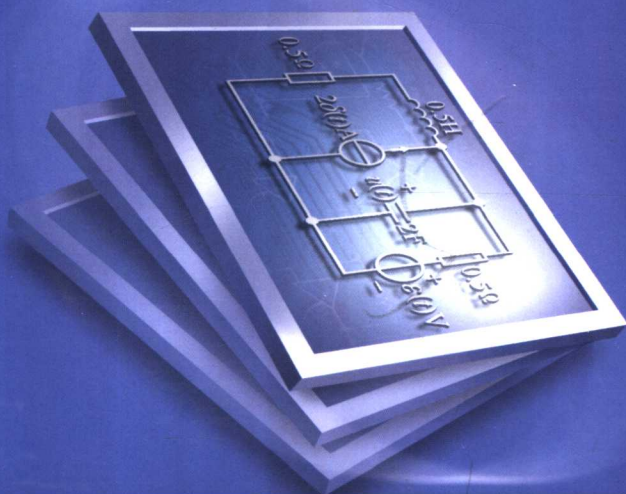


江苏省高等教育精品教材重点立项项目



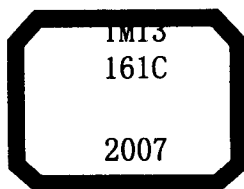
21 世 纪 高 等 院 校 电 气 信 息 类 系 列 教 材

电路原理 学习指导与习题全解

陈晓平 傅海军 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



江苏省高等教育精品教材重点立项项目
21 世纪高等院校电气信息类系列教材

电路原理学习指导与 习题全解

陈晓平 傅海军 主编
李长杰 温军玲 殷春芳 刘西健 参编

机械工业出版社

本书是孙玉坤、陈晓平主编的《电路原理》配套的教学指导书,各章的排列次序、标题都与教材相同。每章均由四个部分组成:第一部分为基本知识点,概括性地说明本章的主要概念、基本理论和分析方法;第二部分为重点与难点,指出学习本章内容时容易出现疑点和难点,帮助读者掌握重点,理解难点,系统深入地掌握教材内容;第三部分为习题解析,给出了教材中习题的全部解答,习题的解析方法与教材中本章、节讲述内容密切配合,注重阐述解题思路、方法、步骤、特点和技巧,有些习题还给出多种解法;第四部分为典型题分析,选用一些基本概念强、知识覆盖面宽、具有一定难度的典型例题进行分析,以进一步拓宽解题思路,深入理解电路理论,更好地掌握解题方法与技巧。

本书虽属配套教学指导书,但对从事电路教学的教师、学习电路课程的学生以及报考电气信息类专业研究生的人员都具有很好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电路原理学习指导与习题全解/陈晓平,傅海军主编.

—北京:机械工业出版社,2007.1

(21世纪高等院校电气信息类系列教材)

ISBN 7-111-20273-2

I. 电… II. ①陈…②傅… III. 电路理论-高等学校

-教学参考资料 IV. TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第128982号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:时静 赵丽欣 版式设计:冉晓华 责任校对:姚培新

封面设计:刘吉维

责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2007年1月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·24印张·593千字

0 001—4 000册

定价:31.00元

凡购本书,如有缺页,倒页,脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379739

封面无防伪标均为盗版

出版说明

随着科学技术的不断进步，整个国家自动化水平和信息化水平的长足发展，社会对电气信息类人才的需求日益迫切、要求也更加严格。在教育部颁布的“普通高等学校本科专业目录”中，电气信息类（Electrical and Information Science and Technology）包括电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程等子专业。这些子专业的人才培养对社会需求、经济发展都有着非常重要的意义。

在电气信息类专业及学科迅速发展的同时，也给高等教育工作带来了许多新课题和新任务。在此情况下，只有将新知识、新技术、新领域逐渐融合到教学、实践环节中去，才能培养出优秀的科技人才。为了配合高等院校教学的需要，机械工业出版社组织了这套“21世纪高等院校电气信息类系列教材”。

本套教材是在对电气信息类专业教育情况和教材情况调研与分析的基础上组织编写的。期间，与高等院校相关课程的主讲教师进行了广泛的交流和探讨，旨在构建体系完善、内容全面新颖、适合教学的专业教材。

本套教材涵盖多层次专业课程，定位准确，注意理论与实践、教学与教辅的结合，在语言描述上力求准确、清晰，适合各高等院校电气信息类专业学生使用。

机械工业出版社

前言

本书是参照高等工业学校《电路课程教学基本要求》，针对学生学习“电路原理”的实际需要编写的一本教学参考书。

“电路原理”是电类一门重要的技术基础课，它所涵盖的内容不仅是后续多门专业课所需之先修的知识，其理论本身又蕴含有丰富而普通的思想方法，掌握好这些知识和思想方法，不仅为后续课程所必需，也有利于以系统的观点分析客观事物，正因为电路理论的重要性，全国大部分高等院校把该课程定为研究生入学考试课程。教学实践表明，学生除了接受课堂教学外，有选择地研读一些学习参考材料，做适当数量的习题是学好本课程的重要环节。可以说不进行适量习题练习是很难深刻掌握“电路原理”课程的基本概念和内容的。为了引导学生主动学习，培养科学思维能力，提高分析问题和解决问题能力，针对在校学生学习“电路原理”的实际需要以及研究生入学考试的需要，编写了这本《电路原理学习指导与习题全解》。

本书各章节划分及内容顺序与江苏大学孙玉坤、陈晓平主编的《电路原理》教材相同，是该书的配套教学指导书，其总体内容兼顾了国内其他统编教材及一些重点院校的优秀教材，因此可以配合不同版本的教材使用。本书的每一章内容均由以下四部分组成：

(1) 基本知识点。针对各章节的内容尽可能简明扼要地说明本章的主要概念、基本理论和分析方法，其目的是帮助学生抓住知识要点，以利于学生能有效地掌握所学的基本内容。

(2) 重点与难点。强调本章内容的重点以及在学习过程中容易出现的疑点和难点问题，通过归纳总结提出分析与解决的方法。

(3) 习题解析。对《电路原理》教材中的每一道习题进行详细的解答，习题的解析方法与教材中各章、节讲述的内容密切配合，注重阐述解题思路、方法、步骤、特点和技巧，有些习题还给出了多种解法，以期使读者提高分析问题和解决问题的能力。

(4) 典型例题分析。选用注重基本概念、覆盖面宽、具有一定难度的典型例题进行分析。这些题目主要选自于各高校研究生入学考试题，题目的解法主要用当节、当章所讲述内容配合已学过的章、节内容作解答，目的是帮助读者更深入理解电路理论知识，更好地掌握解题方法与技巧。

参加本书编写的有江苏大学陈晓平（第4、5、7章），傅海军（第9、11、14章），李长杰（第3、8章），温军玲（第12、13章），殷春芳（第1、2章）以及

长安大学建工学院刘西健（第6、10章）。陈晓平教授、傅海军讲师任主编，负责全书的统稿。

本书对从事电路原理课程教学的有关人员，自学该课程的读者及报考电气信息类专业研究生的人员都具有重要的参考价值。对于正在学习电路原理课程的在校学生，可以在独立完成作业的基础上，参照本书的相关内容，找出解题方法的异同，以加深理解基本理论、熟练掌握基本分析计算方法，提高知识综合应用能力。

由于编者的水平和能力有限，书中若有不妥或错误之处，恳望读者批评指正。

编 者

2006年5月

目 录

出版说明

前言

第1章 电路基本概念和电路定律 1

- 1.1 基本知识点 1
 - 1.1.1 电流和电压的参考方向 1
 - 1.1.2 功率 1
 - 1.1.3 电阻元件 1
 - 1.1.4 电压源和电流源 2
 - 1.1.5 受控源 2
 - 1.1.6 基尔霍夫定律 3
 - 1.1.7 运算放大器 3
- 1.2 重点与难点 4
 - 1.2.1 电路元件 4
 - 1.2.2 参考方向和功率 5
 - 1.2.3 基尔霍夫定律 5
 - 1.2.4 含有理想运算放大器的电路的分析 5
- 1.3 习题解析 6
- 1.4 典型例题分析 16

第2章 电阻电路的等效变换 20

- 2.1 基本知识点 20
 - 2.1.1 等效变换的概念 20
 - 2.1.2 电阻的等效变换 20
 - 2.1.3 理想电源的串联、并联及等效变换 21
 - 2.1.4 实际电源的等效变换 21
- 2.2 重点与难点 22
 - 2.2.1 等效变换概念 22
 - 2.2.2 实际电源的等效变换 22
 - 2.2.3 理想电源的串、并联及等效变换 22
- 2.3 习题解析 22

2.4 典型例题分析 35

第3章 电阻电路的分析方法 41

- 3.1 基本知识点 41
 - 3.1.1 电路的图 41
 - 3.1.2 KCL 和 KVL 的独立方程数 41
 - 3.1.3 支路电流法 41
 - 3.1.4 回路电流法及网孔电流法 42
 - 3.1.5 结点电压法 42
 - 3.1.6 含有理想运算放大器的电阻电路的分析 43
- 3.2 重点与难点 43
 - 3.2.1 支路电流法 43
 - 3.2.2 回路电流法 43
 - 3.2.3 结点电压法 43
- 3.3 习题解析 44
- 3.4 典型例题分析 60

第4章 电路定理 65

- 4.1 基本知识点 65
 - 4.1.1 叠加定理 65
 - 4.1.2 齐次定理 65
 - 4.1.3 替代定理 65
 - 4.1.4 戴维宁定理 65
 - 4.1.5 诺顿定理 66
 - 4.1.6 最大功率传输定理 66
 - 4.1.7 特勒根定理 66
 - 4.1.8 互易定理 66
- 4.2 重点与难点 67
 - 4.2.1 叠加定理 67
 - 4.2.2 齐次定理 67
 - 4.2.3 替代定理 68
 - 4.2.4 戴维宁定理 68
 - 4.2.5 诺顿定理 69

4.2.6 最大功率传输定理	69	7.4 典型例题分析	201
4.2.7 特勒根定理	69	第8章 互感电路	207
4.2.8 互易定理	69	8.1 基本知识点	207
4.3 习题解析	70	8.1.1 互感	207
4.4 典型例题分析	91	8.1.2 互感的去耦等效电路	207
第5章 动态电路的时域分析	99	8.1.3 含有耦合电感电路的计算	209
5.1 基本知识点	99	8.1.4 空心变压器	209
5.1.1 电容元件与电感元件	99	8.1.5 理想变压器	209
5.1.2 换路定律和初始值的确定	100	8.2 重点与难点	210
5.1.3 一阶电路的零输入响应	100	8.2.1 耦合电感元件的伏安关系、 同名端的概念	210
5.1.4 一阶电路的零状态响应	100	8.2.2 耦合电感的去耦等效	210
5.1.5 一阶电路的全响应	101	8.2.3 空心变压器的方程及 等效电路	211
5.1.6 一阶电路的三要素法	101	8.2.4 理想变压器的伏安关系及 阻抗变换作用	211
5.1.7 一阶电路的阶跃响应	101	8.3 习题解析	211
5.1.8 一阶电路的冲激响应	101	8.4 典型例题分析	225
5.1.9 二阶电路的动态响应	102	第9章 三相电路	230
5.2 重点与难点	102	9.1 基本知识点	230
5.3 习题解析	103	9.1.1 三相电路的基本概念	230
5.4 典型例题分析	134	9.1.2 对称三相电路的计算	231
第6章 正弦交流电路的稳态分析	147	9.1.3 非对称三相电路的概念 及计算	233
6.1 基本知识点	147	9.1.4 三相电路的功率	233
6.1.1 正弦量及其三要素	147	9.2 重点与难点	234
6.1.2 相量法的概念	148	9.3 习题解析	235
6.1.3 阻抗、导纳及串并联	149	9.4 典型例题分析	246
6.1.4 正弦稳态电路的分析	151	第10章 非正弦周期电流电路	249
6.1.5 正弦稳态电路的功率	151	10.1 基本知识点	249
6.2 重点与难点	152	10.1.1 非正弦周期信号的谐波分析	249
6.3 习题解析	153	10.1.2 非正弦周期信号的有效值、 平均值和平均功率	250
6.4 典型例题分析	183	10.1.3 非正弦周期电流电路的计算	251
第7章 谐振电路	191	10.2 重点与难点	251
7.1 基本知识点	191	10.3 习题解析	252
7.1.1 串联谐振电路	191		
7.1.2 并联谐振电路	192		
7.1.3 串并联谐振电路	193		
7.2 重点与难点	193		
7.3 习题解析	194		

10.4 典型例题分析	269	12.2.4 矩阵方程中的电源(独立源或受控源)的正负号确定	310
第 11 章 动态电路的复频域分析	274	12.2.5 状态方程	310
11.1 基本知识点	274	12.3 习题解析	311
11.1.1 拉普拉斯变换的基本性质	274	12.4 典型例题分析	328
11.1.2 拉普拉斯反变换	275	第 13 章 二端口网络	334
11.1.3 线性动态电路的复频域分析——运算法	275	13.1 基本知识点	334
11.1.4 网络函数的定义	276	13.1.1 端口条件	334
11.1.5 网络函数的应用	276	13.1.2 端口的特性方程	334
11.1.6 网络函数的性质	277	13.1.3 二端口网络的参数与方程	334
11.1.7 网络函数的零、极点及其分布	277	13.1.4 二端口网络的等效电路	335
11.1.8 网络函数的频率响应	277	13.1.5 二端口网络的网络函数	336
11.2 重点与难点	278	13.1.6 二端口网络的连接	336
11.2.1 电路的运算法分析	278	13.1.7 回转器和负阻抗变换器	336
11.2.2 网络函数 $H(s)$ 的计算	278	13.2 重点与难点	337
11.2.3 幅频响应	279	13.2.1 二端口网络参数方程的求解	337
11.3 习题解析	279	13.2.2 二端口网络的等效电路计算	337
11.4 典型例题分析	297	13.3 习题解析	337
第 12 章 电路方程的矩阵形式	305	13.4 典型例题分析	356
12.1 基本知识点	305	第 14 章 非线性电路	359
12.1.1 概念	305	14.1 基本知识点	359
12.1.2 图的矩阵表示	305	14.1.1 非线性元件	359
12.1.3 复合支路	306	14.1.2 非线性电阻电路的分析方法	361
12.1.4 网络的矩阵分析法	306	14.2 重点与难点	361
12.1.5 状态方程	306	14.3 习题解析	362
12.2 重点与难点	307	14.4 典型例题分析	369
12.2.1 回路电流矩阵方程	307	参考文献	374
12.2.2 结点电压矩阵方程	308		
12.2.3 割集电压矩阵方程	310		

第 1 章 电路基本概念和电路定律

1.1 基本知识点

1.1.1 电流和电压的参考方向

电流和电压是电路分析的基本物理量，一般要先假定电流、电压的参考方向，根据参考方向列写电路方程，再通过解方程求得结果。参考方向是人为任意假定的，一旦选定，在计算过程中不能随意更改，而电流、电压的实际方向则根据计算结果的正负进行判断。

电流 i 的实际方向规定为正电荷流动的方向。在确定参考方向后，若 $i > 0$ ，表示电流的实际方向与所设的参考方向相同；若 $i < 0$ ，表示电流的实际方向与所设的参考方向相反。

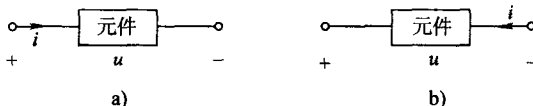


图 1-1-1 电流、电压的参考方向

a) 关联参考方向 b) 非关联参考方向

电压 u 的实际方向（极性）规定为由高电位指向低电位的方向，或者说高电位为电压的正极，低电位为电压的负极。在确定的参考方向下，若 $u > 0$ ，表示电压的实际方向与所设的参考方向相同；若 $u < 0$ ，表示电压的实际方向与所设的参考方向相反。

如果电流的参考方向是从电压参考方向的“+”端流入任一元件，而从“-”端流出，则称电压、电流关于该元件为关联参考方向，否则为非关联参考方向，参见图 1-1-1。

1.1.2 功率

功率在电路分析中也是十分重要的，电功率与电压、电流密切相关。

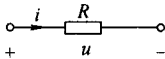
1) 若元件（或支路）的 u 、 i 为关联参考方向，该元件（或支路）吸收的功率为 $p = ui$ 。当 $p > 0$ 时，表示该元件（或支路）实际上吸收功率；当 $p < 0$ 时，则该元件（或支路）实际上释放功率。

2) 若元件（或支路）的 u 、 i 为非关联参考方向，该元件（或支路）释放的功率为 $p = ui$ 。当 $p > 0$ 时，表示该元件（或支路）实际上释放功率；当 $p < 0$ 时，则该元件（或支路）实际上吸收功率。

1.1.3 电阻元件

电阻元件是电路分析中最常见、最基本的二端无源元件之一，其定义及相关的特点可参见表 1-1-1。

表 1-1-1 电阻元件的定义和特点

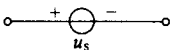
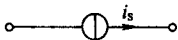
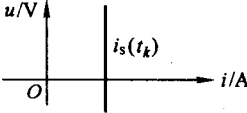
电路符号	定义及定义式	伏安特性	功率和能量
	元件两端的电压 u 、电流 i 之比值, 由 $u-i$ 平面上一条过原点的直线决定 定义式: $R = \frac{u}{i}$	$u = Ri$ 或 $i = Gu$	$p = i^2 R = Gu^2$ $W(t) = i^2 Rt = Gu^2 t$

1.1.4 电压源和电流源

电压源 u_s 和电流源 i_s 是有源元件, 为了区别受控源, 也称它们为独立源。

电压源、电流源的定义和特点如表 1-1-2 所示。

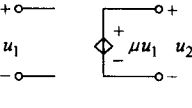
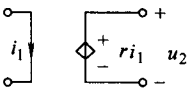
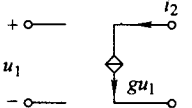
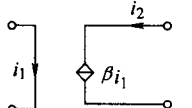
表 1-1-2 电压源、电流源的定义和特点

	电压源	电流源
定义	能独立向外电路提供规定的电压, 而与流过的电流无关的二端元件	能独立向外电路提供规定的电流, 而与其端电压无关的二端元件
电路符号		
伏安特性		
主要特性	①电压源的端口电压为特定的值或特定的时间函数, 与流过的电流大小、方向无关 ②流过电压源的电流由电源端电压与外电路共同决定 ③当 $u_s(t) = U_s$ (常数) 时, 称其为直流电压源 ④当 $u_s(t) = 0$ 时, 电压源支路相当于短路 ⑤在复杂电路中, 电压源既可以发出功率, 也可以吸收功率	①电流源流出的电流是一个特定的值或特定的时间函数, 与其端电压的方向、大小无关 ②电流源的端电压由电源电流与外电路共同决定 ③当 $i_s(t) = I_s$ (常数) 时, 称其为直流电流源 ④当 $i_s(t) = 0$ 时, 电流源支路相当于开路 ⑤在复杂电路中, 电流源既可以发出功率, 也可以吸收功率

1.1.5 受控源

区别于独立源, 受控源也称为非独立源, 它本身不能产生激励作用, 属于无源元件, 因此当电路中无独立电源时, 电路不能产生响应。受控源是一种四端元件, 由两个支路构成, 一个为控制支路, 另一个为被控制支路。被控制支路的电流或电压由控制支路的电压或电流控制。受控源的分类比较如表 1-1-3 所示。

表 1-1-3 受控源的分类比较

代号	VCVS	CCVS	VCCS	CCCS
名称	电压控制电压源	电流控制电压源	电压控制电流源	电流控制电流源
电路符号				
控制量	u_1	i_1	u_1	i_1
被控制量	u_2	u_2	i_2	i_2
控制关系式	$u_2 = \mu u_1$	$u_2 = r i_1$	$i_2 = g u_1$	$i_2 = \beta i_1$
注意点	VCVS、CCVS 统称为受控电压源,被控支路的符号和电压特性与独立电压源相近。被控制支路的电压与该支路的电流无直接关系,这一点与独立电压源相同,但又有不同,独立电压源电压不受其他支路电压或电流控制,而受控电压源电压受控制支路电压或电流控制			VCCS、CCCS 统称为受控电流源,被控支路的符号和电流特性与独立电流源相近。被控制支路的电流与该支路的电压无直接关系,这一点与独立电流源相同,但又有不同,独立电流源电流不受其他支路电压或电流控制,而受控电流源电流受控制支路电压或电流控制

1.1.6 基尔霍夫定律

电路由若干电气元件按一定方式连接而成,相互连接的元件除受元件定律本身的约束外,还受连接结构的约束。由电路结构产生的约束关系称为基尔霍夫定律。基尔霍夫定律是电路最基本的关系之一,无论是线性、非线性、时变或时不变电路,只要是集总参数电路均满足基尔霍夫定律。

基尔霍夫定律的表述以及使用说明见表 1-1-4。

表 1-1-4 基尔霍夫定律

名称	基尔霍夫电流定律	基尔霍夫电压定律
简称	KCL	KVL
定律内容文字表述	在集总电路中,任何时刻,对任一结点,所有流出结点的支路电流的代数和恒等于零	在集总电路中,任何时刻,沿任一回路,所有支路电压的代数和恒等于零
定律公式表述	$\sum i = 0$	$\sum u = 0$
定律使用说明	可用于一个结点,也可用于一个闭合面	用于任一闭合路径
物理实质	是电流连续性和电荷守恒的体现	是电位单值性的体现

1.1.7 运算放大器

运算放大器属于多端元件,是一种增益很高的电压放大集成电路,能同时放大直流和一定频率的交流电压。由于它能完成加法、微分、积分等多种运算,故称为运算放大器,简称运放。

1. 运算放大器的电路符号

运算放大器的电路符号见图 1-1-2,其中,“-”端称为反相输入端,“+”端称为同相

输入端（注意不要把“+”、“-”误认为电压参考方向的正、负极性）。若运算放大器的同相输入端和反相输入端的电压分别为 u_+ 和 u_- 时，运算放大器输出端的电压

$$u_o = A(u_+ - u_-) = Au_d$$

式中， $u_d = u_+ - u_-$ ，称为差动输入； A 为运算放大器电压放大倍数或电压增益的绝对值，数值很大，可达 10^5 量级以上。

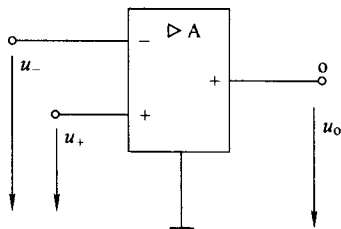


图 1-1-2 运放的电路符号

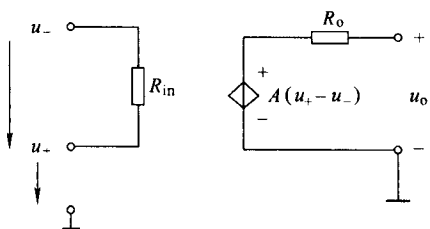


图 1-1-3 运放的电路模型

2. 运算放大器的电路模型

运算放大器的电路模型如图 1-1-3 所示，也可称其为运放外部关系的等效电路。其中，受控源 $A(u_+ - u_-)$ 为电压控制电压源； R_{in} 为运放的输入电阻，数值很大，一般为 $1\text{M}\Omega$ 至几十 $\text{M}\Omega$ ； R_o 为运放的输出电阻，数值相对很小，一般为 100Ω 左右。

3. 理想运算放大器及其约束规则

若流入每一个输入端的电流为零，就是说输入电阻 $R_{in} \rightarrow \infty$ ，输出电阻 R_o 则设为零，而放大倍数 $A \rightarrow \infty$ ，这时的运算放大器称为理想运算放大器，其电路符号如图 1-1-4 所示。

对含有理想运算放大器的电路，有以下两条约束规则：

1) “虚断（路）”——由于 $R_{in} \rightarrow \infty$ ，所以流入每一个输入端的电流均为零，即 $i_+ = i_- = 0$ ；

2) “虚短（路）”——由于 $u_o = A(u_+ - u_-)$ ， u_o 又为一有限值，而 $A \rightarrow \infty$ ，因此有 $u_+ - u_- = 0$ ，即有 $u_+ = u_-$ 。

应用这两条约束规则是分析含有理想运放电路的重要工具之一。

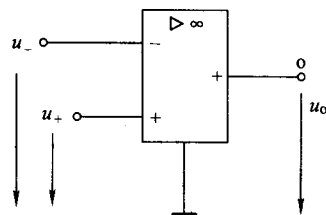


图 1-1-4 理想运算放大器

1.2 重点与难点

1.2.1 电路元件

电路元件是指电阻、电压源、电流源、受控源和将在后续章节中学习到的电容、电感，它们是组成电路的基本单元。对每一种电路元件，应掌握其定义，图形符号，伏安关系以及相关性质等，尤其对于理想电源，更应深入理解。

1. 独立电源

理想电压源有以下特点：理想电压源电压按给定的时间函数规律变化，不受外电路影响，而其流过的电流随外电路的改变而改变；理想电压源为零时，相当于短路。

理想电流源有以下特点：理想电流源电流按给定的时间函数规律变化，不受外电路影

响，而其两端电压随外电路的改变而改变；理想电流源为零时，相当于开路。

值得注意的是，理想电源在电路中不一定总是释放功率，在某些电路中也可能吸收功率。

2. 受控源（非独立电源）

受控源的引入对于电路初学者而言是个难点。受控源用以表示电路中支路电压、支路电流之间的一种控制关系，对于其种类、控制关系及其特点应该深入理解。需要指出的是，受控电压源的电压或受控电流源的电流受电路中其他支路电压或电流（亦称控制量）的控制，因此，当电路中无独立电源时，电路不能产生响应。

1.2.2 参考方向和功率

1) 对于电路初学者，必须很好地理解和掌握电压和电流的参考方向。在电路分析、计算中，必须对每一个元件设定其电压、电流的参考方向，否则将无法列写方程，也无法判定方程正确与否以及确定未知量的实际方向。

2) 元件的功率计算比较简单，难点在于功率状态的判断。要正确判断元件的功率状态，不仅要由功率计算公式 $P = ui$ 所求得的功率值的正、负，还要根据元件上电压、电流的参考方向才能进一步作出判断。

1.2.3 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是电路理论的基础，定律内容虽然简单，但要完全掌握并灵活应用需要一个过程。在本章中，读者需要深刻理解定律的描述对象：KCL 是电路中与某一结点相关的各支路电流之间的约束关系；而 KVL 是电路中与某一回路相关的各支路电压之间的约束关系，它们是分析结点处各电流和回路中各电压的基本依据。

此外，根据基尔霍夫电压定律（KVL），还可以得到以下结论：

1) 电路中任意两点之间的电压是确定的，与路径无关。

2) 两点间的电压，例如从 i 结点到 j 结点的电压 u_{ij} ，等于从 i 结点沿某一路径到 j 结点的各电压的代数和。各电压的符号规定为：当电压方向（ $+\rightarrow-$ ）与路径方向一致时取“+”，否则取“-”。

3) 沿电路任一回路电阻上的电压降的代数和等于该回路中电压源电动势的代数和，即 $\sum Ri = \sum u_s$ 。各项的正负号规定为：当支路电流与回路绕行方向一致时， Ri 前取“+”，否则取“-”；当电动势方向（从电压源负极指向正极）与回路绕行方向一致时， u_s 前取“+”，否则取“-”。

1.2.4 含有理想运算放大器的电路的分析

在电路分析中，一般不涉及运算放大器的内部电路，而只考虑其外部特性。将运算放大器用理想化模型表示，可极大地简化电路的分析与计算，而掌握含有理想运算放大器电路的分析方法是有关运算放大器部分的重点。

分析含有理想运算放大器的电路，一是依据两条规则（虚短路和虚断路），二是根据电路自身结构利用结点电压法（将在 3.5 节中学习）或 KCL 列写方程。值得注意的是，对于和运算放大器输出端直接连接的结点，由于理想运算放大器的输出端电流是未知的，所以一般不列写其结点电压方程（KCL 方程）。

1.3 习题解析

1. 如图 1-3-1 所示各元件, 试确定它们电流、电压的实际方向, 判断图示电压、电流是否为关联参考方向, 并说明各元件实际上是吸收还是发出功率。

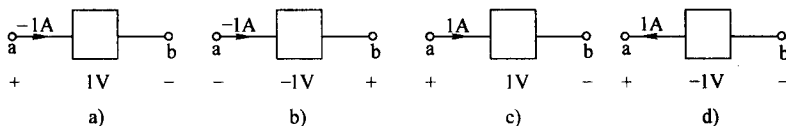


图 1-3-1

解 提示: 注意 u 、 i 的参考方向。当 u 、 i 是关联参考方向时, 若 $p = ui > 0$, 则表示吸收功率, 反之发出功率; 当 u 、 i 是非关联参考方向时, 若 $p > 0$, 则表示发出功率, 反之吸收功率。

图 a: u 的实际方向 a 正、b 负, i 的实际方向 $b \rightarrow a$;

u 、 i 的参考方向是关联的

$$p = ui = 1 \times (-1) \text{ W} = -1 \text{ W} < 0, \text{ 该元件发出功率}$$

图 b: u 的实际方向 a 正、b 负, i 的实际方向 $b \rightarrow a$;

u 、 i 的参考方向是非关联的

$$p = ui = (-1) \times (-1) \text{ W} = 1 \text{ W} > 0, \text{ 该元件发出功率}$$

图 c: u 的实际方向: a 正、b 负, i 的实际方向 $a \rightarrow b$;

u 、 i 的参考方向是关联的

$$p = ui = 1 \times 1 \text{ W} = 1 \text{ W} > 0, \text{ 该元件吸收功率}$$

图 d: u 的实际方向 a 正、b 负, i 的实际方向 $b \rightarrow a$;

u 、 i 的参考方向是非关联的

$$p = ui = (-1) \times 1 \text{ W} = -1 \text{ W} < 0, \text{ 该元件吸收功率}$$

2. 图 1-3-2 所示电路中各方框均代表某一电路元件, 在所示参考方向条件下求得各元件电流、电压分别为 $i_1 = 5 \text{ A}$, $i_2 = 3 \text{ A}$, $i_3 = -2 \text{ A}$, $u_1 = 6 \text{ V}$, $u_2 = 1 \text{ V}$, $u_3 = 5 \text{ V}$, $u_4 = -8 \text{ V}$, $u_5 = -3 \text{ V}$, 试计算各元件吸收的功率, 并判断是否满足功率平衡。

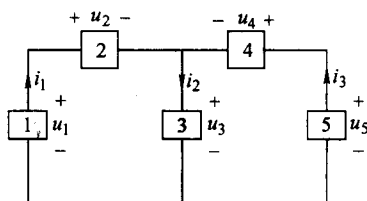


图 1-3-2

解 提示: 讨论功率平衡就是任何一个电路中所有吸收功率总和为零, 或者说所有吸收功率支路之和等于所有发出功率支路之和。当 u 、 i 处于关联参考方向时, 用 $p = ui$ 计算吸收的功率; 当 u 、 i 处于非关联参考方向时, 用 $p = -ui$ 计算吸收的功率。

元件 1 $p_1 = -u_1 i_1 = -6 \times 5 \text{ W} = -30 \text{ W}$ (实为发出 30W 功率)

元件 2 $p_2 = u_2 i_1 = 1 \times 5 \text{ W} = 5 \text{ W}$

元件 3 $p_3 = u_3 i_2 = 5 \times 3 \text{ W} = 15 \text{ W}$

元件 4 $p_4 = u_4 i_3 = (-8) \times (-2) \text{ W} = 16 \text{ W}$ (实为吸收 16W 功率)

元件 5 $p_5 = -u_5 i_3 = -(-3) \times (-2) \text{ W} = -6 \text{ W}$ (实为发出 6W 功率)

整个电路吸收的功率总和为 $p = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 = 0\text{W}$

这说明各元件吸收和发出的功率相互平衡。

3. 若某元件端子上的电压和电流取关联参考方向, 而 $u = 170\cos(100\pi t)\text{V}$, $i = 7\sin(100\pi t)\text{A}$, 求:

(1) 该元件吸收功率的最大值;

(2) 该元件发出功率的最大值。

解 (1) $p = ui = 170\cos(100\pi t) \times 7\sin(100\pi t)$
 $= 595\sin(200\pi t)\text{W}$

当 $\sin(200\pi t) > 0$ 时, $p > 0$, 元件吸收功率

当 $\sin(200\pi t) = 1$ 时, 元件吸收功率为最大, 即 $p_{\text{吸max}} = 595\text{W}$

(2) 当 $\sin(200\pi t) < 0$ 时, $p < 0$, 元件实际发出功率

当 $\sin(200\pi t) = -1$ 时, 元件发出功率为最大, 即 $p_{\text{发max}} = 595\text{W}$

4. 如图 1-3-3 所示, 在指定的电压 u 、电流 i 参考方向下, 试写出各元件 u 和 i 的约束方程 (VCR 方程)。

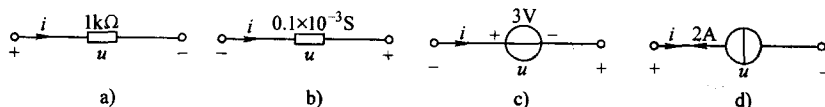


图 1-3-3

解 提示: 注意在 u 、 i 关联参考方向下, 电阻的 u 、 i 关系为: $u = Ri$ (或 $i = Gu$); 而非关联时为 $u = -Ri$ (或 $i = -Gu$); 理想电压源的电压是确定的, 而其电流由外电路决定; 理想电流源的电流亦是确定的, 而其电压由外电路决定。

图 a 中, 电阻的 u 、 i 在关联参考方向下, 其 u 、 i 约束方程为

$$u = Ri = 10^3 i$$

图 b 中, 电阻的 u 、 i 在非关联参考方向下, 其 u 、 i 约束方程为

$$i = -Gu = -0.1 \times 10^{-3} u = -10^{-4} u$$

$$\text{即 } u = -10^4 i$$

图 c 中, 对理想电压源, 有 $u = -3\text{V}$

图 d 中, 对理想电流源, 有 $i = -2\text{A}$ 。

5. 根据图 1-3-4 所示电路回答下列问题:

(1) 设 $i = -2\text{mA}$, $u = -6\text{V}$, R 为何值?

(2) 设 $u = -6\text{V}$, $R = 30\Omega$, R 吸收的功率为多少?

(3) 设 $u = -6\text{V}$, R 吸收的功率为 0.24W , 求电流 i 。

解 (1) $R = \frac{u}{i} = \frac{-6}{-2 \times 10^{-3}} \Omega = 3\text{k}\Omega$

(2) 电阻元件吸收的功率 $p = \frac{u^2}{R} = \frac{(-6)^2}{30} \text{W} = \frac{36}{30} \text{W} = 1.2\text{W}$

(3) 电阻元件吸收的功率 $p = ui$ (u 、 i 关联参考方向下)

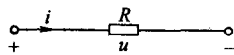


图 1-3-4

$$i = \frac{p}{u} = \frac{0.24}{-6} \text{ A} = -0.04 \text{ A} = -40 \text{ mA}$$

6. 在图 1-3-5 所示各电路中, $U_s = 10\text{V}$, $I_s = 2\text{A}$, $R = 5\Omega$, 求各元件的电流、电压和功率状态。

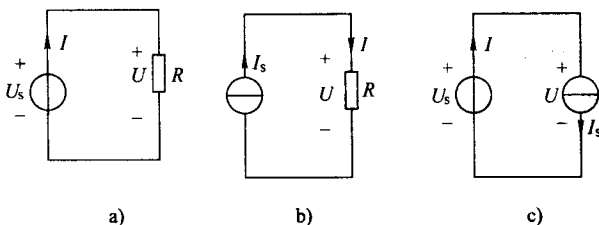


图 1-3-5

解

图 a 中, $I = \frac{U_s}{R} = \frac{10}{5} \text{ A} = 2\text{A}$, $U = U_s = 10\text{V}$

所以, 电压源 U_s 的电压为 10V , 电流为 2A , 方向如图; $P_{U_s} = U_s I = 10 \times 2\text{W} = 20\text{W}$ 。由于 U_s 、 I 处于非关联参考方向, 所以电压源发出功率 20W ;

电阻 R 的电压为 10V , 电流为 2A , 方向如图, $P_R = UI = 10 \times 2\text{W} = 20\text{W}$, 由于 U 、 I 处于关联参考方向, 所以电阻吸收功率 20W 。

图 b 中, $I = I_s = 2\text{A}$, $U = RI = 5 \times 2\text{V} = 10\text{V}$

所以, 电流源的电压为 10V , 电流为 2A , 方向如图; $P_{I_s} = UI_s = 10 \times 2\text{W} = 20\text{W}$, 由于 U 、 I_s 处于非关联参考方向, 所以电流源发出功率 20W ;

电阻的电压为 10V , 电流为 2A 。方向如图, $P_R = UI = 10 \times 2\text{W} = 20\text{W}$, 由于 U 、 I 处于关联参考方向, 所以电阻吸收功率 20W 。

图 c 中, $U = U_s$, $I = I_s$

电压源的电压为 10V , 电流为 2A , 方向如图, $P_{U_s} = U_s I = 10 \times 2\text{W} = 20\text{W}$, 由于 U_s 、 I 处于非关联参考方向, 所以电压源发出功率 20W ;

电流源的电压为 10V , 电流为 2A , 方向如图, $P_{I_s} = U_{I_s} = 10 \times 2\text{W} = 20\text{W}$, 由于 U 、 I_s 处于关联参考方向, 所以电流源吸收功率 20W 。

7. 计算如图 1-3-6 所示电路中各元件的功率, 判断是吸收还是发出功率, 并校验功率平衡关系。

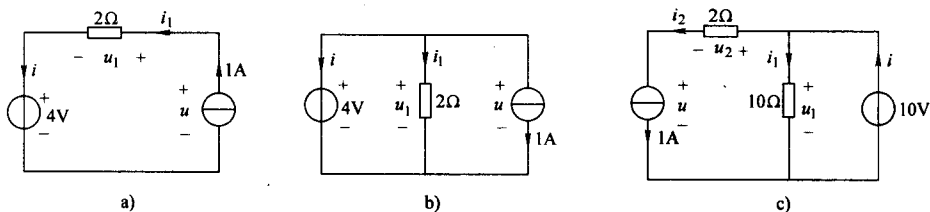


图 1-3-6