

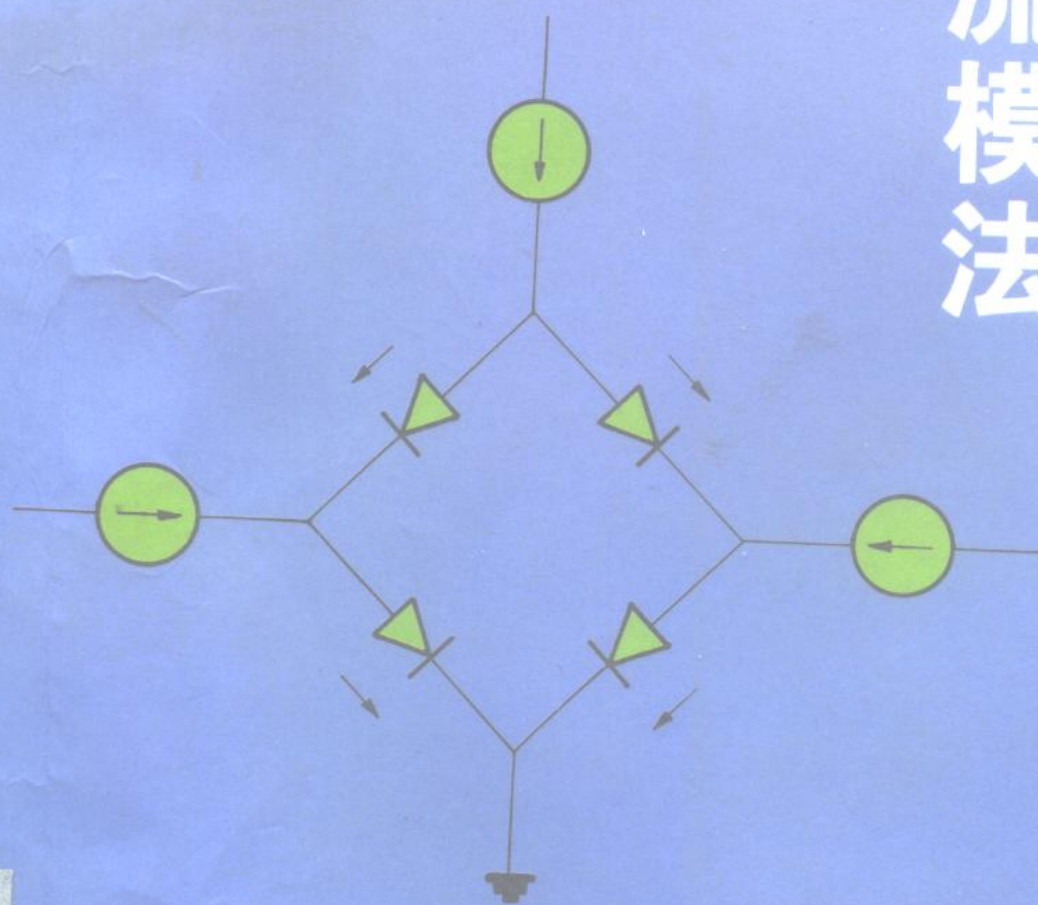
[英] C. Toumazou, F. J. Lidgley

& D. G. Haigh 编

姚玉洁 冯军 尹洪

张培东 李永和 译

模拟集成电路设计 电流模法



高等教育出版社

模拟集成电路设计

——电流模法

[英] C.Toumazou F.J.Lidgey & D.G.Haigh 编
姚玉洁 冯 军 尹 洪 张培东 李永和 译

高等教育出版社

(京)112号

内 容 提 要

本书原著曾于1991年获Rayleigh图书奖, 主要介绍国外用电流模法设计模拟集成电路的新知识。内容为: 电流传输器原理和应用、通用电流模模拟放大器、高频CMOS跨导器、双极型电流镜、动态电流镜、砷化镓模拟集成电路设计技术、连续时间滤波器、开关电容单片滤波器、开关电流滤波器、VLSI模拟接口电路、电流模D/A和A/D转换器、电流拷贝器电路的应用、集成电流传输器、用于电压放大器的电流反馈、用于模拟MOS VLSI的神经网络标准部件等。

Analogue IC design: the current-mode approach
Edited by C.Toumazou, F.J.Lidgey & D.G.Haigh
Peter Peregrinus Ltd.

Copyright © 高等教育出版社
Institution of Electrical Engineers 授权翻译

图书在版编目(CIP)数据

模拟集成电路设计: 电流模法/(英)C. Toumazou 等编;
姚玉洁等译. —北京: 高等教育出版社, 1996. 4
ISBN 7-04-5673-9

I. 模… I. ①T…②姚… III. 模拟集成电路-设计-方法, 电流模法 IV. TN431.102

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 17705 号

*

高等教育出版社出版

北京沙滩后街 55 号

邮政编码: 100009 传真: 4014048 电话: 4054588

新华书店总店北京发行所发行

高等教育出版社印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 28 字数 690 000

1996 年 4 月第 1 版 1996 年 4 月第 1 次印刷

印数 0 001-1 674

定价 26.50 元

凡购买高等教育出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等
质量问题者, 请与当地图书销售部门联系调换

版权所有, 不得翻印

序

本卷书是由Chris Toumazou试图为“电流模模拟集成电路设计”研究组发表一些学术短文的设想而引发出版的。而这些学术短文是编者为1990年4月30日在New Orleans举行的1990年IEEE国际电路与系统专题讨论会的部分内容而组织的。

从联系作者到出版只有五个月的时间,这看来令人气馁,但Chris和John表现出冲天干劲与极大热情,作者们造诣极高、成就卓越,二者结合起来意味着这项工作必定能向前进展。出版者同意以非常短的时间印刷手稿以示帮助。

最终,编者终于出版了这卷书,此书远远胜过研究组原始论文,成为现代集成电路设计技术的“圣经”。它是对电路与系统丛书中的第1卷——《砷化镓工艺及其对电路与系统的影响》的完美补充,而且将对本科生、研究生、学术界和电子工业界的研究人员与电路设计者大有裨益。

David Haigh
Randeep Singh Soin

1990年3月于伦敦

前 言

Chris Toumazou和John Lidgely这两位编者被特许为1989年6月在Portland(Oregon)召开的1989年IEEE国际电路与系统专题讨论会“电流模模拟集成电路设计”特别会议的组织者。这个会议参加者十分踊跃,并激发了人们浓厚的兴趣。Texas A & M大学的Randy Geiger教授作为1990年IEEE电路与系统专题讨论会的研究组和特别会议的负责人,批准了今年召开关于“电流模模拟集成电路设计”特别会议和在讨论会之前成立研究组的两项计划。这些事情(特别是研究组)的结果是诞生了现在这卷书。许多被约请到研究组或特别会议的人有着更重要的任务,但都同意为本书撰写章节,提供宝贵的资料。

短期内出版此书对作者们提出了相当迫切的要求。他们当中许多人在最后冲刺阶段为使资料齐备而牺牲了睡眠。他们的敬业和奉献精神实在令人难忘。

我们希望本卷书能像编写时激人振奋那样令读者感到有兴趣和实用。

Chris Toumazou

John Lidgely

David Haigh

1990年3月于伦敦

感 谢

排版是我们自己利用作者提供的计算机软盘上的材料完成的。

我们感谢Imperial学院的Bob Spence教授允许我们使用计算机设备,感谢Costas Makris把接收数据转换成普通格式,并成为我们的“计算机顾问”。Ann Toumazou提供了热诚的服务,打印出不能被电子转换的几百个方程和表格,还非常仔细地做了大量校对工作。对这些极其重要的贡献,我们深表感谢。Imperial学院的Wiesia Hsissen在秘书事务工作方面给予我们很有益的支持。我们感谢Peter Peregrinus公司合作制定了非常迅速的印刷计划。

最后,谢谢我们的家人的忍耐、理解和支持。

编 者

译 者 的 话

本译本的原版书由Peter Peregrinus Ltd于1990年出版,是英国畅销书之一,研究生对本书的需求呈上升趋势。本书于1991年获英国Rayleigh图书奖。

本书根据“电流模拟集成电路设计”研究组为1990年4月30日在New Orleans举行的1990年IEEE国际电路与系统专题讨论会准备部分资料而撰写的一批学术论文编辑出版的。作者们均是国际上在模拟集成电路设计方面造诣颇深的知名资深专家。他们提出的电流模电路理论和技术是与高速集成工艺相伴发展的新兴电路技术分支,用电流模技术设计的高性能模拟集成电路容量大、速度快、精度高、频带宽、线性好、效率高,可以说是模拟集成电路设计的重大突破,具有极为广阔的发展前景。本书虽为论文集,各章独自成篇,但经过编者精心编选、组织,却成为内在有机联系的体系完整的整体。一经出版,即受到欢迎。看来被誉为现代集成电路设计技术的“圣经”也许并不为过。

他山之石可以攻玉,国外的经验和先进技术值得借鉴。我们组织翻译这本书,向广大读者介绍电流模理论和技术,意在将这些当代前沿理论与技术逐步引入我国电子线路、电子技术教学,推进面向21世纪的教学内容和课程体系的改革,促进教材建设。同时可供广大科技工作者借鉴与参考。

全书共18章。姚玉洁编审译第1、6、10、11、12、15、18章及前言、序、目录、索引;冯军副教授译第3、7章;张培东副编审译第4、5、14、17章;尹洪副编审译第8、13、16章;李永和编审译第2、9章。全书由李永和编审和姚玉洁编审校订并定稿。由于本书是根据学术论文编辑的,各论文独领风骚,各具特色,但各论文间文图符号不尽一致,为尊重原文,在翻译时不便以某一标准进行统一,因此除对因计算机排版造成的下标平排做了一些必要的处理外,基本上保持原版插图原貌。原版个别文字与插图有错误,译文中作了更正,并加注说明。

在组织翻译的过程中得到谢嘉奎教授和张凤言教授的大力支持和帮助,在此深表谢意。由于本书新内容多,加之我们水平有限,时间仓促,译文中难免有错误和疏漏,敬请广大读者批评指正。

译 者

1995年4月

目 录

第1章 绪论

Chris Toumazou, John
Lidgey, David Haigh..... (1)

- 1.1 模拟集成电路(IC)设计..... (1)
- 1.2 电流模方法..... (1)
- 1.3 半导体工艺技术的进步..... (1)
- 1.4 新的模拟标准部件..... (3)
- 1.5 电流模系统..... (3)
- 1.6 各章评论..... (4)
- 1.7 未来电流模模拟IC设计..... (7)

第2章 从跨导线性观点看电流模电路: 一个指导

Barrie Gilbert..... (8)

- 2.1 引言..... (8)
- 2.2 一般原理..... (8)
 - 2.2.1 跨导线性环与跨导线性网络..... (11)
 - 2.2.2 跨导线性原理..... (12)
 - 2.2.3 发射区面积比的应用..... (14)
 - 2.2.4 V_{BE} 失配..... (15)
 - 2.2.5 TL分析的几个实例:多环..... (15)
 - 2.2.6 比量度观点..... (17)
 - 2.2.7 扩展TL理论以计入电压发生器..... (18)
 - 2.2.8 器件其他非理想特性的影响..... (19)
- 2.3 平方和求平方根..... (22)
 - 2.3.1 定标..... (23)
 - 2.3.2 TL平方电路..... (24)
 - 2.3.3 有效值-直流值变换器..... (26)
 - 2.3.4 二象限TL平方器..... (29)
 - 2.3.5 求平方根和几何平均..... (31)
 - 2.3.6 矢量模..... (31)
- 2.4 模拟乘法器和除法器..... (35)
 - 2.4.1 基本四管乘法器单元..... (36)
 - 2.4.2 不受 β 影响的“A”型单元..... (37)
 - 2.4.3 β 过敏的“B”型单元..... (41)
 - 2.4.4 失真机理..... (43)
 - 2.4.5 “对数-反对数”乘法器..... (45)
 - 2.4.6 六管乘法器单元..... (46)
- 2.5 跨导线性交叉四管单元..... (47)
 - 2.5.1 Caprio四管单元..... (48)

- 2.5.2 线性半波整流器..... (48)
- 2.5.3 与绝对温度成比例(ΔV_{BE})单元..... (49)
- 2.5.4 另一种宽带平方器..... (51)
- 2.5.5 另一种二象限乘法器..... (52)
- 2.6 各种各样的TL和TN电路..... (53)
 - 2.6.1 信号归一化..... (54)
 - 2.6.2 最小值和最大值函数..... (55)
 - 2.6.3 三角函数..... (57)
- 2.7 感谢..... (59)
- 2.8 参考文献..... (59)
- 2.9 参考书目..... (60)

第3章 电流传输器原理和应用

Adel S. Sedra, Gordon
W. Roberts..... (62)

- 3.1 引言:电流传输器概念..... (62)
- 3.2 第一代电流传输器(CC I)..... (62)
- 3.3 第二代电流传输器(CC II)..... (65)
 - 3.3.1 CC II电路实现的基础..... (68)
 - 3.3.2 $5\mu\text{m}$ CMOS CC II实现..... (68)
 - 3.3.3 五阶高通滤波器实例..... (73)
- 3.4 有源RC电路转换成电流传输器等效
电路..... (75)
 - 3.4.1 伴随网络..... (75)
 - 3.4.2 单电流传输器双二阶电路..... (76)
 - 3.4.3 高阶滤波器的实现..... (77)
 - 3.4.4 采用电流运算放大器的
电流模电路..... (79)
- 3.5 结束语..... (80)
- 3.6 参考文献..... (80)

第4章 通用电流模模拟放大器

Chris Toumazou,
John Lidgey..... (84)

- 4.1 引言..... (84)
- 4.2 使用电压运算放大器设计的传统
电流输出电路的回顾..... (85)
- 4.3 运算放大器电源电流读出:
回顾和发展..... (86)
 - 4.3.1 电源电流分配..... (90)
- 4.4 电流跟随器..... (91)

4.5 电流传输器	(93)
4.5.1 以运算放大器电源电流读出 为基础的高性能电流传输器	(95)
4.6 电源电流读出的实际应用	(96)
4.6.1 以恒定带宽跟随器为基础的电压 放大器	(96)
4.6.2 电流模阻抗变换器	(98)
4.6.3 通用电流传输器有源滤波器	(100)
4.6.4 电流模精密整流器	(100)
4.6.5 电流模精密峰值检波器	(101)
4.6.6 电流模仪用放大器	(102)
4.6.7 硬件减少	(104)
4.7 七端运算放大器	(104)
4.8 电流模反馈放大器	(106)
4.8.1 跨导线性甲乙类电流放大器	(106)
4.8.2 电流反馈运算放大器	(107)
4.8.3 运算浮置传输器(OFC)	(108)
4.8.4 关于真正的电流模运算放大器	(111)
4.9 结束语	(117)
4.10 参考文献	(117)
第5章 高频CMOS跨导器	
Scott T. Dupuie,	
Mohammed Ismail	(121)
5.1 引言	(121)
5.2 差分对跨导器	(122)
5.2.1 非线性	(122)
5.2.2 谐波失真	(123)
5.2.3 频率响应	(124)
5.2.4 噪声	(125)
5.2.5 交叉耦合差分对	(126)
5.3 自适应偏置跨导器	(128)
5.3.1 基本原理	(128)
5.3.2 双晶体管平方电路	(130)
5.3.3 交叉耦合四管单元	(133)
5.4 甲乙类跨导器	(135)
5.4.1 基本原理	(136)
5.4.2 电压偏置源极耦合对	(138)
5.4.3 CMOS复合对	(139)
5.4.4 交叉耦合双四管单元	(141)
5.5 三极管区跨导器	(145)
5.5.1 基本原理	(145)
5.5.2 四晶体管跨导器	(147)
5.5.3 双晶体管跨导器	(148)
5.5.4 频率响应	(149)

5.6 结束语	(150)
5.7 感谢	(150)
5.8 参考文献	(150)
附录 5A 非线性函数的幂级数表示法	(153)
附录 5B 器件模型	(154)
B.1 非饱和模型	(154)
B.2 饱和模型	(156)

第6章 双极型电流镜

Barrie Gilbert	(157)
6.1 引言——理想电流镜	(157)
6.1.1 电流镜、电流反射器、电流传输器、 电流源	(158)
6.2 单晶体管电流镜	(159)
6.2.1 采用横向PNP晶体管的 单晶体管电流镜	(161)
6.3 双晶体管电流镜	(165)
6.3.1 实际器件缺陷的影响	(165)
6.3.2 利用发射极电阻提高精度	(166)
6.3.3 噪声和漂移考虑	(169)
6.3.4 非线性双晶体管电流镜	(171)
6.4 三晶体管电流镜	(174)
6.4.1 射极跟随器增广电流镜	(174)
6.4.2 利用共射-共基结构提高输出电阻	(175)
6.4.3 Wilson电流镜及改进	(176)
6.5 专用电流镜	(181)
6.5.1 可变比电流镜	(181)
6.5.2 大电流比电流镜	(184)
6.5.3 跟踪电源的电流镜	(186)
6.5.4 具有很高输出电阻或负 输出电阻的电流镜	(187)
6.5.5 电压跟随电流镜: GCM	(189)
6.5.6 互补应用于电流镜	(191)
6.6 感谢	(194)
6.7 参考文献	(194)

第7章 动态电流镜

Eric A. Vittoz,	
George Wegmann	(195)
7.1 引言	(195)
7.2 MOS晶体管的特性 及模型的概述	(195)
7.3 标准MOS电流镜的 设计考虑和限制	(197)
7.4 动态电流镜的工作原理	(198)
7.5 电荷注入	(199)

7.6 共源-共栅组态	(202)	的设计	(247)
7.7 泄漏电流的影响	(204)	9.2.1 级联设计	(248)
7.8 建立时间	(205)	9.2.2 元件替代法	(249)
7.9 噪声	(206)	9.2.3 运算仿真法	(250)
7.10 多重电流镜和乘法电流镜	(207)	9.2.4 OTA非理想性的影响	(252)
7.11 除法动态电流镜	(208)	9.3 调谐方法	(253)
7.12 应用举例及可能的扩展	(209)	9.4 讨论与总结	(254)
7.13 结束语	(212)	9.5 参考文献	(254)
7.14 参考文献	(212)	第10章 基于采用电流变量和电荷变量的LCR滤波器仿真的连续时间和开关电容单片滤波器	
第8章 砷化镓模拟集成电路设计技术		David Haigh	(257)
Chris Toumazou,		10.1 引言	(257)
David Haigh	(215)	10.2 LCR原型滤波器和状态矩阵公式	(257)
8.1 引言	(215)	10.3 信号流图表示和实现	(259)
8.2 工艺、器件和仿真	(215)	10.4 积分器子部件	(261)
8.3 电流镜	(217)	10.5 积分器类型	(261)
8.3.1 电流镜的分类	(217)	10.5.1 电压积分器	(261)
8.3.2 同相正电流镜	(217)	10.5.2 电流积分器	(261)
8.3.3 反相电压跟随负电流镜	(218)	10.5.3 混合变量积分器	(262)
8.3.4 线性负电流镜	(223)	10.5.4 积分器标准	(262)
8.3.5 电流镜性能评价	(224)	10.6 信号流图定标	(262)
8.4 单端-差分变换器	(225)	10.7 广义滤波器实现结构	(263)
8.5 差分-单端变换器	(226)	10.7.1 广义化的必要性	(263)
8.6 线性跨导器	(227)	10.7.2 广义结构	(264)
8.6.1 线性化原理	(227)	10.8 灵敏度	(266)
8.6.2 线性跨导器的实现	(227)	10.9 一般定标操作	(267)
8.7 高增益运算跨导放大器	(230)	10.10 跨导器结构	(267)
8.7.1 总论	(230)	10.11 滤波器实现的分类和特性	(269)
8.7.2 二极管电平移位电路	(231)	10.11.1 概述	(269)
8.7.3 采用器件宽度比的电路	(232)	10.11.2 行-型实现	(269)
8.7.4 快速建立结构	(232)	10.11.3 列-型实现	(270)
8.8 缓冲放大器	(235)	10.11.4 非标准实现	(270)
8.9 应用	(236)	10.11.5 交叉型仿真	(270)
8.9.1 开关电容滤波器举例	(236)	10.11.6 “Z”型仿真	(270)
8.9.2 微波应用	(238)	10.11.7 椭圆式滤波器	(271)
8.9.3 光学应用	(240)	10.12 举例	(271)
8.9.4 连续时间滤波器	(241)	10.12.1 多项式滤波器	(271)
8.10 结束语	(241)	10.12.2 椭圆式滤波器	(274)
8.11 感谢	(241)	10.13 结束语	(275)
8.12 参考文献	(241)	10.14 感谢	(275)
第9章 连续时间滤波器		10.15 参考文献	(275)
Rolf Schaumann,		第11章 开关电流滤波器	
Mehmet Ali Tan	(245)		
9.1 引言	(245)		
9.2 连续时间跨导-电容滤波器			

John B. Hughes	(277)
11.1 引言	(277)
11.2 开关电容背景	(278)
11.3 开关电流系统	(281)
11.4 开关电流积分器	(282)
11.4.1 电流存储器	(282)
11.4.2 第一代开关电流积分器	(283)
11.4.3 第二代开关电流积分器	(286)
11.5 开关电流微分器	(290)
11.6 开关电流状态变量滤波器综合	(292)
11.6.1 基于积分器的四次节	(292)
11.6.2 滤波器设计举例	(294)
11.6.3 基于微分器的四次节	(295)
11.7 模拟误差	(296)
11.8 电流存储器电路增强	(297)
11.9 接口电路	(298)
11.10 结束语	(298)
11.11 感谢	(299)
11.12 参考文献	(299)
第12章 VLSI模拟接口电路	
Evert Seevinck	(302)
12.1 引言	(302)
12.2 输入接口电路	(303)
12.2.1 线性CMOS电压-电流变换器	(304)
12.2.2 大信号双极型 $V-I$ 变换器	(305)
12.2.3 高频双极型 $V-I$ 变换器	(306)
12.2.4 CMOS亚纳秒ECL可兼容 输入缓冲器	(307)
12.3 单片滤波器	(308)
12.3.1 双极型视频滤波器	(309)
12.3.2 CMOS VHF滤波器	(311)
12.3.3 大时间常数的积分	(312)
12.4 信号调节	(313)
12.5 内部接口	(316)
12.5.1 SRAM中的电流读出	(316)
12.5.2 双引线多路传输系统	(317)
12.6 输出接口电路	(318)
12.6.1 双极型功率放大器	(318)
12.6.2 扩大安全工作区的双极型功率晶体 管设计	(319)
12.6.3 CMOS亚纳秒真实ECL输出 缓冲器	(319)
12.7 电源接口	(321)
12.7.1 “纳功率”CMOS电压和电流基准	(321)

12.7.2 具有低支持电流的带自适应偏置 的调整器电路	(322)
12.7.3 在片 I_{DD} 监控器电路	(323)
12.8 结束语	(324)
12.9 感谢	(324)
12.10 参考文献	(324)
第13章 电流模A/D和D/A转换器	
C.Andre T.Salama, David G.Nairn, Henry W.Singor	(328)
13.1 引言	(328)
13.2 A/D转换器	(328)
13.2.1 算法A/D转换	(328)
13.2.2 基本电流镜A/D转换器	(329)
13.2.3 有源镜A/D转换器	(331)
13.2.4 电流匹配A/D转换器	(333)
13.2.5 小结	(335)
13.3 D/A转换器	(336)
13.3.1 CMOS分离集电极横向双极型 晶体管	(336)
13.3.2 D/A转换器结构	(337)
13.3.3 加权电流源的实现	(338)
13.3.4 高速电流开关的实现	(338)
13.3.5 控制放大器的实现	(339)
13.3.6 实验结果	(340)
13.3.7 小结	(341)
13.4 感谢	(341)
13.5 参考文献	(341)
第14章 电流拷贝器电路的应用	
David Vallancourt, Steven J. Daubert	(344)
14.1 引言	(344)
14.2 电流拷贝器概念的回顾	(344)
14.3 电流拷贝器的应用	(345)
14.4 功能块举例	(345)
14.4.1 与比值无关的整数电流乘法器	(345)
14.4.2 与比值无关的电压乘法器/除法器	(346)
14.4.3 与比值无关的电流除法器	(347)
14.5 系统举例	(349)
14.5.1 自校准D/A转换器	(349)
14.5.2 与比值无关的算法A/D转换器	(351)
14.5.3 利用电流除法的流水线A/D转换器	(352)
14.5.4 $\Sigma-\Delta$ 前端	(353)
14.5.5 数字可编程模拟滤波器	(354)

14.6 参考文献	(354)
第15章 集成电流传输器	
Doug C.Wadsworth	(357)
15.1 引言	(357)
15.1.1 以前的传输器实现	(357)
15.1.2 新传输器的实现	(357)
15.2 电路拓扑结构的发展	(358)
15.2.1 基本新电路拓扑结构	(359)
15.2.2 改进的电路拓扑结构	(360)
15.2.3 最终电路拓扑结构	(360)
15.3 工艺特性	(362)
15.3.1 标准双极工艺	(362)
15.3.2 互补双极工艺	(362)
15.4 电路描述	(363)
15.4.1 单位增益缓冲器	(364)
15.4.2 反相CC I 结构	(364)
15.4.3 同相CC II 结构	(365)
15.4.4 JFET输出结构	(365)
15.5 性能	(366)
15.5.1 传输器输出阻抗	(366)
15.5.2 传输器频率响应	(366)
15.5.3 传输器瞬态响应	(366)
15.5.4 传输器谐波失真	(367)
15.5.5 传输器精度	(367)
15.5.6 性能总结	(369)
15.6 应用	(369)
15.6.1 专用音频电子学	(369)
15.6.2 精密整流	(371)
15.6.3 电流反馈放大器	(375)
15.7 结束语	(376)
15.8 参考文献	(377)
第16章 应用于电压放大器的“电流反馈”	
Derek F. Bowers	(380)
16.1 引言	(380)
16.2 运算放大器	(380)
16.3 仪用放大器	(382)
16.4 “电流反馈”运算放大器	(383)
16.5 大信号对电流反馈运算放大器	

的影响	(386)
16.6 电流反馈运算放大器的缺点	(386)
16.7 电流反馈运算放大器的设计方法	(387)
16.8 实际的电流反馈运算放大器设计	(389)
16.9 “电流反馈”用于仪用放大器	(390)
16.10 “有源反馈”用于仪用放大器	(392)
16.11 典型的电流和有源反馈仪用放大器	(394)
16.12 结束语	(395)
16.13 感谢	(396)
16.14 参考文献	(396)
第17章 用于模拟MOS VLSI的神经网络标准部件	
Steven Bibyk, Mohammed Ismail	(398)
17.1 神经网络和模拟VLSI	(398)
17.2 神经模型	(399)
17.3 突触权重的存储	(400)
17.3.1 非易失的浮栅存储	(400)
17.4 电流模、神经网络标准部件	(402)
17.4.1 可编程突触元件	(402)
17.4.2 内积电路	(402)
17.4.3 电流阈值	(404)
17.4.4 硅实现	(405)
17.5 自适应滤波和应用	(407)
17.6 结束语	(407)
17.7 感谢	(408)
17.8 参考文献	(408)
第18章 模拟集成电路设计的发展前景	
Phillip E.Allen	(411)
18.1 模拟集成电路设计的现状	(411)
18.2 工艺技术发展趋向	(413)
18.3 设计发展趋向	(415)
18.4 仿真和模型化发展趋向	(417)
18.5 设计自动化	(420)
18.6 测试发展趋向	(422)
18.7 前景发展趋向和展望	(423)
18.8 参考文献	(425)
附录:英汉名词术语对照	(427)

第1章 绪 论

Chris Toumazou, John Lidgey , David Haigh

1.1 模拟集成电路(IC)设计

随着应用机会的不断增多,模拟集成电路设计变得日益重要。单片芯片上包括混合模拟和数字功能的集成电路的出现,已将模拟设计引到一个更先进的水平。

模拟IC设计在传统上曾受到工艺技术的阻碍,一般是因为工艺技术是对数字电路优化的。这导致表现的“设计时间综合症”,即一个单片IC可能仅有20%的模拟功能,这些功能却要花费80%的设计时间。然而,随着新一代“工艺技术专用”模拟设计技术的发展,这种状况现在正在改变。而且,作为新的更成熟的器件工艺技术,诸如真正互补硅双极结(BJT)工艺、混合硅双极和互补金属氧化物半导体(BiCMOS)工艺和砷化镓(GaAs)工艺等,正变得可资利用。随之而来的是,对新型模拟设计、方法、技术和CAD工具的需求,这些需求对于为未来市场而成功地研制、开发这些工艺技术是必需的。伴随着这些工艺技术进步而来的是,IC上器件特征尺寸的日益缩小,以及为产生“更迭的”模拟设计技术供能的电源电压的必然降低。

现代化的模拟集成电路设计从电流模处理的发展和应用中获得极大的推进,电流模处理正迅速地取代基于电压模设计的传统方法。从包括电流模技术在内的模拟信号处理的更广阔的角度来观察,可能会得到更多的好处。本书汲取、汇集了世界上最著名的模拟IC设计者的论文,首次提供一本专门研究这个重要而振奋人心的模拟电子学新领域的综合性教材。

1.2 电流模方法

模拟设计历史上被认为是电压主宰的信号处理形式。在模拟IC设计中显而易见的是,一般在进行任何模拟信号处理之前,电流信号很容易变换到电压域。举个最经常遇到的例子,人们十分乐于将晶体管装进与电压有关的电路和系统,并且假设这种形式的处理最适合于这个任务,尽管BJT和FET都是电流输出器件!电流模处理的一个关键性能特性是固有的宽带能力,而在电流放大器中,晶体管几乎一直到其 f_T 频率都是有效的。近来集成电路工艺技术的进步就意味着,现代化的模拟IC设计现在能够发挥电流模模拟信号处理的潜力,为解决许多电路和系统问题提供有吸引力的精巧方法。

1.3 半导体工艺技术的进步

图1.1概略地表示出导致电流模模拟IC设计这个领域发展的工艺技术进步的几个主要方面。

例如,在双极工艺技术中,近来发展起来的电流反馈运算放大器呈现出与闭环增益无关的近似恒定的带宽以及非常高的转换速率,这正证明了运用电流模方法的优越性。值得注意的是,许多电流反馈放大器设计的理论基础在多年以前就已奠定了,但只是在最近随着真正互补双极工艺技术的发展,这些器件才能得以实现。

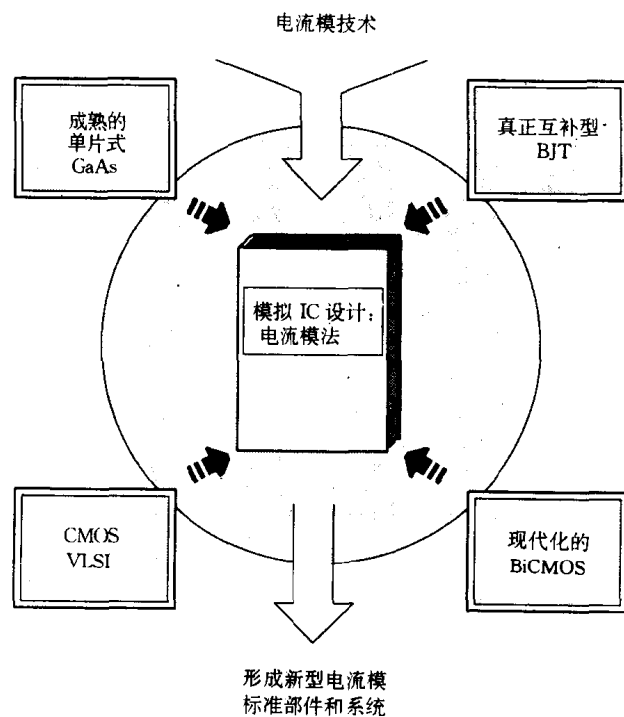


图 1.1 工艺技术及其对电流模模拟设计的影响

在CMOS工艺技术中,由于已有VLSI混合模拟和数字电路,研究发展集中于新一代模拟采样数据处理系统,它可以称为开关或动态电流电路。这些电路包括开关电流滤波器、动态电流镜和电流拷贝器及存储单元。这些发展的主要推动力之一是缩减数字CMOS器件的特征尺寸,这些器件需要降低电源电压。由于3.3 V很可能成为将来CMOS工业化标准,将选择如阈值电压这样的工艺参数,以使数字性能优化,结果电压域性能将受损失。这样的难点可以通过全部地或有选择地工作于电流域来解决。开关电流滤波器是开关电容滤波器的引人注意的替换物。它们不需要运算放大器,而且在常规开关电容滤波器中必需的精确电容匹配不再是先决条件。同样地,VLSI CMOS A/D转换器和神经计算处理机的电流模实现代表了振奋人心的新发展,而且是工艺技术推动设计的明显例证。CMOS工艺技术已成为占绝对优势的模拟工艺技术,主要是因为高质量的电容和开关。BiCMOS工艺技术将双极工艺技术和CMOS工艺技术两者的优点结合起来,可提供非常引人注意的可很理想地适合于电流模技术的低功率和高速度工艺技术。

采用CMOS工艺技术的采样数据信号处理电路最高开关频率极限约为30 MHz。GaAs MESFET工艺技术已成功地将工作开关频率提高了一个数量级以上。这是靠引入高速跨导放大器和电流镜技术达到的,而这些技术已被改进,以充分发挥GaAs工艺技术固有的高速潜力。这样一些在模拟GaAs电路和系统设计中的进展已经打开了通往将微波和光学系统设计转换到模拟IC设计领域可能性的大门。

此外,有了成熟的CMOS VLSI、BiCMOS、GaAs和真正互补双极工艺技术,电流模模拟设计技术将在模拟域内成功地开发这些工艺技术的过程中起重要作用。结果,许多早先的电流模电路技术将会复兴,而新一代电流模标准部件和系统正在研制,如图1.1所示,并将在全书中加以描述。

1.4 新的模拟标准部件

电流模处理的早期电路设计原理和技术,如Barrie Gilbert 1972年提出的跨导线性电路原理,现在成为研制高性能模拟电路和系统的有力工具。研究电流模模拟信号处理的更深远影响是出现了一批新的标准部件,从电流传输器和电流反馈运算放大器到采样数据电流电路,如动态电流镜和模拟神经网络。图1.2示出了可在本教科书中找到的这些标准部件的范围,并在每个方框内给出章节参考号数。例如,电流传输器是非常有功效的模拟标准部件,它将电压模和电流模的能力结合在一起。业已证实,它功能灵活而通用,很快就被认可为实际可行的有很宽的高性能电路和系统应用范围的器件。有关最近商业性集成电路电流传输器的推广已有报导,而且的确是非常及时并极受欢迎的。

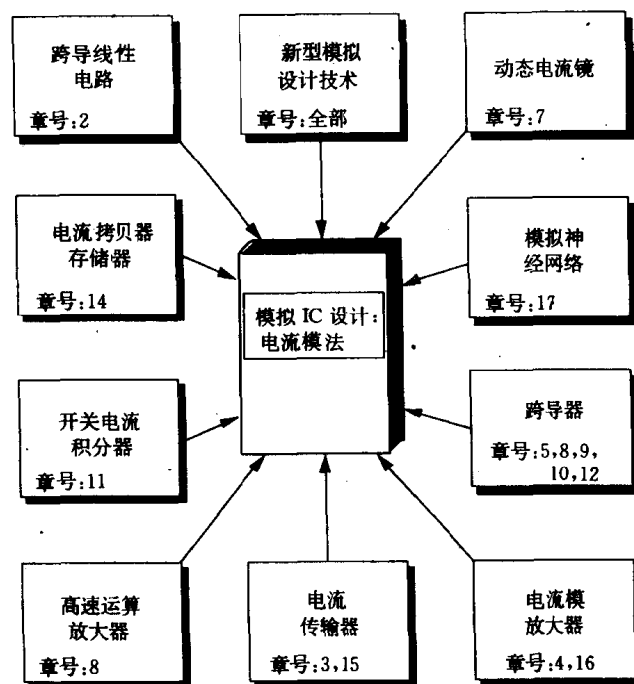


图 1.2 电流模模拟标准部件

1.5 电流模系统

从以电流模方法为基础的系统的可看到电流模模拟信号处理的成熟程度。图1.3示出这里描述的各种各样的系统应用,覆盖了许多重要领域,如从连续时间和采样数据滤波器,通过通

用模拟接口、A/D和D/A转换器，一直到电流模神经网络。这个领域尚处于初期，再过五年左右，将会看到越来越多的以电流模模拟电路及子系统构成的系统开发。

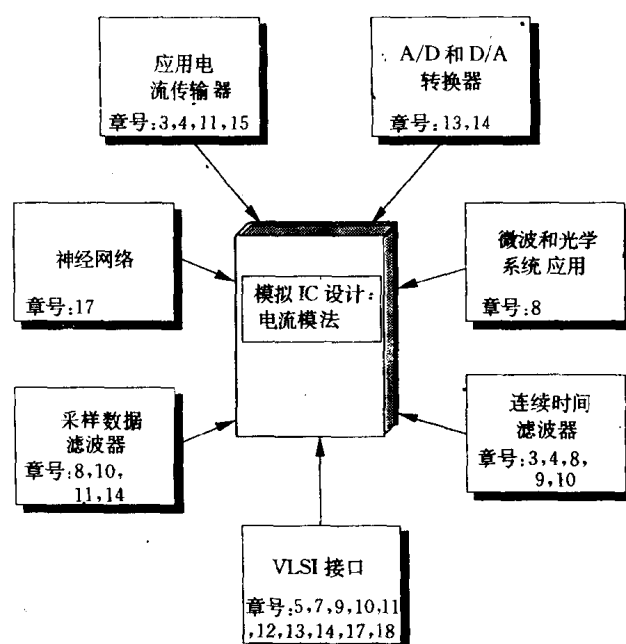


图 1.3 电流模系统应用

1.6 各章评论

本书包括三个主要部分，它们是电路级、子系统级和系统级设计。本书适当地在第2章以跨导线性电路原理的发明者Barrie Gilbert关于“从跨导线性观点看电流模电路”的指导为开始。从1972年它一开始，“跨导线性电路原理”就发展了有助于理解和简化分析各种精巧非线性电路的概念。第2章回顾了这个原理，并阐述了从乘法器/除法器到三角函数发生器范围的应用。随着最近真正互补BJT的出现，这个重要的电路原理将被确认为模拟电路设计中的有力工具。具有BJT的基本工作性能但又不抽取基极电流(β 无穷大)的异质结器件的前景也在第2章阐述。这种器件的应用前景是十分惊人的，而且Barrie Gilbert论述了他的观点，即这种器件在概念上是“理想”半导体器件的可能性。跨导线性电路原理向MOS领域的进一步发展在后面第12章叙述。

当电流传输器在1968年被提出时，它的优点并不是十分明显，特别是在单片运算放大器已被充分确认以后。电子工程师过于频繁地倾向于按照电压而不是按照电流来考虑问题，仅仅到了现在，模拟设计者才认识到电流模方法的全部好处。电流传输器实质上是电压/电流模混合电路，因而是非常通用的模拟标准部件。这一点已被有关电流传输器的大量文献所证实，电流传输器是第3章的主题，题目为“电流传输器原理和应用”，是由Adel Sedra(电流传输器的共同发明者之一)和Gordon Roberts合写的。尽管电流传输器已有20年以上的历史，但作为一个电路概念，它的时代已经到来。

Chris Toumazou和John Lidgey所写的第4章阐述关于通用电流模模拟放大器的放大器研

制工作。从基于电源电流读出技术、配置适配的电压模运算放大器以提供电流模性能开始,他们通过实际应用证实了这种方法在许多模拟电路和系统设计领域中的优越性。这一章的后一部分集中研究新型结构的模拟放大器,包括从运算浮置电流传输器直到全差分输入/输出电流模运算放大器。

另一个重要的电流模模拟标准部件是跨导器。Scott Dupuie和Mohammed Ismail所写的第5章阐述各种高频CMOS跨导器的详细进展情况。模型化、线性、失真、噪声、高频性能、信号处理和功耗诸方面是这一章打算论述的问题。作者着重强调作为VLSI中电压模和电流模电路之间的理想接口的跨导器的价值。

电流镜对所有半导体工艺技术来说都是普遍存在的标准部件。Barrie Gilbert在第6章对BJT电流镜的实际应用方面做了研究。尽管一般还没有从实用观点充分证明,但还是经常可以碰到,作者考察了普通和不大普通的电流镜,提出了对这个课题的综合性专题论文。第6章着重论述选择特定电流镜以适于专门应用的重要性,并且为了达到所需的性能目标,已研制了程序。

遗憾的是,CMOS电流镜的失调和噪声性能比BJT的差得很多,而克服了大部分这些偏差的新一代动态电流镜是由Eric Vittoz和George Wegmann在第7章介绍的。这种技术基于开关晶体管这样的简单想法: MOS晶体管给出一个输出,此输出为输入电流——对应的间断拷贝。该章还阐述了动态电流镜的演变和设计,作者阐明可如何将其扩展到各种不同电路,以产生非常精密的模拟CMOS标准部件。

砷化镓工艺技术随其可达到高成品率、低成本和快周转速度而迅速成熟起来。现代宽带通信系统的广泛发展,对以这种工艺技术实现的电路和系统部件提出严格要求。在第8章,Chris Toumazou和David Haigh介绍了GaAs模拟标准部件的设计和研制,如应用于精密滤波器、微波和光通信中的电流镜、跨导器和运算放大器等。和在其他工艺技术中一样,电流模方法对全面开发GaAs工艺技术的高速潜力是必不可少的。

混合模拟与数字VLSI要求研制模拟连续时间滤波器。基于电流的跨导-电容(g_m-C)设计满足大多数系统要求,并在与高频性能匹配的简洁性和拓扑结构方面占优势。在第9章,Rolf Schaumann和Mehmet Ali Tanı讨论了 g_m-C 连续时间滤波器的原理,并评述了现代化设计方法。也评述了一些成功的连续时间滤波器设计的程序。

在第10章,David Haigh介绍了对采用跨导元件的连续时间和开关电容滤波器的综合探讨。当要仿真的变量在连续时间滤波器中是电流或在开关电容滤波器中是电荷时,以良好的信号处理能力和对元件参数变化响应的低灵敏度来表示性能是最恰当的。熟知的和新型的开关电容滤波器结构的例子就证明了电流或电荷方法的优越性。

模拟采样数据信号处理在过去的十年是由开关电容技术占绝对优势地位。由于MOSFET的特征尺寸继续缩小,以适应VLSI中更大程度的电路复杂性,而VLSI主要是对数字性能而不是对模拟性能优化的,John Hughes在第11章介绍一种称作“开关电流”的新采样数据滤波器技术。由于工作在采样电流域,它具有一些胜过开关电容的优点,并能在标准VLSI工艺上实现。还介绍了针对滤波器实现的概念、技术和电路模型的评述。

Evert Seevinck在第12章论述了连续时间模拟接口电路的设计,这种接口电路在“现实世界”与可兼容CMOS、BiCMOS和双极工艺技术的数字VLSI系统之间是必需的。给出的电路利用推动模拟技术的传统的和新型的工艺技术,其中包括误差补偿、跨导线性原理和共模反馈。