



全国高等专科教育自动化类专业规划教材

电工技术

刘永波 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



全国高等专科教育自动化类专业规划教材

电 工 技 术

主 编 刘永波
副主编 张国德 孙玉芳
参 编 柳明丽
主 审 关大陆



机 械 工 业 出 版 社

本书是根据高职高专院校建筑工程、冶金、测量等非电类专业教学要求和实际需要编写的。结合工程实际中所需的电工技术基础知识和基本技能,从电路分析基础、电动机原理、继电-接触器控制技术、安全用电等四方面进行讲授,内容精炼,以必需够用为度,强调结论以及结论在实际中的应用,删减了大量的公式推导和理论论证内容。

本书主要内容包括:电路基础知识、电路的分析方法、正弦交流电路、三相交流电路、电路的暂态分析、磁路和变压器、电动机、继电-接触器控制、工厂供电与安全用电、电工测量等。为方便学生理解,本书设计了与教学内容结合紧密的例题、思考题和习题,并在书末附了部分习题答案和电工技术常用中英文词对照等。

为方便教学,本书配置了电子教案。凡选用本书作为授课用教材的学校,均可免费获得。咨询电话:010-88379758。

本书简明扼要,但却涵盖了非电类专业对电工技术课程要求的全部内容。因此它既可以作为高职高专院校及应用型本科院校的教材,也可以作为从事相关专业的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电工技术/刘永波主编. —北京:机械工业出版社,
2006.8

全国高等专科学校教育自动化类专业规划教材
ISBN 7-111-19648-1

I. 电... II. 刘... III. 电工技术—高等学校—教材
IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 084488 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:于宁 高倩 责任编辑:高倩 版式设计:冉晓华
责任校对:申春香 封面设计:鞠杨 责任印制:李妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2006 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·10.75 印张·264 千字

0001—3000 册

定价:17.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

编辑热线电话(010)68354423

封面无防伪标均为盗版

前 言

高等职业教育在我国高等教育中承担着重要角色，担负着为我国工业、农业和国防的现代化建设培养应用型工程技术人才的重任。为了适应电气自动化技术在工、农业生产中的广泛应用，在高职高专院校中的工科专业普遍开设了《电工技术》这门课程，并作为专业必修课引入教学。

本书是根据教育部最新制定的《高职高专教育电工电子技术课程教学基本要求》，并结合高等职业院校建筑工程、冶金、测量等非电类专业的实际需求而编写的专业基础课教材。取材以工程实践中所需的电工技术基本知识、基本理论、实用技术为主。遵循“以应用为目的，以必需够用为度”的原则，力求做到理论上讲清，不追求过深的理论分析和数学推导；同时注意内容结构的合理性，力求做到理论和实践结合，重点培养实践能力。使学生在电路、电气控制技术及安全用电等方面获得必备知识和必要技能的培养，并为后续专业知识的学习和高级职业技能的培训打下良好的基础。

本书参考学时为 60~70 学时，其中标有“*”号的为选学内容，授课教师可根据专业要求自行删减。

本书共有 10 章，其中第 1、2 章由辽宁科技学院张国德编写，第 3~5 章由辽宁冶金技师学院孙玉芳编写，第 6~8 章由辽宁科技学院柳明丽编写，第 9、10 章由辽宁科技学院刘永波编写，全书由主编刘永波负责内容的组织和定稿。

本书由辽宁科技学院关大陆担任主审，他对书中的结构、内容及形式安排等方面提出了许多宝贵的建议。本书在编写过程中得到了辽宁科技学院众多师生的支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，殷切希望使用本教材的师生和读者给予批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 电路基础知识	1
1.1 电路及其主要物理量	1
1.2 电路元件	6
1.3 基尔霍夫定律	10
1.4 电阻的串联与并联	13
1.5 电路的状态和电气设备的额定值	16
习题	18
第 2 章 电路分析方法	21
2.1 支路电流法	21
2.2 实际电源的两种模型和等效变换	23
2.3 节点电压法	25
2.4 叠加原理	27
2.5 等效电源定理	29
2.6 非线性电阻电路的分析	32
习题	34
第 3 章 正弦交流电路	37
3.1 正弦交流电的基本概念	37
3.2 正弦交流电的相量表示法	41
3.3 单一参数电路元件的交流电路	44
3.4 正弦交流电路的分析	49
3.5 正弦交流电路的功率及功率因数的提高	54
3.6 电路的谐振	57
习题	59
第 4 章 三相交流电路	62
4.1 三相交流电源	62
4.2 三相负载的连接	64
4.3 三相电路的功率	68
习题	70

第5章 电路的暂态分析	72
5.1 动态电路和换路定律	72
5.2 一阶电路的零输入响应	74
5.3 一阶电路的零状态响应	77
5.4 一阶电路的全响应	79
5.5 一阶电路暂态分析的三要素法	80
5.6 微分电路和积分电路	81
习题	83
第6章 磁路和变压器	85
6.1 磁路的基本概念和基本定律	85
6.2 交流铁心线圈电路	89
6.3 变压器的结构和工作原理	91
6.4 常用变压器	96
习题	98
第7章 电动机	100
7.1 三相异步电动机	100
7.2 单相异步电动机	114
7.3 三相同步电动机	115
7.4 直流电动机	116
习题	119
第8章 继电-接触器控制	121
8.1 几种常用电器	121
8.2 三相异步电动机的基本控制电路	127
8.3 电气原理图的阅读	131
习题	133
第9章 工厂供电与安全用电	135
9.1 工厂供电	135
9.2 安全用电	137
习题	143
第10章 电工测量	144
10.1 指示仪表的分类和测量误差	144
10.2 常用指示仪表的基本结构和工作原理	146
10.3 电流、电压和功率的测量	147
10.4 万用表	151

10.5 兆欧表	154
习题	155
附录	156
附录 A 部分习题答案	156
附录 B 电工技术常用中英名词对照	161
参考文献	165

第 1 章 电路基础知识

本章主要讨论电路的基本概念和主要物理量、电路的基本定律、电路的基本连接方式、电流和电压的参考方向以及电路中电位的计算等，并介绍电路的工作状态和额定值，组成电路的各种电路元件及其伏安特性，这些内容是学习电工技术的基础。

1.1 电路及其主要物理量

1.1.1 电路的概念

电路是电流的通路，由电源、负载、中间环节三个部分按一定方式组成。

下面以图 1-1a 所示的简单照明电路为例来说明电路的基本组成，它由干电池、灯泡、连接导线和开关构成。开关闭合时，灯泡就会发光，这是由于在这个闭合电路中有电流流动的缘故。在电路中，电源是电路中电能的来源，是把非电能转化为电能的装置；负载是消耗电能的设备，其作用是将电能转换为其他形式的能量，为人们所利用；中间环节是连接电源和负载的部分，起传递、分配和控制电能的作用。一般常把负载和中间环节组成的电路称为外电路，而把电源内部的电路称为内电路。

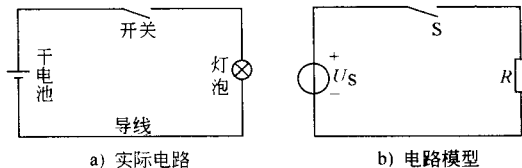


图 1-1 简单照明电路

实际电路都是由一些具体的电路元件或器件组成，比如发电机、变压器、电池、晶体管等。在电路分析中，为了简化分析和计算，通常在一定条件下，突出其主要的电磁性质，忽略其他次要的因素，用某些足以表征其主要特性的单一理想电路元件或其组合来代替。常用的理想电路元件只有几个，它们可以用来表征千万种实际元器件。用一个理想电路元件或几个理想电路元件的组合来代替实际电路中的具体元器件，称为实际电路的模型化。

由理想电路元件构成的电路称为电路模型。图 1-1b 就是上述简单照明电路的电路模型。在本教材中所分析的电路多是指电路模型。在电路图中，各种电路元件用规定的图形符号表示。

1.1.2 电路的主要物理量

1. 电流 带电粒子的有规则定向运动就形成了电流，其数值等于单位时间内通过导体横截面的电荷量。设在 dt 时间内通过导体横截面的电量的代数和为 dq ，则通过该截面的电流为

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

式(1-1)说明了电流是随时间而变化的，是时间的函数。如果电流不随时间而变，即

dq/dt 为常数, 则这种电流称为恒定电流, 简称直流。直流电流常用大写字母 I 表示, 所以式(1-1)可改写为

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

式中, q 为在时间 t 内通过导体横截面的电荷量。

在国际单位制中, 时间的单位为秒(s), 电荷量的单位为库仑(C), 电流的单位为安培(A), 简称安。当 1s 内通过导体横截面的电量为 1C 时, 则电流为 1A。计量微小的电流时, 还可以毫安(mA)、微安(μA)为单位。它们之间的换算关系是

$$1\text{mA} = 10^{-3}\text{A} \quad 1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$$

习惯上规定正电荷运动的方向或负电荷运动的相反方向为电流的方向(实际方向)。电流的方向是客观存在的, 在简单电路中, 人们很容易判断出电流的实际方向。但在分析较为复杂的直流电路时, 往往难于事先判断某支路中电流的实际方向。另外, 在交流电路中, 电流是随时间变化的, 在图上也无法表示其方向。为此, 在分析电路时, 常任意选定某一方向作为电流的参考方向, 也称正方向, 在电路中一般用箭头表示。所选的电流的正方向并不一定与电流的实际方向一致, 当电流的参考方向与实际方向一致时, 则电流为正值($I > 0$); 反之, 当电流的实际方向与其参考方向相反时, 电流为负值($I < 0$)。这样, 在选定了参考方向之后, 电流值就有正负之分, 根据电流的正负, 就可以确定电流的实际方向, 如图 1-2 所示。

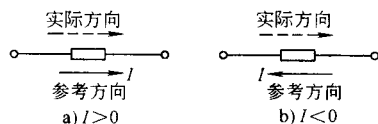


图 1-2 电流的参考方向与实际方向

本书电路图上所标出的电流方向都是指参考方向。

2. 电压、电动势和电位

(1) 电压。在图 1-3 中, A、B 为两个极板, A 极板带正电, B 极板带负电, 因而两极板间形成电场, 其方向由 A 指向 B。当用导线将负载和电源的正负极板连接成一个闭合电路时, 则在此电场作用下, 正电荷就要从正极 A 经导线和负载流向负极 B (其实是导体中的自由电子在电场作用下从 B 极流向 A 极), 从而形成电流。这时电场力对电荷做功, 这种电场力做功的大小就用电压来度量。

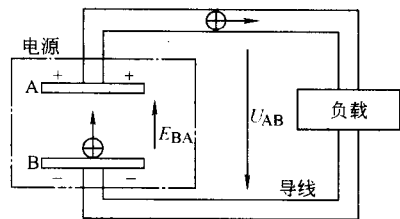


图 1-3 电压和电动势

设在某一电路中电场力把电荷 q 从 A 点经外电路移动到 B 点所做的功为 W_{AB} , 则电场中 A 点到 B 点的电压为

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} \quad (1-3)$$

电压的方向(实际方向)规定由高电位端指向低电位端, 即为电压降的方向。但在分析电路时, 也需选取电压的参考方向。当电压的参考方向与实际方向一致时, 电压为正值($U > 0$); 反之, 当电压的参考方向和它的实际方向相反时, 电压为负值($U < 0$), 如图 1-4 所示。

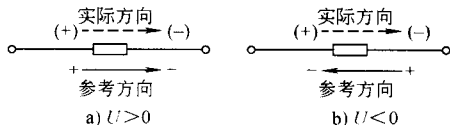


图 1-4 电压的参考方向与实际方向

电压的参考方向也是任意指定的。在电路中,

参考方向可用箭头来表示,也可用双下标表示,如 U_{AB} 表示 A 和 B 之间电压的参考方向是由 A 指向 B 的,也可用极性“+”、“-”表示,“+”表示高电位,“-”表示低电位。

在分析电路时,电压和电流参考方向的假定,原则上是任意的。但为了方便起见,元件上的电压和电流常取一致的参考方向,这称为关联参考方向。

在图 1-5a 中的 U 与 I 参考方向一致,则其电压与电流的关系是 $U = IR$;而在图 1-5b 中的 U 与 I 参考方向不一致,则电压与电流的关系是 $U = -IR$ 。可见,在列写电压与电流的关系式时,式中的正负号由它们的参考方向是否一致来决定。

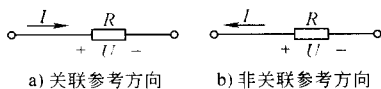


图 1-5 关联参考方向
与非关联参考方向

(2) 电动势。在图 1-3 中,正电荷在电场的作用下,从高电位移向低电位。这样,电极 A 因正电荷的减少而使电位逐渐降低,电极 B 因正电荷的增多而使电位逐渐升高,其结果是 A 和 B 两电极的电位差逐渐减小到零,同时导体中的电流也相应减小到零。为了维持电流不断地在连接导体中流动,必须使 A、B 两极板间保持一定的电压,这就要借助一种外力源源不断地把电源内部的正电荷从低电位处(负极 B)移到高电位处(正极 A)。在这个过程中外力要克服电场力做功,这种外力是非电场力。

为了衡量非电场力对电荷做功的能力,这里引出电动势这个物理量。电源的电动势 E_{BA} 在数值上等于非电场力将单位正电荷从电源低电位端 B(负极)经电源内部移到高电位端 A(正极)所做的功,用 E 表示。电动势的实际方向在电源内部是从低电位指向高电位。

(3) 电位。在进行电路特别是电子线路分析和计算时,经常要研究电路中各点电位的高低。例如在讨论晶体管的工作状态时,要分析各个极的电位值,求出各极间的电位差,从而确定晶体管的工作状态。

电位是度量电路中各点所具有的电位能大小的物理量,是一个相对的概念,它必须是相对于某个特定的参考点而言的。电位在数值上等于电场力将单位正电荷从该点移到参考点所做的功,用 V 表示。参考点的电位值一般设为零,因此也称为零电位点。

对照电位与电压的定义,不难理解电路中任意一点的电位,就是该点与参考点之间的电压,而电路中任意两点之间的电压,则等于这两点的电位之差,即

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (1-4)$$

式中, V_A 为 A 点的电位; V_B 为 B 点的电位。

参考点的选取方法从理论上讲,是把无穷远处作为零电位参考点。在工程上,是把大地作为零电位参考点。在电子技术上,以机壳或导线汇交点作为零电位参考点。实际上,零电位参考点可以任意选定,它只是作为一个电位比较标准,在电路图中用“ $\perp$ ”符号表示。

在国际单位制中,电压、电动势和电位的单位都是伏特(V)。当电场力把 1C 的电荷从一点移到另一点所做的功为 1J(焦耳)时,该两点间的电压为 1V。有时也用千伏(kV)、毫伏(mV)、为单位,它们之间的换算关系为

$$1\text{kV} = 10^3\text{V} \quad 1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}$$

下面以图 1-6 为例,来讨论电路中各点的电位。设 $E_1 = 30\text{V}$, $E_2 = 40\text{V}$, $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 20\Omega$, $R_3 = 10\Omega$, $I_1 = 1\text{A}$, $I_2 = 1\text{A}$, $I_3 = 2\text{A}$ 。

先把 D 点设为参考点,则各点的电位如下:

$$V_D = 0V$$

$$V_A = E_1 = 30V$$

$$V_B = I_3 R_3 = 2 \times 10V = 20V$$

$$V_C = E_2 = 40V$$

如果把图 1-6 中的 B 点作为参考点, 则可变为如图 1-7 所示电路, 各点的电位值如下:

$$V_B = 0V$$

$$V_A = I_1 R_1 = 1 \times 10V = 10V$$

$$V_C = I_2 R_2 = 1 \times 20V = 20V$$

$$V_D = -I_3 R_3 = -2 \times 10V = -20V$$

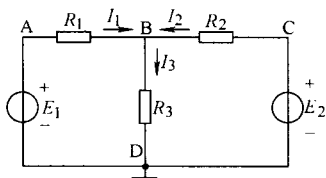


图 1-6 电路中各点的电位

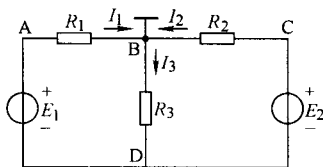


图 1-7 电路中各点的电位

无论是把 B 点作为参考点, 还是把 D 点作为参考点, 虽然各点的电位值变了, 但任意两点间的电压是不变的。如 C 到 B 点的电压总为 $U_{CB} = V_C - V_B = I_2 R_2 = 20V$ 。

从上面的结果可得出如下两点结论: ①电路中某一点的电位等于该点与参考点(电位为零)之间的电压; ②参考点选得不同, 电路中各点的电位值不同, 但是任意两点间的电压是不变的。所以各点电位的高低是相对的, 而两点间的电压是绝对的。

有时在画电路图时, 特别在画电子电路图时, 常省掉电源, 各端标以电位值。图 1-6 所示的电路可简化为如图 1-8 所示的电路。

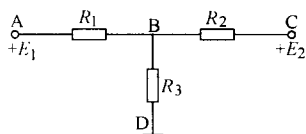


图 1-8 图 1-6 的简化电路

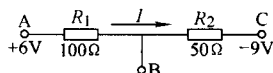


图 1-9 例 1-1 电路图

【例 1-1】 计算图 1-9 所示电路中 B 点的电位。

$$\text{解: } I = \frac{V_A - V_C}{R_1 + R_2} = \frac{6 - (-9)}{100 + 50} A = 0.1 A$$

$$V_B = V_A - U_{AB} = 6 - IR_1 = 6V - 0.1 \times 100V = -4V$$

3. 电能和功率 在图 1-3 所示的电路中, 设 A、B 两点的电压为 U , 通过的电流为 I , 电场力把正电荷 q 从 A 点经负载移到 B 点, 电场力对正电荷做了功。由电压、电流的定义, 电场力所做的功可表示为

$$W = Uq = UIt \quad (1-5)$$

式中, t 为电流通过负载的时间。

这是在时间 t 内负载所消耗或吸收的电能, 而单位时间内消耗的电能称为功率。

$$P = W/t = UI \quad (1-6)$$

电场力做功所消耗的电能是电源提供的。在时间 t 内, 非电场力将电荷 q 从电源负极经电源内部移到正极所做的功为

$$W_E = Eq = EIt \quad (1-7)$$

电源产生的功率为

$$P_E = EI \quad (1-8)$$

在一个电路中, 电源产生的功率与负载、导线以及电源内阻上消耗的功率总是平衡的, 遵循能量守恒定律。

在国际单位制中, 功率的单位为瓦特, 简称瓦(W), 另外有千瓦(kW)、毫瓦(mW)等, 其关系为

$$1\text{W} = 10^{-3}\text{kW} = 10^3\text{mW}$$

功和能的单位为 J(焦耳), 其与功率的关系为

$$1\text{J} = 1\text{W} \times 1\text{s} = 1\text{W} \cdot \text{s}$$

工程上常用“度”作为电能的单位, 存在以下关系:

$$1\text{度} = 1\text{kW} \cdot \text{h} = 1000\text{W} \times 3600\text{s} = 3.6 \times 10^6\text{J}$$

在电路分析中, 当电压、电流在参考方向下, 功和功率也是代数量。在电压、电流为关联参考方向时, $P > 0$, 说明元件是耗能的, 为负载; 若 $P < 0$, 说明元件产生电能, 为电源。在电压、电流为非关联参考方向时, 情况相反, 可修正为

$$P = -UI \quad (1-9)$$

【例 1-2】 在图 1-10 所示电路中, 电压、电流的参考方向已标出, 已知 $I_1 = -4\text{A}$, $I_2 = -6\text{A}$, $I_3 = 10\text{A}$, $U_1 = 60\text{V}$, $U_2 = -60\text{V}$, $U_3 = 60\text{V}$, 求各元件的功率, 并判断是输出功率还是消耗功率, 验证功率是否平衡。

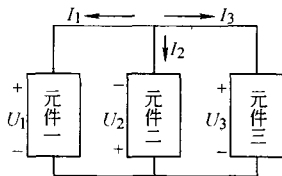


图 1-10 例 1-2 电路图

解: 元件一 $P_1 = U_1 I_1 = 60 \times (-4)\text{W} = -240\text{W}$

输出功率

元件二 $P_2 = -U_2 I_2 = -(-60) \times (-6)\text{W} = -360\text{W}$

输出功率

元件三 $P_3 = U_3 I_3 = 60 \times 10\text{W} = 600\text{W}$

消耗功率

$P_1 + P_2 + P_3 = (-240)\text{W} + (-360)\text{W} + 600\text{W} = 0$

功率平衡, 说明计算正确。

思考题

1-1-1 为什么要引入电压、电流的参考方向? 参考方向与实际方向有何区别和联系?

1-1-2 何谓关联参考方向?

1-1-3 何谓电位? 如何计算?

1-1-4 计算图 1-11a 中的电流 I 和图 1-11b 中的电压 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} 。

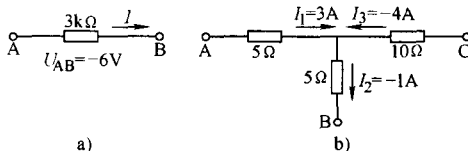


图 1-11 思考题 1-1-4 图

1-1-5 计算图 1-12 所示电路中, 在开关 S 打开和闭合时 A 点的电位 V_A 。

1-1-6 试判断图 1-13a、b 中的元件是输出功率还是消耗功率。

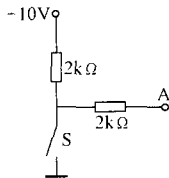


图 1-12 思考题 1-1-5 图

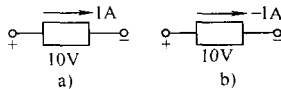


图 1-13 思考题 1-1-6 图

1.2 电路元件

电路中连接的电气装置或器件，形态各异，种类繁多，物理性质复杂，所以由实际电路元件组成的电路结构复杂，不便进行分析计算。为此，需要将实际电路元件理想化。基本的理想无源元件有电阻元件、电感元件和电容元件；理想有源元件有电压源和电流源。

1.2.1 无源元件

1. 电阻元件 理想电阻元件简称为电阻元件，是实际电阻器的理想化模型，它是一种将电能转换为热能的理想电路元件。一般反映实际电路中的耗能元件（如电炉、电灯等），若忽略其电感、电容作用时，可将其抽象为只具有消耗电能性质的电阻元件。电阻元件的图形符号如图 1-14a 所示，用字母 R 表示。

电阻元件上电压和电流之间的关系称为伏安特性。当电阻两端的电压与流过电阻的电流为关联参考方向时，根据欧姆定律，有式(1-10)成立，即伏安特性。

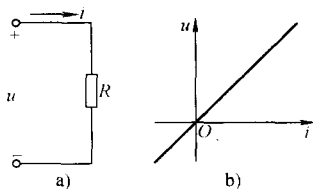


图 1-14 电阻元件及其伏安特性

$$u = Ri \quad (1-10)$$

在关联参考方向下，当 $R = u/i$ 是个常数时，称为线性电阻。它表示电阻元件的端电压和流过它的电流成正比。图 1-14b 所示为理想电阻元件的伏安特性曲线，是一条过原点的直线。

在国际单位制中，电阻的单位为欧姆(Ω)，简称欧，此外还有千欧($k\Omega$)、兆欧($M\Omega$)。当电阻两端的电压为 1V，流过电阻的电流为 1A 时，电阻为 1Ω 。

电阻元件消耗的功率为

$$p = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (1-11)$$

不论 u 、 i 是正值还是负值， p 总是大于零的，说明电阻元件总是消耗能量的。

电阻元件消耗的能量，在从 0 到 τ 时间内为

$$W = \int_0^\tau Ri^2 dt \quad (1-12)$$

电阻元件也可用电导参数来表征，它是电阻 R 的倒数，用“ G ”表示，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-13)$$

电导的单位为西门子(S)。

2. 电感元件 理想电感元件简称为电感元件,它是从实际电感线圈抽象出来的理想化模型。当忽略导线电阻及线圈匝与匝之间的电容时,可将其抽象为只具有储存磁场能性质的电感元件。电感元件的图形符号如图 1-15a 所示,用字母 L 表示。假定绕制电感的线圈有 N 匝,当线圈通以电流 i 后,在其内部及周围建立磁场,产生磁通 Φ_L 。磁通 Φ_L 与产生它的电流间遵循右手螺旋定则。磁通 Φ_L 与 N 匝线圈都交链,则磁通链 ψ_L 为

$$\psi_L = N\Phi_L \quad (1-14)$$

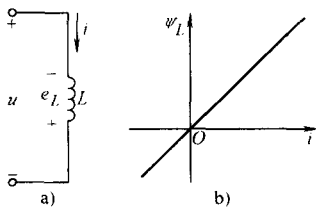


图 1-15 电感元件及其韦安特性

当磁通链 ψ_L 的参考方向与电流 i 的参考方向之间满足右手螺旋定则时,有式(1-15)成立。

$$\psi_L = Li \quad (1-15)$$

式(1-15)称为韦安特性, L 称为线圈的自感或电感。当 $L = \psi_L/i$ 是常数时,称其为线性电感,图 1-15b 是线性电感元件的韦安特性曲线。

当流过电感元件的电流 i 随时间变化时,在电感上要产生感应电动势 e_L ,元件两端就有电压 u 。当电压、电流、电动势的参考方向如图 1-14a 所示时,感应电动势的方向与磁通链的方向之间符合右手螺旋定则,根据电磁感应定律,有

$$e_L = -\frac{d\psi_L}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (1-16)$$

电感元件的伏安特性为

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} \quad (1-17)$$

从式(1-17)可以看出,任何时刻,线性电感元件的电压与该时刻电流的变化率成正比。当电流不随时间变化(直流电流),其电感电压为零,这时电感元件相当于短路。

在国际单位制中,磁通和磁通链的单位为韦伯(Wb),简称韦。电感 L 的单位为亨利(H),简称为亨。当电感线圈中的电流变化率为 1A/s ,产生 1V 的感应电动势时,则该电感线圈的电感为 1H 。另外还有毫亨(mH)、微亨(μH),其关系为

$$1\text{H} = 10^3\text{mH} = 10^6\mu\text{H}$$

当电感元件两端电压 u 和通过电感元件的电流 i 在关联参考方向下,电感元件的功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt} \quad (1-18)$$

若电流从 0 增加到 I 值,则电感元件消耗的电能为

$$W = \int_0^I Li di = \frac{1}{2}LI^2 \quad (1-19)$$

若电流从 I 值减小到 0,则电感元件消耗的电能为

$$W = \int_I^0 Li di = -\frac{1}{2}LI^2 \quad (1-20)$$

消耗的电能为负值,意味着输出能量。因此,当电流增加时,电感元件从电路中吸收电能,转换为磁场能量储存起来;当电流减小时,它释放磁场能量,转换为电能还给电路。所以理想的电感元件是一种储能元件,不消耗能量。

3. 电容元件 理想电容元件简称为电容元件或电容器,是从实际电容器抽象出来的理

想化模型。当忽略电容器的漏电阻和电感时,可将其抽象为只具有储存电场能性质的理想电路元件。电容元件的图形符号如图 1-16a 所示,用字母 C 表示。电容器通常由两块金属极板中间充满介质(如空气、云母、绝缘纸、陶瓷等)构成,电容器与电源接通后,两块极板上将出现等量正、负电荷,并在两极板间形成电场,储存电场能。电容器极板上储存的电量 q 与其两端电压 u 有以下关系:

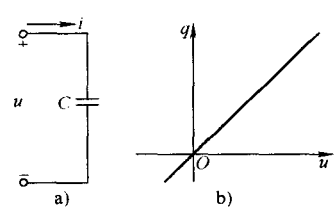


图 1-16 电容元件及其库伏特性

$$q = Cu \tag{1-21}$$

比例系数 C 称为该元件的电容,式(1-21)称为电容的库伏特性。当 $C = q/u$ 是常数时,电容为线性电容,线性电容的库伏特性如图 1-16b 所示。

在国际单位制中,电容元件的单位为法拉(F),简称为法,另外有微法(μF)和皮法(pF),其关系为

$$1\text{F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \text{pF}$$

当电容两端电压 u 与通过电容的电流 i 为关联方向时,如图 1-16a 所示,电容元件的伏安特性为

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \tag{1-22}$$

从式(1-22)可以看出,任何时刻,线性电容元件的电流与该时刻电容两端电压的变化率成正比。当电压不随时间变化(直流电压)时,则电流为零,这时电容元件相当于开路。

电容元件消耗的功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt} \tag{1-23}$$

若电压从 0 增加到 U 值,电容消耗的电能

$$W = \int_0^U C u du = \frac{1}{2} CU^2 \tag{1-24}$$

若电压从 U 值减小到 0,电容消耗的电能

$$W = \int_U^0 C u du = -\frac{1}{2} CU^2 \tag{1-25}$$

W 为负值,表明电容输出能量。可见,电容元件与电感元件一样,理想状态下只进行能量转换,不消耗电能,也是储能元件。

1.2.2 有源元件

1. 电压源 无论流过多大电流,都能提供恒定电压的电路元件称为理想电压源。它相当于一个只产生电压 U_s 而没有内部能量损耗的电源,其符号和伏安特性曲线如图 1-17a、b 所示。图中 U_s 为理想电压源的电压,流过电压源的电流 I 是任意的,是由与之相连接的外电路决定。直流电压源也可用图 1-17c 中的符号表示,长线表示正极(高电位),短线表示负极(低电位)。

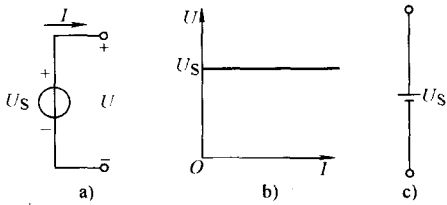


图 1-17 理想电压源及其伏安特性

理想电压源实际上是不存在的,但如果电压源

的内阻远小于负载电阻,则端电压基本恒定,就可忽略内阻的影响,认为是一个理想电压源。通常,稳压电源和新干电池都可以近似地认为是理想电压源。

当电流流过电压源时从低电位流向高电位,则电压源向外输出电能。当电流流过电压源时从高电位流向低电位,则电压源吸收电能,此时相当于负载。

2. 电流源 在电路中,无论它的端电压是多少,都能提供恒定电流的电路元件称为理想电流源。至于它的端电压,则由与之相连接的外电路决定。图 1-18a、b 是理想电流源的符号和伏安特性曲线, I_S 为理想电流源的电流。

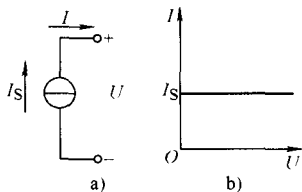


图 1-18 理想电流源及其伏安特性

同样,理想电流源实际上也是不存在的,但如果电流源的内阻远大于负载电阻,则电流基本恒定,也可认为是理想电流源。电流源既可以对外电路提供能量,也可以从外电路接受能量,视电压的极性而定。

***3. 受控电源元件** 受控电源元件简称为受控源,它向电路提供的电压和电流,是受其他支路的电压或电流控制的。当控制电压或电流为零时,受控源就不起电源作用了。

受控源有电压源,也有电流源,而控制量可以是电压,也可以是电流。因此,受控源有四种不同的类型。分别为电流控制电压源(CCVS)、电流控制电流源(CCCS)、电压控制电压源(VCVS)、电压控制电流源(VCCS),其符号如图 1-19 所示。

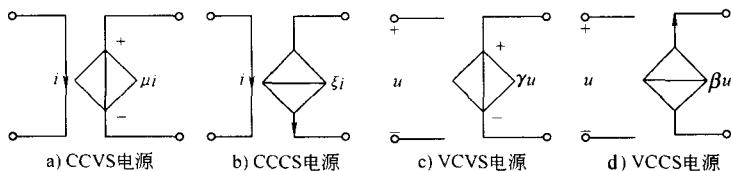


图 1-19 受控电源符号

图中 μ 、 ξ 、 γ 、 β 分别为四种控制系数,是受控源的受控量与控制量之比值。

思考题

1-2-1 以下说法中,哪些是正确的,哪些是错误的?

- (1) 电阻元件在电路中总是消耗电能的,与电流的参考方向无关。
- (2) 线性电阻的伏安特性与施加电压的极性无关,即它是双向性的。
- (3) 在稳定的直流电路中,电感元件相当于短路,电容元件相当于断路。
- (4) 电感元件两端的电压与电流的变化率成正比,而与电流的大小无关。
- (5) 电容元件的电荷 q 越大,电流 i 也越大。
- (6) 电容电流增大时,电容充电,电场能量增加;电流减小时电容放电,电场能量减小。
- (7) 当电容两端电压为零时,其电流必定为零。

1-2-2 写出图 1-20 三个分图电路中的电压、电流关系式,并求电阻 R 的值。

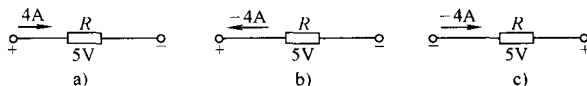


图 1-20 思考题 1-2-2 图

1-2-3 在图 1-21 所示的各理想电路元件的伏安关系中, 哪些是正确的, 哪些是错误的?

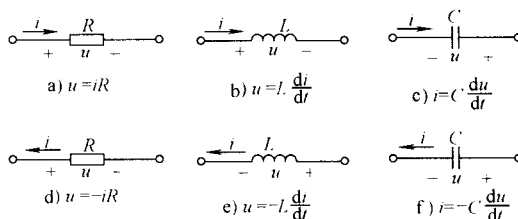


图 1-21 思考题 1-2-3 图

1-2-4 在图 1-22 所示各电路中的电压 U 和电流 I 各是多少? 根据计算结果能得出什么规律性的结论?

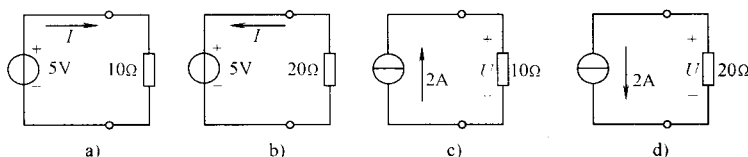


图 1-22 思考题 1-2-4 电路图

1.3 基尔霍夫定律

在电路的分析和计算中, 有两个基本定律: 欧姆定律和基尔霍夫定律。欧姆定律在物理学中已经学过, 本节讨论基尔霍夫定律。基尔霍夫定律包含有两条定律: 有关电路中电流之间关系的基尔霍夫电流定律; 有关电路中电压之间关系的基尔霍夫电压定律。

在讨论基尔霍夫定律之前, 先以图 1-23 所示电路介绍几个名词。

支路: 电路中的每一分支称为支路, 一个支路流过同一个电流。在图 1-23 中共有三条支路。

节点: 电路中三条或三条以上的支路相连接的点称为节点。在图 1-23 中共有两个节点: A 和 C。

回路: 由一条或多条支路所组成的闭合路径称为回路。图 1-23 中有三个回路, 分别为 ABCA、ACDA 和 ABCDA。

网孔: 未被其他支路分割的回路称为网孔。图 1-23 中有两个网孔, 分别为 ABCA、ACDA。

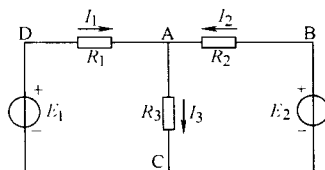


图 1-23 电路举例

1.3.1 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律 (KCL) 是用来说明连接在同一个节点上的各支路电流间关系的基本定律。由于电流的连续性, 在任一瞬时, 流入节点的电流之和必定等于流出该节点的电流之和, 即

$$\sum I_i = \sum I_o \quad (1-26)$$

例如, 对于图 1-23 所示电路中的节点 A 可以写出

$$I_1 + I_2 = I_3$$

若设流入节点的电流为正, 流出节点的电流为负, 则式 (1-26) 又可改写为