

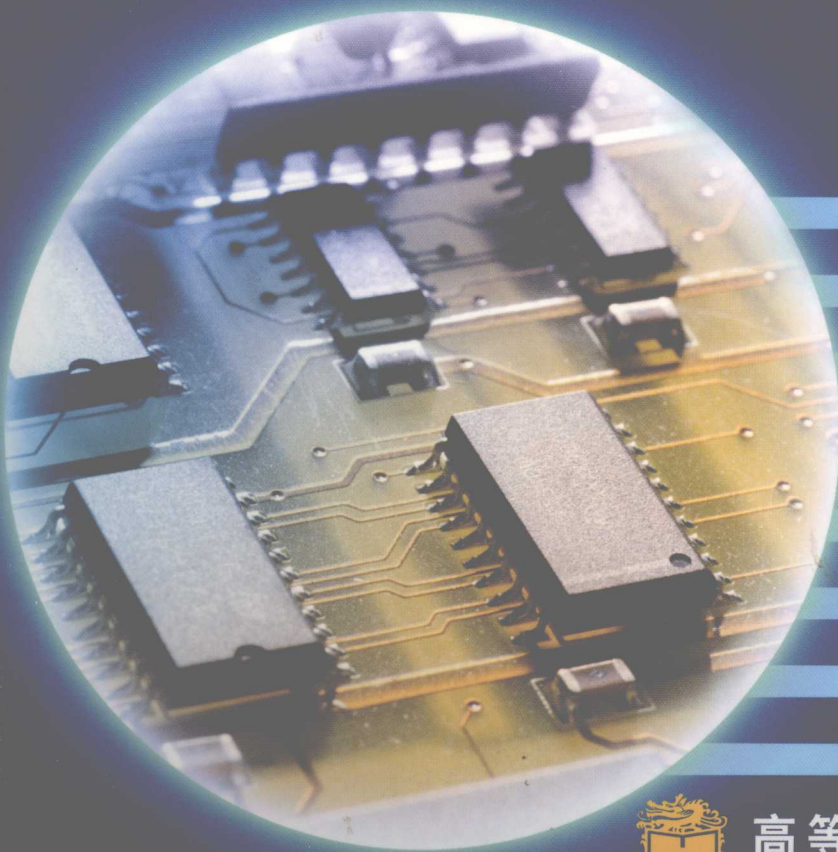


普通高等教育“十五”国家级规划教材

(高职高专教育)

电路基础简明教程

胡翔骏 编



高等教育出版社

内容提要

《电路基础简明教程》是普通高等教育“十五”国家级规划教材,它是一体化设计的立体教材,由纸质主教材《电路基础简明教程》,纸质辅助教材《电路基础简明教程学习指导》和电子教材《电路基础简明教程计算机辅助教学系统》等组成,丰富的教学资源为应用现代信息技术进行电路基础课程教学提供全方位的支持。纸质主教材《电路基础简明教程》的内容由电路的基本概念和定律,简单电阻电路分析,网孔分析法和结点分析法,网络定理,多端元件和双口网络,动态电路的时域分析,正弦稳态分析,正弦稳态的功率及三相电路,网络函数和频率特性,含耦合电感的电路分析共十章组成。纸质辅助教材《电路基础简明教程学习指导》的内容由全书的习题解答和复习资料组成。电子教材《电路基础简明教程计算机辅助教学系统》由《电路基础简明教程电子教案》,《电路分析重难点演示系统》,《电路分析解答系统》和《电路分析教学实验演示系统》等组成。

本立体化教材供高职高专电子信息、通信等专业学生使用,也可供其他学生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电路基础简明教程/胡翔骏编. —北京:高等教育出版社,2004.11

ISBN 7-04-015748-9

I. 电… II. 胡… III. 电路理论—高等学校: 技术学校—教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 103144 号

策划编辑	尹 洪	责任编辑	王莉莉	封面设计	王凌波	责任绘图	朱 静
版式设计	胡志萍	责任校对	尤 静	责任印制	孔 源		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京铭成印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 19.5
字 数 470 000

版 次 2004 年 11 月第 1 版
印 次 2004 年 11 月第 1 次印刷
定 价 28.60 元(含光盘)

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号:15748-00

出版说明

为加强高职高专教育的教材建设工作,2000年教育部高等教育司颁发了《关于加强高职高专教育教材建设的若干意见》(教高司[2000]19号),提出了“力争经过5年的努力,编写、出版500本左右高职高专教育规划教材”的目标,并将高职高专教育规划教材的建设工作分为两步实施:先用2至3年时间,在继承原有教材建设成果的基础上,充分汲取近年来高职高专院校在探索培养高等技术应用性专门人才和教材建设方面取得的成功经验,解决好高职高专教育教材的有无问题;然后,再用2至3年的时间,在实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,推出一批特色鲜明的高质量的高职高专教育教材。根据这一精神,有关院校和出版社从2000年秋季开始,积极组织编写和出版了一批“教育部高职高专规划教材”。这些高职高专规划教材是依据1999年教育部组织制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》(草案)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(草案)编写的,随着这些教材的陆续出版,基本上解决了高职高专教材的有无问题,完成了教育部高职高专规划教材建设工作的第一步。

2002年教育部确定了普通高等教育“十五”国家级教材规划选题,将高职高专教育规划教材纳入其中。“十五”国家级规划教材的建设将以“实施精品战略,抓好重点规划”为指导方针,重点抓好公共基础课、专业基础课和专业主干课教材的建设,特别要注意选择一部分原来基础较好的优秀教材进行修订使其逐步形成精品教材;同时还要扩大教材品种,实现教材系列配套,并处理好教材的统一性与多样化、基本教材与辅助教材、文字教材与软件教材的关系,在此基础上形成特色鲜明、一纲多本、优化配套的高职高专教育教材体系。

普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2002年11月30日

前 言

《电路基础简明教程》是“十五”国家级规划教材,它是一套立体化的教材,由纸质主教材《电路基础简明教程》和纸质辅助教材《电路基础简明教程学习指导》以及《电路基础简明教程计算机辅助教学系统》光盘组成。适合于电子、通信与信息类专业的高职高专学生使用,也可供应用型本科学生参考使用。

纸质主教材《电路基础简明教程》介绍电路理论的基本内容,由电路的基本概念和定律,简单电阻电路分析,网孔分析法和结点分析法,网络定理,多端元件和双口网络,动态电路的时域分析,正弦稳态分析,正弦稳态的功率和三相电路,网络函数和频率特性,含耦合电感的电路分析共十章组成。为便于学生自学,书中有比较丰富的例题和习题。本教材讲述的是电路分析的最基本内容,选材比较浅近,阐述比较详细,编写由浅入深,且有许多贴近实际以及增加学生实践知识的例题,是一本符合高职高专学生水平,便于教学及自学使用的教材。

纸质辅助教材《电路基础简明教程学习指导》的内容由主教材全部习题的详细解答和有关复习资料两部分组成。帮助学生解决在学习和解算习题中存在的某些问题。

在《电路基础简明教程计算机辅助教学系统》光盘中,提供了丰富的教学资源,供教师和学生在学习中使用,其内容有“电子教案”,“电路分析重难点教学演示系统”,“电路分析解答系统”,“电路分析教学实验演示系统”和全书的习题答案。教师可以利用“电子教案”来编写在多媒体教室和网络上使用的电子教案,学生也可以利用“电子教案”在计算机上进行学习;利用“电路分析重难点教学演示系统”来理解黑板上难以表达的某些电路概念;利用“电路分析解答系统”来解算各种电路习题和学习计算机分析电路的方法;还可以利用“电路分析教学实验演示系统”来解决电路课程理论教学中理论联系实际的某些问题,有助于学生深入掌握电路基本理论和提高分析与解决实际电路问题的能力。为了便于学生使用,《电路基础简明教程计算机辅助教学系统》光盘附在纸质主教材中。

蔡元宇教授详细地阅读了纸质主教材《电路基础简明教程》和纸质辅助教材《电路基础简明教程学习指导》,提出了宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

编写电路课程的立体化教材是一个新的事物,不妥和错误之处在所难免,欢迎读者提出宝贵意见。

胡翔骏

2004年6月于电子科技大学

目 录

第一章 电路的基本概念和定律	1	* § 5-2 运算放大器的电路模型	109
§ 1-1 电路和电路模型	1	* § 5-3 含运放的电阻电路分析	113
§ 1-2 电路的基本物理量	5	§ 5-4 双口网络的电压-电流关系	117
§ 1-3 基尔霍夫定律	8	§ 5-5 双口网络参数的计算	120
§ 1-4 电阻元件	11	§ 5-6 互易双口和互易定理	128
§ 1-5 独立电压源和独立电流源	16	* § 5-7 含双口网络的电路分析	131
§ 1-6 两类约束和电路方程	21	摘要	133
§ 1-7 支路电流法	24	习题五	134
摘要	25	第六章 动态电路的时域分析	139
习题一	26	§ 6-1 电容元件和电感元件	139
第二章 简单电阻电路分析	31	§ 6-2 一阶电路的零输入响应	148
§ 2-1 分压电路和分流电路	31	§ 6-3 一阶电路的零状态响应	154
§ 2-2 电阻单口网络	37	§ 6-4 一阶电路的完全响应	158
§ 2-3 电阻的星形联结与三角形联结	46	§ 6-5 三要素法	161
§ 2-4 简单非线性电阻电路分析	49	* § 6-6 阶跃函数和阶跃响应	169
摘要	53	§ 6-7 RLC 串联电路的零输入响应	173
习题二	54	摘要	179
第三章 网孔分析法和结点分析法	60	习题六	181
§ 3-1 网孔分析法	60	第七章 正弦稳态分析	190
§ 3-2 结点分析法	64	§ 7-1 正弦电压和电流	190
§ 3-3 含受控源的电路分析	68	§ 7-2 基尔霍夫定律的相量形式	197
摘要	74	§ 7-3 RLC 元件电压-电流关系的 相量形式	200
习题三	75	§ 7-4 正弦稳态的相量分析	208
第四章 网络定理	79	§ 7-5 一般正弦稳态电路分析	214
§ 4-1 叠加定理	79	§ 7-6 单口网络和双口网络的 相量模型	218
§ 4-2 戴维宁定理	83	§ 7-7 正弦稳态响应的叠加	228
§ 4-3 诺顿定理和含源单口网络的 等效电路	88	摘要	231
§ 4-4 最大功率传输定理	93	习题七	233
§ 4-5 替代定理	96	第八章 正弦稳态的功率及三相电路	241
摘要	98	§ 8-1 正弦稳态的功率	241
习题四	98	§ 8-2 最大功率传输定理	247
第五章 多端元件和双口网络	105	§ 8-3 平均功率的叠加	249
§ 5-1 理想变压器	105		

§ 8-4 三相电路	252	第十章 含耦合电感的电路分析	287
摘要	258	§ 10-1 耦合电感的电压 - 电流关系	287
习题八	260	§ 10-2 耦合电感的串联与并联	290
第九章 网络函数和频率特性	264	§ 10-3 耦合电感的去耦等效电路	292
§ 9-1 网络函数	264	§ 10-4 空心变压器电路的分析	294
§ 9-2 RC 电路的频率特性	268	* § 10-5 耦合电感与理想变压器的	
§ 9-3 谐振电路	276	关系	299
§ 9-4 谐振电路的频率特性	280	摘要	301
摘要	283	习题十	302
习题九	284	参考文献	305

第一章

电路的基本概念和定律

本章介绍电路的基本概念和基本变量,阐述集总参数电路的基本定律——基尔霍夫定律。定义三种常用的电路元件:电阻,独立电压源和独立电流源。最后讨论集总参数电路中,电压和电流必须满足的两类约束。这些内容是全书的基础。

§ 1-1 电路和电路模型

一、电路

电在日常生活、生产和科学研究工作中得到了广泛应用。在手机、收录机、电视机、录像机、影碟机、音响设备、计算机、通信系统和电力网络中都可以看到各种各样的电路。这些电路的特性和作用各不相同。电路的一种作用是实现电能的传输和转换,例如电力网络将电能从发电厂输送到各个工厂、广大农村和千家万户,供各种电气设备使用。电路的另外一种作用是实现电信号的传输、处理和存储,例如电视接收天线将所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信息,在扬声器发出声音并在显像管屏幕上呈现图像。

由电阻器、电容器、线圈、变压器、晶体管、运算放大器、传输线、电池、发电机和信号发生器等电气器件和设备连接而成的电路,称为实际电路。根据实际电路的几何尺寸(d)与其工作信号波长(λ)的关系,可以将它们分为两大类:满足 $d \ll \lambda$ 条件的电路称为集总参数电路,其特点是电路中任意两个端点间的电压和流入任一器件端钮的电流是完全确定的,与器件的几何尺寸和空间位置无关;不满足 $d \ll \lambda$ 条件的另一类电路称为分布参数电路,其特点是电路中的电压和电流不仅是时间的函数,也与器件的几何尺寸和空间位置有关。由波导和高频传输线组成的电路,是分布参数电路的典型例子。本书只讨论集总参数电路,为叙述方便起见,今后常简称为电路。

例如,一个音频放大电路的最高工作频率为 $f = 25 \text{ kHz}$,其波长为

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{25 \times 10^3 / \text{s}} = 12 \times 10^3 \text{ m} = 12 \text{ km}$$

一般的音频放大电路和音响设备的几何尺寸(d)远比这个波长(λ)小,均应视为集总参数电路。

表 1-1 列举了我国国家标准中的部分图形符号。采用这些图形符号,可以画出表明实际电路中各个器件互相连接关系的电原理图。例如图 1-1(a)表示日常生活中使用的手电筒电路,它由干电池、白炽灯、开关和手电筒壳(连接导体)组成。图 1-1(b)是用电气图形符号表示的手电筒电路的电原理图。又如图 1-2(a)表示一个最简单的晶体管放大电路,它由传声器、晶体管、电阻器、电池、变压器和扬声器组成,其电原理图如图 1-2(b)所示。

表 1-1 部分电气图用图形符号
(根据国家标准 GB 4728)

名称	符号	名称	符号	名称	符号
导线		传声器		电阻器	
连接的导线		扬声器		可变电阻器	
接地		二极管		电容器	
接机壳		稳压二极管		线圈,绕组	
开关		隧道二极管		变压器	
熔断器		晶体管		铁心变压器	
灯		运算放大器		直流发电机	
电压表		电池		直流电动机	

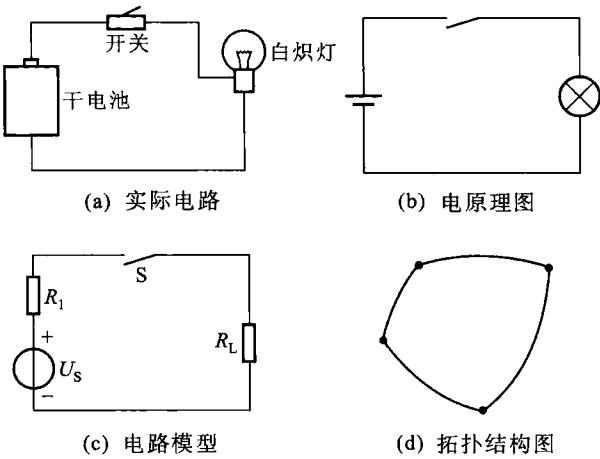


图 1-1 手电筒电路

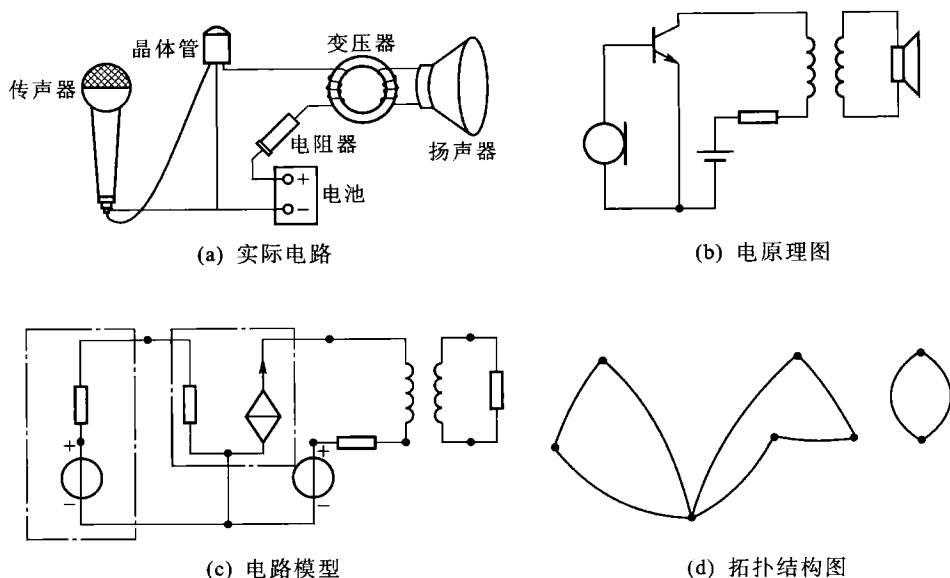


图 1-2 晶体管放大电路

二、电路模型

研究集总参数电路特性的一种方法是用电气仪表对实际电路直接进行测量。另一种更重要的方法是将实际电路抽象为电路模型,用电路理论的方法分析计算出电路的电气特性。运用现代电路理论,借助于计算机,可以模拟各种实际电路的特性和设计出电气性能良好的大规模集成电路。

如何将实际电路抽象为电路模型呢?实际电路中发生的物理过程是十分复杂的,电磁现象发生在各器件和导线之中,相互交织在一起。对于集总参数电路,若不关心器件内部的情况,只关心器件端钮上的电压和电流时,可以定义一些理想化的电路元件来近似模拟器件端钮上的电气特性。例如定义电阻元件是一种只吸收电能(它可以转换为热能或其他形式的能量)的元件,电容元件是一种只存储电场能量的元件,电感元件是一种只存储磁场能量的元件。用这些电阻、电容和电感等理想化的电路元件近似模拟实际电路中每个电气器件和设备,再根据这些器件的连接方式,用理想导线将这些电路元件连接起来,就得到该电路的电路模型。例如图 1-1(c)是图 1-1(a)电路的电路模型。图 1-2(c)是图 1-2(a)电路的电路模型。这些电路模型是用电路元件的图形符号表示的,常称为电路图。

在电路分析中,为了便于看出电路模型中各元件的连接关系,常采用仅仅表示元件连接关系的拓扑结构图,如图 1-1(d)和图 1-2(d)所示。表 1-2 列举了本书采用的部分电路元件的图形符号,其中有一些符号与电气图所用的图形符号相同。这些电路元件的定义和特性将在以后陆续介绍。

表 1-2 部分电路元件的图形符号

名称	符号	名称	符号	名称	符号
独立电流源		理想导线		电容	
独立电压源		连接的导线		电感	
受控电流源		电位参考点		理想变压器	
受控电压源		理想开关		耦合电感	
电阻		开路		回转器	
可变电阻		短路		理想运放	
非线性电阻		理想二极管		二端元件	

电路模型近似地描述实际电路的电气特性。根据实际电路的不同工作条件以及对模型精确度的不同要求,应当用不同的电路模型模拟同一实际电路。例如图 1-3(a)所示线圈,在低频交流工作条件下,用一个电阻和电感的串联来模拟,如图(b)所示;在高频交流工作条件下,则要再并联一个电容来模拟,如图(c)所示。

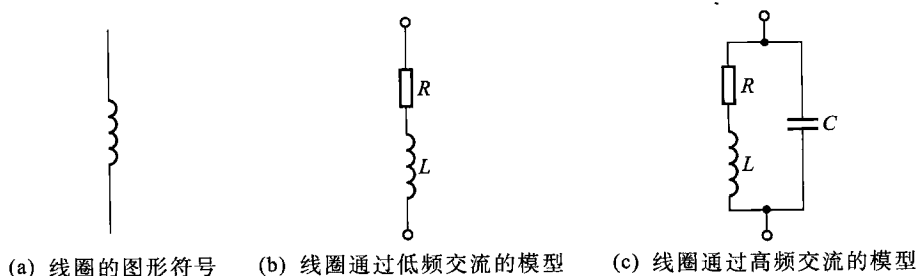


图 1-3 线圈的几种电路模型

将实际电路抽象为电路模型的工作,需要对各种电气器件的特性有深入的了解,有时是非常复杂和困难的。本书只能涉及一些简单的情况,其目的是为了牢固地树立“电路模型”的概念。本课程的主要任务是研究电路模型(简称为电路)的各种分析方法,其目的是通过对电路(模型)的分析研究来预测实际电路的电气特性,以便指导改进实际电路的电气特性和设计制造出新的实际电路。电路的研究问题可以分为两类。一类是电路分析:已知电路结构和元件特性,分析电路的特性;另一类是网络^①综合:根据电路特性的要求来设计电路的结构和元件参数。本

^① 本书中网络(network)与电路(circuit)同义。

课程是电路的入门课程,主要讨论电路分析问题。

§ 1-2 电路的基本物理量

电路的特性是由电流、电压和电功率等物理量来描述的。电路分析的基本任务是计算电路中的电流、电压和电功率。

一、电流和电流的参考方向

带电粒子(电子、离子)定向移动形成电流。电子和负离子带负电荷,正离子带正电荷。电荷用符号 q 或 Q 表示,它的 SI 单位为库[仑]①(C)。

单位时间内通过导体横截面的电荷定义为电流,用符号 i 或 I 表示,其数学表达式为

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

电流的 SI 单位是安[培](A)。

量值和方向均不随时间变化的电流,称为恒定电流,简称为直流(dc 或 DC),一般用符号 I 表示。量值和方向随时间变化的电流,称为时变电流,一般用符号 i 表示。量值和方向作周期性变化且平均值为零的时变电流,称为交流(ac 或 AC)。

习惯上把正电荷移动的方向规定为电流方向(实际方向)。在分析电路时,往往不能事先确定电流的实际方向,而且时变电流的实际方向又随时间不断变动,不能够在电路图上标出适合于任何时刻的电流实际方向。为了电路分析和计算的需要,任意规定一个电流参考方向,用箭头标在电路图上。若电流实际方向与参考方向相同,电流取正值;若电流实际方向与参考方向相反,电流取负值。根据电流的参考方向以及电流量值的正负,就能确定电流的实际方向。例如:在图

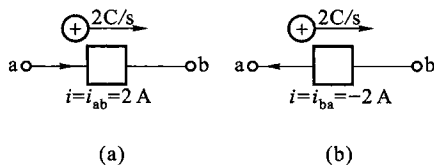


图 1-4 电流的参考方向

1-4 所示的二端元件中,每秒钟有 2C 正电荷由 a 点移动到 b 点。当规定电流参考方向由 a 点指向 b 点时,该电流 $i = 2A$,如图 1-4(a) 所示;若规定电流参考方向由 b 点指向 a 点时,则电流 $i = -2A$,如图 1-4(b) 所示。若采用双下标表示电流参考方向,则写为 $i_{ab} = 2A$ 或 $i_{ba} = -2A$ 。电路中任一电流有两种可能的参考方向,当对同一电流规定相反的参考方向时,相应的电流表达式相差一个负号,即

$$i_{ab} = -i_{ba} \quad (1-2)$$

今后,在分析电路时,必须事先规定电流变量的参考方向。所计算出的电流 $i(t) > 0$,表明该时刻电流的实际方向与参考方向相同;若电流 $i(t) < 0$,则表明该时刻电流的实际方向与参考方向相反。

① 去掉方括弧为全称,去掉方括弧和其中的字为简称,以下同。本书只采用以 SI 为基础的我国法定计量单位,一般不介绍其他单位制单位。

二、电压和电压的参考方向

电荷在电路中移动,就会有能量的交换发生。单位正电荷由电路中 a 点移动到 b 点所获得或失去的能量,称为 ab 两点的电压,即

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-3)$$

其中, dq 为由 a 点移动到 b 点的电荷量,单位为库[仑](C); dW 为电荷移动过程中所获得或失去的能量,单位为焦[耳](J),电压的单位为伏[特](V)。

将电路中任一点作为参考点,把 a 点到参考点的电压称为 a 点的电位,用符号 v_a 或 V_a 表示。在集总参数电路中,元件端钮间的电压与路径无关,而仅与起点与终点的位置有关。电路中 a 点到 b 点的电压,就是 a 点电位与 b 点电位之差,即

$$u_{ab} = v_a - v_b \quad (1-4)$$

量值和方向均不随时间变化的电压,称为恒定电压或直流电压,一般用符号 U 表示。量值和方向随时间变化的电压,称为时变电压,一般用符号 u 表示。

习惯上认为电压的实际方向是从高电位指向低电位。将高电位称为正极,低电位称为负极。与电流类似,电路中各电压的实际方向或极性往往不能事先确定,在分析电路时,必须规定电压的参考方向或参考极性,用“+”号和“-”号分别标注在电路图的 a 点和 b 点附近。若计算出的电压 $u_{ab}(t) > 0$,表明该时刻 a 点的电位比 b 点电位高;若电压 $u_{ab}(t) < 0$,表明该时刻 a 点的电位比 b 点电位低。例如:在图 1-5 所示的 n 端元件中,若已知 $u_{12}(t_1) = 20 \text{ V}$,则表明在 t_1 时刻,1 点的电位比 2 点的电位高 20 V。若 $u_{12}(t_2) = -10 \text{ V}$,则表明在 t_2 时刻,1 点的电位比 2 点的电位低 10 V,或 2 点电位比 1 点电位高 10 V。对电路中同一电压规定相反参考极性时,相应的电压表达式相差一个负号,即

$$u_{ab} = -u_{ba} \quad (1-5)$$

综上所述,在分析电路时,必须对电流变量规定电流参考方向,对电压变量规定参考极性。对于二端元件而言,电压和电流参考方向的选择有四种可能的方式,如图 1-6 所示。为了电路分析和计算的方便,常采用电压、电流的关联参考方向。也就是说,当电压的参考极性已经规定时,电流参考方向从“+”指向“-”;当电流参考方向已经规定时,电压参考极性的“+”号标在电流参考方向的进入端,如图 1-6(a)、(b)所示。在二端元件的电压、电流采用关联参考方向

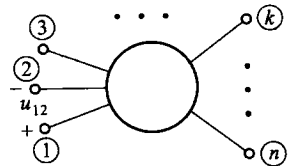
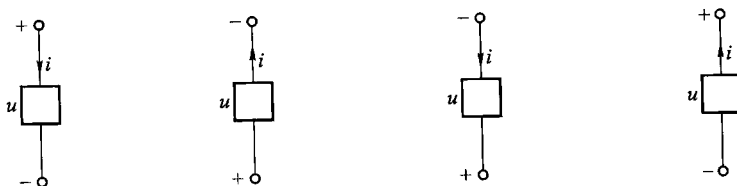


图 1-5 n 端元件



(a) 关联参考方向 (b) 关联参考方向 (c) 非关联参考方向 (d) 非关联参考方向

图 1-6 二端元件电流、电压的参考方向

的条件下,在电路图上可以只标明电流参考方向,或只标明电压的参考极性。除特别声明外,本书今后均采用电压、电流的关联参考方向。

三、电功率

下面讨论图 1-7 所示二端元件和二端网络的功率。当电压、电流采用关联参考方向时,二端元件或二端网络吸收的功率为

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

与电压、电流是代数量一样,功率 p 也是一个代数量。当 $p(t) > 0$ 时,表明该时刻二端元件实际吸收(消耗)功率;当 $p(t) < 0$ 时,表明该时刻二端元件实际发出(产生)功率。由于能量必须守恒,对于一个完整的电路来说,在任一时刻,所有元件吸收功率的总和必须为零。若电路由 b 个二端元件组成,且全部采用关联参考方向,则

$$\sum_{k=1}^b u_k i_k = 0 \quad (1-7)$$

二端元件或二端网络从 t_0 到 t 时间内吸收的电能为

$$W(t_0, t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad (1-8)$$

功率的 SI 单位是瓦[特](W)。吸收功率为 1 W 的用电设备,在 1 s 时间内消耗 1 J 的电能。1 000 W 的用电设备,在 1 小时(h)内消耗 1 kW·h 的电能。

表 1-3 列出部分国际单位制的单位,称为 SI 单位。在实际应用中,若这些 SI 单位太大或太小时,可以加上表 1-4 中的国际单位制的词头,构成 SI 的十进倍数或分数单位。例如

$$2 \text{ mA} = 2 \times 10^{-3} \text{ A} \quad 2 \text{ } \mu\text{s} = 2 \times 10^{-6} \text{ s} \quad 8 \text{ kW} = 8 \times 10^3 \text{ W}$$

表 1-3 部分国际单位制的单位(SI 单位)

量的名称	单位名词	单位符号	量的名称	单位名词	单位符号
长度	米	m	电荷[量]	库[仑]	C
时间	秒	s	电位、电压	伏[特]	V
电流	安[培]	A	电容	法[拉]	F
频率	赫[兹]	Hz	电阻	欧[姆]	Ω
能量、功	焦[耳]	J	电导	西[门子]	S
功率	瓦[特]	W	电感	亨[利]	H

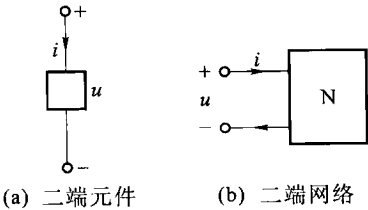


图 1-7 二端元件和二端网络

表 1-4 部分国际单位制词头

因数	10^9	10^6	10^3	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}
名称	吉	兆	千	毫	微	纳	皮
符号	G	M	k	m	μ	n	p

例 1-1 在图 1-8 电路中,已知 $U_1 = 1 \text{ V}$, $U_2 = -6 \text{ V}$, $U_3 = -4 \text{ V}$, $U_4 = 5 \text{ V}$, $U_5 = -10 \text{ V}$, $I_1 = 1 \text{ A}$, $I_2 = -3 \text{ A}$, $I_3 = 4 \text{ A}$, $I_4 = -1 \text{ A}$, $I_5 = -3 \text{ A}$ 。试求:(1) 各二端元件吸收的功率;(2) 整个电路吸收的功率。

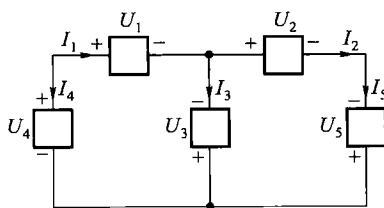


图 1-8 例 1-1

解:(1) 根据式(1-6),各二端元件吸收的功率分别为

$$P_1 = U_1 I_1 = (1 \text{ V}) \times (1 \text{ A}) = 1 \text{ W}$$

$$P_2 = U_2 I_2 = (-6 \text{ V}) \times (-3 \text{ A}) = 18 \text{ W}$$

$$P_3 = -U_3 I_3 = -(-4 \text{ V}) \times (4 \text{ A}) = 16 \text{ W}$$

$$P_4 = U_4 I_4 = (5 \text{ V}) \times (-1 \text{ A}) = -5 \text{ W} (\text{发出 } 5 \text{ W})$$

$$P_5 = -U_5 I_5 = -(-10 \text{ V}) \times (-3 \text{ A}) = -30 \text{ W} (\text{发出 } 30 \text{ W})$$

由于元件 3 和元件 5 的电压、电流采用的是非关联参考方向,因此计算吸收功率的公式中增加了一个负号,即 $P = -UI$ 。

(2) 整个电路吸收的功率为

$$\sum_{k=1}^5 P_k = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = (1 + 18 + 16 - 5 - 30) \text{ W} = 0$$

§ 1-3 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是任何集总参数电路都适用的基本定律,它包括电流定律和电压定律。基尔霍夫电流定律描述电路中各电流的约束关系,基尔霍夫电压定律描述电路中各电压的约束关系。

一、电路的几个名词

电路由电路元件相互连接而成。在叙述基尔霍夫定律之前,先介绍电路的几个名词:

(1) 支路:一个二端元件视为一条支路,其电流和电压分别称为支路电流和支路电压。

图 1-9 电路共有 6 条支路。

(2) 结点:电路元件的连接点称为结点。图 1-9 电路中, a、b、c 点是结点, d 点和 e 点间由理想导线相连, 应视为一个结点。该电路共有 4 个结点。

(3) 回路:由支路组成的闭合路径称为回路。图 1-9 电路中 $\{1, 2\}$ 、 $\{1, 3, 4\}$ 、 $\{1, 3, 5, 6\}$ 、 $\{2, 3, 4\}$ 、 $\{2, 3, 5, 6\}$ 和 $\{4, 5, 6\}$ 都是回路。

(4) 网孔:将电路画在平面上内部不含有支路的回路, 称为网孔。图 1-9 电路中的 $\{1, 2\}$ 、 $\{2, 3, 4\}$ 和 $\{4, 5, 6\}$ 回路都是网孔。网孔与平面电路^①的画法有关, 例如将图 1-9 电路中的支路 1 和支路 2 交换位置, 则三个网孔变为 $\{1, 2\}$ 、 $\{1, 3, 4\}$ 和 $\{4, 5, 6\}$ 。

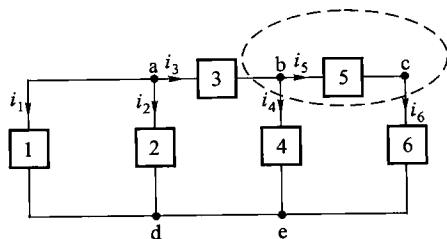


图 1-9 一个具有 6 条支路和 4 个结点的电路

二、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law), 简称为 KCL, 它陈述为: 对于任何集总参数电路的任一结点, 在任一时刻, 流出该结点全部支路电流的代数和等于零, 其数学表达式为

$$\sum i = 0 \quad (1-9)$$

对电路某结点列写 KCL 方程时, 流出该结点的支路电流取正号, 流入该结点的支路电流取负号。例如: 对图 1-9 电路中的 a、b、c、d 4 个结点写出的 KCL 方程分别为

$$\begin{aligned} i_1 + i_2 + i_3 &= 0 \\ -i_3 + i_4 + i_5 &= 0 \\ -i_5 + i_6 &= 0 \\ -i_1 - i_2 - i_4 - i_6 &= 0 \end{aligned}$$

KCL 方程是以支路电流为变量的常数线性齐次代数方程, 它对连接到该结点的各支路电流施加了线性约束。如将结点 b 的 KCL 方程改写为

$$i_4 = i_3 - i_5$$

这表明支路电流 i_4 是连接到结点 b 的其余支路电流 i_3 和 i_5 的代数和, 这是一种线性约束关系。一般来说, 流出 (或流入) 电路中某结点的一条支路电流, 等于流入 (或流出) 该结点的其余支路电流的代数和。若已知电路中某些支路电流, 根据 KCL 的这种约束关系可以求出另一些支路电流。例如: 图 1-9 电路中, 若已知 $i_1 = 1 \text{ A}$, $i_3 = 3 \text{ A}$ 和 $i_5 = 5 \text{ A}$, 则由 KCL 可求得

$$\begin{aligned} i_2 &= -i_1 - i_3 = -1 \text{ A} - 3 \text{ A} = -4 \text{ A} \\ i_4 &= i_3 - i_5 = 3 \text{ A} - 5 \text{ A} = -2 \text{ A} \\ i_6 &= i_5 = 5 \text{ A} \end{aligned}$$

若 i_1 , i_3 和 i_5 的量值增加一倍, 变为 $i_1 = 2 \text{ A}$, $i_3 = 6 \text{ A}$ 和 $i_5 = 10 \text{ A}$, 则 i_2 , i_4 和 i_6 变为 $i_2 = -8 \text{ A}$, $i_4 = -4 \text{ A}$ 和 $i_6 = 10 \text{ A}$, 也相应增加了一倍。不受 KCL 约束的一组电流 (如 i_1 , i_3 和 i_5), 称为独立电流变量; 受 KCL 约束由独立电流确定的电流 (如 i_2 , i_4 和 i_6), 称为非独立电流变量。显

① 平面电路是指能够画在一个平面上而没有支路交叉的电路。

然,选择独立电流变量的方案有多种。

KCL 不仅适用于结点,也适用于任何假想的封闭面,即流出任一封闭面的全部支路电流的代数和等于零。例如对图 1-9 电路中虚线表示的封闭面,写出的 KCL 方程为

$$-i_3 + i_4 + i_6 = 0$$

它可由该封闭面内结点 b 和 c 的 KCL 方程相加而得到证明。结点的 KCL 方程可以视为封闭面只包围一个结点的特殊情况。根据封闭面 KCL 对支路电流的约束关系可以得到:流出(或流入)封闭面的某支路电流,等于流入(或流出)该封闭面的其余支路电流的代数和。由此可以断言:当两个单独的电路只用一条导线相连接时(如图 1-10 所示),此导线中的电流 i 必定为零。

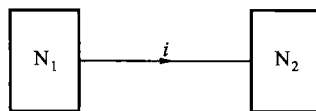


图 1-10 用一条导线相连的两个电路

在任一时刻,流入任一结点或封闭面全部支路电流的代数和等于零,意味着由全部支路电流带入结点或封闭面内的总电荷量为零,这说明 KCL 是电荷守恒定律的体现。

三、基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law),简称为 KVL,陈述为:对于任何集总参数电路的任一回路,在任一时刻,沿该回路全部支路电压的代数和等于零,其数学表达式为

$$\sum u = 0 \quad (1-10)$$

在列写回路 KVL 方程时,其电压参考方向与回路绕行方向相同的支路电压取正号,与绕行方向相反的支路电压取负号。

例如对图 1-11 电路的三个回路,沿顺时针方向绕行回路一周,写出的 KVL 方程为

$$u_2 + u_4 + u_3 - u_1 = 0 \quad (1-11)$$

$$u_5 - u_4 - u_2 = 0 \quad (1-12)$$

$$u_5 + u_3 - u_1 = 0 \quad (1-13)$$

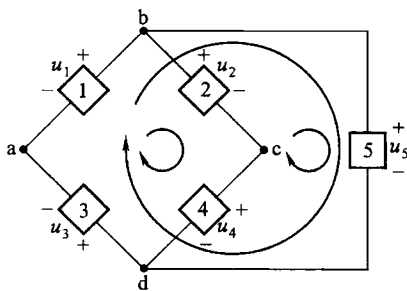


图 1-11 具有 5 条支路和 4 个结点的电路

KVL 方程是以支路电压为变量的常系数线性齐次代数方程,它对支路电压施加了线性约束。例如:由式(1-12)和式(1-13)可得到

$$u_5 = u_2 + u_4$$

$$u_5 = u_1 - u_3$$

这表明支路电压 u_5 是与它处于同一回路的其余支路电压的线性组合。也就是说,任一支路电压等于从其“+”端沿任一路径绕行到“-”端所经过的各支路电压的代数和。利用 KVL 的这种约束关系,已知电路的某些支路电压可求得另一些支路电压。例如图 1-11 电路中,若已知 $u_1 = 1\text{ V}$, $u_2 = 2\text{ V}$ 和 $u_5 = 5\text{ V}$,则由 KVL 可求得

$$u_3 = u_1 - u_5 = 1\text{ V} - 5\text{ V} = -4\text{ V}$$

$$u_4 = -u_2 + u_5 = -2\text{ V} + 5\text{ V} = 3\text{ V}$$

若 u_1 , u_2 和 u_5 的量值增加一倍变为 $u_1 = 2\text{ V}$, $u_2 = 4\text{ V}$ 和 $u_5 = 10\text{ V}$,则 u_3 和 u_4 变为 $u_3 = -8\text{ V}$, $u_4 = 6\text{ V}$ 。不受 KVL 约束的一组电压 u_1 , u_2 和 u_5 ,称为独立电压变量;受 KVL 约束由独立电压确定的电压 u_3 和 u_4 ,称为非独立电压变量。显然,选择独立电压变量的方案也有多种。

KVL 可以从由支路组成的回路,推广到任一闭合的结点序列,即在任一时刻,沿任一闭合结点序列的各段电压(不一定是支路电压)的代数和等于零。对图 1-11 电路,闭合结点序列 abca 和 abda 列出的 KVL 方程分别为

$$u_{ab} + u_{bc} + u_{ca} = 0$$

$$u_{ab} + u_{bd} + u_{da} = 0$$

若将式中各电压表示成电位差,方程的正确性即可得到证明。以上两式可以改写为

$$u_{ab} = -u_{ca} - u_{bc} = u_{ac} + u_{cb}$$

$$u_{ab} = -u_{da} - u_{bd} = u_{ad} + u_{db}$$

这表明电路中任两结点间电压 u_{ab} 等于从 a 点到 b 点的任一路径上各段电压的代数和。

由支路组成的回路可以视为闭合结点序列的特殊情况。沿电路任一闭合路径(回路或闭合结点序列)各段电压代数和等于零,意味着单位正电荷沿任一闭合路径移动时能量不能改变,这表明 KVL 是能量守恒定律的体现。

综上所述,可以看到:

- (1) KCL 对电路中任一结点(或封闭面)的各支路电流施加了线性约束。
- (2) KVL 对电路中任一回路(或闭合结点序列)的各支路电压施加了线性约束。
- (3) KCL 和 KVL 适用于任何集总参数电路,与电路元件的性质无关。

§ 1-4 电 阻 元 件

集总参数电路(模型)由电路元件连接而成。电路元件是为建立实际电气器件的模型而提出的一种理想元件,它们都有精确的定义。按电路元件与外电路连接端点的数目,电路元件可分为二端元件、三端元件、四端元件等。本节先介绍一种常用的二端电阻元件。

一、二端电阻

在物理课中学过的遵从欧姆定律的电阻,是一种最常用的线性电阻元件(简称电阻)。随着电子技术的发展和电路分析的需要,有必要将线性电阻的概念加以扩展,提出电阻元件的一般