

TM/
4053

164563

高等学校教材

电 工 技 术

主 编	李忠波	梁 引	
参 编	高有华	袁 宏	申永山
	龚淑秋	高荣善	李景荣
主 审	范振铨		

本书共十三章,基础部分有电路的基本概念与定律、电路分析方法、正弦交流电路、三相交流电路、电路的时域分析、电工测量与安全用电、周期性非正弦电路等内容;应用部分有铁心线圈与变压器、异步电动机、三相异步电动机的继电器控制、控制电机、可编程序控制器、均匀传输线等内容。本书章后有习题,节后有练习与思考题。书中编入较多的例题和应用实例。

本书可作为高等工科院校大学本科、专科机械类、经贸管理类、化工类、建筑类、计算机类等有关专业“电工技术”课程的教材,也可作为职工大学、业余大学和电视大学有关专业的教材,还可供有关工程技术人员学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术/李忠波 梁引主编. —北京:机械工业出版社, 1997. 11
高等学校教材
ISBN 7-111-05744-9

I. 电… I. 李… III. 电工学-高等学校-教材 IV. TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第09968号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码 100037)
责任编辑:贡克勤 版式设计:王 颖 责任校对:张 力
封面设计:姚 毅 责任印制:卢子祥
北京市密云县印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1997年11月第1版第1次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·21.25印张·516千字
0 001—6500册
定价:26.50元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

本书是根据国家教育委员会电工学课程教学指导组拟定的电工、电子技术系列课程教学基本要求编写的。可供高等工科院校大学本科、专科机械类、经贸管理类、化工类、建筑类、计算机类等有关专业教学使用。

电工技术是非电类专业的技术基础课程。通过本课程的学习,应使学生得到电工技术必要的基础理论、基本知识和基本技能,了解电工事业发展概况,为学习后续课程和专业知识和从事工程技术工作和科学研究工作打下理论和实践基础。

本教材是十几年教学经验的结晶,在校试用期间收到了满意效果。本教材分基础和应用两部分。基础部分七章,可供有关专业 30~40 学时教学使用。为适应教育、教学改革和人才素质培养的需要,该部分力求作到提高起点、加大跨度、精炼内容、培养自学。内容安排上以元件模型的伏安关系、能量关系和功率关系为基础,以基本定律和基本分析方法为手段,以激励和响应为主线,按认识规律使课程内容逐步深化,以便教学和学生自学。有些内容,例如网孔电流法、替代定理、正弦交流电路的频率特性及周期性非正弦电路等可在教师指导下由学生自学,这些内容均以 * 号标记。应用部分六章,可供有关专业 30~40 学时教学使用。为满足不同专业的需要和反映科学技术发展的新成果,该部分增加了一些选修内容,例如三相变压器、伺服电动机、步进电动机、可编程序控制器、均匀传输线等,这些内容均以 * 号标记,可根据教学需要选用。

本书由沈阳工业大学李忠波(编写第三章和第十二章的第三、四、五节)和辽宁工学院梁引(编写第一、九章)担任主编。沈阳工业大学高有华编写第二、四章,袁宏编写第五章,申永山编写第六章,龚淑秋编写第七、十一章,高荣善编写第八、十三章,辽宁工学院李景荣编写第十章和第十二章的第一、二、五节。

范振铨教授在百忙之中对本书进行了仔细审阅,提出许多修改意见,在此深表谢意。

由于编者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,恳请使用本书的教师和学生提出批评指正。

编 者

1996 年 8 月

目 录

前言

第一篇 基础部分

第一章 电路的基本概念与定律	1
第一节 电路和电路模型	1
第二节 电路变量及其参考方向	2
第三节 电阻、电感和电容	5
第四节 电压源和电流源	7
第五节 受控电源	10
第六节 基尔霍夫定律	12
第七节 电功率和电位的计算	14
第八节 非线性电阻电路	16
小 结	18
习 题	19
第二章 电路分析方法	23
第一节 电路的等效变换	23
第二节 支路电流法	27
* 第三节 网孔电流法	30
第四节 节点电压法	35
第五节 叠加原理	40
* 第六节 替代定理	42
第七节 戴维南定理和诺顿定理	43
小 结	46
习 题	47
第三章 正弦交流电路	50
第一节 正弦交流电的基本概念	50
第二节 正弦量的相量表示法	53
第三节 电阻元件的正弦交流电路	55
第四节 电感元件的正弦交流电路	56
第五节 电容元件的正弦交流电路	59
第六节 正弦稳态电路的分析	61
第七节 功率因数的提高	68
* 第八节 正弦交流电路的频率特性	71
第九节 谐振电路	73
小 结	78
习 题	79
第四章 三相交流电路	83

第一节 三相电动势的产生与三相电源的 联结	83
第二节 三相电路负载的联结	86
第三节 三相电路的功率	95
小 结	99
习 题	99
第五章 电路的时域分析	102
第一节 概述	102
第二节 RC 电路的时域分析	105
第三节 求解一阶电路的三要素法	111
第四节 RC 串联电路对矩形波电压的 响应	114
小 结	118
习 题	118
第六章 电工测量与安全用电	122
第一节 测量误差与仪表准确度	122
第二节 电工仪表的类型	123
第三节 电流、电压和单相功率的测量	127
第四节 万用表和兆欧表	129
第五节 电桥及电阻、电容和电感的 测量	132
第六节 安全用电常识	134
小 结	136
习 题	136
* 第七章 周期性非正弦电路	138
第一节 非正弦周期量的分解	138
第二节 非正弦周期量的有效值、平均值 和平均功率	141
第三节 非正弦周期信号线性电路的谐波分 析法	145
小 结	147
习 题	148

第二篇 应用部分

第八章 铁心线圈与变压器	150
第一节 磁路的基本概念和定律	150
第二节 磁性材料的磁性能	153

第三节 直流铁心线圈与直流电磁铁.....	154	第一节 伺服电动机.....	225
第四节 交流铁心线圈与交流电磁铁.....	159	第二节 步进电动机.....	234
第五节 单相变压器.....	163	第三节 控制电动机的选用.....	238
*第六节 三相变压器.....	173	小 结.....	241
小 结.....	175	习 题.....	242
习 题.....	176	*第十二章 可程序控制器	243
第九章 异步电动机	178	第一节 概述.....	243
第一节 三相异步电动机的构造及原理.....	178	第二节 指令系统与编程.....	249
第二节 三相异步电动机的等效电路及 参数.....	182	第三节 MASTER-K30PLC 的 I/O 配置及 内部软继电器.....	262
第三节 三相异步电动机的电磁转矩与机械 特性.....	185	第四节 MASTER-K30 的指令系统与编程 语言.....	263
第四节 三相异步电动机的起动、调速和 制动.....	188	第五节 PLC 控制系统的应用举例.....	276
第五节 三相异步电动机的选择.....	193	小 结.....	281
*第六节 单相异步电动机.....	197	习 题.....	281
小 结.....	199	*第十三章 均匀传输线	284
习 题.....	199	第一节 均匀传输线及其分布参数 方程.....	284
第十章 三相异步电动机的继电器接触器 控制	201	第二节 均匀传输线方程的正弦稳态解.....	287
第一节 常用控制电器.....	201	第三节 均匀传输线的行波.....	290
第二节 笼型电动机直接起动的控制 电路.....	209	第四节 特性阻抗与传播常数.....	297
第三节 逻辑门电路和继电器接触器电路的逻 辑式.....	211	第五节 无损耗传输线的稳态分析.....	300
第四节 笼型电动机正反转控制电路.....	214	小 结.....	306
第五节 行程控制和时间控制.....	218	习 题.....	307
小 结.....	222	附 录	308
习 题.....	223	附录 A TNC-810PLC 简介.....	308
第十一章 控制电机	225	附录 B 金星 MASTER-K30PLC 简介.....	312
		附录 C 电气原理图中常用新旧电气符 号对照表.....	328
		参考文献	331

第一篇 基础部分

第一章 电路的基本概念与定律

本章主要介绍电路和电路模型的概念、理想电路元件及其伏安特性、电路变量和它们的参考方向、基尔霍夫定律及功率和电位的计算方法等。

第一节 电路和电路模型

一、实际电路及其基本功能

实际的电路（或系统）都是由电路元件以一定方式连接起来的整体。虽然电路的种类繁多、具体功能各异，但是，从电路的基本功能上分，它可分为两大类。一类是信号的产生和处理电路，一类是功率（或能量）的产生和处理电路。各种物理量的检测电路、放大电路、声音、图象或文字的处理电路等即属前者，各种整流电路、逆变电路、变频电路及直流变换电路等即是后者。

二、理想电路元件和电路模型

实际电路中的电磁过程是相当复杂的，难以进行有效的分析计算。电路分析方法中采用如下两项措施加以解决。

其一，只要电路的尺寸远小于电路变量的工作波长，便可以用一些集中的理想电路元件来模拟实际电路元件。例如，用理想电阻元件来模拟电路对能量的不可逆消耗，用电容元件来模拟电场能的存储，用理想电感元件来模拟磁场能的存储。此外，还有电压源元件、电流源元件、受控源元件、耦合电感元件和理想变压器元件等。由于它们都有精确的数学定义式和相应的电路符号，所以便于计算。用理想电路元件组成的电路等效地模拟了实际电路的功能，称为电路模型。图 1-1 给出了三种基本元件电路模型的图形符号。

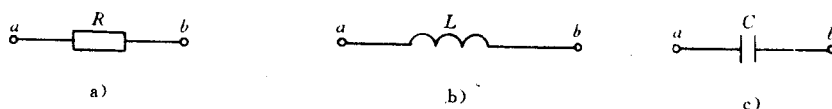


图 1-1 三种基本理想元件的图形符号

a) 电阻元件 b) 电感元件 c) 电容元件

其二，一个实际的电路元件在电路中的作用往往不是单一的。例如，电感线圈，一方面它会储存磁场能，另一方面会发热（耗能）。在高频的场合，它还会有电容效应。因此，在建

立电路模型时必须抓住其主要性质，忽略其次要性质。在低频情况下，使用电感与电阻的串联组合来模拟电感线圈，如图 1-2 所示，其中图 a 是电感线圈，图 b 是它的电路模型。



图 1-2 用电感与电阻的串联组合模拟电感线圈

今后所谈及的电路元件均指理想电路元件，所涉及的电路除特殊申明者外，均指电路模型。电路中的连接导线为既无电阻也无电感、电容效应的理想导线。

图 1-3 所示为手电筒实际电路（图 a）及其电路模型（图 b），其中电池用理想电压源 U_S 来表示。

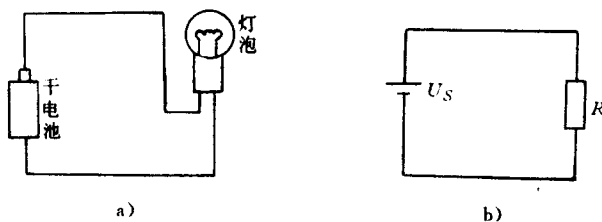


图 1-3 手电筒电路及其电路模型

第二节 电路变量及其参考方向

电路中的主要物理量有电流、电压、功率和能量。在分析计算中经常用到的变量是电流和电压。

一、电流及其参考方向

单位时间内通过导体横截面的电荷量被定义为电流强度，简称为电流。或者说，电流 i 是电荷 q 对时间 t 的变化率，即

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

随时间变化的电流用小写字母 i 来表示，不随时间变化的电流，如直流（恒定电流），用大写字母 I 来表示。

在《量和单位》一书中，电荷量的单位为库仑（C），时间的单位为秒（s），电流的单位为安培（A）。

电流虽然是标量，但电荷在电路中通过某一截面是有指向的，历史上已规定正电荷运动的方向为电流的正方向，也就是所谓的实际方向。在分析复杂的电路时，一般难于判断出电流的实际方向。而列方程、进行定量计算时需要电流有一个约定的方向，即用一个箭头表示某电流假定的正方向，称为参考方向。参考方向的规定必须在解析之先，并且是任意指定的。这样，一个完整、确切的电流数值便成为代数量，正值表示参考方向与实际方向相同，负值表示二者方向相反。

在图 1-4 中,用方框来泛指元件,电流的方向都是参考方向。对于图 a,由于没有指定参考方向,电流的数值便失去意义,也无法参与分析计算;图 b 中,电流在所示参考方向下其数值为正,因此其实际方向是由 a 至 b ;而图 c 中电流的实际方向为由 b 至 a 。

二、电压及其参考方向

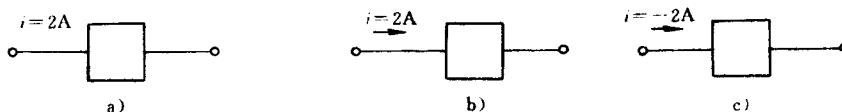


图 1-4 电流及其参考方向

电路中任意两点之间之所以存在电压和电流,是因为电源在电路中建立了电场的缘故。电源内部总存在着一种输运电荷的电源力,电源力维持着电源两极间的电压,即电源电压,并在此过程中完成能量转换,同时将电能输送给电源以外的电路。电源产生电功率,而电路作为电源的负载则吸收电功率,两者是平衡的。在多电源的电路中,可能出现吸收电功率的电源,此种情况需要通过计算来判断。

为衡量电路元件吸收或消耗电功率的情况,定义了电压这一物理量。若以 U_{ab} 来表示 a 点对 b 点的电压,则 U_{ab} 在数值上等于单位正电荷由 a 点经任意路径运动到 b 点时电场力所作的功,或者说该段电路所吸收的能量。用大写字母 U 来表示不随时间变化的电压,例如直流电压;用小写字母 u 来表示一般的电压,即有

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

式中, dW 为电场力作功所输出的能量或该段电路所吸收的能量; dq 为通过该段电路的电荷量。

在《量和单位》一书中,能量的单位为焦耳 (J),电荷的单位为库仑 (C),电压的单位为伏特 (V)。

电压也是标量,但它是有极性的,或者说存在着电位高低的问题。习惯上规定电压的实际方向由正极性端钮 (点) 指向负极性端,或由电位高的端钮指向电位低的端钮。这里所说的电位其定义和物理学中的一样,是某点相对于参考点的电压值,并且常把参考点选定在电路中适当的点上 (例如电源负极)。如果令参考点的电位为零,则电路中各点的电位值就是确定的。改动参考点的位置,各点电位值将发生变化。实质上,任意两点之间的电压值也就是它们的电位差值。倘若正电荷的运动是由高电位点至低电位点,那么相应点之间的电压值即为电位降。反之,正电荷由低电位点运动到高电位点,例如直流电源内部电荷的运动即是,相应的称呼为电位升。今后,在电路的分析计算中,常交替使用电位降和电位升的概念,应当熟悉它们并灵活运用。

与电流的方向规定类似,在分析计算电路之前必须对电压标以极性 (正、负号),或标以方向 (箭头)。这种标法是假定的参考方向,并因此才可以用电压的代数值来确切地表示电压的实际方向和数值。图 1-5 是标注电压参考方向的两种方法,图 1-6 是在参考方向下确定电压实际方向及数值的例子。其中图 a 由于没有标注参加方向,电压值是不确切、无法参与计算的;图 b 中 a 点对 b 点的电压值为 $10V$,或者说 a 点电位比 b 点电位高 $10V$,也可以说从 a 点至 b

点有电位降 10V 等；对于图 c，由于电压 u 为负值，则表示了与图 b 相反的情况。

应该指出，反映任一电路元件性能的数学表达式都与电压和电流参考方向的规定有关，在一般情况下，为方便起见，常规定某一元件端电压的参考极性与电流的参考方向一致，即电流的参考方向是电压降的参考方向，称为关联参考方向。如图 1-7 所示。

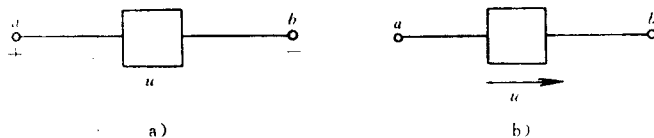


图 1-5 电压参考方向的表示方法

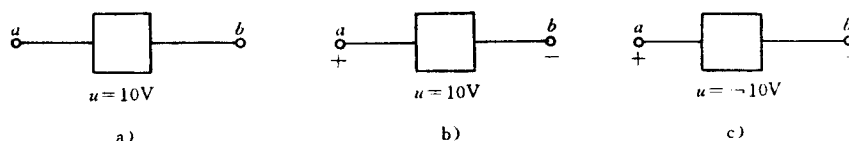


图 1-6 确定电压实际方向的例子

关于电压、电流、功率和能量的计量单位问题，应该引入辅助单位，这会給应用和书写带来方便。表 1-1 所列出的是《量和单位》中的部分词头。一些较大或较小的物理量就可以用辅助单位的词头来表示，例如：

$$2 \times 10^{-3} \text{A} = 2 \text{mA}$$

$$5 \times 10^{-6} \text{s} = 5 \mu\text{s}$$

$$10 \times 10^3 \text{V} = 10 \text{kV}$$

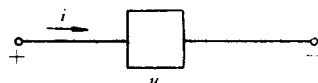


图 1-7 关联参考方向

等等。

表 1-1 《量和单位》中的部分词头

因 数	词 头 名 称		符 号	因 数	词 头 名 称		符 号
	原文 (法)	中 文			原文 (法)	中 文	
10^{12}	tera	太	T	10^{-3}	milli	毫	m
10^9	giga	吉	G	10^{-6}	micro	微	μ
10^6	mega	兆	M	10^{-9}	nano	纳	n
10^3	kilo	千	k	10^{-12}	pico	皮	p

练习与思考

1-2-1 在图 1-8a 中，电压 U_{ac} 为 () V；从 a 点至 b 点是电位 ()，从 b 点至 c 点是电位 ()。

1-2-2 在图 1-8b 中，元件 B 的电压、电流参考方向为关联的，而对于元件 A，则是 ()。

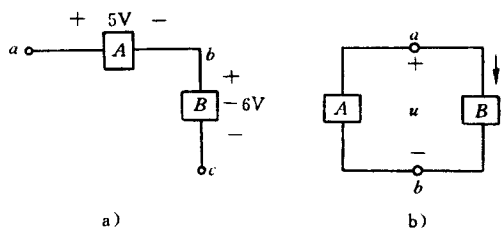


图 1-8 题 1-2-1、1-2-2 图

第三节 电阻、电感和电容

本节讨论三种基本电路元件的伏安特性。

一、电阻元件

电阻元件是实际的电阻器(炭膜、金属膜和线绕电阻器等)、半导体器件的体电阻以及各类电路元件内部耗能电阻的抽象。电阻元件可分为线性电阻和非线性电阻两类,本书主要讨论线性电阻。绝大多数实际电阻器可抽象为线性电阻。图 1-9 是线性电阻的符号,在电压、电流关联参考方向下,其端钮伏安关系为

$$u = Ri \quad (1-3)$$

式中, R 为常数,用来表示电阻及其数值。

式 (1-3) 表明,凡是服从欧姆定律的元件即线性电阻元件。图 1-10 为它的伏安特性曲线。在图 1-11 所示的电压、电流非关联参考方向下,伏安关系应写成

$$u = R(-i) = -Ri \quad (1-4)$$

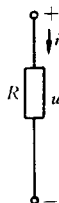


图 1-9 电阻元件

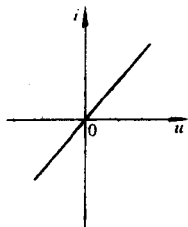


图 1-10 线性电阻的伏安特性

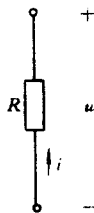


图 1-11 非关联参考方向

在法定计量单位中,电阻的单位是欧姆 (Ω)。电阻的倒数称为电导,用符号 G 表示,即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-5)$$

电导的单位是西门子 (S)。显然,欧姆定律还可表示为

$$i = Gu \quad (1-6)$$

二、电感元件

电感元件是实际的电感线圈即电路元件内部所含电感效应(指对磁场能量的存储)的抽象。空心电感线圈常可抽象为线性电感,其韦安特性可表示为

$$\psi = Li \quad (1-7)$$

式中, L 是常数,用来表示电感元件及其数值; ψ 表示电感的磁链,与每匝磁通 Φ 有关系

$$\psi = N\Phi \quad (1-8)$$

上面式 (1-7) 成立的条件是电感电流 i 与磁通 Φ 的方向符合右手螺旋定则,如图 1-12 所示。图 1-13 是电感的符号,图 1-14 是其韦安特性曲线。

电感的性质也是用其端钮伏安关系来表征的。根据电磁感应定律和线性电感的韦安关系有

$$u = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d}{dt}(Li) = L \frac{di}{dt} \quad (1-9)$$

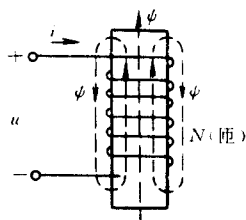


图 1-12 电感元件

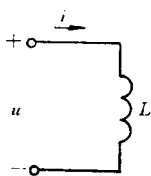


图 1-13 电感元件的符号

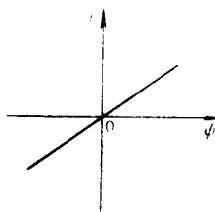


图 1-14 线性电感的韦安特性

如果电感电压、电流的参考方向非关联，在式 (1-9) 的右端应取负号。这就是线性电感的伏安特性，它表征了变化磁场将产生电场的性质，如果电流不随时间变化，即 $di/dt=0$ ，虽有电流，电压也为零。在直流电路中电感的作用如同短路。

当线圈含有铁心或其附近分布有铁磁介质时，便成为非线性电感，用一个常数表示它的电感值已不可能。本书只讨论线性电感，并简称为电感。

在法定计量单位中，电感的单位为亨利 (H)；磁通 (链) 的单位为韦伯 (Wb)；电流和时间要用安 (A) 和秒 (s)。

三、电容元件

从实际的电容器即电路器件的电容效应 (指对电场能量的存储) 中抽象出电容元件。绝大多数的平行板电容器与电容元件相近。线性电容的库伏特性可表示为

$$q = Cu \quad (1-10)$$

式中， C 是常数，用来表示电容元件及其数值； q 是正极所带电荷量； u 是正、负极间的电压。

根据电流的定义式 (1-1) 和电容的库伏特性，可推导出电容元件的伏安关系式，即

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(Cu) = C \frac{du}{dt} \quad (1-11)$$

如果电压和电流的参考方向非关联，则必须在式 (1-11) 的右端取负号。该式表征了变化电场将产生磁场这一性质，如果电压不随时间变化，即 $du/dt=0$ ，虽有直流电压，电流也为零。所以说，在直流电路中，电容的作用如同开路。图 1-15 所示的是线性电容元件；图 1-16 所示的是电容的符号；图 1-17 示出线性电容的库伏特性曲线。

在法定计量单位中，电容的单位为法拉 (F)。

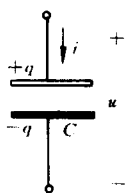


图 1-15 电容元件

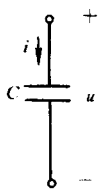


图 1-16 电容元件的符号

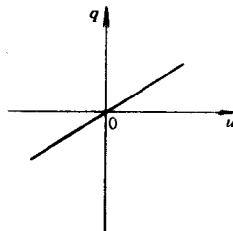


图 1-17 线性电容的库伏特性

练习与思考

1-3-1 在图 1-18 中， $u_C =$ _____。

1-3-2 在图 1-19 中, $i_L =$ _____。

1-3-3 在图 1-20a 中, 给出了电容 $C=1000\mu\text{F}$ 两端电压的波形。把电容电流 i_C 的波形画在图 1-20b 中。

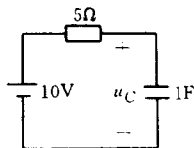


图 1-18 题 1-3-1 图

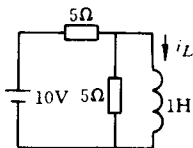


图 1-19 题 1-3-2 图

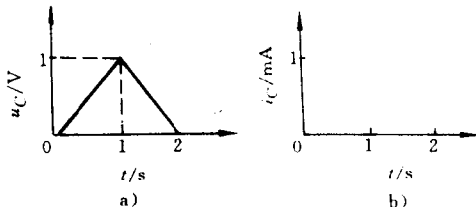


图 1-20 题 1-3-3 图

第四节 电压源和电流源

电路中各段上的电压和通过的电流都是由电源供给的, 也就是说, 电路中的能源是电源。干电池、蓄电池、发电机、电子稳压、稳流器等都是常见的实际电源。

一、电压源

电压源是实际电源的一种抽象。它的端钮电压总能保持某一恒定值或时间函数值, 而通过它们的电流无关。图 1-21a 为理想电压源的一般电路符号, 图 1-21b 是理想电池符号, 专指理想直流电压源。理想电压源元件的伏安特性可写为

$$u = u_S(t) \quad (1-12)$$

在电源内部一般规定电流的参考方向由电源负极指向正极, 即电压、电流的方向相反。电压源的电流值是任意的, 与电压源的负载 (外电路) 状态有关。图 1-21c 为理想直流电压源的伏安特性曲线。

实际电源总是有内部损耗的, 因此可以用一个理想电压源元件与一个电阻的串联组合来模拟, 如图

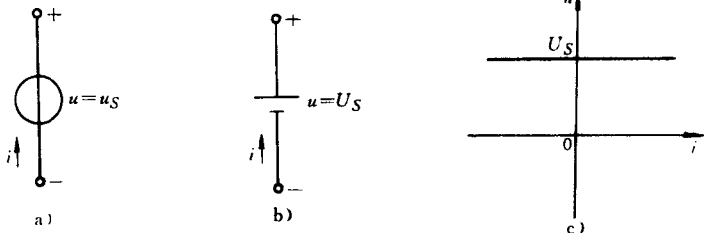


图 1-21 理想电压源

1-22所示。由于含有内部损耗电阻, 该组合的伏安特性与理想电压源的伏安特性截然不同, 可表示为

$$u = u_S - R_0 i \quad (1-13)$$

并可据此画出相应的伏安特性曲线。图 1-23 是直流电源的伏安特性曲线, 它是一条始于电压 u_S 、随电流 I 的增大向横轴倾斜的直线①, 其伏安特性表达为

$$U = U_S - R_0 I \quad (1-14)$$

这里, 端电压、电流均不是恒定的。如果负载为电阻 R (见图 1-24), 那么电流、电压还应符合负载电阻伏安特性的约束, 即

$$U = RI \quad (1-15)$$

在图 1-23 中, 描述两种电路元件的直线①和②的交点 Q , 称为电路

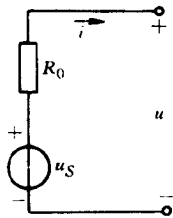


图 1-22 实际电压源模型

的工作点, Q 点对应的电流、电压即是当前电路的定值。

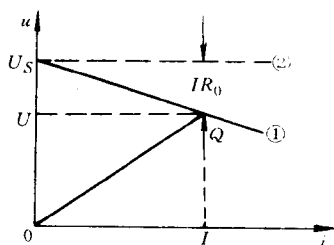


图 1-23 电压源的伏安特性

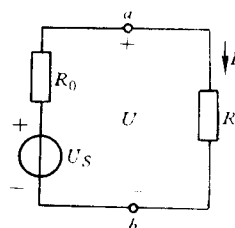


图 1-24 电压源外特性

二、电流源

电流源也是实际电源的一种抽象, 它的端钮输出为恒定的或一定时间函数的电流。电流源两端的电压值取决于外电路的情况。理想电流源的电路符号如图 1-25 所示, 直流电流源用大写字母 I_S 或 I 等表示, 随时间变化的电流源用 i_S 或 i 等来表示。其伏安特性是

$$i = i_S \quad \text{或} \quad I = I_S \quad (1-16)$$

图 1-26 给出的是理想直流电流源的输出电流曲线。

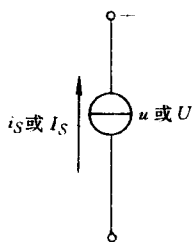


图 1-25 理想电流源

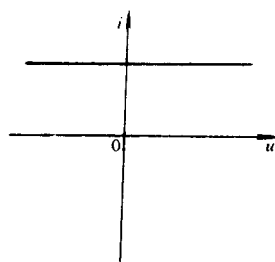


图 1-26 理想电流源的伏安特性曲线

如果用电流源来模拟实际电源, 应采用理想电流源与内部损耗电阻的并联组合, 如图 1-27 所示。此时, 电路中电压、电流的约束关系为

$$\left. \begin{aligned} I &= I_S - \frac{1}{R_0} U \\ I &= \frac{U}{R_L} \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

电路的工作点 Q 由电源的伏安特性和负载电阻的伏安特性共同决定 (参见图 1-28)。

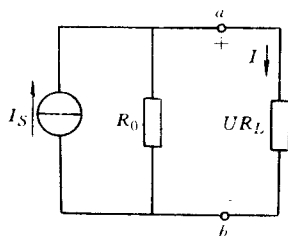


图 1-27 实际电流源

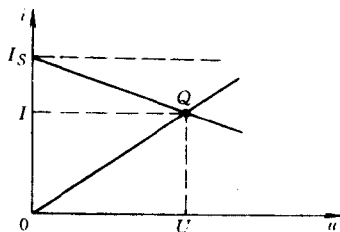


图 1-28 实际电源特性

三、电源模型的等效互换

上面介绍了两种电源模型。如果不考虑实际电源内部的特性,而只考虑实际电源的端钮伏安特性,那么,在图 1-24 和图 1-27 中,端钮 a 、 b 左侧的电路是可以等效互换的。例如,式 (1-14) 可以写成下面形式

$$I = \frac{U_s}{R_0} - \frac{1}{R_0}U \quad (1-18)$$

比较式 (1-18) 和式 (1-17) 的第一式可知,只要令

$$I_s = \frac{U_s}{R_0} \quad (1-19)$$

而电源内阻 R_0 的数值不变,则可以将理想电压源与内阻的串联组合电路变换成理想电流源与内阻并联的电路。并且,变换以后的电路与原电路相比较,端口处的伏安关系不会改变。显然,也可以把电流源与内阻并联的电路组合等效地变换成电压源与内阻的串联组合,只要满足

$$U_s = R_0 I_s \quad (1-20)$$

的关系即可。注意,这种变换只对端钮处的伏安关系是等效的,即不改变端口电压 U 和端口电流 I 的数值;但是,对于电源内部,两种电路组合是不等效的。电压源与电流源的等效变换如图 1-29 所示。

上述变换可以推广到一般的恒压源与电阻的串联组合和恒流源与电阻的并联组合之间,而不管 R_0 是否是电源内阻,对于交流电源的情况,也可以进行类似的等效变换。但须注意,变换后的电源方向应该是:电流源的箭头总是指向电压源的正极性端。

例 1-1 分别求图 1-30a 所示电路的恒流源与电阻并联的等效电路和图 1-30b 的恒压源与电阻串联的等效电路。

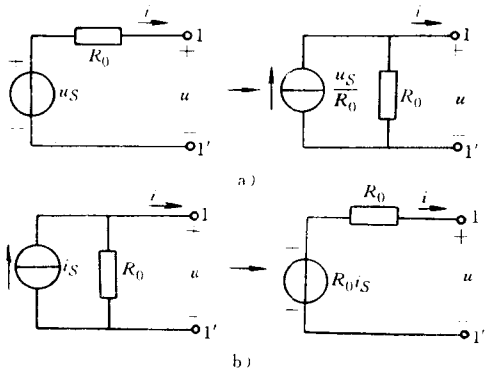


图 1-29 电源的等效变换

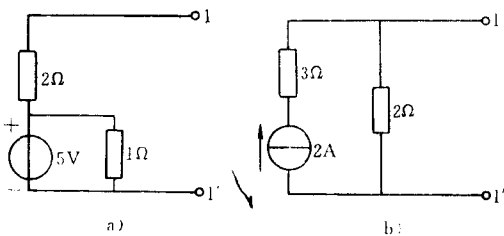


图 1-30 例 1-1 电路图

解 对于图 1-30a, 根据电压源的伏安特性, 5V 电压源与 1Ω 电阻相并联的电路, 可等效成 5V 电压源; 再根据式 (1-19) 计算出 $I_s = U_s/R_0 = 5/2\text{A} = 2.5\text{A}$ 。电路的变换过程如图 1-31 所示。

对于图 1-30b, 根据电流源的伏安特性, 2A 电流源与 3Ω 电阻相串联的电路, 可等效成 2A 电流源; 再根据式 (1-20), 计算出 $U_s = R_0 I_s = (2 \times 2)\text{V} = 4\text{V}$ 。电路的变换过程如图 1-32 所示。

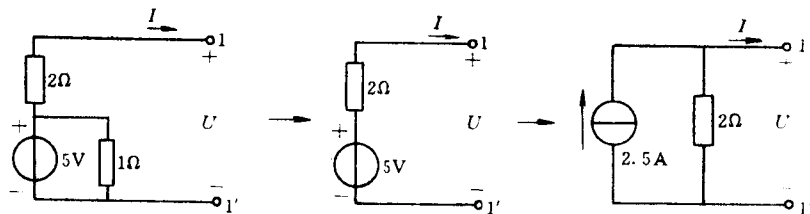


图 1-31 图 1-30a 的解

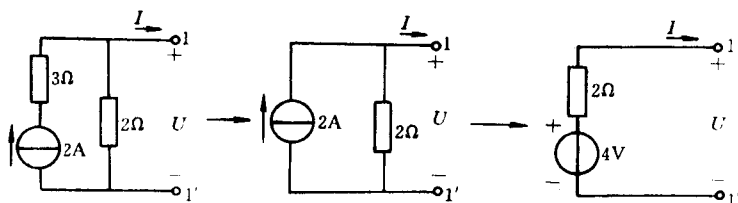


图 1-32 图 1-30b 的解

练习与思考

1-4-1 理想电压源的内阻为_____；理想电流源的内阻为_____。两种电源所产生的功率都是_____。

1-4-2 理想电压源与理想电流源相互间是_____等效互换的。

1-4-3 图 1-33a 电路的端口伏安特性是_____；图 1-33b 电路的端口伏安特性是_____。

1-4-4 图 1-34 电路的端口伏安特性是_____。

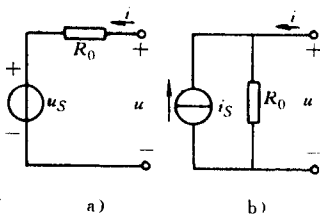


图 1-33 题 1-4-3 图

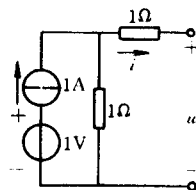


图 1-34 题 1-4-4 图

1-4-5 理想电压源的电压 u_S 为零时，可以用_____替代；理想电流源的电流 i_S 为零时，可以用_____替代。

第五节 受控电源

前面所讨论的电压源和电流源，其电压 u_S 和电流 i_S 都是实际电源输出电能的抽象，是不受外电路影响和控制的独立量，因此称为独立电源。另外有些电路元件，它们输出电压或电流的特性很象独立电源，例如半导体三极管和场效应晶体管，但是其输出电压或电流却是受到电路中某处电压、电流所控制的。在模拟这类受电压或电流控制的器件功能时，引入了受

控电源模型。受控电源的输出电压或电流，与控制它们的电压或电流之间，有正比关系时，称为线性受控电源。本书讨论的即是这类受控电源。

图 1-35 所示电路是一个受电流控制的电流源例子。受控电流源用菱形表示，其输出电流 βi_b 是控制电流 i_b 的 β 倍。显然， i_b 的大小决定着受控电流源输出电流的数值。当 i_b 为零时，其输出电流也为零。

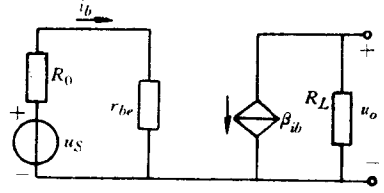


图 1-35 电流控制电流源实例

根据受控电源是电压源还是电流源，以及受电压控制还是受电流控制，受控电源可分为电压控制电压源 (VCVS)、电流控制电压源 (CCVS)、电压控制电流源 (VCCS) 和电流控制电流源 (CCCS) 四种类型。它们的示意图如图 1-36 所示。四种受控源

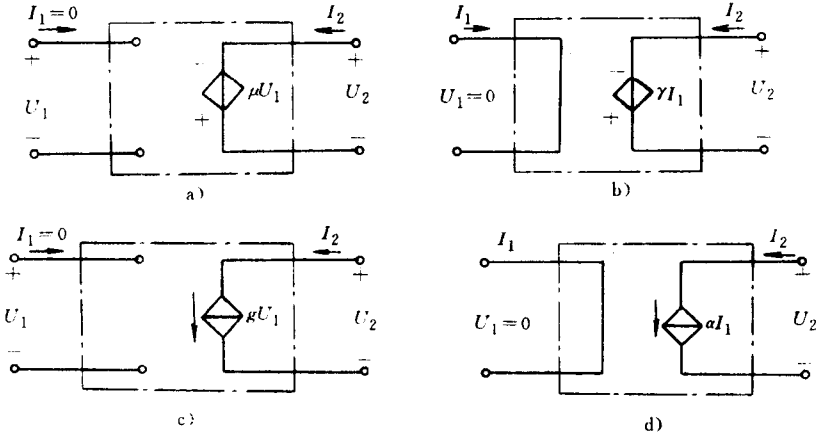


图 1-36 理想受控电源模型

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

的端钮伏安关系，即控制关系为

$$\text{VCVS: } U_2 = \mu U_1 \quad (1-21)$$

$$\text{CCVS: } U_2 = r I_1 \quad (1-22)$$

$$\text{VCCS: } I_2 = g U_1 \quad (1-23)$$

$$\text{CCCS: } I_2 = \alpha I_1 \quad (1-24)$$

式中， μ 、 r 、 g 和 α 称为控制系数，且均为常数，其中 μ 和 α 是没有量纲的纯数， r 具有电阻的量纲， g 具有电导的量纲。

受控电压源的输出电压，及受控电流源的输出电流，在控制系数、控制电压和控制电流不变的情况下，都是恒定的或是一定的时间函数。受控电压源与电阻的串联组合和受控电流源与电阻的并联组合，相互间可以进行像独立源一样的等效互换，但控制电压或控制电流支路应保持原来的结构。

例 1-2 在图 1-35 中，设 $i_b = 0.1 \sin \omega t$ (mA)、 $\beta = 50$ 及 $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ 。求输出电压 u_o 。

解 $u_o = -(\beta i_b) R_L = -(50 \times 0.1 \sin \omega t) \times 1 \text{ V} = -5 \sin \omega t \text{ (V)}$