



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

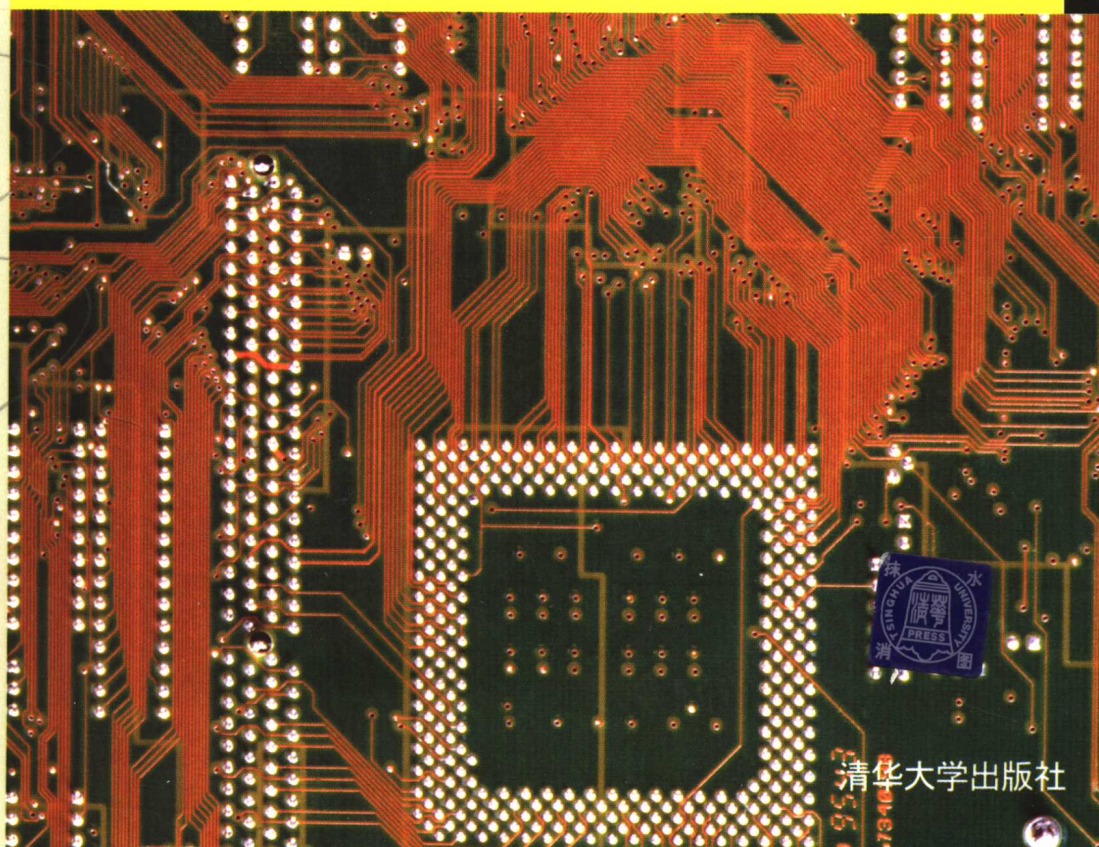
湖北省精品课程教材

国家工科电工电子教学基地教材

电路原理

汪建 编著

(上册)



清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

湖北省精品课程教材

国家工科电工电子教学基地教材

TM13/184

:1

2007

电路原理 (上册)

汪 建 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了电路理论的基本概念、基本原理和基本分析方法。全书共分上下两册 15 章。上册内容包括:电路的基本定律和电路元件;电路分析方法——等效变换法、电路方程法、运用电路定理法;正弦稳态分析;谐振电路与互感耦合电路。下册内容包括:三相电路;非正弦周期性稳态电路分析;双口网络;暂态分析方法——经典分析法、复频域分析法、状态变量分析法;均匀传输线的稳态分析和暂态分析;非线性电路分析概论。

从培养学生分析、解决电路问题的能力出发,通过对电路理论课程中重点、难点及解题方法的详细论述,本书将基本内容的叙述和学习方法的指导有机融合,例题丰富,语言严谨流畅,便于自学。

本书可作为高等院校电气、电子类专业电路理论课程的教材,也可供有关科技人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

电路原理(上册)/汪建编著.——北京:清华大学出版社,2007.12

ISBN 978-7-302-15551-5

I. 电… II. 汪… III. 电路理论 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 096729 号

责任编辑:刘 彤

责任校对:李建庄

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社 总 机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印 刷 者:北京密云胶印厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:25.25 字 数:607 千字

版 次:2007 年 12 月第 1 版 印 次:2007 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:34.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:021877-01

前 言

电路理论是电类各专业重要的技术基础课。本课程的教学目的是使学习者懂得电路的基础理论,掌握电路分析的基本方法,为后续课程的学习及今后从事电类各学科领域的学习和工作打下坚实的基础。毋庸置疑,在电类专业领域的学习、研究过程中,电路理论知识的掌握程度至关重要,因此,学好这门课程的重要性不容低估。

电路理论的内容丰富,知识点多,概念性强。学习本课程不仅要具有良好的物理学有关内容的基础,也需要掌握高等数学的相关理论。可以说,清晰的物理概念和扎实的数学基础是学好电路理论的基本保证。通过本课程的学习,学生能够了解高等数学的理论在工程专业领域的应用方法,可以体会到数学工具在研究和解决专业理论和工程实际问题时的重要作用。

学生对本课程内容的掌握,可归结为综合运用所学的知识分析求解具体电路的能力。而这一能力的培养和提高,有赖于对基本概念、基本原理的准确理解,对基本方法的熟练掌握。因此,在本书的编写中,除参照高等学校对“电路”课程教学的基本要求,兼顾电气类和电子类专业的需要,突出对基本内容的叙述外,还刻意加强了对学习方法特别是解题方法的指导。具体的做法是:

(1) 强调对基本概念的正确理解。对重点、难点内容用注释方式予以较详尽的说明和讨论;对在理解和掌握上易于出错之处给予必要的提示。

(2) 重视对基本分析方法的训练和掌握。对各种解题方法给出了具体步骤,并用众多实例说明这些解题方法的具体应用,且许多例题同时给出多种解法,供读者比较。

(3) 注意培养学生独立思考、善于灵活运用基本概念和方法分析解决各种电路理论问题的能力。在每一章的最后均安排有“例题分析”,通过对一些典型的或综合性较强、具有一定难度的例题的精讲,进一步讨论各种电路分析方法的灵活应用,以启迪思维,开阔思路,达到融会贯通、举一反三的效果。

本书的内容采用授课式语言叙述,十分便于自学。

全书共分上、下两册 15 章,本书为上册。本书的出版得到了清华大学出版社的大力支持,在此深表谢意。

限于编者的学识水平,书中的疏漏和不当之处在所难免,希望读者批评指正。

编 者

2007 年 10 月于华中科技大学

目 录

第 1 章 电路的基本定律和电路元件	1
1.1 电路的基本概念	1
1.2 电流、电压及其参考方向	4
1.3 功率和能量	7
1.4 电路的基本定律——基尔霍夫定律	9
1.5 奇异函数及波形的表示法	12
1.6 电路元件的分类	22
1.7 电阻元件	24
1.8 电容元件	29
1.9 电感元件	35
1.10 独立电源	38
1.11 受控电源	40
1.12 运算放大器	43
1.13 例题分析	47
习题	52
第 2 章 电路分析方法之一——等效变换法	59
2.1 等效电路和等效变换的概念	59
2.2 电阻元件的串联和并联	61
2.3 电阻元件的混联	64
2.4 电源的等效变换	67
2.5 无伴电源的转移	73
2.6 线性电阻的 Y 形连接和 Δ 形连接的等效变换	76
2.7 受控电源的等效变换	79
2.8 求入端等效电阻的几种特殊方法	83
2.9 动态元件的串联和并联	90
2.10 例题分析	99
习题	108
第 3 章 电路分析方法之二——电路方程法	114
3.1 网络图论的基本概念	114
3.2 有向图的矩阵描述	119
3.3 电路方程中的独立变量	126

3.4	基尔霍夫定律的矩阵表示式	128
3.5	2b 变量分析法	133
3.6	支路分析法	140
3.7	节点分析法	148
3.8	网孔分析法	158
3.9	回路分析法	164
3.10	割集分析法	169
3.11	对偶原理和对偶电路	176
3.12	例题分析	179
	习题	186
第4章	电路分析方法之三——运用电路定理法	193
4.1	叠加定理	193
4.2	替代定理	199
4.3	等效电源定理	202
4.4	特勒根定理	210
4.5	互易定理	214
4.6	最大功率传输定理	217
4.7	中分定理	221
4.8	例题分析	225
	习题	235
第5章	正弦稳态电路分析	242
5.1	正弦交流电的基本概念	242
5.2	正弦量的相量表示	247
5.3	基尔霍夫定律的相量形式	253
5.4	RLC 元件伏安关系式的相量形式	254
5.5	复阻抗和复导纳	261
5.6	正弦稳态电路的分析计算	266
5.7	相量图与波形图	272
5.8	正弦稳态电路中的功率	278
5.9	功率因数的提高	293
5.10	例题分析	297
	习题	307
第6章	谐振电路与互感耦合电路	317
6.1	串联谐振电路	317
6.2	并联谐振电路	328
6.3	一般谐振电路及其计算	334
6.4	耦合电感与电感矩阵	337

6.5 互感耦合电路的分析	345
6.6 耦合电感元件的去耦等效电路	349
6.7 两绕组耦合电感元件与空心变压器	354
6.8 全耦合变压器与理想变压器	357
6.9 理想变压器电路的计算	360
6.10 例题分析	364
习题	376
部分习题答案	384

第 1 章 电路的基本定律和电路元件

本章提要

本章介绍了电路的基本概念、电路的基本定律以及几种基本的电路元件。主要的内容有：电路和电路模型；电流、电压及其参考方向；基尔霍夫电流定律和电压定律；阶跃函数和冲激函数及不连续波形的表示法；电阻、电容和电感这三种理想的无源元件；独立电压源和独立电流源；受控电源和运算放大器。应予以强调，电路的基本定律和电路元件的特性是分析、求解电路的基本依据。

1.1 电路的基本概念

一、实际电路

电与现代社会息息相关，电在人们的生产、生活中几乎无处不在。电的作用是通过具体的电路实现的。所谓实际电路，是由用电设备或电器件用导线按一定的方式连接而成的电流的通路。

实际的电路千差万别，种类繁多。尽管各种电路的复杂程度相异，完成的功能亦不相同，但它们都是由电源或信号源、用电设备（又称负载）和中间环节这三部分构成的。电路中电源或信号源的作用是将其他形式的能量转化为电能或产生信号向负载输出；用电设备（负载）的作用是将电能转化为人们需要的其他形式的能量或信号；而中间环节（包括连接导线、开关等）用于将电源和负载相连，并加以控制，构成电流的通路以传输电能。如一个简单的手电筒电路，其电源为干电池，它将化学能转化为电能并提供给负载；手电筒的负载为小灯泡，它将电能转化为光能供人们使用；手电筒的金属外壳或金属连线起着连接导线的作用并附有开关，以便根据需要形成电流的通路使电能从电池传送到灯泡。

电路也称为电网络或网络。

不同的电路具有不同的功能。实际电路可实现如下功能之一：完成能量的转换、传输和分配，例如电力系统；实现对某种对象的控制，如电机运行控制电路；对信号进行加工处理，以获取所需的信号，例如通信网络；实现信息的存储及数学运算，典型的例子是计算机电路等。

二、电路模型

1. 理想电路元件

实际电路中的电气设备或元器件称为实际器件。当电路工作时，任何一个实际器件都将呈现出很复杂的电磁特性，其内部一般包含有能量的损耗、电场能量的储存和磁场能量的

储存等三种基本效应。并且这些效应交织在一起,使得直接对实际电路的分析计算变得非常困难。譬如一个电感线圈,当绕组通以电流后,将储存磁场能量;同时还因绕线电阻存在,出现发热损耗;以及因有匝间电容及层间电容而储存电场能量。

为便于对实际电路进行分析研究,有必要对实际器件进行理想化处理。事实上,在一定的条件下,一个实际器件中的某些电磁效应处于次要地位,将其忽略不计也可使理论分析结果与实际情况十分近似,不会有本质的差异。鉴于此,提出了理想化电路元件的概念,用它们或它们的组合来表示实际器件。

所谓理想化的电路元件是只具有一种电磁性质的电路元件,并且用数学公式予以严格定义。例如理想线性电阻元件的定义式为 $u= Ri$,即众所周知的欧姆定律。理想化的电路元件也称为理想元件或电路元件。应注意,实际中并不存在只呈现单一电磁性质的元器件,电路元件是理想化的元件模型,是一种科学抽象。

2. 电路模型

由理想元件连接而成的电路称为电路模型,电路理论所研究的对象便是这种电路模型。电路模型用电路图表示,在电路图中各种电路元件采用国家标准规定的图形符号,图 1-1 是电路图的一个例子。

将实际电路或实际器件转化为电路模型的基本出发点是,必须客观地反映实际元器件的基本特性,即按照电路的工作条件,依据实际发生的能量效应和电磁现象,突出主要矛盾,忽略次要因素,用一些恰当的理想元件按一定方式连接所构成的电路模型去模拟、逼近实际情况。譬如对一个实际电感线圈,在低频的情况下,其电容效应相对较弱,可予以忽略,因此它的电路模型是一个电阻元件和一个电感元件串联而成的电路,如图 1-2(a)所示。而在高频时,线圈的匝间和层间电容将增大,这样就必须考虑电容效应,其电路模型需由电阻、电感和电容三个元件组合而成,如图 1-2(b)所示。

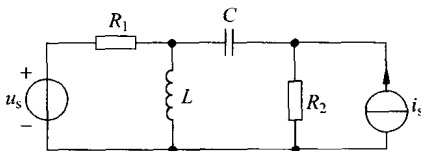


图 1-1 电路图示例

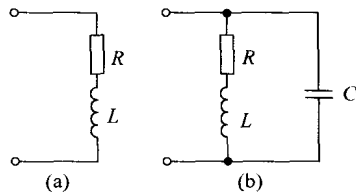


图 1-2 电感线圈的电路模型

由上述可见,对实际电路建立电路模型是理论分析所必需的,同时也是一种满足一定准确度的近似方法。

三、集中参数电路和分布参数电路

任何电路中都存在能量损耗、电场储能和磁场储能这三种基本效应。人们用电阻参数反映能量损耗,用电容参数和电感参数表征电路的电场储能及磁场储能性质。严格地讲,实际电路中的上述三种基本效应具有连续分布的特性,因此反映这些能量过程的电路参数也是连续分布的,或者说电路的各处既有电阻,也有电容和电感,这样的电路称为分布参数电路。从数学的观点看,分布参数电路中的电磁量是时间和空间坐标的函数,因而描述电路的是偏微分方程。

实际电路及其元器件中的电磁现象及过程与其几何尺寸密切相关。当电路中电压和电流的最高频率所对应的波长远大于电路器件及电路的各向尺寸时,电路参数的分布性对电路性能的影响程度很小,可认为能量损耗、电场储能和磁场储能分别集中在电阻元件、电容元件和电感元件中进行,并将电路元件赋以确切的参数,这样的电路称为集中参数电路。描述一般集中参数电路的是常微分方程,对于电阻性电路,其对应的则是实数代数方程。采用集中参数电路的概念也是一种近似方法,它给大多数实际电路的理论分析与计算带来了便利。同时,分布参数电路的研究也可借助于集中参数电路的分析方法。

若用 l 表示电路的最大几何尺寸, λ 表示电路中电流波或电压波的最高频率对应的波长,则当式(1-1)成立时,所研究的电路便可视作集中参数电路:

$$\lambda > 100l \quad (1-1)$$

式中 $\lambda = c/f$, f 为电路的最高工作频率, $c = 3 \times 10^8 \text{ km/s}$, 为电磁波的传播速度。

如频率 $f = 50 \text{ Hz}$ 的工频正弦交流电,其波长 $\lambda = c/f = 6000 \text{ km}$,而一般用电设备及电路的尺寸远小于这个数值,因而相应的电路视为集中参数电路处理是完全可行的。但对于电力传输线(高压输电线路)而言,其长度可达几百千米甚至上千千米,与电路工作频率的波长处于同一数量级,若将其当作集中参数电路,将导致不良或是错误的结果。又如在高频电子电路中,信号频率的波长为米,甚至是毫米数量级,与电路和元器件的尺寸相当或更小,这样的电路只能按照分布参数电路来处理。

本书主要介绍集中参数电路的分析方法,在最后两章讨论分布参数电路。

四、电路中的几个术语

下面结合图 1-3 所示的电路,介绍电路中常用的几个重要名词。

1. 支路

电路中的每一个分支称为一条支路。如图 1-3 电路中的分支 baf 、 bd 、 df 、 bce 等均为支路。这样,该电路共有六条支路。此外,亦可将每一个二端元件(具有两个端钮的元件)、甚至一对开路端钮或者一段短接线视为一条支路。

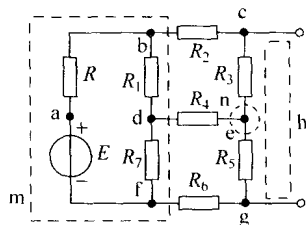
2. 节点

电路中两条或两条以上支路的联接点被称为节点。图 1-3 用以说明电路术语的电路节点的定义与电路中支路的定义有关。若认为图 1-3 电路中的每一个二端元件为一条支路,则该电路共有七个节点;若将电路中的每一个分支视为一条支路,则该电路只有 b 、 d 、 e 、 f 四个节点。

电路中亦有“广义节点”的概念。所谓“广义节点”是指电路中的任一封闭面,如图 1-3 中由虚线构成的闭合路径 m 、 n 便是两个封闭面。“汇集”于每一个广义节点的支路为虚线(即闭合面)所切割的支路,如“汇集”于广义节点 m 的有 bc 、 de 、 fg 等三条支路。要注意构成广义节点的虚线(即封闭面)只能对任一支路切割一次。显然,“节点”是“广义节点”的特例,其封闭面只包围一个节点,仅切割与该节点相连的支路,如广义节点 n 就是节点 e 。

3. 回路

电路中从任一节点出发,经过某些支路和节点,又回到原来的起始节点(所有的节点和支路只能通过一次)的任一闭合路径被称为回路。如图 1-3 所示电路中的路径 $bcedb$ 、



degfd、bcegfdb 等都是回路,该电路共有七个回路。

回路不一定要全部由支路构成,也可以包括虚拟路径,如在图 1-3 中的回路 chgec 便包括了虚拟路径 chg,这种回路称为虚拟回路。

回路的特例是“网孔”。所谓“网孔”是指在回路内部不含有支路的回路。如图 1-3 中的回路 bcedb 便是一个网孔;但回路 bcegfdb 不是网孔,因为在该回路内部有一条 de 支路。网孔又分为“内网孔”和“外网孔”。外网孔是指由电路最外沿的支路所形成的闭合路径。如图 1-3 中的路径 abcegfba 构成一个外网孔,该电路有三个内网孔和一个外网孔。网孔的概念只适用于所谓的“平面”电路。

4. 平面电路和非平面电路

若一个电路能画在平面上且不致有任何两条支路在非节点处交叉(即交叉而不相连接的情况),这种电路被称为平面电路,否则称为非平面电路。图 1-4(a)所示的电路是一个非平面电路。在该电路中出现了 R_8 支路和 R_9 支路交叉而不相联接的情况。但图 1-4(b)所示电路不是非平面电路,这是因为它能被改画为图 1-4(c)所示的电路,在此电路中, R_5 和 R_6 支路不再交叉。

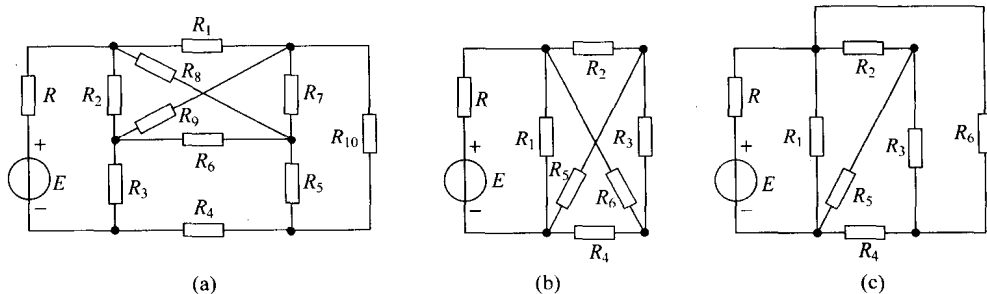


图 1-4 非平面电路和平面电路示例

1.2 电流、电压及其参考方向

电流和电压是描述电路特性的两个基本物理量,它们也是电路分析的主要求解对象。这两个物理量在物理学中已有论述,下面对它们作简要的回顾,重点是介绍电流和电压的参考方向。

一、电流

大量电荷有规则的定向运动形成电流。为表征电流的强弱,引入电流强度的概念,它被定义为单位时间内通过导体横截面的电量,用符号 i 表示,即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

式中电荷量 q 的单位为库(C),时间 t 的单位为秒(s),则电流强度 i 的单位为安(培)(A)。实用中电流强度的单位还有千安(kA)、毫安(mA)和微安(μ A)等。

电流强度通常简称为电流。这样,电流这一术语既表示一种物理现象,同时也代表一种物理量。

电流是有流向的,习惯规定正电荷的运动方向为电流的正方向。一般情况下,电流是时

间 t 的函数,以小写字母 i 表示,称为瞬时电流。当电流的大小和方向为恒定时,称为直流电流,并可用大写字母 I 表示。

实际中的电流有传导电流、徙动电流和位移电流等三种类型。电流是按其形成方式的不同来分类的。传导电流是导电媒质中的自由电子或离子在电场作用下有规则地运动而形成的,如金属导体或电解液中的电流。徙动电流是由带电粒子在自由空间(真空或稀薄气体中)运动而形成的电流,典型的例子是电晕现象和真空电子管中的电流。徙动电流也称作对流电流或运流电流。位移电流是因电场的变化使得电介质内部的束缚电荷位移而形成的电流,例如电容器内部的电流。

二、电压和电位

电荷在电场中会受到力的作用。为衡量电场力作功的能力,引入“电压”这一物理量。电场中任意两点 a 、 b 间的电压被定义为库仑电场力将单位正电荷从 a 点移动至 b 点所作的功。设电量为 dq 的电荷由 a 点移动至 b 点时电场力作的功为 dW ,则 a 、 b 两点间的电压为

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

设能量 W 的单位为焦(J),电荷 q 的单位为库(C),则电压 u 的单位为伏(特)(V)。实用中,电压的单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)、微伏(μ V)等。

电压也可用电场强度 E 进行计算,其计算式为

$$u_{ab} = \int_{ab} E dl \quad (1-4)$$

上式中 ab 表示由 a 点经路径 l 至 b 点的线积分。式(1-4)是电压的又一定义式,由该式可见,电压 u_{ab} 的值只取决于点 a 、 b 的位置,与积分路径的选取无关。

电压是有极性的。若单位正电荷从 a 点移动至 b 点时电场力作了正功,则 a 点为正极性, b 点为负极性, $u_{ab} > 0$,此时 a 、 b 之间的这段电路将吸收能量。若单位正电荷从 a 点移动至 b 点时电场力作了负功,则 a 点为负极性, b 点为正极性, $u_{ab} < 0$,此时 a 、 b 间的这段电路将释放能量。电压 u_{ab} 采用的是双下标表示法,其前一个下标代表电压的起点,后一个下标为电压的终点,且 $u_{ab} = -u_{ba}$,表明两个下标的位置不可随意颠倒,需特别予以注意。

电场中任意两点间电压的大小与计算时所选取的路径无关,是一个重要的结论。与此结论对应的实际应用是,当用电压表测量电路中两点的电压时,无论连接电压表的导线如何弯曲,只要电压表所连接的电路中两点的位置不变,则表的读数不变。在进行理论计算时,若求解电压有多个路径,则应选取计算最便利的路径。

电压一般是时间 t 的函数,应以小写字母 u 表示,称为瞬时电压。当电压为恒定值时称为直流电压,可用大写字母 U 表示。

在电路分析中,常用到“电位”的概念。电路中某点的电位被定义为该点与电路中参考点之间的电压,因此在谈到电位的同时必须指出电路的参考点。参考点的电位显然为零。电位的单位与电压的单位相同。

电位的表示符号为 U 或 φ ,并常用单下标作为点的标记。例如若选电路中的某点 O 为参考点,则 a 点的电位可记为 U_a 或 φ_a ,这也意味着 $U_a = \varphi_a = U_{a(O)}$ 。

设电路中 a 、 b 两点的电位为 φ_a 和 φ_b ,则

$$\varphi_a - \varphi_b = U_{a(O)} - U_{b(O)} = U_{a(O)} - (-U_{(O)b}) = U_{a(O)} + U_{(O)b} = U$$

这个电压 U 是电场力移动单位正电荷从 a 点经 O 点至 b 点所作的功。前已指出, 电路中两点间的电压与电荷移动的路径无关, 因此 U 便是 a 、 b 两点间的电压。于是有

$$\varphi_a - \varphi_b = U_{ab} \quad (1-5)$$

这表明, 电路中任两点间的电压等于这两点的电位之差, 故电压又称为电位差。

若选择不同的参考点, 则电场中某点的电位将具有不同的值, 这表明电位是一个相对的量。但两点间的电压(电位差)却与参考点的选择无关, 它是一个确定的值。

在分析实际的电磁场或电路问题时, 往往需选择一个参考点。原则上讲, 参考点可任意选择, 但许多情况下应根据具体研究对象, 从便于分析的角度出发选择参考点。如在电磁场问题中, 通常是将无穷远处作为电位参考点; 而在电力系统中一般以大地为电位参考点; 在电子线路中往往把设备的外壳或公共接线端作为电位参考点。

三、电流和电压的参考方向

电流有流向, 习惯上规定正电荷的运动方向为电流的实际方向。电压有极性, 电压的实际方向是指由实际高电位点指向实际低电位点的方向。但除了结构极简单的电路可以较容易地确定电流、电压的实际方向外, 对于结构稍复杂的电路, 如图 1-5 所示的电路, 则很难不通过分析计算而直接判断出每一元件中的电流和大多数元件两端电压的实际方向。另外在交流电路中, 电流和电压的方向随时间而不断变化, 它们的实际方向在电路中不便于标示, 即便标示也无实际意义。

为了分析计算电路, 从而确定电流、电压的实际方向和数值的大小, 需建立电路的数学模型, 即列出必要的电路方程。当电流和电压的方向不确定时, 因无依据而不能列写电路方程。考虑到电流、电压的实际方向只有两种可能, 我们给各元件的电流和电压人为地假设一个方向, 并按此方向来建立电路方程。这一假设的方向称为“参考方向”。

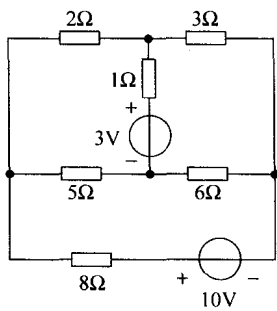


图 1-5 电路示例

应强调指出, 在电路理论中, 参考方向是一个极为重要的概念, 须予以特别重视。

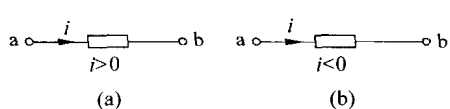


图 1-6 电流的参考方向

1. 电流的参考方向

在电路图中, 电流的参考方向用箭头表示, 如图 1-6 所示。在图 1-6(a) 中, i 为正值, 表明电流的实际方向与图中标示的方向(即参考方向)一致, 即电流确实从 a 端流入, 从 b 端流出; 在图 1-6(b) 中, i

为负值, 表明电流的实际方向与标示的方向相反, 即电流实际是从 b 端流入, 从 a 端流出。尽管图 1-6(b) 中电流的实际流向与假定方向不一致, 也无需将电流的参考方向予以改变, 因为参考方向和电流数值负号的结合便明确地指明了电流的实际方向。

图 1-6 中的矩形框代表电路中的一个任意的元件或多个元件的组合, 这是一种常用的表示方法。

2. 电压的参考方向

电压的参考极性称为电压的参考方向。在电路图中, 电压的参考方向有两种标示法。一种是用“+”、“-”符号表示, 即参考高电位端标以符号“+”, 参考低电位端标以符号“-”。

另一种是用箭头表示,箭头由高电位端指向低电位端。两种表示法示于图 1-7 中。在该图中,若 $u > 0$,表明电压的实际极性和参考方向一致,即 a 为高电位端, b 为低电位端;若 $u < 0$,则情形与上面的刚好相反。

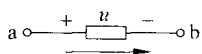


图 1-7 电压的参考方向

3. 电流和电压的关联参考方向

一般而言,电流和电压的参考方向可以独立地任意指定。若在选取两者的参考方向时,使电流从电压的“+”极流入,从“-”极流出,如图 1-8(a)所示,这种情形称为电流电压的关联参考方向,或称一致的参考方向。相反的情形称为电流电压的非关联参考方向,如图 1-8(b)所示。关联参考方向也可简称作“关联正向”。

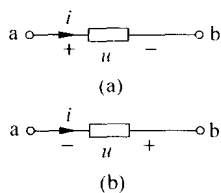


图 1-8 电流和电压的关联参考方向和非关联参考方向

4. 关于参考方向的说明

参考方向的概念虽然简单,但极为重要,它的应用贯穿在电路原理课程的始终,有必要再作几点说明。

(1) 对电路进行分析计算有赖于电流、电压参考方向的指定,因此在求解电路时,必须首先给出相关电流及电压的参考方向,而这一点容易被初学者忽视。务必记住,在分析计算电路时,需在电路图中标示出所涉及的所有电压、电流的参考方向。

(2) 参考方向是假设的方向,它不代表真实方向,但电量的真实方向是根据它和电量数值的正负号共同决定的。离开了参考方向,电量的实际方向将无从确定,电量数值的符号亦失去意义。

(3) 参考方向的给定具有任意性,这意味着标示参考方向可随心所欲。但应注意,参考方向一经指定并在电路图中标示后,则在分析计算过程中不得再变动。

(4) 在电路分析中,电流电压参考方向的标示可采用关联参考方向,这样做,可使问题的讨论更为方便。此时可在电路图中只标示电流的参考方向,或者只标示电压的参考方向。一般地,在仅标示某一电流(或电压)的参考方向而不加说明的情况下,可默认采用的是关联参考方向。

(5) 应当注意,关联或非关联参考方向是一个相对的概念,它是针对某段二端电路而言的。如在图 1-9 中,对二端电路 N_1 来说,电流和电压是关联参考方向,但对二端电路 N_2 而言,电流和电压是非关联参考方向。

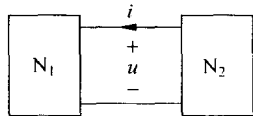


图 1-9 关联或非关联参考方向是一个相对的概念

1.3 功率和能量

一、电功率的定义

当任意一段二端电路通以电流后,该段电路将和外部电路发生能量的交换,或从外部电路吸收电能,或向外部电路送出电能。设在时间 dt 内吸收或送出的电能为 dW ,则把在单位时间内吸收或送出的电能定义为电功率,简称为功率,并用符号 p 表示,即

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

功率的单位为瓦(W),其他常用的单位有千瓦(kW)、毫瓦(mW)等。

二、电功率的计算

一般不直接采用 p 的定义式(1-6)计算功率,而转化用电压、电流计算。

设任意一段二端电路上的电压、电流取关联的参考方向,在电场力的作用下,电量 dq 从高电位端移动至低电位端,电场力所作的功为

$$dW = u dq$$

将上式代入式(1-6),有

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{u dq}{dt}$$

但 $i = \frac{dq}{dt}$,于是得

$$p = ui \quad (1-7)$$

式中 u 、 i 、 p 均为时间 t 的函数, p 称为瞬时功率。上式表明,功率为电压与电流的乘积。若电压、电流的单位分别为伏和安,则功率的单位为瓦。

在直流的情况下,式(1-7)又可写为

$$P = UI \quad (1-8)$$

在电压、电流为关联参考方向的情况下,正电荷是从高电位端转移至低电位端,库仑电场力要作正功,这意味着是将电能转化为了其他形式的能量,因此式(1-7)表示二端电路吸收的(电)功率。由于电压和电流均为代数量,则按式(1-7)计算所得功率值可正可负。若 p 值为正,表明电路确为吸收功率;若 p 值为负,则表明该段电路实为发出功率,即产生(电)功率向外部输出。

不难理解,若电压、电流为非关联参考方向,且仍约定 $p > 0$ 时为吸收功率, $p < 0$ 时为产生功率,则功率的计算式前应冠一负号,即

$$p = -ui \quad (1-9)$$

或

$$P = -UI \quad (1-10)$$

例 1-1 (1) 在图 1-10(a)中,已知 $U_1 = 10\text{V}$, $I_1 = -3\text{A}$,求此二端电路的功率,并说明是吸收功率还是发出功率;

(2) 在图 1-10(b)中,已知二端电路产生的功率为 -12W , $I_2 = 3\text{A}$,求电压 U_2 。

解 (1) 因图 1-1(a)中电压、电流为关联参考方向,则功率的计算式为

$$P_1 = U_1 I_1 = 10 \times (-3)\text{W} = -30\text{W}$$

该二端电路吸收的功率为 -30W ,表明实为发出(产生)功率 30W 。

(2) 在图 1-1(b)中,电压、电流为非关联参考方向,则功率的计算式为

$$P_2 = -U_2 I_2$$

电路产生的功率为 -12W ,即吸收功率 12W ,或 $P_2 = 12\text{W}$,于是有

$$U_2 = -\frac{P_2}{I_2} = -\frac{12}{3}\text{V} = -4\text{V}$$

由例题可见,计算功率时需注意以下两点:

(1) 应正确地选用功率计算式。采用公式 $p = ui$ 或 $p = -ui$ 中的

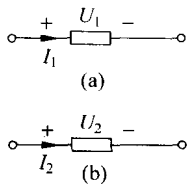


图 1-10 例 1-1 图

哪一个是根据电压、电流的参考方向来决定的。当 u, i 为关联参考方向时, 用公式 $p = ui$; 当 u, i 为非关联参考方向时, 用公式 $p = -ui$ 。

(2) 应正确地确定 p 值的正负号。当电路吸收正功率(或发出负功率)时, p 取正值; 当电路产生正功率(或吸收负功率)时, p 为负值。

前述功率的计算是以电路吸收功率(即 p 为正值时, 元件实为吸收功率)为前提。若以发出功率(即约定 p 值为正时实为产生功率)为前提进行计算, 则功率的计算式为

$$p = ui \quad (\text{非关联参考方向时})$$

$$p = -ui \quad (\text{关联参考方向时})$$

为避免混乱, 在本书中约定按吸收功率这一前提进行计算, 与此相对应, 约定在不予以说明时, $p > 0$ 时一律表示电路实际吸收正功率, $p < 0$ 时一律表示电路实际发出正功率。

三、能量及电路的无源性、有源性

设任意二端电路的电压、电流为关联参考方向, 由式(1-6)和式(1-7)可得该电路从 t_1 到 t_2 的时间段内吸收的电能为

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p dt = \int_{t_1}^{t_2} u i dt \quad (1-11)$$

式中电压的单位为伏(V), 电流的单位为安(A), 功率的单位为瓦(W), 则电能的单位为焦(J)。实用中电能的一个常用单位为 $1\text{kW} \cdot \text{h}$ (千瓦时), 且 $1\text{kW} \cdot \text{h} = 3600\text{kJ}$ 。1 千瓦时又称为 1 度。

若式(1-11)中积分下限取为 $-\infty$, “ $-\infty$ ”表示电路能量为零的一个抽象时刻, 则电路在任一时刻 t 所吸收的电能为

$$W = \int_{-\infty}^t p d\tau = \int_{-\infty}^t u i d\tau \quad (1-12)$$

若对于所有时间 t 和 u, i 的可能组合, 式(1-12)的积分值恒大于或等于零, 则称该电路是无源的, 否则电路就是有源的。

1.4 电路的基本定律——基尔霍夫定律

电路问题的研究依赖于对电路基本规律的认识和把握。电路是由元件相互连接而成的。电路的行为便取决于元件之间的连接关系或电路结构的总体情况以及各元件自身的特性。基尔霍夫定律体现的是电路结构关系的电路基本定律, 它反映了电路中各支路电压、电流之间的约束关系。基尔霍夫定律是整个电路理论的基础, 是分析计算电路的基本依据。该定律由基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律组成。

一、基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's Current Law)又称为基尔霍夫第一定律, 简称为 KCL, 它说明的是电路中任一封闭面或任一节点上各支路电流间的约束关系, 其具体内容是: 在任一瞬时, 流入电路中任一封闭面(或节点)的电流必等于流出该封闭面(或节点)的电流; 或表述为: 在任一瞬时, 流出任一封闭面(或节点)的电流的代数和恒等于零。KCL 的数学

表达式为

$$\sum_{k=1}^b i_k = 0 \quad (1-13)$$

式中, b 为所讨论的封闭面(或节点)相关联的支路数。若以流入封闭面(或节点)的电流为正, 则流出封闭面(或节点)的电流为负; 或以流出的电流为正, 则流入的电流为负。如对图 1-11(a)所示的电路, 写出节点 N 的 KCL 方程为

$$i_1 + i_2 + i_3 - i_4 = 0$$

对图 1-11(b)所示的电路, 写出封闭面的 KCL 方程为

$$i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = 0$$

KCL 是电荷守恒原理在电路中的具体体现, 是电流连续性原理的必然结果。

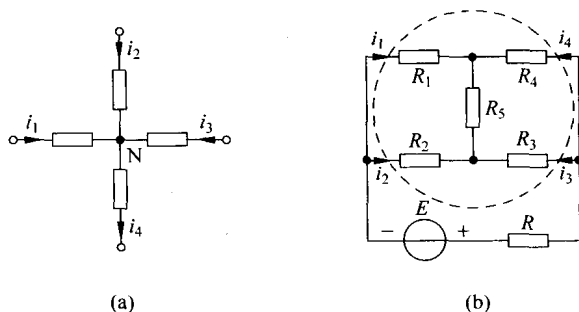


图 1-11 基尔霍夫电流定律的说明

二、基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law)又称为基尔霍夫第二定律, 简称为 KVL, 它说明的是电路中任一回路的各支路电压间的约束关系, 其具体内容是: 在任一瞬时, 沿电路中任一闭合回路的绕行方向, 各支路电压降的代数和等于零。KVL 的数学表达式为

$$\sum_{k=1}^b u_k = 0 \quad (1-14)$$

式中, b 为所讨论的回路含有的支路数, 与回路绕行方向一致的支路电压取正号, 反之则取负号。在图 1-12 所示的电路中, 回路的绕行方向(简称为回路方向)用箭头表示, 写出该回路的 KVL 方程为

$$U_1 - U_2 + U_3 - U_4 - U_5 - U_6 = 0$$

基尔霍夫电压定律是能量守恒原理在电路中的具体体现。

三、关于基尔霍夫定律的说明

(1) 基尔霍夫定律体现了集中参数电路中各支路电流、电压间的相互约束关系, 它在本质上揭示的是网络结构上的内在规律性。换句话说, 基尔霍夫定律的应用只决定于网络的具体结构, 而与各支路元件的电特性无关。因此, 只要是集中参数电路, 无论电路由什么样

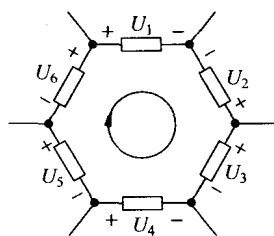


图 1-12 基尔霍夫电压定律的说明