

大学本科计算机专业教材系列

电路与电子学基础

· 周树南 张砚春 方维 编著 ·



1 2 3 4 5 6 1 2 3

Q W E R T Q W I

A S D F G A S

科学出版社

内 容 简 介

“电路与电子学基础”是计算机、电子、信息、自动控制等专业的一门理论性、实践性都比较强的技术基础课程。本着“新颖、实用、创新”的指导思想,全书内容包括线性电路分析基础、集成电路元器件和基本单元模拟电子电路及集成运算放大器的应用、基本数字逻辑电路三个部分。书中着重基本概念、基本原理和基本电路的分析和应用。例题和习题除围绕上述着重点外,还注意思考性、启发性,使读者能增强分析问题和解决问题的能力。

本书兼顾了深度和广度,适合于计算机、电子、自动控制等学科本科、大专两个层次的学生,也适合于各种类型的成人教育;对有关工程技术人员,也是一本实用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路与电子学基础/周树南,张砚春,方维编著. —北京:科学出版社, 2000

(大学本科计算机专业教材系列)

ISBN 7-03-007737-7

I. 电… II. ①周…②张…③方… III. 电子电路—高等学校—教材
IV. TN7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 67035 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

北京双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2000 年 9 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2000 年 9 月 第 一 次 印 刷 印张: 20 1/2

印数: 1—4 000 字数: 468 000

定价: 25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<环伟>)

前 言

为了适应计算机技术的飞速发展和面向 21 世纪的高等教育的需要,随着对计算机类学科现专业结构、课程体系和教学内容进行系统的、整体的改革,早在全国《计算机学科教学计划 1993》中就要求:改变长期以来多门技术基础课分设,学时多且内容较庞杂陈旧,与专业结构、课程体系的改革不配套的情况。为此,根据《计划》建议的“基本电路与电子学”课程大纲,我们编写了这本教材。该教材包含了原“电路分析”和“模拟电子技术基础”两门课程,压缩、优化了教学计划中有关课程的总学时,而且考虑了专业结构中课程设置的和体系改革的需要。在“模拟电子电路”里,不仅着眼于打好学生正确使用模拟集成电路的基础,讨论了集成电路元件、器件、基本单元电路的概念和分析方法,加强了集成运算放大器及其组成的各类应用电路,还涵盖了原“数字电子技术基础”课程中有关电路级的内容(如集成逻辑门电路、脉冲波形的产生与处理电路、A/D 与 D/A 转换电路等),使“数字逻辑与数字系统”课程侧重在数字逻辑系统的设计和应用上。

在编写过程中,编著者认真总结了多年来的教学实践经验,并学习参考了国内外不少同类教材和有关文献,以培养学生分析问题和解决问题的能力为目标,注重基本概念、基本原理、基本分析处理方法的论述,使学生既能打好基础,又能开阔视野。在文字叙述方面,力求简明扼要、深入浅出、思路清晰、便于自学。

全书的内容和体系是按照 60 个学时安排的,共分 12 章,3 个部分。第一章到第五章是电路分析,第六章到第九章是模拟电子技术基础,第十章到第十二章是基本数字逻辑电路部分。在实际教学过程中,书中有些内容(如带“*”号的可选部分)可以节略或由学生自学。

本书第一、二、三、五、六章由周树南编写,第七、八、十、十一章由张砚春编写,方维编写了第四、十二章,张素全编写了第九章。全书由周树南统稿。本书从酝酿到完稿自始至终得到了北京邮电大学白中英教授的关注、支持和帮助,并审阅了全稿。在编写过程中,石义彬、张素全还帮助完成了本书的大部分插图和录入,上海 Lattice 半导体有限公司也对本书的出版给予了很大支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编著者水平有限,书中难免有许多缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

编著者

2000 年 1 月

目 录

第一章 电路分析导论	1
1.1 电路及其模型.....	1
1.1.1 电路的作用、组成与模型.....	1
1.1.2 电路分析的基本变量.....	2
1.2 电路基本元件.....	4
1.2.1 电阻元件.....	5
1.2.2 电感元件.....	6
1.2.3 电容元件.....	7
1.2.4 电源元件和实际电源模型.....	9
1.2.5 受控源.....	11
1.3 基尔霍夫定律.....	13
1.3.1 基尔霍夫电流定律(KCL).....	13
1.3.2 基尔霍夫电压定律(KVL).....	14
1.4 简单电路的计算.....	16
1.5 电路中的对偶.....	19
习题.....	20
第二章 电路分析方法和定理	24
2.1 支路电流法.....	24
2.2 节点电压法.....	25
2.3 线性电路的叠加性和齐次性.....	28
2.4 等效电源定理.....	29
2.4.1 戴维南定理(等效电压源定理).....	29
2.4.2 诺顿定理(等效电流源定理).....	32
习题.....	33
第三章 正弦电路的稳态分析	38
3.1 正弦量的基本概念.....	38
3.1.1 正弦量的特征量.....	38
3.1.2 同频率正弦量的相位差.....	39
3.1.3 周期信号的有效值.....	40
3.2 正弦量的相量表示.....	41
3.2.1 相量和相量图.....	41
3.2.2 基尔霍夫定律的相量形式.....	43
3.2.3 电阻、电感、电容元件伏安关系的相量形式.....	44
3.3 阻抗和导纳.....	47
3.3.1 欧姆定律的相量形式,阻抗与导纳.....	47
3.3.2 阻抗和导纳的等效变换.....	50
3.4 正弦稳态电路的分析.....	52
3.5 正弦稳态电路的功率.....	55

3.5.1	瞬时功率	55
3.5.2	平均功率	56
3.5.3	无功功率	56
3.5.4	视在功率	57
3.5.5	功率因数的提高	57
3.6	电路中的谐振	59
3.6.1	RLC 串联谐振电路	60
3.6.2	RLC 并联谐振电路	62
3.7	三相电路	64
3.7.1	对称三相电源	65
3.7.2	三相电路的联接	65
3.7.3	三相电路的功率	68
	习题	70
第四章	非正弦周期电流电路	74
4.1	非正弦周期信号	74
4.2	非正弦周期函数的谐波分析	75
4.3	平均值、有效值和平均功率	78
4.3.1	平均值	78
4.3.2	有效值	78
4.3.3	平均功率	78
4.4	非正弦周期电流电路的计算	79
	习题	81
第五章	电路的动态分析	84
5.1	换路定律、初始值、稳态值	84
5.1.1	换路定律	84
5.1.2	初始值、稳态值的确定	85
5.2	RC 电路的动态分析	87
5.2.1	RC 电路的零输入响应	87
5.2.2	RC 电路的零状态响应	88
5.2.3	RC 电路的全响应	89
5.3	微分电路和积分电路	91
5.3.1	微分电路	91
5.3.2	积分电路	92
5.4	一阶电路的三要素法	93
5.5	RL 电路的动态分析	95
5.5.1	RL 电路的零输入响应	96
5.5.2	RL 电路的零状态响应和全响应	97
5.6	阶跃信号和阶跃响应	100
	习题	104
第六章	半导体器件基础	108
6.1	半导体的基本知识	108
6.2	半导体二极管	109
6.2.1	二极管的结构	109

6.2.2	二极管的伏安特性、电路模型和参数	109
6.2.3	稳压二极管	111
6.3	双极型晶体管	112
6.3.1	晶体管的结构、工作状态和电路组态	113
6.3.2	晶体管的特性曲线	115
6.4	晶体管的主要参数	116
6.5	场效应晶体管	118
6.5.1	结型场效应管(JFET)	118
6.5.2	绝缘栅场效应管(IGFET)	120
6.5.3	场效应管的主要参数	122
	习题	123
第七章	模拟集成电路的基本放大单元电路	126
7.1	基本放大电路	126
7.1.1	基本交流放大电路的组成	126
7.1.2	放大电路的静态分析	127
7.1.3	放大电路的动态分析	128
7.2	放大电路中静态工作点的稳定	137
7.2.1	温度对静态工作点的影响	137
7.2.2	分压式偏置电路	138
7.3	射极输出器	141
7.4	电流源	144
7.5	多级放大电路	146
7.6	阻容耦合放大电路的频率特性	151
7.7	差动放大电路	153
7.7.1	差动放大电路的基本工作原理	153
7.7.2	典型差动放大电路的分析	156
7.7.3	具有恒流源的差动放大器	159
7.8	功率放大电路	160
7.8.1	功率放大电路的特点与工作状态	160
7.8.2	互补对称功率放大电路	161
7.8.3	集成功率放大电路的应用	164
7.9	场效应管放大电路	167
7.9.1	场效应管共源极放大电路	167
7.9.2	场效应管源极输出器	170
	习题	171
第八章	集成运算放大器	177
8.1	集成运算放大器简介	177
8.1.1	集成电路	177
8.1.2	集成运算放大器的原理电路	177
8.1.3	集成运算放大器芯片	179
8.1.4	理想运算放大器	181
8.2	运算放大器的线性应用	183
8.3	放大电路中的负反馈	199

8.3.1	反馈的基本概念	200
8.3.2	负反馈类型及判断	201
8.3.3	负反馈对放大电路性能的影响	206
8.4	运算放大器的非线性应用	210
8.4.1	电压比较器	210
8.4.2	正弦波发生器	216
8.4.3	方波发生器	220
*8.4.4	三角波发生器和锯齿波发生器	222
*8.5	使用集成运算放大器应注意的几个问题	224
习题	226
第九章	直流稳压电源	235
9.1	整流与滤波电路	235
9.2	直流稳压器	238
9.2.1	直流稳压器的主要性能指标	238
9.2.2	串联型稳压器	239
9.2.3	集成稳压器	241
*9.2.4	开关型稳压电路	242
习题	244
第十章	门电路及脉冲波形的产生	247
10.1	脉冲信号	247
10.2	半导体元件的开关作用	248
10.2.1	二极管开关电路	248
10.2.2	三极管开关电路	249
10.2.3	场效应晶体管(MOS)开关电路	251
10.3	分立元件门电路	252
10.4	TTL集成门电路	255
10.4.1	TTL与非门电路	255
10.4.2	集电极开路与非门	260
10.5	MOS门电路	263
10.5.1	NMOS门电路	263
10.5.2	CMOS门电路	264
10.6	集成门电路使用中的几个问题	268
10.7	脉冲波形的产生	270
10.7.1	集成555定时器	270
10.7.2	单稳态触发器	272
10.7.3	多谐振荡器	273
习题	275
第十一章	模拟量与数字量的转换	278
11.1	数模转换器	278
11.1.1	DAC简介	278
11.1.2	集成DAC芯片的应用	281
11.2	模数转换器	285
11.2.1	ADC简介	285

11.2.2 集成 ADC 芯片的应用	288
习题	290
第十二章 在系统可编程模拟电路(ispPAC)	291
12.1 ispPAC 系统概述	291
12.1.1 EDA 技术概况	291
12.1.2 ispPAC 的特点	291
12.2 ispPAC 器件	292
12.3 增益调整方法	295
12.3.1 通用增益设置	295
12.3.2 分数增益设置	296
12.3.3 整数比增益设置	296
12.4 PAC-Designer 软件	297
12.4.1 设计输入	297
12.4.2 设计仿真	298
12.4.3 器件编程	299
* 12.5 ispPAC 设计实例	299
12.5.1 ispPAC10 实现双二次滤波器	300
12.5.2 宏(Macro)生成的滤波器	301
12.5.3 仿真结果	302
习题	304
附录	305
附录 A 电阻器、电容器的标称系列值	305
附录 B 半导体分立器件型号命名方法	306
附录 C 常用半导体分立器件的参数	306
附录 D 半导体集成电路型号命名方法	309
附录 E 常用半导体集成电路的参数和符合	309
附录 F CMOS 和 TTL 门电路部分品种型号	310
中英名词对照	311
参考文献	316

第一章 电路分析导论

1.1 电路及其模型

1.1.1 电路的作用、组成与模型

电路就是电流流通的路径。实际电路装置由于所完成的任务不同,其结构形式各种各样,但都是由各种电气器件、设备按一定方式联结起来的总体。通常,将其中提供电能的装置称为电源,取用电能的用电设备称为负载,两者由导线联接成闭合电路。电路的功能是实现电能的传输与分配,如在电力系统里;而电子电路的作用是进行电信号的传输与处理。例如日常使用的收音机和电视机,能把接收到的微弱的无线电信号进行加工处理,最后给出人们需要的声音和图像;又如计算机可对输入的数据进行指定的计算或对各种机械进行控制等等。

如同任何工程学科一样,电路分析也是建立在模拟概念的基础上的。因此,它分析的对象不是用电气器件、设备构成的实际电路,而是由电路元件构成的电路模型。电路元件具有单一电磁现象,是理想化了的器件,所以也称理想电路元件。任何电路器件都可用电路元件的适当组合来模拟。由于电路模型具有实际电路的主要电磁性能,由模型得出的电路各物理量之间的关系反映了实际电路的基本物理规律,这就在保证工程实践要求的基础上简化了分析。当然,实际电路用模型近似表示是有条件的。一种模型只在一定条件下适用。条件变了,电路模型须作相应的改变。如何根据实际电路作出其模型,这称为建模。本书只对电路模型进行分析,不考虑建模过程。

图 1.1(a)所示是手电筒电路的模型。其中电池看作是能提供恒定电压 U_s 的理想电压源和具有内电阻值 R_s 的电阻元件组成的串联组合,小电珠的灯丝用电阻值为 R_L 的电阻元件表示,联接导线则是无电阻的理想导线,S是开关。图 1.1(b)表示的是分支电路模型。其中分支的每一段电路称为支路。在图 1.1(b)中共有三条支路。三条或三条以上的支路相联接的点称为节点。在图 1.1(b)中共有两个节点:a 和 b。各支路组成的闭合路径称为回路。图 1.1(b)中共有三个回路:adbca、abca 和 abda。电路中的每一个网格(即未被其他支路分割的最简单的回路)称为网孔。在图 1.1(b)中只有 $\langle I \rangle$ 和 $\langle II \rangle$ 两个网孔。

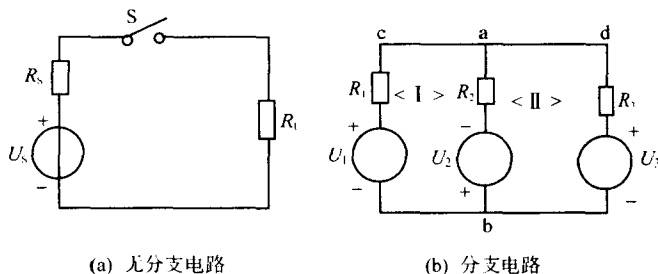


图 1.1 电路模型

1.1.2 电路分析的基本变量

电路中基本的物理量(简称电量)是电流、电压及电功率。一般情况下,它们都是时间 t 的函数,分别用 $i(t)$ 、 $u(t)$ 及 $p(t)$ 表示,简写成 i 、 u 及 p 。电路分析的基本内容是已知电路的结构及元件参数,要确定电路各部分的电压和电流。即在给定激励下,求给定电路的响应。这里的所谓“激励”,可理解为电源的作用,所谓“响应”,则可理解为电路各部分对电源作用的反应。电流和电压作为电路分析的基本变量,它们是分析电路的主要求解对象。此外,有时还要分析电路中的功率和能量问题。

1. 电流

电路运行时,电荷在电路中的定向运动便形成电流。电流的大小用电流强度表示。电流强度在数值上等于单位时间内通过导体横截面的电荷量,即

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

式中 t 的单位为秒(s), q 的单位是库仑(C), i 的单位是安培(A)。习惯上,常常将电流强度称为电流。

大小和方向随时间变化的电流称为交流电流,用小写字母 i 表示。不随时间变化的电流则称为恒定电流或直流电流,用大写字母 I 表示。

电流是有方向的,电流的实际方向规定为正电荷定向运动的方向。然而分析问题时,电路中流过各元件的电流的实际方向往往很难预知。如交流电路中电流的方向是变化的。即使在直流电路中,要预先确定较复杂电路里某一元件通过的电流方向也很困难。为此,分析电路时,首先要给电流一个假定方向,以便列出电路方程,然后才能对电路进行分析计算。这个假定方向称为参考方向,并在电路图中将它用箭头标出。参考方向可以任意选择。一经选定,就不再改变。经过计算,电流值为负,说明参考方向与实际方向相反。电流值为正,则表示参考方向与实际方向一致,即说明参考方向就是实际方向。所以,参考方向又称为正方向。这样,根据计算值的正或负,结合参考方向就能确定电流的实际方向(见图 1.2)。电流是代数量,既有数值又有方向,才有明确的物理意义。

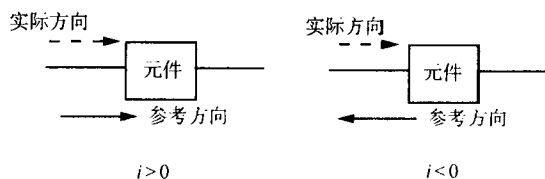


图 1.2 电流参考方向与实际方向之间关系

2. 电压与电位

电路上 a、b 两点间的电压在数值上等于电场力把单位正电荷从 a 点移动 b 点所作的

功,也就是单位正电荷从 a 点(高电位)移到 b 点(低电位)所失去的能量,即

$$u = \frac{dW}{dq} \quad (1-2)$$

式中 q 的单位是库仑(C), W 的单位是焦耳(J), u 的单位是伏(V)。

大小和极性(方向)随时间变化的电压称为交流电压,用小写字母 u 表示。不随时间变化的电压称为恒定电压或直流电压,用大写字母 U 表示。

电压是有极性的,高电位点定为正极,标以“+”号,低电位点定为负极,标以“-”号。有时也用电压的方向,电压的方向规定为由高电位端指向低电位端,即电位降低的方向(也有用双下标表示的,如 u_{ab} ,其方向由 a 指向 b)。和电流方向判断的情况一样,分析问题时往往很难预先确定电压的实际方向,我们同样采用参考方向(参考极性)假定电压的极性。如图 1.3 所示,“+”、“-”表示参考极性,箭头表示参考方向(若用双下标表示为 u_{ab})。电压的参考方向一经选定,就不再变更。经过计算,电压值为正,说明实际方向与参考方向一致,“+”极为高电位,“-”极为低电位;电压值为负,则情况与前述相反。由此可见,只有标定了参考方向后的电压数值才有明确的物理意义。

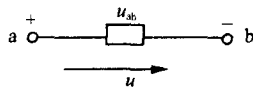


图 1.3 电压参考方向

电流和电压的参考方向都是任意选定的,二者彼此独立,相互无关。但为了分析电路的方便,常使电流和电压的参考方向关联起来选成一致,即电流参考方向是从电压参考正极流入,负极流出,并称之为关联参考方向。采用关联参考方向时,只要标出两者中任何一个的参考方向,另一电量的参考方向也就同时给定了。

电压有时也叫电位差。如图 1.3 中, a、b 两点间的电压 u , 就是 a、b 两点的电位差。

电路中某点的电位,是将单位正电荷沿电路中任一路径移到参考点时,电场力所做的功。参考点的电位为零,所以某点的电位,就是该点到参考点的电压。电位的单位也是伏特(V)。讨论电路中各点的电位时,必须先选定一个参考点,否则是无意义的,因为电位与参考点的选择有关,而电压与参考点的选择无关。参考点的选择,物理学中一般选为无穷远处。而实际电气设备一般常有一个连接到机壳的电路公共端,工程上常以这个公共点为参考点,即使它并不真正接地,习惯上也称该点为“接地点”。电子电路图中经常采用电位电路的画法。如图 1.4 所示,“⊥”标为参考地, V_{S1} 、 V_{S2} 表示电位。

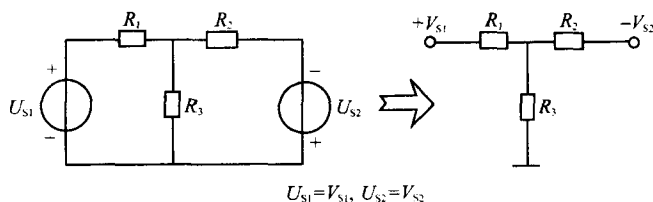


图 1.4

3. 功率与能量

功率是电场力在单位时间内移动电荷所作的功。从图 1.3 看到,当通过这段电路的

电流 i 与电压 u 取关联参考方向时,在 dt 时间内从 a 点移到 b 点的正电荷量为 dq ,因 a 、 b 两点间电压为 u ,故 dq 从 a 点移到 b 点过程中失去的能量为

$$dW = u \cdot dq \quad (1-3)$$

这些能量被这段电路吸收。因此,电路在单位时间内吸收的能量,即它吸收的功率为

$$p = \frac{dW}{dt} = u \frac{dq}{dt} = u \cdot i \quad (1-4)$$

上式指出:任意时刻,元件(或电路)吸收的功率等于该时刻元件(或电路)两端的电压与通过它的电流的乘积。在直流情况下,上式写为

$$P = UI \quad (1-5)$$

功的单位是焦耳(J),功率的单位是焦/秒,又称瓦特(W)。

应该注意的是:用上式计算功率时,若 u 、 i 采用关联参考方向,则功率值 $p > 0$,表示元件吸收(或消耗)的功率; $p < 0$,表示元件产生(或提供)的功率。若 u 、 i 采用非关联参考方向,则 $p > 0$,表示元件产生的功率; $p < 0$,表示元件吸收的功率。

设元件吸收的功率为 $p(t)$,则从 t_0 到 t 时刻元件吸收的总能量为

$$W(t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi \quad (1-6)$$

式中积分上限为 t ,为了区别,积分式内的时间变量改用 ξ 。当 p 的单位为瓦(W)时,能量 W 的单位为焦耳,简称焦(J)。

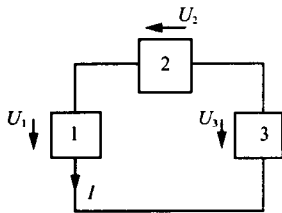


图 1.5

例 1-1 在图 1.5 中,电流和各元件两端电压的正方向如图中所示。今测得: $I = -4\text{A}$, $U_1 = 140\text{V}$, $U_2 = -80\text{V}$, $U_3 = 60\text{V}$ 。试说明电流和各电压的实际方向。并计算各元件的功率,指明哪些元件是电源,哪些是负载。

解 电流 I 和电压 U_2 的实际方向与图 1.5 所示正方向相反, U_1 和 U_3 的实际方向则与正方向相同。

元件 1 的功率为: $P_1 = (-4) \cdot 140 = -560(\text{W})$,元件 1 产生功率,所以元件 1 是电源。

元件 2 的功率为: $P_2 = (-4) \cdot (-80) = 320(\text{W})$,元件 2 吸收功率,所以元件 2 是负载。

元件 3 的电流、电压取非关联参考方向,它的功率为: $P_3 = (-4) \cdot 60 = -240(\text{W})$,元件 3 吸收功率,所以元件 3 也是负载。

1.2 电路基本元件

电路元件按其对外提供还是不提供能量分为有源元件和无源元件。按其对外引出端钮的数目还可分为二端元件和多端元件。具有两个端钮的二端元件有电阻、电感、电容及电压源、电流源等。多端元件具有三个或三个以上端钮,如受控源、理想变压器和运算放

大器等。

本书只讨论由集中参数元件构成的所谓集中参数电路,如以后所述的电路基本定律均是在这一前提下才能使用。集中参数元件的电磁过程认为都是集中在元件内部进行,因此元件特性可集中用一个或有限个分立的参数表征。工程中遇到的大量电路都可作为集中参数电路来处理。能这么处理的准则是:若电路元件及其联接成的电路尺寸远小于电路最高工作频率所对应的波长,则电路的实际尺寸可以忽略不计而看作是集中参数电路。例如,若计算机电路工作频率高达 500MHz,对应的波长为 0.6m。因采用大规模和超大规模集成电路,器件及电路被集成在几毫米的硅片上,这时电路就属于集中参数电路。

1.2.1 电阻元件

电阻元件简称电阻,其特性由通过它的电流 i 和它两端电压 u 之间的关系,即 $i = f(u)$ 表征。这个关系表现在 $u-i$ 平面上是电阻的伏安特性曲线。若伏安特性是通过坐标原点的直线,则称为线性电阻;若伏安特性是通过坐标原点的曲线,则称为非线性电阻。

电阻又可分为时变电阻和时不变(定常)电阻。前者的特征是,其伏安特性随时间变化;而後者的不随时间变化。线性定常电阻的伏安特性为一条通过坐标原点的直线,而线性时变电阻的伏安特性为过原点的一族直线。

线性定常电阻的电路符号和特性如图 1.6 所示。这种电阻有如下特点:

(1) 端电压 u 与通过的电流 i 成正比,即满足欧姆定律

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

式中, u 与 i 采用关联参考方向。元件参数就是电阻值 R ,反映了对电流的阻碍作用。它是常数,与通过它的电流和作用在它两端的电压大小无关。它也就是伏安特性的斜率。

(2) 双向性:伏安特性以原点对称,即对不同方向电流和电压,伏安特性完全相同,故元件两个端钮没有区别,可任意联接。

(3) 耗能性:它的功率 $p = iu = i^2 R = \frac{u^2}{R} > 0$,即总是消耗功率。说明电阻不仅是无源元件,而且是一种耗能元件。若时间 t 从 0 到 T ,则在这段时间内电阻所消耗的电能为

$$W = \int_0^T p dt \quad (1-8)$$

这些电能全部变成热散发掉。所以,电阻消耗电能是不可逆的能量转换过程。而且,发热使电阻的温度升高。若温度过高,电阻就有烧坏的危险。为此,实际电阻器上通常除标明阻值外,还要标明它长期运行时其功率所规定的限额,称为额定功率。

(4) 无记忆性:由式(1-7)可见,任一时刻电阻的电压(或电流)完全由同一时刻的电

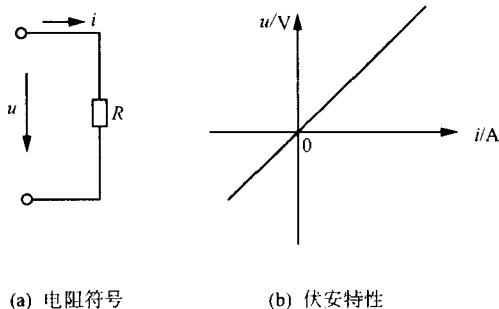


图 1.6 线性定常电阻

流(或电压)决定,而与该时刻以前的电流(或电压)值无关。也就是说,线性电阻的电压(或电流)不能“记忆”电流(或电压)在“历史”上所起的作用。故它是无记忆元件。

以后如不特殊说明,一般均用线性定常电阻(包括后述的电感、电容)。这种元件的参数还可用电导 G 表示,即

$$G = \frac{1}{R} = \frac{i}{u} \quad (1-9)$$

式中当 u 的单位为伏[特], i 的单位为安[培]时, R 的单位为欧姆(Ω), G 的单位为西[门子](S)。

1.2.2 电感元件

电感元件简称电感,其物理原形是如图 1.7(a)所示的电感线圈。当电流 i 流过线圈时,周围就会有磁场产生。线圈内磁通 ϕ 与电流 i 它们的方向符合右螺旋定则。磁力线是发散的,因而与线圈各匝交链的磁通不等。各匝磁通的总和,即全磁通或称磁链 ψ 为

$$\psi = \sum_{j=1}^N \phi_j$$

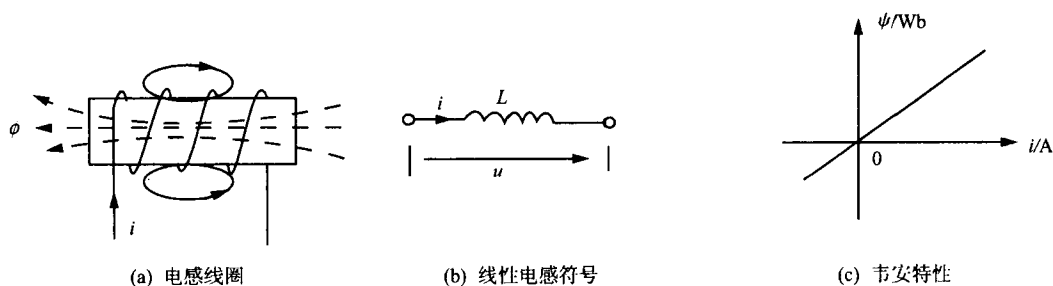


图 1.7

式中, ϕ_j 为与第 j 匝线圈交链的磁通。如果线匝绕得很紧凑或采取其他措施,使得与各匝线圈交链的磁通都相同且为 ϕ , 则有

$$\psi = N\phi$$

式中, N 为线圈匝数。磁通和磁链的单位为韦伯(Wb)。这样,一个电感元件的特性用函数 $\psi = f(i)$ 来表示。这个关系表现在 $\psi - i$ 平面上是电感的韦安特性曲线。若韦安特性是通过坐标原点的直线,则为线性电感。线性电感有如下特点:

(1) 其磁链 ψ 正比于产生磁链的电流 i , 即

$$\psi = Li \quad (1-10)$$

式中, ψ 与 i 参考方向之间遵守右螺旋定则,比例系数 L 是一个正实常数。它与 ψ 、 i 无关,是电感元件本身固有的物理量,称为电感(或自感),单位是亨利(H)。它也就是韦安特性的斜率。

线性电感的电路符号和磁特性如图 1.7(b)、(c)所示。电感 L 既是元件名称又表示元件的参数。

(2) 双向性: 韦安特性以原点对称, 故也是一种与端钮接法无关的元件。

(3) 动态性: 当电感的电流 i 随时间变化时, ψ 也随之变化, 因而在它的两端将产生感应电压 u 。由电磁感应定律可知

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

式中, u 和 i 采用关联参考方向。此式说明, 线性电感的电压与该时刻电流的变化率有关(成正比), 而与该时刻的电流无关。所以, 称它是动态元件。如果电流不随时间变化(直流电流), 则电压为零, 电感相当于一根无电阻的短接导线(称电感短路)。

(4) 记忆性: 由式(1-11)可得电感电流与电压关系的积分形式

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\xi) d\xi = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u(\xi) d\xi + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi \\ &= i(t_0) + \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi \end{aligned} \quad (1-12)$$

上式表明, 电感在 t 时刻的电流值与 t 时刻以前电感电压的全部历史有关。电感电流有“记忆”电感电压的作用, 故电感是一个记忆元件。式中 $i(t_0)$ 为电感在初始时刻 t_0 的状态, 称为初始状态。

(5) 储能性: 它的功率为

$$p = ui = L \frac{di}{dt} \cdot i = Li \frac{di}{dt} \quad (1-13)$$

可见, 当 u 、 i 的实际方向一致时 $p > 0$, 表明电感吸收功率, 其磁场增强, 磁场能量随电流的增加而增加; 反之, 则 $p < 0$, 电感把吸收了的能量释放出来, 输出功率。所以电感是一种储能元件。从 $t = t_0$ 到任意时间 t 供给电感的能量为

$$\begin{aligned} W_L &= \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t \left[L \frac{di(\xi)}{d\xi} \right] i(\xi) d\xi = L \int_{i(t_0)}^{i(t)} i di \\ &= \frac{1}{2} L [i^2(t) - i^2(t_0)] \end{aligned}$$

如果初始电流 $i(t_0) = 0$, 则电流为 $i(t)$ 时, 电感吸收并全部转化为它的磁场能量的是

$$W_L = \frac{1}{2} Li^2(t) \quad (1-14)$$

上式说明, 磁场能只决定于电流, 与电感的电压无关。而且, 在任意时刻 $W_L > 0$, 与元件在电路中的联接方式无关。所以, 电感仍是一个无源元件。

1.2.3 电容元件

电容元件简称电容, 是实际电容器的理想化模型。任何两个彼此绝缘而又互相靠近

的导体就可构成一个电容器。这两个导体就是电容器的两个极,极间用绝缘介质隔开。电容的特性由两个极板上所加电压 u 和极板上储存电荷 q 之间的关系表征。这个关系表现在 $q-u$ 平面上是电容的库伏特性曲线。该特性若是通过坐标原点的直线,则元件为线性电容。否则称其为非线性电容。线性电容有如下特点:

(1) q 正比于 u , 即

$$q = cu \quad (1-15)$$

式中 c 是一个常量,称为电容量,单位为法拉(F)。它与 q 和 u 无关,也是库伏特性的斜率。其电路符号和特性如图 1.8 所示。

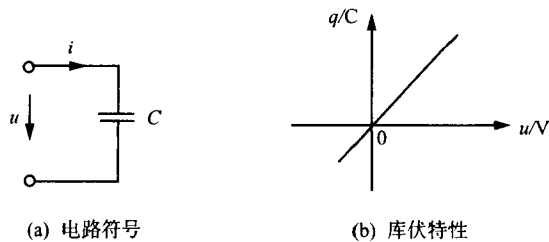


图 1.8 线性电容

(2) 双向性:库伏特性以原点对称,说明特性与端钮接法无关。

(3) 动态性:若作用于电容两端的电压是直流电压,则极板上的电荷是稳定的。这时极板间没有电荷的移动,即没有电流。电容相当于断开(称为开路),所以电容有隔断直流作用。但若加在电容上的电压 u 随时间变化,则极板上的电荷会随之变化,在极板间的介质中会产生位移电流,从而在导线上形成传导电流。如图 1.8(a)所示,当 u 、 i 为关联参考方向时

$$i = \frac{dq}{dt} = c \frac{du}{dt} \quad (1-16)$$

可见,任一时刻通过电容的电流取决于该时刻电容两端电压的变化率,而与该时刻的电压值无关,这反映了电容的动态性。

(4) 记忆性:由式(1-16)可得电容电压与电流关系的积分形式

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{1}{c} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi = \frac{1}{c} \int_{-\infty}^0 i(\xi) d\xi + \frac{1}{c} \int_0^t i(\xi) d\xi \\ &= u(t_0) + \frac{1}{c} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi \end{aligned}$$

上式表明,电容在 t 时刻的电压与 $-\infty$ 到 t 这一段时间内所有的电流都有关。可见,电容电压有“记忆”电容电流的作用。

(5) 储能性:当 u 、 i 参考方向关联时,电容吸收的功率为

$$p = ui = cu \frac{du}{dt} \quad (1-17)$$

上式中 p 可能为正,也可能为负。这意味着电容可能吸收功率,也可能供出功率。和电感的能量分析类似,此处不再推导。电容 c 在 t 时刻储存的电场能量为

$$W_c = \frac{1}{2}cu^2(t) \quad (1-18)$$

所以,电容是储能元件,也是一无源元件。

1.2.4 电源元件和实际电源模型

电源元件有理想电压源和理想电流源二种,它们都是理想二端有源元件。

1. 理想电压源、电流源

理想电压源是其端电压 u 总是保持为一定的时间函数 $u_s(t)$,而与通过它的电流无关的元件。其电路符号如图 1.9(a)所示,图中通过它的电流 i ,完全由电源以外的电路(称为外电路)的工作情况决定。

若 $u_s(t) = U_s$ 为一常量,则称它为恒定电压源(简称恒压源),其伏安特性为 $u-i$ 平面上平行于 i 轴的一条直线,如图 1.9(b)所示。若 u_s 是时间 t 的函数,则称为时变理想电压源,其伏安特性是 $u-i$ 平面上平行于 i 轴的一族直线。

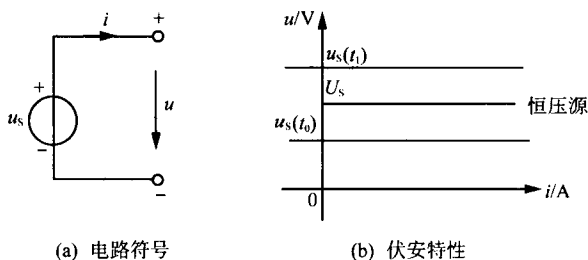


图 1.9 理想电压源

理想电流源是在其端钮上总能向外提供一定的电流 $i_s(t)$,而与它的端电压无关的元件。其电路符号如图 1.10(a)所示,图中它的端电压 u 的大小和方向(极性),在 $i_s(t)$ 给定时,完全由外电路的工作情况决定。

若理想电流源的端电流 $i_s(t) = I_s$ 为一常量,则称它为恒定电流源(简称恒流源),其伏安特性为 $u-i$ 平面上平行于 u 轴的一条直线,如图 1.10(b)所示。若为时间 t 的函数 $i_s(t)$,则称为时变理想

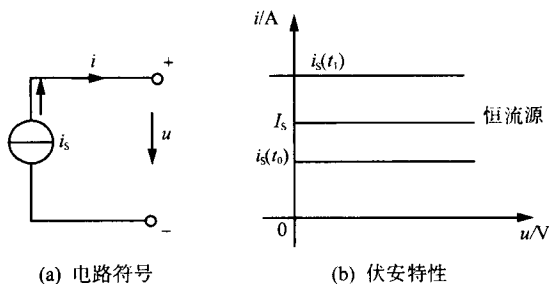


图 1.10 理想电流源