



全国高职高专教育“十一五”规划教材

电路基础

(第2版)

胡翔骏 主编



高等教育出版社
Higher Education Press

全国高职高专教育“十一五”规划教材

电 路 基 础

(第 2 版)

胡翔骏 主编

高等教育出版社

内 容 提 要

《电路基础》(第2版)由电路的基本概念和定律、电阻电路分析、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等九章及附录组成。本书保持1版的风格和特点,突出电路理论的基本内容,有比较丰富的例题和习题,便于学生自学。学生在学习电路知识的同时,还可以学习掌握和运用电路知识的方法,提高分析和解决问题的能力。本教材适合于电子、通信与信息类专业的高职高专和普通本科学生使用。

图书在版编目(CIP)数据

电路基础 / 胡翔骏主编. —2版. —北京: 高等教育出版社, 2009. 12

ISBN 978 - 7 - 04 - 028545 - 1

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 (2009) 第 208675 号

策划编辑	孙 杰	责任编辑	魏 芳	封面设计	张雨微	责任绘图	黄建英
版式设计	马敬茹	责任校对	金 辉	责任印制	毛斯璐		

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 100120
总 机 010 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787 × 1092 1/16
印 张 19.25
字 数 470 000
插 页 2

购书热线 010 - 58581118
咨询电话 400 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 1996 年 12 月第 1 版
2009 年 12 月第 2 版
印 次 2009 年 12 月第 1 次印刷
定 价 23.50 元

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 28545 - 00

前 言

教育部高职高专推荐教材《电路基础》自 1996 年 12 月出版以来,深受读者欢迎,重印 20 多次。现根据读者要求对教材进行修订,欢迎读者继续使用。本教材适合电子、通信与信息类专业的高职高专和普通本科学生使用。

《电路基础》(第 2 版)删掉了 1 版的磁路部分,只介绍电路理论的基本内容,由电路的基本概念和定律、电阻电路分析、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等九章及附录组成。本书保持 1 版的风格和特点,突出电路理论的基本内容,有比较丰富的例题和习题,便于学生自学。学生在学习电路知识的同时,还可以学习掌握和运用电路知识的方法,提高分析和解决问题的能力。

读者在使用本教材时可以参考编者编写的其他电路教材。在《电路分析》(第 2 版)所附《电路分析计算机辅助教学系统》光盘中,有用计算机分析电路的软件、电子教案、电路分析实验演示系统等教学资源。在《电路分析(第 2 版)教学指导书》中有相关的习题解答。

王慧玲教授详细审阅了本书,提出不少宝贵意见,编者表示衷心感谢。

《电路基础》(第 2 版)的修订工作由胡翔骏和黄金玉完成。在此,对参加编写和使用《电路基础》(第 1 版)的教师和学生表示衷心的感谢。对于教材不妥和错误之处,欢迎读者提出宝贵意见。

本书的电子教案和有关电路分析程序由高等教育出版社免费提供。

胡翔骏

2009 年 7 月于电子科技大学

目 录

第一章 电路的基本概念和定律	1
§ 1-1 电路和电路模型	1
§ 1-2 电路的基本物理量	4
§ 1-3 基尔霍夫定律	7
§ 1-4 电阻元件	10
§ 1-5 独立电压源和独立电流源	14
§ 1-6 两类约束和电路方程	20
§ 1-7 支路电流法	24
§ 1-8 分压电路和分流电路	26
习题一	30
第二章 电阻电路分析	37
§ 2-1 电阻单口网络	37
§ 2-2 电阻的星形联结与三角形联结	46
§ 2-3 网孔分析法	49
§ 2-4 节点分析法	54
§ 2-5 含受控源的电路分析	60
§ 2-6 简单非线性电阻电路分析	66
习题二	72
第三章 网络定理	81
§ 3-1 叠加定理	81
§ 3-2 戴维南定理	85
§ 3-3 诺顿定理和含源单口的等效电路	90
§ 3-4 最大功率传输定理	94
§ 3-5 替代定理	97
习题三	102
第四章 多端元件和双口网络	107
§ 4-1 理想变压器	107
* § 4-2 运算放大器	111
§ 4-3 双口网络	118
§ 4-4 互易双口和互易定理	125
* § 4-5 含双口网络的电路分析	127
习题四	131
第五章 动态电路的时域分析	136
§ 5-1 电容元件和电感元件	136
§ 5-2 一阶电路的零输入响应	144
§ 5-3 一阶电路的零状态响应	150

§ 5-4 一阶电路的完全响应	155
§ 5-5 三要素法	158
* § 5-6 阶跃函数和阶跃响应	166
§ 5-7 RLC 串联电路的零输入响应	168
习题五	176
第六章 正弦稳态分析	183
§ 6-1 正弦电压和电流	183
* § 6-2 正弦稳态响应	190
§ 6-3 基尔霍夫定律的相量形式	192
§ 6-4 R 、 L 、 C 元件电压电流关系的相量形式	195
§ 6-5 正弦稳态的相量分析	201
§ 6-6 单口网络的相量模型	207
§ 6-7 一般正弦电流电路分析	212
§ 6-8 正弦稳态响应的叠加	214
习题六	219
第七章 正弦稳态的功率和三相电路	225
§ 7-1 正弦稳态的功率	225
§ 7-2 最大功率传输定理	230
§ 7-3 平均功率的叠加	233
§ 7-4 三相电路	236
习题七	243
第八章 网络函数和频率特性	247
§ 8-1 网络函数	247
§ 8-2 RC 电路的频率特性	249
§ 8-3 谐振电路	258
§ 8-4 谐振电路的频率特性	262
习题八	267
第九章 含耦合电感的电路分析	270
§ 9-1 耦合电感的电压电流关系	270
§ 9-2 耦合电感的串联与并联	273
§ 9-3 耦合电感的去耦等效电路	276
§ 9-4 空心变压器电路的分析	278
§ 9-5 耦合电感与理想变压器的关系	282
习题九	286
附录 计算机辅助电路分析	289
部分习题答案	293
参考书目	301

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,通过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)为小,应视为集总参数电路。

采用我国国家标准中的图形符号,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)是用国家标准 GB 4728 规定的电气图形符号表示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、变压器和扬声器等电气器件组成,其电原理图如图 1-2(b)所示。

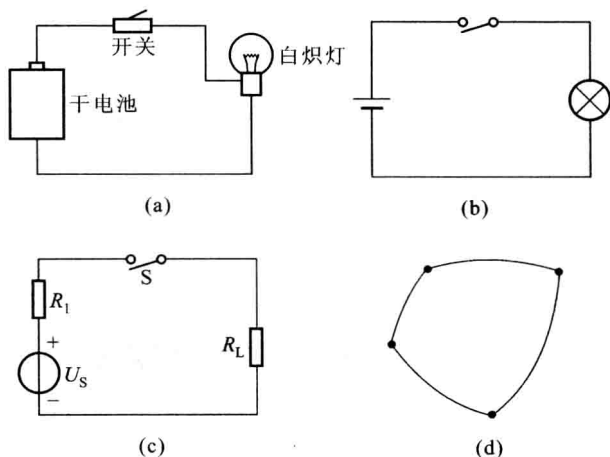


图 1-1 手电筒电路

(a) 实际电路 (b) 电原理图 (c) 电路模型 (d) 拓扑结构图

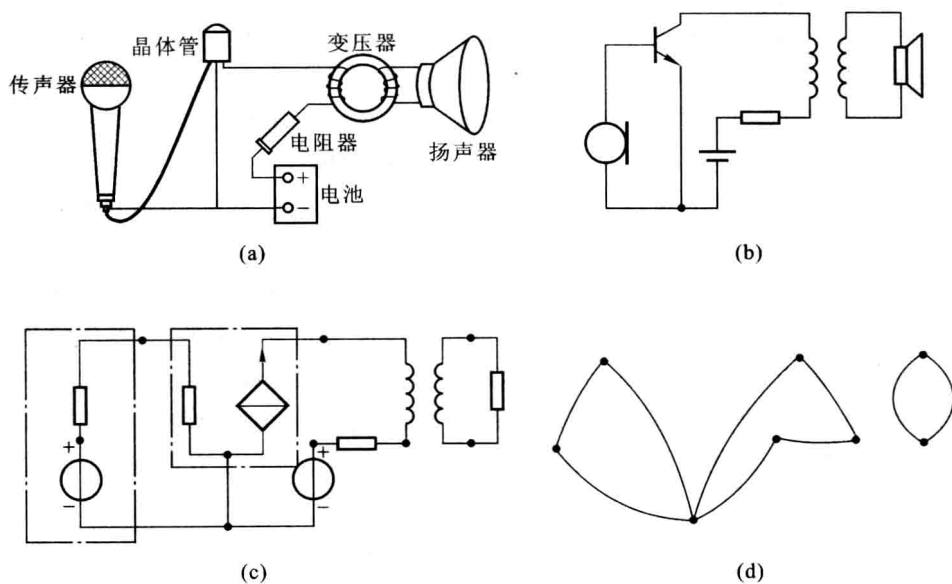


图 1-2 晶体管放大电路

(a) 实际电路 (b) 电原理图 (c) 电路模型 (d) 拓扑结构图

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,用电路理论的方法计算出电路模型的电气特性,如图

1-3 所示。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。

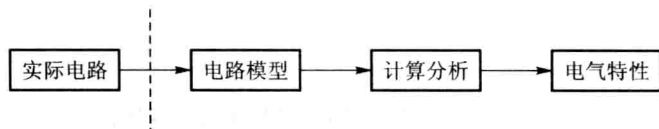


图 1-3 研究电路的基本方法

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,当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)所示实际电路的电路模型。图 1-2(c)是图 1-2(a)所示实际电路的电路模型。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。这些电路元件的定义和特性将在以后陆续介绍。

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。

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,应该采用不同的电路模型模拟同一实际电路。例如图 1-4(a)表示一个线圈,在低频交流工作条件下,用一个电阻和电感的串联来模拟它的电气特性,如图 1-4(b)所示;在高频交流工作条件下,则需再并联一个电容来模拟,如图 1-4(c)所示。

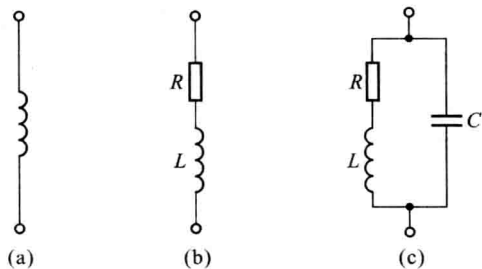


图 1-4 电感器或绕组的几种电路模型

- (a) 线圈的电气图形符号
- (b) 线圈通过低频交流的模式
- (c) 线圈通过高频交流的模式

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。书中绝大部分电路图表示的是电路模型,其电气特性与实际电路是有区别的。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,分析电路的电气特性;另一类是网络^①综合:根据电路特性的要求来设计电

^① 本书中网络(network)与电路(circuit)同义。

路的结构和元件参数。本课程是电路的入门课程,主要讨论电路分析问题。

根据电路模型中元件的性质可以将电路分为线性电路和非线性电路,本书主要讨论线性电阻电路和线性动态电路。

§ 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 1-5 所示的二端元件中,每秒钟有 2 C 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 $i = 2 \text{ A}$ [图 1-5(a)];若规定电流参考方向由 b 点指向 a 点时,则电流 $i = -2 \text{ A}$ [图 1-5(b)]。若采用双下标表示电流参考方向,则写为 $i_{ab} = 2 \text{ A}$ 或 $i_{ba} = -2 \text{ A}$ 。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

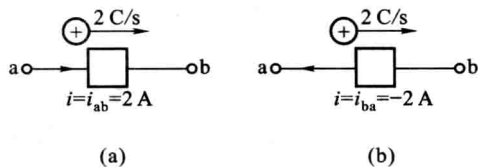


图 1-5 电流的参考方向

^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。本书只采用以国际单位制(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。

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。

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 a、b 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,而仅与起点和终点的位置有关。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。例如图 1-6 所示 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 点的电位比 1 点的电位高 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 1-7 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 1-7(a)、(b)所示。在二端元件的电压、电流采用关联参考方向的条件下,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。

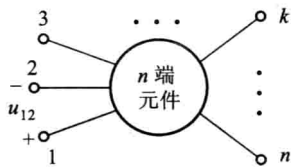


图 1-6 n 端元件

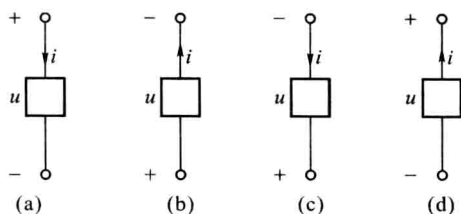


图 1-7 二端元件电流、电压的参考方向

(a)、(b) 关联参考方向 (c)、(d) 非关联参考方向

三、电功率

下面讨论图 1-8 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)时间内消耗 1 kW·h 的电能,简称为 1 度电,这是一个习惯用以计量电能的单位。

表 1-1 列出部分国际单位制的单位,称为 SI 单位。在实际应用中感到这些 SI 单位太大或太小时,可以加上表 1-2 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 $2 \text{ mA} = 2 \times 10^{-3} \text{ A}$, $2 \text{ } \mu\text{s} = 2 \times 10^{-6} \text{ s}$, $8 \text{ kW} = 8 \times 10^3 \text{ W}$ 。

表 1-1 部分国际单位制的单位(SI 单位)

量的名称	单位名称	单位符号	量的名称	单位名称	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

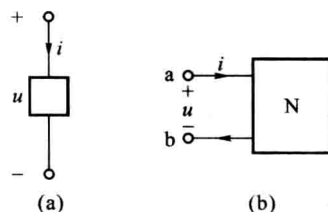


图 1-8 二端元件和二端网络

(a) 二端元件 (b) 二端网络

表 1-2 部分国际单位制的词头

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 1-9 所示电路中,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。

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

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

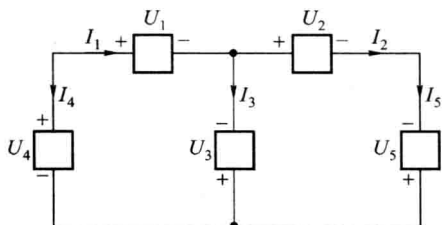


图 1-9 例 1-1

§ 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,需要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 1-10 所示电路共有 6 条支路。

(2) 节点:电路元件的连接点称为节点。图 1-10 所示电路中,a、b、c 点是节点,d 点和 e 点由理想导线相连不是一个电路元件时,应视为一个节点。该电路共有 4 个节点。

(3) 回路:由支路组成的闭合路径称为回路。图 1-10 所示电路中 $\{1, 2\}$ 、 $\{1, 3, 4\}$ 、 $\{1, 3, 5, 6\}$ 、 $\{2, 3, 4\}$ 、 $\{2, 3, 5, 6\}$ 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 1-10 所示电路中的

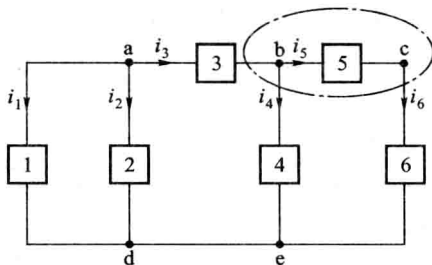


图 1-10 一个具有 6 条支路和 4 个节点的电路

$\{1,2\}$ 、 $\{2,3,4\}$ 和 $\{4,5,6\}$ 回路都是网孔。网孔与平面电路^①的画法有关,例如图 1-10 所示电路可以有多种画法,如将支路 1 和支路 2 交换位置,则三个网孔变为 $\{1,2\}$ 、 $\{1,3,4\}$ 和 $\{4,5,6\}$ 。

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节点,在任一时刻,流出该节点全部支路电流的代数和等于零,其数学表达式为

$$\sum_{k=1}^K i_k = 0 \quad (1-9)$$

对电路某节点列写 KCL 方程时,一般将流出该节点的支路电流取正号,流入该节点的支路电流取负号。

例如对图 1-10 所示电路中的 a、b、c、d 4 个节点写出的 KCL 方程分别为

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

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

$$-i_5 + i_6 = 0$$

$$-i_1 - i_2 - i_4 - i_6 = 0$$

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

$$i_4 = i_3 - i_5$$

这表明支路电流 i_4 是连接到节点 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)电路中某节点的一条支路电流,等于流入(或流出)该节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 1-10 所示电路中,若已知某时刻电流 $i_1 = 1 \text{ A}$ 、 $i_3 = 3 \text{ A}$ 和 $i_5 = 5 \text{ A}$,则由 KCL 可求得该时刻另外三个电流为

$$i_2 = -i_1 - i_3 = -1 \text{ A} - 3 \text{ A} = -4 \text{ A}$$

$$i_4 = i_3 - i_5 = 3 \text{ A} - 5 \text{ A} = -2 \text{ A}$$

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。

$$i_6 = i_5 = 5 \text{ A}$$

若另一时刻电流 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 $i_5 = 10 \text{ A}$, 则此时 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。显然, 选择独立电流变量的方案有多种。

KCL 不仅适用于节点, 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 1-10 所示电路中点画线表示的封闭面, 写出的 KCL 方程为

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

它可由该封闭面内节点 b 和 c 的 KCL 方程相加而得到证明。节点的 KCL 方程可以视为封闭面只包围一个节点的特殊情况。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(图 1-11), 此导线中的电流 i 必定为零。

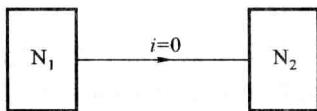


图 1-11 用一条导线相连的两个电路

在任一时刻, 流入任一节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节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

$$\sum_{k=1}^K u_k = 0 \quad (1-10)$$

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 1-12 所示电路的三个回路, 沿顺时针方向绕行回路一周, 写出的 KVL 方程为

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

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

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

KVL 方程是以支路电压为变量的常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

$$u_5 = u_2 + u_4$$

$$u_5 = u_1 - u_3$$

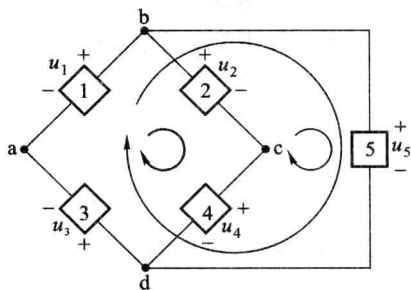


图 1-12 具有 5 条支路和 4 个节点的电路

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 1-12 所示电路中,若某时刻的电压 $u_1 = 1 \text{ V}$, $u_2 = 2 \text{ V}$ 和 $u_5 = 5 \text{ V}$,则由 KVL 可求得该时刻另外两个电压

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

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

若另一时刻电压 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 $u_5 = 10 \text{ V}$,则此时 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,推广到任一闭合的节点序列,即在任一时刻,沿任一闭合节点序列的各段电压(不一定是支路电压)的代数和等于零。对图 1-12 所示电路中闭合节点序列 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

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

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

这表明电路中任两节点间电压 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节点序列的特殊情况。沿电路任一闭合路径(回路或闭合节点序列)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没有改变,这表明 KVL 是能量守恒定律的体现。

综上所述,可以看到:

- (1) KCL 对电路中任一节点(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(或闭合节点序列)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元件: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

定义。

如果一个二端元件在任一时刻的电压 u 与其电流 i 的关系,由 $u-i$ 平面上一条曲线确定,则此二端元件称为二端电阻元件,其数学表达式为

$$f(u, i) = 0 \quad (1-14)$$

这条曲线称为电阻的特性曲线。它表明了电阻电压与电流间的约束关系 (Voltage Current Relationship, 简称为 VCR)。按照电阻的特性曲线情况,可以对电阻进行分类。其特性曲线为通过坐标原点一条直线的电阻,称为线性电阻;否则称为非线性电阻。其特性曲线随时间变化的电阻,称为时变电阻;否则称为时不变电阻或定常电阻。图 1-13 表示某些线性时不变电阻、线性时变电阻、非线性时不变电阻和非线性时变电阻的特性曲线。通常,电阻的特性曲线都是在关联参考方向下绘制的。

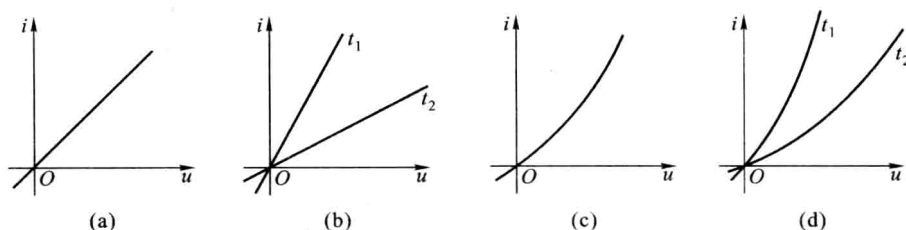


图 1-13 二端电阻的特性曲线

(a) 线性时不变电阻 (b) 线性时变电阻 (c) 非线性时不变电阻 (d) 非线性时变电阻

电阻元件的特点是电压与电流存在一种确定的代数约束关系。已知电阻的电压(或电流),可由特性曲线找到一个或几个确定的电流(或电压)。本节主要介绍线性二端电阻,其他的线性多端电阻元件以及非线性电阻元件将在以后介绍。

二、线性电阻

线性时不变电阻的特性曲线是通过 $u-i$ 平面(或 $i-u$ 平面)原点的一条不随时间变化的直线,如图 1-14 所示。

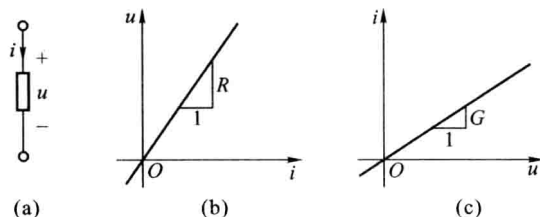


图 1-14 线性时不变电阻的特性曲线

(a) 线性电阻的符号 (b) $i-u$ 平面上的特性曲线 (c) $u-i$ 平面上的特性曲线

线性时不变电阻的电压电流关系由欧姆定律描述,其数学表达式为

$$u = Ri \quad (1-15)$$

或

$$i = Gu \quad (1-16)$$

式中, R 称为电阻,其 SI 单位为欧[姆](Ω),它与 $i-u$ 平面上通过原点直线的斜率成正比,是一