

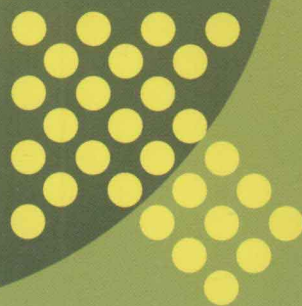
21世纪高等学校规划教材



DIANLU YU DIANZI JISHU

电路与电子技术

傅 平 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

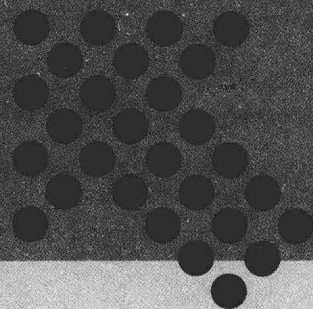
21世纪高等学校规划教材



DIANLU YU DIANZI JISHU

电路与电子技术

编 著 傅 平
主 审 李守成



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。内容包括：电路基础知识、电路分析方法、正弦交流稳态电路、三相交流电路、过渡过程的一阶电路、常用半导体器件、晶体管放大电路、反馈电路、集成运算放大器及其应用、直流稳压电源、逻辑代数基础、组合逻辑电路、时序逻辑电路和 555 集成定时器及其应用等。书中为配合理论讲授列举了丰富的典型例题，每章后均配置了本章小结和习题，并在书后给出了部分习题的参考答案，以便于读者巩固和检验所学知识。

本教材可供普通高校工科非电类专业电工电子技术（不含电机及控制内容）、电类专业少学时电路与电子技术、模拟电子技术和数字逻辑电路等课程的教学使用，还可供电类专业自学者使用，亦可供有关技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电路与电子技术/傅平编著. —北京：中国电力出版社，
2011.12

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 2463 - 3

I. ①电… II. ①傅… III. ①电路理论—高等学校—教材
②电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM13②TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 260851 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](http://www.cepp.sgcc.com.cn))

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 2 月第一版 2012 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.5 印张 525 千字

定价 38.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

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

本教材以教育部门颁发的电工技术、电子技术课程的基本教学要求为依据,本着必须、够用、能用的原则编写。针对不同非电类专业特点,作者根据多年的课堂教学和实践教学经验,对传统的电工学教学内容进行了筛选,重点介绍电路和电子技术的基本概念、基本理论、基本分析方法和基本电路及其应用,旨在培养学生独立思考问题和解决问题的能力,为学习后续专业课程及从事工程技术和科学研究等工作打下基础。

本教材的主要内容包括电路分析、模拟电子技术和数字电子技术三大部分,削减了传统电工学教材中的电机及其控制部分内容,文字力求简洁明了。全书内容共11章,其中第1章~第4章为电路分析内容。第5章~第8章为模拟电子技术内容,第9章~第11章为数字电子技术内容,与传统的电工学教材相比,本教材在编写上主要有以下特点:在电路分析部分,本书详细介绍了网孔电流法和节点电位法这两种基本的系统电路分析方法;对含受控源电路的分析计算进行了相应地介绍;交流电路的分析计算以相量法为主线进行了详细介绍,删去了二阶电路过渡过程分析及非正弦周期电路分析的内容。在模拟电子技术部分,详细介绍了晶体管放大电路三种组态的分析计算,加强了反馈电路的内容;对集成运算放大器在信号运算、信号处理和信号产生等方面的应用进行了比较详细地介绍;直流稳压电源作为一种重要的模拟电路,本教材单列一章进行了介绍。在数字电子技术部分,着重介绍了逻辑代数的运算、逻辑函数的化简方法、组合逻辑电路和时序逻辑电路的分析及设计、常用的组合逻辑电路和时序逻辑电路等,加强了中规模集成电路模块及应用等内容的介绍,对555集成定时器及其应用进行了较为详细地介绍,删去了A/D、D/A转换部分内容。本书适用于普通高校工科非电类专业电工电子技术、电类专业少学时电路与电子技术、模拟电子技术和数字逻辑电路等课程的教学。不同院校、不同专业可结合课程需要,进行有选择的讲授。

本书由中国地质大学(北京)傅平独立编写而成,新星石油公司高级工程师张秀英对本书的编写提出了许多宝贵的建议。在编写过程中,中国地质大学(北京)教务处、中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院等单位也给予了大力支持,谨在此表示诚挚的谢意。

本书由北京交通大学李守成教授主审,李先生以严谨的科学态度和高度的敬业精神统审了全书,提出了许多宝贵的修改建议,在此致以衷心的感谢!

限于作者的学识和能力,书中难免存在不妥和纰漏,恳请广大师生和读者提出批评和建议。

编 者

2011年10月于北京

目 录

前言

1 电路的基本概念与定律	1
1.1 电路和电路模型	1
1.2 电路的基本物理量及其方向	2
1.3 电路元件	6
1.4 电路基本定律	13
1.5 电路的三种状态	16
1.6 电路中电位的计算	18
本章小结	19
习题 1	20
2 电路基本分析方法	22
2.1 电路形式的等效变换	22
2.2 支路电流法	31
2.3 网孔电流法	32
2.4 节点电位法	35
2.5 叠加定理	40
2.6 等效电源定理	42
2.7 非线性电阻电路分析	46
本章小结	47
习题 2	48
3 正弦交流电路	51
3.1 正弦交流电的基本概念	51
3.2 正弦量的相量表示法	54
3.3 基尔霍夫定律的相量形式	58
3.4 单一参数元件 R 、 L 、 C 的正弦交流电路	59
3.5 串联交流电路	64
3.6 并联交流电路	68
3.7 正弦交流稳态电路的分析和计算	72
3.8 一般正弦交流电路的功率及功率因数的提高	73
3.9 交流电路的频率特性与电路中的谐振	76
3.10 三相交流电路	84
本章小结	92

习题 3	93
4 一阶电路的过渡过程分析	96
4.1 电路的过渡过程和换路定则	96
4.2 一阶电路的零输入响应	99
4.3 一阶电路的零状态响应	103
4.4 一阶电路的全响应	106
4.5 一阶线性电路过渡过程分析的三要素法	109
4.6 微分电路和积分电路	111
本章小结	112
习题 4	113
5 常用半导体器件	116
5.1 半导体基础知识	116
5.2 半导体二极管	120
5.3 特殊二极管	124
5.4 双极型晶体管	126
5.5 场效应晶体管	133
本章小结	139
习题 5	140
6 晶体管基本放大电路	142
6.1 放大电路的基本概念和组成原则	142
6.2 固定偏置式共发射极放大电路	144
6.3 稳定静态工作点共发射极放大电路	156
6.4 共集电极放大电路——射极输出器	159
6.5 共基极放大电路	161
6.6 场效应管放大电路	163
6.7 多级放大电路	165
6.8 差动放大电路	170
6.9 互补对称功率放大电路	175
6.10 放大电路中的负反馈	179
本章小结	189
习题 6	190
7 集成运算放大器及其应用电路	194
7.1 集成运算放大器概述	194
7.2 集成运算放大器的信号运算应用	198
7.3 集成运算放大器的信号处理应用	206
7.4 集成运算放大器的信号产生应用——信号发生器	212
本章小结	221

习题 7	221
8 直流稳压电源	225
8.1 直流稳压电源的组成	225
8.2 整流电路	225
8.3 滤波电路	228
8.4 稳压电路	230
本章小结	233
习题 8	234
9 数字逻辑电路基础	236
9.1 数制与码制	236
9.2 逻辑代数的基本运算和基本门电路	239
9.3 逻辑代数的基本运算法则及定理	244
9.4 逻辑函数的常用表示形式	246
9.5 逻辑函数化简	250
本章小结	254
习题 9	254
10 集成逻辑门电路及组合逻辑电路	258
10.1 常用集成逻辑门电路	258
10.2 组合逻辑电路的分析和设计	263
10.3 常用组合逻辑电路	264
本章小结	280
习题 10	280
11 触发器与时序逻辑电路	283
11.1 双稳态触发器	283
11.2 时序逻辑电路的分析和设计	292
11.3 计数器	298
11.4 寄存器	313
11.5 555 集成定时器及其应用	317
本章小结	323
习题 11	324
部分习题参考答案	331
参考文献	336

1 电路的基本概念与定律

本章从建立电路模型入手,介绍电路的基本概念与定律,主要内容有电路的作用与组成、电路的基本物理量、电路元件及电路的基本定律。只有掌握了这些基础知识,才可以对电路进行分析和计算。故本章内容是学习电路和电子技术课程的重要基础。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路的作用与组成

电路(circuit)是为电流的流通提供路径,它是为了完成某种功能按一定方式连接起来的电器设备或元件的组合,是电流的通路。在电路理论中有时也将电路称为电网络(electricity network)。

一、电路的作用

实际电路的形式繁多,功能各异,但主要作用有两个:

(1) 实现电能的生产、传输和转换。如在电力电路中,发电设备将热能、风能或水能等形式的能量转换为电能,传输线路将电能传输到用电设备,用电设备再将电能转换为光能、热能或机械能等形式的能量。

(2) 实现电信号的传递、处理或变换。如在电子电路中,接收装置将载有音频、视频信息的电磁波转换为电信号,放大电路对电信号进行传递和处理,音频或视频播放装置再将处理或变换后电信号还原为原始信息。

二、电路的组成

电路通常由电源(source)、负载(load)和中间环节三个基本部分组成。电源是提供电能装置的总称,它将其其他形式的能量转换为电能,如发电机、电池、信号源等;负载是取用电能装置的总称,它将电能转换为其他形式的能量,如电动机、电灯、扬声器等;中间环节是连接电源和负载之间的部分,它起着电能的传输、控制和分配等作用,如导线、变压器、放大器等。

一个由电池、灯泡、开关和筒体组成的实际手电筒电路如图1-1所示。其中电池是电源元件,它将化学能转换为电能,具有提供电能的性质;灯泡为负载,它将电能转换为光能,具有消耗电能的性质;筒体和开关为中间环节,用来连接电池和灯泡,具有电能的传输和控制的性质。

在电网络中也常将电源和信号源的电压或电流称为激励(excitation),它推动电路的工

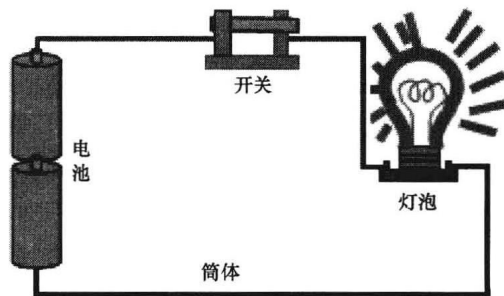


图1-1 实际的手电筒电路

作。由激励在电路中各部分所产生的电压和电流称为响应 (response)。已知激励求响应, 称为电路的分析; 已知响应求激励, 则称为电路的设计。

根据电路中工作电信号的不同, 可以将电路分为直流电路和交流电路两大类。当激励为不随时间变化的直流电时, 称这种电路为直流电路 (direct current circuit, DC circuit); 当激励为随时间变化的交流电时, 称这种电路为交流电路 (alternating current circuit, AC circuit)。

1.1.2 电路模型

在生产实践中所使用的各种电路都是由实际的电气元器件组成的, 这些电气元器件泛指实际的电路部件, 如电阻器、电容器、电感线圈、晶体管、变压器等。但实际的电路元件或器件其电磁性质很复杂, 一种电路元件往往兼有两种以上的电磁特性。如一个白炽灯泡, 它除了具有消耗电能的电阻特性外, 还具有一定的电感特性和电容特性。为了便于用数学方法分析电路, 一般要将实际电路模型化, 用足以反映其电磁性质的理想电路元件或其组合来模拟实际电路中的器件, 从而构成与实际电路相对应的电路模型。例如, 在激励频率不很高也不很低时, 白炽灯泡的电感性和电容性就可以忽略不计, 此时就可将其视为一个理想电阻元件。由理想电路元件所组成的电路就称为实际电路的电路模型 (circuit model), 简称为电路, 这一过程称为电路建模 (circuit modeling)。本书今后所提的电路都是指电路模型。将各种理想电路元件用规定的图形符号所表示的图形称为电路图 (circuit diagram)。如果将电池、灯泡、开关和筒体理想化, 将它们分别用理想电动势 E 、理想电阻 R 、理想开关 S 和理想导线来模拟, 就可以得到手电筒电路实体的电路模型, 如图 1-2 所示。

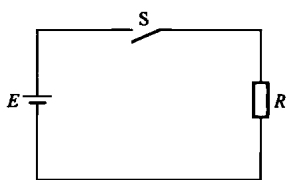


图 1-2 实际手电筒
电路的电路模型

需要说明的是, 在不同的条件下, 同一实际器件可能具有不同的电路模型。例如, 由于线圈绕线之间的等效电容较小, 故当工作频率较高时, 其电容效应就不容忽视, 这种情况下表征这个线圈的较精确的电路模型中还应当包含电容元件。实践证明, 只要电路模型选取得恰当, 这样按照模型电路分析计算所得结果与对应的实际电路中测量所得结果基本上是一致的, 不会造成较大的误差。

1.2 电路的基本物理量及其方向

电流、电压、电动势和电功率等都是电路的基本物理量, 电路分析的目的也就是对这些物理量进行分析和计算。

1.2.1 电流及其方向

一、电流 $i(I)$

电流 (current) 是电荷 (带电粒子) 在电场力作用下有规则的定向运动而形成的。电流是个代数量, 通常规定电流的实际方向为正电荷移动的方向 (或负电荷移动的反方向)。电流用字母 i 表示, 它定义为单位时间内通过导体某一横截面的电荷量, 即

$$i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (1-1)$$

式中: dq 为在极短时间 dt 内通过导体某横截面的电荷量。

电路的基本物理量均用不同的字母来表示, 且有大小写之分, 如电流 I 和 i 、电压 U 和

u 等。若式 (1-1) 中 dq/dt 为一常数, 则表示电流的大小和方向都不随时间变化, 这时称为恒定电流, 简称直流电流, 一般用大写字母 I 表示; 而大小和方向都随时间变化的电流则用小写字母 i 表示, 称为交变电流, 简称交流电流, 正弦电流就是其中的一种。

直流电流 I 的表达式可以写为

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1-2)$$

在国际单位制中, 电荷量 Q 的单位为库仑 (C), 时间 t 的单位为秒 (s), 则电流 I 的单位为安培, 简称安 (A)。当计量微小的电流时, 可用毫安 (mA)、微安 (μA) 或皮安 (pA) 为单位, 它们之间的换算关系为

$$1\text{A} = 1 \times 10^3 \text{mA} = 1 \times 10^6 \mu\text{A} = 1 \times 10^{12} \text{pA} \quad (1-3)$$

二、电流的参考方向

上面已经提到电流是一个代数量, 因此在分析电路时, 不但要考虑其大小, 还要考虑其方向。但在分析和计算较为复杂的电路时, 某条支路中电流的实际方向往往是无法事先预知的。故在分析计算电路之前, 可人为地任意假定某一方向为电流的正方向, 这个事先假定的正方向就称为电流的参考方向 (reference direction)。参考方向可以任意选定, 但不论如何选定, 都不会影响电路分析所得结论的正确性。在电路图中电流的参考方向常用箭标表示, 也可用双下标表示, 某元件上电流的参考方向如图 1-3 所示。如用双下标 I_{ab} 就表示电流的参考方向为从 a 点流向 b 点。

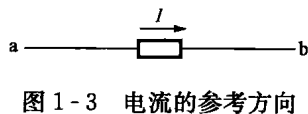


图 1-3 电流的参考方向

三、实际方向与参考方向的关系

必须指出, 假定的电流参考方向与电流的实际方向并不一定相同。按参考方向分析计算出的电流值有两种可能: 正值或负值。如果计算值为正, 说明电流的实际方向与假定的参考方向相同; 如果计算值为负, 说明电流的实际方向与假定的参考方向相反。

例如, 电流的参考方向如图 1-3 中所标, 若计算得 $I=5\text{A}$, 则说明电流的实际方向为由 a 流向 b ; 若计算得 $I=-5\text{A}$, 则说明电流的实际方向为由 b 流向 a 。

可见, 只有当参考方向选定以后, 讨论电流的正负才有意义。因此, 必须养成在分析电路时首先标出有关电量的参考方向的习惯。

1.2.2 电压和电位及其方向

一、电压 $u(U)$

电压 (voltage) 在数值上定义为电场力把单位正电荷从电场中的某一点移到另一点所做的功, 它是一个衡量电场力对电荷做功能力的物理量, 用字母 $u(U)$ 来表示。电压用公式表示为

$$u = \frac{dw}{dq} \quad \text{或} \quad U = \frac{W}{Q} \quad (1-4)$$

式中: $q(Q)$ 为电荷, $w(W)$ 为电场力移动电荷所做的功。

在国际单位制中, 电压的标称单位是伏特 (V), 有时也用千伏 (kV)、毫伏 (mV)、微伏 (μV) 等作单位。它们之间的换算关系为

$$1\text{V} = 1 \times 10^{-3} \text{kV} = 1 \times 10^3 \text{mV} = 1 \times 10^6 \mu\text{V} \quad (1-5)$$

二、电压的参考方向

在分析电路时认为电压具有方向, 通常规定电压的实际方向为由高电位端指向低电位

端,即电位降低的方向。

和电流一样,在分析计算电路之前,同样可以人为地任意为电压假定一个正方向,即参考方向。只有当参考方向选定以后,讨论其正负才有意义。电压的参考方向是可以任意设定的,可用箭标表示,也可用“+”、“-”符号或双下标表示,如 U_{ab} 表示a点与b点之间电压参考方向是由a指向b。电压参考方向的标定方法如图1-4所示。

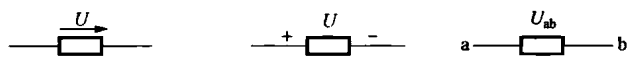


图1-4 电压参考方向的标定

三、电位

在分析和计算电路时通常用到电位(electric potential)的概念。规定电场力将单位正电荷从电场内的a点移动到无限远处所做的功就称为a点的电位,用 V_a 表示,因为在无限远处的电场为零,故其电位也为零。可见,a、b两点间的电压也就是a、b两点间的电位差,故a、b两点间的电压 U_{ab} 也可用电位差来表示,即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-6)$$

四、关联参考方向

理论上某个元件或某段电路上电压和电流的参考方向是可以分别任意设定的,但为了便于分析和计算,在电路图中习惯于将电压 U 和电流 I 的参考方向取为一致,即电流 I 的参考方向从电压标以“+”极性的一端指向标以“-”极性的一端,参考方向的这种设定方法就称为电压、电流取关联参考方向(associated reference direction),如图1-5(a)所示;反之设定则称为取非关联参考方向,如图1-5(b)所示。



图1-5 电压和电流的关联与非关联参考方向

(a) 关联参考方向;(b) 非关联参考方向

若在电路分析中已说明电压与电流取关联参考方向,则在电路图中仅需标出电压或电流其中之一的参考方向即可。

1.2.3 电动势

电动势(electromotive force)是一个用来衡量电源力对电荷做功能力的物理量,用字母 $e(E)$ 来表示。电动势在数值上等于电源力把单位正电荷从电源的低电位端经电源内部移至高电位端所做的功。在电源力的作用下,电源不断地把其他形式的能量转换为电能以维持电路中电流的持续流通。规定电动势的实际方向是在电源内部由低电位端指向高电位端,即为电位升高的方向。

由于我们已对电压和电动势的实际方向作过一些规定,因此,我们要注意电压 U 和电动势 E 的参考方向间不同的内在含义。电动势的标称单位与电压相同,均为伏特(V)。

1.2.4 电功率与电能

一、电功率

电路在工作状态下,总伴随有电能和其他形式能量的相互转换。因此,电功率的计算在电路分析中也是十分重要的。

电功率简称为功率(power),用字母 $p(P)$ 来表示,它是指单位时间内元件所吸收或发出的电能,或者说是电路中能量的转换速率,定义为

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{udq}{dt} = ui \quad (1-7)$$

式中若电能 w 的单位为焦耳 (J)，时间 t 的单位为秒 (s)，电压的单位为伏特，电流的单位为安培，则功率 p 的单位为瓦特 (W)；辅助单位还有千瓦 (kW)、毫瓦 (mW) 等。若电路中某元件两端电压和流过其中的电流已求得，则此元件的功率就可计算出来。

由于电压、电流有正负之分，因此功率也有正负之分。当电压和电流采用关联参考方向时，若计算结果为 $p > 0$ ，表明元件此时是在吸收或者说是在消耗电能，它在电路中的属性为负载；如果计算结果为 $p < 0$ ，表明元件此时是在产生或者说是在释放电能，它在电路中的属性为电源。当电压和电流采用非关联参考方向时，结论正好相反。

当然，也可以根据电压和电流的实际方向来确定电路中某一元件是电源属性还是负载属性：如果流过某元件电流的实际方向是从电压实际极性的高电位端流出，则表明此元件是电源属性，它产生或释放电能；如果流过某元件电流的实际方向是从电压实际极性的高电位端流入，则表明此元件是负载属性，它吸收或消耗电能。

电路在实际工作时，各电源元件所产生或发出的功率之和必定等于各负载元件所吸收或消耗的功率之和，这就是所谓的功率平衡。功率平衡是判断电路计算结果正误的一个重要手段。

二、电能

在时间 t 内转换的电功率称为电能 (electrical energy)，用字母 w 或 W 表示，电能的国际单位为焦耳 (J)。电路中电能的表示式为

$$w = pt = uit \quad \text{或} \quad W = Pt = UIt \quad (1-8)$$

工程上电能的计量单位为千瓦·时 (kW·h)，1 千瓦·时即俗称的 1 度电，它与焦耳的换算关系为

$$1\text{kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{J} \quad (1-9)$$

【例 1-1】 图 1-6 中各元件上的电压、电流参考方向如图所标，已知功率 P 均为 $+15\text{W}$ ，试判断哪些元件具有电源属性（提供能量），哪些元件具有负载属性（吸收能量）？

解 在图 1-6 (a) 电路中，电压 U 和电流 I 采用关联参考方向， $P > 0$ ，表明元件此时是在吸收电能，其属性为负载；在图 1-6 (b) 电路中，电压 U 和电流 I 采用非关联参考方向， $P > 0$ ，表明元件此时是在提供电能，它在电路中的属性为电源。

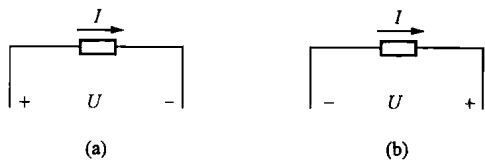


图 1-6 [例 1-1] 电路

1.2.5 电路基本物理量的额定值

电气设备在工作时，其电压、电流和功率的使用限额即是该电气设备的额定值 (rated value)，它是对电气设备的使用规定。额定值通常以下标 N 表示，如额定电流 I_N 、额定电压 U_N 、额定功率 P_N 等。电气元件或设备的额定值通常标注在产品铭牌上或说明书中，如一盏白炽灯泡上标注的电压是交流 220V、功率为 60W，这就是该灯泡的额定值。

电气设备在工作时的实际值不一定等于其额定值，当电气设备的工作值低于其额定值时，称为欠载，电气设备不能正常发挥功能；当工作值超过其额定值时，称为过载，电气设备易损坏或降低其使用寿命，甚至会产生严重事故；当工作值等于其额定值时，称为满载，此时设备运行经济合理，安全可靠。

1.3 电 路 元 件

电路元件包括无源元件和有源元件两大类。前者包括电阻元件、电感元件和电容元件，简称为电阻、电感和电容；后者包括电压源元件和电流源元件，简称为电压源和电流源。这些元件分别由相应的符号和参数来表征。由于实际的电路元件电磁特性比较复杂，但若在分析电路时，突出实际电路元件的主要电磁特性，而忽略其次要电磁特性，则可以将实际的电路元件理想化，这时称之为理想电路元件。可以用多个理想电路元件及其组合来近似地代替一个实际的电路元器件。为了表述简便，通常将“理想”二字省略，以下如无特殊说明，元件就是指理想元件。

任何一个复杂电路都是由若干电路元件按一定的方式连接而成。因此，为了分析电路中的电压、电流和功率关系，必须首先掌握单一参数元件上的电压、电流和功率关系。本节对讲述中涉及的普通物理学的基本知识加以直接引用，对其原理不做过多阐述。

1.3.1 电阻元件

一、基本概念

电阻元件 (resistance) 是消耗电能的无源二端元件，它是实际电阻器的理想化模型，简称为电阻，用字母 R 表示。电阻元件是表征电路中消耗电能的元件，它将电源传输给其的电能转换为热能消耗掉。常见的电阻类元件有白炽灯泡、电阻炉、电加热器等。

电阻的国际标准单位为欧姆 (Ω)，经常用的辅助单位还有千欧姆 ($k\Omega$)、兆欧姆 ($M\Omega$) 等，它们之间的换算关系为

$$1M\Omega = 1 \times 10^3 k\Omega = 1 \times 10^6 \Omega \quad (1-10)$$

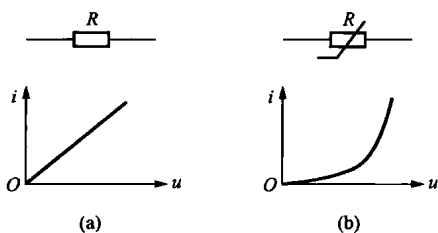
电阻有时也可用电导 (conductance) 来表示，线性电导 G 的定义为电阻的倒数，即

$$G = 1/R \quad (1-11)$$

电导的国际标准单位为西门子 (S)。

二、电阻元件的伏安特性

元件两端电压与流过其中电流的关系称为伏安特性。电阻元件的端电压与流过其中的电流成正比的电阻称为线性电阻，线性电阻的伏安特性曲线是通过坐标原点的一条直线；若某



电阻元件的伏安特性曲线不是通过坐标原点的一条直线，就称之为非线性电阻元件。图 1-7 (a)、(b) 所示分别为线性电阻和非线性电阻的符号及其伏安特性曲线。

在电阻元件两端 u 、 i 取关联参考方向的前提下，可得线性电阻元件两端电压 u 与流过其中电流 i 的关

图 1-7 电阻元件的符号及伏安特性曲线

(a) 线性电阻；(b) 非线性电阻

$$u = Ri \quad \text{或} \quad U = RI \quad (1-12)$$

式 (1-12) 即为著名的欧姆定律 (Ohm's Law)。

由学过的物理课程可知，欧姆定律是电路理论中最基本的定律之一，它确定了流过电阻的电流 I 与电阻两端电压 U 之间的约束关系，遵循欧姆定律的电阻称为线性电阻。

应当说明的是,当电阻元件上电压和电流取非关联参考方向时,欧姆定律式应为

$$U = -RI \quad (1-13)$$

三、电阻元件的能量关系

当 u 、 i 取关联参考方向时,线性电阻所消耗的功率计算式为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 \quad (1-14)$$

可见,电阻元件所消耗的功率与电压 u 或电流 i 的平方成正比, p 恒为正值。这表明线性电阻元件任何时刻都不会提供电能,它总是吸收电能并将其转换为热能消耗掉。

电阻元件消耗的电能为

$$W = \int_0^t p dt = \int_0^t ui dt = \int_0^t Ri^2 dt \quad (1-15)$$

1.3.2 电感元件

一、基本概念

电感元件(inductance)是储存磁场能量的无源二端元件,它是实际电感器的理想化模型,简称为电感,用字母 L 表示。在电工技术中,电感元件通常是由导线绕制成线圈的形式而成,它将电源传输给它的电能以磁场能量的形式储存起来。

电感的国际标准单位为亨利(H),经常使用的辅助单位还有毫亨利(mH),它们之间的换算关系为

$$1\text{H} = 1 \times 10^3 \text{mH} \quad (1-16)$$

线圈电感的大小取决于线圈的形状、几何尺寸、匝数和线圈周围介质的磁导率,即

$$L = \frac{\mu SN^2}{l} \quad (1-17)$$

式中: S 为线圈横截面积, m^2 ; l 为线圈长度, m ; N 为线圈匝数; μ 为线圈周围介质的磁导率, H/m 。

由物理学知识可知,当单匝线圈中有电流 i 通过,便产生了磁通 Φ ,若线圈有 N 匝,则乘积 $N\Phi$ 就称为线圈的磁链 Ψ ,如图 1-8 所示。显然,磁链 Ψ 是电流 i 的函数,当线圈周围的介质为非铁磁物质(如空气)时,磁链 Ψ 与电流 i 成正比关系,这种电感就称为线性电感,其电感量为一常量。当线圈导线电阻很小可以忽略时,一个电感线圈就可以视为一个理想电感元件。

在磁链 Ψ 的参考方向与电流 i 的参考方向符合右手螺旋定则的情况下, Ψ 与 i 之间存在以下关系

$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{N\Phi}{i} \quad (1-18)$$

二、电感元件的伏安关系

当通过电感元件的电流 i 随时间发生变化时,穿过电感元件的磁通也将相应发生变化,线圈中要产生感应电动势 e_L ,其大小等于磁通 Φ 随时间的变化率。若规定感应电动势的参

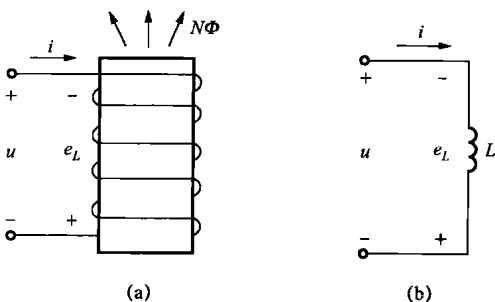


图 1-8 线性电感元件
(a) 电感线圈; (b) 理想电感

考方向与磁通的参考方向符合右手螺旋定则, 则电流 i 与 e_L 的参考方向也应一致 (如图 1-8 所示), 在此规定情况下, 根据电磁感应定律, N 匝线圈的感应电动势为

$$e_L = -N \frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (1-19)$$

式 (1-19) 表明电感元件两端感应电动势的大小与该时刻流过其中电流的变化率成正比关系, 而与该时刻电流的大小无关。电流的变化率越大, 则其两端的感应电动势也就越大。

式 (1-19) 中的负号表明感应电动势的实际方向与电流随时间的变化率成反比, 当电流随时间增大时, $di/dt > 0$, 则 $e_L < 0$, 感应电动势的实际方向与参考方向相反, 电感元件将电能以磁场能量的形式储存起来并阻碍电流的增加; 当电流随时间减小时, $di/dt < 0$, 则 $e_L > 0$, 感应电动势的实际方向与参考方向相同, 电感元件将储存的磁场能量以电能的形式释放出来并阻碍电流的减小。由此可见, 感应电动势始终在阻碍电流的变化。

在如图 1-8 所示电感元件两端电压与电流取关联参考方向的前提下, 可得电感元件两端电压 u 与流过其中电流 i 的微分关系式为

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} \quad (1-20)$$

由式 (1-20) 可见, 若流过电感元件的电流为一恒定的直流电流 I , 电流值不随时间而变化, 则有 $di/dt = 0$, $e_L = 0$, $u = 0$, 即此时电感元件两端电压等于零, 此时理想电感元件相当于一条电阻为零的短路线, 即理想电感元件对直流电流无阻碍作用。因此在直流稳态电路中可将电感元件视为一条短路线。

如已知电压 u , 则可得 u 、 i 之间的积分关系式为

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u dt = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u dt + \frac{1}{L} \int_0^t u dt = i_0 + \frac{1}{L} \int_0^t u dt \quad (1-21)$$

式 (1-21) 中 i_0 表示 $t=0$ 时刻电感元件中电流的初始值, 它反映了电感元件的初始储能。若电感元件的初始储能为零, 则 $i_0 = 0$ 。

三、电感元件的能量关系

当 u 和 i 取关联参考方向时, 电感元件吸收的功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1-22)$$

电感元件储存的电能为

$$w = \int_0^t p dt = \int_0^t Li \frac{di}{dt} dt = \int_{i(0)}^{i(t)} Li di = \frac{1}{2} Li^2 - \frac{1}{2} Li_0^2 \quad (1-23)$$

若电感元件的初始储能为零, 则式 (1-23) 可写为

$$w = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1-24)$$

式 (1-24) 说明, 电感元件储存的磁场能量与通过其中电流的二次方成正比。当电流增加时, 电感元件从电源吸收电能并转换成磁能储存起来, 储能增加; 当电流减小时, 电感元件将储存的磁场能量转换为电能的形式释放出来, 储能减少。由此可见, 理想电感元件只有储存和释放磁场能量的性质而本身并不消耗能量, 故将电感元件称为储能元件。

在实际工作中, 一个电感线圈的导线都具有一定的电阻, 因此, 常用一个理想电感元件

与一个理想电阻元件的串联形式来表示一个实际的电感线圈。

1.3.3 电容元件

一、基本概念

电容元件 (capacitance) 是储存电场能量的无源二端元件, 用绝缘介质将两片金属极板隔开即可构成一个简单的电容器, 电容元件就是实际电容器的理想化模型。由于绝缘介质是不导电的, 在电容器极板两端外加电源的作用下, 其两个极板上分别聚集起等量异性的正、负电荷, 则在极板间的介质中建立起电场, 其电荷量 q 与所加电压 u 成比例, 这个比例系数就称为电容, 用字母 C 表示。电容元件分为无极性电容和有极性电容两类。无极性电容 (如云母电容) 在使用时两个引线可以任意连接; 有极性电容 (如电解电容) 的两个金属极板有正负极之分, 在使用时标有正号的电极应接电路的高电位端, 否则电容元件将会损坏。图 1-9 所示为电容元件的符号。

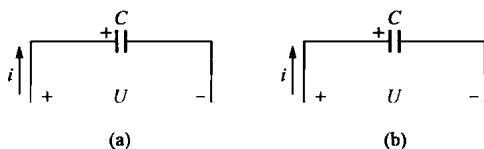


图 1-9 电容元件的符号

(a) 无极性电容; (b) 有极性电容

设电容器极板上积累有电荷 q , 端电压为 u , 则电容器的电容为

$$C = \frac{q}{u} \quad (1-25)$$

在国际单位制中, 电容的单位为法拉, 简称法 (F)。由于法拉的单位在工程应用中显得过大, 故经常使用的辅助单位还有微法拉 (μF) 和皮法拉 (pF) 等。它们的换算关系为

$$1\text{F} = 1 \times 10^6 \mu\text{F} = 1 \times 10^{12} \text{pF} \quad (1-26)$$

电容器的电容与极板的尺寸和极板间绝缘介质的介电系数有关, 即

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (1-27)$$

式中: S 为极板面积, m^2 ; d 为极板间距离, m ; ϵ 为极板间绝缘介质的介电系数, F/m 。

二、电容元件的伏安关系

当电容元件极板两端所加电压随时间发生变化时, 极板上的电荷量 q 也随之发生变化, 则电容元件中便有变化的电流流过。在 u 、 i 取关联参考方向时有微分关系式

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-28)$$

式 (1-28) 表明电容电流与其两端电压的变化率成正比关系, 即只有当电容元件两端的电压发生变化时电容元件中才有电流通过, 电压变化率越大电容电流也就越大。当电压随时间增大时, $du/dt > 0$, 则 $i > 0$, 电流的实际方向与参考方向相同, 电容元件将电能以电场能量的形式储存起来, 称电容元件处于充电状态; 当电压随时间减小时, $du/dt < 0$, 则 $i < 0$, 电流的实际方向与参考方向相反, 电容元件将储存的电场能量以电能的形式释放出来, 称电容元件处于放电状态。

此外, 若电路工作在直流稳定状态下, 由于电容两端电压恒定, 电压值不随时间而变化, $du/dt = 0$, 根据式 (1-28) 可知这时电容中电流为零, 电容两端相当于断开, 即电容元件具有阻隔直流电流的作用。因此在直流稳态电路中可将电容元件视为断开。

如已知电流 i , 则可得电容元件 u 、 i 之间的积分关系式为

$$u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i dt + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = u_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (1-29)$$

式中： u_0 表示 $t=0$ 时刻电容元件上电压的初始值，它反映了电容元件的初始储能。若电容元件的初始储能为零，则 $u_0=0$ 。

三、电容元件的能量关系

当电容元件两端电压 u 和电流 i 取关联参考方向时，电容元件吸收的功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt} \quad (1-30)$$

从 0 到 t 时间内，电容元件吸收的电能为

$$w = \int_0^t p dt = \int_0^t Cu \frac{du}{dt} dt = \int_{u(0)}^{u(t)} Cu du = \frac{1}{2} Cu^2 - \frac{1}{2} Cu_0^2 \quad (1-31)$$

若初始电压 u_0 为零，则电容元件在 t 时刻所储存的电场能量为

$$w = \frac{1}{2} Cu^2 \quad (1-32)$$

式 (1-32) 说明，电容元件储存的电场能量与其端电压的二次方成正比。当电压随时间增大时，电容被充电，储存的电场能量增加；当电压随时间降低时，电容放电，储存的电场能量减少。由此可见，理想电容元件只有储存和释放电场能量的性质而本身不消耗能量，它也是一种储能元件。

1.3.4 电压源

实际的电源器件包括发电机、电池、信号源等，通常它们在电路中起激励作用，为电路提供能量，故常将它们统称为电源。一个实际电源器件可以用两种模型来表示：以电压输出的形式表示称为电压源 (voltage source)；以电流输出的形式表示称为电流源 (current source)。当然，一个实际的电源器件可以既输出电压也输出电流，只不过在电路中的表示形式不同而已。

所谓独立电源是指它们的输出电压或电流是独立存在的，不受电路中其他支路的电压或电流影响，它们是任何一个完整电路中不可或缺的组成部分。当电源的输出电压或电流为恒定数值时，称其为直流电源，如直流发电机等；若电源的输出电压或电流是随时间而变化的，则称其为交流电源，如正弦交流信号源等。本处主要介绍直流电源。

一、理想电压源

理想电压源是实际电压源的一种理想化模型，当实际电压源内部的电能损耗可以忽略不计，即可将实际电压源抽象为理想电压源。理想直流电压源也称为恒压源，即其输出的端电压是恒定的，与其中流过的电流无关。理想电压源的图形符号和伏安特性分别如图 1-10 (a)、(b) 所示。

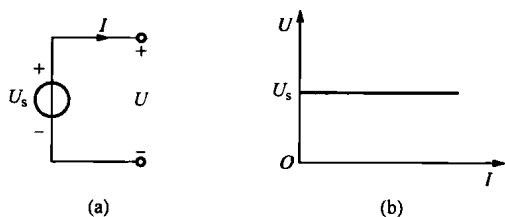


图 1-10 理想电压源的符号和伏安特性

(a) 理想电压源符号；(b) 理想电压源的伏安特性

图中 U_s 为理想电压源的端电压，直流电压源的伏安特性是一条不通过原点且与电流轴平行的直线。

理想直流电压源的端电压 U_s 也可用电动势 E 表示，由于规定电压的正方向为由“+”指向“-”，电动势的正方向为由“-”指向“+”，因而有 $U_s = E$ 。