



全国高等农林院校“十一五”规划教材

电 路

张长利 沈明霞 主编

 中国农业出版社

全国高等农林院校“十一五”规划教材

电 路

张长利 沈明霞 主编

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电路 / 张长利, 沈明霞主编. —北京: 中国农业出版社,
2008. 2

全国高等农林院校“十一五”规划教材

ISBN 978-7-109-12029-7

I. 电… II. ①张…②沈… III. 电路-高等学校-教材
IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 012118 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100026)

责任编辑 郭元建 李兴旺

北京通州皇家印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2008 年 3 月第 1 版 2008 年 3 月北京第 1 次印刷

开本: 820mm×1080mm 1/16 印张: 21

字数: 495 千字

定价: 34.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

编写人员名单

主 编 张长利 (东北农业大学)

沈明霞 (南京农业大学)

副主编 董桂菊 (东北农业大学)

吴仕宏 (沈阳农业大学)

吴 扬 (安徽农业大学)

参 编 (以姓氏笔画为序)

王树文 (东北农业大学)

任力生 (河北农业大学)

刘振宇 (山西农业大学)

前 言

“电路理论”是高等学校电专业的必修技术基础课，是电气工程学科和信息技术学科学生必备的知识基础。

本教材主要介绍了电类相关专业中有关电路分析方面的基本概念、基本原理和基本分析方法。通过本课程的学习，学生可以掌握电路的基本定律定理、分析、计算电路的基本技能。

本教材编写中，总结并吸收了多所学校多年来的教学和教改经验，注重理论的系统性和实用性的结合；课堂教学和自学的结合；力求概念清楚，条理清晰，语言简练易懂；以培养学生分析和解决实际问题的能力为出发点。

全书共分14章，内容包括电路的基本概念和基本定律、电阻电路的等效变换、电阻电路的系统化分析、电路定理、动态电路的时域分析、动态电路的复频域分析、正弦交流电路、谐振与互感、三相电路、非正弦周期电流电路、网络函数和频率特性、二端口网络、电路方程的矩阵形式及非线性电路。每章后附有习题，以帮助学生复习巩固和加深对课程内容的理解。建议学时为90~108学时。书中有*号的章节属于选学内容，可根据不同专业的需要学习。

东北农业大学、南京农业大学、沈阳农业大学、安徽农业大学、河北农业大学、山西农业大学等多所农业院校的教师参加了本书的编写。参加编写人员有张长利（第三章和第十二章），沈明霞（第一章和第五章），董桂菊（第二章和第十三章），吴仕宏（第四章和第七章），吴扬（第九章和第十四章），任力生（第六章和第十章），刘振宇（第八章和第十一章），王树文（附录）。

本教材编写过程中参阅了其他同类教材和相关的文献资料，在此对这些教材和文献的作者深表谢意。

由于编者水平有限，书中不妥和疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2007年11月

目 录

前言

第一章 电路的基本概念和基本定律	1
第一节 电路	1
第二节 理想元件和电路模型	2
一、实际元件中的电磁现象	2
二、理想元件	3
三、电路模型	4
第三节 电路中的基本物理量	4
一、电流、电压及其参考方向	4
二、电位	7
三、电能与电功率	8
第四节 电路元件及其约束	10
一、电阻元件和欧姆定律	10
二、电感元件	12
三、电容元件	14
四、电压源元件和电流源元件	16
五、受控源	19
第五节 基尔霍夫定律	20
一、几个术语	20
二、基尔霍夫电流定律(KCL)	20
三、基尔霍夫电压定律(KVL)	21
习题	23
第二章 电阻电路的等效变换	27
第一节 电路的等效变换	27
第二节 等效电阻	27
第三节 电阻的串、并联及 Y- Δ 等效变换	28
一、电阻的串、并联等效变换	28
二、电阻的 Y- Δ 等效变换	31
第四节 电源的连接及等效变换	35

一、电压源的串联等效变换	35
二、电流源的并联等效变换	35
三、实际电源的等效变换	36
习题	40
第三章 电阻电路的系统化分析	43
第一节 电路的拓扑结构	43
一、电路的图	43
二、树、割集	44
三、基本回路与基本割集	47
第二节 支路电流法	48
第三节 网孔电流法	50
一、网孔电流方程及其一般形式	50
二、含理想电流源电路的网孔电流方程	52
三、含受控源电路的网孔电流方程	53
第四节 回路电流法	53
第五节 结点电压法	54
一、结点电压方程及其一般形式	55
二、含理想电压源电路的结点电压法	57
三、含受控源电路的结点电压方程	58
习题	60
第四章 电路定理	65
第一节 叠加定理	65
第二节 置换定理	69
第三节 戴维宁定理和诺顿定理	71
一、戴维宁定理	73
二、诺顿定理	77
第四节 对偶原理	82
第五节 特勒根定理	83
第六节 互易定理	86
习题	88
第五章 动态电路的时域分析	93
第一节 电路的动态过程和动态响应	93
第二节 换路定律及初始条件的确定	94
一、电路的初始条件及初始状态	94

二、换路定律	94
三、初始条件的确定	95
第三节 一阶电路的零输入响应	97
一、RC 电路的零输入响应	97
二、RL 电路的零输入响应	100
第四节 一阶电路的零状态响应	102
一、直流激励下 RC 电路的零状态响应	102
二、直流激励下 RL 电路的零状态响应	104
三、正弦激励下一阶电路的零状态响应	106
第五节 一阶电路的全响应	108
第六节 三要素法	112
第七节 阶跃函数与阶跃响应	115
一、阶跃函数的定义和符号	115
二、阶跃函数的用途	116
三、阶跃响应	118
第八节 冲激函数与冲激响应	119
一、单位冲激函数	119
二、冲激响应	120
第九节 二阶电路的零输入响应	122
一、过阻尼过程	123
二、欠阻尼过程	124
三、临界阻尼过程	126
习题	127
第六章 动态电路的复频域分析	133
第一节 拉普拉斯变换的定义	133
一、拉普拉斯变换的定义	133
二、拉普拉斯变换存在条件	133
三、典型函数的拉氏变换	134
第二节 拉普拉斯变换的基本性质	135
一、线性性质	135
二、导数性质	135
三、积分性质	136
四、平移性质	136
第三节 拉普拉斯反变换	139
第四节 动态电路的复频域模型	142
一、运算形式的电路定律	142

二、电路元件的运算形式	142
第五节 应用复频域法分析动态电路	145
习题	149
第七章 正弦交流电路	151
第一节 正弦交流电	151
一、最大值与有效值	152
二、频率与周期	153
三、初相位	153
四、相位差	154
第二节 正弦量的相量表示法	155
一、复数的表示方法及其运算	155
二、旋转因子	157
三、正弦量的相量表示法	157
第三节 R、L、C 中的交流电	159
一、电阻中的正弦电流	159
二、电感中的正弦电流	161
三、电容中的正弦电流	163
第四节 复阻抗、复导纳及其等效变换	166
一、基尔霍夫定律的相量形式	166
二、RLC 串联电路及复阻抗	166
三、RLC 并联电路及复导纳	170
四、复阻抗的串并联电路	172
五、复阻抗与复导纳的等效变换	176
第五节 正弦交流电路中的功率	177
一、有功功率	177
二、无功功率	178
三、视在功率	178
四、复功率	180
第六节 正弦稳态电路的计算	182
第七节 功率因数的提高	188
一、功率因数的实质	188
二、提高功率因数的意义	189
三、提高功率因数的方法	189
习题	191
第八章 谐振与互感	197
第一节 谐振电路	197

一、串联谐振	197
二、并联谐振	200
第二节 互感	203
第三节 含互感电路的分析	206
第四节 空心变压器	211
第五节 理想变压器	213
习题	217
第九章 三相电路	220
第一节 三相电源	220
第二节 三相负载	222
第三节 对称三相电路的分析	222
一、负载作 Y 形连接	222
二、负载作 Δ 形连接	224
第四节 不对称三相电路的概念	224
第五节 三相电路的功率	225
一、三相电路功率的计算	225
二、三相电路功率的测量	226
习题	229
第十章 非正弦周期电流电路	232
第一节 非正弦周期信号的谐波分析	232
第二节 有效值、平均值和平均功率	233
一、非正弦周期信号的有效值	233
二、非正弦周期信号的平均值	234
三、非正弦周期信号的平均功率	235
第三节 非正弦周期电流电路的分析	235
* 第四节 对称三相电路中的高次谐波	237
一、接成星形连接形式时	238
二、接成三角形连接形式时	238
习题	239
第十一章 网络函数和频率特性	240
第一节 网络函数的极点和零点	240
一、网络函数的定义及类型	240
二、网络函数的极点和零点	241
第二节 极点、零点与频率特性	244

第三节 卷积	247
习题	248
第十二章 二端口网络	250
第一节 二端口网络	250
第二节 二端口的方程和参数	251
一、 Z 参数方程及 Z 参数	251
二、 Y 参数方程及 Y 参数	253
三、 H 参数方程及 H 参数	255
四、 T 参数方程及 T 参数	256
第三节 二端口的等效电路	258
第四节 二端口的联接	259
一、二端口的级联	260
二、二端口的串联	260
三、二端口的并联	261
第五节 二端口的转移函数	261
一、无端接的二端口的转移函数	262
二、有端接的二端口的转移函数	262
第六节 回转器和负阻抗变换器	264
一、回转器	264
二、负阻抗变换器	265
习题	266
第十三章 电路方程的矩阵形式	270
第一节 关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵	270
一、关联矩阵	270
二、回路矩阵	272
三、割集矩阵	274
第二节 矩阵 A 、 B_f 、 Q_f 之间的关系	276
第三节 结点电压方程的矩阵形式	277
一、不含互感和受控源时的支路方程	278
二、含互感、不含受控源时的支路方程	278
三、含受控源时的支路方程	279
第四节 回路电流方程的矩阵形式	283
第五节 割集电压方程的矩阵形式	284
第六节 状态方程	286
一、状态方程的标准形式	286

二、状态方程的直观列写法	287
三、状态方程的系统列写法	288
习题	290
第十四章 非线性电路	294
第一节 非线性元件	294
一、非线性电阻	294
二、非线性电容和非线性电感	296
第二节 非线性电路的分析	296
第三节 小信号分析法	297
第四节 分段线性化方法	299
习题	301
附录 电路仿真	303
部分习题参考答案	310
主要参考文献	318

第一章 电路的基本概念和基本定律

【内容提要】本章介绍电路的基本概念和基本定律。基本概念主要包括理想元件和电路模型的概念、电流和电压及它们的参考方向的概念、功率和能量的概念。基本定律为欧姆定律和基尔霍夫定律。

第一节 电 路

在生产、生活、科研和国防等各领域，到处都可以看到电路。实际电路是由实际元件连接而成的电流通路。实际元件指电路中所使用的电阻器、电容器、线圈、晶体管、变压器、电动机、发电机、电线、开关和灯泡等物理实体。实际元件又称为器件。最常见最简单的电路是图 1-1 所示的手电筒电路。它由电池、小灯泡、按钮和导线四种实际元件组成。电力系统也是常见电路。它由发电机、变压器、传输线、开关、电动机等组成。

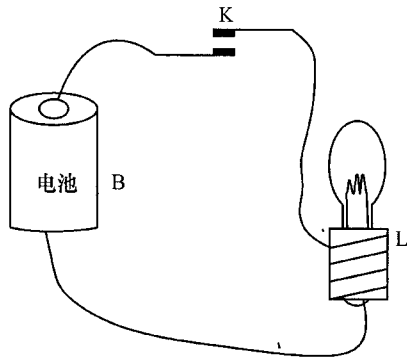


图 1-1 手电筒电路

实际电路按尺寸大小分为集中参数电路和分布参数电路两种。如果电路的最大线尺寸以 l 表示，电路中频率最高的电流波、电压波波长以 λ 表示，则 $l \ll \lambda$ 的实际电路为集中参数电路。电流最高频率不高、线尺寸也不很大的实际电路都是集中参数电路。例如厅堂用的扩音机电路的线尺寸不过几十米，其中信号最高频率为 25 kHz，相应的电压波、电流波波长为

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{25 \times 10^3} = 12\,000 \text{ (m)}$$

它满足 $l \ll \lambda$ ，所以，扩音机电路是集中参数电路。集中参数电路尺寸相对电压波、电流波波长很小，所以可把集中参数电路及其中的元件都看成集中在空间一点的，因而其中电压和电流都只是时间的函数，而与空间坐标无关，记为 $i(t)$ 、 $u(t)$ 。实践和理论都证明，集中参数电路每个分支中的电流和任意两点间的电压，在任何时刻都有确定的惟一的值。不满足 $l \ll \lambda$ 的电路为分布参数电路。长距离电力系统、尺寸较大的高频电路都是分布参数电路。这种电路中的电流和电压既是时间的函数又是空间坐标的函数，记为 $i(x, y, z, t)$ 、 $u(x, y, z, t)$ 。本教材只讨论集中参数电路。

实际元件的性能可用描述元件端钮上电压与电流间关系的方程来表示。例如电阻器性能可用其上电压 u 与其中电流 i 间的关系 $u = Ri$ 表示。这种描述元件性能的方程称为元件性能方程。元

件性能方程是代数方程或微分方程。这些方程中的系数称为元件参数。元件参数不随电压和电流改变的电路为线性电路，否则为非线性电路。

元件参数随时间改变的电路为时变电路，否则为非时变电路或定常电路。本教材只讨论定常电路。

从数学角度看：集中参数电路的电路方程是代数方程或常微分方程，分布参数电路的电路方程是偏微分方程；线性电路的电路方程是线性的，非线性电路的电路方程是非线性的；时变电路中方程的系数是随时间而变的，定常电路中方程的系数是不随时间改变的。

实际电路按功用不同分为三类：①用于能量的转换、传输和分配的电路，如图 1-1 所示的手电筒电路。其中干电池是电能的供应者，称为电源。电源内进行着非电能转化为电能的过程。其中的灯泡是电能的消耗者，称为负载。负载内进行着电能转化为非电能的过程。电源和负载都是换能器。按钮是控制电路的通断的；导线是引导电流用的。按钮和导线起着传输和分配电能的作用。所以，手电筒电路是起能量转换、传输和分配作用的电路。电力系统也是起能量转换、传输和分配作用的电路。发电机是电力系统的电源；电动机、电灯等是电力系统的负载；变压器、电线、开关等起传输和分配电能的作用。②用于对信号进行加工变换和传递的电路，如会场、音乐厅、电影院中的扩音机电路。扩音机电路能把声音变换为电流，加以放大，再变换为声音。③用于存储数据和信号的电路，这种电路被称为存储电路。计算机中广泛采用的电子存储器就是由存储电路组成的。存储电路中包含触发器和门电路等。

电路还可按其他原则分类。例如按电源种类可分为直流电路、单相交流电路、三相交流电路、非正弦周期电流电路等。

电路的功用不同，其组成也不同。用于能量的转换、传输和分配的电路是由电源、负载和传输分配三部分组成的。用于信号加工变换和传递的电路以及用于存储数据和信号的电路是由具有各种不同功能的电气器件和设备组成的，如放大器、混频器、检波器、限幅器、触发器和门电路等，这些电路的功能和组成元件与用于能量转换、传输和分配的电路不同，但是从能量观点看，它们也包含电源、负载和传输分配三部分。

电路的主要物理量为电流、电压、电荷和磁通。

分析电路的依据是基尔霍夫定律和各种元件的性能方程。这些定律和方程将在有关章节中逐一介绍。

第二节 理想元件和电路模型

一、实际元件中的电磁现象

电路的实际元件种类繁多、不计其数。例如发电机、变压器、输电线、电容器、电阻器、电灯、电炉等。但是，实际元件中的电磁现象只有以下五种：

(1) 供给电能的现象。发电机、干电池、蓄电池作为电源工作时，就是供给电能的现象。

(2) 消耗电能的现象。电灯、电动机中把电能转化为热能、光能和机械能的现象，就是消耗电能的现象。

(3) 储存电能的现象。各种实际元件的电场中,如电容器两极板间电场中和输电线内外的电场中,都存在储存电能的现象。

(4) 储存磁能的现象。各种实际元件的磁场中,如日光灯镇流器和变压器的磁场中都存在储存磁能的现象。

(5) 传输电能的现象。如变压器原副边之间就有传输电能的现象。

每一个实际元件中,都可能同时存在上述五种电磁现象中的两种、三种、四种或五种。例如线圈通电流时,其内外有磁场,所以线圈中有储存磁能的现象;其内外又有电场,所以线圈中一定还有储存电能的现象;线圈对电流有阻力,通电流时还会发热,所以其中还有消耗电能的现象。就是说,线圈中同时存在三种电磁现象。又例如发电机中同时存在前四种电磁现象。

每一个实际元件中,都同时存在几种电磁现象,而且它们可能不分主次。所以,要精确地分析由实际元件构成的电路是困难的、甚至是不可能的。为此,提出了理想元件的概念。

二、理想元件

理想元件是具有单一电磁性质的假想元件。所谓单一电磁性质,就是一个理想元件中只存在上述多种电磁现象中的一种,换言之,理想元件只消耗电能、只储存电能、只储存磁能、只供给电能或只传输电能,而不会同时存在两种或两种以上电磁现象。实际元件中不会只存在一种电磁现象,所以理想元件是不存在的,它只是一种假想元件而已。理想元件又称为集中参数元件,或者简称元件。

理想元件的引出端有两个、三个或更多。有两个引出端的理想元件称为两端元件。类似地,具有三个引出端的称为三端元件,具有更多引出端的称为多端元件。常见的两端元件有电阻元件、电容元件、电感元件、电压源元件和电流源元件。

电阻元件是只消耗电能现象的元件。其符号如图 1-2(a) 所示。它用于反映实际元件中消耗电能的现象。例如电灯、电炉、线圈通电时,消耗电能而发热的现象都可用电阻元件模拟。电阻元件简称电阻。

电感元件是只储存磁能现象的元件。其符号如图 1-2(b) 图所示。它用于反映实际元件中储存磁能的现象。线圈和电动机通电时,既有消耗电能的现象又有储存磁能的现象,其中储存磁能的现象就可用电感元件来表示。电感元件简称电感。

电容元件是只储存电能现象的元件。其符号如图 1-2(c) 所示。它用于反映实际元件中储存电能的现象。例如电容器的两极板间加上电压后,两电极分别充以等量异号电荷,两极间的介质中建立了电场,电场中储存电能的现象就可以用电容元件表示。电容元件简称电容。

以上三种理想元件中都不存在产生电能的现象,因而称它们为无源元件。

电压源元件和电流源元件是只产生电能现象的元件。它们的符号分别如图 1-3(a)、(b) 所示。直流电压源元件也可采用图 1-3(c) 所示的符号。 u_s 、 i_s 是它们提供的电压和电流。它们用于反映实际元件中产生电能的现象。

以上五种元件的性能将在后面进一步介绍。

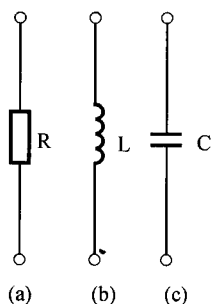


图 1-2 电阻、电感、电容的表示符号

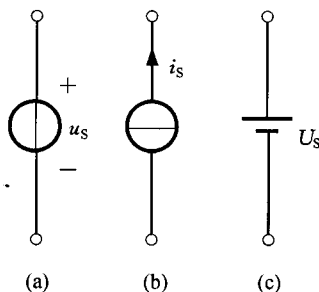


图 1-3 电压源、电流源、直流电压源的表示符号

三、电路模型

理想元件是不存在的，或者说只是近似存在的。但是有了理想元件之后，集中参数电路中的实际元件就可以用有限个理想元件来模拟。例如线圈可以用电阻元件、电感元件和电容元件的组合来近似地模拟，如图 1-4 所示。这种由理想元件及其组合近似模拟实际元件的模型称为实际元件的电路模型。例如图 1-1 所示的手电筒电路的电路模型如图 1-5 所示，其中 U_s 和 R_i 的串联是电源的模型， R_i 为导线的模型， R_L 是灯泡的模型。电路模型只包含种类和数量都有限、特性单一的理想元件，它使电路的分析和计算都大大简化。电路模型简称电路，也称为电网络或网络。

注意：今后本书后面章节所提到的“元件”都指理想元件，而不是实际元件；所提到的“电路”一般都指电路模型，而不是实际电路。还应注意，由于工作条件和计算精度要求的不同，同一实际元件可能有不同的模型。例如，图 1-4 是线圈在高频下的模型；在低频情况下，其中电容可忽略；在直流情况下，电感也可去掉。

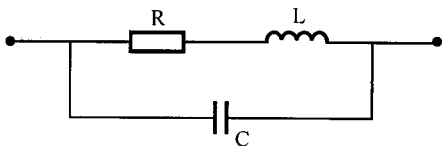


图 1-4 线圈模型

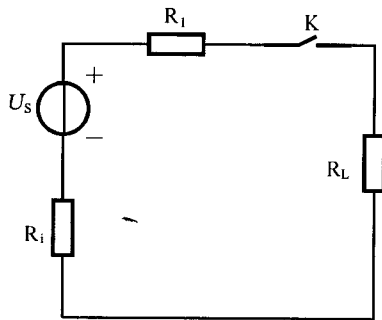


图 1-5 手电筒电路模型

第三节 电路中的基本物理量

一、电流、电压及其参考方向

1. 电流

电荷的定向运动形成电流；变动的电场也形成电流。电流是电路中主要物理量之一。

电流的大小称为电流强度。即

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

按电流的大小、方向是否随时间变化, 电流分为恒定电流和变动电流两种。恒定电流是大小和方向都不变的电流, 又称为直流。直流常用大写字母 I 表示。变动电流以小写字母 i 表示。变动电流有很多种。有的只是大小变化, 有的方向也变化。最简单最常见的变动电流是正弦电流。

SI 制中, 电流的主单位为安培, 简称安, 符号为 A; 电流的辅助单位为毫安、微安和千安, 它们的符号分别为 mA、 μ A 和 kA。它们间的关系为

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

电流的实际方向规定为正电荷运动的方向, 即电子运动的反方向。直流的实际方向恒定不变; 变动电流的实际方向可能是变化的。物理学中是采用电流的实际方向计算电路的。

电路理论中采用“电流参考方向”的概念。电流参考方向是假定的电流方向。在计算电路之前, 可事先假定电路各分支中电流的方向, 例如图 1-6 所示电路中 R_5 中电流的方向可假定为 i_5 的方向或 i'_5 的方向, i_5 或 i'_5 的方向就是 R_5 中电流的参考方向。每个分支中的电流参考方向可在两个方向上任意指定一个。

电路计算中采用电流参考方向, 而不采用实际方向的原因有两个: ①复杂电路的有些元件中, 电流的实际方向预先往往难于断定。例如上述 R_5 中电流的实际方向通过计算才能确定, 因此, 在计算电路时, 只能先假定一个电流方向。②交流电路中, 电流实际方向不断变化, 不便采用电流实际方向, 只能指定电流的参考方向, 然后用数学式表示任何瞬间电流的大小和方向。

电流参考方向除用图 1-6 所示实线箭头表示外, 还可用双下标表示。例如上述 i_5 可用 i_{ab} 表示, i'_5 可用 i_{ba} 表示。下标 ab 表示电流参考方向由 a 到 b, 下标 ba 表示电流参考方向由 b 到 a。

电流参考方向不同, 计算结果差正负号。例如图 1-7 中的电流实际方向如虚线箭头 I 所示, $I = \frac{1.5}{1+0.5} = 1(\text{A})$ 。如果电流参考方向的指定与实际方向一致, 如 I_{ab} 所示, $I_{ab} = \frac{1.5}{1+0.5} = 1(\text{A})$, I_{ab} 为正值; 如果指定电流参考方向与电流实际方向相反, 如 I_{ba} 所示, 则由欧姆定律得

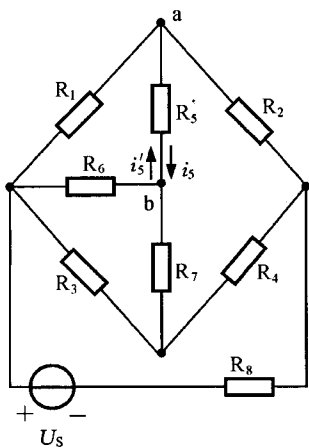


图 1-6 实线箭头

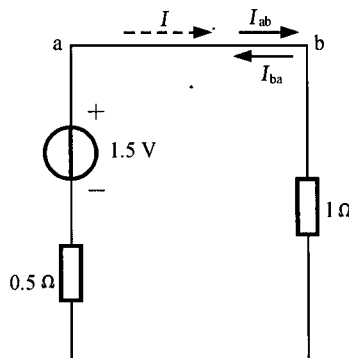


图 1-7 虚线箭头