



“十三五”普通高等教育规划教材

安徽省重大教学研究项目

DIANGONG DIANZI JISHU
YU YINGYONG

电工电子技术 与应用

郎佳红 主 编

程木田 副主编

扫一扫



扫码获取配套数字资源



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育规划教材

安徽省重大教学研究项目

电工电子技术 与应用

主 编 郎佳红

副主编 程木田

编 写 朱志峰 周郁明 唐得志 周春雪

主 审 李月乔 王 彦



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育规划教材。

本书根据中国高等学校电工学会修订的《“电工学”课程教学基本要求》、教育部高等学校电工电子基础课程教学指导委员会《电工电子基础课程教学基本要求》，并结合目前我国高等学校非电类工科专业对“电工电子基础课程”适宜教学迫切需求等实际情况，编写了此书。

本书主要内容有电路基本概念与定律、电阻电路的一般分析方法、电路的暂态分析、正弦稳态电路分析、磁路与变压器、电动机、继电器—接触器控制系统、工业企业供电与安全用电、可编程控制器、半导体基本器件、基本放大电路、集成运算放大电路、直流稳压电源、组合逻辑电路、时序逻辑电路以及模数转换电路。

本书结合专业特点和社会需求有机结合了电工、电子、电气各部分基础必修知识点，选材新颖、结构合理，较好满足各方面和时代需求，着力培养学生的“电”问题的分析和解决问题的能力，提高学生的工程意识和社会竞争能力。

本书既可作为非电类工科专业的基础课教材，也可作为相关专业工程技术人员的学习和参考用书。

扫码获取数字化教学资源 and 习题参考答案。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工电子技术与应用/郎佳红主编. —北京: 中国电力出版社, 2018. 8

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978 - 7 - 5198 - 2066 - 4

I. ①电… II. ①郎… III. ①电工技术—高等学校—教材 ②电子技术—高等学校—教材
IV. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 108469 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 乔 莉 (010-63412535)

责任校对: 常燕昆

装帧设计: 郝晓燕

责任印制: 吴 迪

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2018 年 8 月第一版

印 次: 2018 年 8 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 16.75

字 数: 406

定 价: 42.00 元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前 言

“电工电子技术”是高等院校中非电类工科专业，诸如化工、材料、冶金、建筑等专业必修的重要的专业基础课，具有较强的针对性和适用性。

随着“985工程”和“211工程”的实施，推动了高水平大学和重点学科的建设，然而高校规模的高速扩大，导致不少学校的专业设置、师资队伍、教材资源和教学实验条件与课程教学出现一定的不适应性。高校教材，作为教学改革成果和教学经验的结晶，其质量问题自然备受关注。随着人才培养模式的创新、必修课课时进一步的压缩，任课教师需要根据学校、社会需求以及学生特点进行删减和补充教学内容，这在一定程度上影响了“电工电子技术”课程的教学。因此，编写基本概念、基本定律和基本方法简单明了又不失完整，内容深入浅出、详略得当、重点突出，适应专业需求，利于教师教学和学生学习的适用性强的教材是十分必要的。为此，根据多年教学经验和体会，遵循“以实用为主，理论够用为度”的原则，组织多位长期担任本课程教学的教师编写了本教材，旨在使学生通过本教材的学习，更好地掌握电工电子技术中的基本概念、基本分析方法，培养学生科学思维能力、分析计算能力和理论联系实际的工程能力。为激发学生的学习兴趣，本教材增加了理论应用与工程实践内容，以提高创新性思维，为以后的工作和学习打下良好的基础。

本教材参考学时为40~56学时，其中加“*”部分为选学内容。为便于教学，每章开首有内容提要 and 基本要求，每章末附有一定数量习题，方便学生的学习和实习训练。

本教材由安徽工业大学电工电子教研室郎佳红老师担任主编，负责全教材的策划、统审工作，并编写了第1、2、4、9章和第13章。另外，参与本教材编写的教师还有唐得志（第3章），朱志峰（第5、6章），周春雪（第7、8章），周郁明（第10~12章）、程木田（第14~16章）。

本教材承蒙华北电力大学李月乔和安徽工业大学王彦主审，在此表示感谢。

限于编者水平，错误和不妥之处恳请广大读者批评指正。

编 者

2018年5月

目 录

前言	1
第 1 章 电路基本概念与定律	1
1.1 电路基本概念	1
1.2 电路元器件	4
1.3 电路基本定律	13
1.4 电路等效变换	16
习题	20
第 2 章 电阻电路的一般分析方法	23
2.1 一般分析方法	23
2.2 电路定理	27
习题	33
第 3 章 电路的暂态分析	36
3.1 动态电路的基本概念	36
3.2 换路定理和初始值的分析	37
3.3 一阶动态电路的三要素法	38
3.4 工程应用	49
习题	51
第 4 章 正弦稳态电路分析	55
4.1 正弦交流电路有关概念	55
4.2 正弦量的相量	57
4.3 阻抗与导纳	61
4.4 正弦稳态电路相量分析方法	63
4.5 正弦稳态电路的功率分析	64
4.6 三相电路的基础知识	66
4.7 频率响应与谐振电路	71
4.8 工程应用	75
习题	77
第 5 章 磁路与变压器	81
5.1 磁路的基本概念	81
5.2 磁路的分析方法	84
5.3 变压器	85
5.4 工程应用	89
习题	91

第 6 章 电动机	93
6.1 三相异步电动机的基本知识	93
6.2 三相异步电动机的电路分析	97
6.3 三相异步电动机的转矩与机械特性	98
6.4 三相异步电动机的启动、调速与制动	100
6.5 工程应用	104
习题	106
第 7 章 继电器—接触器控制系统	107
7.1 常用控制电器	107
7.2 继电器—接触器控制电路	114
7.3 工程应用	118
习题	122
第 8 章 工业企业供电与安全用电	124
8.1 工业企业供电	124
8.2 安全用电	126
8.3 节约用电	130
习题	130
* 第 9 章 可编程控制器	132
9.1 概述	132
9.2 可编程控制器的程序编制	133
9.3 可编程控制器工程应用	143
习题	151
第 10 章 二极管和晶体管	154
10.1 半导体基本知识	154
10.2 半导体 PN 结及导电特性	156
10.3 二极管	157
10.4 稳压二极管	160
10.5 双极型晶体管	161
10.6 工程应用	166
习题	167
第 11 章 基本放大电路	170
11.1 基本放大电路的组成	170
11.2 放大电路的静态分析	172
11.3 放大电路的动态分析	173
11.4 静态工作点的稳定	179
11.5 差分放大电路	181
11.6 互补对称功率放大电路	183
11.7 工程应用	185
习题	187

第 12 章 集成运算放大电路	190
12.1 集成运算放大器的基本知识	190
12.2 运算放大电路中的负反馈	193
12.3 集成运算放大电路的信号运算	199
12.4 工程应用	205
习题	207
第 13 章 直流稳压电源	210
13.1 基本知识	210
13.2 整流电路	211
13.3 滤波电路	213
13.4 直流稳压电路	214
习题	216
第 14 章 组合逻辑电路	219
14.1 逻辑代数与逻辑函数	219
14.2 逻辑门电路	224
14.3 组合逻辑电路的分析与设计	226
14.4 工程应用	228
习题	232
第 15 章 触发器与时序逻辑电路	235
15.1 基本知识	235
15.2 双稳态触发器	235
15.3 时序逻辑电路的分析	241
15.4 寄存器与计数器	242
习题	247
* 第 16 章 模拟量和数字量的转换	251
16.1 概述	251
16.2 D/A 转换器	252
16.3 A/D 转换器	254
习题	257
参考文献	259



扫码获取习题参考答案

第1章 电路基本概念与定律



基本要求

- ◇ 理解电压、电流参考方向的概念。
- ◇ 熟练应用 VCR 计算电路吸收或发出功率。
- ◇ 掌握电阻、独立源等电路元件特点、伏安特性。
- ◇ 掌握基尔霍夫定律，熟练应用基尔霍夫定律分析基本电路。



内容简介

本章首先通过实际电路的应用引出电路模型的概念，接着介绍电压、电流参考方向的概念及其表示形式，以及元件吸收、发出功率的分析与计算。最后介绍电路的基本定律，如电压电流关系 (VCR)；基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。

1.1 电路基本概念

如今电已遍及人们的日常生活、工农业生产、科学研究、国防等方方面面。在人们日常生活中会遇到各种的实际电路，针对实际电路的共同属性不难得出它们一般的共同点。实际电路是为完成某种实际需要而设计、安装、运行的，由电路元器件通过导线连接而成，具有电能传输、信号处理与计算、测量与控制、信息存储等功能。实际电路虽然多种多样，功能各不相同，但它们是受到共同的基本规律支配的。

1.1.1 理想电路元器件

为了能够用数学方法从理论上分析电路的主要性能，需要在一定条件下按电路元件主要性质理想化，使得每一种理想电路元件具有单一严格的数学定义，体现单一的电磁现象。本书中涉及的理想电路元件主要有电阻、电容、电感，如图 1-1 (a) ~ (c) 所示。理想电压源与理想电流源器件，其符号分别如图 1-1 (d)、(e) 所示。注意，理想电压源两端的电压不因所接负载的情况而改变，始终保持规定值和方向；理想电流源，其提供的电流不因所接负载的情况而改变，始终保持规定值和方向。

在电路理论中，用电阻、电感、电容、电压源、电流源等理想电路元器件组成的电路称为电路模型。由电路模型分析计算结果是实际电路情况的近似，但一定要把实际电路的主要性质和功能反映出来。图 1-2 (a)

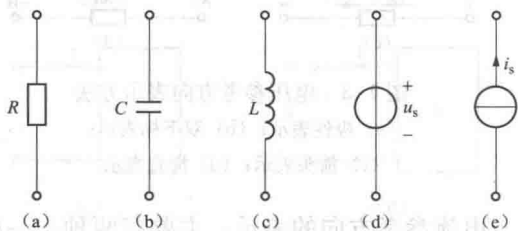


图 1-1 元件符号

- (a) 电阻；(b) 电容；(c) 电感；
- (d) 理想电压源；(e) 理想电流源

所示为电池、小灯泡、开关和实际导线组成的照明电路，图 1-2 (b) 则是该照明电路的电路模型。

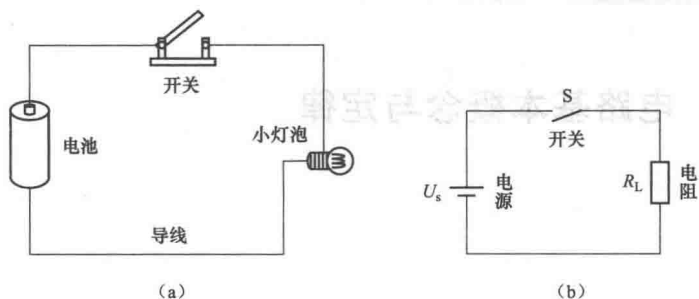


图 1-2 实际电路与电路模型

(a) 照明电路；(b) 电路模型

建立电路模型时，应当根据电路的实际工作条件和工程精度要求，对实际元件选取合适的电路模型。

1.1.2 电流和电压参考方向

电路理论中涉及的物理量主要有电流 (I)、电压 (U)、电荷 (Q)、磁通 (Φ)、电功率 (P) 和电磁能量 (W)。主要物理量的单位见表 1-1。

表 1-1 主要物理量单位与换算关系

变量名称	主要单位	单位换算关系
电流	μA 、 mA 、 A 、 kA	$1\text{kA}=10^3\text{A}$ 、 $1\text{mA}=10^{-3}\text{A}$ 、 $1\mu\text{A}=10^{-6}\text{A}$
电压	μV 、 mV 、 V 、 kV	$1\text{kV}=10^3\text{V}$ 、 $1\text{mV}=10^{-3}\text{V}$ 、 $1\mu\text{V}=10^{-6}\text{V}$
功率	mW 、 W 、 kW	$1\text{kW}=10^3\text{W}$ 、 $1\text{mW}=10^{-3}\text{W}$ 、 $1\mu\text{W}=10^{-6}\text{W}$
磁通 (链)	Wb 、 $\text{V}\cdot\text{s}$ 、 Mx	$1\text{Wb}=1\text{V}\cdot\text{s}$ 、 $1\text{Wb}=10^8\text{Mx}$

为了方便对电路进行分析和计算，需要假定电压电流的方向，即为参考方向。该方向不是实际方向，可能与实际方向相同，也可能与实际方向相反。在假定方向下，若电压、电流为正值，则表明参考方向与实际方向一致；若电压、电流为负值，则表明与实际方向相反。

电压的参考方向的表示主要有三种方法，如图 1-3 所示。

1) 用正负极性表示，表示电压参考方向由“+”指向“-”，如图 1-3 (a) 所示。

2) 用双下标表示，如 U_{AB} ，表示电压参考方向由 A 指向 B，如图 1-3 (b) 所示。

3) 用箭头表示，箭头的指向为电压的参考方向，如图 1-3 (c) 所示。电压的参考方向也可以用以上三种表示法方法的组合来表示电压参考方向，如图 1-3 (d) 所示，采用了极性和下标的混合表示电压参考方向。

电压参考方向与实际方向相同时，电压大于零，反之电压小于零，如图 1-4 所示。

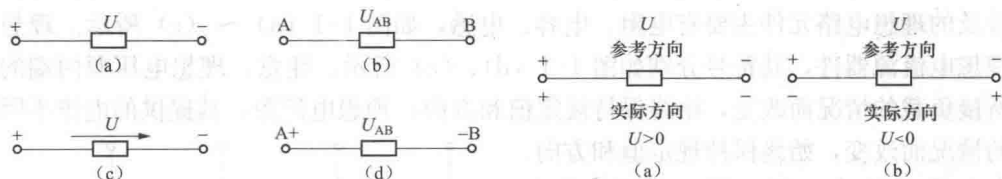


图 1-3 电压参考方向表示方法

(a) 极性表示；(b) 双下标表示；

(c) 箭头表示；(d) 混合表示

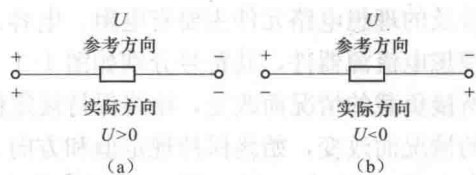


图 1-4 电压参考方向与实际方向关系

(a) 参考方向与实际方向一致；(b) 参考方向与实际方向相反

电流参考方向的表示，主要有两种，一种是箭头法，如图 1-5 (a) 所示；另一种是下标法，如图 1-5 (b) 所示。

若用箭头表示，电流的参考方向为箭头的所指方向；用双下标表示，如 i_{AB} ，电流的参考方向是 A 指向 B 的方向。有的时候是这两种方法混合表示电流的参考方向，如图 1-5 (c) 所示。

在电路理论分析中,有时用到电位的概念。为了电路分析的方便,常在电路中选定某一点为电位参考点,电路中任一点到电位参考点的电压就称为该点的电位。

通常设电位参考点的电位为零,所以电位参考点也称为零电位点,电位的单位与电压一样,为伏[特](V)。电路中电位参考点可任意选择;电位参考点一经选定,电路中各点的电位值就是唯一的;当选择不同的电位参考点时,电路中各点电位值将改变,但任意两点间电压保持不变。需要指出的是,若某两点为等电位点,在电路分析中,该两点之间可以看成短路也可以看成开路。这样处理不影响电路的计算结果,但往往对电路的分析计算带来很大的方便。

【例 1-1】 如图 1-6 所示电路,已知: $U_{ab}=2\text{V}$, $U_{bc}=3\text{V}$ 。按要求求解下列问题:若以 c 点为参考点,求 a、b、c 点的电位和电压 U_{ac} 、 U_{bc} ;若以 b 点为参考点,再求以上各值。

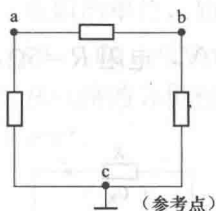


图 1-6 [例 1-1] 电路

解: (1) 以 c 点为电位参考点,则有

$$U_{ac} = U_{ab} + U_{bc} = 2 + 3 = 5(\text{V}), U_{bc} = 3(\text{V})$$

a、b、c 三点相对于参考点的电位分别为 $U_a = 5\text{V}$, $U_b = 3\text{V}$, $U_c = 0\text{V}$ 。

(2) 若以 b 点为电位参考点,则有

$$U_{ac} = U_{ab} + U_{bc} = 2 + 3 = 5(\text{V}), U_{bc} = 3(\text{V})$$

a、b、c 三点相对于参考点的电位分别为 $U_a = U_{ab} = 2\text{V}$ 、 $U_b = 0\text{V}$ 、 $U_c = -U_{bc} = -3\text{V}$ 。

对于电位的分析和计算不难得出两个结论:

- (1) 电位参考点可任意选择,但电位参考点一旦确定,电路中各点的电位值就是唯一的;
- (2) 选择不同的电位参考点时,电路中各点电位值将改变,任意两点间电压保持不变。

在电路工程理论分析中,有时用到电动势的概念。电动势是指克服电场力把单位正电荷从电源负极经电源内部移到正极所做的功。电动势的参考方向是指电位升高的方向,其与电压的参考方向相反。

对于同一元件,如果该元件电流参考方向与电压参考方向一致,则电压电流参考方向称为关联参考方向;当两者不一致时,称为非关联参考方向。图 1-7 (a)、(c) 电压电流参考方向为关联方向,图 1-7 (b)、(d) 电压电流参考方向为非关联方向。电压和电流参考方向关联还是非关联,关系到电压和电流之间的约束方程前有正负号之别。电压和电流参考方向相关联,约束方程前为正号,反之为负号。

需要说明的是,在分析电路时,必须要假定有关支路电压和电流的参考方向,并在相应支路上加以标注。一旦假定了参考方向,在计算过程中,参考方向不得任意改变。以后电路的分析,在没有特别说明的情

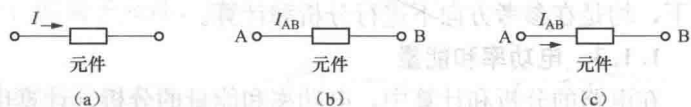


图 1-5 电流参考方向表示方法

(a) 箭头法; (b) 双下标法; (c) 混合表示法

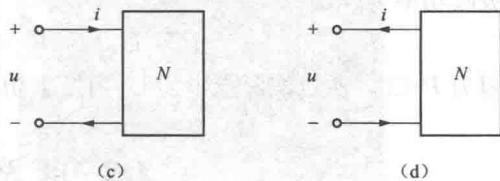
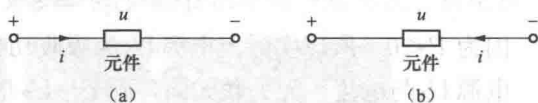


图 1-7 关联方向与非关联方向

(a)、(c) 关联方向; (b)、(d) 非关联方向

况下,均是在参考方向下进行分析和计算。

1.1.3 电功率和能量

在电路的分析和计算中,电功率和能量的分析、计算也是常常遇到的。电功率与电压和电流密切相关。在一定电压和电流参考方向,元件实际上是吸收能量,还是发出能量的问题的讨论,需要注意两个要点,一是电压和电流参考方向是否关联,二是在给定的参考方向下,电压和电流值的正负情况。

(1) u 、 i 参考方向为关联方向。 u 、 i 参考方向为关联方向,如图 1-8 (a) 所示。功率 $p=ui$, 表示吸收功率,若 $p>0$ 表示元件实际上是吸收功率,为负载;若 $p<0$ 表示元件实际上是发出功率,为电源。

(2) u 、 i 参考方向为非关联方向。 u 、 i 参考方向为非关联方向,如图 1-8 (b) 所示。功率 $p=ui$, 表示发出功率,若 $p>0$ 表示元件实际上是发出功率,为电源;若 $p<0$ 表示元件实际上是吸收功率,为负载。

【例 1-2】 如图 1-9 (a) 所示电路,已知电压源 $U_1=5\text{V}$, $U_2=10\text{V}$, 电阻 $R=5\Omega$, 分别求电源 U_1 、 U_2 及电阻 R 可能吸收或发出的功率。

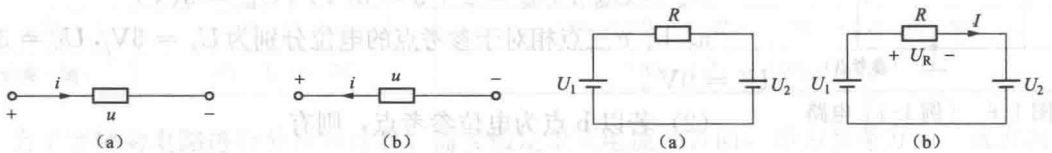


图 1-8 u 、 i 参考方向

(a) 关联方向; (b) 非关联方向

图 1-9 [例 1-2] 电路

解: 电路如图 1-9 (b), 由题意可以求出电路中的电流 I 。

$$I = \frac{U_1 - U_2}{R} = \frac{5 - 10}{5} = -1(\text{A})$$

电阻 R 上功率为

$$P = I^2 R = (-1)^2 \times 5 = 5(\text{W})$$

电源 U_1 与电流 I 为非关联方向, 则 $P=U_1 I$ 表示发出功率。

发出功率为

$$P = U_1 I = 5 \times (-1) = -5\text{W}$$

因为 $P<0$, 所以实际上电源 U_1 为吸收功率, 是负载。

电源 U_2 与电流 I 为关联方向, 则 $P=U_2 I$ 表示吸收功率。

吸收功率为

$$P = U_2 I = 10 \times (-1) = -10\text{W}$$

因为 $P<0$, 所以实际上电源 U_2 为发出功率, 是电源。

1.2 电路元器件

电路元器件是电路中最基本的组成单元。每一种元件反映某种确定的电磁性质。电路元器件按与外部连接端子数目可分为二端子元件, 如电阻、电感、电容、电压源、电流源; 三

端子元件，如晶体管、场效应管；四端子元件，如变压器。

1.2.1 电阻元件

电阻元件是由实际电阻元件经抽象而来的二端元件，反映电阻元件阻碍电流的性质，线性电阻元件的符号如图 1-10 所示。电阻元件的电压与电流之间的函数关系，称为 VCR

(Voltage-Current Relation) 关系，服从欧姆定律。图 1-10 (a) 所示，在电压、电流参考方向为关联方向时，VCR 关系为

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

在电压、电流参考方向为非关联方向时，如图 1-10 (b) 所示。VCR 关系为

$$u = -Ri \quad (1-2)$$

电阻的单位，如果电压单位取伏 [特] (V)，电流单位取安 [培] (A)，则电阻单位为欧 [姆] (Ω)，此外还有微欧 ($\mu\Omega$)、毫欧 ($m\Omega$)、千欧 ($k\Omega$)、兆欧 ($M\Omega$) 等。

在电路的分析和计算中常涉及电阻元件的功率分析和计算。在电压、电流参考方向为关联方向时，

$$p = ui = \frac{u^2}{R} = i^2 R \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 看出，只要 $R \geq 0$ ，便有 $p \geq 0$ ，这说明实际电阻元件总是消耗能量，所以电阻元件为耗能元件。电阻的倒数为电导，用字母 G 表示，其单位为西 [门子] (S)。

$$G = \frac{1}{R}$$

对于实际电阻元件而言，电阻值是一个正值，而且有固定的系列标称值。标称值是根据国家制定的标准系列标注的，不是生产者任意标定的。

实际工程中，设计电路时计算出来的电阻值经常会与电阻的标称值不相符，有时候需要根据标称值来修正电路的计算。

1.2.2 电容元件

在工程技术中，电容器（简称电容）的应用非常的广泛。电容虽然种类、规格繁多，但就其构成原理来说，电容都是由介质（如云母、绝缘纸等）隔开的两块金属极板组成，电解电容如图 1-11 所示。在外加电源的作用下，两块极板上能分别存储等量的正、负电荷。外

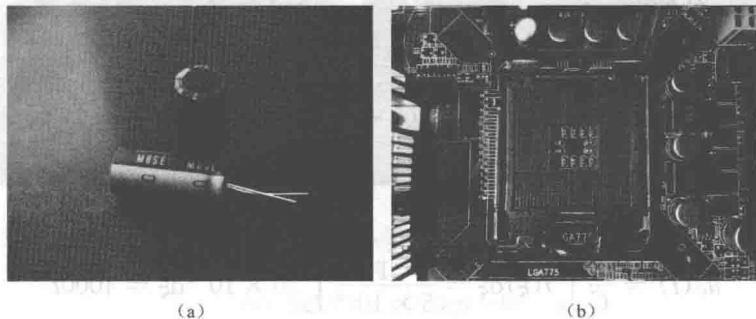


图 1-11 电容

(a) 电解电容实物；(b) 应用

电源拆离后, 这些电荷在电场力相互作用下相互吸引, 又因中间间隔着绝缘介质而不能中和, 故两极板上的电荷能长久地保存下去。在电荷建立的电场中储藏着能量, 因此电容器是一种能够存储电荷或者说存储能量的元件, 可以说电容器是一种电荷与电压相互约束的器件。

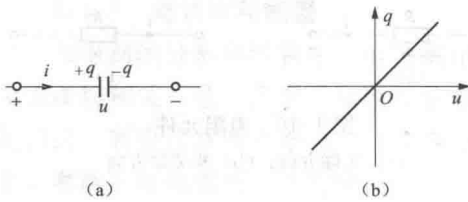


图 1-12 电容元件及其 $u-q$ 特性曲线

(a) 电容元件符号; (b) $u-q$ 特性曲线

电容元件符号及其 $u-q$ 特性曲线如图 1-12 所示。在国际单位制中, 电容 C 的单位为法 [拉](F)。

若电流 $i(t)$ 与电荷 $q(t)$ (或与电压) 参考方向相关联, 满足

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{dCu}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (1-4)$$

在 $i(t)$ 与电荷 $q(t)$ (或与电压) 的参考方向不一致时, 有

$$i(t) = -\frac{dCu}{dt} = -C \frac{du}{dt} \quad (1-5)$$

式 (1-4) 与式 (1-5) 就是电容的 VCR。它们表明: 在某时刻电容的电流取决于该时刻电容电压的变化率。如果电压随时间变化, 电流不为零; 电压不随时间变化时, 则电流为零, 因此电容有隔直流通交流的特点。

也可以用电流 $i(t)$ 表示电压 $u(t)$ 或是 $q(t)$, 对式 (1-4) 取逆关系, 则得

$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi \quad (1-6)$$

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi \quad (1-7)$$

电容电压有记忆特性, 所以电容元件是一种有“记忆”的元件, 电容电压另一个特性是不能跃变, 这个特性在动态电路常常用到, 但是需要注意该性质的前提, 电容电流为一个有限值。

【例 1-3】 已知电容 $C=5\mu\text{F}$, 通过图 1-12 (a) 所示电容的电流波形如图 1-13 (a) 所示, 已知 $u_C(0)=0$ 。试画出电容元件电压 u_C 的波形。

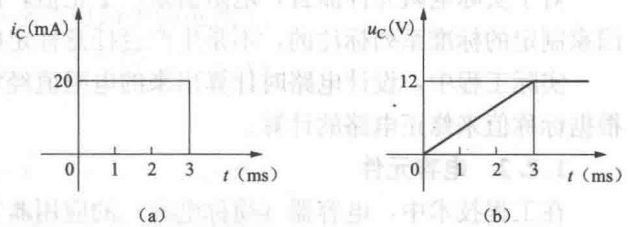


图 1-13 [例 1-3] 波形图

(a) 电容电流波形; (b) 电容电压波形

解: 根据电容元件的 VCR 关系, 即

$$u_C(t) = u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_C(\xi) d\xi$$

分段积分, 当 $t \leq 0$ 时, $u_C=0$ 。

当 $0 \leq t \leq 3\text{ms}$ 时, 有

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_C(\xi) d\xi = \frac{1}{5 \times 10^{-6}} \int_0^t 20 \times 10^{-3} d\xi = 4000t$$

当 $t=3\text{ms}$ 时,

$$u_C(3\text{ms}) = 4000 \times 3 \times 10^{-3} = 12 \text{ (V)}$$

当 $t \geq 3\text{ms}$ 时, 电容电流 $i_C = 0$

$$\begin{aligned} u_C(t) &= u_C(3\text{ms}) + \frac{1}{5 \times 10^{-6}} \int_{3\text{ms}}^t i_C(\xi) d\xi \\ &= u_C(3\text{ms}) \\ &= 12 \text{ (V)} \end{aligned}$$

电容是一个储能元件, 任何元件的某时刻的功率 $p(t)$ 都可由该元件此时刻端电压 $u(t)$ 和流过电流 $i(t)$ 的乘积来表示。在电压和电流参考方向相关联情况下, 某时刻线性电容元件的功率可以表示为

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

从 t_0 到 t 时刻, 电容元件吸收的能量为

$$\begin{aligned} W_C &= \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t Cu(\xi) \frac{du(\xi)}{d\xi} d\xi = C \int_{u(t_0)}^{u(t)} u(\xi) du(\xi) \\ &= \frac{1}{2} Cu(t)^2 - \frac{1}{2} Cu(t_0)^2 \\ &= W_C(t) - W_C(t_0) \end{aligned}$$

若 $W_C(t) > W_C(t_0)$, 表明在 t_0 到 t 时间段电容元件储存了能量。若 $W_C(t) < W_C(t_0)$, 则电容元件释放了能量。电容元件释放的能量一定是充电吸收并储存的能量, 它本身不产生能量也不消耗能量。

1.2.3 电感元件

在工程中, 广泛应用导线绕制的线圈, 以增强线圈内部的磁场。例如, 在电子电路中常用的高频线圈, 在变压器中包含在铁心上绕制的线圈等。通常把导线绕制的线圈, 称为电感器或电感线圈, 如图 1-14 所示。载流线圈中的电流 i 产生的磁通 Φ_L 与 N 匝线圈交链成为磁通链 ψ_L , 磁通链与磁通的关系为 $\psi_L = N\Phi_L$ 。该磁通 Φ_L 和磁通链 ψ_L 都是本线圈施感电流 i 产生的, 所以称为自感磁通和自感磁通链。 Φ_L 和 ψ_L 的方向与 i 的参考方向符合右手螺旋法则, 如图 1-15 所示。

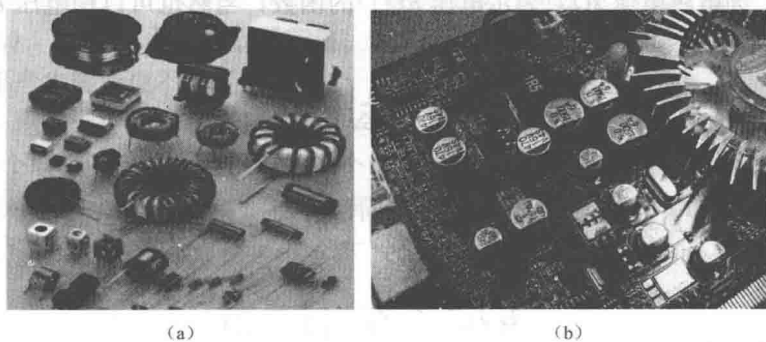


图 1-14 电感

(a) 电感实物; (b) 电感应用

当磁通链随时间变化时, 在线圈两端产生感应电压。若电压、电流参考方向相关联, 根据电磁感应定律, 有

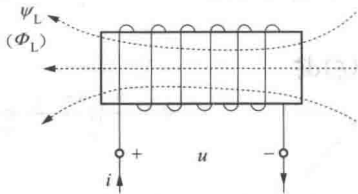


图 1-15 电流与磁通、磁通链、感应电压

$$u = \frac{d\psi_L}{dt} \quad (1-8)$$

由式 (1-8) 确定感应电压的真实方向时, 与楞次定律的结果是一致的。

电感元件在任何时刻 t , 它的磁通链 $\psi_L(t)$ 与施感电流 $i(t)$ 之间的关系可以用 ψ_L-i 平面上的一条曲线来确定, 如果 ψ_L-i 平面上的特性曲线是一条通过原点的直线, 且不随时间而变, 则此电感元件称之为线性非时变电感元件, 自感系数或电感 L 是一个正值常数, 具体关系为

$$\psi_L(t) = Li(t) \quad (1-9)$$

电感元件的符号及其 ψ_L-i 特性曲线如图 1-16 所示。在国际单位制中, L 的单位为亨 [利] (H), 磁通和磁通链的单位是韦 [伯] (Wb)。习惯上, 电感元件常常简称为电感, 若没有特别说明, 电感均表示为线性非时变电感。

把式 (1-9) 代入式 (1-8), 得到电感元件的电压电流 VCR 为

$$u = L \frac{di(t)}{dt} \quad (1-10)$$

式 (1-8)、式 (1-10) 表明: 在某时刻电感的电压取决于该时刻电感磁通链或电流的变化率。电流随时间变化时, 电压不为零; 电流不随时间变化时, 电压为零, 因此, 通直流电流时电感相当于短路, 感应电压为零。

式 (1-10) 就是电感电压电流为关联方向下的 VCR。若电感的电压与电流参考方向非关联关系, 则其 VCR 为

$$u = -L \frac{di(t)}{dt} \quad (1-11)$$

式 (1-10) 为电感电流 $i(t)$ 表示电压 $u(t)$ 的函数, 当然也可以用电压 $u(t)$ 表示电流 $i(t)$, 对式 (1-10) 取逆关系, 则得

$$i(t) = \frac{1}{L} \int u dt \quad (1-12)$$

将式 (1-12) 写成定积分的形式

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\xi) d\xi = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u(\xi) d\xi + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi \\ &= i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi \end{aligned}$$

从以上分析不难发现电感电流有记忆特性, 所以电感元件是一种有“记忆”的元件, 电感电流另一个特性就是它的不能跃变性, 这个特性在动态电路常常用到, 但是需要注意该性质的前提, 电感电压为一个有限值。

【例 1-4】 图 1-17 (a) 所示电路中电感 $L=4\text{H}$, 且 $i_L(0)=0$, 电感的电压波形如图 1-17 (b) 所示。试求当 $t=1\text{s}$ 、 $t=2\text{s}$ 时, 电感电流 i_L 。

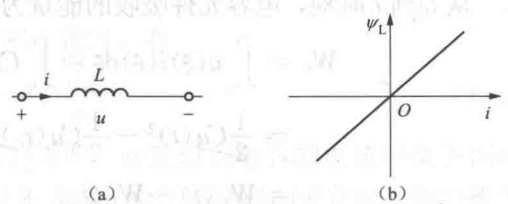


图 1-16 电感元件及其 ψ_L-i 特性曲线

(a) 电感元件符号; (b) ψ_L-i 特性曲线

解：首先分段写出电感电压与时间的函数

关系

$$u_L(t) = \begin{cases} 10 & 0 \leq t \leq 1\text{s} \\ 10t - 20 & 1 < t \leq 2\text{s} \end{cases}$$

根据电感元件的 VCR, 得

$$i_L(t) = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u_L(\xi) d\xi$$

在 $0 \leq t \leq 1\text{s}$ 时

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u_L(\xi) d\xi = \frac{1}{4} \int_0^t 10 d\xi = 2.5t$$

求得 $t=1\text{s}$ 时, $i_L = 2.5 \times 1 = 2.5 \text{ (A)}$ 。

在 $1 \leq t \leq 2\text{s}$ 时

$$i_L(t) = i(1) + \frac{1}{4} \int_1^t (10\xi - 20) d\xi = 1.25t^2 - 5t + 6.25$$

求得 $t=2\text{s}$ 时, $i_L = 1.25 \times 2^2 - 5 \times 2 + 6.25 = 1.25 \text{ (A)}$ 。

下面对电感元件功率进行分析, 在电压和电流相关联参考方向下, 线性电感元件吸收的功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt}$$

当 p 为正值, 表明该电感消耗或吸收功率。当 p 为负值, 表明电感产生或释放功率。在时间段 $t_0 \sim t$, 电感吸收的磁场能量等于在此时间段内对功率的积分。

$$\begin{aligned} W_L &= \int_{t_0}^t p d\xi = \int_{t_0}^t Li \frac{di}{d\xi} d\xi = L \int_{i(t_0)}^{i(t)} i(\xi) di(\xi) \\ &= \frac{1}{2} Li(t)^2 - \frac{1}{2} Li(t_0)^2 \\ &= W_L(t) - W_L(t_0) \end{aligned}$$

当电流 $|i|$ 增加时, $W_L(t) > W_L(t_0)$, 表明在该时间段电感元件储存了能量, 反之, $W_L(t) < W_L(t_0)$, 则电感元件释放了能量。电感元件释放的能量一定是充电吸收并储存的能量, 它本身不产生能量也不消耗能量。

对于电容、电感元件的串联或是并联组合时, 它们可以等效一个电容或是一个电感。图 1-18 (a) 为 n 个电容的串联, 可以等效一个电容, 如图 1-18 (b) 所示。它们之间的关系, 见式 (1-13)。对于每一电容来说, 具有相同的电流, 根据电容的 VCR 很容易得出这个关系。

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n} \quad (1-13)$$

对于 n 个电容的并联组合可以等效一个电容, 如图 1-19 所示。它们之间的关系为

$$C_{\text{eq}} = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n \quad (1-14)$$

接下来, 分析电感元件的串联与并联组合的等效, 图 1-20 (a) 为 n 个电感的串联组合, 可以等效一个电感, 如图 1-20 (b) 所示。

$$L_{\text{eq}} = L_1 + L_2 + L_3 + \cdots + L_n$$

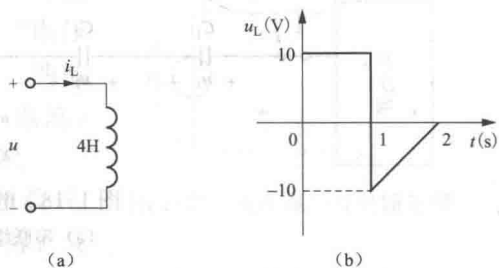


图 1-17 [例 1-4] 图

(a) 电感电路; (b) 电压波形

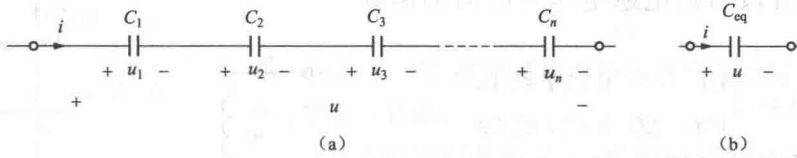


图 1-18 电容的串联组合及其等效
(a) 串联组合电路；(b) 等效电路

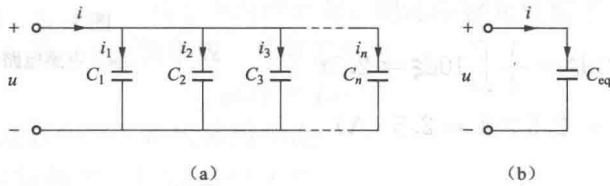


图 1-19 电路的并联组合及其等效
(a) 并联组合电路；(b) 等效电路

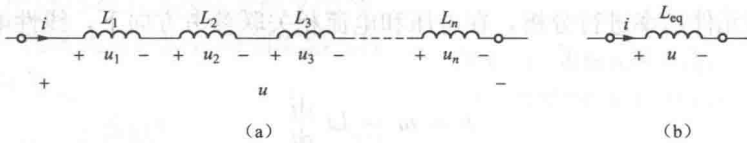


图 1-20 电感的串联组合及其等效

对于 n 各电感的并联组合，如图 1-21 (a) 所示，其等效电感如图 1-21 (b) 所示。

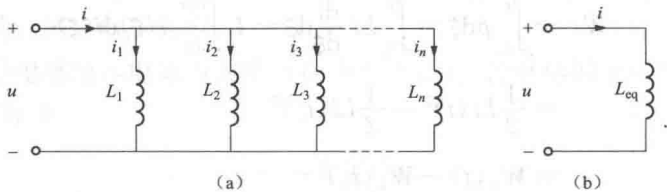


图 1-21 电感的并联组合及其等效

按照电感特性，不难得到 n 个电感并联组合的等效电感 L_{eq} 与并联电感的表达式为

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

1.2.4 理想电压源和电流源（独立电源）

电源是能够提供能量产生电压和电流的二端元件，可以分为理想电源和非理想电源。理想电压源和电流源是从实际电源抽象得到的一种电路模型。

理想电压源的符号如图 1-22 (a)、(b) 所示，根据其性质，它的伏安特性曲线如图 1-22 (c) 所示。

如图 1-23 所示电路，电压源的电压 u_s 与其通过的电流 i 的参考方向，一般取非关联方向，此时电压与电流的乘积就表示电压

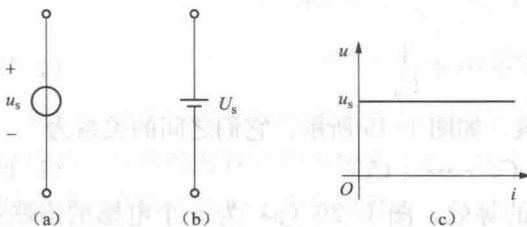


图 1-22 理想电压源

(a)、(b) 理想电压源符号；(c) 伏安特性曲线