



电路原理

导学导教及习题解答

朱桂萍 于歆杰 陆文娟 刘秀成 编著

清华大学出版社

电 路 原 理

导学导教及习题解答

朱桂萍 于歆杰 陆文娟 刘秀成 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是清华大学《电路原理》(于歆杰、朱桂萍、陆文娟编著,清华大学出版社,2007)教材的配套辅导书,结合作者多年的教学经验和学生反馈意见编写而成。书中仍按主教材分为6章,每章再以“教”与“学”过程中的多个难点和课程重点作为论题进行深入分析,并对教材中的相关知识点做了延伸和拓展(如 MOSFET 和 Op-Amp 的应用)。本书还对教材中的所有习题给出了详细解答,指出了每一道习题的考查重点。

本书既可以作为普通高等学校电气工程、电子工程、自动化、计算机、微电子、软件工程、生物医学工程等专业本科生学习电路原理课程的复习指导书,也可作为从事电路原理课程教师的教学参考书。此外,书中介绍的内容对于准备参加研究生入学考试的考生和从事与电路相关专业的研究人员来说,也具有参考价值。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电路原理导学导教及习题解答/朱桂萍,于歆杰,陆文娟,刘秀成编著. —北京:清华大学出版社,2009.3

ISBN 978-7-302-19223-7

I. 电… II. ①朱… ②于… ③陆… ④刘… 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(2009)第 001204 号

责任编辑:邹开颜

责任校对:王淑云

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京市人民文学印刷厂

装 订 者:三河市兴旺装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:18.75 字 数:454 千字

版 次:2009 年 3 月第 1 版 印 次:2009 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:29.80 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:019639-01

前言

FOREWORD

本书是电路原理课程的辅导读物。它与其他教学资料一起,构成了清华大学电路原理课程的立体化教材体系。这些资料包括:

- (1) 主教材:《电路原理》^①。
- (2) 教学和学习辅导:《电路原理导学导教及习题解答》(即本书)。
- (3) 习题集:《电路原理学习指导与习题集》^②。
- (4) 课件:《电路原理电子课件》^③。

(5) 教学网站: <http://www.eea.tsinghua.edu.cn/pec>,其中包括网络课堂和2007年秋清华大学电路原理课程的全程录像等多媒体资料。

整套资料的完成以教育部“高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程”教学指导分委员会编写的电子信息科学与电气信息类平台课程教学的基本要求为依据。对于电路分析基础课程(信息学院本科生学习,64学时),上述5项内容构成了完整的教学支撑环境;对于电路理论基础课程(电机系本科生学习,96学时),则将主教材替换为《电路原理(第2版)》^④即可。

写作本书的目的主要可以归结为以下三点。

1. 说意犹未尽之话

毋庸置疑,电路原理中有些知识点是需要颇费笔墨才能阐述清楚的。但如果在主教材中对每个知识点都言之务尽,则定会使整本教材显得冗长而重点不清,因此作者在编写过程中不得不有所取舍和保留。篇幅的减少必然带来读者理解上的困难,而且由于某些章节的编排与目前国内其他电路原理教材差别较大,因此很有必要向读者解释清楚作者的写作初衷。本书无疑是畅谈这些意犹未尽之话的最佳去处。

2. 答似是而非之疑

电路原理这门课程的一大特点就是知识点特别多,而且很多知识点相互之间关系紧密。这些知识点往往在学生的若干后续课程中被反复应用。因此对基本概念有清晰而正确的理解是电路教学的基本要求之一。遗憾的是,作者在课下与学生交流或面试研究生的过程中

① 于歆杰,朱桂萍,陆文娟编著. 电路原理. 清华大学出版社,2007

② 徐福媛,刘秀成,朱桂萍编著. 电路原理学习指导与习题集. 清华大学出版社,2005

③ 刘秀成,于歆杰,朱桂萍,陆文娟著. 电路原理电子课件. 清华大学出版社,2008年(该课件可向主教材用量较大的高校任课教师免费赠送。请感兴趣的读者与清华大学出版社联系)

④ 江缉光,刘秀成主编. 电路原理(第2版). 清华大学出版社,2007

经常发现,学生能够快速而准确地做对习题,但对基本概念的理解却比较肤浅,经不起推敲。所以有必要对电路原理中学生理解时容易似是而非的一些基本概念进行深入的剖析。

3. 解章后练习之题

尽管作者始终认为题海战术对学好电路原理课程是不适用的,但认真完成适量的练习是学好电路原理的必要手段。学电路,切忌眼高手低、浅尝辄止,务必要踏踏实实算出结果来。关于这一点,在主教材中已有较多讨论,这里就不再赘述。本书给出所有主教材章后习题的完整解答,供读者参考。

本书的写作目的决定了其写作风格。在内容的组织和编排上也许会稍显松散,有点“信马由缰”的感觉,但所有的论题都是有感而发。它们汇集了作者在编写主教材和教学过程中的很多体会,基本上都是电路原理课程教学中必须强调的重点或是学生学习过程中容易出错或难以理解的难点,也有些内容需要和后续课程中的若干知识点相互联系起来才能理解得更为深刻,例如第2章和第4章中与MOSFET相关的部分(目录中已经用*标出)。这一部分内容也许并不适合学生阅读,但对于教授电路原理课程的老师来说,却是很有必要搞清楚的。作者非常欣赏清华大学郑君里教授所著《教与写的记忆——信号与系统评注》^①的写作风格,虽然我们不可能具备大师那样举重若轻的高超技巧,但我们笃信“取法于上,仅得为中,取法于中,故为其下”^②,因此这种略显轻松的写作风格是我们乐于尝试的。

本书每一章的若干论题篇幅不等,它们之间的联系并不紧密,有时可能需要一些后面的知识才能读懂前面的内容。从导学的角度看,这也许会给学生造成一些困难;但从本书的另一出发点——导教的角度看,这种阐述方法也许会帮助教师或者已经全部学完本课程的学生更加深刻、正确地认识一些知识点之间的相互联系。

本书的写作分工基本与主教材相同,即朱桂萍主要负责第5、6章的编写,于歆杰主要负责第1、2、4章的编写,陆文娟主要负责第3章的编写,刘秀成对各章均有贡献。正是由于本书具有略显轻松的写作风格,同时并不要求体系完整,因此可以允许教师针对其他内容编写自己感兴趣的话题。

由于作者水平有限,难免存在错漏之处,我们恳切希望读者多多批评指正。联系方式为:朱桂萍,北京市清华大学电机系,100084,010-62794878, gpzhu@tsinghua.edu.cn。

作者

2008年9月于清华园

^① 郑君里,高等教育出版社,2005

^② 李世民《帝范》卷四

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
0 组织结构图	1
1 重读方案	1
2 关于模拟信号、数字信号、采样信号和阶梯信号	1
3 实际电路元件可抽象为集总参数电路模型的几个条件	4
4 电路的基本量和电磁场的基本量	5
参考文献	6
第 2 章 简单电阻电路分析	7
0 组织结构图	7
1 电阻和独立电源的 u 和 i 参考方向设定	7
2 不适当的抽象可能产生病态电路	8
3 电阻电路的灵敏度	9
4 对受控源的讨论	12
5 运算放大器的共模抑制比	14
6 影响运算放大器性能的其他参数	16
7 信号处理电路的输入和输出电阻	17
8 负反馈理想运算放大器电路的分析方法	19
9 从灵敏度角度讨论负反馈对运算放大器的作用	19
10 为什么二端口有两个独立方程	20
11 三端网络与二端口网络	21
12 二端口网络的联接	22
13 如何在数字系统中比较精确地表示信号的值	25
*14 对 MOSFET 电气性能的解释	26
*15 如何用 MOSFET 构成电阻	31
*16 MOSFET 门电路的静态功率(兼论 COMS)	32
17 功率电子中的 MOSFET 结构	33

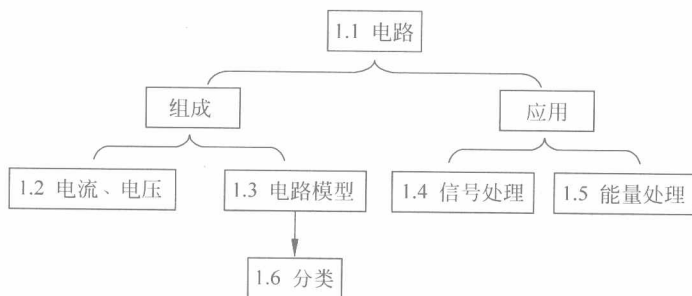
参考文献	35
第3章 线性电阻电路的分析方法和定理	36
0 组织结构图	36
1 一种电路等效变换方法——电源转移	36
2 在应用叠加定理时受控源能单独作用吗	38
3 关于戴维南等效电路的讨论	41
4 割集和割集电压	42
5 应用特勒根定理分析电路时的注意点	45
6 互易定理的第三种形式	47
7 对偶电路中电压源和电流源方向的对应关系	50
参考文献	51
第4章 非线性电阻电路分析	52
0 组织结构图	52
1 非线性电阻的串并联	52
2 为什么 MOSFET 的 SR 模型和 SCS 模型可能没有相同的工作点	53
3 什么是小信号	56
4 小信号法是应用叠加定理吗	57
5 关于小信号法的两个问题	59
6 小信号放大电路的输入和输出电阻	61
7 MOSFET 跟随器	62
*8 MOSFET 差分放大电路	64
9 运算放大器的构成和若干参数	67
*10 MOSFET 的栅极和漏极相连有什么作用	71
11 对4种非线性电阻电路分析方法的总结	74
12 用运算放大器实现更多的运算功能	75
参考文献	78
第5章 动态电路的时域分析	79
0 组织结构图	79
1 线性电路的基本概念	79
2 三要素法的4张图	80

3	MOSFET 反相器的动态过程	83
4	利用积分电路抑制干扰的进一步说明	86
5	示波器探头简介	86
6	从能量的角度讨论升压和降压斩波器的电压变化	88
7	二阶电路的直觉解法	90
8	两个电容(或电感)和电阻构成的二阶电路一定过阻尼	92
9	冲激激励作用下电路初始值的简便求解	93
10	$f(t)\varepsilon(t)$ 和 $f(t)(t \geq 0)$ 的区别	96
11	电容电压的跳变	97
12	电感电流的跳变	99
13	单位冲激函数与任意函数的卷积	100
14	用卷积积分的图形解法确定卷积积分的上下限	102
15	用窗口函数来确定卷积积分的上下限	106
16	常数变易法求特解	108
17	开关电容简介	110
18	运算放大器的转换速率	111
	参考文献	113
 第 6 章 正弦激励下动态电路的稳态分析		114
0	组织结构图	114
1	滤波器中大电容和大电感的实现方法	114
2	低通和积分的关系	116
3	高通和微分的关系	119
4	谐振概念的引入和讨论	120
5	电感线圈的品质因数和电容器的介质损耗角	126
*6	变压器在信号处理领域的应用——开关电源	127
7	最大功率传输问题的进一步讨论	131
8	三绕组理想变压器的分析(安匝平衡)	137
9	从二端口的角度分析三相功率的测量方法	139
10	Y 接电源和 Δ 接电源的对比	145
11	三相系统的接线方式对比	146
12	单相变三相的几种方法	148
	参考文献	150

附录 《电路原理》中的应用实例·····	151
习题解答·····	154
第1章习题解答·····	154
第2章习题解答·····	159
第3章习题解答·····	184
第4章习题解答·····	213
第5章习题解答·····	225
第6章习题解答·····	264

第 1 章 绪 论

0 组织结构图



1 重读方案

一本好的教材应该是常读常新的。这里的“常读”，既包括在学习过程中反复阅读教材的相关章节从而掌握各知识点的实质和相互之间的联系，也包括在一门课程学习结束一段时间后再次阅读教材。通过一段时间的积淀，也许会更深刻地体会作者在写作时的良苦用心。

为使主教材可以是常读常新的，在编写过程中作者努力使之满足读者日后查阅的需要。建议读者学完电路原理课程后重读教材第 1 章；学习模拟电子线路之前重读教材 4.4~4.7 节；学习数字电子线路前重读教材 2.8~2.9 节，学习信号与系统之前重读教材 6.8 节；学习通信电路之前重读教材 1.4 节；学完电磁学和电磁场(电动力学)后重读教材附录 A。

2 关于模拟信号、数字信号、采样信号和阶梯信号

教材的 1.4.1 小节讨论了信号的分类，可以总结为图 1.1。

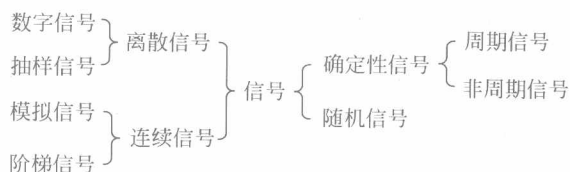


图 1.1 信号的分类

下面来关注图 1.1 中左半部分的分类方式。

图 1.2 给出了几种信号的波形,其中包括教材中并没有提到的时间连续取值离散的阶梯信号。

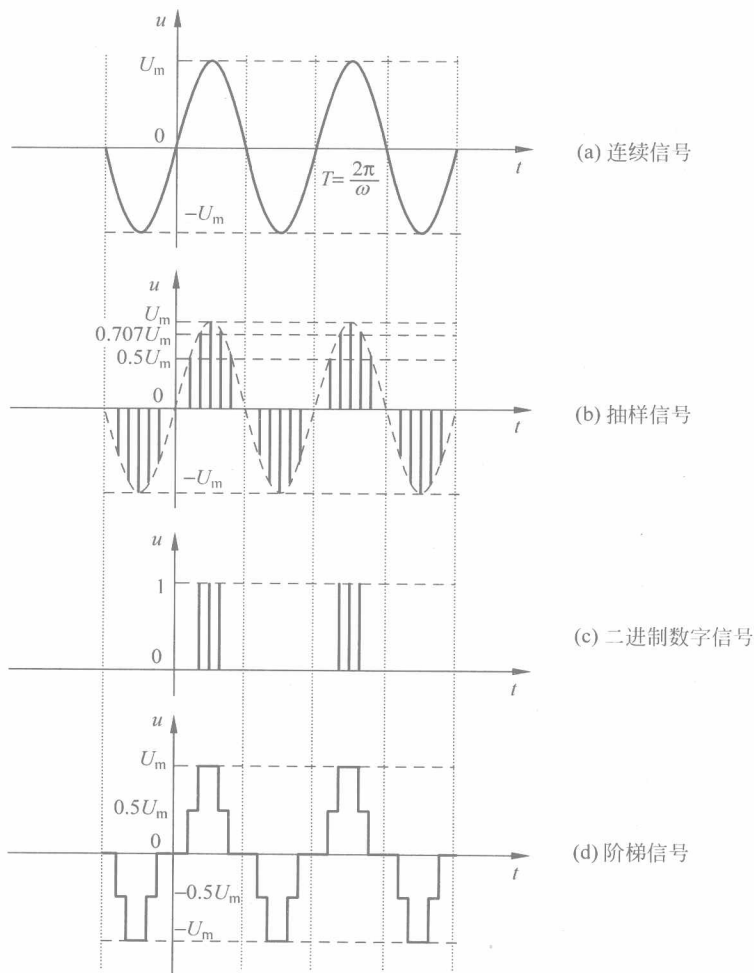


图 1.2 几种信号的波形

图 1.2(a)是自然界中最常见的正弦模拟信号,它的特点是时间和取值均连续。

由于计算机等数字系统均为离散时间系统,因此利用计算机来处理模拟信号的第一步必须对其进行采样。如果每隔一段时间对图 1.2(a)所示信号进行采样,并将这些在离散时间点采集来的连续取值信号作为对图 1.2(a)所示模拟信号的近似,则可以得到图 1.2(b)所示的抽样信号。它的特点是时间离散,取值连续。

为了能够用计算机来处理,除了时间轴上离散采样之外,还需要对采样信号的连续值进行离散化(这个问题将在第2章论题13中详细讨论)。这样得到的信号称为数字信号。它的特点是时间和取值均离散。如果只有两种取值,则称其为二进制数字信号。对图1.2(b)所示采样信号,设置某个阈值($0.707U_m$),认为大于该阈值表示信息1,小于该阈值表示信息0,就可以得到图1.2(c)所示的二进制数字信号,它从 $t=0$ 时起表示信息00111000000000111.....

图1.2(d)所示为阶梯信号,这种信号的特点是时间连续,取值离散,它们在功率电子学(power electronics,也称为电力电子学)中广泛存在。在功率电子学中,通常用“开关”这种非线性元件来控制能量的流动,从而达到处理能量的目的。有一种功率变换方式叫做逆变(或称DC/AC变换),即将直流变换为交流。逆变的基本原理可用图1.3所示电路来说明。

为简单起见,假设负载是纯电阻。由图1.3易知,开关S1、S4闭合,S2、S3断开时, $u=U_s$; S1、S4断开,S2、S3闭合时, $u=-U_s$; S1、S2、S3、S4全部断开时, $u=0$ 。因此负载上的电压是交变的,其波形可能如图1.4所示。无疑,用这种方式实现的交流是非常粗放的,只有0和 $\pm U_s$ 这3种电压。如果希望产生类似于正弦那样的交流,则需要采取其他手段。

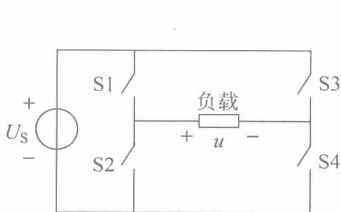


图 1.3 逆变的基本原理^[1]

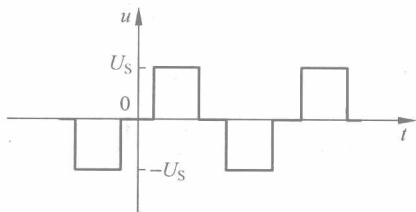


图 1.4 一种可能的逆变输出波形

如果能够产生两个相互错开一定角度的逆变输出波形(图1.5(a)和(b)),然后将其相加,则可得更接近正弦的波形(图1.5(c))。这种方法称为多重化。

由图1.4和图1.5(c)可以看出:这两种波形在时间上是连续的,但在取值上是离散的,每隔一定时间输出就上/下一个“台阶”,因此称为阶梯信号。图1.5(c)输出了0、 $\pm U_s$ 、 $\pm 2U_s$ 共5种电压。相比图1.4所示波形,多重化技术可产生更接近正弦信号的输出。根据教材6.8节的知识可知,图1.5(c)所示波形的谐波分量也更小。

除了上文所说的多重化技术,在电力电子技术中还有其他对正弦近似的手段,如脉冲宽度调制(PWM)等,请参考相关读物,如参考文献[1]。

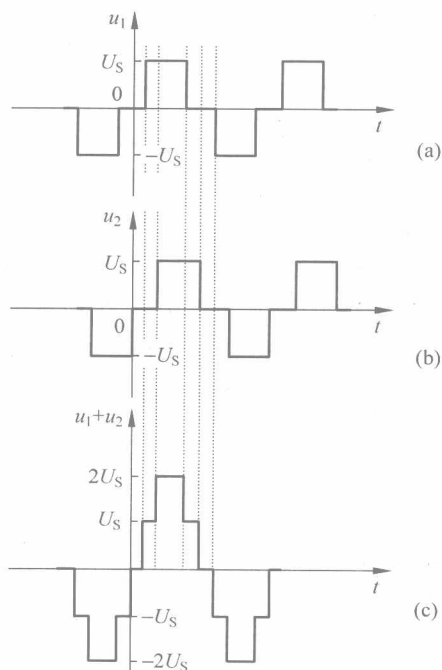


图 1.5 多重化产生更接近正弦的波形

3 实际电路元件可抽象为集总参数电路模型的几个条件

实际电路元件(如电阻器、电容器、电感器、MOSFET、运算放大器等)是人们为了某种目的生产出来的、具有某种电气性能的元件。如何用电路模型来表示这些元件呢?对这个问题的回答需要考虑该实际元件的使用场合和求解问题所需的精度。

从本质上来讲,只有麦克斯韦方程组才能精确地描述所有电气元件中的电磁性质,但列写和求解麦克斯韦方程组在数学上和物理上都是很复杂的事,因此人们往往希望能够对电路元件进行抽象,使其能够用集总参数电路模型来表征,从而可以用电路分析手段求出误差可接受的解。一般来说,一个实际电路元件的电路模型随着该元件的使用场合及问题的求解精度不同而不同。元件的材料、结构、尺寸、是否存在外加场和激励频率等因素都会对元件的电路模型有影响,在这些因素都满足一定条件时,才能用集总参数电路模型来描述实际元件。

材料需要满足的条件是:电阻元件的电导率比周围介质的电导率大很多,电感元件的磁导率比周围介质的磁导率大很多,电容元件的介电常数比周围介质的介电常数大很多。只有满足这些条件,才能确保电流始终在电阻元件中流动,磁场始终维持在电感元件中,电

场始终维持在电容元件中。

结构需要满足的条件是：没有产生强电场和强磁场的结构。特别尖锐的结构可能会在电压和电流并不很大时形成很强的电场或磁场，从而使得该元件无法用集总参数模型来表示。

尺寸需要满足的条件是：元件空间尺度比电源发出的电磁波波长小很多。这一点在教材的 1.6 节第 5 部分有比较详细的讨论。

外加场的约束是：该元件不位于其他电场或磁场中。举例来说，如果一段导线位于某个变化的外加磁场中，则根据法拉第电磁感应定律，在该导线上必然产生感应电动势，但这个电动势却与导线所在的电路无关。因此该导线就不能仅建模为电阻或电阻与电感的串联，必须将外加磁场的影响用独立电压源来建模。

此外，要想用集总参数模型对实际电路元件建模，还需要对电路的工作频率有一定限制。这一点与元件尺寸需要满足的条件类似，在教材的 1.6 节第 5 部分也有比较详细的讨论。

4 电路的基本量和电磁场的基本量

教材附录 A 的最后引用了法肯伯尔格的一幅重要关系图来说明电路基本量和电路基本模型间的关系(图 A9.5)，并据此说明 u 、 i 、 q 和 Ψ 是电路的 4 个基本量。事实上，这 4 个基本量都是所谓的积分量。根据国际电工委员会(IEC)的标准，积分量指的是电磁场中相关量的线、面或体积分，这些相关量有：电场强度 $\mathbf{E}$ ，电通密度 $\mathbf{D}$ ，磁场强度 $\mathbf{H}$ ，磁通密度 $\mathbf{B}$ ，体电荷密度 ρ ，电流密度 $\mathbf{J}$ 等。下面介绍一下这些电磁场量与电路基本量之间的积分关系。

根据静电场的保守性质可定义电位差(即电压)为

$$u_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (1.1)$$

式(1.1)等号右侧的积分表示给定积分路径的方向后的第 2 类曲线积分，式(1.1)给出了 $\mathbf{E}$ 和 u 之间的积分关系。

根据高斯定理，考虑极化后有

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = q \quad (1.2)$$

式(1.2)等号左侧的积分表示正方向向外的闭合曲面的第 2 类曲面积分，右侧的 q 表示该闭合曲面包围的净自由电荷。式(1.2)给出了 $\mathbf{D}$ 和 q 之间的积分关系。

在恒定电流场中，根据电流密度的定义，有

$$I = \iint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.3)$$

式(1.3)等号右侧积分表示给定某个曲面正方向后，电流密度 $\mathbf{J}$ 的第 2 类曲面积分。式(1.3)

给出了 $\mathbf{J}$ 和 I 之间的积分关系。

在恒定磁场中,磁通的定义为

$$\Phi = \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.4)$$

式(1.4)等号右侧积分表示给定某个曲面正方向后,磁通密度 $\mathbf{B}$ 的第2类曲面积分。式(1.4)给出了 $\mathbf{B}$ 和 Φ 之间的积分关系。此外,由于 $\Psi = N\Phi$,式(1.4)实际上也给出了 $\mathbf{B}$ 和 Ψ 之间的积分关系。

根据恒定磁场中的安培环路定律,考虑磁化后有

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad (1.5)$$

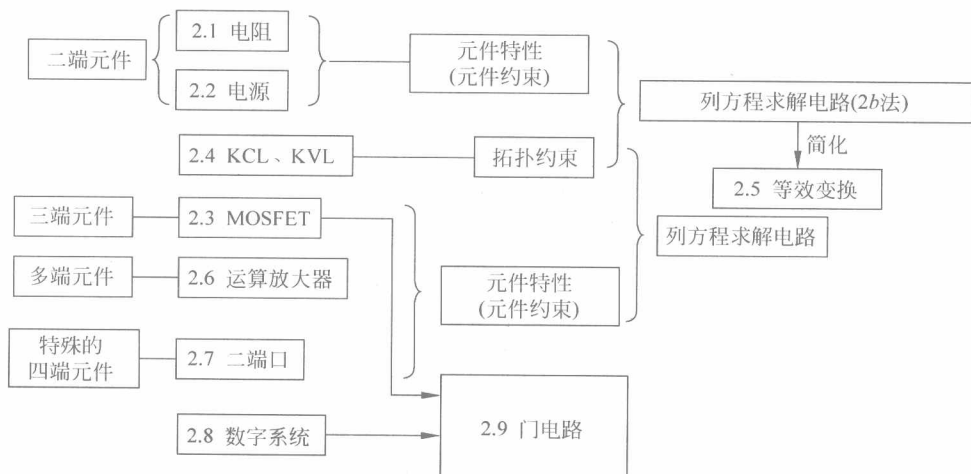
式(1.5)等号左侧积分表示给定积分路径的方向后,磁场强度 $\mathbf{H}$ 的闭合曲线的第2类曲线积分,右侧的 I 表示曲线包围的净电流,电流的参考方向由该闭合曲线方向和右手螺旋定则共同确定。式(1.5)给出了 $\mathbf{H}$ 和 I 之间的积分关系。

参考文献

- [1] 王兆安,黄俊.电力电子技术.第4版.北京:机械工业出版社,2003

第2章 简单电阻电路分析

0 组织结构图



1 电阻和独立电源的 u 和 i 参考方向设定

一般情况下,通常将电阻的 u, i 设为关联参考方向,而对独立电源的 u, i 则采用非关联参考方向。这种设定是符合直觉认识的,即电阻吸收功率,独立电源发出功率(事实上独立电源也可以吸收功率)。

关于元件发出和吸收的功率有两种等效的记忆方法。

法 1 只记关联参考方向下的表达式,即

$$p_{\text{吸}} = ui \quad (2.1)$$

当 u, i 的参考方向非关联时,改变 u, i 中任一变量的符号以表示其在关联参考方向下的取值,再利用式(2.1)进行计算。若计算结果为正,表明元件实际上确实在吸收功率;若计算结果为负,表明元件实际在发出功率。

法 2 只记表达式

$$p = ui \quad (2.2)$$

u, i 取关联参考方向时, p 表示该二端元件吸收的功率,否则就表示其发出的功率。根据上

文所说的设定方法,将电阻的 u 、 i 设为关联参考方向,独立电源的 u 、 i 设为非关联参考方向,则利用式(2.2)求出的就是电阻吸收的功率或电源发出的功率。建议在表达式前明确指明是吸收功率或是发出功率。

对于初学者,作者建议采用第 1 种表达式计算功率。

2 不适当的抽象可能产生病态电路

在对实际电路建模时,如果抽象不适当,就有可能产生病态电路。其典型表现之一就是 KCL 或 KVL 好像不成立了。这并不是电路的基本理论出现了问题,而是建立的电路模型不正确,例如图 2.1 所示的两个电路。

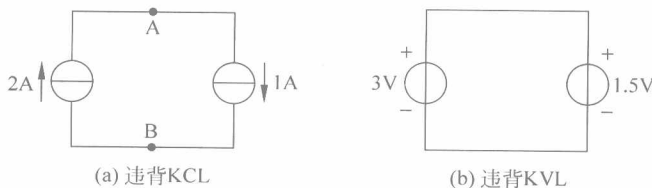


图 2.1 违背 KCL 和 KVL 的病态电路

产生这种病态电路有两个原因,第一是故意编造出的矛盾电路,这不是关心的重点,第二则是由于不适当的抽象。下面以图 2.1(b)所示电路来说明后一种情况。

假设将 2 个 5 号电池串联后与 1 个 5 号电池并联,如图 2.2 所示。

实际这样操作时会在电池中产生很大的电流,容易将电池烧坏,因此一般不允许这样连接。但无论如何,这种连接与违反 KVL 无关。假设每个 5 号电池的内阻为 0.1Ω ,此时对这个实际电路建立的正确的电路模型应该如图 2.3 所示,该电路模型完全可以用 KCL 和 KVL 来分析。

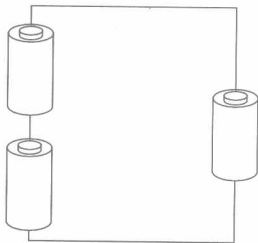


图 2.2 实际电路

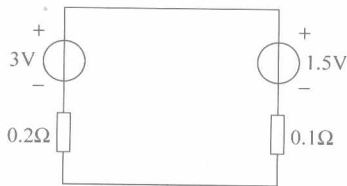


图 2.3 合理抽象的电路模型

当外部电阻比电池内阻大很多的时候,电池内阻可忽略,实际电池可建模为一个理想电压源。但在图 2.2 中,若以左侧两个串联电池作为电源,右侧电池作为外部负载,该条件(外