



应用型本科规划教材
电气工程及其自动化


CIRCUIT PRINCIPLE

电路原理

韩冬 姚磊 田颖

杨芳艳 李海英

· 编著 ·


上海科学技术出版社

国家一级出版社
全国百佳图书出版单位



应用型本科规划教材
电气工程及其自动化

CIRCUIT PRINCIPLE

电路原理

韩冬 姚磊 田颖

杨芳艳 李海英

· 编著 ·



上海科学技术出版社

国家一级出版社

全国百佳图书出版单位

内 容 提 要

本书系上海市应用型本科专业建设立项规划教材。电路原理是电气类专业一门重要的专业基础课,介绍了电路的基本概念、基本定律及分析方法。

本书共分8章,通过本书的学习,可使学生获得直流稳态电路、交流单相及三相稳态电路、暂态电路、电磁耦合电路分析的基础知识,即通过求解电路中的电压、电流和功率,了解电路的特性。同时,学生能够运用教材所介绍知识,在给定电路技术指标的情况下,设计实际电路并确定元件参数,实现信号的传递、处理和控制。

本书主要读者对象为高等院校电气工程及其自动化专业的本科学生及相关专业的研究生,也可供工程技术人员及爱好者参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路原理 / 韩冬等编著. —上海:上海科学技术出版社,
2020.1

应用型本科规划教材. 电气工程及其自动化

ISBN 978-7-5478-4567-7

I. ①电… II. ①韩… III. ①电路理论—高等学校—教材
IV. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 181542 号

电路原理

韩 冬 姚 磊 田 颖 杨芳艳 李海英 编著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路71号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 9.75

字数: 250千字

2020年1月第1版 2020年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-4567-7/TM·63

定价: 39.00元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向工厂联系调换

丛书前言

20世纪80年代以后,国际高等教育界逐渐形成了一股新的潮流,那就是普遍重视实践教学、强化应用型人才培养。我国《国家教育事业“十三五”规划》指出,普通本科高校应从治理结构、专业体系、课程内容、教学方式、师资结构等方面进行全方位、系统性的改革,把办学思路真正转到服务地方经济社会发展上来,建设产教融合、校企合作、产学研一体的实验实训实习设施,培养应用型和技术技能型人才。

近年来,国内诸多高校纷纷在教育教学改革的探索中注重实践环境的强化,因为人们已越来越清醒地认识到,实践教学是培养学生实践能力和创新能力的重要环节,也是提高学生社会职业素养和就业竞争力的重要途径。这种教育转变成具体教育形式即应用型本科教育。

根据《上海市教育委员会关于开展上海市属高校应用型本科试点专业建设的通知》(沪教委高[2014]43号)要求,为进一步引导上海市属本科高校主动适应国家和地方经济社会发展需求,加强应用型本科专业内涵建设,创新人才培养模式,提高人才培养质量,上海市教委进行了上海市属高校本科试点专业建设,上海理工大学“电气工程及其自动化”专业被列入试点专业建设名单。

在长期的教学和此次专业建设过程中,我们逐步认识到,目前我国大部分应用型本科教材多由研究型大学组织编写,理论深奥,编写水平很高,但不一定适用于应用型本科教育转型的高等院校。为适应我国对电气工程类应用型本科人才培养的需要,同时配合我国相关高校从研究型大学向应用型大学转型的进程,并更好地体现上海市应用型本科专业建设立项规划成果,上海理工大学电气工程系集中优秀师资力量,组织编写出版了这套符合电气工程及其自动化专业培养目标和教学改革要求的新型专业系列教材。

本系列教材按照“专业设置与产业需求相对接、课程内容与职业标准相对接、教学过程与生产过程相对接”的原则,立足产学研发展的整体情况,并结合应用型本科建设需要,主要服务于本科生,同时兼顾研究生夯实学业基础。其涵盖专业基础课、专业核心课及专业综合训练课等内容;重点突出电气工程及其自动化专业的理论基础和实操技术;以纸质教材为主,同时注重运用多媒体途径教学;教材中适当穿插例题、习题,优化、丰富教学内容,使之更满足应用型电气工程及其自动化专业教学的需要。

希望这套基于创新、应用和数字交互内容特色的教材能够得到全国应用型本科院校认可,作为教学和参考用书,也期望广大师生和社会读者不吝指正。

前 言

为了进一步引导高等院校电气工程及其自动化专业本科人才培养主动适应经济社会发展需求,结合应用型本科教育的建设要求,明确和凝练电气工程及其自动化专业的特色,上海市教育委员会开展了应用型本科专业项目建设。该项目以现代工程教育的“成果导向教育”为指导,聚焦于加强应用型本科内涵建设,创新人才培养模式,提高人才培养质量,最终实现专业工程应用教育培养体系的构建。本书就是根据上海市应用型本科专业项目建设所通过的教材规划而编写的。

本书是电气类专业一门重要的专业基础课程教材,教材介绍了电路的基本概念、基本定律及分析方法。通过学习,可使学生获得电路分析的基础知识,培养学生分析问题和解决问题的能力,树立理论联系实际的工程观点,从而为电路设计及后续相关专业课程的学习及应用打好基础;通过学习,可使学生获得直流稳态电路、交流单相及三相稳态电路、暂态电路、电磁耦合电路分析的基础知识,即通过求解电路中的电压、电流和功率,了解电路的特性。同时,学生能够运用课本所学知识在给定电路技术指标的情况下,设计实际电路并确定元件参数,实现信号的传递、处理和控制。

本书是作者在多年讲授电路课程的基础上,汲取了上海理工大学电工电子教研室全体老师的智慧和教学经验,并根据全国高等工科院校《电路课程教学基本要求》以及上海理工大学862专业课电路与电子技术基础课程考试大纲编写而成。

本书与国内出版的同类教材比较,编写特点如下:鉴于学生学习时间有限,书中删减了部分不常用的知识;作者均具有工程实践经验,书中内容尽可能做到理论联系实际;书中习题基于考研真题,通过练习,可加深学生对知识的理解和巩固。

全书编写分工如下:姚磊编写第1~2章,李海英编写第3章,田颖编写第4~5章,韩冬编写第6~7章,杨芳艳编写第8章。全书由韩冬统稿并负责出版联络。上海交通大学严正教授、太原理工大学宋建成教授、上海理工大学侯文副教授和蒋玲老师对书稿进行了初审,提出了宝贵的修改意见,在此谨致以衷心的感谢。

限于作者水平及时间仓促,书中难免存在不妥和错误之处,希望读者予以批评指正。

作者

目 录

第 1 章 电路基本概念和定律	1
1.1 电路和电路模型	2
1.2 电压和电流及其参考方向	2
1.3 电功率和能量	4
1.4 无源二端元件	5
1.5 独立源和受控源	11
1.6 基尔霍夫定律	13
习题	16
第 2 章 线性电阻电路分析	19
2.1 电阻的等效变换	20
2.2 电源的等效变换	25
2.3 网孔电流分析法	27
2.4 结点电压法	31
习题	33
第 3 章 电路定理	36
3.1 叠加定理	37
3.2 替代定理	40
3.3 戴维宁定理和诺顿定理	41
3.4 最大功率传输定理	45
3.5 特勒根定理	46
习题	49
第 4 章 相量法	52
4.1 正弦量的基本概念	53

4.2	相量法的基本概念	55
4.3	电路的相量模型	58
4.4	相量图	63
	习题	66
第5章	正弦稳态电路分析	68
5.1	阻抗与导纳	69
5.2	相量法求解电路中的正弦稳态响应	73
5.3	正弦稳态电路中的功率	76
5.4	最大功率传输定理	83
5.5	功率因数的提高	86
	习题	88
第6章	互感电路	92
6.1	互感	93
6.2	互感电路计算	97
6.3	变压器原理	101
6.4	理想变压器	102
	习题	104
第7章	三相交流电路	107
7.1	三相电源	108
7.2	三相电路的分析	110
7.3	三相功率	118
	习题	121
第8章	动态电路的时域分析	124
8.1	换路定则及其应用	125
8.2	RC 电路的暂态响应	131
8.3	RL 电路的暂态响应	136
8.4	一阶线性电路暂态分析的三要素法	137
8.5	单位阶跃响应和单位冲激响应	140
	习题	145
参考文献		148

第 1 章

电路基本概念和定律

本章内容

本章介绍了电路模型、电路元件的概念,电压和电流的参考方向如何选取,电路元件与电路吸收或发出功率的计算;本章还介绍了电阻、电容、电感、独立电源以及受控电源。电路中的电压、电流之间具有两种约束,一种是由电路元件决定的元件约束,另一种是元件间连接而引入的几何约束,后者由基尔霍夫定律来表达。基尔霍夫定律是集总参数电路的基本定律。

本章特点

本章从电路模型、电路元件以及电路基本定律入手,介绍了电路的基础知识。本章作为其他章节的知识基础,从原理上介绍电路的基本概念和定律。

1.1 电路和电路模型

实际电路是指由电阻器、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。而在研究实际电路中,往往会将其抽象为电路模型。

实际电路的电路模型由理想电路元件相互连接而成。理想元件是组成电路的最小单元,是具有某种确定电磁性质并有精确数学定义的基本结构。电路模型中各理想元件的端子是用理想导线连接起来的。理想导线的电阻为零,且假设当导线中有电流时,导线内、外均无电场和磁场。

例如生活中常见的照明灯泡,如果用导线将其与电池连接,如图 1-1a 所示,灯泡会被点亮。其电路模型如图 1-1b 所示。

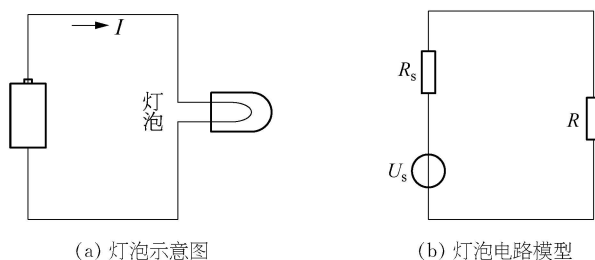


图 1-1 照明电路

利用麦克斯韦方程并通过细致地分析灯泡、电池和导线的物理特性,可得出电流值,但这是个相当复杂的过程。而这里的电路模型,就可以简化为下步任务。将干电池用电压源 U_s 和电阻元件 R_s 的串联组合作为模型;忽略灯泡的内部属性,而将灯泡表示为一个离散的元件电阻 R 。所以电流

$$I = \frac{U_s}{R_s + R} \quad (1-1)$$

这里将灯泡表示为电阻 R ,其实际形状和物理特性将不再影响计算电流。

需要注意的是,在不同工作条件下,同一实际器件可能采用不同的模型。模型取得恰当,对电路进行分析计算的结果就与实际情况接近。

1.2 电压和电流及其参考方向

在电路分析中,当涉及电路中某个元件或部分电路的电流和电压时,有必要指出电压或电流的参考方向。这是因为电流或电压的实际方向可能是未知的,也可能是随时变动的。

1.2.1 电流及其参考方向

在电场力的作用下电荷产生定向移动便形成电流。为了衡量电流的大小,引入电流强度这一物理量。电流强度简称电流,用 i 表示。其定义为:单位时间内通过导体横截面的电荷量,即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

在国际单位制(SI)中,电荷 q 的单位为 C(库仑),时间 t 的单位为 s(秒),电流 i 的单位为 A(安培)。常用的电流单位还有 mA(毫安)和 μA (微安), $1\text{ A} = 10^3\text{ mA} = 10^6\text{ }\mu\text{A}$ 。

习惯上把正电荷运动的方向规定为电流的正方向。如果电流的大小和方向都不随时间变化,则称之为直流电流,简称直流,记作 DC,用 I 表示。如果电流的大小和方向都随时间做周期性变化,则称之为交变电流,简称交流,记作 AC,用 i 或 $i(t)$ 表示。其他形式的电流总可以用直流叠加交流的方式来表示。

上述规定的电流方向是电流在电路中的真实方向。对简单电路而言,电流的真实方向是可以直观地确定的,但在一个复杂电路中,往往很难判断出电路中电流的真实方向,而对于大小和方向都随时间变化的交变电流来说,判断其真实方向就更加困难了。为此,引入参考方向的概念。

电流的参考方向可以任意假设,在图中用箭头表示,它并不一定代表电流的真实流向。通常规定:如果电流的真实方向与参考方向相同,则电流为正值;如果电流的真实方向与参考方向相反,则电流为负值。例如,在图 1-2 所示的电路中,方框泛指某电路的一部分,假设电流 i 的参考方向为 $a \rightarrow b$,如箭头所示,若计算或测量得出 i 为正值,说明电流的真实方向与参考方向一致,即 i 由 a 端流向 b 端;若计算或测量得出 i 为负值,说明电流的真实方向与参考方向相反,即 i 由 b 端流向 a 端。这就是说,可以用电流的正、负值,再结合电流的参考方向来确定电流的真实方向。因此,不标出电流的参考方向,电流值的正负是没有意义的。

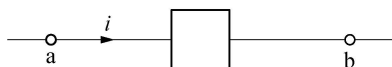


图 1-2 电流参考方向

1.2.2 电压及其参考方向

在电路中电荷能够产生定向移动,一定受到电场力的作用,也就是电场力对电荷做了功。为了衡量电场力做功的大小,引入电压这一物理量,电压用 u 表示,电路中 a 、 b 两点间的电压等于电场力把单位正电荷从 a 点移到 b 点所做的功。设 dW 为电场力将电路中单位正电荷 dq 从 a 点移到 b 点所做的功,则电路中 a 、 b 两点间的电压 u 定义为

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

在国际单位制中,电荷 q 的单位为 C(库仑),功 W 的单位为 J(焦耳),电压 u 的单位为 V(伏特)。常用的电压单位还有 kV(千伏)、mV(毫伏)和 μV (微伏), $1\text{ V} = 10^3\text{ mV} = 10^6\text{ }\mu\text{V}$ 。

电压总是与电路中的两个点有关,通常给电压 u 加上脚标,如将 u 写成 u_{ab} ,以明确电路中 a 、 b 两点间的电压。如果正电荷从 a 点移到 b 点是失去能量,则 a 点是高电位,为正端,标以“+”号; b 点是低电位,为负端,标以“-”号,即 u_{ab} 是电压降,其值为正。反之,如果正电荷从 a 点移到 b 点是获得能量,则 a 点是低电位,为负端,标以“-”号; b 点是高电位,为正端,标以“+”号,即 u_{ab} 是电压升,其值为负。

习惯上称电压降为电压,将电压降的方向规定为电压的正方向。如果电压的大小和方向都不随时间变化,则称之为直流电压,用 U 表示。如果电压的大小和方向都随时间做周期性变化,则称之为交流电压,用 u 或 $u(t)$ 表示。其他形式的电压总可以用直流电压叠加交流电压的方式来表示。

对于一个复杂电路而言,电路中电压的真实极性也称真实方向,往往也是很难判断的。为此,也需要引入电压参考方向的概念。

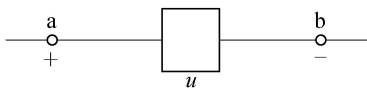


图 1-3 电压参考方向

电压的参考方向可以任意假设,在元件或电路的两端用“+”“-”符号表示,它并不一定代表电压的真实方向。通常规定:如果电压的真实方向与参考方向相同,则电压为正值;如果电压的真实方向与参考方向相反,则电压为负值。例如,在图 1-3 所示的电路中,假设电压 u 的参考方向为 a 端

“+”,b 端“-”,若计算或测量得出 u 为正值,则说明电压的真实方向与参考方向相同,a 端电位高于 b 端电位;若计算或测量得出 u 为负值,则说明电压的真实方向与参考方向相反,b 端电位高于 a 端电位。这就是说,可以用电压的正、负值,再结合电压的参考方向来表示电压的真实方向。因此,不标出电压的参考方向,电压值的正负是没有意义的。

电路中同一个元件上的电压、电流的参考方向是相互独立的,均可任意假设。如果选择电流的参考方向是从标为电压正极的一端流向标为电压负极的一端,即两者的参考方向一致时,则称为关联参考方向如图 1-4a 所示。如果选择电流的参考方向是从标为电压负极的一端流向标为电压正极的一端时,则称为非关联参考方向,如图 1-4b 所示。

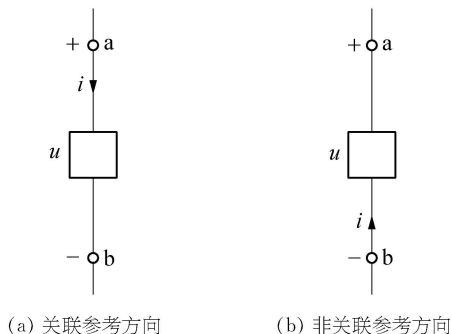


图 1-4 关联方向

1.3 电功率和能量

在电路的分析和计算中,也需要考虑电路的功率和能量。电功率是指单位时间电场力移动正电荷所做的功,即

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

在单位时间 dt 内,将单位正电荷从 A 移动到 B,电场力对电荷做功,这时元件吸收能量

$$dW = u dq \quad (1-5)$$

吸收的功率为

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

在国际单位制中,电流的单位为 A(安培),电压的单位为 V(伏特),功率的单位为 W(瓦特),能量的单位为 J(焦耳)。

电功率吸收和释放的判别,应该从功率 P 的定义出发。功率的定义既能适用于负载又能

适用于电源,不管电压 u 、电流 i 的方向,都将功率定义为 $P=ui$ 。当 u 、 i 取关联参考方向时, $P>0$ 表示元件吸收功率,而 $P<0$ 表示元件释放功率;当 u 、 i 取非关联参考方向时, $P<0$ 表示元件吸收功率,而 $P>0$ 表示元件释放功率。

例 1-1 如图 1-5 所示元件 A 和 B,电压电流方向已给出, $I_1=I_2=1\text{ A}$,判断元件 A 和 B 是吸收功率,还是释放功率?



图 1-5 例 1-1 图

解:(1) 电流、电压为关联参考方向,

$$P_1 = U_1 I_1 = 1 \times 1 = 1 \text{ W} > 0$$

元件 A 吸收功率。

(2) 电流、电压为非关联参考方向,

$$P_2 = U_2 I_2 = -1 \times 1 = -1 \text{ W} < 0$$

元件 B 释放功率。

1.4 无源二端元件

二端元件是指有两个外接引出端子的元件,分为有源二端元件和无源二端元件两大类。本节将介绍无源二端元件中的电阻元件、电容元件和电感元件。

1.4.1 电阻元件

电路中表示材料电阻特性的元件称为电阻器,常用的电阻器有碳膜电阻器、金属膜电阻器、线绕电阻器及电位器等,电阻元件是从实际电阻器中抽象出来的模型。线性电阻元件的符号如图 1-6a 所示,其两端电压和电流的关系称为伏安关系,简称为 VAR,两者服从欧姆定律。当电压与电流参考方向关联时,有

$$u = Ri \quad (1-7)$$

式中, R 为电阻元件的参数,称为元件的电阻。电阻的单位为 Ω (欧姆,简称欧)。常用的电阻单位还有 $\text{k}\Omega$ (千欧)和 $\text{M}\Omega$ (兆欧)。换算关系为 $1 \text{ k}\Omega = 10^3 \Omega$, $1 \text{ M}\Omega = 10^6 \Omega$ 。

如果电压、电流参考方向取非关联参考方向,欧姆定律的表达式应为

$$u = -Ri \quad (1-8)$$

令 $G = \frac{1}{R}$,式(1-7)变成

$$i = Gu \quad (1-9)$$

式中, G 称为电阻元件的电导。电导的单位是 S (西门子,简称西)。 R 和 G 都是电阻元件的参数。

如果把电阻元件的电压取为纵坐标、电流取为横坐标,在 $u-i$ 平面上绘出的曲线称为电阻元件的伏安特性曲线。显然,线性电阻元件的伏安特性曲线是一条经过坐标原点的直线,电

阻值可由直线的斜率来确定,如图 1-6b 所示。

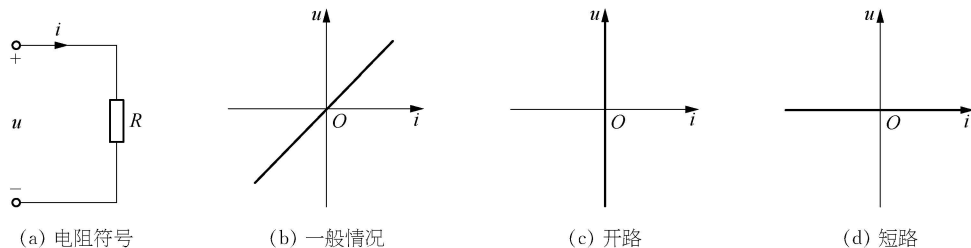


图 1-6 电阻元件及其伏安特性曲线

从线性电阻元件的伏安特性曲线可以看出,任一时刻电阻的电压(或电流)是由同一时刻的电流(或电压)所决定的。也就是说,线性电阻的电压不能“记忆”电流在“历史”上起过的作用,所以称为无记忆元件。对于任一个二端元件,只要电压、电流之间存在代数关系,都是无记忆元件。

线性电阻有两个特殊情况——开路和短路。当电阻元件开路(即 $R = \infty$)时,无论电压为何值,其上的电流恒等于零,如图 1-6c 所示。当电阻元件短路(即 $R = 0$)时,无论电流为何值,其两端的电压恒等于零,如图 1-6d 所示。当实际电路出现开路或短路现象时,多数情况是电路出现故障须排除后方能正常工作,但有些场合则需要利用开路或短路现象,如电焊机就是利用短路引起的大电流工作的。

当电压 u 和电流 i 取关联参考方向时,电阻元件消耗的功率为

$$P = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} = Gu^2 = \frac{i^2}{G} \quad (1-10)$$

式中, R 和 G 是正实数,故功率 P 恒为非负值。所以线性电阻元件是一种无源元件。

电阻元件在电路中最常用的一种元件,在实际使用时,不但要知道它的阻值,还需要知道它的额定功率。事实上,为了使各种电气设备和器件能安全、可靠和经济地工作,制造厂家对每个电气设备和器件都规定了工作时允许的最大电流、最高电压和最大功率,这些数值称为额定值。如某一盏电灯的额定电压是 220 V、额定功率是 40 W,虽然实际工作时不一定处于额定状态,但一般不应超过额定值。若超出额定值过多,可能会使电气设备或器件损坏,而当远低于额定值时,不仅得不到正常合理的工作情况,而且也不能充分利用设备的能力。

1.4.2 电容元件

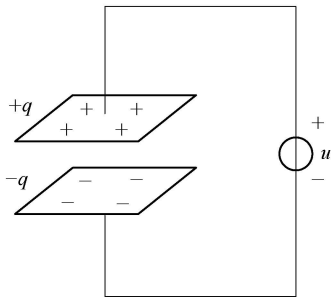


图 1-7 平行板电容器

电容元件是具有储存电场能量性质的元件,是实际电容器的理想化模型。实际电容器一般由两块相互绝缘的金属平行板所构成,并从两极板分别引出外接端。加有电压 u 时,两极板上分别储存有等量的异性电荷 $+q$ 和 $-q$,如图 1-7 所示。当两极板之间的电压 u 变化时,所储存的电荷量 q 亦随之变化。将电荷量 q 与电压 u 的比值定义为电容器的电容量,简称电容,用 C 表示。即

$$C = \frac{q}{u} \quad (1-11)$$

式中, C 是电容元件的参数, 称为电容, 它是一个正实数。在国际单位制中, 当电荷和电压的单位分别是 C(库仑)和 V(伏特)时, 电容的单位为 F(法拉, 简称法)。常用的电容单位还有 μF (微法)、 pF (皮法), 其中 $1\ \mu\text{F}=10^{-6}\ \text{F}$ 、 $1\ \text{pF}=10^{-12}\ \text{F}$ 。线性电容元件的符号如图 1-8a 所示。图 1-8b 中, 以 q 为纵坐标、 u 为横坐标, 画出电容元件的库伏特性曲线。线性电容元件的库伏特性曲线是一条通过原点的直线。

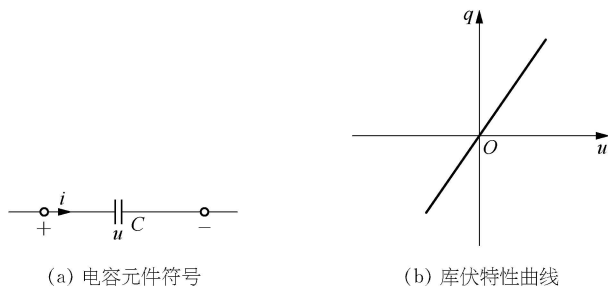


图 1-8 电容元件及其库伏特性曲线

若电容元件的电压、电流参考方向为关联参考方向, 则

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

若电容元件的电压、电流参考方向为非关联参考方向, 则

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

一般不加特殊说明, 均指关联参考方向。

由式(1-12)可见, 电容上的电流与其电压的变化率成正比, 即动态的电压才能产生电流, 所以称为动态元件。如果电容两端电压保持不变, 则通过它的电流为零; 即对直流电压而言, 电容相当于开路, 表明电容具有隔直作用。另外由式(1-12)还可以看出, 对于有限电流值来说, 电容两端的电压不能跃变, 即电容变化需要时间, 否则电容电流为无穷大。

式(1-12)的逆关系为

$$q = \int i dt \quad (1-14)$$

这是一个不定积分, 可写成定积分的表达式

$$q = \int_{-\infty}^t i d\xi = \int_{-\infty}^{t_0} i d\xi + \int_{t_0}^t i d\xi = q(t_0) + \int_{t_0}^t i d\xi \quad (1-15)$$

式中, $q(t_0)$ 为 t_0 时刻电容所带电荷。式(1-15)的物理意义是: t 时刻具有的电荷等于 t_0 时的电荷加以 $t_0 \sim t$ 时间间隔内增加的电荷。如果指定 t_0 为时间的起点并设为零, 式(1-15)可写为

$$q(t) = q(0) + \int_0^t i d\xi \quad (1-16)$$

对于电压和电流的关系, 由于 $u = q/C$, 因此有

$$u(t) = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i \, d\xi \quad (1-17)$$

将式(1-17)和式(1-15)做比较可知,电容元件的电压 u 和电流 i 具有动态关系,因此,电容是一个动态元件。从式(1-17)可见,电容电压除与 $0 \sim t$ 的电流值有关外,还与 $u(0)$ 值有关,因此,电容元件是一种有“记忆”的元件。与之相比,电阻元件的电压仅与该瞬间的电流值有关,是无记忆的元件。

电容的记忆特性是它具有储存电场能量的反映。在电压和电流的关联参考方向下,电容吸收的功率为 $P = ui = Cu(du/dt)$ 。当 $P > 0$ 时,电容吸收功率,说明电容从电源或外电路中吸收能量建立电场,此时电容充电;当 $P < 0$ 时,表示元件产生功率,即电容把储存的能量加以释放,此时电容放电。电容从 $t = -\infty$ 到任意时刻 t 储存的能量为

$$\begin{aligned} W_C(t) &= C \int_{-\infty}^t u(\xi) i(\xi) \, d\xi = \int_{-\infty}^t Cu(\xi) \frac{du(\xi)}{d\xi} \, d\xi \\ &= C \int_{u(-\infty)}^{u(t)} u(\xi) \, du(\xi) = \frac{1}{2} Cu^2(t) - \frac{1}{2} Cu^2(-\infty) \end{aligned} \quad (1-18)$$

式(1-18)表明,电容能量只与时间端点的电压值有关,与此期间其他电压值无关。可以认为 $u(-\infty) = 0$,因为在 $t = -\infty$ 时,电容器未充电,从而得到

$$W_C = \frac{1}{2} Cu^2 \quad (1-19)$$

由于 C 为大于零的常数,故不可能为负,即电容释放能量不可能大于从外电路吸收的能量,所以电容是一个无源元件。

由上述电容性质,可得理想电容器的几个重要特性如下:

(1) 如果电容两端电压不随时间变化,那么流过电容的电流为零,因此电容对直流而言相当于开路;

(2) 即使流过电容的电流为零,电容中也可能储存有限的能量,比如电容两端的电压是常数;

(3) 若流经电容的电流是有限值,则电容电压不跃变,即电容电压是连续的;

(4) 理想电容器不消耗能量,而只会储存能量,从数学模型上来说是正确的,但对实际非理想电容器来说不正确,因为电介质和封装都会使电容器具有一定的内阻,所以实际非理想电容器有一个并联模式的漏电阻。

1.4.3 电感元件

电感元件是具有储存磁场能量性质的元件,是实际电感线圈的理想化模型。用导线绕制成螺线管后,就可以构成电感线圈,如图 1-9a 所示。当一个匝数为 N 的线圈通以变化的电流 i 时,线圈内部以及周围便产生磁场,形成磁通 Φ ,磁通与 N 匝线圈相交链,则称为磁链 Ψ ,即 $\Psi = N\Phi$ 。由于电流 i 的变化,引起磁通 Φ 和磁链 Ψ 的变化。将磁链 Ψ 与电流 i 的比值定义为电感线圈的电感量,简称电感,用 L 表示,即

$$L = \frac{\Psi}{i} \quad (1-20)$$

若磁链 Ψ 与电流 i 的变化关系成正比,则电感 L 为常数,此时 Ψ 与 i 的变化关系在 $\Psi-i$

平面上是一条通过坐标原点的直线,直线的斜率是 L ,如图 1-9b 所示,具有这种性质的电感称为线性电感。线性电感元件的符号如图 1-9c 所示。电感 L 是表示电感元件电感量的参数,因此电感元件通常简称为电感。

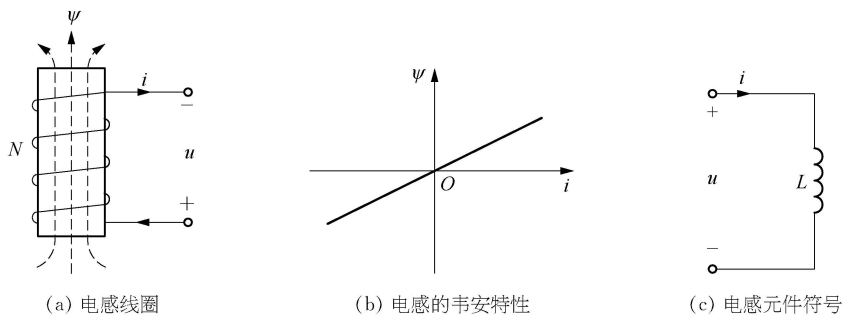


图 1-9 磁通链与感应电压

在国际单位制中,磁通 Φ 和磁链 Ψ 的单位是 Wb(韦伯,简称韦)。当电流 i 单位为 A(安培)时,电感的单位是 H(亨利,简称亨)。常用的电感单位还有 mH(毫亨)、 μH (微亨),其中 $1\text{ mH} = 10^{-3}\text{ H}$ 、 $1\ \mu\text{H} = 10^{-6}\text{ H}$ 。

当电感线圈通有随时间变化的电流时,磁链 Ψ 也会随时间变化,在电感线圈两端会感应出电压。如果感应电压 u 的参考方向与 Ψ 的方向符合右手螺旋法则,则根据法拉第电磁感应定律可得

$$u = \frac{d\Psi}{dt} \quad (1-21)$$

把 $\Psi = Li$ 代入式(1-21),可以得到电感元件的电压电流关系如下:

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1-22)$$

式(1-22)表明:某一时刻电感电压只取决于该时刻电流的变化率,因此电感元件也是个动态元件。当电感电流不变即为直流时,电压为零,意味着电感对直流相当于短路。若将电感电流表示成电压的函数,则有

$$i = \frac{1}{L} \int u dt \quad (1-23)$$

写成定积分形式为

$$i = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u dt = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u dt + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u dt = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u dt \quad (1-24)$$

式中, $i(t_0) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u dt$,体现了起始时刻 $t = t_0$ 之前电压对电感电流的贡献,称为电感元件的初始电流或初始状态。

式(1-24)表明,某一时刻电感上的电流与该时刻以前电压的全部历史有关,即电感电流有“记忆”电压的性质,因此电感也是一种记忆元件。

电感的记忆特性是其储存磁场能量的反映。当电感上电压和电流在关联参考方向下,线性电感元件吸收的功率为 $P = ui = Li \frac{di}{dt}$ 。当 $P > 0$ 时,电感从外电路中吸收能量建立磁场;当

$P < 0$ 时,电感释放储存的能量,其中从 $-\infty$ 到 t 储存的能量为

$$W_L(t) = \int_{-\infty}^t P d\xi = \int_{-\infty}^t Li(\xi) \frac{di(\xi)}{d\xi} d\xi = \int_{i(-\infty)}^{i(t)} Li(\xi) di(\xi) = \frac{1}{2}Li^2(t) - \frac{1}{2}Li^2(-\infty) \quad (1-25)$$

式(1-25)表明,电感能量只与时间端点的电流值有关,与此期间其他电流值无关。可以认为 $i(-\infty) = 0$,因为在 $t = -\infty$ 时,电感器并未储能,从而得到

$$W_L = \frac{1}{2}Li^2 \quad (1-26)$$

由于 L 为正值常数,故 W_L 不可能为负。说明电感元件释放出的能量不可能大于它吸收的能量,因而电感元件也属于无源元件。

由上述电感性质,可得理想电感器的几个重要特性如下:

(1) 如果流过电感的电流不随时间变化,那么电感两端的电压为零,因此电感对直流而言相当于短路;

(2) 即使电感两端的电压为零,电感中也可能储存有限的能量,比如流过电感的电流是常数;

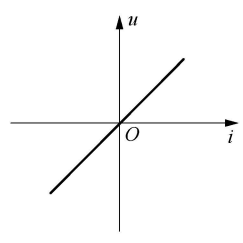
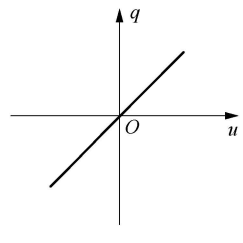
(3) 若电感两端的电压是有限值,则电感电流不跃变,即电感电流是连续的;

(4) 理想电感器不消耗能量,只会储存能量,从数学模型上来说是正确的,但对实际非理想电感器来说不正确,因为实际非理想电感器须考虑有一个串联内阻的存在。

比较电容特性与电感特性,不难发现它们的对偶关系,这里将“电感”替换“电容”、“电感电流”替换“电容电压”、“短路”替换“开路”、“串联”替换“并联”,就得到前面关于电容特性的表述,反之亦然。

R 、 C 和 L 元件的基本性质总结见表 1-1。

表 1-1 R 、 C 和 L 元件的基本性质总结

电路元件	单位	物理性质	特性曲线	电压与电流的关系 (关联参考方向)	储存能量
R (电阻元件)	Ω	R 为耗能元件,在电路中消耗电源能量并转换为热能		$u = Ri$	无
C (电容元件)	F	C 为储能元件,储存电能,与电源只做能量交换,不消耗功率		$i = C \frac{du}{dt}$	$W_C = \frac{1}{2}Cu^2$