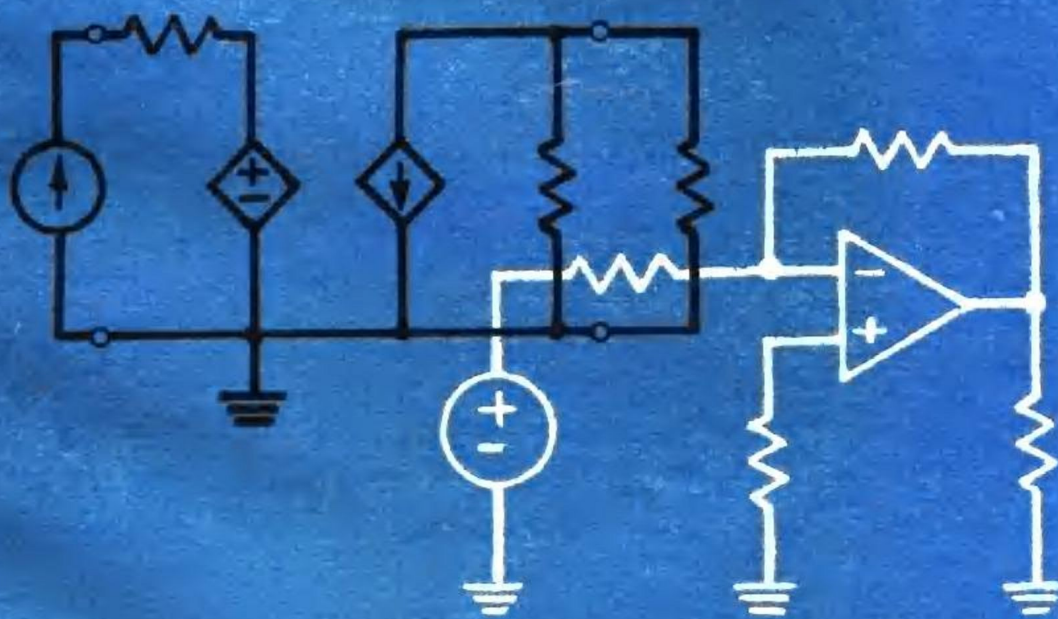


〔美〕M.D.西莱特 著

电路分析与 设计导论

凌宝京 等 译

舒 标 审校



电子科技大学出版社

内 容 提 要

本书是1988年美国出版的工科院校大学生用电路基础理论教科书。全书共十八章,主要是集总参数线性和非时变电路的分析与设计,包括电路元件模型,信号模型,电路的时域与频域分析方法,滤波器设计等基本内容,与我国高等工科院校教材《电路分析基础》相仿。

本书有以下特点:1.增加了《信号与系统》课程及运算放大器的分析计算的部分内容,既对具体实用电路进行了分析,又与后续课程有机相联。2.对重要概念阐述清楚,深入浅出,便于自学。3.在电路原理论述中,列举了大量例题与技巧练习,帮助读者掌握复杂电路分析。

本书在美国一些大学受到教授们的好评,认为“作者对电路分析中许多重要概念给出了有价值的透视与洞察,使本书可读性好。”。本书可作为我国电类大专院校教材与参考书,也可作为电类与非电类工程技术人员及成人高教、电大自学参考书。

Michael D. Ciletti

INTRODUCTION TO CIRCUIT ANALYSIS and DESIGN

Holt, Rinehart and Winston, Inc. 1988

电路分析与设计导论

凌宝京 周敏 王志玉 唐海 译
舒 标 审校

*

电子科技大学出版社出版

(中国成都建设北路二段五号)

四川省青神县印刷厂印刷

四川省新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 27.50 字数 650千字

版次 1991年4月第一版 印次 1991年4月第一次印刷

印数 1—3000册

中国标准书号 ISBN 7—81016—259—4/TN·75

(15452·116)

定价: 8.70元

序 言

《电路分析与设计导论》(Introduction To Circuit Analysis and Design, 1988年出版)是美国科罗拉多(Colorado)大学Michael D. Ciletti教授为电气工程系低年级大学生写的一本教科书。本书内容主要是集总参数线性和非时变电路的分析与设计,包括电路元件模型,信号模型,电路的频域与时域的基本分析方法,滤波器的初等设计等基本内容。该书与我国本科课程教材《电路分析基础》内容相仿,并包含了《信号与系统》课程的部分内容。本书在写法和内容编排上具有特色。第一,作者对电路分析中许多重要概念进行了清楚而形象的阐述,使本书可读性好,便于自学。第二,作者较早地介绍了运算放大器(第4章),并在以后各章中都讨论了包含运放的电路及其分析运算方法。由于运放应用广泛,其外部特性接近于理想电压控制电压源,简单易懂,因此在该书中结合电路分析及早期地介绍运放电路,有利于读者理论联系实际,也有利于学习后续有源电路课程。第三,作者在第2章讨论电路分析方法时,一开始就引入了矩阵方程表示方法,作者在列出各节点的电流方程后,将它们归纳成矩阵方程,使电路特性具有紧凑的数学形式,书写简洁,概念清楚并有利于读者掌握复杂电路的分析。第四,作者在介绍概念和分析方法后,均列举大量例题进行说明,并给出了技巧练习,可使读者熟悉所述概念和方法。各章之后备有大量习题,其中一部分是该章内容的直接应用,另一部分有一定的难度,需要读者对内容有较深入的了解。这些例题与习题选材合适,使本书增色不少。

本书在美国一些大学中获得好评,例如Dayton大学Bernhard M. Schmidt教授的评语是“作者对储能元件的介绍,信号模型的处理和对一阶电路的处理方法都是十分出色的。”“本书是一本理想的自学教材,练习题出得好,难度合适。”;Marguerite大学Susan Reidel教授的评语是“作者对电路分析中许多重要概念给出了有价值的透视与洞察,使本书可读性好。”;其他如Michigan技术大学, Louisiana州大学, Minnesota大学等大学的教授们也都对本书作出了好评。

在八十年代,我国的教材建设取得了很大发展,出版了我国自编的各种类型、各种层次的电路教材,解决了我国大学的用书。但是“他山之石,可以攻玉”,引进和翻译国外有特色的最新教材,对我国的电路教学和教材建设无疑是有益的。如果在内容上进行适当的选择,我认为本书可作为我国电气工程系本科生、大专生的教材和教学参考书。本书由凌宝京副教授,周敏副教授,王志玉副教授等担任翻译,译文正确流畅,可读性佳,是本较好的译书。

黄香馥

一九九〇年四月

于电子科技大学

译者的话

《电路分析与设计导论》是美国1988年出版的一本大学电路基础理论教科书。正如黄香馥教授在序言中介绍的那样，该书在内容取材、编写以及例题、习题等方面都有突出的优点和特色，已在美国一些大学使用并获得好评。书中每一章都有引言、例题、技巧练习、本章提要以及大量习题，有利于读者加深理解与掌握基本内容。我们翻译此书，将它介绍给国内读者，希望有益于我国电路教学与研究工作。

本书前言，第1、2、3、4、17章及附录与英、中文名词对照表由凌宝京译，第5、6、7、8、18章由周敏译，第9、10、11、12、13章由王志玉译，第14、15、16章由唐海译。全书由舒标审校。本书在翻译过程中得到唐明光教授的支持和帮助，在此表示诚挚的感谢。由于我们水平有限，译文中可能有不少谬误之处，恳请读者不吝指正。

前 言

学习电路是学习电子工程其他课程的基础。因此，一个学生学习的的第一门电路课应该既包含丰富的资料，又必须技术上严谨，对学生既有启发性，又有鞭策。

写这本书的目的是为了帮助学生增长洞察电路性能的能力，并给予他们电路设计的入门引导。本书在材料的份量和技术处理的选取上，有时是引导学生去解决描述电路的数学方程，而不必了解它的实际工作情况。这对含有电感器、电容器和运算放大器的电路完全正确。在这些电路中，首要的任务是解微分方程。即使学生有一些微分方程的初步知识，它也不可能包括在电路的应用中。无论那种情况，研究电路的实际性能都可籍助求解电路微分方程的数学运算来完成。本书希望鼓励学生们对电路的实际工作性能进行更深入的探讨，所以在内容的选择，次序的安排和处理上尽量把实际的直觉认识与牢固的电路理论基础结合起来。

每章的引言介绍该章的目的以及讨论本章和前面章节内容的关系。每章的重点处都安排有技巧练习，通过这些练习使学生们在学习新内容前评价自己对这部分内容的理解程度。几个有影响的例子给出了解决问题的应用和发展附加的实际观察力。书中丰富的图形和曲线展示出各种输入信号和参量的电路响应。最后，在每章的结尾给出了大量的习题，有些只要求直接应用书中的内容，另一些则要求学生较深入地思考。

电路基本特性的表示用节点分析法多于用网孔分析或回路分析法。因为节点方程（而不是网孔方程或回路方程）在实际描述电路中几乎唯一地被采用。采用矩阵方法来构成公式以及解电路的节点模型和网孔模型有如下几个原因：学工程的学生通常在高中或在大学第一年的数学课中已经学习了矩阵代数；电路可用矩阵模型简单地表述出来；基本电路特性（如迭加性和戴维宁或诺顿等效电路）可直接从电路的矩阵模型引伸出来。而运算放大器在书中则更早地引出，并贯穿于整本教材，而不是仅在一章或几章中运用。

在数学课程讲到有关内容之前，至少有一个学期给电子工程的学生讲授微分方程。有效的方法是教学生如何推测解，以及求解边值问题。相反地，本书强调对各种类型的输入信号、电路参量和初始条件建立电路微分方程模型的重要性，而不是去推导其解。这种方法不特别强调求解，而依赖于记忆和诀窍，这就减少了这种方法可能产生的混淆。本书进一步区分开了数学问题（求解微分方程的齐次解和特解分量）和电路问题（对各种源和初始储能条件的零输入、零状态和初始状态响应）。

指数信号在本书中起着中枢作用，因为它们在电路中扮演了重要角色，大多数感兴趣的信号都可用实指数或复指数表示。当和转移函数概念联系起来后，指数信号提供了统一处理一阶、二阶或更高阶的线性电路对阶跃、正弦、脉冲、周期信号（傅里叶级数）和更为一般的非周期信号（傅里叶变换和拉普拉斯变换）响应的机会。因此，我们直接引入电路的转移函数，并用它去构造电路的响应。在学生学会如何去构造对实指数、阶跃、复指数、正弦、周期信号、傅里叶变换信号以及最终的拉普拉斯变换信号的电路响应时，我们努力使他们了解电路的时域模型和频域模型之间的关系，以及正确地评价学生们取得的进步。

拉普拉斯变换放在本书的最后，因为学生们由指数响应、迭加性、傅里叶级数和傅里叶变换展开的观点来看它们，就能更深地理解它们的意义。所以，没有必要去描述所谓的“拉普拉斯算子”方法或要求学生接受拉普拉斯变换。这章是线性系统课程的基础，许多大学中接着有许多电路后续课。

第17章详细地讲述了所介绍电路程序中在分析与设计之间需要提供更多的均衡。难点在于，设计现代数字和模拟集成电路的工艺要求在固体器件中附加衬底，以及涉及的大动态范围。这里采取的折衷办法是引导学生做模拟滤波器设计，而不管制造的问题。本书开发出模拟滤波器的设计方程，并用它们来确定滤波器各分量的值，以保证滤波器的特性参量。这一章可简略、取消部分或补充部分内容，以适应教师的需要。例如，本章讲述了与滤波器设计有密切关系的波特（Bode）分析，但这个论题也可以很快地简述。

这本书比一般两个学期或四分之三学年的电子工程课程所覆盖的材料多，其意图是提供足够的适应性，使教师可从这些适当的材料中得以变化其讲授方式。同时也可作为学生们课外阅读、参考的材料。例如，信号这章可作为一个单元或分作几个部分来讲述。一阶电路对正弦信号的时域响应（第9章）出现在二阶电路之前，但它也可直接放在第12章之后，而引出讨论正弦稳态分析的第13章。希望用更多时间进行设计讨论的教师，可略读或跳过某些关于功率电路和三相电路的材料。相反地，有关频率响应和滤波器设计这一章允许选择或削减某些基本滤波器类型。四端网络可完全跳过，或作课外阅读材料。拉普拉斯变换可在傅里叶级数或傅里叶变换前讲述，但需作一些补充来过渡。

用在本书的目录和某些章节题头上的符号*是在两个学期课程时，建议教师对这些材料可缩减，跳过或作课外阅读。

第1章至第10章的内容可作为第一学期的基础课。第11章至第18章为第二学期的教材。或者第10章放在第二学期，以调节第一学期进度。论题总体顺序（TCS）可修改以加强所要求的重点。一些修改的例子如下（*表示部分范围）：

TCS #1（设计重点） 1—9* 章，10—13章，14—17章。

TCS #2（设计重点） 1—5章，7—8章，10—13* 章，14—17章。

TCS #3（传统安排） 1—5章，7章，8章，10—16章。

TCS #4（传统安排） 1—5章，7章，8章，11章，12章，10章，13—16章。

M.D.西莱特

目 录

1. 基本电路关系

引言	(1)	1.8 基尔霍夫电压定律 (KVL)	(13)
1.1 电路模型和假设	(1)	1.9 串联电阻和电压分配	(14)
1.2 电压和电流	(2)	1.10 串联、并联电路	(17)
1.3 理想电压源和电流源	(4)	1.11 电源组合	(18)
1.4 电阻和欧姆定律	(5)	1.12 受控电源	(20)
1.5 电导	(5)	1.13 能量和功率	(21)
1.6 基尔霍夫电流定律 (KCL)	(7)	本章提要	(22)
1.7 并联电阻和电流分配	(10)	习题一	(22)

2. 电路分析方法

引言	(29)	2.2 网孔分析 (MA) 和基尔霍夫电压定律	(39)
2.1 节点分析 (NA) 和基尔霍夫电流定律	(29)	2.2.1 网孔方程	(39)
2.1.1 节点方程求解	(32)	2.2.2 受控电压源的网孔分析	(41)
2.1.2 受控电流源的节点分析法	(33)	2.2.3 电流源的网孔分析	(41)
2.1.3 电压源的节点分析法	(35)	本章提要	(44)
		习题二	(44)

3. 实用电路特性

引言	(53)	3.5 诺顿等效电路——迭加*	(64)
3.1 线性与迭加	(53)	3.6 电源变换	(64)
3.2 戴维宁等效电路	(57)	3.7 最大功率传递	(65)
3.3 戴维宁等效电路——迭加*	(61)	本章提要	(67)
3.4 诺顿等效电路	(62)	习题三	(67)

4. 运算放大器

引言	(74)	4.4 电压跟随器	(83)
4.1 有限增益反馈放大器	(74)	4.5 缓冲电路	(83)
4.2 理想运算放大器	(79)	4.6 实用的考虑	(85)
4.3 对运算放大器的进一步探讨	(82)	本章提要	(85)
		习题四	(86)

5. 能量贮存元件

引言	(90)	5.4 串联电路和电压分配	(100)
5.1 能量贮存元件	(90)	5.5 模型和直觉	(101)
5.1.1 电容器	(90)	5.6 电容器和电感器的边界条件	(102)
5.1.2 电感器	(95)	本章提要	(104)
5.1.3 导数模型	(96)	习题五	(104)
5.2 能量贮存	(97)		
5.3 并联电路和电流分配	(99)		

6. 信号模型

引言	(109)	6.6 正弦信号	(116)
6.1 恒定信号	(109)	6.6.1 相位角和信号延迟	(117)
6.2 单位阶跃信号	(109)	6.6.2 阻尼正弦信号和无阻尼正弦信号	(117)
6.3 斜坡函数和多项式	(110)	本章提要	(118)
6.4 脉冲和冲激	(111)	习题六	(118)
6.5 指数信号	(115)		

7. 电路响应的输入/输出模型

引言	(124)	7.5 电路的传输函数(s-域)模型	(131)
7.1 输入/输出模型	(124)	7.6 极、零点图	(131)
7.2 电路I/O模型的求解	(125)	7.7 特解的迭加	(133)
7.2.1 齐次解	(126)	本章提要	(133)
7.2.2 传输函数和特解	(128)	习题七	(133)
7.2.3 指数输入信号的全解	(129)		
7.3 边界条件	(130)		
7.4 重复的固有频率	(131)		

8. 一阶电路响应

引言	(137)	8.5 初始状态响应	(150)
8.1 电容元件的响应	(137)	8.5.1 初始状态响应和阶跃输入	(150)
8.2 串联RC电路响应	(139)	8.5.2 初始状态响应和稳态响应	(151)
8.3 零输入响应	(140)	8.5.3 初始状态响应和瞬态响应	(151)
8.3.1 时间常数和极、零点图	(141)	8.5.4 初始状态响应和迭加/分解	(152)
8.3.2 稳态响应	(142)	8.6 串联RC电路和指数输入*	(152)
8.3.3 瞬态响应	(143)	8.7 RL电路响应	(154)
8.3.4 ZIR时移	(143)	8.7.1 RL电路的零输入响应	(154)
8.4 零状态响应	(145)	8.7.2 RL电路对阶跃输入的零状态响应	(155)
8.4.1 具有阶跃输入信号的ZSR	(145)	本章提要	(156)
8.4.2 零状态响应和时移	(147)	习题八	(156)
8.4.3 零状态响应和稳态响应	(148)		
8.4.4 零状态响应和瞬态响应	(149)		

9. 一阶网络的其他特性

引言	(163)	9.5 斜坡输入信号的ZSR和ISR*	(166)
9.1 零输入响应的线性特性	(163)	9.6 RC电路对脉冲信号的响应*	(167)
9.2 零状态响应源信号的迭加性	(163)	9.7 RC电路的冲激响应	(169)
9.3 零状态响应的定标(放大)	(165)	9.8 多激励源零状态响应的迭加性	(170)
9.4 零状态响应的线性和迭加性	(166)	本章提要	(171)
		习题九	(172)

10. 正弦输入的一阶电路

引言	(175)	10.4 正弦稳态响应	(183)
10.1 复指数信号	(175)	10.5 正弦信号的迭加性	(186)
10.2 正弦输入信号的特解	(179)	本章提要	(187)
10.3 正弦信号输入的零状态响应	(182)	习题十	(187)

11. 二阶电路响应

引言	(193)	11.5.2 过阻尼电路的零状态响应	(204)
11.1 RLC串联电路	(193)	11.5.3 RL、RC和RLC电路的零状态响应	(207)
11.1.1 物理过程	(193)	11.5.4 过阻尼电路的初始状态响应	(207)
11.1.2 RLC串联电路的输入输出模型	(194)	11.5.5 临界阻尼电路的ZIR, ZSR和ISR	(208)
11.2 二阶运算放大器电路的输入输出模型	(194)	11.5.6 欠阻尼电路的零输入响应	(209)
11.2.1 物理过程	(194)	11.5.7 欠阻尼电路的零状态响应	(210)
11.2.2 输入输出模型	(195)	11.5.8 欠阻尼电路的初始状态响应	(212)
11.3 二阶齐次解	(195)	11.6 零输入响应和零状态响应*	(213)
11.4 边界条件	(201)	11.7 二阶电路的正弦响应	(213)
11.4.1 串联RLC电路	(201)	11.8 脉冲响应*	(214)
11.4.2 运算放大器电路*	(202)	本章提要	(215)
11.5 ZIR, ZSR和ISR	(202)	习题十一	(215)
11.5.1 过阻尼电路的零输入响应	(203)		

12. 广义阻抗, 导纳及s-域分析

引言	(221)	12.2 广义基尔霍夫电压定律和电流定律	(222)
12.1 广义阻抗和导纳	(221)		

12.3 串联和并联电路·····	(225)	12.8 广义节点分析* ·····	(234)
12.4 广义电压和电流分配·····	(227)	12.9 广义戴维宁和诺顿等效电路* ·····	(236)
12.5 电路模型及其分析 ——一种简易方法·····	(229)	本章提要·····	(238)
12.6 源迭加·····	(230)	习题十二·····	(238)
12.7 极、零点图形* ·····	(232)		

13. 频域模型和正弦稳态分析

引言·····	(242)	·····	(262)
13.1 阻抗、导纳和矢量·····	(242)	13.10 复功率·····	(263)
13.2 用相量分析稳态电路·····	(249)	13.11 最大传输功率·····	(264)
13.3 电路的相量模型·····	(250)	13.12 三相电路* ·····	(265)
13.4 源的迭加·····	(253)	13.12.1 Δ -Y阻抗变换·····	(270)
13.5 戴维宁和诺顿等效电路·····	(255)	13.12.2 Y- Δ 导纳变换·····	(271)
13.6 正弦稳态功率·····	(257)	13.13 变压器·····	(272)
13.7 平均功率·····	(258)	13.14 理想变压器·····	(274)
13.8 功率因数和传输损耗·····	(259)	本章提要·····	(275)
13.9 均方根电压和电流(有效值)		习题十三·····	(275)

14. 傅里叶级数

引言·····	(280)	14.5 信号频谱·····	(293)
14.1 周期信号·····	(280)	14.5.1 振幅·····	(293)
14.2 相量信号集合·····	(280)	14.5.2 相位谱·····	(295)
14.3 复数傅里叶级数·····	(282)	14.5.3 功率谱·····	(296)
14.4 傅里叶级数的性质* ·····	(284)	14.5.4 信号的正交性·····	(297)
14.4.1 唯一性·····	(284)	14.5.5 信号均方值·····	(300)
14.4.2 直流值·····	(285)	14.6 电路分析——周期信号·····	(301)
14.4.3 线性特性·····	(289)	14.6.1 输入/输出振幅谱·····	(303)
14.4.4 时移特性·····	(289)	14.6.2 输入/输出功率谱·····	(303)
14.4.5 傅里叶级数的导数·····	(290)	14.6.3 近似误差* ·····	(304)
14.4.6 对称性·····	(292)	14.7 三角傅里叶级数·····	(304)
14.4.7 余弦傅里叶级数·····	(292)	本章提要·····	(305)
		习题十四·····	(306)

15. 傅里叶变换

引言·····	(310)	15.4 傅里叶变换的性质·····	(319)
15.1 非周期信号: 傅里叶变换·····	(310)	15.4.1 唯一性·····	(319)
15.2 幅度谱·····	(313)	15.4.2 对称性·····	(320)
15.3 傅里叶变换的存在性* ·····	(314)	15.4.3 面积·····	(320)
15.3.1 广义函数和傅里叶变换·····	(315)	15.4.4 直线性·····	(320)
15.3.2 傅里叶变换的极限·····	(317)	15.4.5 时移特性·····	(321)
		15.4.6 频移(调制)特性·····	(322)

15.4.7 导数特性.....	(322)	15.7 冲激响应.....	(331)
15.4.8 积分特性.....	(324)	15.8 卷积*	(331)
15.5 能量谱.....	(326)	本章提要.....	(333)
15.6 傅里叶变换的电路分析.....	(328)	习题十五.....	(334)

16. 电路分析和拉普拉斯变换

引言.....	(337)	16.2.2 情况二: 重极点因式.....	(344)
16.1 拉普拉斯变换.....	(337)	16.2.3 情况三: 复极点因式.....	(345)
16.1.1 存在性.....	(338)	16.3 微分方程的拉普拉斯变换...	(346)
16.1.2 唯一性.....	(338)	16.3.1 初始状态响应.....	(348)
16.1.3 线性特性.....	(339)	16.3.2 零状态响应.....	(350)
16.1.4 对称性.....	(340)	16.3.3 零输入响应.....	(351)
16.1.5 导数特性.....	(340)	16.3.4 瞬态和稳态响应.....	(351)
16.1.6 积分特性.....	(341)	16.4 冲激响应.....	(352)
16.1.7 复频移特性.....	(341)	16.5 拉普拉斯变换的电路分析...	(352)
16.1.8 时移特性.....	(342)	16.6 信号源的迭加.....	(355)
16.2 拉普拉斯反变换和部分分式展开式.....	(343)	16.7 戴维宁和诺顿等效电路.....	(356)
16.2.1 情况一: 单极点因式.....	(343)	本章提要.....	(357)
		习题十六.....	(357)

17. 频率响应及滤波器设计导论

引言.....	(362)	17.4.2 极、零点图.....	(374)
17.1 频率响应: 振幅响应和相位响应.....	(362)	17.5 带通滤波器.....	(374)
17.2 一阶低通滤波器.....	(363)	17.5.1 一般型式带通滤波器的特性...	(375)
17.2.1 无源滤波器的实施方案.....	(364)	17.5.2 实际的和逼近的高Q带通滤波器的极、零点图.....	(376)
17.2.2 低通滤波器极、零点图特性...	(365)	17.5.3 无源带通滤波器设计.....	(377)
17.2.3 低通滤波器设计.....	(366)	17.5.4 有源带通滤波器设计.....	(381)
17.3 二阶低通滤波器.....	(367)	17.6 带阻滤波器*	(382)
17.3.1 无源滤波器的实施方案.....	(368)	17.7 滤波器的尺度变换设计法*	(383)
17.3.2 极、零点图.....	(369)	17.7.1 振幅尺度变换.....	(383)
17.3.3 有源低通滤波器设计.....	(369)	17.7.2 频率尺度变换.....	(384)
17.3.4 波特图.....	(371)	17.8 级联滤波器及加载*	(385)
17.3.5 二阶波特图.....	(372)	本章提要.....	(386)
17.4 高通滤波器*	(373)	习题十七.....	(386)
17.4.1 无源高通滤波器的实施方案...	(373)		

18. 二端口网络模型

引言.....	(392)	18.2 导纳参数*	(395)
18.1 电路的阻抗模型*	(392)	18.3 混杂参数*	(398)

18.4 传输参数*	(399)	习题十八.....	(403)
本章提要.....	(403)		

附录一 矩阵

附录二 复数

英、中文名词对照表

基本电路关系

引言

人类已经从对电迷惑不解及怀着恐惧的心情观察闪电现象进展到对带电体物理特性有了深入认识的时代。虽然电仍然具有一种神秘和潜在的破坏力，但我们已能够利用电效应的能力将图象传送到彩色电视荧光屏，给监视器提供重要信号，控制高性能的汽车引擎以及用起搏器使人的心脏跳动等等。

我们已经在集成电路或“电子学引擎”(electronic engines)的亚微观尺寸方面取得了进展——在使电路更便宜、功率更强大和更小型化方面取得了难以置信而且非常令人鼓舞的进展。在微电路领域，试试改改的电路设计方法已被抛弃，这种方法面对其内在成本和日益缩小的产品市场已无法继续适应。由于受生产成本特别是时间因素的限制，必须要求集成电路一次试验成功。在制作电路之前，必须先进行纸上建造与试验，这就要求电路设计者在建造电路之前一定要对所设计的电路将如何运转有一个透彻的理解。现在，我们对一个电路能够工作完全有把握，是基于信赖我们所建立的电路模型和电路模型中的元件及其互联特性的精确判断。因此，我们首先要从清晰理解电路如何工作着手。

1.1 电路模型和假设

本书的宗旨是向读者提供理解电路所需要的技术手段。我们想把电路的定性分析同定量分析结合起来，因此将要研究它们的数学关系。这种方法大家应该是熟悉的。在物理学中我们已经习惯应用质点数学模型（如牛顿定律描写了质点物理量力、质量和加速度之间的关系）。象这些熟知的物理模型一样，虽然描写电路的模型并不完善，但是它们能够提供十分有用的结果。

本书仅仅考虑“集总”(lumped)电路——那些被假定其物理尺寸不会影响电气性能的电路。通常，当电路的物理尺寸比通过该电路的电信号波长小得多时，上述假设是合理的。然而，许多重要的电路并不满足这个假设，我们将在后续课程中处理这类电路模型，并进一步研究电路中电磁信号的空间分布和传输问题。此外，本书在处理电路模型时，不仅认为它们好象没有物理尺寸，而且认为似乎不需要时间就能立即通过它们传播电信号。实际上，这种情况是不存在的。例如在计算机集成电路中，在高时钟频率下，信号传播的延迟决定了它的性能极限并限制了我们的制造高速计算机的能力。在本教科书中，我们将仅仅考虑“时不变”(time invariant)电路——其特性在整个感兴趣的时间内是固定不变的。

电气工程是一门定量的学科，它的任务是建立模型、测量物理量及确定它们之间的相互关系。本书的物理量采用国际单位制(SI)规定的度量标准：长度(米)，质量(千

克),时间(秒),电流(安培),温度(开尔文)和光强度(坎德拉)①。这六个基本物理量及其单位与符号由表1.1给出。由于物理量在数值上可以按几个数量级来排列,采用

表 1.1

物理量	单 位	符号	物理量	位 单	符号
长 度	米 (Meter)	m	电 流	安 培(Ampere)	A
质 量	千 克(Kilogram)	kg	温 度	开尔文(Degree Kelvin)	K
时 间	秒 (Second)	s	光强度	坎德拉(Candela)	cd

表1.2所示标准前缀对应的10的幂次来约化需要描述的相对大或小的物理量是十分方便的。

表 1.2

词 头 名 称	幂 次	词头符号	词 头 名 称	幂 次	词头符号
atto (阿)	10^{-18}	a	deci (分)	10^{-1}	d
femto (飞)	10^{-15}	f	deka (十)	10^1	da
pico (皮)	10^{-12}	p	hecto (百)	10^2	h
nano (纳)	10^{-9}	n	kilo (千)	10^3	k
micro (微)	10^{-6}	μ	mega (兆)	10^6	M
milli (毫)	10^{-3}	m	giga (吉)	10^9	G
centi (厘)	10^{-2}	c	tera (太)	10^{12}	T

我们学习电路的过程将按下列顺序进行:首先验证个别电路元件的电性能模型;其次验证描述互连元件电特性的物理定律;最后验证由元件构成的电路在接通电源时的工作情况。这样的顺序说起来容易做起来难。读者应该反复要求自己深入了解特定电路的数学模型,并获得一种对其物理特性的判别能力,或“感受”它们的工作情况。对于每个人来说,要获得一种对电路的“感受”是不容易的。所以,在开始时不要犹豫和泄气,要不断地问自己为什么电路按这种方式工作,并寻找出内在的因果关系以充实你的洞察力。

1.2 电压和电流

电气元件如电池、电阻器和电流源的任意互连均构成电路(circuit)。在电路中我们最为关心的有两个量:电路节点处的电压和电路支路中的电流。电压(voltage)是对在空间两点间移动电荷所作功的量度。电流(current)是对单位时间内移动电荷数量的量度。

图1.1中的方框表示电路元件,连接方框的线代表容许电流通过的路径;加粗的圆点称

① 原文漏掉此物理量与单位——译者注。

为电路的节点(nodes)，它表征了由方框表示的元件间的物理连接点。节点也是我们测量电压的位置。

电路节点上的电压用符号标在节点位置，这个电压是节点电位与参考点电位之差，参考点用地的符号标明。

两个节点(a 和 b)之间的电压降(voltage drop)可通过计算求得

$$v_{ab} = v_a - v_b$$

v_a 与 v_b 是节点 a 和 b 的电位。按惯例规定：当节点 a 的电位比节点 b 的电位高时，节点 a 和节点 b 间的电压降为正极性，这时 $v_{ab} > 0$ ；反之，节点 a 和 b 之间的电压升(voltage rise)为

$$v_{ba} = v_b - v_a$$

故 $v_{ba} = -v_{ab}$ 。即正值的电压升对应于负值的电压降。

技巧练习1.1 在图1.1中，如果节点电位为 $v_a = 20\text{V}$ ， $v_b = 35\text{V}$ 及 $v_c = -45\text{V}$ ，求 v_{ab} ， v_{ac} ， v_{ba} 和 v_{ca} 的数值。地到节点 b 的电压降是多少？节点 a 到节点 c 的电压升是多少？

答案： $v_{ab} = -15\text{V}$ $v_{ac} = 65\text{V}$ $v_{ba} = 15\text{V}$
 $v_{ca} = -65\text{V}$ $-v_b = -35\text{V}$ $-v_{ac} = -65\text{V}$

注意：负值的电压升相当于正值的电压降，负值的电压降相当于正值的电压升。

电荷(charge)在电场的作用下才能运动。在导体中价电子被松散地束缚在特定的原子周围，可以认为它们在原子点阵中作不规则的运动。如果由外加电源产生电场，在导体中的自由电子将逆电场极性方向移动。但是，按照惯例，电流的定义是等值正电荷在与电场相同方向的移动。如果导体横截面积为 S ，导体中的平均电流可以通过测量和计算得到。若 Δq 是测量时间间隔 Δt 内连续通过横截面积的电荷，则平均电流 I 为

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

缩小测量间隔，可以获得电流的瞬时值：

$$i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt} \quad (\text{安培})$$

电路各条支路中的电流，用电流符号与箭头表示在对应支路旁边。这些电流符号用于区别每一个支路中的电流，而且可以注上负号以表示反方向的电流。箭头方向指示所标注电流符号的正代数值参考方向。通过图1.2可说明两种等效电流表示方法。如果 $i_1 = 5\text{A}$ ，则 $-i_1 = -5\text{A}$ ；如果 $i_2 = -10\text{A}$ ，则 $-i_2 = 10\text{A}$ 。正的电流值对应于在箭头所表示的电流方向流过正电荷。

本书仅处理这类电路：它们的特性可以由在节点之间测得的电压及其对应节点之间的传导支路中的电流表示。由于连接在同一节点的任何一个导体(导线)都与该节点具有相同的电位，因此可用圆点表示节点和用线表示电流支路。在一根线上的任意一点位置测得

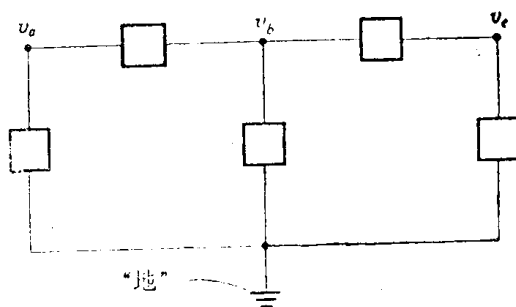


图1.1 标明节点电压的电路

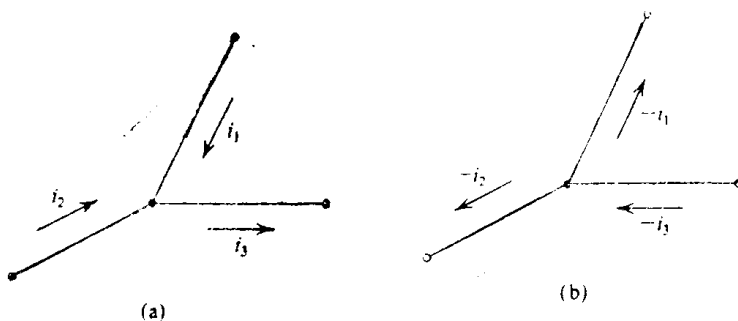


图1.2 等效的电流极性与符号

的电压都和与之相连节点上测得的电压值是相同的。

1.3 理想电压源和电流源

理想独立电压源在电路的两个节点间建立一个电压，我们用图1.3(a)中的电路符号

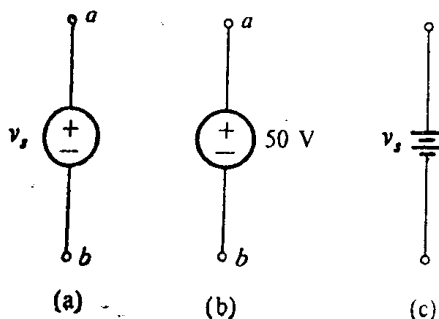


图1.3 理想独立电压源的电路符号

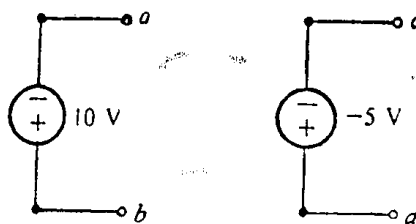


图1.4 电路节点间的电压源以及
表明电源电压的符号与极性

来表示这种电压源，用电源符号来区别每一个电源，并用 $\pm$ 符号标明电源的极性。有时，电源符号可以注明分配于该电源的电压值，如图1.3(b)所示，这里 $v_s = 50\text{V}$ 。当电压源是随时间而变时，其符号应表示对时间的依赖关系。对于电池，它是一种固定不变的电源，用图1.3(c)所示的符号表示。按照常规，长杠表示电池的正极。分配于电源的电压代数值与电源符号标记的极性应相一致。例如在图1.4中， $v_{ab} = -10\text{V}$ ， $v_{cd} = 5\text{V}$ 。独立(independent)电压源建立的电压不受流经电源的电流大小影响。

电源的伏安特性 (v - i characteristic) 是一曲线图，它表示了电源建立的电压与流过电源的每个电流值的关系。通常电压和电流并不是彼此完全独立无关的，但是对于理想电压源， v - i 特性曲线如图1.5所示，在这里不管电流是多少，电源都有相同的电压。

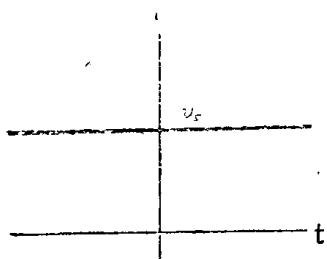


图1.5 理想电压源的 v - i 特性

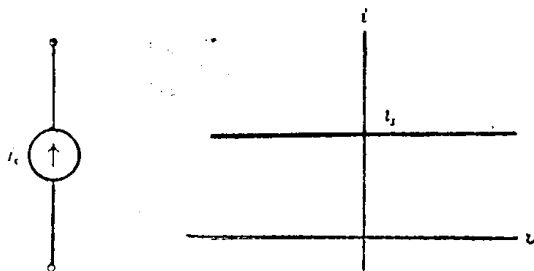


图1.6 理想电流源
(a) 电路符号 (b) i - v 特性

理想独立电流源提供的电流与电源两端间的电压无关，其特性由图1.6表示，并用图示电路符号表示理想独立电流源。箭头指示电流源提供正电流方向。

1.4 电阻和欧姆定律

电路元件的电性能取决于它的材料与加工工艺。近十年来，在已取得一系列引人注目的成就的影响下，已经可以制造出各种各样的器件。现在已有总共能容纳几十万器件的电路。再过几十年，可以期望得到更为密集的电路。本书不涉及电路元件的实际制造，但是本书提出的基本概念为理解更为复杂电路的工作奠定了基础。

最简单的电路元件可以看成为二端器件，其特性可由加于端点的电压与流过器件的电流之间的关系来描述。这类器件之一就是电阻器，用 R 表示。其电路符号如图1.7(a)所示。根据测量惯例加在电阻上的电压和进入电阻中的电流极性可由图1.7(b)表示，测量电压的正端与正电流进入端一致。图1.7(c)表示了线性电阻器的线性关系，这个重要特性可用欧姆定律 (Ohm's Law) 描写：

$$v(t) = i(t)R$$

或 $R = v(t)/i(t)$ 。电阻器的电阻(resistance)是电阻器上的电压和电阻器中的电流之比值。

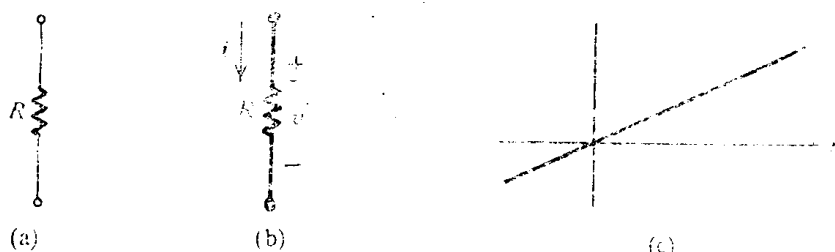


图1.7 电阻器

(a) 电路符号 (b) 规定的电压测量极性 (c) v - i 特性

电阻的量度单位是欧姆或伏特/安培，其符号用 Ω 表示。我们只考虑这样的电路，该电路中的电阻 R 为常数，它与电流和电压值无关，也不随时间而变。

根据电路的输入/输出特性来考虑电路是很方便的。亦即，施加一个信号至电路使其产生一个输出信号。如果把一个电压加到电阻器两端，就可得到一个由欧姆定律确定电流值的电流。反之亦然。因此，欧姆定律是一个描写电阻器输入/输出特性的模型。

1.5 电 导

欧姆定律也可描述电流与电压的比值： $i(t)/v(t) = G$ ，在此

$$G = 1/R$$

电导 (conductance) G 的单位是姆欧，符号为 $\mathcal{O}$ ^①。高电阻值意味为低电导值，反之亦然。当施加相同电压时，高电导值电阻器中的电流比低电导值电阻器中的电流更大。

技巧练习1.2 在图SE1.2中求解 i_1 和 i_2 。

① 原文误写为 Ω ——译者注。