



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
高等职业教育应用电子技术专业系列教材

Dianlu Fenxi Jichu

电路分析基础

主 编 周 华



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press

教育部职业教育与成人教育司推荐教材
高等职业教育应用电子技术专业系列教材

电路分析基础

主 编 周 华
副主编 左朝君

武汉理工大学出版社
Wuhan University of Technology Press

内容提要

本书共 9 章,分别为电路的基本概念和定律、电路的等效变换、电路的分析方法、正弦交流电路、三相电路、谐振电路及互感、非正弦周期交流电路、线性动态电路的分析、二端口网络,附录为电路实验部分及部分习题参考答案。

本书可供高等职业学校、高等专科学校、成人高等学校以及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高等学校电气类、电工类、通信类、自动控制类、计算机各专业使用,也可供其他专业、参加自学考试的同学和有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路分析基础/周华主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2006.8

教育部职业教育与成人教育司推荐教材

高等职业教育应用电子技术专业系列教材

ISBN 7-5629-2390-6

I. 电… II. 周… III. 电路分析 IV. TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 059026 号

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市洪山区珞狮路 122 号 邮政编码 430070)

HTTP://www.techbook.com.cn

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:安陆市鼎鑫印务有限责任公司

开 本:787×960 1/16

印 张:17.5

字 数:345 千字

版 次:2006 年 8 月第 1 版

印 次:2006 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~3000 册

定 价:25.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。本社购书热线电话:(027)87397097 87394412

凡使用本教材的教师,可拨打(027)87385610 或通过邮件免费索取电子教案光盘。

E-mail:duanchao@mail.whut.edu.cn

前 言

本教材是积极响应国务院《关于大力推进职业教育与发展的决定》而编写的。高等职业教育是以社会需求为导向来设置专业,围绕地方或行业经济科技发展的需求开展专业教学改革,培养目标突出了职业技术教育的特征。

高等职业教育专业教学改革的核心是课程体系和教学内容的改革,也是专业教学改革的难点和重点。教材改革在这方面下了很多工夫,我们在认真总结、吸取自身多年教学经验和国内外职业教育课程改革经验的基础上,在教学内容、教学模式、教材体系结构及教学方法、手段等方面具有较大创新,并能较好地体现现代职业教育教学观念。

在教材内容的编写上坚持“以应用为目的,以必需、够用为度”和“少而精”的原则。在编写过程中采用理论与实际相结合的方法,充分体现能力本位的思想,注重在学习理论知识的基础上重点培养学生的实践能力,既要教会学生运用理论去观察和分析问题,又要培养学生解决问题的能力。

本书内容的选用和编排有以下几大特点:

1. 本书全面而系统地介绍了电路的基本概念、基本理论和基本分析方法。阐述准确简明、重点突出,脉络清晰。删去复杂的理论分析,注重分析问题、解决问题的能力的培养。

2. 本书注重理论联系工程实际。内容讲解、例题选用尽量贴近实际应用、附有电路分析实验,以培养技能型、应用型人才为目标,强化学生工程技术的应用能力。

3. 本书体现时代特征,删去老化的知识点,突出高职教育的特点和培养目
标,尽量多介绍电子技术领域的有关新知识和技术,使学生能学到新颖的、实用的知识,有利于培养学生的创新精神。

4. 本书内容通俗易懂、层次清晰,文字深入浅出,版面新颖、活泼,对学生有吸引力。

5. 本书配有电子教案,有利于教师教学和学生自学。

本书主要是介绍电路的基本概念、基本定律及工程应用的一门技术基础课。全书共分为9章。第1章:电路的基本概念和定律;第2章:电路的等效变换;第3章:电路的分析方法;第4章:正弦交流电路;第5章:三相电路;第6章:谐振电路及互感;第7章:非正弦周期交流电路;第8章:线性动态的电路分析;第9章:二端口网络;附录:电路分析实验及部分习题参考答案。本书可供电气类、电

工类、通信类等各专业人员及非电专业人员使用。

本书由贵州电子信息职业技术学院周华担任主编,负责全书统稿和审稿,山东省第二技术学院左朝君担任副主编。参加本书编写工作的还有贵州电子信息职业技术学院范泽良、吴正昌等。在此感谢几位老师在编书过程中给予的大力支持!

由于编者水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2006 年 5 月

目 录

1 电路的基本概念和定律	(1)
1.1 电路和电路模型	(1)
1.1.1 电路	(1)
1.1.2 电路模型	(2)
1.2 电路的基本物理量	(4)
1.2.1 电流及电流的参考方向	(4)
1.2.2 电压及电压的参考方向	(5)
1.2.3 电流与电压的关联参考方向和非关联参考方向	(5)
1.3 电位、电功率与电能	(7)
1.3.1 电位	(7)
1.3.2 电功率	(8)
1.3.3 电能	(9)
1.4 电阻元件	(10)
1.4.1 电阻	(10)
1.4.2 电导	(11)
1.4.3 电阻元件的功率及能量	(11)
1.5 电感元件和电容元件	(13)
1.5.1 电感元件和电容元件的定义	(13)
1.5.2 电感元件和电容元件的连接方式	(14)
1.5.3 电感元件和电容元件的电流与电压关系	(17)
1.5.4 电感元件和电容元件的功率和储能	(18)
1.6 电压源和电流源	(19)
1.6.1 理想电压源	(19)
1.6.2 实际电压源	(20)
1.6.3 理想电流源	(21)
1.6.4 实际电流源	(21)
1.7 电路的工作状态	(23)
1.7.1 电路的有载状态	(23)
1.7.2 电路的开路状态	(24)
1.7.3 电路的短路状态	(24)

1.8 基尔霍夫定律	(26)
1.8.1 名词解释	(26)
1.8.2 基尔霍夫电流定律	(27)
1.8.3 基尔霍夫电压定律	(28)
习题一	(32)
2 电路的等效变换	(35)
2.1 电阻的连接及等效电阻	(35)
2.1.1 等效网络	(35)
2.1.2 电阻的串联	(36)
2.1.3 电阻的并联	(37)
2.1.4 电阻的混联	(38)
2.2 电阻的星形与三角形连接及等效变换	(41)
2.2.1 电阻的星形连接	(41)
2.2.2 电阻的三角形连接	(41)
2.2.3 电阻的Y形与 Δ 形等效变换	(41)
2.3 电源的连接与等效变换	(45)
2.3.1 电压源的串联和并联	(45)
2.3.2 电流源的串联和并联	(46)
2.3.3 两种实际电源模型的等效变换	(48)
2.4 受控源电路的分析	(51)
2.4.1 受控源	(51)
2.4.2 含受控源电路的分析	(52)
习题二	(55)
3 电路的分析方法	(58)
3.1 支路电流法	(58)
3.1.1 支路电流法	(58)
3.1.2 支路电流法的一般步骤	(60)
3.2 网孔电流法	(61)
3.2.1 网孔电流法	(61)
3.2.2 含理想电流源电路的网孔分析	(63)
3.2.3 含受控源电路的网孔分析	(64)
3.3 节点电位法	(65)
3.3.1 节点电位法	(65)
3.3.2 节点法对只含电压源支路与含受控源支路的处理	(67)
3.3.3 弥尔曼定理	(68)

3.4 叠加定理.....	(69)
3.4.1 含理想电流源电路的网孔分析.....	(69)
3.4.2 齐次定理.....	(73)
3.5 替代定理.....	(74)
3.6 戴维南定理和诺顿定理.....	(76)
3.6.1 二端网络.....	(76)
3.6.2 戴维南定理.....	(77)
3.6.3 诺顿定理.....	(81)
3.7 最大功率传输定理.....	(83)
习题三	(86)
4 正弦交流电路.....	(90)
4.1 正弦交流电(正弦量)的基本概念.....	(90)
4.1.1 正弦量的周期、频率、瞬时值和最大值.....	(91)
4.1.2 正弦量的三要素.....	(92)
4.1.3 正弦量的有效值.....	(95)
4.2 正弦量的相量表示.....	(97)
4.2.1 复数.....	(97)
4.2.2 正弦量的相量表示.....	(97)
4.2.3 正弦量的计算.....	(99)
4.3 电路定律的相量形式	(100)
4.3.1 KCL、KVL 的相量表示	(100)
4.3.2 电阻、电感、电容元件伏安关系的相量形式	(100)
4.4 复阻抗和复导纳	(105)
4.4.1 RLC 串联电路与复阻抗	(105)
4.4.2 RLC 并联电路与复导纳	(109)
4.5 用相量法分析正弦交流电路	(112)
4.5.1 网孔电流法	(113)
4.5.2 节点电位法	(113)
4.6 正弦交流电路的功率	(114)
4.6.1 瞬时功率	(114)
4.6.2 有功功率、无功功率.....	(116)
4.6.3 电路的视在功率及功率因素	(118)
4.6.4 功率因素的提高	(120)
习题四.....	(123)

5 三相电路	(126)
5.1 三相电源	(126)
5.2 三相电源的连接方法	(128)
5.2.1 三相电源的三角形连接	(128)
5.2.2 三相电源的星形连接	(128)
5.2.3 三相电压	(129)
5.3 三相负载的连接方法	(130)
5.3.1 三相负载的星形连接	(131)
5.3.2 星形连接的三相电路	(131)
5.3.3 三相负载的三角形连接	(134)
5.3.4 三角形连接的三相电路	(134)
5.4 三相电路的功率	(137)
5.4.1 三相电路功率的计算	(137)
5.4.2 对称三相电路中瞬时功率	(138)
习题五	(140)
6 谐振电路及互感	(142)
6.1 串联谐振电路	(142)
6.1.1 谐振现象	(142)
6.1.2 串联谐振电路的谐振条件	(142)
6.1.3 串联谐振电路的基本特征	(144)
6.2 并联谐振电路	(146)
6.2.1 并联谐振电路的谐振条件	(146)
6.2.2 并联谐振电路的基本特征	(147)
6.3 互感电路	(150)
6.3.1 互感	(150)
6.3.2 互感线圈的同名端及电压、电流关系	(151)
6.3.3 正弦交流电路中互感的电压、电流关系的相量形式	(155)
6.3.4 互感的等效受控源电路	(156)
6.3.5 含互感电路的计算	(157)
6.4 理想变压器及其电路的计算	(165)
习题六	(170)
7 非正弦周期交流电路	(174)
7.1 概述	(174)
7.2 非正弦周期信号的谐波分析	(175)
7.3 有效值、平均值和平均功率	(180)

7.3.1	有效值	(180)
7.3.2	平均值	(182)
7.3.3	平均功率	(183)
7.4	非正弦周期电流电路的计算	(184)
习题七		(188)
8	线性动态电路的分析	(191)
8.1	换路定律	(191)
8.1.1	电路的过渡过程	(191)
8.1.2	换路定律	(193)
8.2	电路初始值与稳态值的计算	(194)
8.2.1	电路初始值的计算	(194)
8.2.2	电路稳态值的计算	(197)
8.3	动态电路的方程及三要素公式	(198)
8.3.1	方程的建立	(198)
8.3.2	一阶微分方程的求解	(199)
8.4	零输入响应和零状态响应	(204)
8.4.1	零输入响应	(205)
8.4.2	零状态响应	(206)
8.4.3	零输入响应和零状态响应与全响应的关系	(208)
8.5	稳态响应和暂态响应	(210)
8.6	求解一阶动态电路的方法	(215)
习题八		(222)
9	二端口网络	(226)
9.1	二端口网络	(226)
9.2	二端口网络的基本方程和参数	(228)
9.2.1	阻抗参数方程及 Z 参数	(228)
9.2.2	导纳参数方程及 Y 参数	(230)
9.2.3	混合参数方程及 H 参数	(232)
9.2.4	传输参数方程及 T 参数	(234)
9.2.5	各种参数间的相互换算	(235)
9.2.6	实验参数	(236)
9.3	二端口网络的等效电路	(237)
9.3.1	T 形等效电路	(238)
9.3.2	II 形等效电路	(238)
9.4	二端口网络的阻抗和传输函数	(241)

9.4.1 输入阻抗	(241)
9.4.2 输出阻抗	(242)
9.4.3 特性阻抗	(242)
9.4.4 传输函数	(244)
习题九	(247)
附录 I 电路分析实验	(250)
实验 1 电阻元件伏安特性的测定	(250)
实验 2 电路中电位与电压的测量	(251)
实验 3 基尔霍夫定律、叠加定理的验证实验	(252)
实验 4 日光灯电路及功率因素的提高	(254)
实验 5 三相交流电路实验	(255)
实验 6 RLC 串联谐振电路实验	(257)
实验 7 单相变压器实验	(259)
附录 II 部分习题参考答案	(261)
参考文献	(267)

1 电路的基本概念和定律

内容提要与学习要求

本章介绍电路和电路模型的概念,电流、电压及其参考方向的概念,电位、电能与电功率的概念,由电阻、电容、电感、电源组成电路的工作状态及基尔霍夫定律。电压和电流的参考方向是电路中重要的基本概念,基尔霍夫定律是分析电路的重要依据也是全书的基础。

通过本章的学习,应达到以下要求:

(1) 掌握电路的概念,电流、电压及其参考方向、关联参考方向,电容、电感元件的电流与电压关系、欧姆定律以及基尔霍夫定律(KCL 和 KVL)。

(2) 了解电路模型,掌握电位、电能及电功率的计算方法,了解电路的三种工作状态。

(3) 了解电路的作用,理想电压源、理想电流源与实际电压源、实际电流源的关系,电容、电感的功率和储能。

1.1 电路和电路模型

1.1.1 电路

电在日常生活、生产和科研工作中得到了广泛应用。在电视机、音响设备、通信系统、计算机和电力网络中可以看到各种各样的电路。电路由电器元件按照一定方式连接而成,它可提供电流流通的路径。

现实生活中实际应用的电路结构形式非常多,但其主要作用有两类:一是实现电能的转换和传输;二是实现信号的传递和处理。

电路都是由一些基本的部件组成,主要分为三部分:一是电源:提供电能或信号的电器元件;二是负载:消耗电能的电器元件;三是中间环节:连接电源和负载的部分,如导线、控制开关等。

1.1.2 电路模型

实际电路是由一些电工设备、器件和电路元件所组成的。为了便于分析和计算,往往把这些器件和元件理想化并用国家统一的标准符号来表示。由理想电路元件及其组合来近似代替实际电路元件,构成与实际电路相对应的电路称为电路模型。电路模型表征了这些设备在电路中所表示的主要电气特性,因此,从电路模型得到的分析结论能够适用于实际电路,同时实际电路的分析也得到了简化。

1.1.2.1 理想电路元件

为了表征电路中某一部分的主要电磁性能以便进行定性、定量分析,可以把该部分电路抽象成一个电路模型,即用理想的电路元件来代替这部分电路。因此,能表征电路的特征,并且具有单一电磁性质的假想元件被称之为理想电路元件。所谓单一电磁性质是指突出该部分电路的主要电或磁的性质,而忽略了次要的电或磁的性质。因此,可以用理想电路元件以及它们的组合来反映实际电路元件的电磁性质。

例如,电感线圈是由导线绕制而成的,它既有电感量又有电阻值,在考虑其主要电磁性质时往往忽略了线圈的电阻性质,而突出了它的电磁性质,把它表征为一个储存磁场能量的电感元件。同样,电阻丝是用金属丝一圈一圈绕制而成的,那么,它既有电感量又有电阻值,在实际分析时往往忽略电阻丝的电感性质,而突出其主要的电阻性质,把它表征为一个消耗电能的电阻元件。

1.1.2.2 理想电路元件的分类及符号

理想电路元件共有五类:电阻、电感、电容、电压源、电流源。各理想电路元件名称及符号如图 1.1 所示。

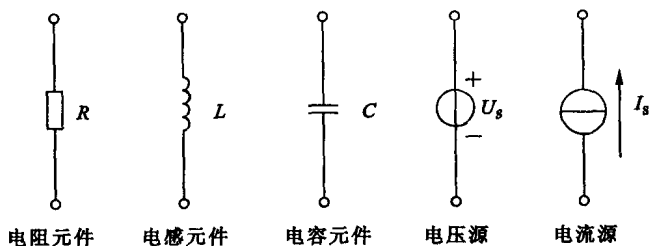


图 1.1 理想电路元件名称及符号

电阻元件是消耗电能的元件,用符号 R 表示。电感元件和电容元件都是储能元件,也称为动态元件。电感元件能把电能转化为磁场能量储存在电感线圈当中,用符号 L 表示。电容元件能把电能转化为电场能量储存在电容器当中,用符号 C 表示。电压源也称为理想电压源,它两端的电压固定不变,且所通过的电流可以是任意值,电流大小取决于与它相连接的外电路。电压源用符号 U_s 表示。电流源也称为理想电流源,它向外提供一个恒定不变的电流,其两端的电压可以是任意值,电压大小取决于与它相连接的外电路。电流源用符号 I_s 表示。

1.1.2.3 电路图

用理想电路元件构成的理想化电路模型图称为电路原理图,简称电路图。在电路图中,各种电路元件必须用国家统一标准的图形和符号表示。

例如:图 1.2 所示电路是由一个电源(干电池)、一个负载(小电珠)、一个开关和若干导线组成的最简单电路。对此电路进行抽象后变成图 1.3 所示的电路图。 U_s 是电压源,这里将干电池的内阻忽略不计; S 表示开关; R 电阻元件表示小电珠。各个理想元件之间的导线连接用连线来表示。这样,电路分析就变得非常简单。今后书中未加特别说明时,所指的电路均为这样抽象的电路模型,所指的元件均为理想电路元件。

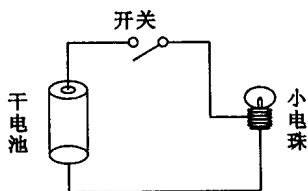


图 1.2 手电筒实际电路图

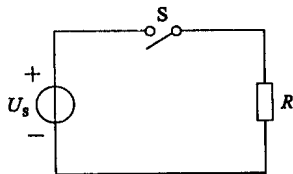


图 1.3 手电筒电路模型

思考与练习

- 1.1.1 什么叫电路?
- 1.1.2 电路有哪些作用?
- 1.1.3 电路由哪几个部分组成?
- 1.1.4 什么叫电路图? 电路模型与实际电路有什么区别?

1.2 电路的基本物理量

1.2.1 电流及电流的参考方向

1.2.1.1 电流

带电粒子的定向移动形成电流。带电粒子在金属导体中是指带负电的自由电子,在电介质中是指带正电或负电的正、负离子。电子和负离子带负电荷,正离子带正电荷。电荷用符号 q 或 Q 表示,在国际单位制(SI)中,单位为库仑,简称库,符号为 C。

单位时间内通过导体横截面的电荷定义为电流。电流的实际方向为正电荷运动的方向。电流用符号 i 或 I 表示,其数学表达式为

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

在直流电路中,单位时间内通过导体横截面的电荷是恒定不变的,有

$$I = \frac{q}{t} \quad (1.2)$$

在国际单位制(SI)中,电流单位为安培,简称安,符号为 A;有时也用千安(kA)、毫安(mA)或微安(μ A)。它们之间的关系为

$$1\text{kA} = 10^3\text{A} = 10^6\text{mA} = 10^9\mu\text{A}$$

电流的量值和方向均不随时间变化的电流,称为恒定电流,简称为直流(dc或DC),一般用符号 I 表示。量值和方向随时间变化的电流,称为时变电流,一般用符号 i 表示。量值和方向随时间作周期性变化且平均值为零的时变电流,称为交流(ac或AC)。

1.2.1.2 电流的参考方向

在分析电路时,电流常常是所求的未知量,有时电流虽已知但其为变动电流,实际方向随时间在变化,在电路图上无法标明,为了解决这一问题,引入了“参考方向”这一概念。

任一支路电流只可能有两个方向,任选其中一个方向为电流的正方向,则所选定的方向则称为参考方向。当参考方向与实际方向一致时,电流为正值($I > 0$);当参考方向与实际方向不一致时,电流为负值($I < 0$)。可见,在选定参考方向后,电流值才有正负之分,根据电流量值的正、负来判断电流的实际方向,如图 1.4 所示。

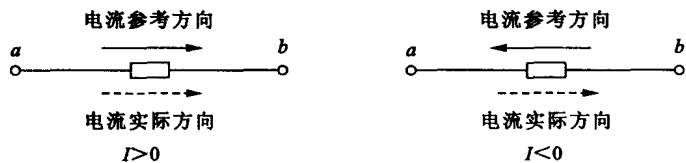


图 1.4 电流参考方向与实际方向的关系

电流的参考方向和实际方向用箭头线表示,如图 1.5 所示。有时也用双下标表示,若支路 ab 上的电流为 I_{ab} ,则表示该支路电流的参考方向选定为 a 指向 b ,并有 $I_{ab} = -I_{ba}$ 。

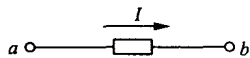


图 1.5 电流参考方向的表示

1.2.2 电压及电压的参考方向

1.2.2.1 电压

单位正电荷由电路中 a 点移到 b 点所获得或失去的能量,称为 ab 两点的电压,即

$$u_{ab} = \frac{dW}{dq} \quad (1.3)$$

式(1.3)中, dq 为由 a 点移到 b 点的电荷量, dW 为电荷移动过程中所获得或失去的能量, u_{ab} 为两点间的电压。规定:若正电荷从 a 点移到 b 点,其电势能减少,电场力做正功,则电压实际方向从 a 到 b 。

国际单位制(SI)中,功的单位为焦耳(J);电荷单位为库仑(C);时间单位为秒(s);电压单位为伏特,简称伏,符号为 V,有时也用千伏(kV)、毫伏(mV)或微伏(μV)。它们之间的关系为

$$1\text{kV} = 10^3 \text{V} = 10^6 \text{mV} = 10^9 \mu\text{V}$$

1.2.2.2 电压的参考方向

电压参考方向与电流参考方向一样,也是任意选定的。在分析电路时,选定某一方向作为电压参考方向,当选定的电压参考方向与实际方向一致时,则电压为正值($U > 0$);当选定的电压参考方向与实际方向不一致时,则电压为负值($U < 0$)。如图 1.6 所示。

电压的参考方向可以用“+”、“-”极性表示,还可以用双下标表示,如图 1.7 所示,并有 $U_{ab} = -U_{ba}$ 。

1.2.3 电流与电压的关联参考方向和非关联参考方向

电压和电流的参考方向可以分别选定,但为了方便起见,常将一条支路的电

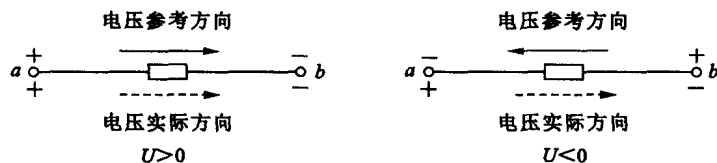


图 1.6 电压参考方向与实际方向关系



图 1.7 电压参考方向的表示

压、电流参考方向选得一致,即电流的参考方向使得电流从电压的“+”参考极性流入,从“-”参考极性流出。这种电压、电流参考方向选得一致的情况称为关联参考方向;反之,称为非关联参考方向。如图 1.8 所示。今后若不加以说明,本书都采用关联参考方向。

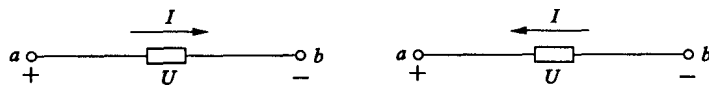


图 1.8 关联参考方向与非关联参考方向

关于电压和电流的参考方向,需注意:

- (1) 电流、电压的实际方向是客观存在的,而参考方向是人为选定的。
- (2) 当电流、电压的参考方向与实际方向一致时,电流、电压值取正号;反之取负号。
- (3) 在求解电路时,必须首先给出求解过程中所涉及的一切电压、电流的参考方向,并在电路图中予以标出。否则计算得出的电压、电流正负值是没有意义的。虽然参考方向的指定具有任意性,但一经指定,在求解过程中不应改变。
- (4) 一般来说,同一段电路的电压和电流的参考方向可以各自选定。但为了分析方便,常对一段电路采用关联参考方向。

【例 1.1】如图 1.9 所示,电路中电流或电压的参考方向如图所示,已知 $I_1 = 1\text{A}$, $I_2 = -1\text{A}$, $U_1 = 5\text{V}$, $U_2 = -5\text{V}$,试指出电流或电压的实际方向。

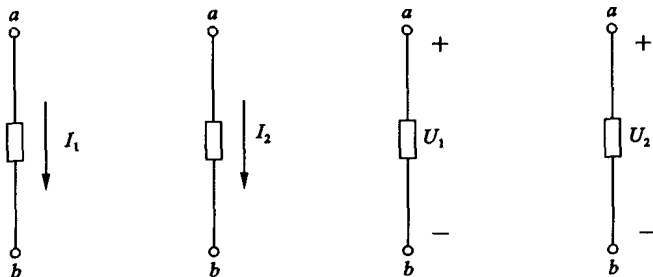


图 1.9 例 1.1 电路图