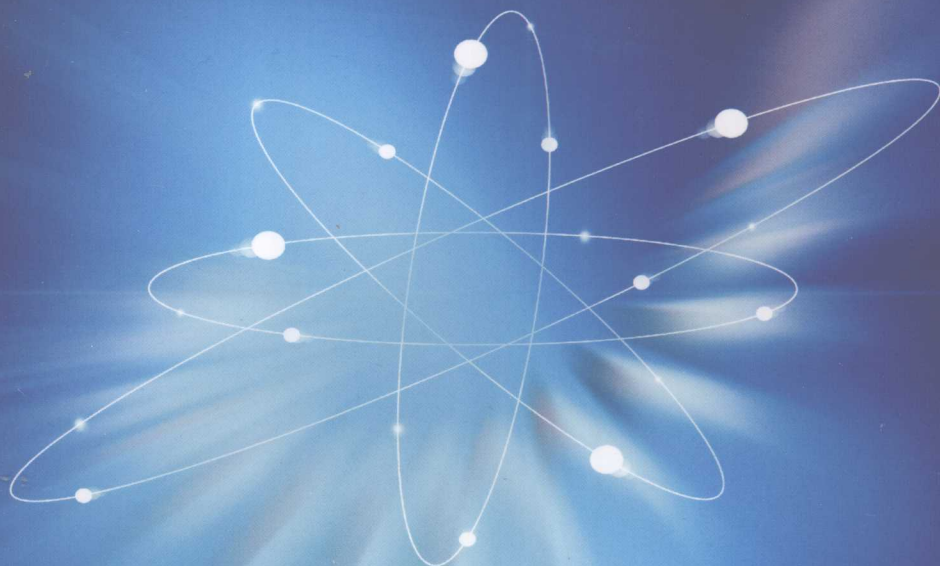




■ ■ ■ ■ 高 等 学 校 教 学 参 考 书 ■ ■ ■ ■

电路学习指导

Dianlu Xuexi Zhidao

主编 姚素芬



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内容简介

本书是根据教育部《高等学校电工电子技术课程教学基本要求》编写而成的。本书可作为高等院校工科专业及相关专业的教材，也可供从事电工电子技术工作的工程技术人员参考。本书共分五章，第一章为电路的基本概念和基本定律，第二章为电路的暂态分析，第三章为交流电路的分析，第四章为三相电路的分析，第五章为磁路和变压器。本书可作为高等院校工科专业及相关专业的教材，也可供从事电工电子技术工作的工程技术人员参考。

电路学习指导

主编 姚素芬

编者 王光艳 李海丰

郭会娟 孙云山



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

地址：天津市南开区卫津路89号 邮编：300072 电话：(022) 23523647 网址：www.tjupress.com

发行：天津大学书店 电话：(022) 23523647

内容简介

本书以教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会制定的“电路理论、电路分析课程教学基本要求”为依据,参考国内外电路理论、电路分析经典教材,针对电类专业学生在学习电路分析课程时遇到的难以理解的概念、容易混淆的内容以及经常出现错误的环节进行了深入的阐述。全书共分17章,分别为:电路模型和电路定律,电阻电路的等效变换,电阻电路的一般分析,电路定理,含有运算放大器的电阻电路,一阶电路,二阶电路,相量法,正弦稳态电路的分析,含有耦合电感的电路,三相电路,非正弦周期电流电路和信号的频谱,拉普拉斯变换,网络函数,电路方程的矩阵形式,二端口网络,非线性电路分析。每章均从教学要点及难点、典型例题解析、相关知识扩展、练习与思考四部分进行总结、分析、释疑、解惑,并给出参考答案。

本书可作为电类专业学生学习电路课程的辅导教材或参考书,也可作为报考电类专业研究生的复习参考书以及相关专业师生和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电路学习指导/姚素芬主编;王光艳等编著. —天津:天津大学出版社,2008.8

ISBN 978-7-5618-2728-4

I.电… II.①姚… ②王… 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(2008)第 112807 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
网 址 www.tjup.com
短信网址 发送“天大”至 916088
印 刷 廊坊市长虹印刷有限公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm × 260mm
印 张 18.75
字 数 470 千
版 次 2008 年 8 月第 1 版
印 次 2008 年 8 月第 1 次
印 数 1—3 000
定 价 30.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

序

电路分析理论是电气信息类专业重要的基础课之一。它不但是网络综合的先修课程,也是学习电气信息类专业后续课程的基础。学好电路分析理论,对于提高分析问题、解决问题的能力 and 独立获取知识的本领都具有十分重要的作用。

电路分析理论的特点是内容广泛,内涵丰富,习题类型多且计算量大。要学好电路分析理论,仅凭课堂听讲是不够的,需要认真做练习题。做大量而深入的习题有助于加深理解和巩固电路分析的基本理论和基本概念,而理解基本概念又有助于问题的求解。因此,只有通过大量的练习或训练,才能比较牢固地掌握并熟练运用有关的基本概念和基本分析方法。由姚素芬教授主编的这本书,满足了这一需要。本书不失为一本难得的电路分析辅助教材。该书具有如下特点。

(1)清楚地给出了各章的要点和难点,对应掌握的内容一目了然。

(2)每章给出了典型例题解析。从分析问题入手,引出解题思路和方法,由分析结果导出结论,引导学生从不同层面深入理解电路分析的基本理论,拓宽思路,从而进一步提高分析问题和灵活运用所学知识解决问题的能力。

(3)每章给出了知识扩展。理论联系实际,提出问题并解决问题,使学生了解电路分析理论在工程中的应用。

对于学习电路分析理论课程的学生,本书将是一本很好的参考书和辅助教材。衷心地希望本书能够成为读者学习电路分析理论的良好益友。

滕建辅

2008年5月

前言

本书以教育部高等学校电子信息科学与工程类基础课程教学指导分委员会制定的“电路理论、电路分析课程教学基本要求”为依据,参阅国内外电路理论、电路分析经典教材,采用国际上教材最新编写原则(包括知识结构、单元结构、题材结构)编写而成。全书针对电类专业学生在学习电路分析课程时遇到的难以理解的概念、容易混淆的内容以及经常出现错误的环节作了系统深入的阐述,特别突出了电路分析课程每章中的要点、重点及难点,并通过典型例题分析以及“一题多解和多题一解”的解题方法,引导学生走出解题误区,拓宽解题思路,扩大观察视野,学会举一反三,提高应用知识的能力。全书分 17 章,每章均包含以下四方面内容。

(1)教学要点及难点 简明扼要地叙述各章要点,通过对各章要点的剖析、归纳、总结,帮助学生更好地掌握课程的基本内容和基本要求,理解概念,掌握课程的重点、难点。

(2)典型例题解析 针对每章要点、重点及难点,对有代表性的典型例题进行分析,给出解题思路、方法和注意事项(或结论),帮助学生从不同层面深入理解教材,拓宽分析思路,学会举一反三,提高综合应用电路知识的能力并掌握解题技巧。

(3)相关知识扩展 采用国际上流行的教学方法——PBL(基于实践的学习),以实际应用为线索,提出问题,分析问题,解决问题,扩大知识面,延伸教学内涵,提高学生灵活运用电路知识解决实际问题的技能和自主学习的能力,为后续课程的学习打好基础。

(4)练习与思考 分为两大部分:基础题,着重强调基本概念、基本理论的理解;综合题,着重强调综合分析、灵活运用知识的能力。通过练习激发学生思考问题、正确应用概念、灵活运用知识求解电路问题的能力和分析计算能力。

此外,为了更好地满足教学及选用该教材广大师生的需求,本书在附录中给出了练习与思考题的参考答案,以便读者更深入系统地掌握电路理论的基本知识和基本技能。

本书由姚素芬教授主持并编写了第 1~3 章;王光艳编写了第 4 章、第 8~10 章;李海丰编写了第 15~17 章;郭会娟编写了第 5~7 章、第 11 章;孙云山编写了第 12~14 章及参考答案。滕建辅教授审阅了初稿,并提出许多宝贵意见和建议,谨此表示衷心的感谢。

衷心感谢兄弟院校广大师生对本书的选用和建议,并恳请广大读者提出宝贵意见。错误和不妥之处,欢迎批评指正。

编者

2008 年 3 月

目 录

(051)	.....	4.5
(551)	.....	章 8 第
(551)	.....	1.8
(451)	.....	5.8
(851)	.....	8.8
第 1 章 电路模型和电路定律	.....	(1)
1.1 教学要点及难点	.....	(1)
1.2 典型例题解析	.....	(6)
1.3 相关知识扩展	.....	(11)
1.4 练习与思考	.....	(13)
第 2 章 电阻电路的等效变换	.....	(18)
2.1 教学要点及难点	.....	(18)
2.2 典型例题解析	.....	(22)
2.3 相关知识扩展	.....	(28)
2.4 练习与思考	.....	(31)
第 3 章 电阻电路的一般分析	.....	(36)
3.1 教学要点及难点	.....	(36)
3.2 典型例题解析	.....	(41)
3.3 相关知识扩展	.....	(46)
3.4 练习与思考	.....	(47)
第 4 章 电路定理	.....	(55)
4.1 教学要点及难点	.....	(55)
4.2 典型例题解析	.....	(59)
4.3 相关知识扩展	.....	(73)
4.4 练习与思考	.....	(76)
第 5 章 含有运算放大器的电阻电路	.....	(85)
5.1 教学要点及难点	.....	(85)
5.2 典型例题解析	.....	(86)
5.3 相关知识扩展	.....	(88)
5.4 练习与思考	.....	(89)
第 6 章 一阶电路	.....	(91)
6.1 教学要点及难点	.....	(91)
6.2 典型例题解析	.....	(95)
6.3 相关知识扩展	.....	(106)
6.4 练习与思考	.....	(107)
第 7 章 二阶电路	.....	(113)
7.1 教学要点及难点	.....	(113)
7.2 典型例题解析	.....	(115)
7.3 相关知识扩展	.....	(119)

7.4 练习与思考	(120)
第8章 相量法	(122)
8.1 教学要点及难点	(122)
8.2 典型例题解析	(124)
8.3 相关知识扩展	(128)
8.4 练习与思考	(129)
第9章 正弦稳态电路的分析	(132)
9.1 教学要点及难点	(132)
9.2 典型例题解析	(136)
9.3 相关知识扩展	(153)
9.4 练习与思考	(156)
第10章 含有耦合电感的电路	(163)
10.1 教学要点及难点	(163)
10.2 典型例题解析	(167)
10.3 相关知识扩展	(176)
10.4 练习与思考	(178)
第11章 三相电路	(182)
11.1 教学要点及难点	(182)
11.2 典型例题解析	(183)
11.3 相关知识扩展	(186)
11.4 练习与思考	(188)
第12章 非正弦周期电流电路和信号的频谱	(192)
12.1 教学要点及难点	(192)
12.2 典型例题解析	(194)
12.3 相关知识扩展	(203)
12.4 练习与思考	(204)
第13章 拉普拉斯变换	(207)
13.1 教学要点及难点	(207)
13.2 典型例题解析	(208)
13.3 相关知识扩展	(214)
13.4 练习与思考	(214)
第14章 网络函数	(216)
14.1 教学要点及难点	(216)
14.2 典型例题解析	(217)
14.3 相关知识扩展	(224)
14.4 练习与思考	(225)
第15章 电路方程的矩阵形式	(227)
15.1 教学要点及难点	(227)
15.2 典型例题解析	(230)

15.3 相关知识扩展	(240)
15.4 练习与思考	(242)
第 16 章 二端口网络	(247)
16.1 教学要点及难点	(247)
16.2 典型例题解析	(250)
16.3 相关知识扩展	(259)
16.4 练习与思考	(260)
第 17 章 非线性电路分析	(263)
17.1 教学要点及难点	(263)
17.2 典型例题解析	(264)
17.3 相关知识扩展	(268)
17.4 练习与思考	(270)
附录 参考答案	(273)
参考文献	(289)

第1章 电路模型和电路定律

本章重点介绍电路模型的概念,电压、电流参考方向的概念,吸收、发出电功率的表达式和计算方法,电阻、电容、电感、独立电源和受控电源等电路元件,并在此基础上给出了电路中各支路电压和电流受到的两类约束:①电路元件性质的约束(VCR, Voltage Current Relationship, 亦称电路元件的伏安关系),它仅与元件性质有关,与元件在电路中的连接方式无关;②电路连接方式的约束(亦称拓扑约束),这类约束由基尔霍夫电流定律(节点定律)和基尔霍夫电压定律(回路定律)来体现,这种约束关系与构成电路的元件性质无关。

1.1 教学要点及难点

【本章要点】

1. 电流和电压的参考方向

(1) 参考方向

在电路分析中,因为电流或电压的实际方向有时可能无法确定,也可能是随时间变动的,所以,当涉及某个元件或部分电路的电流或电压时,有必要指定电流或电压的参考方向,即应用人为规定的参考方向表达电流、电压的实际方向。在分析和设计电路时应预先指定参考方向。

(2) 关联参考方向

当元件中流过的电流与端电压的参考方向一致时(即电流从端电压的“+”端流入,从“-”端流出),为关联参考方向。关联参考方向也称为无源符号约定。

(3) 非关联参考方向

当元件中流过的电流与端电压的参考方向相反时,为非关联参考方向。

注 电流、电压的参考方向可以任意假定。

2. 电功率和电能

电功率和电能是反映元件(或部分电路)电能量特征时所用的参量。例如,电源发出电能,电荷在电源处获得电能;电阻吸收电能,电荷在电阻处失去电能等。随着电荷的流动,总伴随着电能和其他形式能量(例如电阻吸收电能发热)的相互转换。

(1) 电功率

电功率为电能对时间的导数,或单位时间内电能的变化,即 $p(t) = \frac{dW(t)}{dt} = u(t)i(t)$ ①。

物理意义:

①反映元件(或部分电路)的性质,即吸收能量(在电路中起负载作用)还是释放能量(在电路中起电源作用)。当 $i(t)$ 和 $u(t)$ 取关联参考方向时,乘积“ $u(t)i(t)$ ”表示元件吸收的电功率。当 $p(t) > 0$ 时,该元件吸收电功率(起负载作用);当 $p(t) < 0$ 时,该元件释放电功率(起电源作用)。当 $i(t)$ 和 $u(t)$ 取非关联参考方向时,乘积“ $u(t)i(t)$ ”表示元件释放的电功率。当 $p(t) > 0$ 时,该元件释放电功率(起电源作用);当 $p(t) < 0$ 时,该元件吸收电功率(起负载作用)。

②反映元件(或部分电路)在单位时间内释放或吸收电能的数值。

(2) 电能

从 t_0 到 t 的时间内,元件吸收的电能 $W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u(t) dq$ 。

物理意义:

①判别无源元件(或电路)与有源元件(或电路)。

在式子 $W = \int_{q(t_0)}^{q(t)} u(t) dq$ 中,若令 $t_0 = -\infty$,且 $W(-\infty) = 0$,则有

$$W = \int_{-\infty}^t u(\xi)i(\xi)d\xi$$

式中,如果在任意时间 t 都存在 $W(t) \geq 0$,则说明时间变化到任意时刻 t 为止,送入该元件(或部分电路)的能量为正值,该元件(或部分电路)为能量的消耗者,这类元件(或部分电路)称为无源元件(或电路)。若存在 t 使 $W(t) < 0$,则该元件(或部分电路)称为有源元件(或电路)。

②判别无损元件(或电路)与有损元件(或电路)。

若存在 $W = \int_{-\infty}^{\infty} u(\xi)i(\xi)d\xi = 0$,即吸收的总能量为零,并且有 $u(-\infty) = u(\infty) = i(-\infty) = i(\infty) = 0$,则称此元件(或部分电路)为无损元件(或电路)。

若存在 $W = \int_{-\infty}^{\infty} u(\xi)i(\xi)d\xi \neq 0$,则称此元件(或部分电路)为有损元件(或电路)。

3. 电路元件

(1) 电阻元件

电阻元件是电阻器、白炽灯、电炉等实际电路器件的理想化模型,各种电阻式传感器也可等效为电阻模型,只不过其阻值常常是变化的(引起阻值变化的量可以是压力、温度、流量、湿度、光强等)。

1) 伏安特性

电阻元件的伏安特性可以用伏安坐标平面上的曲线来表示。线性时不变电阻元件的伏安

① 在 $i(t)$ 和 $u(t)$ 取关联参考方向时:设 $p(t) = u(t)i(t)$,若 $p(t) > 0$,则该元件吸收能量(起负载作用);若 $p(t) < 0$,则该元件释放能量(起电源作用)。在 $i(t)$ 和 $u(t)$ 取非关联参考方向时:设 $p(t) = -u(t)i(t)$,若 $p(t) > 0$,则该元件吸收能量(起负载作用);若 $p(t) < 0$,则该元件释放能量(起电源作用)。

特性曲线是一条通过伏安坐标平面原点的直线(注:线性电阻元件的阻值是常量)。非线性时不变电阻元件的伏安特性曲线为非直线(注:非线性电阻元件的阻值是变量)。

电阻电流与端电压取关联参考方向时, $u = Ri^{\text{①}}$ (或 $i = Gu$)。

电阻电流与端电压取非关联参考方向时, $u = -Ri$ (或 $i = -Gu$)。

2) 电功率与电能

电阻元件消耗的电功率为

$$p = ui = Ri^2 = Gu^2$$

上式说明,在 $R > 0$ (或 $G > 0$) 的情况下,电阻元件消耗的电功率始终大于零,这样的电阻元件是耗能元件。

从能量角度分析,直到 t 时刻电阻消耗的电能

$$W = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^t u(\xi) i(\xi) d\xi = R \int_{-\infty}^t i^2(\xi) d\xi = G \int_{-\infty}^t u^2(\xi) d\xi$$

上式说明,在 $R > 0$ (或 $G > 0$) 的情况下,电阻元件在任一时刻 t 以前都是从电路中吸收能量的,是无源元件;且不能始终为零,说明是有损元件。当 $R < 0$ (参见第2章例2-7)时,称之为负电阻元件,负电阻元件实际上是一个发出电能的元件。如果要获得这种元件,一般需要专门设计。

(2) 电容元件

电容元件是由被绝缘体(介质)隔开的两个导电平板组成,具有保存电荷、储存电场能量的特性。

1) 线性时不变电容

线性时不变电容的电容量 C 为常数。在任何时刻 t , 其端电压 $u(t)$ 与元件所储存的电荷 $q(t)$ 成正比,即 $q(t) = Cu(t)$ 。电荷和电压特性是通过 $q-u$ 坐标平面原点的一条直线,又称库伏特性曲线。

电容电流与端电压取关联参考方向时, $i = C \frac{du}{dt}$ 。

电容电流与端电压取非关联参考方向时, $i = -C \frac{du}{dt}$ 。

电容电流与端电压取关联参考方向时,其伏安关系为

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\xi) d\xi + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi$$

式中, $u(t_0)$ 为 t_0 时刻电容的电压。该式表明: t 时刻电容端电压等于 t_0 时刻的电压加上 t_0 到 t 时间间隔内增加的电压。可见电容是记忆元件。其物理意义为:电容端电压是对 t 时刻以前电容电流的累积,它不仅与此时刻的电流值有关,而且与此时刻以前电流的全部历史值有关,故电容具有记忆性质。

2) 电功率

电容元件的电功率为

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt}$$

① 本书中通常把 $u(t)$ 、 $i(t)$ 、 $p(t)$ 等简写为 u 、 i 、 p 等。

3) 储存的电场能量

从 $-\infty$ 到 t 时刻, 电容元件吸收的电场能量为

$$W_C = \frac{1}{2} C u^2(t)$$

式中, C 为正值, 无论 $u(t)$ 为何函数, 到 t 时刻为止, 电容元件吸收的能量 $W(t) > 0$, 因此, 电容是一个无源元件。

电容在某时刻 t 吸收的能量取决于此时刻的电压 $u(t)$ 值。当电压减小时, 储存在电容元件中的能量也减小, 即电容向电路释放能量。当电压减到零时, 能量全部释放, 电容释放的总能量等于原来吸收的总能量, 能量没有被消耗, 说明电容是无损元件。电容元件吸收的能量以电能的形式储存在相关的电场中, 说明电容又是储能元件。

(3) 电感元件

电感元件模拟的是实际线圈, 反映了电流产生磁通和磁场能量储存的物理现象, 将线圈的磁特性抽象为电感元件。

1) 线性时不变电感

线性时不变电感元件的电感量 L 为常数。在任何时刻 t , 线性时不变电感元件电流 i 与磁通链 Ψ 成正比关系, 即 $\Psi(t) = Li(t)$ 。磁通链和电流特性是通过 $\Psi-i$ 坐标平面原点的一条直线, 又称韦安特性曲线。

电感电流与端电压取关联参考方向时, $u = L \frac{di}{dt}$ 。

电感电流与端电压取非关联参考方向时, $u = -L \frac{di}{dt}$ 。

电感电流与端电压取关联参考方向时, 其伏安关系为

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\xi) d\xi = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u(\xi) d\xi + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi$$

式中, $i(t_0)$ 为 t_0 时刻电感的电流。该式表明: t 时刻流过电感的电流等于 t_0 时刻的电流加上 t_0 到 t 时间间隔内增加的电流。可见电感是记忆元件。其物理意义为: 电感中流过的电流是对 t 时刻以前电感端电压的累积, 它不仅与此时刻的电压值有关, 而且与此时刻以前电压的全部历史值有关, 故电感具有记忆性质。

2) 电功率

电感元件的电功率为

$$p = ui = Li \frac{di}{dt}$$

3) 储存的磁场能量

t 时刻电感储存的磁场能量等于它吸收的能量 $W_L = \frac{1}{2} Li^2(t)$, 说明电感是无源、储能元件。电感元件释放的能量等于原来吸收的总能量, 能量没有被消耗, 说明电感是无损元件。

(4) 电压源和电流源

电压源和电流源是两个理想化的电路元件, 其物理原型为实际电源。例如干电池、发电

机、信号源等可等效成电压源的形式,光电池^①可等效成电流源的形式,它们是二端有源元件。

电压源说明:由于流过电压源的电流不是由它本身所决定,而是由与之连接的外电路决定,电流可以从不同的方向流过电压源,因此电压源既可以对外电路发出电功率(起电源作用),也可以从外电路吸收电功率(起负载作用)。

电流源说明:由于电流源的端电压不是由它本身所决定,而是由与之连接的外电路决定,端电压的方向就可能有两种情况,因此电流源既可以对外电路发出电功率(起电源作用),也可以从外电路吸收电功率(起负载作用)。

电压源和电流源发出的电功率均可表达为

$$p(t) = u(t)i(t)$$

(5)受控源

受控源也称为非独立源。受控电压源的电压和受控电流源的电流并不是独立存在,而是受其他部分支路的电压或电流的控制。受控源是一种四端元件。

受控源与独立源在电路中的作用不同。独立源是电路的输入,表示外界对电路的作用,电路中的电压和电流是由独立源起激励作用的。受控源表示电路中一条支路的电压或电流受另一条支路电压或电流的控制,反映了电路中一部分的变量与另一部分电路间的耦合关系,在电路中不起激励作用。处理时有时可依据独立源处理,有时也可依据电阻处理,所以受控源具有两重性,即电源性和电阻性。

4. 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律包括电流定律(KCL, Kirchhoff's Current Law, 又称节点定律, 针对节点而言)和电压定律(KVL, Kirchhoff's Voltage Law, 又称回路定律, 针对回路而言)。

(1)KCL定律

定律内容 在集中参数电路中,任何时刻 t ,对任意节点,流入该节点所有支路电流的代数和为零。该定律建立在电荷守恒的基础上。数学表达式为

$$\sum i(t) = 0 \quad \text{或} \quad i_{\text{出}} = i_{\text{入}}$$

上述两式从不同的角度表达了KCL。

推广 可将KCL从一个节点推广至一个封闭面。即:在任何时刻,流入(或流出)封闭面支路电流的代数和恒为零,封闭面也称广义节点。

(2)KVL定律

定律内容 在集中参数电路中,在任何时刻 t ,沿任意回路的所有支路电压的代数和恒为零。该定律建立在能量守恒的基础上。数学表达式为

$$\sum u(t) = 0 \quad \text{或} \quad \sum u_{\text{降}} = \sum u_{\text{升}}$$

上述两式从不同的角度表达了KVL。

推广 可将KVL从一个回路推广至一段电路。

(3)基尔霍夫定律中的符号说明

在运用基尔霍夫定律时,要注意两套符号。

运用KCL时:其一是方程中各项前的正、负符号,其正负取决于电流参考方向与节点的相

^① 光电池的采光极板接受一定的光通量时,在一定的电压范围内,其电流几乎不变,相当于一个电流源。

对关系(如以流出为正,流入为负);另一是电流本身数值的正、负号,其正负取决于电流实际方向与参考方向是否一致。

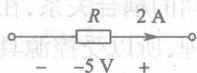
运用 KVL 时:其一是方程中各项前的正、负符号,其正负取决于各元件电压降的参考方向与所选的绕行方向是否一致,一致取正号,反之取负号;另一是电压本身数值的符号,其正负取决于电压实际方向与参考方向是否一致(参见例 1-6)。

【本章难点】

- ①电压、电流的实际方向与参考方向的关系。
- ②电功率和电能的计算及电路元件(或部分电路)性质的判断。
- ③电容、电感的特性。
- ④受控源的特性及其理解。
- ⑤运用基尔霍夫定律时涉及的两套符号。

1.2 典型例题解析

【例 1-1】写出例 1-1 题图所示电路的 VCR 表达式,并求 R 的数值。



例 1-1 题图

分析 在关联参考方向下,电阻中流过的电流与电阻电压可表示为: $u = iR$;在非关联参考方向下,可表示为: $u = -iR$ 。

解 图中,电阻中流过的电流与电阻电压为非关联参考方向,则

$$u = -iR$$

$$\text{即} \quad -5 = -2R$$

$$\text{得} \quad R = \frac{-5}{-2} = 2.5 \, \Omega$$

注 引入了参考方向的概念后,电路元件的电压、电流参考方向之间出现了关联参考方向与非关联参考方向两种情况,体现在电路元件的 VCR 方程中。电压、电流参考方向之间是否关联与电压或电流本身数值的正负无关。

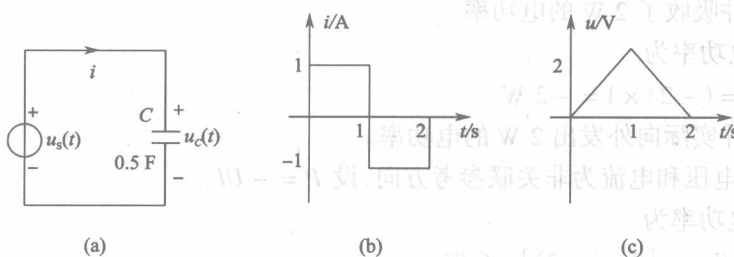
【例 1-2】在例 1-2 题图(a)所示电路中,电容中流过的电流波形如图(b)所示,求电容电压,画出电压波形,并计算 $t = 0$ 、 $t = 1 \text{ s}$ 、 $t = 2 \text{ s}$ 时电容的能量。

分析 在关联参考方向下,电容中流过的电流与电容电压可表示为: $i(t) = C \frac{du_c}{dt}$;在非关联参考方向下可表示为: $i(t) = -C \frac{du_c}{dt}$ 。

解 根据题目给定的电流波形,其随时间变化的函数为

$$i(t) = C \frac{du_c}{dt} = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & 0 < t < 1 \text{ s} \\ -1 & 1 \text{ s} < t < 2 \text{ s} \\ 0 & t > 2 \text{ s} \end{cases}$$

由 $i(t) = C \frac{du_c}{dt}$, 得



例 1-2 题图

$$0 \leq t \leq 1 \text{ s} \quad u_c(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 0 d\xi + \frac{1}{C} \int_0^t 1 d\xi = 2t$$

$$1 \text{ s} \leq t \leq 2 \text{ s} \quad u_c(t) = u(1) + \frac{1}{0.5} \int_1^t (-1) d\xi = 4 - 2t$$

$$t \geq 2 \text{ s} \quad u_c(t) = u(2) + \frac{1}{0.5} \int_2^t 0 d\xi = 0$$

电压的波形如例 1-2 题图 (c) 所示。

$$t = 0 \text{ 时电容储存的电能为: } W_c(0) = \frac{1}{2} C u^2(0) = 0$$

$$t = 1 \text{ s 时电容储存的电能为: } W_c(1) = \frac{1}{2} C u^2(1) = \frac{1}{2} \times (0.5 \times 2^2) = 1 \text{ J}$$

$$t = 2 \text{ s 时电容储存的电能为: } W_c(2) = \frac{1}{2} C u^2(2) = 0$$

【例 1-3】 计算例 1-3 题图所示电路的电功率。图(a)

中: (1) $I = 1 \text{ A}$, $U = 2 \text{ V}$; (2) $I = 1 \text{ A}$, $U = -2 \text{ V}$ 。图(b)中:

(1) $I = -2 \text{ A}$, $U = 3 \text{ V}$; (2) $I = -2 \text{ A}$, $U = -3 \text{ V}$ 。

解法一 在图(a)中, 电压和电流为关联参考方向, U 与 I 的乘积表示该元件吸收的电功率。

(1) 元件吸收的电功率为

$$P = UI = 1 \times 2 = 2 \text{ W}$$

(2) 元件吸收的电功率为

$$P = UI = (-2) \times 1 = -2 \text{ W}$$

计算结果为负值, 表明该元件向外发出 2 W 的电功率。

在图(b)中, 电压和电流为非关联参考方向, U 与 I 的乘积表示该元件发出的电功率。

(1) 元件发出的电功率为

$$P = UI = 3 \times (-2) = -6 \text{ W}$$

元件发出的电功率为负值, 表明其实际吸收了 6 W 的电功率。

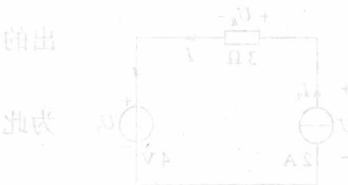
(2) 元件发出的电功率为

$$P = UI = (-3) \times (-2) = 6 \text{ W}$$

解法二 在图(a)中, 电压和电流为关联参考方向, 设 $P = UI$ 。

(1) 元件的电功率为

$$P = UI = 1 \times 2 = 2 \text{ W}$$



例 1-3 题图

$P > 0$, 表明该元件吸收了 2 W 的电功率。

(2) 元件的电功率为

$$P = UI = (-2) \times 1 = -2 \text{ W}$$

$P < 0$, 表明该元件实际向外发出 2 W 的电功率。

在图(b)中, 电压和电流为非关联参考方向, 设 $P = -UI$ 。

(1) 元件的电功率为

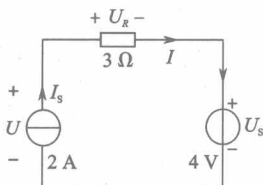
$$P = -UI = -[3 \times (-2)] = 6 \text{ W}$$

$P > 0$, 表明该元件实际吸收了 6 W 的电功率。

(2) 元件的电功率为

$$P = -UI = -[(-3) \times (-2)] = -6 \text{ W}$$

$P < 0$, 表明该元件向外发出 6 W 的电功率。



例 1-4 题图

【例 1-4】 计算例 1-4 题图所示电路中的电流 I 和独立电源发出的电功率, 判断电路中各元件的性质。

分析 理想电流源的电流恒定, 与之串联的支路中的电流均为此电流, 图中 $I = I_s$ 。

解 电路为一个单回路, 其电流 I 等于电流源电流, 即

$$I = I_s = 2 \text{ A}$$

由欧姆定律得电阻上的端电压为

$$U_R = 3I = 6 \text{ V}$$

电流源两端的电压等于电阻上的电压与电压源的电压之和, 即

$$U = U_R + U_s = 6 + 4 = 10 \text{ V}$$

电流源的电功率为

$$P_{I_s} = -UI_s = -10 \times 2 = -20 \text{ W}$$

$P_{I_s} < 0$, 表明电流源发出电功率, 向外释放能量。

因电压源的电流由外电路决定, 其值为 2 A。

电压源的电功率为

$$P_{U_s} = U_s I = 4 \times 2 = 8 \text{ W}$$

$P_{U_s} > 0$, 表明电压源吸收电功率, 吸收能量。

注 电路中, 电流源确实发出电功率, 而电压源实际上是在吸收电功率, 这时的电压源已成为电流源的“负载”。

【例 1-5】 例 1-5 题图所示电路中: (1) 分别求 I_s 、 U_s 两电源产生的电功率 P_{I_s} 、 P_{U_s} ; (2) 若电阻为零, 问(1)中所求的电功率如何变化?

分析 理想电压源电压 U_s 为恒定值 8 V, 它与 15 A 理想电流源串连, 电流恒定, 因此电压源 U_s 产生的电功率 P_{U_s} 为一定值, P_{U_s} 不随电阻的数值变化而改变。理想电流源电流 I_s 恒定为 10 A, 其两端的电压 U 由外电路决定。电阻是理想电流源外电路的一部分, 当电阻的数值变化时 U 将随之改变, 因此电流源 I_s 产生的电功率 P_{I_s} 也将随着电阻数值的变化而变化。

解 (1) 因 U_s 所标极性与流经它的 15 A 电流的流向属关联参考方向, 所以电压源 U_s 产

生的电功率为

$$P_{U_s} = -U_s \times 15 = -8 \times 15 = -120 \text{ W}$$

由 KCL 得

$$I = 15 - 10 = 5 \text{ A}$$

对回路 1, 由 KVL 得

$$U = -2I + 12 + 6 = -2 \times 5 + 12 + 6 = 8 \text{ V}$$

因 I_s 的流向与它两端的电压 U 所标极性属非关联参考方向, 所以电流源产生的电功率

$$P_{I_s} = UI_s = 8 \times 10 = 80 \text{ W}$$

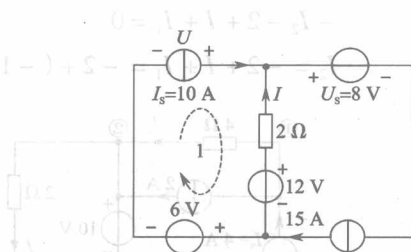
(2) 当电阻为零时, U_s 与流经它的电流均不发生变化, 所以它产生的电功率不变化, 仍为 -120 W 。而当电阻为零时, 电流源 I_s 两端的电压为

$$U = -0 \times 5 + 12 + 6 = 18 \text{ V}$$

此时电流源产生的电功率为

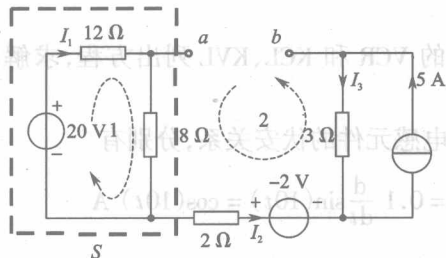
$$P_{I_s} = UI_s = 18 \times 10 = 180 \text{ W}$$

注 电压源 U_s 产生的 -120 W 电功率即是它吸收 120 W 电功率, 电压源 U_s 处于被充电状态, 这时的电压源 U_s 已成为其他产生正电功率电源的“负载”。可根据电流和电压的参考方向以及计算电功率的相应表达式来判别电路中电源实际起电源作用还是负载作用。



例 1-5 题图

【例 1-6】求例 1-6 题图所示电路中的电压



例 1-6 题图

U_{ab} 。

分析 由图可见, 自 a 点沿任一条绕行路径至 b 点, 沿途各段电路电压的代数和即为所求电压。

解 设电流为 I_1 、 I_2 、 I_3 , 并作封闭曲面 S 如图所示, 由 KCL 推广可知: $I_2 = 0$, $I_3 = 5 \text{ A}$ 。

对回路 1, 由 KVL 和欧姆定律得

$$I_1 = \frac{20}{12 + 8} = 1 \text{ A}$$

对回路 2, 由 KVL 推广得

$$U_{ab} = 8I_1 + 2I_2 + (-2) - 3I_3 = 8 \times 1 + 2 \times 0 - 2 - 3 \times 5 = -9 \text{ V}$$

注 上式括弧内 2 前面的负号是由于电压实际方向与参考方向不一致产生的, 而 $3I_3$ 前面的负号却是由于所选回路绕行方向与元件电压参考方向不一致而产生的。所以, 在运用基尔霍夫定律时, 一定要注意两套符号。

【例 1-7】求例 1-7 题图所示电路中的电流 I 和 I_2 。

解 阻值 2Ω 的电阻两端的电压等于 10 V 电压源的电压, 根据欧姆定律有

$$I_1 = \frac{10}{2} = 5 \text{ A}$$

对节点③, 由 KCL 列写电流方程为

$$I_s = I + I_1 \quad I = I_s - I_1 = 4 - 5 = -1 \text{ A}$$

对节点②, 由 KCL 列写电流方程为