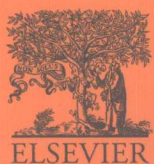


信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列

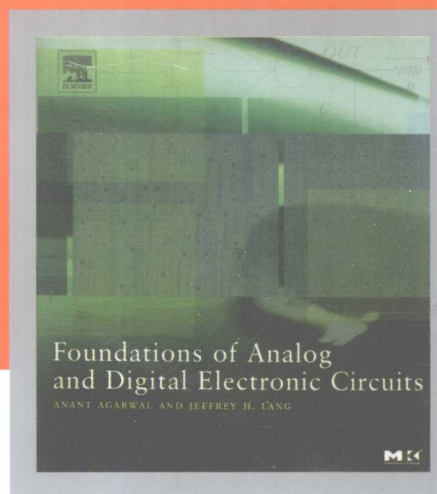


# Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits

## 模拟和数字 电子电路基础

Anant Agarwal      著  
Jeffrey H. Lang

于歆杰 朱桂萍 刘秀成 译



清华大学出版社

信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列

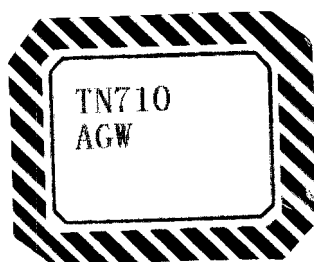


# Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits

## 模拟和数字 电子电路基础

Anant Agarwal      著  
Jeffrey H. Lang

于歆杰 朱桂萍 刘秀成 译



清华大学出版社  
北京

Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits

Anant Agarwal, Jeffrey H. Lang

ISBN: 1558607358

Copyright © 2005 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN: 981-259-578-3

Copyright © 2008 by Elsevier(Singapore)Pte Ltd. All rights reserved.

Printed in China by Tsinghua University Press under special arrangement with Elsevier(Singapore)Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由清华大学出版社与 Elsevier(Singapore)Pte Ltd. 在中国大陆境内合作出版。本版仅限在中国境内(不包括香港特别行政区及台湾)出版及标价销售。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

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

模拟和数字电子电路基础/(美)爱格瓦尔(Agarwal, A.), (美)朗 J. H. (Lang, J. H.) 著; 于歆杰, 朱桂萍, 刘秀成译. —北京: 清华大学出版社, 2008. 7

(信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列)

书名原文: Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits

ISBN 978-7-302-17144-7

I. 模… II. ①爱… ②朗… ③于… ④朱… ⑤刘… III. ①模拟电路—高等学校—教材  
②数字电路—高等学校—教材 IV. ①TN710 ②TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 028126 号

责任编辑: 王一玲

责任校对: 时翠兰

责任印制: 李红英

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](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈: 010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 刷 者: 清华大学印刷厂

装 订 者: 三河市李旗庄少明装订厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印 张: 42.5 字 数: 1019 千字

版 次: 2008 年 7 月第 1 版 印 次: 2008 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 1~3000

定 价: 69.00 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: 018780-01

# 译者序

模拟和数字电子电路基础

本书是美国麻省理工学院(MIT)电气工程与计算机科学系(EECS)二年级本科生必修的 6.002 课程(电路与电子学)教材的中译本。

MIT 是美国乃至世界最著名的研究型大学之一,其 EECS 系在工科领域更是闻名遐迩。除在电气工程和计算机科学领域取得一系列令人瞩目的研究成果之外,MIT EECS 历来重视本科生教学,重视教学改革,重视教材建设,每个时期均会产生能够影响世界的经典教材。这其中既包括我国 20 世纪 70 年代翻译的电路教材<sup>①</sup>,也包括目前影响最大的信号与系统教材<sup>②</sup>、算法设计与分析教材<sup>③</sup>和电力电子教材<sup>④</sup>……

MIT EECS 有 4 门本科生必修的课程,即 6.001(计算机程序结构与解释),6.002(电路与电子学),6.003(信号与系统)和 6.004(计算结构)。其中 6.001 关于软件设计,6.004 关于计算机体系结构,二者共同构成了计算机科学(CS)的基础;6.002 关于电路,6.003 关于信号,二者共同构成了电气工程(EE)的基础。

为了进一步说明 6.002 课程的地位及其在本科生培养中的作用,我们用表 1 列出了 MIT EECS 电路类课程及其与我国相关课程的对照<sup>⑤</sup>。

表 1 MIT 电路类课程与我国相应课程对照

MIT 课程名称	类 型	与我国相近的课程
6.002 电路与电子学	必修	电路、模拟电路、数字电路
6.004 计算结构	必修	数字电路、计算机组成原理
6.101 模拟电子学实验引论	限选、任选	模拟电路及其实验
6.111 数字系统实验引论	限选、任选	FPGA 等
6.012 微电子器件与电路	限选	模拟电路、数字电路、微电子学

① 德陶佐等著,江缉光等译. 系统、网络与计算: 基本概念. 人民教育出版社,1978 年;阿坦斯等著,宗孔德等译. 系统、网络与计算: 多变量法. 人民教育出版社,1979 年

② 奥本海姆等著,刘树棠译. 信号与系统. 西安交通大学出版社,1998 年

③ Cormen et. al. . Introduction to Algorithms, second edition. The MIT Press, 2001

④ Kassakian et. al. . Principles of Power Electronics. Addison-Wesley Publishing, 1991

⑤ 对 MIT EECS 本科生课程体系感兴趣的读者可参阅: 郑君里,于歆杰. 美国 MIT EECS 系本科生课程设置简介. 电气电子教学学报, 2006, 28(2): 9-11

可以发现,MIT EECS 6.002 课程把电路和电子学紧密结合起来。EECS 把我国的数字电子技术课程的基础部分放入 6.002 课程,实验部分放入 6.111 课程,高级部分放入 6.004 课程和 6.012 课程。与此同时,模拟电子技术课程的基础部分也放入 6.002 课程,实验部分放入 6.101 课程,高级部分放入 6.012 课程。也就是说,6.002 课程中包含了电路分析方法及其在数字和模拟电路中的基础应用,这也是该课程成为本科必修课的原因。此外,通过这种整合方式,还很好地解决了电路类课程数量过多,总学时数过大的问题。既让学生在较短时间内掌握更丰富完整的知识,又为后续高级课程提供了广阔的舞台。

这一点和我国 20 世纪 70 年代翻译的 MIT 电路课程教材改革思路迥异。那时的趋势是将电路课程和信号与系统课程进行整合,试图用系统的观点和全局的方法建立电路分析的理论框架,从而使得学生掌握扎实的分析功底。这一时期同时还诞生了其他类似的经典教材<sup>①</sup>。在这一时期,除 MIT 趋向于把电路与系统相结合外,美国加州大学伯克利分校把网络函数、图论和状态变量等内容融入电路分析中,成功地建立起电路理论体系<sup>②</sup>。

毫无疑问,20 世纪 60~80 年代进行的电路理论化进程使得电路这一课程更为系统化,对我国电路教学起到了很好的促进作用。但应该看到,自 20 世纪 80 年代起,美国电路课程教学的思路逐渐发生改变,涌现出一批更贴近实际电路、更能体现 EE 和 CS 学科发展趋势、更符合学生认知规律的新教材。引入晶体管模型、加强对运算放大器的讨论、涉及更多实际电路等方面已经成为当前流行电路教材的普遍趋势,当然 MIT EECS 的这本教材就是其中的佼佼者<sup>③</sup>。据译者所知,该教材不仅在 MIT EECS 使用,同时还成为斯坦福大学电路课程的教材。

结合翻译本书的心得和译者在清华大学从事“电路原理”课程教学的体会,可以总结出将电路与电子学相结合的几个原因。

(1) EE 和 CS 的学科发展使然。科学技术的发展虽然使得模拟系统和数字系统都取得了长足的进步,但数字系统表现得更为抢眼。Internet、CDMA、iPod 等眩目的字眼无不映射出数字系统的勃勃生机。因此在 EE 和 CS 领域的第一门课程中应该涉及初步的数字系统。

(2) 电路元件的发展使然。一方面,非线性元件、开关元件的大量使用使得我们不能仅关注集总线性非时变电路;另一方面,MOSFET 和运算放大器等元件已事实上成为电路的基本元件。因此电路课程中应该让 MOSFET、运算放大器具有与电阻、电容和电感相同的地位。

(3) 工程教育的需求使然。电路是 EE 和 CS 领域第一门具有工程性质的课程。与学生熟悉的科学类课程不同,工程类课程中应该对成本、精度、复杂度等方面的折中有所涉及,从而让学生了解到“创造世界上没有的东西”这一工程实践过程中需要考虑的诸多因素。电路和电子学的结合为这一思想提供了很好的平台。

要想能够在电路课程中体现上述思想(即涉及数字系统,让 MOSFET、运算放大器具有

① 郑钧著,毛培法译.线性系统分析.科学出版社,1979年

② 狄苏尔等著,林争辉等译.电路基本理论.人民教育出版社,1979年

③ 其他比较有代表性的教材有 Nilsson, et. al. . Electric Circuits. 7th edition. Pearson Education, 2005 和 Hayt, et. al. . Engineering Circuit Analysis. 7th edition. McGraw-Hill Companies, 2007

与电阻、电容和电感相同的地位,使电路成为一门工程类课程),需要授课教师(或作者)一方面具有丰富的科研经验,另一方面有长期从事本科生基础课教学的经历。MIT 的 Agawral 教授和 Lang 教授完全具备这样的资质。Agarwal 教授的科研方向是微处理器设计和应用,属于 CS 学科;Lang 教授的科研方向是机电系统的分析、设计与控制,属于 EE 学科。二人均长期从事电路课程教学。得益于这两位教授的学术背景和教学背景,本书相当多内容引人入胜。(如第 11 章讨论数字电路中的能量与功率,第 14 章对谐振的讨论,各章后习题中涉及 EE 和 CS 领域方方面面的实用例子……)

除了在内容方面较传统电路教材有较大创新之外,本书在可读性上也考虑颇多。比较突出的特点有两个。其中之一在于书中反复提到直觉对于工程师的重要作用。在元件建模和电路分析时经常通过列方程求解和用直觉解法求解相对比,借此循序渐进地培养读者对电路分析的直觉。这种直觉往往是决定工程师分析能力和创新能力的重要基础。其次,本书用较大篇幅讨论了电路元件的建模,同时提供了大量电路分析方法在数字和模拟电子电路中的应用,其中既讨论分立元件电路,也涉及集成电路。读者会发现,电路模型往往是实际元件重要电气性质的数学表达(而不是“电路学家”挖空心思编出来的公式),电路分析方法在若干实际电路中有非常重要的应用(而不是仅仅用于求解教师精心编出来的例题和习题)。这些讨论和例子对于拓展学生视野、激发学生兴趣和使学生真正牢固掌握基本概念和基本分析方法来说都有很大帮助。

还应注意,“电路课该怎样上才更好”这一问题并不存在唯一的答案,会随着时间和地点的变化而变化。虽然目前看来将电路和电子学相结合更符合学科发展和学生培养的规律,但随着新分析方法和新元件的产生,电路与电子学、信号与系统、自动控制原理、电磁场<sup>①</sup>等几门课程的关系还可能发生变化。即可能出现新的更适合电路课程的教学理念。此外,不同类型的学校也应结合自己的师资和学生特点进行教学改革。在任何历史时期,完全照搬别人的成功经验都不意味着会取得成功。

当然这本书也存在着一些不完全适合我国电路课程教学的地方。比如对正弦激励下动态电路的稳态分析讨论过少(尤其是功率部分)、未涉及三相电路、对互感以及变压器讨论很少……但综合以上介绍不难发现,本书的出版对我国电路课程改革仍然具有较大借鉴意义。它是学习电路课程、讲授电路课程很好的参考读物,同时可作为其他相关课程的辅助材料。

本书译者均为清华大学电机系电路原理课程教学组教师。翻译分工为:于歆杰负责序言和第 1~8 章的翻译,朱桂萍负责 9~14 章的翻译,刘秀成负责 15~16 章和附录的翻译。全书由于歆杰统稿。

其他值得说明的地方包括:

- 书中电阻、独立源、受控源等符号与我国习惯不同,电压以  $v$  表示;
- 作者对角频率  $\omega$  和频率  $f$  并没有严格加以区分;
- 支路量的符号和我国习惯有所不同,以支路 A 两端的电压为例,  $v_A$  表示总的瞬时量,  $V_A$  表示直流或工作点量,  $v_a$  表示小信号量,  $V_a$  表示相量(其中模为  $|V_a|$ ,相角为  $\angle V_a$ );

<sup>①</sup> 俄罗斯一直以来坚持“场-路-场”的电路教学体系。有代表性的教材包括:克鲁格著,俞大光等译,电工原理,东北教育出版社,1952年;聂孟等著,哈尔滨工业大学电工基础研究室译,电工理论基础,高等教育出版社,1985年

- 书中大多数正弦激励表示为  $\cos(\omega t)$  的形式;
- 原书有部分内容在网上(参见前言),因此正文中有公式和图的编号不连续的情况,也有正文引用网上公式和图的情况,请感兴趣的读者自行查阅相关网页。

此外,译者还要特别向清华大学出版社王一玲编辑和陈志辉编辑表示深深的谢意。你们的热情与专业素质是激励我们的强大动力。

由于我们水平有限,对原著的理解难免存在不够准确之处,译文中一定存在不少缺点和错误,热诚欢迎读者批评指正。来信请寄:“北京市清华大学电机系 于歆杰(100084)”, email 地址为 yuxj@tsinghua.edu.cn。

于歆杰 朱桂萍 刘秀成

2007年10月

# 关于作者

模拟和数字电子电路基础

Anant Agarwal 是麻省理工学院(MIT)电气工程与计算机科学系(EECS)教授,1988年成为教师。讲授的课程包括电路与电子学,VLSI,数字逻辑与计算机结构。1999—2003年任计算机科学实验室(LCS)副主任。Agarwal教授获斯坦福大学电气工程博士和硕士学位,印度 IIT Madras 大学电气工程学士学位。Agarwal教授领导的研究小组于1992年开发了 Sparcle 多线程微处理器,于1994年开发了 MIT Alewife 可扩展共享存储器微处理器。他同时还领导着 MIT 的 VirtualWires 项目,并为 Virtual Machine Works 公司的创始人。该公司于1993年将 VirtualWires 的逻辑仿真技术应用于市场。目前 Agarwal 教授在 MIT 领导 Raw 项目。该项目旨在开发新型可重配置的计算芯片。他带领其团队开发了世界上最大的麦克风阵列 LOUD,可以在噪音中定位、跟踪并放大语音,因此于2004年被授予吉尼斯世界记录。他还与他人共同创建了 Engim 公司。该公司开发多通道无线混合信号芯片集。Agarwal 教授还于2001年获得 Maurice Wilkes 计算机结构奖,于1991年获得 Presidential Young Investigator 奖。

Jeffrey H. Lang 是麻省理工学院(MIT)电气工程与计算机科学系(EECS)教授,1980年成为教师。他分别于1975年、1977年和1980年在 MIT 的 EECS 获得学士、硕士和博士学位。他在1991年至2003年期间任 MIT 电磁与电子系统实验室(LEES)副主任,在1991年至1994年任 Sensors and Actuators 杂志副主编。Lang 教授的研究与教学兴趣在于分析、设计与控制机电系统,尤其关注电机、微传感器和驱动器以及柔性结构等方面。他在 MIT 讲授电路与电子学课程。他撰写过超过170篇论文并在机电、电力电子和应用控制等方面拥有10项专利。他还获得过4次 IEEE 协会的最佳论文奖。Lang 教授是 IEEE 的 Fellow,同时是原 Hertz 基金会的 Fellow。



# 前言

模拟和数字电子电路基础

## 方法

本书可用作电气工程或电气工程与计算机专业第一门课程的教材,使学生在大学二年级完成从物理世界向电子和计算机世界的转换。本书试图实现两个目的:将电路和电子学以统一的、完整的方式来处理,并建立起电路与当今数字和模拟世界的紧密联系。

这两个目的来自于这样的事实,即用传统电路分析课程来介绍电气工程的方法日显过时。我们的世界正逐渐数字化。电气工程领域中大部分学生都将要进入与数字电子学或计算机系统相关的工业界或研究生阶段,甚至那些继续留在电气工程核心领域的学生也受到了数字领域的深刻影响。

由于更加强调数字领域,因此基础电气工程教学必须从两个方面进行改变。首先,传统的那种无视数字领域而讲授电路和电子学的方法必须被强调数字和模拟领域共同的电路基础的方法所取代。由于电路和电子学中大多数基本概念均可同时用于数字和模拟领域,这就意味着,我们首先要强调电路与电子学对数字系统的更为广阔的影响,并借此来激励学生。比如说,虽然传统的对一阶  $RC$  电路动态过程的讨论对于进入数字系统的学生来说并无兴趣,但如果用相同的方法介绍由开关和电阻器构成的反相器连接到非理想容性导线时的开关行为,则会使人兴趣盎然。类似地,我们可以用观察带有寄生效应的 MOSFET 反相器的行为来激发学生对二阶  $RLC$  电路阶跃响应的兴趣。

其次,在考虑计算机工程的附加需求后,许多系提供了过多关于电路和电子学的独立课程。因此更适合将其组合成为一门课程<sup>①</sup>。电路课程讨论无源元件网络,如电阻、电源、电容和电感。电子学讨论无源元件和有源元件网络,如 MOS 晶体管。虽然本书对电路与电子学进行了统一的处理,但也可以将其划分为两个学期连续的课程,一个强调电路,另一个强调电子学,二者的基础内容相同。

本书使用“抽象”的概念来试图构建物理世界与大型计算机世界的联系。特别地,本书试图将电气工程与计算机科学统一起来,使其作为不断进行创造性和

<sup>①</sup> Yannis Tsidividis 在 1998 年 Int. Symp. Circuits and Systems(ISCAS)会议上发表的论文 Teaching Circuits and Electronics to First-Year Students 给出了将电路与电子学集成为一门课程的精彩实例。

探索性抽象的艺术,从而可解决在创建有用的电气系统所导致的复杂问题。简而言之,计算机系统就是一种电气系统。

为了将电路和电子学结合为一个整体,本书采取的方法是较为深入地讨论一些非常重要的主题,并尽可能选择新的元件。比如,本书使用 MOSFET 作为基本的有源元件,而将对其他装置(如双极晶体管)的讨论限制在练习和例子中。此外,为了让学生理解基本电路概念,而不是沉迷于特定的元件,本书在例子和练习中还介绍了若干抽象元件。我们相信这种方法可使学生会用现有元件和以后发明的元件进行设计。

最后,下面列出了本书与本领域相关书籍的其他区别。

- 本书通过介绍如何从麦克斯韦方程利用一系列简化假设直接得到集总电路抽象,在电气工程和物理间建立了清晰的联系。
- 本书中始终使用抽象的概念,以统一在模拟和数字设计中所进行的工程简化。
- 本书更为强调数字领域。但我们对数字系统的处理却强调其模拟方面。我们从开关、电源、电阻器和 MOSFET 开始,介绍 KCL、KVL 应用等内容。本书表明,数字特性和模拟特性可通过关注元件特性的不同区域而获得。
- MOSFET 装置的介绍采用循序渐进的方式进行:从 S 模型,到 SR 模型,再到 SCS 模型和 SU 模型。
- 本书表明,可用非常简单的 MOSFET 模型对数字电路的静态和动态工作进行大量而深入的分析。
- 元件的不同特性,如电容的记忆特性或放大器的增益效益,均与其在模拟电路和数字电路中的应用相关。
- 从直觉角度强调了暂态问题的状态变量观点,这样处理的原因在于可方便地得到线性或非线性网络的计算机解。
- 能量和功率的问题在模拟和数字电路中均进行讨论。
- 从数字领域中抽取大量 VLSI 的例子,这样可强调传统电路中分析的力量和普遍适用性。

我们相信,在具有上述特点后,本书为即将进入核心电气工程专业(包括数字和 RF 电路、通信、控制、信号处理、装置制造等领域)或计算机工程专业(包括数字设计、体系结构、操作系统、编译器和语言)的学生提供了足够的基础。

MIT 具有统一的电气工程与计算机科学系。本书作为 MIT 关于电路与电子学入门课程的教材。该课程每学期均开设,每年有约 500 名学生选修。

## 概述

第 1 章讨论抽象的概念并介绍集总电路的抽象。本章讨论如何从麦克斯韦方程中抽象出集总电路,提供了电气工程领域简化复杂系统分析过程的基本方法。然后,本章介绍了若干理想的集总元件,包括电阻、电压源和电流源。

本章还讨论了研究电子电路的两个主要动机:对物理系统建模和信息处理。本章介绍了模型的概念,并讨论如何用理想电阻和电源对物理元件进行建模。本章还讨论了信息处理与信号表示。

第2章介绍 KVL 和 KCL,并讨论其与麦克斯韦方程的关系。然后用 KVL 和 KCL 来分析简单电阻网络。本章还介绍了另一种有用的元件:受控源。

第3章给出了网络分析的更为一般的方法。

第4章介绍了简单非线性电路的分析方法。

第5章介绍了数字抽象,讨论了第二个重要的简化,使得电气工程师可解决创建大型系统所带来的复杂问题<sup>①</sup>。

第6章介绍开关元件并描述数字逻辑单元是如何构造的。本章还介绍了用 MOSFET 晶体管实现的开关。本章介绍了 MOSFET 的 S(开关)和 SR(开关-电阻)模型,并用前面介绍的网络分析方法分析简单的开关电路。接下来还讨论了数字系统中的放大和噪声容限的关系。

第7章讨论放大的概念。本章介绍了 MOSFET 的 SCS(开关电流源)模型,并构建了一个 MOSFET 放大器。

第8章继续进行对小信号放大器的讨论。

第9章介绍了存储元件,即电容和电感,讨论了电容和电感模型对于高速设计的必要性。

第10章讨论网络的一阶暂态。本章还介绍了一阶网络的若干重要应用,如数字存储。

第11章讨论数字系统的能量和功率,从而引入 CMOS 逻辑。

第12章分析网络的二阶暂态,同时从时域观点讨论 RLC 电路的谐振特性。

第13章讨论动态电路的正弦稳态分析。本章还介绍了阻抗和频率响应的概念。本章将设计滤波器作为重要的激发学生兴趣的应用。

第14章从频率观点分析谐振电路。

第15章介绍了运算放大器,将其作为模拟设计中应用抽象概念的重要例子。

第16章讨论二极管和简单二极管电路。

本书还包含了关于三角函数、复数和求解线性代数方程的附录,以帮助读者复习和查阅。

## 课程组织

各章顺序的排列是为了进行1或2学期完整的电路与电子学教学。一阶和二阶电路尽可能放到后面,使得学生在同时选修微分方程课程时可获得更好的数学基础。数字抽象尽可能早地介绍,以尽早地引起学生的兴趣。

此外,也可采用下面的顺序来组织电路课程和电子学课程。电路课程的顺序是:第1章(集总电路抽象),第2章(KVL 和 KCL),第3章(网络分析),第5章(数字抽象),第6章(MOSFET 的 S 和 SR 模型),第9章(电容和电感),第10章(一阶暂态),第11章(能量、功率和 CMOS),第12章(二阶暂态),第13章(正弦稳态),第14章(谐振电路的频率分析)和第15章(运算放大器抽象,任选)。

电子学课程的顺序是:第4章(非线性电路),第7章(放大器, MOSFET 的 SCS 模型),

<sup>①</sup> 在本书和相关的教学计划中如何引入数字抽象是让作者颇费苦心的问题。我们认为在此处引入数字抽象平衡了在教学计划中尽早引入数字系统以激励学生(尤其是通过实验)的需求和介绍足够的理论基础从而使得学生能够分析诸如组合逻辑这样的数字电路的需求。需要指出,我们认为应比 Tsividis 在 1998 年 ISCAS 会议文章所倡导的更早地介绍数字系统,同时我们完全同意他关于需要包含一定程度数字设计的思想。

第 8 章(小信号放大器),第 13 章(正弦稳态和滤波器),第 15 章(运算放大器抽象)和第 16 章(二极管和功率电路)。

## 网络补充材料

我们收集了相当丰富的材料帮助学生和教师使用本书。这些信息可通过 Morgan Kaufmann 网站获取: <http://www.mkp.com/companions/1558607358>。该网站包括:

- 附加的小节和例题,正文中用 **www** 的字样来标明这些小节和例题。
- 教师手册。
- 对 MIT OpenCourseWare 网站的连接,从中可访问作者开设的 6.002 电路与电子学课程。在该网站中包括:
  - 教学大纲。关于 6.002 教学目的和学习收获的介绍。
  - 阅读材料。对《模拟和数字电子电路基础》一书的阅读布置。
  - 讲稿。完整的讲稿,包括教学视频以及教师在课堂中对演示实验的说明。
  - 实验。4 个实验:戴维南/诺顿等效与逻辑门电路,MOSFET 反相放大器 and 一阶电路,二阶网络,声音回放系统。包括了关于仪器设备的补充材料和实验指南。实验包括实验前练习、实验中练习和实验后练习 3 个部分。
  - 作业。每周布置的作业,共 11 次。
  - 考试。2 次小测验和一次期末考试。
  - 相关资源。可用于自学电路与电子学课程的在线练习。

## 致谢

本书从 Campbell Searle 于 1991 年为 6.002 课程编写的初始讲义中演化而来。本书同时受到了不同时期 6.002 课程教员的影响,包括 Steve Senturia 和 Gerry Sussman。本书还受益于 Steve Ward、Tom Knight、Chris Terman、Ron Parker、Dimitri Antoniadis、Steve Umans、Gerry Wilson、Paul Gray、Keith Carver、Mark Horowitz、Cliff Pollock、Denise Penrose、Greg Schaffer 和 Steve Senturia 等人的深刻理解。作者还对 Timothy Trick、Barry Farbrother、John Pinkston、Stephane Lafortune、Gary May、Art Davis、Jeff Schowalter、John Uyemura、Mark Jupina、Barry Benedict、Barry Farbrother 和 Ward Helms 等人的反馈致谢。作者同时要向 Michael Zhang、Thit Minn 和 Patrick Maurer 在充实问题和例子方面的帮助,向 Jose Oscar Mur-Miranda、Levente Jakab、Vishal Kapur、Matt Howland、Tom Kotwal、Michael Jura、Stephen Hou、Shelley Duval、Amanda Wang、Ali Shoeb、Jason Kim 和 Michael Jura 在提供答案方面的帮助,向 Rob Geary、Yu Xinjie、Akash Agarwal、Chris Lang 和许多学生及同事在校读方面的帮助,向 Anne McCarthy、Cornelia Colyer 和 Jennifer Tucker 在绘图方面的帮助表示深深的谢意。我们还要向 Maxim 为本书提供的支持和 Ron Koo 使得支持成为现实致谢。Ron Koo 为本书提供了多个电子元件和芯片照片,他还促使我们以有经验的电气工程师分析电路时采用的快速直觉方式来讲授课程。本书中许多直觉分析均是在他的鼓励下完成的。我们同时还要感谢 Adam Brand 公司和 Intel 公司为我们提供奔腾 4 芯片的照片。

# 目 录

说明可从 Internet 上获取资料(参见前言)

<b>第 1 章 电路抽象</b> .....	1
1.1 抽象的力量 .....	1
1.2 集总电路抽象 .....	3
1.3 集总事物原则 .....	5
1.4 集总电路抽象的局限性 .....	7
1.5 实际二端元件 .....	9
1.5.1 电池 .....	9
1.5.2 线性电阻 .....	11
1.5.3 关联变量约定 .....	15
1.6 理想二端元件 .....	18
1.6.1 理想电压源、导线和电阻 .....	19
1.6.2 元件定律 .....	20
1.6.3 电流源——另一种理想二端元件 .....	22
1.7 物理元件的建模 .....	23
1.8 信号表示 .....	26
1.8.1 模拟信号 .....	26
1.8.2 数字信号——数值离散化 .....	28
1.9 小结 .....	30
练习 .....	31
问题 .....	32
<b>第 2 章 电阻网络</b> .....	33
2.1 术语 .....	33
2.2 基尔霍夫定律 .....	34
2.2.1 KCL .....	35
2.2.2 KVL .....	37
2.3 电路分析:基本方法 .....	41

2.3.1	单电阻电路 .....	42
2.3.2	单电阻电路的快速直觉分析 .....	44
2.3.3	能量守恒 .....	44
2.3.4	分压器和分流器 .....	46
2.3.5	一个更为复杂的电路 .....	53
2.4	电路分析的直觉方法：串联与并联简化 .....	57
2.5	更多例子 .....	61
2.6	受控源和控制的观念 .....	63
2.6.1	带有受控源的电路 .....	66
<b>WWW</b> 2.7	适于用计算机求解的表示方式 .....	69
2.8	小结 .....	69
练习	.....	70
问题	.....	73
<b>第3章</b>	<b>网络定理 .....</b>	<b>77</b>
3.1	概述 .....	77
3.2	节点电压 .....	77
3.3	节点法 .....	81
3.3.1	节点法：第二个例子 .....	84
3.3.2	浮动独立电压源 .....	87
3.3.3	节点法在含受控源电路中的应用 .....	90
<b>WWW</b> 3.3.4	电导和电源矩阵 .....	93
<b>WWW</b> 3.4	回路法 .....	93
3.5	叠加定理 .....	94
3.5.1	独立电源电路的叠加规则 .....	94
3.5.2	受控源的叠加规则 .....	100
3.6	戴维南定理和诺顿定理 .....	102
3.6.1	戴维南等效网络 .....	102
3.6.2	诺顿等效网络 .....	108
3.6.3	更多的例子 .....	112
3.7	小结 .....	116
练习	.....	117
问题	.....	122
<b>第4章</b>	<b>非线性电路分析 .....</b>	<b>127</b>
4.1	非线性元件简介 .....	127
4.2	直接分析 .....	130
4.3	图形分析 .....	134
4.4	分段线性分析 .....	136

4.5	增量分析 .....	142
4.6	小结 .....	151
	练习 .....	151
	问题 .....	153
<b>第 5 章</b>	<b>数字抽象 .....</b>	<b>159</b>
5.1	电平和静态原则 .....	161
5.2	布尔逻辑 .....	169
5.3	组合门 .....	171
5.4	标准乘积之和表示方式 .....	173
5.5	简化逻辑表达 .....	174
5.6	数字表示 .....	177
5.7	小结 .....	181
	练习 .....	182
	问题 .....	183
<b>第 6 章</b>	<b>MOSFET 开关 .....</b>	<b>189</b>
6.1	开关 .....	189
6.2	用开关实现逻辑函数 .....	191
6.3	MOSFET 元件及其 S 模型 .....	192
6.4	逻辑门的 MOSFET 开关实现 .....	194
6.5	用 S 模型进行静态分析 .....	198
6.6	MOSFET 的 SR 模型 .....	201
6.7	MOSFET 的物理结构 .....	202
6.8	用 SR 模型进行静态分析 .....	206
6.9	信号重构、增益和非线性 .....	211
	6.9.1 信号重构与增益 .....	211
	6.9.2 信号重构与非线性 .....	214
	6.9.3 缓冲器的传递特性和静态原则 .....	215
	6.9.4 反相器的传递特性和静态原则 .....	215
6.10	逻辑门的消耗功率 .....	216
<b>www</b> 6.11	有源上拉 .....	216
6.12	小结 .....	216
	练习 .....	217
	问题 .....	218
<b>第 7 章</b>	<b>MOSFET 放大器 .....</b>	<b>221</b>
7.1	信号放大 .....	221
7.2	复习受控源 .....	222

7.3	实际 MOSFET 特性 .....	224
7.4	MOSFET 的开关电流源(SCS)模型 .....	227
7.5	MOSFET 放大器 .....	230
7.5.1	MOSFET 放大器的偏置 .....	233
7.5.2	放大器抽象与饱和原则 .....	235
7.6	MOSFET 放大器的大信号分析 .....	236
7.6.1	饱和区域中 $v_{IN}$ 与 $v_{OUT}$ 的关系 .....	237
7.6.2	有效输入和输出范围 .....	239
7.6.3	用另一种方法求解有效输入和输出范围 .....	243
7.7	选择工作点 .....	244
7.8	MOSFET 的开关统一(SU)模型 .....	258
7.9	小结 .....	259
	练习 .....	260
	问题 .....	263
<b>第 8 章</b>	<b>小信号模型 .....</b>	<b>269</b>
8.1	非线性 MOSFET 放大器综述 .....	269
8.2	小信号模型 .....	269
8.2.1	小信号电路表示 .....	274
8.2.2	MOSFET 放大器的小信号电路 .....	277
8.2.3	选择工作点 .....	279
8.2.4	输入与输出电阻、电流与功率增益 .....	280
8.3	小结 .....	294
	练习 .....	295
	问题 .....	297
<b>第 9 章</b>	<b>储能元件 .....</b>	<b>301</b>
9.1	元件方程 .....	304
9.1.1	电容 .....	305
9.1.2	电感 .....	308
9.2	串联和并联 .....	311
9.2.1	电容 .....	311
9.2.2	电感 .....	312
9.3	特别的例子 .....	313
9.3.1	MOSFET 栅极电容 .....	313
9.3.2	导线回路电感 .....	315
9.3.3	集成电路的导线电容和电感 .....	315
9.3.4	变压器 .....	317
9.4	简单的电路例子 .....	318



<b>www</b> 9.4.1 正弦输入	319
9.4.2 阶跃输入	319
9.4.3 冲激输入	325
<b>www</b> 9.4.4 角色颠倒	326
9.5 能量、电荷和磁链守恒	326
9.6 小结	328
练习	329
问题	331
<b>第 10 章 线性电气网络的一阶暂态过程</b>	<b>335</b>
10.1 RC 电路分析	336
10.1.1 阶跃输入的并联 RC 电路	336
10.1.2 RC 放电电路	339
10.1.3 阶跃输入的串联 RC 电路	341
10.1.4 方波输入的串联 RC 电路	343
10.2 RL 电路分析	345
10.3 直觉分析	346
10.4 传播延迟和数字抽象	350
10.4.1 传播延迟的定义	351
10.4.2 根据 MOSFET 的 SRC 模型计算 $t_{pd}$	353
10.5 状态和状态变量	359
10.5.1 状态的概念	359
10.5.2 利用状态方程进行计算机分析	360
10.5.3 零输入和零状态响应	360
<b>www</b> 10.5.4 通过积分算子求解	363
10.6 其他例子	363
10.6.1 数字电路中导线电感的影响	363
10.6.2 斜坡输入与线性	364
10.6.3 RC 电路对窄脉冲的响应和冲激响应	367
10.6.4 求冲激响应的直觉方法	370
10.6.5 时钟信号和时钟扇出	371
<b>www</b> 10.6.6 RC 对衰减指数的响应	374
10.6.7 正弦输入的串联 RL 电路	374
10.7 数字存储	376
10.7.1 数字状态的概念	376
10.7.2 一个抽象的数字存储元件	377
10.7.3 设计数字存储元件	378
10.7.4 静态存储元件	381
10.8 小结	382