是线性元件;反之就是非线性元件。比如,线性电阻元件就是电阻值不随电压或电流而变化;而二极管就是一个典型的非线性元件,它所呈现出的电阻阻值会随着流经它的电流的方向和大小的改变而变化。如果电路中所有元件都是线性元件,则此电路被称为线性电路;反之,通常情况下,只要电路中包含一个非线性元件,此电路即为非线性电路。

3. 时变电路与非时变电路

根据组成电路的元件参数是否随时间变化来确定。如果元件的参数与时间无关,那么此元件就是非时变元件;反之,此元件就是时变元件。如果电路中所有元件都是非时变元件,则此电路被称为非时变电路;反之,通常情况下,只要电路中包含一个时变元件,此电路即为时变电路。

本书重点分析集总、非时变、线性的电路。

1.2 电路分析的基本变量

电路的变量是描述电路特性的物理量。电路分析中,电压、电流无疑是最重要的基本变量。除此之外,功率与能量也是工程中颇受关注的重要物理量。

1.2.1 电流

1. 电流的定义

我们知道,电子带负电荷,质子带正电荷。电荷的定向移动形成电流。物理学规定电流的实际方向为正电荷运动的方向。电流*i*在数值上等于单位时间内通过导体路径中某一横截面的电荷量,即:

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

如果在任一瞬间通过导体横截面的电量都是相等的,而且方向也不随时间变化,则这种电流叫做恒定电流,用符号*I*^①表示。

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

式中,*Q*为时间*t*内通过导体横截面的电荷。

国际单位制(SI)中,电荷单位是C(库仑,简称库),时间单位是s(秒),电流的单位为A(安培,简称安)。国际单位制中用来构成倍数与分数的词头见表1-1。比如,1mA(毫安)=10⁻³A,1μA(微安)=10⁻⁶A等。

① 当电路中的变量随时间变化时,一般用小写字母表示,用大写字母则表示变量相对于时间是恒定量。但有时也采用小写字母表示恒定的变量;可根据上下文判断。

表 1-1 SI 倍数与分数的词头

倍率	词头名称		词头符号	倍率	词头名称		词头符号
10^{12}	太 [拉]	tera	T	10^{-1}	分	deci	d
10^9	吉 [咖]	giga	G	10^{-2}	厘	centi	c
10^6	兆	mega	M	10^{-3}	毫	milli	m
10^3	千	kilo	k	10^{-6}	微	micro	μ
10^2	百	hecto	h	10^{-9}	纳 [诺]	nano	n
10	十	deca	da	10^{-12}	皮 [可]	pico	p

2. 电流的参考方向

尽管规定正电荷的运动方向为电流方向,但有些复杂电路的某些支路事先无法确定实际方向,而且实际电路中有些电流是交变的,无法标出实际方向。因此,为了分析电路的方便,引入参考方向的概念。

一段电路中,电流在某一瞬时的方向只有两种可能性。分析电路时可以任意假定一个方向作为电流参考方向,在电路图中直接用箭头标记在电流符号附近。如图 1-2 所示, i_1 下的实线箭头就表示电流 i_1 的参考方向。

如果电流的实际方向与参考方向一致,则电流为正值;如果电流的实际方向与参考方向相反,则电流为负值。这样,在规定参考方向以后,电流就成为具有正负号的代数量;同时,在指定参考方向的前提下,结合电流的正负值就能够确定电流的实际方向。如图 1-2 (a) 所示,若电流 i_1 的实际方向(虚线箭头表示)与参考方向相同,则 $i_1 > 0$;如图 1-2 (b) 所示,若电流 i_1 的实际方向(虚线箭头表示)与参考方向相反,则 $i_1 < 0$ 。

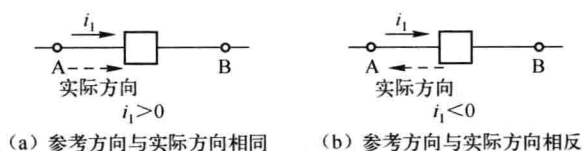


图 1-2 电流的参考方向与实际方向

需要注意的是,今后电路图中标示的所有电流方向都是其参考方向,不一定就是其实际方向。而且,每一个电流都应该在电路图中标示其参考方向,否则其正负号没有任何意义。因此,今后在分析电路中,涉及电流变量时,首先就要假定其参考方向,然后才能以此为基础进行分析计算。

1.2.2 电压

1. 电压的定义

电荷在电路中流动,就必然有能量的交换发生。电荷在电路中的一些部分(电源处)获得电能,而在另一些部分(如电阻处)失去电能。为了计量电场力对电荷做功能力的大小,引入电压这一物理量,记为 $u(t)$ 或 U 。电路中 A、B 两点之间的电压 U_{AB} 定义为单位正电荷由 A 点转移到 B 点时电场力所做的功,即:

$$U_{AB} = \frac{dW_{AB}}{dq} \quad (1-3)$$

式中, dq 为从 A 点移动到 B 点的电量, 单位为 C (库仑); dW_{AB} 为移动过程中电场力所做的功, 单位为 J (焦耳, 简称焦); U_{AB} 的单位为 V (伏特, 简称伏), 常用的还有 kV (千伏)、mV (毫伏) 或 μV (微伏)。

另外, 电压也常用电位差表示。比如, A、B 两点之间的电压 U_{AB} 为 A 点的电位 U_A 与 B 点的电位 U_B 之差, 即:

$$U_{AB} = U_A - U_B \quad (1-4)$$

电位是描述电路中某点电位能分布的物理量。如果正电荷由 A 点转移到 B 点时获得电能, 则 A 点电位为低, 通常标示为“-”极; B 点电位为高, 标示为“+”极。物理学规定: 电压的实际方向是电位降低的方向。

2. 电压的参考方向

与电流情况类似, 虽然电压的实际方向规定为从高电位指向低电位, 但是由于分析前电压实际方向不易判断或者随时间不断变化, 因此, 在分析电路前, 也必须对电压指定参考方向。

电压的参考方向的表示方法有 3 种: 箭头、正负极性和双下标, 如图 1-3 所示。图 (a) 中箭头指向为电压 (降) 的参考方向, 即箭头由参考高电位指向参考低电位; 图 (b) 中“+”极标注在参考高电位所在点,“-”极标注在参考低电位所在点, 即电压 (降) 的参考方向由“+”极指向“-”极; 图 (c) 中 u_{AB} 表示 A 点为参考高电位, B 点为参考高电位, 即电压 (降) 的参考方向由 A 点指向 B 点。

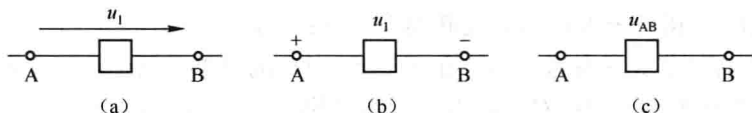


图 1-3 电压参考方向的表示方法

当电压实际方向与参考方向一致时, 电压为正值; 否则, 电压为负值。这样, 电压与电流一样, 也成为带有正负号的代数量。另外, 在指定电压参考方向, 并完成对电路的分析计算以后, 依据计算结果中电压的正负号, 就可以确定电压的实际方向。

3. 电流、电压的参考方向的注意事项

电流、电压这两个物理量都具有参考方向, 在使用时应注意以下几点。

(1) 分析电路前必须选定电压和电流的参考方向, 选定后必须在图中相应位置标注 (包括方向和符号)。

(2) 参考方向原则上可以任意选定, 但是一经选定, 在整个计算过程中不得改变。

(3) 参考方向也称为假定正方向, 以后分析计算均在参考方向下进行, 无须考虑实际方向。

(4) 对同一个电流或者电压, 参考方向选择不同时, 其表达式符号也不同, 但实际方向不变。

如图 1-4 所示电路中, 设图 (a) 中有 1A 电流从 A 点流向 B 点, 若选择电流参考方向从

A 点指向 B 点 (图中 i_1)，则可得 $i_1 = 1\text{A}$ ；若选择另一种参考方向 (图中 i_2)，则 $i_2 = -1\text{A}$ 。稍加分析即可知道，虽然 i_1 与 i_2 参考方向选择不同，但是它们的表达式相差一个正负号，因此表示的是同一个电流，具有相同的实际方向和大小。类似的，如果表示同一个电压时选择不同的参考方向，其表达式也相差一个正负号。图 (b) 中，若要表示 AB 点电压，一种选择是电压参考方向从 A 点指向 B 点 (图中 u_1)，另一种选择是电压参考方向从 B 点指向 A 点 (图中 u_2)，则 $u_1 = -u_2$ 。可以看出，参考方向是可以任意选取的，只要表达式与参考方向匹配，不同的参考方向选择情况不会影响实际方向和大小。

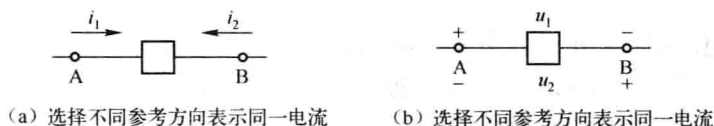


图 1-4 参考方向可任意选定

4. 电流、电压参考方向的关联与否

在分析计算电路时，既要为通过元件的电流选择参考方向，也要为元件两端的电压选择参考方向。两者是可以独立地任意指定的，但对于一个元件而言，其电流、电压的参考方向只可能有两种关系：关联或者非关联。对于一个两端元件而言，如果指定流过元件的电流的参考方向是从元件电压正极性 (指参考方向) 流入，从电压负极性 (指参考方向) 流出，即两者参考方向一致，则把电流、电压的这种参考方向称为关联参考方向，如图 1-5 (a) 所示；否则称为非关联参考方向。在图 1-5 (b) 中，N 表示电路的一个部分，它有两个端子与外部电路连接，电流 i_1 的参考方向自电压 u_1 的正极性流入 N，从电压的负极性流出 N，所以电流 i_1 与电压 u_1 相对于 N 而言是关联参考方向；相反，在图 1-5 (c) 中，电流 i_2 与电压 u_1 相对于 N 而言是非关联参考方向。在图 1-5 (d) 的简单电路中，对于电源而言，电流 i_1 与电压 u_1 是非关联参考方向；对电阻而言，同样的电流 i_1 与电压 u_1 则为关联参考方向。通常，除电源以外的元件一般采用关联参考方向。

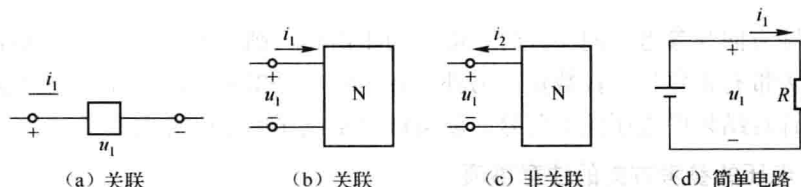


图 1-5 电流、电压参考方向的关联与否

1.2.3 电功率与电能

电路的分析与计算中，对电功率和电能的计算是很重要的。一方面是因为电路在工作状况下总伴随着电能与其他形式能量之间的相互转换；另一方面，电气设备、电路部件本身都有功率的限制，使用时要注意其电流电压不能超过额定值，否则过载会使设备或部件损坏，或不能正常工作。

1. 电功率的定义

电功率与电压和电流密切相关。当正电荷从元件的高电位端, 经过元件运动到低电位端时, 电场力对电荷做功, 电场力做功消耗的电能被元件吸收, 即元件吸收电能; 反之, 正电荷由从元件的低电位端经过元件运动到高电位端时, 电场力对电荷做负功, 元件将其他形式的能量转换为电能, 即元件对外释放电能。

单位时间内元件消耗的电能即为该元件吸收的电功率, 记为 $p(t)$ 或 P , 即:

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (1-5)$$

式中, dW 为元件在 dt 时间内消耗的电能。功率 P 的单位为 W (瓦特, 简称瓦), 常用的还有 kW (千瓦) 或 mW (毫瓦)。

2. 电功率的计算

假设在 dt 时间内, 有 dq 电荷从元件的电压 “+” 极到达电压 “-” 极, 且电压为 u , 由式 (1-3) 可知, 电场力所做功, 即元件吸收的电能量 $dW = udq$ 。若此元件电压 u 与电流 i 是关联参考方向, 由式 (1-1) 可知, $dq = idt$, 则元件在此瞬时所吸收的电功率为:

$$p = \frac{udq}{dt} = ui \quad (1-6)$$

由于电流、电压的参考方向有关联与非关联两种情况, 在计算功率时使用的表达式并不相同。

(1) 当元件上电压 u 与电流 i 关联时, 该元件吸收的瞬时功率为:

$$p_{\text{吸}} = ui \quad (1-7)$$

(2) 当元件上电压 u 与电流 i 非关联时, 该元件吸收的瞬时功率为:

$$p_{\text{吸}} = -ui \quad (1-8)$$

(3) 上述功率计算不仅适用于元件, 也适用于任意二端网络。

(4) 由于电压 u 与电流 i 均为带有正负号的代数量, 计算结果 $p_{\text{吸}}$ 也是带有正负号的代数量, 但是此正负号的意义与电压电流的正负号意义不同。若 $p_{\text{吸}} > 0$, 则说明元件确实从外界吸收电功率; 若 $p_{\text{吸}} < 0$, 则说明元件实际上对外释放电功率。

【例 1-1】 如图 1-6 所示电路中, 两个电压源与一个 5Ω 电阻串联。已知电压源电压分别为 $U_1 = 10\text{V}$ 、 $U_2 = 2\text{V}$, 求两个电源及电阻的功率。

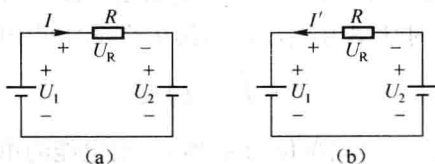


图 1-6 例 1-1 电路图

解: 若选取电路中电流 I 参考方向如图 1-6 (a), 根据欧姆定律, 电路中电流 I 为:

$$I = \frac{U_R}{R} = \frac{U_1 - U_2}{R} = \frac{10 - 2}{5} = 1.6 \text{ (A)}$$

对电压源 U_1 , 电压 U_1 与电流 I 为非关联, 此电源吸收的功率为: