

高等学校通信教材

电路分析基础

主 编 周 围

副主编 杨晓非 李实秋

人民邮电出版社

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/ 周围主编. —北京: 人民邮电出版社, 2003. 2

高等学校通信教材

ISBN 7-115-10905-2

. 电... . 周... . 电路分析 - 高等学校 - 教材 . TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 001451 号

内 容 简 介

本书比较系统地介绍电路的基本概念、基本理论和基本分析方法。

全书共分 10 章。内容包括:基础知识、等效变换分析法、线性网络的一般分析方法和网络定理、动态电路的瞬态分析、正弦稳态电路分析、耦合电感与变压器、线性电路的频率响应特性、双口网络、简单非线性电阻电路分析及电路的计算机辅助分析。配合正文,还有丰富的例题和习题,并附有相应的习题答案。

本书适用于通信、电子、计算机、自控类及相关专业本科教学使用,也可供有关科技人员参考。

高等学校通信教材 电路分析基础

主 编 周 围
副 主 编 杨晓非 李实秋
策划编辑 滑 玉
执行编辑 郭 玲

人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

读者热线 010 - 67129260

北京汉魂图文设计有限公司制作

北京隆昌伟业印刷有限公司印刷

新华书店总店北京发行所经销

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 24.5

字数: 597 千字

2003 年 2 月第 1 版

印数: 1 - 000 册

2003 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-10905-2/ TP · 3224

定价: 31.00 元

本书如有印装质量问题,请与本社联系 电话: (010)67129223

前 言

“电路分析基础”是高校电类相关专业的一门重要的专业基础课程,其基本理论已非常成熟。但是,一方面,近代电路理论仍在不断发展;另一方面,当今时代是知识“爆炸”的时代,新的学科领域和新的学科分支不断涌现,高校学生的知识结构已经发生变化,使得各高校讲授本门课程所允许的学时数普遍削减。因此,有必要调整传统教材的内容,以适应新的教学大纲和教学要求。

编者多年来一直从事“电路分析基础”、“电工学”、“电路与信号分析”、“信号与系统”、“电子电路”及“电路的计算机辅助分析”等课程的本、专科教学工作,在长期的教学体会和教学经验的基础上,编写了本教材。

在本教材的编写过程中,编者紧密结合通信技术,力图能体现一些信息学科的特色。在教材内容的安排上,既尊重传统的教学习惯和方法,又希望能体现一些教学改革的精神和思路;在继承传统的基本内容的同时,又力求能反映近代电路理论的最新发展和最新特点。教材中第一章至第七章是电路分析的基础部分,第八章双口网络可供不单设“网络理论”课程的专业选学,第九章非线性电阻电路分析是进一步学习“电子电路”的基础,可以作为与“电子电路”课程衔接的内容。另外,随着大规模集成电路和计算机技术的迅猛发展,对于大规模电路的分析与设计变得非常重要,因此教材第十章引入了电路的拓扑理论和电路的计算机辅助分析,并介绍了一些计算机辅助分析的算法。这些部分是加深的内容,可作为选学内容。

本教材始终以“循序渐进,讲透概念原理,打好电路基础”为宗旨,在讲授思路上淡化传统的根据电路形式和结构分类(如直流、交流电路;一阶、二阶电路)的讲授方法,强调根据分析方法分类(如两类约束关系、等效化简分析法、时域经典法及基本频域法——相量法等),避免了同一种电路(如一阶电路、二阶电路)由于工作条件不同(激励信号不同,暂态和稳态不同等)要采用不同的分析方法或不同电路(直流与交流)却可采用同样的一般分析方法(节点分析法与网孔法)所带来的概念上的混淆,从而更体现了“掌握基本分析方法”的教学要求,避免了电路结构方面的过多讨论,抓住了主要矛盾(分析方法)。

本书经集体讨论,分工执笔。周围编写了第一章和第四章,杨晓非编写了第五章和第六章,李实秋副教授编写了第三章和第九章,郑丹玲编写了第二章和第七章,徐昌彪博士编写了第八章和第十章。周围为本书的主编,负责对各章内容的修改、统稿和定稿,杨晓非和李实秋担任副主编。阙采兰副教授担任主审,汪载生教授、王继森副教授也参加了本书的审阅,并提出了许多宝贵意见。在此向以上各位专家及同事表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,诚望读者及各位专家指正。

编 者
2002年12月

目 录

| | |
|---------------------------------|-------|
| 第一章 基础知识..... | (1) |
| 1.1 电路与电路模型 | (1) |
| 1.2 电路分析的基本变量 | (3) |
| 1.3 电阻元件和独立电源元件 | (7) |
| 1.4 基尔霍夫定律..... | (10) |
| 1.5 受控源..... | (15) |
| 1.6 两类约束和 KCL, KVL 方程的独立性 | (17) |
| 习题 | (19) |
| 第二章 等效变换分析法 | (25) |
| 2.1 单口电阻网络中电阻的串联、并联和混联 | (25) |
| 2.2 实际电源的两种电路模型及其等效变换..... | (29) |
| 2.3 含源单口网络的等效化简..... | (32) |
| 2.4 电源转移法..... | (37) |
| 2.5 T- 变换 | (39) |
| 习题 | (41) |
| 第三章 线性网络的一般分析方法和网络定理 | (46) |
| 3.1 节点分析法..... | (46) |
| 3.2 回路分析法..... | (53) |
| 3.3 割集分析法..... | (58) |
| 3.4 叠加定理..... | (63) |
| 3.5 替代定理..... | (67) |
| 3.6 戴维南定理与诺顿定理..... | (70) |
| 3.7 互易定理..... | (78) |
| 3.8 电路的对偶性..... | (80) |
| 习题 | (81) |
| 第四章 动态电路的瞬态分析 | (85) |
| 4.1 电容元件与电感元件..... | (85) |
| 4.2 换路定律与初始值的计算..... | (91) |
| 4.3 一阶电路的自由响应和强制响应..... | (95) |
| 4.4 一阶电路的零输入响应..... | (98) |
| 4.5 一阶电路的零状态响应 | (103) |
| 4.6 一阶电路的全响应 | (106) |
| 4.7 求解一阶电路的三要素法 | (108) |

| | | |
|-----------------------------|----------------------------|--------------|
| 4.8 | 正弦信号激励下的一阶电路 | (111) |
| 4.9 | 阶跃信号与阶跃响应 | (113) |
| 4.10 | 微分电路与积分电路..... | (117) |
| 4.11 | 二阶电路的瞬态分析..... | (121) |
| 4.12 | 电路中发生强迫跃变时的瞬态分析..... | (128) |
| | 习题..... | (137) |
| 第五章 正弦稳态电路分析..... | | (149) |
| 5.1 | 正弦信号 | (149) |
| 5.2 | 正弦信号的相量表示法 | (156) |
| 5.3 | 正弦稳态电路的相量模型 | (161) |
| 5.4 | 阻抗与导纳 | (174) |
| 5.5 | 正弦稳态电路的相量分析法 | (187) |
| 5.6 | 正弦稳态电路的功率 | (194) |
| 5.7 | 三相电路 | (205) |
| | 习题..... | (214) |
| 第六章 耦合电感与变压器..... | | (223) |
| 6.1 | 耦合电感 | (223) |
| 6.2 | 耦合电感电路分析 | (228) |
| 6.3 | 空芯变压器 | (240) |
| 6.4 | 理想变压器 | (245) |
| 6.5 | 铁芯变压器 | (251) |
| | 习题..... | (257) |
| 第七章 线性电路的频率响应特性..... | | (262) |
| 7.1 | 网络函数与电路的频率特性 | (262) |
| 7.2 | RC电路的频率特性 | (263) |
| 7.3 | RLC串联谐振电路 | (267) |
| 7.4 | GLC并联谐振电路 | (272) |
| 7.5 | 非正弦周期信号激励下的稳态分析 | (275) |
| | 习题..... | (280) |
| 第八章 双口网络..... | | (283) |
| 8.1 | 双口网络方程与网络参数 | (283) |
| 8.2 | 双口网络的等效电路 | (290) |
| 8.3 | 双口网络的连接 | (291) |
| 8.4 | 双口网络的输入输出阻抗、影像阻抗与传输常数..... | (294) |
| 8.5 | 回转器与负阻抗变换器 | (296) |
| | 习题..... | (299) |
| 第九章 简单非线性电阻电路分析..... | | (301) |
| 9.1 | 含一个非线性电阻元件电路的分析 | (301) |
| 9.2 | 非线性电阻的串联、并联和混联..... | (304) |

| | |
|----------------------------|-------|
| 9.3 含理想二极管电路的分析 | (307) |
| 9.4 小信号分析 | (310) |
| 习题..... | (313) |
| 第十章 电路的计算机辅助分析..... | (316) |
| 10.1 概论..... | (316) |
| 10.2 元器件及特性..... | (317) |
| 10.3 电路的拓扑描述..... | (319) |
| 10.4 线性电路的直流和正弦交流稳态分析..... | (324) |
| 10.5 非线性电阻电路的直流分析..... | (340) |
| 10.6 电路的动态分析..... | (346) |
| 10.7 灵敏度与容差分析..... | (353) |
| 10.8 电路的最优化设计..... | (364) |
| 习题..... | (369) |
| 习题参考答案..... | (371) |
| 参考文献..... | (382) |

第一章 基础知识

由电阻、电容、电感等集中参数元件组成的电路称为集中电路。本书只对集中电路进行分析。

电路分析的主要任务是依据电气装置和电子设备中所产生的电磁现象和电磁过程来分析电路中的电流、电压以及它们之间的关系,研究电路定律、定理和电路的分析方法。这些知识是认识和分析实际电路的理论基础,更是分析和设计电路的重要工具。电路分析的理论基础体现了两种约束关系:一种是取决于元件性质的电压、电流之间的约束关系,称为元件的伏安关系;另一种是确定电路结构的联接方式的拓扑约束关系——基尔霍夫定律。本章先回顾电流、电压及电功率等基本概念,并介绍组成电路的基本元件及它们的伏安关系,以及电路的基本定律(KCL, KVL)和受控源。

1.1 电路与电路模型

1. 电路

“电路”概念我们并不陌生。在广泛用电的今天,电路可以说是随处可见,举目皆是,任何一个电气装置和电子设备都构成一种功能不同的电路。

一个干电池,一个灯泡,一个开关,三根导线,按照图 1-1(a)的方式连接起来,这就组成了一个简单的实际的手电筒电路图 1-1(b)所示为这个实际手电筒电路的电路模型。由此可对电路作如下的定义:若干个电气设备或器件,按照一定的方式连接起来,构成电流的通路,这个通路就称为电路,或网络。

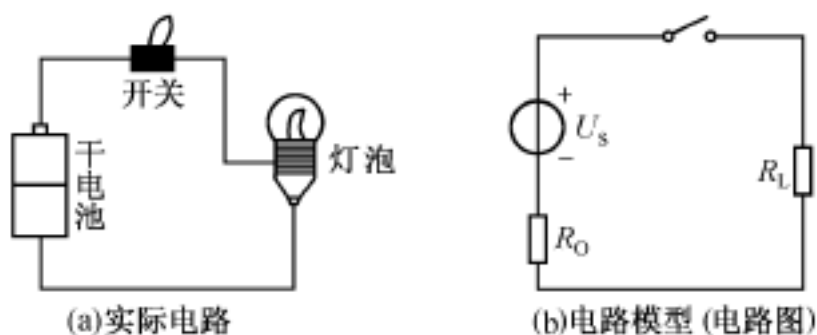


图 1-1 手电筒电路

在电路理论中,“电路”与“网络”这两个术语并无严格的区别,今后可以混用。

2. 电路的形式与功能

电路的形式多种多样。小的如将数以千计的电阻、电容、电感及晶体管集中在几个平方毫米内的集成电路;大的如现代电话网、现代通信网、数据信息网和计算机网;乃至于延伸到几百

上千公里以外的传输线路,它们都可以构成形式不同的电路,完成复杂的功能。

电路的功能基本上可以分成两大类。一类是用来实现电能的转换、传输和分配,例如电力系统。发电厂的发电机把热能或水能转换成电能,通过变压器、输电线等输送给各用电单位,用电单位又把电能转换成机械能、光能和热能等,这样构成了一个极为复杂的电路或网络。人们常把供给电能的设备称为电源,而把用电设备称为负载。电路的另一类功能则是在信息网络中,用来传递、储存、加工和处理各种电信号,如语言信号、图像信号和控制信号。图 1-2 所示的是通信网的基本组成框图。通常把输入电路的信号称为激励,而把经过电路传输或处理后的信号称为响应。

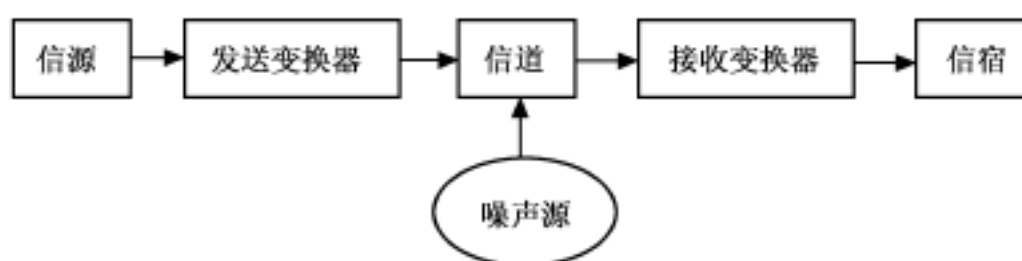


图 1-2 通信网的基本组成框图

3. 电路模型与集中电路

构成电路的设备和器件统称为电路部件,常用的电路部件有电池、发电机、信号发生器、电阻器、电容器、电感线圈、变压器、晶体管及集成电路等。电路一旦接通有电流通过时,每个部件都会同时出现好几种电磁现象。例如,当通过电池的电流增大时,电池的端电压会降低,电池会发热;电阻器通电后会发热,同时还有磁场产生;电流通过电感器时会产生磁场,电感器也要发热,匝间还有电场;当电容器极板间的电压变化时,电容器中有变化的电场和变化的磁场,介质中还有热损耗等。上述这些电磁现象对于每一个器件来说都是交织在一起的,连续分布在整个部件中,不能从空间上相互分开。因此,直接分析由电路部件组成的实际电路是比较复杂的,而在工程上也没有这样精确的必要。为此,我们必须在一定的条件下对电路部件抽象,加以理想化,忽略它的次要特性,用一个足以表征其主要性能的元件模型来表示,这种元件模型称为电路的理想元件。

电路理论分析的对象是由理想元件组成的电路模型,而不是实际电路。图 1-1(b)所示的是图 1-1(a)所示实际电路的电路模型。它将实际电路中的灯泡看作一个理想的电阻元件,忽略其极其微小的电感;新的干电池其内阻远小于灯泡电路,把它看作恒定的理想电压源;三根导线很短,其电阻完全可以忽略不计,看作理想导体。于是,理想电阻元件就构成了灯泡的模型,理想电压源就构成了干电池的模型,而理想导体则构成了连接导线的模型。

为了进一步描述和研究电路中出现的电磁现象,在这里还需要引入电路参数的概念。基本的电路参数有 3 个,即电阻、电容和电感。其中,电阻是用以表征消耗电能的电路参数,电容是用以表征形成电场和储积电场能的电路参数,电感则是用以表征形成磁场和储积磁能的电路参数。

有了电路参数的概念之后,对所谓电路部件的“理想化”就可以理解为:假设上述几种电磁现象可以分别研究,并将具有分布特性的电路参数集中起来,构成集中参数元件模型,这样每一种集中参数元件就只表示一种电磁特性,且其电磁特性还可以用数学方法精确地定义出流

过它的电流和端钮间的电压。基本的集中参数元件有电阻元件、电感元件和电容元件,分别用图 1-3 (a), (b) 和 (c) 来表示。图中标注的“ R ”、“ L ”和“ C ”既是元件的代表符号,也是元件的参数。在构成电路模型时,我们还需要两种理想电源元件——电压源元件和电流源元件。上述元件都具有两个端钮,称为二端元件(或单口元件)。除二端元件外,本书还将介绍四端元件(双口元件)——受控源、耦合电感和理想变压器等。



图 1-3 三种基本的集中参数元件

对于实际的电路,由它的电路特性构成的电路模型,称为电路的建模。有的电路的建模较简单,如上面的手电筒电路。有的器件或系统的建模则需要深入分析其中的物理现象才能做出它的电路模型。例如对交流发电机、半导体晶体管,便需要分别运用有关知识去建模,这是相应的专门课程的课题。

由集中参数元件组成的电路称为集中参数电路。

实际电路要能用集中参数电路去近似,需要满足以下条件:电路的几何尺寸 l 必须远小于电路工作频率所对应的电磁波的波长 λ , 即

$$l \ll \lambda = \frac{c}{f} \quad c = 3 \times 10^8 \text{ m/s (光速)}$$

例如工业用电的频率为 50 Hz,其波长为 6000 km,对于电子电路,其尺寸与这一波长相比都可以忽略不计,因此,可以采用集中参数概念。而对于远距离的通信线路和电力输电线则不满足上面条件,就不能用集中参数来分析。

本书只对集中参数电路进行分析。集中参数条件(即集中假设)是电路分析的重要假设,今后所讨论的电路的基本定律以及以基本定律为基础的各种分析方法都必须满足这一假设。

1.2 电路分析的基本变量

在电路分析中,电路的工作状态通常可以用电荷、磁链、电流、电压、功率和能量这一组时间函数的变量来描述,电路分析的任务在于解得这些变量。这些变量中最常用到的便是电流、电压和功率,物理课中对它们已有详细讨论,在这里只作简要的复习,着重说明电压、电流的参考方向和功率正、负号的意义。

1. 电流及其参考方向

电子和质子都是带电的粒子,电子带负电荷,质子带正电荷。带电粒子在外电场作用下定向移动形成电流。在电路分析中,电流不仅是一种能够通过热效应或磁效应觉察到的物理现象,而且是一个可以定量计算的物理量(在物理学中这个物理量一般称为电流强度)。电流用符号 i 表示。其定义为:单位时间内通过导体横截面的电荷量,或者说电流是电荷对时间的变化率。其表达式是

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

式中 q 代表电荷量,就是带电粒子携带的电荷量。在国际单位制(SI)中,电荷的单位是库

[仑],符号为 C;电流的单位是安(培),符号为 A。式中 t 表示时间,单位为秒,符号为 s。因此 $1 \text{ 安} = 1 \text{ 库/秒}$ 。

在电信技术中常用的电流单位还有:毫安(mA)和微安(μA)。 $1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A}$, $1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$ 。

电路中电流可以具有两个不同的方向,当带负电的电子在导体中沿某一方向作定向运动时,导体中的正电荷沿相反方向运动。历史上把电流的方向规定为正电荷沿导体运动的方向,沿用至今。

如果电流的大小和方向不随时间变化,则这种电流叫恒定电流,简称直流(Direct Current),简写作 dc 或 DC,可用符号 I 表示。如果大小和方向都随时间变化,则称为交变电流,简称交流(Alternating Current),简写作 ac 或 AC。

在简单电路中,例如图 1-1 所示电路,不难根据电源电压的极性直接在电路图中标出电流的方向。但对于复杂一些的电路,例如图 1-4 所示电路,就难以确定 R 支路中电流的实际方向。此外,如果电路中电流的实际方向不断地随时间改变,那就更不可能用一个固定的箭头来表示真实方向。这样的困难可用选定参考方向(Reference Direction)的办法来解决。

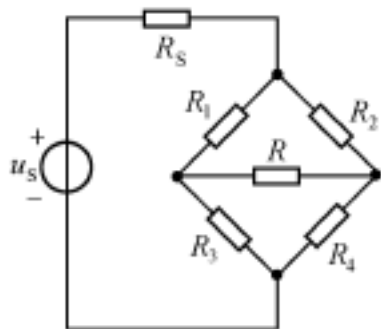


图 1-4 说明电流方向用图

参考方向是人为指定的,因为电流是代数量,可以是正值或负值。我们规定:当电流的实际方向与参考方向相同时,电流取正值;若相反,则取负值。这样,一旦指定了参考方向,就可以通过电流值的“正”或“负”来说明电流的实际方向。不言而喻,在没有指定参考方向的情况下,电流值的“正”、“负”是没有意义的。由于电流的参考方向就是电流取“正”值的方向,所以也称为正方向。注意:参考方向一经指定,在计算过程中就不能改变了。

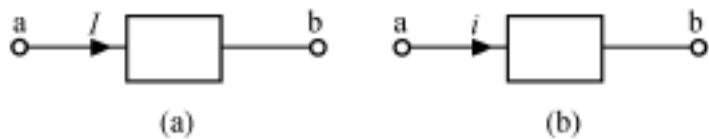


图 1-5 电流的参考方向

电流参考方向在电路图中的标注方法如图 1-5 所示。在计算式中,电流的参考方向可用带有下标的电流符号表示。如图 I_{ab} 表示 I 的参考方向由 a 指向 b,而 I_{ba} 则表示 I 的参考方向由 b 指向 a。对同一实际电流若指定的参考方向不同,计算结果差一“ - ”号。即

$$I_{ab} = - I_{ba} \quad (\text{交流: } i_{ab} = - i_{ba}) \quad (1-2)$$

【例 1-1】 如图 1-5 所示电路元件,设每秒有 5C(库仑)的正电荷由 a 端移到 b 端。

若电流的参考方向由 a b,求 $i = ?$

若电流的参考方向由 b a,再求 $i = ?$

若为负电荷,结果又如何?

解 因参考方向与正电荷的运动方向一致,故电流应取正值,即 $i = 5 \text{ A}$ 。

参考方向与正电荷的运动方向相反,故电流应取负值,即 $i = - 5 \text{ A}$ 。

负电荷由 a 转移到 b,相当于等量的正电荷由 b 转移到 a,因此,当参考方向由 a b 时, $i = - 5 \text{ A}$;而当参考方向由 b a 时, $i = 5 \text{ A}$ 。

2. 电压及其参考方向

电路中的电荷具有电位(势)能。电荷只有在电场力的作用下才能作有规则的定向移动,形成电流。电场力对电荷做功的大小是用电压来衡量的,因此,电压是电路分析中的另一个重

要的物理量。电路中 a 点对 b 点的电压,在数值上等于电场力把单位正电荷由 a 点移到 b 点所作的功,也就是该单位正电荷在此过程中获得或失去的能量。电压用符号 u 表示,其定义式为

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

式中 W 是电场力把正电荷由 a 点移到 b 点所作的功,单位为焦(耳),符号为 J。 q 是被移动的正电荷的电量。 u 是 a、b 两点间的电压,单位为伏(特),符号为 V。常用的电压单位还有千伏(kV)、毫伏(mV)及微伏(μ V)。

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

如果正电荷从 a 点移到 b 点失去能量,则电位降低,即 a 点的电位高于 b 点。反之,若正电荷从 a 点移到 b 点获得能量,则电位升高,即 a 点的电位低于 b 点。所以正电荷在电路中移动时,电能的失去或获得体现为电位的降低或升高。

通常把电位降低的方向作为电压的实际方向。

大小和方向(或极性)都不随时间变化的电压称为直流电压,用大写字母 U 表示,其定义为

$$U = \frac{W}{q} \quad (1-4)$$

如同电流需要指定参考方向一样,在电路分析中,电压也需要指定参考方向(或参考极性)。

指定了电压参考方向之后,如果计算得到的电压为正值,说明电压的实际方向与参考方向一致。若计算得到的电压为负值,就说明电压的实际方向与参考方向相反。

电压参考方向在电路中的标注方法如图 1-6 所示。图 1-6(a)和图 1-6(b)都表示电压参考方向由 a 指向 b。

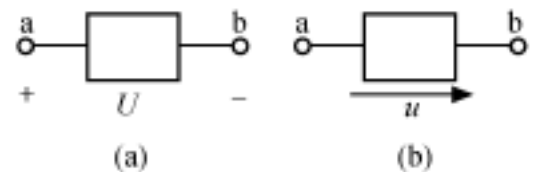


图 1-6 电压参考方向

在计算式中,电压参考方向可用带有双下标的电压符号表示,如 u_{ab} 表示电压 u 的参考方向由 a 指向 b。当指定的参考方向相反时,同一电压互为负值。即

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

在电路分析中,电流和电压的参考方向都是人为任意指定的,彼此互不相关。但是为了分析方便起见,常常采用关联的(Associated)参考方向,即电流与电压降参考方向一致,如图 1-7(a)所示。在关联参考方向下,只需标出电流的参考方向或电压的参考方向。

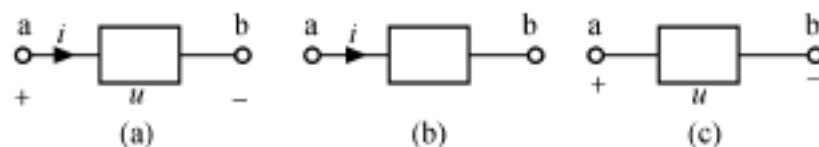


图 1-7 u, i 关联参考方向

3. 功率及其正、负号的意义

能量的传输和转换是电路的基本物理现象之一。

电功率(简称功率)是衡量电路中能量变化速率的物理量。其定义式为

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

式中 W 为能量, t 为时间。它说明功率在数值上等于单位时间内变化的能量。式(1-6)还可以进一步写为

$$p = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i \quad (1-7)$$

此式说明:一段电路的功率等于这段电路的电压与电流的乘积。在国际单位制中,功率单位是瓦(特),符号为(W)。常用的功率单位还有毫瓦(mW)、微瓦(μ W)及千瓦(kW)。

若电路中的 u 与 i 都是随时间变化的,则功率也将随时间变化,此时称为瞬时功率,用小写字母 p 表示。在直流电路中,功率与电流、电压均不随时间变化,式(1-7)可写成

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

当用式(1-7)或式(1-8)进行功率计算时,由于 u, i (或 U, I) 都是代数量,可正可负,因而功率值也可正可负。那么,功率取正值或负值有什么意义呢?它与电压、电流的参考方向有关。

先考虑 u 与 i 用关联参考方向的情况,这时功率正、负号的意义如图 1-8 所示。

设 $p > 0$, 则 u 与 i 的符号必然相同在关联参考方向下, u 与 i 符号相同表示 u 与 i 的实际方向相同。由于电流的方向代表正电荷移动的方向,电压的方向代表电位降,两者实际方向相同,说明正电荷在通过这个电路元件(或这段电路)时,电位降低了。电位降低表示失去能量,或者说,能量被这个电路元件吸收(或消耗)。单位时间内吸收的能量也就是吸收功率。于是得到: $p > 0$, 表明这个电路元件吸收功率。

反之,若 $p < 0$, 必然是 u 与 i 符号相反。在关联参考方向下, u 与 i 符号相反意味着它们的实际方向相反,正电荷在通过这段电路时提高电位得到能量。由此可以推断,这个电路元件释放或产生功率。

当 u 与 i 采用非关联参考方向时,计算功率的公式应改为

$$p = -ui \quad (\text{或 } P = -UI) \quad (1-9)$$

按式(1-9)计算所得的功率正负号的意义仍与前面的说明相同,即如图 1-8 所示。

【例 1-2】 在图 1-9 所示电路中,电压与电流参考方向已经指定,并知 $U_1 = 3\text{V}, U_2 = 1\text{V}, U_3 = 2\text{V}, U_4 = -2\text{V}, I_1 = 2\text{A}, I_2 = -3\text{A}, I_3 = 1\text{A}$, 试计算每个元件上的功率,并说明这些功率是产生的,还是吸收的。

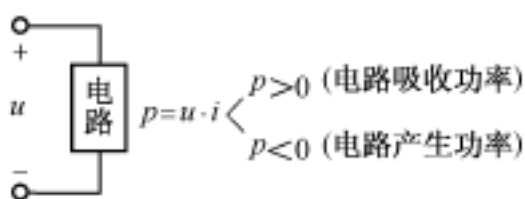


图 1-8 功率正、负号的意义

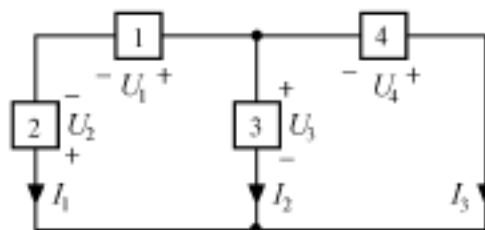


图 1-9 【例 1-2】电路

解 电路中元件 1, 3 的电流、电压参考方向一致, 它们的功率按式(1-8)计算, 分别为

$$P_1 = U_1 I_1 = 3 \times 2 = 6\text{W} > 0 \quad (\text{吸收功率})$$

$$P_3 = U_3 I_2 = 2 \times (-3) = -6\text{W} < 0 \quad (\text{产生功率})$$

电路中元件 2, 4 的电流、电压参考方向不一致, 应采用式(1-9)计算。即

$$P_2 = -U_2 I_1 = (-1) \times 2 = -2\text{W} < 0 \quad (\text{产生功率})$$

$$P_4 = -U_4 I_3 = -(-2) \times 1 = 2\text{W} > 0 \quad (\text{吸收功率})$$

通过本例可看到,在电压与电流采用关联与非关联两种情况下,为了使功率正、负号的意义一致,必须采用不同的计算公式。为避免这种情况,应尽可能采用关联参考方向。

由本例还可以看到,电路中各元件吸收功率的总和为

$$P_{\text{吸收}} = P_1 + P_4 = 8\text{W}$$

而产生功率的总和为

$$P_{\text{产生}} = |P_2 + P_3| = 8\text{W}$$

二者正好相等。这并不是偶然现象,而是因为根据能量守恒原理,电路中吸收的总功率必然要等于产生的总功率,这称为功率平衡。电路分析中常用它来检验计算结果是否正确。

1.3 电阻元件和独立电源元件

电路元件分成两大类:无源元件和有源元件。电阻元件是最简单且常用的无源元件之一,而理想的电压源和理想的电流源是实际电源的理想化模型,属于有源元件。本节将对上述元件的伏安特性和功率作简单地介绍。

1. 电阻元件

(1) 电阻元件的伏安特性、欧姆定律

如前所述,电阻元件是从实际电阻器抽象出来的模型。在中学物理中,学过由欧姆定律(Ohm's law),即

$$u = Ri \quad (\text{或 } U = RI) \quad (1-10)$$

来定义电阻元件。任何二端元件两个端钮上电压与电流之间的关系称为伏安关系或伏安特性。欧姆定律所表示的也是电阻元件的伏安特性,它的意思是:电阻元件的端电压 u 与通过它的电流成正比。比例系数

$$R = \frac{u}{i} \quad (1-11)$$

就是电阻元件的参数值,称为电阻。式中若 u 的单位用伏, i 的单位用安,则电阻 R 的单位是欧(姆),符号是“ Ω ”。高值电阻常以千欧“k”或兆欧“M”为单位。

电阻元件的伏安特性也可写成

$$i = Gu \quad (1-12)$$

的形式。意思是:通过电阻元件的电流与元件的端电压成正比。比例系数

$$G = \frac{i}{u} = \frac{1}{R} \quad (1-13)$$

称为元件的电导。电导的单位是“西(门子)”,符号“S”。

由式(1-11)和式(1-13)可见电阻和电导互为倒数。

需要强调指出,式(1-10)和式(1-12)是在 u 和 i 采用关联参考方向时的表达式,如图 1-10(a)所示。如果 u 和 i 采用非关联参考方向,两式右端应冠以负号,如图 1-10(b)和图 1-10(c)所示。

对于直流电路,可将以上讨论中的电压和电流符号改为 U 和 I 。

电阻元件的伏安特性还可以画成曲线。服从欧姆定律的电阻元件其伏安特性是一条通过坐标原点的直线,如图 1-11(a)所示。这一类电阻称为线性电阻。

还有另一类电阻元件,它们的伏安特性不是直线而是曲线。例如图 1-11(b)所示为一半导体二极管伏安特性曲线。这一类电阻称为非线性电阻。关于非线性电阻元件与非线性电阻电路的分析在本书的第九章再作介绍。

如果电阻元件的伏安特性不随时间改变,称为非时变电阻;若其伏安特性随时间改变,则称为时变电阻。本书不讨论时变元件。

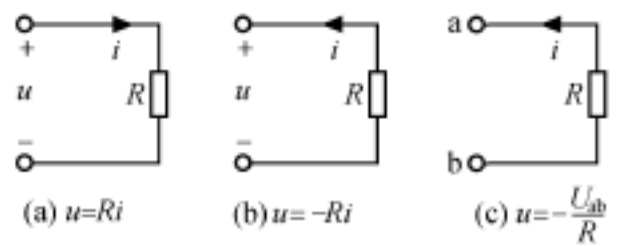


图 1-10 欧姆定律的符号与 u 和 i 参考方向的关系

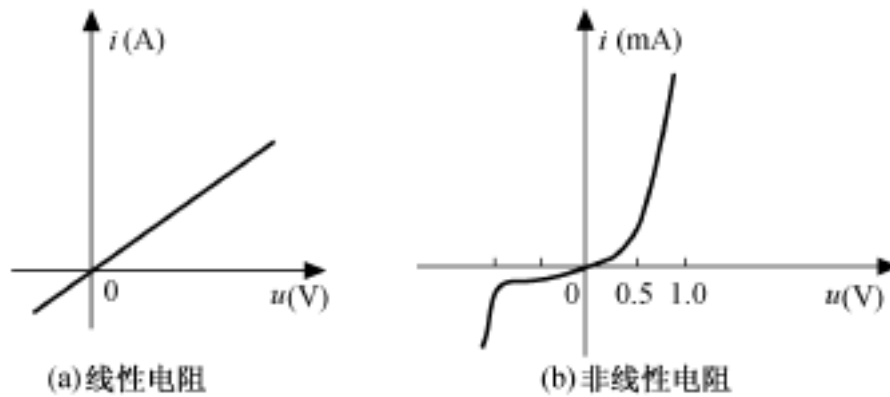


图 1-11 电阻元件的伏安特性

由以上分析得知,电阻元件的一个重要特性就是在任一瞬间的电压值(或电流值)完全取决于同一瞬间流过的电流值(或电压值),而与过去的电流(或电压)值无关。从这个意义上讲,电阻是一种无记忆的元件。

(2) 电阻元件的功率与耗能

线性电阻元件在任一瞬间的吸收功率可按式(1-7)结合欧姆定律进行计算,即

$$p_R = u \cdot i = Ri^2 = Gu^2 \quad (1-14)$$

在直流情况下,计算式可写成

$$P_R = UI = RI^2 = GU^2 \quad (1-15)$$

上式说明,电阻元件功率与通过元件的电流的平方或元件端电压的平方成正比,因此恒有 $p_R > 0$,说明电阻元件是耗能元件。

在一段时间(t_1, t_2)内,电阻消耗的能量一般可按下式计算:

$$W_R = \int_{t_1}^{t_2} p_R(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} u(t) i(t) dt \quad (1-16)$$

在直流情况下,一段时间 t 内,电阻消耗能量的计算式为

$$W_R = P_R t = UI t = RI^2 t = GU^2 t \quad (1-17)$$

顺便指出,虽然能量一般用焦(耳)(J)为计算单位,但在电力系统中,常用“千瓦小时”作电能的计算单位。即在式 $W = Pt$ 中,若功率 P 的单位用“千瓦”,时间的单位用“小时”,它们的乘积就是“千瓦时”。1“千瓦时”即通常所说的 1“度”电。

工程上常利用电阻器消耗电能并转化成热能的效应做成各种电热器,如电烙铁、电熨斗

等。但是,也由于电阻器在电流流过时不可避免地要产生热量,因此在电子设备的设计中,有时还必须考虑器件的散热问题。

实际的电阻元件,其电压、电流或功率都不可能在不受任何限制的情况下应用。电压过高或电流过大都将引起电阻功率过大、发热过度而损坏。为保证电阻元件的安全使用(其他任何电气设备也一样),生产厂家对每种元件(或设备)都规定了电压、电流和功率的限额,分别称为额定电压、额定电流和额定功率。根据电压、电流和功率之间的关系,标明额定值时,一般不需要全部给出。例如,电灯泡通常只给出额定电压和额定功率;许多电阻元件,只标明电阻值和额定功率。

【例 1-3】 一电阻元件值为 $1k$,额定功率 $\frac{1}{2}W$,问它在使用中能承受的最大电压及允许通过的最大电流各是多少?

解 按 $P = \frac{U^2}{R}$,有

$$U = \sqrt{PR} = \sqrt{0.5 \times 1000} = 22.36V$$

又由 $P = I^2 R$,有

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{0.5}{1000}} = 22.36mA$$

计算表明,该电阻元件允许加上的最大电压为 $22.36V$,允许通过的最大电流为 $22.36mA$ 。

2. 理想电压源

理想电压源是一个二端元件,其端电压 u_s 在任意瞬间与通过它的电流无关。 u_s 可以保持恒定不变(称为理想直流电压源)或按一定规律随时间变化。

在图 1-12 中,图 1-12(a)所示的是理想电压源的符号,图 1-12(b)所示的是理想直流电压源(主要表示电池)的符号,图 1-12(c)表示理想电压源的伏安特性。

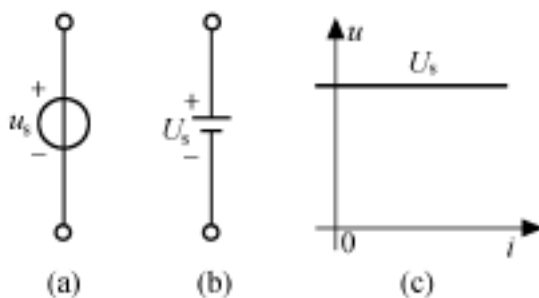


图 1-12 理想电压源及其伏安特性

电压源接通外电路后,其输出电流的大小和方向都与外电路有关。一般而言,电压源在电路中是作为输出功率的元件出现的,真正起电源作用;有时也可能从外电路吸收功率,作为负载出现在电路中。因此,不要认为凡是电源元件,任何时候都一定向外电路输出功率。

理想电压源可以输出任意大(直至无限大)的电流,这意味着它可以提供无限大的功率,所以是一个无限大的功率源。某些实际电源,例如功率强大的市电网,或者容量很大的蓄电池,其输出特性接近于理想电压源,当负载在一定范围内变化时,可以保持端电压基本不变,输出很大的功率,但不会是无限大。

电压源开路时,输出电流为零,而端电压仍保持为 u_s 。

$u_s = 0$ 的理想电压源,在电路中相当于一短路。

【例 1-4】 图 1-13 所示电路中,已知 $U_s = 6V$, $R = 10$ 。

求: 当开关 K 未闭合时, $I = ?$ $U_{bc} = ?$

$$U_{ac} = ? \quad U_{ab} = ?$$

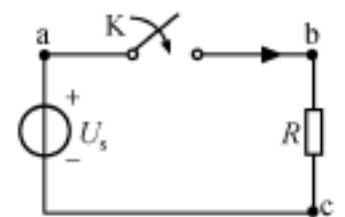


图 1-13 【例 1-4】电路

开关 K 闭合后,再求 I, U_{bc}, U_{ac} 和 U_{ab} 。

将 R 换为 $1k$, 合上 K, 求 I, U_{bc} 和 U_{ac} 。

解 K 打开时, ab 间为开路, 故 $I = 0, U_{bc} = RI = 0, U_{ac} = U_s = 6V, U_{ab} = U_{ac} + U_{cb} = 6V$ 。

K 闭合时, ab 间为短路, $U_{ab} = 0, I = \frac{U_s}{R} = \frac{6}{10} = 0.6A, U_{bc} = RI = 10 \times 0.6 = 6V, U_{ac} = U_s = 6V$ 。

$R = 1000$ 时, $I = \frac{U_s}{R} = \frac{6}{1000} = 6mA, U_{bc} = U_{ac} = U_s = 6V$ 。

计算结果表明:理想电压源的特点是输出电流与外电路有关,而端电压与外电路无关。

3. 理想电流源

理想电流源是另一种理想电源。它也是一个二端元件,在任意瞬间,输出电流 i_s 与其端电压无关。 i_s 可以保持恒定不变(称为理想直流电流源)或按一定规律随时间变化。

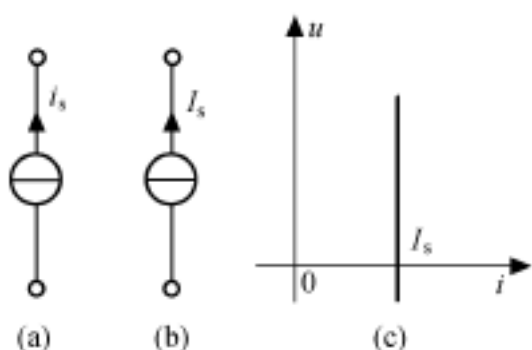


图 1-14 理想电流源及其伏安特性

在图 1-14 中,图 1-14(a)所示为理想电流源的符号,图 1-14(b)所示为理想直流电流源的符号,图 1-14(c)表示理想电流源的伏安特性。

电流源接入电路后,其端电压的大小和极性均取决于外电路。它在电路中可能输出功率也可能吸收功率。

理想电流源保持规定的 i_s 。当外接的电阻很大时,它可以有非常高的输出电压。在极限情况下,也可以提供无限大的功率,是一个无限大功率源。

理想电流源实际上是不存在的,但半导体三极管的集电极电流和五极管的板极电流都接近于理想电流源的条件,在作电路分析时,可以当作理想电流源。

$i_s = 0$ 的理想电流源在电路中相当于开路。

【例 1-5】 图 1-15 所示电路中,已知电流源 $I_s = 2A, R = 10$ 。

求: 当开关 K 闭合时,求流过开关 K 的电流 I 和 U_{ab} ;

当 K 断开时,再求 I_{ab}, I 和 U_{ab} ;

将 R 换成 $10k$, 再求 I 和 U_{ab} 。

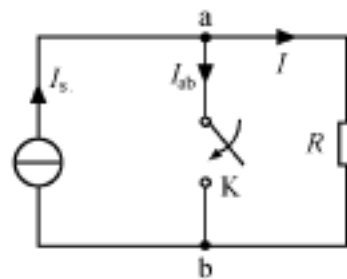


图 1-15 【例 1-5】电路

解 K 闭合时, ab 间为短路, $U_{ab} = 0, I_{ab} = I_s = 2A, I = \frac{U_{ab}}{R} = 0$ 。

K 打开时, ab 间开路, $I_{ab} = 0, I = I_s = 2A, U_{ab} = RI = 10 \times 2 = 20V$ 。

R 换为 $10k$ 后, 仍有 $I = I_s = 2A, U_{ab} = RI = 10 \times 10^3 \times 2 = 20 \times 10^3 = 20kV$ 。

计算结果表明:理想电流源的特点是输出电压与外电路有关,而输出电流与外电路无关。

1.4 基尔霍夫定律

上节讨论的电阻、理想电压源和理想电流源端钮上的伏安关系,这一关系通常称为元件约束,它只表示了二端元件本身的特性,而与整个电路的结构无关。但是当分析由若干元件根据

设计需要而构成的电路时,还必须建立各个连接节点上支路电流间的约束关系以及任一回路中各支路电压间的约束关系。通常把这两种约束关系统称为结构约束关系(或拓扑约束)。本节将介绍的基尔霍夫电流定律与基尔霍夫电压定律就是表征结构约束的两个基本定律。

先介绍几个与电路结构有关的名词或术语。

支路:电路中一个二端元件称为一条支路。

节点:电路中元件的汇接点称为节点(结节)。在图 1-16 所示电路中共有 5 条支路 4 个节点。

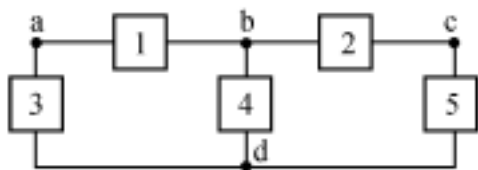


图 1-16 说明节点、支路用图

为了方便,也可以把支路定义为多个元件串联而成的一段电路。例如将图 1-16 中所示的 1 元件和 3 元件的串联作为一条支路,2 元件和 5 元件的串联作为一条支路。在这种情况下,节点定义则为三条或三条以上支路的汇接点,如 b 和 d,而 a 和 c 就不再是节点。这样定义支路和节点,显然比前面的定义在支路和节点的数量上要减少,对分析电路和解题是方便的。

回路:电路中任一闭合的路径称为回路。如图 1-16 中元件 1,3 和 4;元件 2,4 和 5;元件 1,2,3 和 5 均构成回路。

网孔:内部不含支路的回路称为网孔。如图 1-16 中元件 1,3 和 4;元件 2,4 和 5 均构成网孔。显然,元件 1,2,3 和 5 不构成网孔,因为内部含有元件 4 支路。

通过支路的电流称为支路电流,支路端点间的电压称为支路电压,它们是电路分析的对象,集中参数电路的基本规律也由它们来表示。

1. 基尔霍夫电流定律(KCL)

基尔霍夫电流定律可表述为:在集中参数电路中,任一时刻流出(或流入)节点的各支路电流的代数和恒等于零。

写成数学表达式为

$$i = 0 \tag{1-18}$$

式(1-18)称为 KCL 方程。

KCL 是从实践中总结出来的一个重要的客观规律,它是电流连续性原理在集中参数电路中的表现形式。电流连续性原理指的是,在单位时间内,在电路的任一节点上,流入的电荷必须等于流出的电荷,亦即电荷在任一节点上,既不能积累,也不会消失。

建立 KCL 方程时,要根据各支路电流的参考方向是流入或是流出节点来决定各电流的代数符号,既可以设流入节点的电流为“+”,流出为“-”,也可以反过来以流出节点的电流为“+”,流入为“-”。但一经确定之后,在分析过程中,不能随意改动。如图 1-17 中的节点,若选流入为正,可写出 KCL 方程为

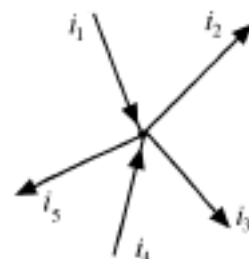


图 1-17 说明 KCL 用图

$$i_1 + i_4 - i_2 - i_3 - i_5 = 0$$

移项可得

$$i_1 + i_4 = i_2 + i_3 + i_5$$

可见,流出节点的电流总和等于流入节点的电流总和,即

$$i_{出} = i_{入} \tag{1-19}$$