



普通高等教育“十二五”规划教材



电子电气基础课（研究型系列）

电 工 学

吉培荣 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

电 工 学

主编 吉培荣
编写 赵胜会 李海军 栗世玮
主审 姚纓英

常州大学图书馆
藏书章



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书按照教育部高等学校电子信息科学与工程电气信息类基础课程教学指导分委员会制定的《电工学课程教学基本要求》编写而成。书中包含电路基础理论、模拟电子技术、数字电子技术、电机与电气控制技术4个模块,共16章内容。

本书既可作为高等学校“电工学”、“电工与电子技术”、“电路与电子技术”等课程的教材,也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工学/吉培荣主编. —北京:中国电力出版社,2012.9
(2013.8重印)

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-3371-0

I. ①电… II. ①吉… III. ①电工学—高等学校—教材 IV. ①TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第180887号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012年9月第一版 2013年8月北京第二次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 25印张 611千字

定价 45.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前 言

电工学课程是高等学校非电类工科专业的一门重要技术基础课程。该课程的作用与任务是：通过该课程的学习，使学生获得电工电子技术必要的基本理论、基本知识和基本技能，为今后学习和从事与本专业有关的工作打下一定的基础。

本书按照教育部高等学校电子信息科学与工程类基础课程教学指导分委员会制定的“电工学”课程教学基本要求，并结合编者多年来从事电工学课程教学的经验编写而成。全书共 16 章，分为电路基础理论、模拟电子技术、数字电子技术、电机与电气控制技术 4 个模块，其中，电路基础理论模块包含电路的基本概念和分析方法、电路的暂态分析、正弦交流电路、三相电路 4 章内容，模拟电子技术模块包含常用半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器及其应用、直流稳压电源 4 章内容，数字电子技术模块包含门电路和组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路、半导体存储器和可编程逻辑器件、数模与模数转换器 4 章内容，电机与电气控制技术模块包含铁磁线圈和变压器、电动机、继电接触器控制、可编程控制器 4 章内容。

本书由三峡大学电气与新能源学院四位教师合作完成，吉培荣担任主编，赵胜会、李海军、栗世玮参加编写。书中具体内容的编写分工为：吉培荣编写电路基础理论模块（第 1～4 章）部分，赵胜会编写模拟电子技术模块（第 5～8 章）部分，李海军编写数字电子技术模块（第 9～12 章）部分，栗世玮编写电机与电气控制技术模块（第 13～16 章）部分。编写本书时，参考了书后参考文献和其他一些文献的相关内容，在此对这些文献作者表示衷心感谢！本书提供教学课件及习题答案，请登录 <http://jc.cepp.sgcc.com.cn> 下载。

本书初稿完成后，经浙江大学姚纓英教授审稿，提出了许多宝贵的修改意见，提高了书稿质量，在此对姚纓英教授表示衷心感谢！

限于编者水平，书中难免存在一些不足之处，敬请读者批评指正。联系地址：湖北省宜昌市大学路 8 号三峡大学电气与新能源学院，邮政编码：443002。联系邮箱：jipeirong@163.com（吉培荣），84237641@qq.com（赵胜会），lihaijun@163.com（李海军），ssw@ctgu.edu.cn（栗世玮）。

编 者

2012 年 3 月



目 录

前言

第1模块 电路基础理论

第1章 电路的基本概念和分析方法	1
1.1 电路的基本概念	1
1.2 电路元件	4
1.3 基尔霍夫定律	10
1.4 电路的等效变换	11
1.5 电路分析的基本方法	15
1.6 电路定理	20
习题	24
第2章 电路的暂态分析	30
2.1 换路定理及电路初始值的确定	30
2.2 RC电路的暂态响应	32
2.3 一阶电路求解的三要素法	36
2.4 RL电路的暂态响应	39
习题	42
第3章 正弦交流电路	46
3.1 正弦交流电路的基本概念	46
3.2 正弦量的相量表示	48
3.3 电路拓扑约束和元件约束的相量形式	51
3.4 阻抗和导纳及其串并联	55
3.5 正弦稳态电路的相量分析法	58
3.6 正弦稳态电路的功率	61
3.7 谐振电路	65
3.8 非正弦周期电流电路	69
习题	73
第4章 三相电路	78
4.1 三相电源	78
4.2 三相电路的连接	79
4.3 三相电路的功率	81
4.4 对称三相电路的计算	83
4.5 安全用电	85

习题	89
----------	----

第2模块 模拟电子技术

第5章 常用半导体器件	91
5.1 半导体的导电特性及PN结	91
5.2 半导体二极管	94
5.3 特殊二极管	97
5.4 双极型三极管	99
5.5 单极型三极管	104
5.6 晶闸管	107
习题	111
第6章 基本放大电路	115
6.1 基本放大电路的组成及工作原理	115
6.2 共射极放大电路的分析	117
6.3 射极输出器	125
6.4 差动放大电路	127
6.5 互补对称功率放大电路	132
6.6 场效应管放大电路	134
6.7 多级放大电路	137
6.8 放大电路的频率响应	139
习题	141
第7章 集成运算放大器及其应用	145
7.1 集成运算放大器概述	145
7.2 运算放大器在信号运算方面的应用	149
7.3 集成运算放大器的非线性应用	153
7.4 集成运算放大器的选择、使用和保护	156
习题	158
第8章 直流稳压电源	162
8.1 整流电路	162
8.2 滤波电路	165
8.3 直流稳压电源	168
习题	179

第3模块 数字电子技术

第9章 门电路和组合逻辑电路	182
9.1 逻辑代数与逻辑函数	182
9.2 逻辑门电路	197

9.3 组合逻辑电路的分析与设计	211
习题	239
第 10 章 触发器和时序逻辑电路	244
10.1 概述	244
10.2 锁存器 (Latch) 和触发器 (Flip-Flop)	244
10.3 时序逻辑电路的分析与设计	253
10.4 寄存器与计数器	262
10.5 计数器	265
10.6 555 定时器及其应用	270
习题	278
第 11 章 半导体存储器和可编程逻辑器件	283
11.1 半导体存储器	283
11.2 只读存储器	283
11.3 随机存取存储器	288
11.4 可编程逻辑器件	292
11.5 可编程逻辑器件的开发	295
习题	295
第 12 章 数模与模数转换器	296
12.1 概述	296
12.2 数模转换器	296
12.3 模数转换器	302
习题	312

第 4 模块 电机与电气控制技术

第 13 章 铁磁线圈和变压器	313
13.1 磁路的概念及其计算	313
13.2 电磁铁	314
13.3 变压器的基本结构	315
13.4 变压器的工作原理	316
13.5 变压器绕组的极性及其连接	320
13.6 特殊变压器	321
习题	322
第 14 章 电动机	323
14.1 三相异步电动机的结构和工作原理	323
14.2 三相异步电动机的电路分析	327
14.3 三相异步电动机的电磁转矩和机械特性	329
14.4 三相异步电动机的使用	333
14.5 单相异步电动机	340

14.6 直流电动机	341
习题	344
第 15 章 继电接触器控制	345
15.1 常用低压电器	345
15.2 继电接触器控制线路图的绘制原则	353
15.3 三相笼型异步电动机的基本控制线路	354
15.4 行程控制	357
15.5 时间控制	358
习题	359
第 16 章 可编程控制器	361
16.1 可编程控制器概述	361
16.2 可编程控制器的基本结构和工作原理	364
16.3 可编程控制器的程序编制	369
16.4 FX 系列可编程控制器及指令系统	372
16.5 可编程控制器的应用举例	385
习题	388
参考文献	391

第1模块 电路基础理论

第1章 电路的基本概念和分析方法

本章介绍电路的基本概念和基本分析方法,内容包括电路的基本概念、电路元件、基尔霍夫定律、电路的等效变换、电路的方程分析法、电路定理。

1.1 电路的基本概念

1.1.1 实际电路与电路模型

电路一词有两重含义,其一指实际电路,其二是指电路模型。所谓实际电路是指由各种实际电器件按一定方式连接而成、具有特定功能的电流的通路;所谓电路模型是指由定义出来的各种理想电路元件用理想导线按一定方式连接构成的图形。实际电路与电路模型既有联系,又有区别。在一定条件下,实际电路可简化成电路模型进行理论分析和计算,而理论分析和计算的根本目的又是为了对实际电路做分析。

实际电路的种类很多,功能也很多,但总体来讲,大致可分成两类:一类进行电能量的传输、分配,如电力系统;另一类进行电信号的传输、处理,如通信系统和各种信息(信号)处理系统。

对电路模型进行理论分析和计算的方法很多,但基本依据是电路的拓扑约束和元件约束。电路的拓扑约束和元件约束以及各种分析计算方法构成了电路理论的主体内容,这也是后面要加以展开的内容。电路理论是为了研究实际电路的电磁过程而提出和发展出来的一门科学理论,电路理论中的基本物理量是电流、电压、电荷和磁通(或磁链),分别用小写字母 u 、 i 、 q 、 φ (或 ψ) 表示,对于不随时间变化的情况,通常用大写字母 U 、 I 、 Q 和 Φ (或 Ψ) 表示。

实际电路通过模型化转化为电路模型。如图 1-1(a) 所示为手电筒电路,对其模型化后得到的电路模型如图 1-1(b) 所示。图 1-1(a) 中的各元件均是实际器件,而图 1-1(b) 中的各器件均是定义出来的理想元件。实际电路与电路模型是完全不同的两个事物,实际电路中各器件的工作受实际特性的影响,如图 1-1(a) 中的灯泡上面不能加过大电压,否则会被烧毁,但理想元件按定义的特性工作,如图 1-1(b) 中的电阻 R_L (灯泡的模型) 上可加任意电压;再如,图 1-1(a) 中的电池是一个器件,但在图 1-1(b) 中被模型化为理想电压源与理想电阻的串联。在各种场合,为简化起见,人们经常将实际电路和电路模型统一简称为电路,初学者受此影响,往往把实际电路与电路模型混为一谈,这是要特别提请初学者注意的。为简化起见,在不引起概念错误或其他问题的时候,本书电路一词既指实

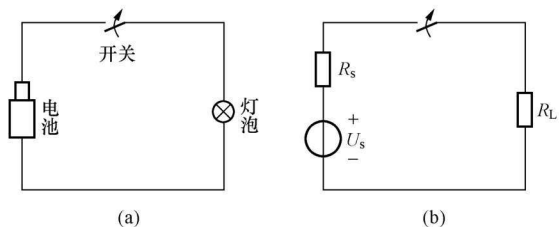


图 1-1 手电筒电路及其电路模型

际电路,也指电路模型;但在容易产生问题的地方,将分别用实际电路或电路模型加以区别。在各种文献中,电路也常被称为电网络,简称网络。

1.1.2 实际电路模型化与集中参数电路

实际电路形形色色,数量众多,构成实际电路的元器件及连接线种类也非常多。对实际电路的分析虽然可以通过测量等手段进行,但更方便的方法是先将实际电路转化为电路模型,然后对电路模型进行分析,最后将分析与计算结果应用于实际电路。此外,在实际电路的设计过程中,对电路模型进行分析和计算也是一个必不可少的环节。

将实际电路转换为电路模型的过程称为模型化,模型化的过程是对实际电路近似的过程。实际要求不同,模型化的结果会有所不同。因此同一个实际电路,可有不同的模型化结果,也即具有不同的电路模型。一般而言,对实际电路近似程度越高,电路模型就越复杂,反之,则越简单。例如图 1-1 (a) 中的电池,在图 1-1 (b) 中被模型化为理想电压源与理想电阻的串联组合,若忽略电池工作时本身也消耗能量这一因素,在模型化时可将电池仅仅用理想电压源表示。

实际电路工作时的电磁现象是非常复杂的,结合工程实际的要求,对实际电路精确地描述既无必要,有时也难以进行。为简化分析,人们引入了集中参数元件和集中参数电路的概念。集中参数元件是定义出来的元件,因此也称为理想元件。理想元件的主要特征是有精确的数学定义,每一种元件只表示一种电磁现象。由集中参数元件和理想导线构成的电路,称为集中参数电路。

实际电路均不是集中参数电路,而是具有分布参数性质的电路。这是因为任何实际电路在工作时各处均存在能量损耗、电场储能和磁场储能三种效应。人们用理想电阻元件(参数)描述能量损耗特性,用理想电容元件(参数)描述电场储能特性,用理想电感元件(参数)描述磁场储能特性。由于实际电路中能量损耗、电场储能和磁场储能三种效应均连续分布于电路和器件中,所以实际电路的各处均分布有电阻、电容、电感,因此实际电路是具有分布参数性质的电路。分布参数电路的分析比较复杂,很多时候理论分析难以进行。但在一定条件下,将实际电路模型化为集中参数电路,不仅带来分析上的便利,而且理论分析结果也满足工程实际的要求,这时,就可将实际电路模型化为集中参数电路。

一般而言,当实际电路的尺寸 l 与其上的电磁波的波长 λ 满足以下关系时,实际电路可模型化为集中参数电路,即

$$\lambda \geq 10l \quad (1-1)$$

式(1-1)中 $\lambda=c/f$, f 为电路中的正弦信号(电压或电流)的最高频率, c 是实际电路中电磁波的传播速度,通常可近似用真空中电磁波的传播速度表示,即 $c=3 \times 10^8 \text{ km/s}$ 。

我国的工频正弦交流电的频率 $f=50\text{Hz}$,对应的波长为 $\lambda=c/f=6000\text{km}$ 。一般的用电设备和小范围区域内的电力网尺寸均远小于 6000km ,因此对应电路可模型化为集中参数电路进行分析,结果满足工程要求。但对高压输电线,其长度可达几百千米或更长,线路长度与其上电磁波的波长差别不大,将其模型化为集中参数电路进行分析,所得结果就不能满足实际要求,此时就只能将其模型化为分布参数电路进行分析。

本书仅涉及集中参数电路分析方法。

1.1.3 电流和电压的参考方向

在实际工作和生活中,人们约定电路中正电荷移动的方向为电流的实际方向,两点间高

电位指向低电位的方向为电压的实际方向。在进行电路分析时,由于电压、电流的实际方向往往是未知的,或者是随时间变化的,因此,必须预先标定电压、电流的方向,这一标定的方向称为参考方向。参考方向的标定不受实际方向的影响,可随意确定。

电压 u 的参考方向通常用+、-号或箭头表示,如图 1-2 (a) 所示,也可用双下标表示,如 u_{AB} 的含义是图 1-2 (a) 中 A、B 两点之间的电压 u 的参考方向由 A 指向 B。电流 i 的参考方向通常用箭头表示,如图 1-2 (b) 所示,也可用双下标表示,如 i_{AB} 的含义是图 1-2 (b) 中电流 i 的参考方向由 A 指向 B。有了参考方向,结合求出或给定的物理量的具体符号和数值,便可确定物理量的实际方向与大小。例如在图 1-2 (a) 中,假定已得到 $u=1\text{V}$,则表明电压的大小是 1V,实际方向如图中箭头所示;若得到的是 $u=-1\text{V}$,则表明电压的大小是 1V,实际方向与图中箭头方向相反。同理,在图 1-2 (b) 中,假定已得到 $i=1\text{A}$,则表明电流的大小是 1A,实际方向如图中箭头所示;若得到的是 $i=-1\text{A}$,则表明电流的大小是 1A,实际方向与图中箭头方向相反。可见,在预先标定电压、电流参考方向的情况下,通过给出或求出的电压、电流的表现形式(带符号的函数式或数值),就可确定电压、电流的实际方向和大小。

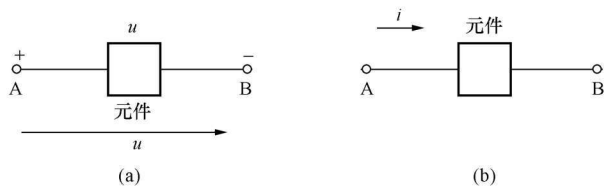


图 1-2 电压和电流参考方向的表示

电路中电压和电流的参考方向可以分别单独指定。如果指明的流过某一元件或局部电路的电流的参考方向与其上电压的参考方向相同,则把两者称为关联参考方向,如图 1-3 (a) 所示, u 与 i 就被称为关联参考方向;当两者参考方向不一致时,如图 1-3 (b) 所示,则被称为非关联参考方向。图 1-3 中的 N 表示电路的一个部分,可由多个元件构成,也可以是一个元件,它有两个端子与电路的其他部分相连。

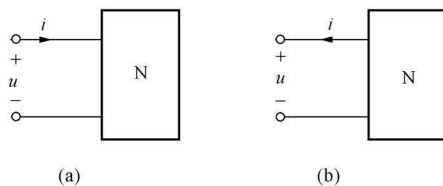


图 1-3 电压和电流的关联参考方向和非关联参考方向

关于电流和电压的参考方向,有必要强调的是:①电流、电压的参考方向可任意地独立选定,但一旦选定,在电路分析和计算过程中则不应随意改变;②在后面将要论述的电路分析计算过程中,在电路图中标出的所有电压、电流的方向均是参考方向,而不是实际方向。

1.1.4 电能量与电功率

当电路工作时,电场力推动正电荷在电路中运动,电场力对电荷做功,同时电路吸收能量。电路在单位时间内吸收的能量称为电路吸收的电功率,简称功率。

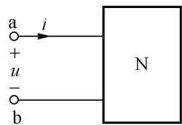


图 1-4 电路的功率计算

图 1-4 所示电路中,电流 i 和电压 u 的参考方向一致,为关联参考方向。在 dt 时间内通过该电路的电荷量为 $dq=idt$,它由 a 端移到 b 端,电场力对其做的功为 $dA=udq$,因此电路吸收的能量为

$$dW = dA = u dq \quad (1-2)$$

即

$$dW = ui dt \quad (1-3)$$

则电路吸收的功率为

$$p = \frac{dW}{dt} = ui \quad (1-4)$$

式(1-4)表明,当电流和电压的方向取关联参考方向时,乘积“ ui ”表示电路吸收的功率。如果求得 $p > 0$,表示该电路确实吸收功率;如果 $p < 0$,表示该电路吸收负功率,即实际发出功率。当电流和电压的参考方向相反,即为非关联方向时,乘积“ ui ”表示电路发出的功率。此时,若求得 $p > 0$,表示该电路确实发出功率;如果 $p < 0$,表示电路实际吸收功率。

在国际单位制(SI)中,功率的单位是W(瓦特)。工程上常用的功率单位有MW(兆瓦)、kW(千瓦)和mW(毫瓦)等,它们与W(瓦)的换算关系为 $1\text{MW} = 10^6\text{W}$, $1\text{kW} = 10^3\text{W}$, $1\text{mW} = 10^{-3}\text{W}$ 。

电路中的能量是电功率对时间的积分。由 t_0 到 t 时间内电路(或元件)吸收的能量可表示为

$$W = \int_{t_0}^t P d\xi = \int_{t_0}^t ui d\xi \quad (1-5)$$

在SI中,能量的单位为J(焦耳)。工程和生活中还采用 $\text{kW} \cdot \text{h}$ (千瓦时)作为电能单位, $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 也称为1度(电)。

$$1\text{kW} \cdot \text{h} = 10^3\text{W} \times 3600\text{s} = 3.6 \times 10^6\text{J}$$

在电路的分析计算中,功率和能量的计算是十分重要的,这是因为实际电路在工作时总伴有电能和其他形式能量的相互转换;此外,电气设备、电路器件本身还受到额定功率的限制,在使用时应注意其电流值或电压值是否超过额定值。如果过载(指超过额定值),会使设备或器件损坏,或电路不能正常工作。这里,额定值是指正常工作状态下所规定的数值。

1.2 电路元件

1.2.1 电阻元件

理想电阻元件也称为线性电阻元件,它的特性定义如下:当电压和电流取关联方向时,在任何时刻,其两端的电压 u 和流过的电流 i 服从线性关系,即

$$u = Ri \quad (1-6)$$

或

$$i = Gu \quad (1-7)$$

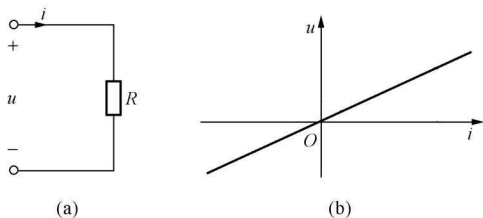


图 1-5 线性电阻元件及其伏安特性

式(1-6)中的系数 R 称为元件的电阻,符号如图 1-5(a)所示;式(1-7)中的系数 G 称为元件的电导, R 与 G 是互为倒数的关系,即 $G = 1/R$ 。在SI中, R 的单位为 Ω (欧姆,简称欧), G 的单位为 S(西门子,简称西)。

线性电阻元件的伏安特性（电压电流关系）如图 1-5（b）所示，它是通过以 $u-i$ 为轴的平面直角坐标系原点的一条直线，直线的斜率与元件的 R 有关。

当线性电阻元件的电压 u 和电流 i 为关联参考方向时，其消耗的功率为

$$P = ui = Ri^2 = u^2/R \quad (1-8)$$

或

$$P = Gu^2 = i^2/G \quad (1-9)$$

在 t_0 到 t 时间内，线性电阻元件消耗的电能为

$$W_R = \int_{t_0}^t Ri^2(\xi)d\xi \quad (1-10)$$

当线性电阻元件的端电压无论为何值时，流过它的电流恒为零，此时 $R = \infty \Omega$ ，称为“开路”；当线性电阻元件流过的电流无论为何值时，其两端电压始终为零，此时 $R = 0 \Omega$ ，称为“短路”。

实际电阻元件并不满足理想电阻元件的特性，如反映理想电阻元件特性的式（1-6）中的电压和电流可为无穷大，而实际电阻元件上的电压和电流是受限制的。当电压电流过大时，实际电阻元件就会被烧毁。但在实际电阻元件能够正常工作的电压、电流范围内，若电阻上电压与电流的相互关系近似符合线性关系，则可把实际电阻模型化为线性电阻，以供理论分析和计算所用。

1.2.2 电容元件

理想电容元件也称为线性电容元件，它的特性定义如下：元件上所存储的电荷量 q 与其两端的电压 u 成正比，即

$$q = Cu \quad (1-11)$$

式中： C 为电容元件的参数，简称电容，其图形符号如图 1-6（a）所示。在 SI 中，电容的单位是 F（法拉，简称法）。工程技术中，电容常用的单位还有 μF （微法）和 pF （皮法），它们与 F 的换算关系为： $1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$ ， $1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$ 。

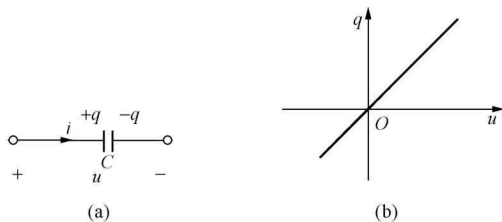


图 1-6 线性电容元件及其库伏特性

线性电容元件的库伏特性，可用 $q-u$ 为轴的平面直角坐标系中的一条过原点的直线来表示，如图 1-6（b）所示。

实际电容元件并不满足理想电容元件的特性，如针对理想电容元件的式（1-11）中的电压可为无穷大，而实际电容元件上的电压是受限制的，当电压过大时，实际电容元件就会被击穿。在实际电容元件能够正常工作的电压范围内，若电容上电压与电荷的相互关系近似符合线性关系时，可把实际电容模型化为线性电容供理论分析和计算所用。

当电容元件上的电压 u 随时间发生变化时，存储在电容元件上的电荷随之变化，这样便出现了充电或放电现象，使得连接电容元件的导线中有电流流过。如果电流 i 和电压 u 取关联参考方向，则由式（1-11）可得

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu)}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-12)$$

如果 i 和 u 所取的参考方向非关联，则有

$$i = -C \frac{du}{dt} \quad (1-13)$$

对式 (1-12) 进行积分可得

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{0-} i(\xi) d\xi + \frac{1}{C} \int_{0-}^t i(\xi) d\xi = u(0-) + \frac{1}{C} \int_{0-}^t i(\xi) d\xi \quad (1-14)$$

式 (1-14) 中 $u(0-)$ 是 $t=0-$ 时刻电容元件上已具有的电压, 此电压描述了电容元件过去的状态, 称为初始电压。而 $\frac{1}{C} \int_{0-}^t i(\xi) d\xi$ 是 $t=0-$ 以后在电容元件上形成的电压。式 (1-14) 说明, 电容在时刻 t 时的电压, 不仅取决于 t 时刻的电流值, 而且取决于 $(-\infty \rightarrow t)$ 所有时刻的电流值, 即与电流过去的全部历史状况有关。由此可见, 电容元件有记忆电流的作用, 所以该元件被称为是记忆元件。

当电容元件的电压、电流取关联参考方向时, 它所吸收的瞬时功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt}$$

若 $p > 0$, 说明电容元件实际是在吸收能量, 即处于被充电状态; 若 $p < 0$, 说明电容元件在释放能量, 处于放电状态。当电容元件从初始时刻 t_0 到任意时刻 t 被充电时, 它吸收的能量 ΔW_C 为

$$\Delta W_C = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) dt = \int_{t_0}^t Cu \frac{du}{d\xi} d\xi = \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(t_0)$$

电容元件吸收的能量以电场能量的形式存储, t 时刻电容元件储存的电场能量 $W_C(t)$ 为

$$W_C(t) = \frac{1}{2} Cu^2(t) \quad (1-15)$$

电容元件被充电时, $|u(t)|$ 增加, $W(t)$ 增加, 故元件吸收能量; 电容元件放电时, $|u(t)|$ 减少, $W(t)$ 减少, 故元件释放能量。一个理想电容元件若原来没有被充电, 则在充电时它所吸收并存储起来的能量一定会在放电完毕时全部释放出来, 并不消耗能量。所以, 电容元件是一种储能元件。由于电容元件不会释放出多于它吸收 (或存储) 的能量, 所以它又是一种无源元件。

1.2.3 电感元件

理想电感元件也称为线性电感元件, 它的特性定义如下: 元件中的磁链 ψ 与流过的电流 i 成正比, 即

$$\psi = Li \quad (1-16)$$

式中: L 为电感元件的参数, 简称电感, 其图形符号如图 1-7 (a) 所示。在 SI 中, 电感的单位是 H (亨利)。工程中常用的单位是 mH (毫亨) 和 μH (微亨)。它们和 H 的换算关系为 $1\text{mH} = 10^{-3}\text{H}$, $1\mu\text{H} = 10^{-6}\text{H}$ 。

线性电感元件磁链 ψ 与电流 i 之间的关系可用 ψ - i 为轴的平面直角坐标系中的一条过原点的直线表示, 如图 1-7 (b) 所示。

实际电感元件并不满足理想电感元件的特性, 如针对理想电感元件的式 (1-16) 中的电流可为无穷大, 而实际电感元件上的电流是受限制的, 当电流过大时, 实际电感元件因过热会被烧毁。在实际电感元件能够正常工作的电压电流范围内, 若电感上的电流与其上磁链的相互关系近似符合线性关系时, 可把实际电感模型化为线性电感供理论分析和计算所用。

当变化的电流 i 通过实际电感线圈时,如图 1-8 所示,在线圈中将会产生变化的磁通或磁链,变化的磁链在线圈两端必然引起感应电压 u ,当 u 与 i 为关联参考方向时,则

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1-17)$$

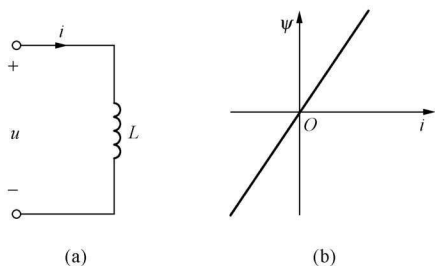


图 1-7 线性电感元件及其韦安特性

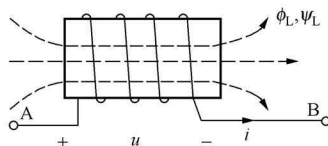


图 1-8 实际电感线圈

对式 (1-17) 进行积分可得

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\xi) d\xi = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{0-} u(\xi) d\xi + \frac{1}{L} \int_{0-}^t u(\xi) d\xi = i(0-) + \frac{1}{L} \int_{0-}^t u(\xi) d\xi \quad (1-18)$$

式中 $i(0-)$ 是 $t=0-$ 时刻电感元件中存在的电流,它总结了电感元件过去的历史状况,称为初始电流。 $\frac{1}{L} \int_{0-}^t u(\xi) d\xi$ 是 $t=0-$ 以后在电感元件中形成的电流。式 (1-18) 说明, t 时刻电感元件的电流不仅取决于该时刻的电压值,而且取决于 $(-\infty \rightarrow t)$ 所有时刻的电压值,即与电感电压全部的去历史有关。电感电压在 $t=0-$ 以前的全部历史,可用 $i(0-)$ 表示。可见,电感元件有记忆电压的功能,它是一种记忆元件。

当电感电压与电感电流为关联参考方向时,电感元件吸收的瞬时功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1-19)$$

从初始时刻 t_0 到任意时刻 t 期间内,电感吸收的能量 ΔW_L 为

$$\Delta W_L = \int_{t_0}^t p d\xi = L \int_{t_0}^t i d\xi = \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(t_0)$$

电感元件在任意时刻 t 存储的磁场能量 $W_L(t)$ 为

$$W_L(t) = \frac{1}{2} Li^2(t) \quad (1-20)$$

由此可知,当 $|i|$ 增加时, W_L 增加,电感元件吸收能量;当 $|i|$ 减小时, W_L 减少,电感元件释放能量。电感元件不会把吸收的能量消耗掉,而是以磁场能量的形式储存在磁场中。可见电感元件是一种储能元件。由于电感元件不会释放出多于它吸收(或存储)的能量,所以它是一种无源元件。

1.2.4 独立电源

独立电源包括理想电压源和理想电流源两种。

1. 理想电压源

理想电压源的定义:端子间电压保持为一个确定的时间函数或常量,而与流过的电流和外接电路无关。

理想电压源常简称为电压源，其电压电流特性可表述为

$$\begin{cases} u(t) = u_s(t) \\ i(t) = -\infty \rightarrow +\infty \end{cases} \quad (1-21)$$

式中： $u_s(t)$ 为给定的时间函数，与流过的电流 $i(t)$ 及外接电路无关； $i(t)$ 由外电路确定，取值范围为 $-\infty \rightarrow +\infty$ 。

电压源的图形符号如图 1-9 (a) 所示。当 $u_s(t)$ 为恒定值时，电压源称为直流电压源，此时，其图形符号可用图 1-9 (b) 表示，其中长划线表示电源“+”极，短划线表示电源“-”极， U_s 表示恒定的电压值。

图 1-10 (a) 给出的是电压源与外电路相连接的情况。其端子 1、2 之间的电压 $u(t)$ 等于 $u_s(t)$ ，它不受外电路的影响。图 1-10 (b) 给出的是直流电压源的伏安特性，它是一条不随时间改变且平行于电流轴的固定直线。

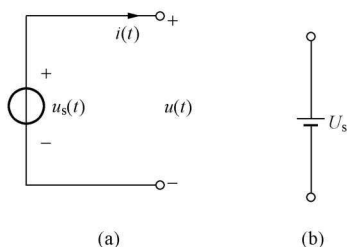


图 1-9 理想电压源的符号

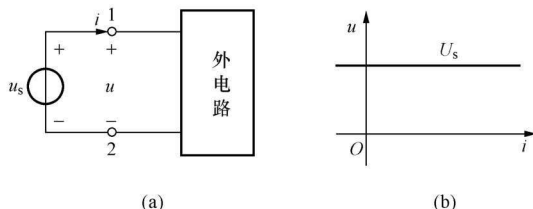


图 1-10 理想电压源的连接与特性

针对电压源，通常将电压和电流的参考方向取为非关联方向，如图 1-10 (a) 所示，则电压源发出的功率为

$$p(t) = u_s(t)i(t) \quad (1-22)$$

此功率也是外电路吸收的功率。

2. 理想电流源

理想电流源的定义：提供的电流为一个确定的时间函数或常量，而与两端的电压和外接电路无关。

理想电流源常简称为电流源，其电压电流特性可表述为

$$\begin{cases} i(t) = i_s(t) \\ u(t) = -\infty \rightarrow +\infty \end{cases} \quad (1-23)$$

式中： $i_s(t)$ 为给定的时间函数，与端电压和外接电路无关；电流源的端电压由外电路决定，取值范围为 $-\infty \rightarrow +\infty$ 。电流源的图形符号如图 1-11 (a) 所示。当 $i_s(t)$ 为常量（恒定值）时，这种电流源称为直流电流源。

图 1-11 (b) 给出了电流源与外电路相连接的情况。图 1-11 (c) 为直流电流源的伏安特性，它是一条不随时间改变且平行于电压轴的固定直线。

针对电流源，通常将电压和电流的参考方向取为非关联参考方向 [如图 1-11 (a)、(b) 所示]，则电流源发出的功率为

$$p(t) = u(t)i_s(t) \quad (1-24)$$

此功率也是外电路吸收的功率。

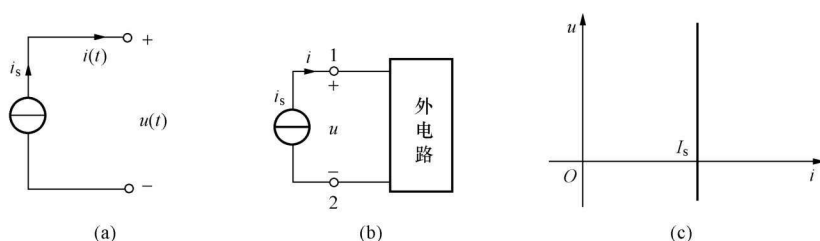


图 1-11 理想电流源的符号、连接及特性

常见的实际电压源，如蓄电池、干电池、发电机和电子稳压器等，它们的特性在一定条件下与理想电压源比较接近，此种情况下，它们的电路模型可用理想电压源表示。实际电压源更精确的模型是表示成理想电压源与理想电阻的串联组合。常见的实际电流源，如光电池、电子稳流器等，它们的特性在一定条件下与理想电流源比较接近，在此情况下，它们的电路模型可用理想电流源表示。实际电流源更精确的模型是表示成理想电流源与理想电阻的并联组合。

电压源和电流源统称为独立电源，这里的“独立”二字是相对下面要讨论的“受控”电源而言的。

1.2.5 受控电源

受控电源是随着电子技术的发展引入电路理论的，应用十分广泛。例如，晶体管的集电极电流受基极电流控制，运算放大器的输出电压受输入电压控制，对包含这类器件的电路进行理论分析，都要用到受控源模型。

受控电源分为受控电压源和受控电流源两类，共四种，分别为：电压控制电压源 (VCVS)；电压控制电流源 (VCCS)；电流控制电压源 (CCVS)；电流控制电流源 (CCCS)。它们的图形符号如图 1-12 所示。

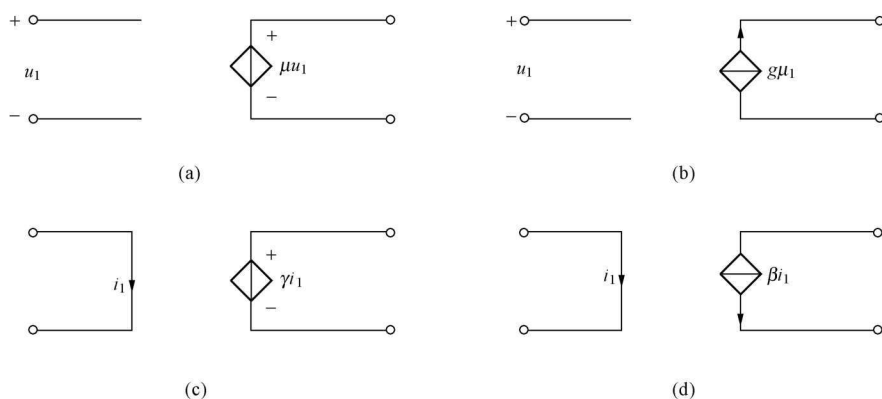


图 1-12 受控电源的图形符号

(a) VCVS; (b) VCCS; (c) CCVS; (d) CCCS

受控电源用菱形符号表示其电源部分，以便与独立电源相区别。图 1-12 中控制端的 u_1 和 i_1 分别表示控制电压和控制电流，受控端的 μ , g , γ , β 分别是相关的控制系数。其中， μ 是一个无量纲的纯数，称为电压控制电压源的转移电压比（或电压放大系数）； g 具有电导