



高等学校教材

电工技术基础

(第三版)

北京化工大学 华东理工大学 合编

吕砚山 主编



化学工业出版社

TM1
95:3

高等学校教材

电工技术基础

(第三版)

北京化工大学、华东理工大学 合编

吕砚山 主编

化学工业出版社

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

电工技术基础/吕砚山主编. —3 版. —北京:化学工业出版社,1998

ISBN 7-5025-2031-7

I. 电… II. 吕… 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(98)第 05537 号

高等学校教材
电 工 技 术 基 础
(第三版)

北京化工大学、华东理工大学 合编

吕砚山 主编

责任编辑:张建茹、唐旭华

责任校对:凌亚男

封面设计:季玉芳

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京市密云云浩印制厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 25 字数 626 千字

1998 年 5 月第 3 版 1998 年 5 月北京第 1 次印刷

印 数:1—3000

ISBN 7-5025-2031-7/G · 593

定 价:27.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换

第三版序言

本书是在化工部教育司的领导下,为高等学校自动化和仪器仪表类专业本科教学编写的统编教材。初版于1980年由科技文献出版社出版,先后有10余所高校选用。1988年在化工部举办的1976~1985年度高等学校优秀教材评选中获化工部优秀教材奖。

1987年为了加强管理,更好地适应教学需要,由化工部教育司安排,本书改由化工出版社出版,并于同年11月出版了其修订版即第二版。第二版保持了第一版的特色,删去了一些与先修课程衔接过多的内容,适当提高了起点,并增加了状态变量分析法、电工测量和计算机辅助分析等内容。两版教材累计印数达10万余册。

经过近10年新的教学实践,在吸收了使用本书的许多院校所提供的宝贵意见的基础上,这次进行了第三版的修订。其宗旨是适应信息时代的发展和我国社会主义市场经济对人才培养的要求,根据已实行的新工作制重新安排学时,精选内容,进一步做到“少而精”,以便能更好地适应跨世纪的教学需要。为此,根据化工部下达的教材编审任务书,于1996年5月在北京化工大学举行了由主编单位(北京化工大学)、协编单位(华东理工大学)、主审单位(北京理工大学)和出版发行单位(化学工业出版社)共同参加的“《电工技术基础》教材(第三版)修订研讨会”。会议由化工部委托化工出版社主持,经充分讨论确定了修订大纲。全体编审人员经过一年多的努力,按照修订大纲,完成了这次修订。

修订后的本书第三版主要有下列特点。

首先,内容体系符合专业教学计划的要求。按照自动化和仪器仪表类专业的教学计划,一般把“电工技术基础”和“电子技术基础”并列为两大主干课程,作为后续电类课程的基础。与课程的性质和作用相适应,本教材内容包含理论基础和应用技术两大部分,即第一篇——电路与磁路基础;第二篇——电测、电机与控制。按照修订大纲,对这两篇都保持了前两版教材的特色,仍采取以传统的基本内容为主,加强基础理论,适当反映现代科学技术,并结合专业特点的基本体系。

其次,篇幅份量力求适应已实行的五天工作制要求。把课程的总学时由原来的160左右缩减到120左右。因此,精选了各章节内容,并将相关章节适当合并,如把“正弦交流电路”与“三相电路”合为“正弦交流电路”一章,把“电动机概述”与“微电机”合为“动力与控制用电机”一章,把“常用电器和电动机的自动控制”与“自动信号连锁保护电路”合为“电器控制与信号连锁保护”一章等,从而减少了篇幅。此外,删去了特勒根定理、计算机辅助直流电阻网络分析、恒定磁通有分支磁路的计算、小功率电源变压器的设计计算以及无触点自动信号连锁保护电路等非基本要求的内容。

再次,图形文字符号全部采用了新国标即国家标准局颁布的自1990年1月1日起使用的“电气制图及图形符号国家标准”,有助于使本书内容更好地与工程实际接轨。

考虑到时代发展和因材施教的需要,这次修订仍列出了一些冠以*号的加深加宽内容,可供选授。此外,根据本课程的理论性和实践性都比较强的特点,本版教材中仍安排了丰富的例题、习题和思考题,并给出了习题答案,以便于读者自学和理论联系实际,同时配合完成相应的实验,将知识真正学到手。

参加这次修订工作的编者有北京化工大学吕砚山(第2、3、8、9、10章)、张进明(第7章)、洪纯一(第11、12章);华东理工大学林家骏(第1、4章)、高言(第5、6章)。全书由主编吕砚山整理。并由北京理工大学沈世锐教授主审。主审对本书内容进行了仔细的审阅,并提出许多宝贵意见,编者谨向他致以衷心的感谢。

最后,我们要向参加本书前两版编写工作的潘宝铭(第二版第4、8、9章)、高敦嶽(第二版第1、5、6章)、梁天白(第二版第7章及附录1)、余宗廉(第二版第11、12章及附录4、5)四位同志表示深深的谢意。虽然他们都已正式表示,由于退休或工作变动,今后不再参加本书的编写工作,但他们所作出的重要贡献是不会被忘记的。

本书虽经编者尽心修订,但由于学识所限,疏漏或错误之处难免,敬希读者批评指正。

吕砚山

1997年8月于北京

主 要 符 号

A	关联矩阵, 状态向量系数矩阵	P_c	复数功率
A	传输参数, 功	p	瞬时功率, 功率损耗, 磁极对数
B	基本回路矩阵, 输入向量关联矩阵	Q	无功功率, 品质因数
$\bar{B}$	磁感应强度	q	电荷
B	磁感应强度的大小, 电纳	R	电阻
B_m	磁感应强度的最大值	R_m	磁阻
B_c	容纳	r	转移电阻, 电流比
B_L	感纳	S	视在功率, 面积
b	支路数	s	转差率
C	基本割集矩阵	T	周期, 转矩
C	电容	t	时间
d	宽度	U	恒定电压, 交变电压的有效值
E	恒定电动势, 交变电动势的有效值	$\dot{U}$	正弦交变电压的复数符号
$\dot{E}$	正弦交变电动势的复数符号	U_m	交变电压的最大值, 磁压
E_m	交变电动势的最大值	U_l	线电压
e	交变电动势的瞬时值	U_p	相电压
F	磁势	$U(s)$	电压的象函数(拉氏变换)
f	频率	$U(t)$	单位阶跃函数
G	电导	u	交变电压的瞬时值
g	转移电导	v	速度
$\bar{H}$	磁场强度	W	能量
H	磁场强度的大小, 混合参数	X	状态向量
I	恒定电流, 交变电流的有效值	$\dot{X}$	状态向量对时间的一阶导数
$\dot{I}$	正弦交变电流的复数符号	X	电抗
I_m	取其函数虚部的	X_c	容抗
I_m	交变电流的最大值	X_L	感抗
I_l	线电流	Y_e	割集导纳矩阵
I_p	相电流	Y_e	支路导纳矩阵, 输出向量
$I(s)$	电流的象函数(拉氏变换)	Y	复数导纳, 导纳参数
i	交变电流的瞬时值	y	导纳
K	放大倍数	Z_e	支路阻抗矩阵
k	变比	Z_L	回路阻抗矩阵
L	自感系数, 自感	$Z(s)$	阻抗的象函数(拉氏变换)
l	长度	Z	复数阻抗, 阻抗参数
M	互感系数, 互感	z	阻抗
N	匝数		
n	转速, 节点数	α	角度, 相位角
P	功率, 平均功率, 有功功率	β	相对误差, 转移电流比, 电流放大系数

Δ 绝对误差,行列式的值
 ΔU 电压调整率
 $\delta(t)$ 单位冲激函数
 η 效率
 θ 磁滞角,失调角
 θ_b 步距角
 μ 磁导率,电压比
 μ_r 相对磁导率

μ_0 真空磁导率
 ρ 电阻率,特性阻抗
 τ 时间常数
 Φ 磁通
 Φ_m 磁通的最大值
 ϕ 阻抗角,相位差角
 ψ 磁通链,初相角
 ω 角频率,角速度

内 容 提 要

本书是在化工部人教司领导下,为高等学校自动化和仪器仪表类专业编写的统编教材《电工技术基础》的第三版。其第一版曾于1988年在化工部举办的1976~1985年度高等学校优秀教材评选中获化工部优秀教材奖。

本版教材着眼于适应信息时代发展和市场经济对人才培养的要求,在保持前两版特色基础上,进一步精选内容,加强基础理论,适当反映现代科技并结合专业特点。全书图形文字符号均采用新国标。

本书内容共分两大部分。第一篇为电路与磁路基础。包括直流电路、正弦交流电路、非正弦周期电流电路、电路的过渡过程、二端口网络、网络拓扑与网络方程、非线性电阻电路、磁路和铁芯线圈电路。第二篇为电测、电机与控制。包括电气测量、变压器、动力与控制用电机、电器控制与信号联锁保护,共计十二章。每章均附有小结、习题和答案,并列有参考文献及中英名词对照索引。

本书还可供从事实际工作的有关工程技术人员参考。

目 录

第一篇 电路与磁路基础

第一章 直流电路	1
第一节 电路及其模型的基本概念.....	1
第二节 电流、电压参考方向	2
第三节 电路基本定律.....	3
第四节 电路的工作状态、额定值	8
第五节 负载获得最大功率的条件.....	9
第六节 电阻的串联、并联和混联.....	10
第七节 电压源、电流源及电源的等效互换.....	13
第八节 电桥电路	15
第九节 网络分析概述	17
第十节 支路电流法	17
第十一节 网孔电流法	19
第十二节 节点电位法	20
第十三节 叠加原理	22
第十四节 替代定理	25
第十五节 戴维南定理与诺顿定理	27
第十六节 受控源及含受控源电路分析	30
小结	34
习题	36
习题答案	44
参考文献	45
第二章 正弦交流电路	46
第一节 正弦交流电的基本概念	46
第二节 正弦交流电的表示与计算方法	50
第三节 单一参数的正弦交流电路	55
第四节 电路基本定律的复数表达形式	63
第五节 电阻、电容、电感的串联和并联电路	65
第六节 复数阻抗与复数导纳的等效变换	69
第七节 正弦交流电路的功率和功率因数	70
第八节 正弦交流电路的分析方法	73

* 第九节 对偶电路	80
第十节 谐振电路	82
第十一节 互感电路	90
第十二节 三相电路	95
小结	102
习题	105
习题答案	113
参考文献	116
第三章 非正弦周期电流电路	117
第一节 概述	117
第二节 周期函数分解为傅里叶级数	117
第三节 平均值、有效值和平均功率	122
第四节 非正弦周期电流电路的分析	125
小结	128
习题	129
习题答案	130
参考文献	131
第四章 电路的过渡过程	132
第一节 过渡过程与换路定律	132
第二节 一阶电路的过渡过程	134
第三节 一阶电路过渡过程解的一般形式	141
第四节 R 、 L 、 C 串联电路的过渡过程	143
第五节 拉普拉斯变换及其基本性质	151
第六节 拉普拉斯反变换	155
第七节 运算电路法	158
* 第八节 单位阶跃函数与阶跃响应	163
* 第九节 单位冲激函数与冲激响应	165
* 第十节 对任意形式激励的响应	168
* 第十一节 状态变量法	169
小结	172
习题	173
习题答案	180
参考文献	182
第五章 二端口网络	183
第一节 概述	183
第二节 二端口网络的基本方程及参数	184
第三节 二端口网络的开路、短路入端阻抗	191
第四节 二端口网络的特性阻抗	194
第五节 二端口网络的等效电路	195
第六节 二端口网络的联接	197

* 第七节 回转器	200
小结	201
习题	201
习题答案	203
参考文献	203
第六章 网络拓扑与网络方程	204
第一节 网络的图	204
第二节 图的数学描述	206
第三节 KCL 与 KVL 的矩阵形式	208
第四节 通用支路方程	211
第五节 网络方程	214
小结	225
习题	226
习题答案	227
参考文献	229
第七章 非线性电阻电路	230
第一节 非线性电阻的伏安特性	230
第二节 非线性电阻电路的图解法	232
第三节 非线性电阻电路的解析法	235
小结	239
习题	240
习题答案	241
参考文献	241
第八章 磁路和铁芯线圈电路	242
第一节 概述	242
第二节 基本物理量	242
第三节 磁性材料及其磁化特性	244
第四节 磁路的基本定律	246
第五节 磁路计算	248
第六节 交流铁芯线圈电路	250
小结	255
习题与思考题	256
习题答案	257
参考文献	257

第二篇 电测、电机与控制

第九章 电气测量	258
第一节 概述	258
第二节 直读式指示仪表的工作原理	259
第三节 电流、电压和功率的测量	263

第四节	万用表	265
第五节	比较式测量仪表	268
第六节	数字式仪表	271
第七节	非电量电气测量	272
小结		276
习题与思考题		277
习题答案		278
参考文献		278
第十章	变压器	279
第一节	变压器的用途、分类和结构	279
第二节	变压器的工作原理	281
第三节	变压器的相量图与等效电路	285
第四节	变压器的额定值和工作特性	289
第五节	几种常用的特殊变压器	291
* 第六节	小型控制用变压器的抗干扰措施	294
小结		296
习题与思考题		296
习题答案		298
参考文献		299
第十一章	动力与控制用电机	300
第一节	概述	300
第二节	三相异步电动机	300
第三节	三相同步电动机简介	313
第四节	直流电动机简介	314
第五节	单相异步电动机	319
第六节	微型同步电动机	324
第七节	交流伺服电动机	331
第八节	直流伺服电动机	339
第九节	步进电动机	340
第十节	测速发电机	345
* 第十一节	自整角机	348
小结		351
习题与思考题		352
习题答案		353
参考文献		353
第十二章	电器控制与信号联锁保护	354
第一节	概述	354
第二节	继电器	354
第三节	接触器	360
第四节	其他常用电器	361

第五节 电动机的自动控制.....	368
第六节 自动信号联锁保护.....	373
小结.....	378
习题与思考题.....	379
参考文献.....	382
名词索引	383

第一篇 电路与磁路基础

第一章 直流电路

本章主要介绍电路模型及其理想元件、电路的基本定律和定理以及电路分析的基本方法。同时,引进了关于电路变量的参考方向、电源的等效变换以及等效电路等重要概念。这里虽以直流电路为研究对象,但所涉及的原理与方法可推广应用于以后的章节,本章是全书的理论基础。

第一节 电路及其模型的基本概念

电路,又称网络,由电源、各类电工电子设备、导线与开关组成。电路的作用大致有以下两方面:一是进行信号传输与变换;二是对电能量进行传输与分配,并实现与其他能量形式的相互转换。前者多见于自动控制与计算机系统;后者则常见于电力系统。

电路理论旨在研究电路中发生的电磁现象与过程及其基本规律与计算方法,其研究对象为由各类反映电工电子设备电气特性的理想元件或理想元件组合所组成的模型化电路。理想元件是具有某种确定的电磁特性的假想元件,具有精确的数学定义。模型化电路是实际电路的一种数学抽象。

随着工业技术的飞速发展,大量新器件新设备不断出现,为每一类电工设备建立专用的模型是不可能,也是不适当的。为此,定义一类理想元件,由它们及它们的组合来使所研究的电工设备模型化,并在一定精度与适用范围内对此电路模型进行分析和处理。例如电阻元件是表征消耗电能的理想元件,当电流通过它时,将发生电能转换成热能的不可逆过程。同样,电感元件是表征储存磁场能量的理想电路元件;电容元件是表征储存电场能量的理想电路元件。理想元件可具有两个端子或多个端子,其端子上的物理量满足确定的约束关系。常用的理想电阻元件,其电气特性可由代数方程描述。若该电阻元件是线性的,即它的电阻值与通过它的电流与所施加的电压无关,即 $R = \frac{U}{I}$ 是一个常量^①。其中符号 U 表示跨越电阻两端的电压,其单位为伏特(V); I 表示通过电阻的电流,单位为安培(A); R 为电阻值,单位为欧姆(Ω)。图 1-1 绘出了线性电阻伏安特性曲线。从图上可见,线性电阻的阻值可由直线的斜率来确定。而非线性电阻元件则不同,它的电阻值与通过它的电流或所施电压的大小有关,电压与电流的比值不再是常量。图 1-2 中绘出了非线性电阻的伏安特性曲线。它反映了半导体二极管的伏安特性。可以看出,在曲线不同点 A 、 B 上电压与电流比值是不同的,即无恒定电阻值。

由线性电阻与电源组成的电路称之为线性电阻电路。含有非线性电阻的电路,称之为非线性

^① 此式即欧姆定律。

性电阻电路。非线性电阻电路将在第七章讨论。

还应指出,所谓集中参数元件,是指元件的尺寸与通过该元件的信号波长相比,可忽略不计的元件。本书中所涉及的理想元件皆为集中参数元件。

另外,电路理论中研究由理想元件构成的电路时,所采用的术语“电阻、电容、电感”以及它们的符号“ R 、 C 、 L ”,既可表示元件本身,又可表示元件参数。

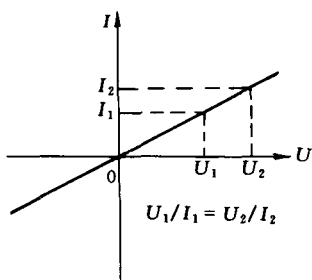


图 1-1 线性电阻伏安特性

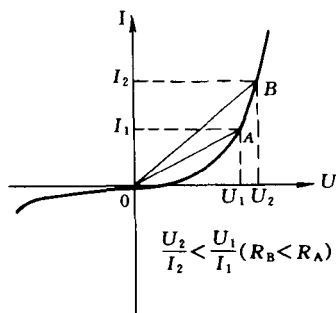


图 1-2 非线性电阻伏安特性

若电阻、电容、电感等元件的约束关系不随时间变化,则称为非时变或定常元件;否则为时变元件。本书主要讨论非时变元件。

第二节 电流、电压参考方向

在电路分析中,实际的电流方向与电压极性是很难预先判断的,为分析的方便,有必要引入电流的“参考方向”与电压的“参考方向”(又称“参考极性”)。实际的电流、电压方向与参考方向一致时,数值为正;实际方向与参考方向相反时,其数值为负。如图 1-3、1-4 所示。在未规定参考方向的情况下,电流、电压的正负是没有意义的。

参考方向可以任意设定。电流参考方向,用箭头($\rightarrow$)表示其流向,电压参考方向(极性)用正负号(+、-)或箭头($\rightarrow$)表示其从高电位指向低电位。参考方向还可下标法表示,如 U_{ab} 、 I_{ab} 分别表示电压、电流的参考方向是由 a 指向 b 或由 a 流向 b 的。

实际的方向一般不必标出,如需要,可用虚线箭头($\cdots \rightarrow$)表示,如图 1-5 所示。

参考方向的选定,也规定了电路元件的电流电压关系式和功率表达式的正负号。图 1-3、1-4 中的元件若为电阻元件,则其欧姆定律的表达式分别为 $U=RI$ 与 $U=-RI$;其功率表达式分别为 $P=UI$ 与 $P=-UI$ 。为分析方便,一般将元件的电流电压参考方向取为一致(称为关联参考方向),如图 1-3 所示。

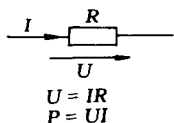


图 1-3 电压、电流参考方向一致

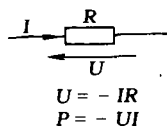


图 1-4 电压、电流参考方向相反

若元件的电流电压参考方向一致,则该元件功率关系式为 $P=UI$ 。在此方向下,元件耗散或释放的功率由 P 的符号决定:

$P > 0$ 元件耗散功率(负载);

$P < 0$ 元件释放功率(电源);

$P=0$ 元件既不吸收也不释放功率(无耗元件)。

例题 1-1 图 1-5 所示电路中,方框代表电源或电阻,若各电压、电流的参考方向如图 1-5 中实线箭头所示,并已知 $I_1 = -1\text{A}$, $I_2 = 2\text{A}$, $I_3 = 3\text{A}$, $U_1 = 4\text{V}$, $U_2 = -2\text{V}$, $U_3 = 6\text{V}$, $U_4 = -5\text{V}$, $U_5 = 2\text{V}$, $U_6 = 7\text{V}$ 。

- (1) 试画出各电压和各电流的实际方向;
- (2) 试计算各个方框所代表电路元件所耗散或释放的功率;
- (3) 试判断哪几个方框可以代表电源,哪几个方框可能为电阻元件。

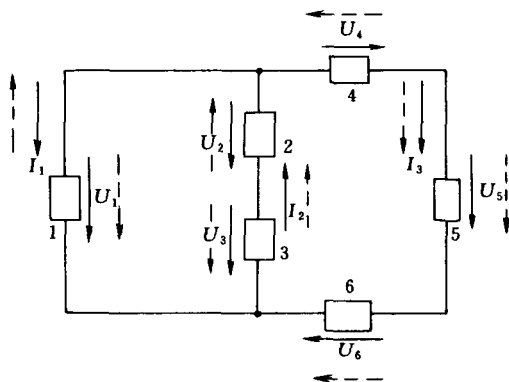


图 1-5 例题 1-1 电路

解 (1) 电压、电流的实际方向如图 1-5 中虚线箭头所示。

(2) $P_1 = U_1 I_1 = 4 \times (-1) = -4\text{ W}$, 释放功率

$P_2 = U_2 I_2 = -(-2) \times 2 = 4\text{ W}$, 耗散功率

$P_3 = -U_3 I_2 = -6 \times 2 = -12\text{ W}$, 释放功率

$P_4 = U_4 I_3 = (-5) \times 3 = -15\text{ W}$, 释放功率

$P_5 = U_5 I_3 = 2 \times 3 = 6\text{ W}$, 耗散功率

$P_6 = U_6 I_3 = 7 \times 3 = 21\text{ W}$, 耗散功率

这个电路耗散的总功率 $= P_2 + P_5 + P_6 = 31\text{ W}$

释放的总功率 $= P_1 + P_3 + P_4 = -31\text{ W}$

由此可见,耗散的总功率与释放的总功率数值相等,达到了功率平衡。

(3) 释放功率的电路元件为电源,所以,1、3、4 三个方框可以代表电源。耗散功率的电路元件可以等效为电阻元件,所以,2、5、6 三个方框可以用电阻元件来表征。

第三节 电路基本定律

欧姆定律、克希荷夫定律和焦耳定律是电路的三个基本定律。这三个基本定律揭示了电路中各物理量之间的关系,是分析电路的依据。鉴于读者对欧姆定律已有了解,本节主要说明克希荷夫定律和焦耳定律。

一、克希荷夫定律

由集中参数元件组成的电路称之为集中参数电路,克希荷夫定律反映了集中参数电路中节点上的电流之间的关系及回路中的电压之间的关系,是电路理论中最基本也是最重要的定律。克希荷夫定律由包含第一定律和第二定律的两个子定律组成。

为说明这两个子定律,先介绍以下名词。

支路: 一个二端子元件或若干二端子元件的串联组合。如图 1-6 中 (abc、ac、adc) 皆为支路。

节点: 三个或三个以上支路的连接点,图 1-6 中 a、c 都是节点。

回路: 电路中的任一闭合路径。如图 1-6 中 abca、acda、abcda 都是回路。

图 1-6 中 ab、ad 段的元件为一种恒定电源,其电动势用 E 表示。电动势的方向是从电源负极指向电源正极。其单位在国际单位制中为伏特(V)。

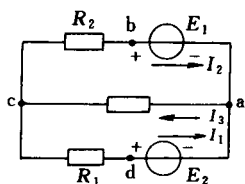


图 1-6 支路、节点、回路示例

1. 克希荷夫电流定律

克希荷夫电流定律,又称为克希荷夫第一定律,简记为 KCL。该定律有两种等价的表述。

定律表述一:

在集中参数电路中,任一时刻,流入任一节点的电流的总和等于流出该节点电流的总和。可表示为:

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

式中 I_i ——流入的电流;

I_o ——流出的电流。

定律表述二:

在集中参数电路中,任一时刻,流入任一节点电流的代数和为零。可表示为:

$$\sum I_i = 0 \quad (1-2)$$

式中 I_i ——任一流入此节点的电流。

对于图 1-6 中电路的节点 a,运用 KCL 的第一种表述,可有

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1-3)$$

应用 KCL 的第二种表述,则有

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0 \quad (1-4)$$

易知,上两式是等价的。在使用 KCL 第二种表述时,是以节点为参考点。一般规定,凡是电流朝向节点取负号,凡是电流背向节点取正号,如式 1-4 所示。

KCL 还可运用于任一假设的封闭面。如图 1-7 所示,对于虚线所示封闭面所包围的电路,也可列出其对外连接的三条支路电流的 KCL 方程:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

KCL 反映了电流连续性这一基本特性。

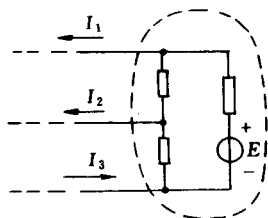


图 1-7 对封闭面的 KCL

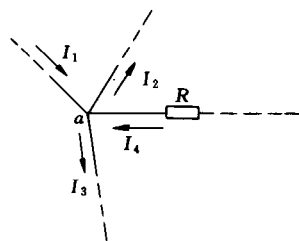


图 1-8 例题 1-2 电路

例题 1-2 图 1-8 表示一个复杂电路中的一个节点 a,电流的参考方向如图中所设,已知 $I_1=5\text{A}$, $I_2=2\text{A}$, $I_3=-3\text{A}$,试求电流 I_4 。

解 根据 KCL 可得

$$-I_1 + I_2 + I_3 - I_4 = 0$$

即

$$-5 + 2 + (-3) - I_4 = 0$$

解之得

$$I_4 = -6\text{A}$$

I_4 为负值,说明 I_4 的实际方向与参考方向相反。