

高等院校微电子专业丛书

CMOS模拟集成电路与系统设计

王 阳 编著

CMOS Mimi Jicheng Dianlu yu
Xitong Sheji



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

高等院校微电子专业丛书

CMOS 模拟集成电路 与系统设计

王 阳 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书较系统、详细地讲解了 CMOS 模拟集成电路的有关基本概念、原理及设计方法。全书内容共七章,主要介绍 CMOS 电路的基本问题。具体包括:基本器件,基本模块电路,放大器,连续时间滤波器,开关电容电路,过采样数据转换器。本书可作为高等院校相关专业师生的教学用书,也可供相关科研、设计人员参阅。

图书在版编目(CIP)数据

CMOS 模拟集成电路与系统设计/王阳编著. —北京:北京大学出版社,2012.1
(高等院校微电子专业丛书)
ISBN 978-7-301-20074-2

I. ①C… II. ①王… III. ①CMOS 电路—模拟集成电路—电路设计:系统设计—高等学校—教材 IV. ①TN432

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 004610 号

书 名: CMOS 模拟集成电路与系统设计

著作责任者:王 阳 编著

责任编辑:王 华

标准书号:ISBN 978-7-301-20074-2/TN·0081

出版发行:北京大学出版社

地 址:北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址:<http://www.pup.cn> 电子信箱:zpup@pup.pku.edu.cn

电 话:邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765014 出版部 62754962

印 刷 者:河北滦县鑫华书刊印刷厂

经 销 者:新华书店

787mm×980mm 16 开本 28 印张 600 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

定 价:50.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:(010)62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

前 言

芯片作为信息化社会的基础产业,在国民经济发展中起着举足轻重的作用。历经多年发展,芯片已复杂到系统级芯片,系统已缩小到芯片级系统。芯片系统所处理的信号已从电学信号扩展到非电学信号。在这个发展过程中,与数字集成电路工艺兼容的CMOS模拟集成电路变得越发重要。另外,芯片行业是典型的知识型产业,知识积累的规律决定了芯片发展满足指数关系。芯片的发展主要取决于制作技术和设计技术两方面进步。在制作技术进步发展到一定程度后,面对微米器件向纳米器件发展,设计技术对于芯片发展变得更加重要。模拟电路作为电路设计的基础知识,对于设计技术提高和创新有着特别重要的作用。

近几十年微电子的迅速发展使每个人都深切感受到,电子产品在以惊人的速度更新换代,而在这种快速发展中技术进步起着巨大的推动作用。因此,这一领域知识更新速度非常快,电路设计人员需要不断用新知识充实自己。特别是与数字集成电路设计比较,模拟电路设计难度大、模块电路通用性小、自动化程度低,许多设计需要结合经验人工进行,需要更多的具有相关专业知识的从业人员。作为芯片研究和设计的重要基础知识,CMOS模拟电路是相关人员,特别是高级研究和设计人员所必须掌握的。自1995年起,为适应芯片设计发展需要,编者开设了与CMOS模拟电路相关的课程,并为此编写本书。

本书定名为《CMOS模拟集成电路与系统设计》主要基于以下几点考虑:(1) CMOS与双极型电路是实现集成电路的两种基本技术,本书主要集中在CMOS电路方面,兼带BiCMOS内容;(2) 模拟与数字电路是两种基本电路形式,本书集中于模拟电路,兼带采样数据电路和模数混合电路;(3) 与传统的分立模拟电路设计比较,本书重点研究适合集成化的模拟电路;(4) 芯片已从实现单一功能的模块电路发展到完成复杂信号处理任务的系统,电路与系统设计结合越来越紧密,因此本书同时涉及电路与系统设计两个层次问题;(5) 对于设计与分析问题,由于设计是创造性工作,本书将注重设计,而将分析作为设计基础对待。

本书特点主要是:(1) 内容讲解采用理论分析和计算机辅助分析相结合的方式,既给出清晰的理论概念又避免大量枯燥的手工计算,并防止大量计算公式和繁杂的计算过程掩盖基本原理和设计思想,尽量处理好模拟电路设计中公式多、计算繁杂、易使读者丧失兴趣等问题;(2) 将书中所及内容的深度和广度进行有机结合,对于典型问题进行深入细致的研究,以微见著,建立分析、处理、解决问题的一般方法,其他类似问题进行简单介绍,在有限篇幅内增大知识面,力求“博而能约,广而能深”;(3) 采用基础和专门知识并重的原则,既考虑到与原有知识的衔接,又兼顾近年来发展的新内容,所述内容力争做到“持之有故,言之成理”;(4) 以具有创造性的电路设计工作为重点,既包括电学设计又包括物理设计,而把电路

分析置于从属地位；(5) 同时并重电路设计和系统设计，内容涉及基本模块电路设计、基于模块的系统设计、传感器/执行器和电路混合的微系统；(6) 以近年来模拟集成电路设计中的新问题作为本书的重点内容，尽可能多地采用适合芯片内部使用并适合 CAD 技术的典型模块电路作为例题，针对亚微米工艺进行设计；(7) 习题除巩固基本内容外，力争反映建立在基本原理之上、适合工艺技术发展需要的新型电路，以进一步拓宽读者视野、增强创新能力。

在晶体管密度和复杂度迅速提高的同时，芯片的其他资源(如：芯片功率、面积等)难以同步增加，芯片系统资源已逐渐成为芯片发展的重要限制因素之一。在设计方面解决这个问题，可以采用从整体出发充分利用器件特性的思想提高芯片资源利用率。作为这种设计思想的部分体现，本书内容从电学信号处理扩展到非电学信号转换和处理，从电压型电路扩展到电流型电路，从 CMOS 电路扩展到 BiCMOS 电路，从常规电路扩展到低压、低功耗和微功耗电路。

本书原稿共分十二章，具体内容包括应当掌握的基础部分和可以选择掌握的拓展部分。基础部分由第二到七章和第十二章组成，包括 CMOS 模拟电路中基本器件和基本单元电路、运算放大器和滤波器、开关电容电路和过采样数据转换电路、版图设计等内容。拓展部分由第八到十一章组成，包括 BiCMOS 模拟电路、低压低功率和微功率电路、电流型电路、集成敏感器和集成系统等内容。由于篇幅限制，此次只出版前七章，涵盖除版图以外的基础部分，诚不得已。如果教学需要更多内容，可自行酌情增添补充资料。

本书编写过程主参考以下几本书籍：1. Kenneth R. Laker 和 Willy M. C. Sansen, "Design of Analog Integrated Circuits and Systems", (McGraw-Hill, 1994); 2. Phillip E. Allen 和 Douglas R. Holberg, "CMOS Analog Circuit Design", Second Edition, (Oxford University Press, 2002); 3. "Design of Analog-Digital VLSI Circuits for Telecommunications and Signal Processing", Jose E. Franca 和 Y. Tsividis, Second Edition, (Prentice-Hall, 1994); 4. "Analog VLSI: Signal and Information Processing", Mohammed Ismail 和 Terri Fiez, (McGraw-Hill, 1994); 5. P. V. Ananda Mohan, V. Ramachandran 和 M. N. S. Swamy, "Switched-capacitor filters: theory, analysis, and design", (Prentice Hall, 1993); 6. Frank Op't Eynde 和 Willy Sansen, "Analog interfaces for digital signal processing systems", (Kluwer Academic Pub., 1993); 7. Paul R. Gray, Paul J. Hurst, Stephen H. Lewis 和 Robert G. Meyer, "Analysis and Design of Analog Integrated Circuits", 4th Edition, (John Wiley & Sons, 2001); 8. David Johns 和 Ken Martin, "Analog Integrated Circuit Design", (John Wiley & Sons, 1997)。书籍 1 和 2 对模块电路和运算放大器作了系统介绍，本书第三、四章主要结构多参考于此书；书籍 1、3 和 4 包含有较详细的有源滤波器内容，是本书第五章的主要参考书目；书籍 1 和 5 以及 3 和 4 对开关电容电路有详细或部分的讨论，是本书第六章的主要参考书目；书籍 6 对过采样数据转换电路有较详细研究，是第七章的主要参考书目；书籍 7 是经典的模拟集成电路设计教材；书籍 8 深入浅出地讲解了许多模拟集成电路的基本概念，对本书撰写甚

有帮助。因为这些书籍是广泛流行的教材或参考教材,本书在涉及这些书籍内容时不再单独标明出处。

今天电子技术发展迅速,本书不可能总括模电重要内容,只要能写出特点、反映一点个人设计理念就是最大满足。虽经多年力作笔耕,书稿已现案头多年,历经多次修改和授课使用,并于2010年6月前将全部12章书稿交到出版社,2011年9月底开始编辑出版,但由于水平有限,难免有遗漏、不妥,甚至错误之处,欢迎读者批评、指正。

王 阳

于中关园

2011年12月

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 模拟电路与芯片级集成系统	(1)
1.1.1 CMOS 模拟电路缘起	(1)
1.1.2 模拟电路在芯片级集成系统中的作用	(3)
1.1.3 模拟集成电路与生物学	(5)
1.1.4 芯片学的未来	(6)
1.2 模拟集成电路设计旨要	(8)
1.2.1 模拟电路设计的科学性与工匠性	(8)
1.2.2 电学设计	(9)
1.2.3 物理设计	(10)
1.3 有关问题说明	(12)
1.3.1 热点问题与本书着重点	(12)
1.3.2 内容安排	(14)
1.3.3 字符、符号使用说明	(14)
第二章 CMOS 集成电路基本器件	(18)
2.1 CMOS 集成电路物理结构及制作过程	(18)
2.1.1 物理结构和基本制作过程	(18)
2.1.2 制造工艺分类	(19)
2.2 PN 结二极管	(21)
2.2.1 基本电流-电压特性	(22)
2.2.2 击穿特性	(23)
2.2.3 PN 结二极管电容	(23)
2.2.4 PN 结二极管噪声	(24)
2.2.5 PN 结二极管温度特性	(26)
2.3 MOS 晶体管电流-电压特性	(27)
2.3.1 MOS 晶体管基本结构和工作原理	(27)
2.3.2 MOS 晶体管特性的数学描述	(28)
2.3.3 沟道强反型模型	(28)
2.3.4 沟道弱反型模型	(32)
2.3.5 深亚微米 MOS 管特性	(33)

2.3.6	等效电路和寄生电容	(35)
2.4	MOS 晶体管小信号和噪声及温度特性	(36)
2.4.1	小信号模型	(36)
2.4.2	噪声特性	(39)
2.4.3	温度特性	(41)
2.5	CMOS 电路中无源器件和寄生器件	(41)
2.5.1	电容	(41)
2.5.2	电阻	(45)
2.5.3	电感	(46)
2.5.4	CMOS 电路的寄生器件	(50)
第三章	基本单元电路	(58)
3.1	单管共源放大电路	(58)
3.1.1	共源管的作用	(58)
3.1.2	单管放大器的偏置	(61)
3.1.3	小信号低频特性	(62)
3.1.4	小信号高频特性	(64)
3.1.5	放大器频率参数	(69)
3.1.6	噪声特性	(72)
3.2	单管阻抗变换电路	(74)
3.2.1	共漏管构成的源极电压跟随器	(74)
3.2.2	共栅管构成的电流跟随器	(81)
3.3	基本放大单元	(85)
3.3.1	直流分析	(85)
3.3.2	低频增益	(87)
3.3.3	高频特性	(88)
3.3.4	小信号近似误差	(90)
3.3.5	电流能力和压摆率	(91)
3.3.6	CMOS 反相放大级设计	(93)
3.3.7	其他类型反相放大级	(94)
3.4	共源共栅级联放大单元	(97)
3.4.1	共源共栅级联电路形式	(97)
3.4.2	低阻负载共源共栅级联放大级(宽带放大级)	(98)
3.4.3	恒流源负载共源共栅级联放大级(高增益放大级)	(99)
3.4.4	噪声特性	(102)
3.4.5	增益提升技术	(102)

3.5	差模放大单元	(103)
3.5.1	基本概念	(104)
3.5.2	电阻负载差分对放大级	(104)
3.5.3	电流源负载差分对放大级	(108)
3.5.4	噪声特性	(110)
3.6	输出级	(111)
3.6.1	甲类输出级	(112)
3.6.2	甲乙类输出级	(115)
3.6.3	丁类输出级	(120)
3.7	电流镜	(125)
3.7.1	简单电流镜	(125)
3.7.2	基本共源共栅电流镜	(128)
3.7.3	最小输出电压共源共栅电流镜	(129)
3.7.4	共栅管自偏置共源共栅电流镜	(131)
3.7.5	Wilson 电流镜	(132)
3.7.6	电流镜噪声特性	(133)
3.8	基准电路	(133)
3.8.1	分压式简单基准电路	(134)
3.8.2	不受电源电压影响的基准电路	(136)
第四章	运算放大器	(150)
4.1	运算放大器和运算跨导放大器	(150)
4.1.1	基本结构和理想模型	(150)
4.1.2	主要参数	(151)
4.2	简单运算跨导放大器	(153)
4.2.1	电路结构	(154)
4.2.2	低频特性	(155)
4.2.3	GBW 和 PM	(155)
4.2.4	GBW 优化	(156)
4.2.5	失调电压	(158)
4.2.6	共模抑制比	(158)
4.2.7	共模输入电压范围	(159)
4.2.8	差模信号线性输入范围	(159)
4.2.9	简单 OTA 设计	(160)
4.3	Miller 补偿两级 OTA	(160)
4.3.1	电路结构和偏置	(161)

4.3.2	共模输入电压范围和输出电压范围	(161)
4.3.3	低频增益	(163)
4.3.4	增益带宽积和相位裕度	(163)
4.3.5	压摆率	(165)
4.3.6	建立时间	(166)
4.3.7	输入、输出阻抗	(166)
4.3.8	失调电压和共模抑制比	(169)
4.3.9	电源抑制比(power-supply rejection ratio,PSRR)	(170)
4.3.10	噪声分析	(172)
4.3.11	放大器设计	(173)
4.3.12	SR/GBW 的优化设计	(176)
4.3.13	正零点补偿	(177)
4.3.14	失调电压消除技术	(179)
4.4	对称负载输入级 OTA	(180)
4.4.1	简单对称 OTA	(180)
4.4.2	共源共栅级联对称 OTA	(184)
4.4.3	两级对称 OTA	(186)
4.4.4	折式共源共栅级联 OTA	(188)
4.5	全差模 OTA	(192)
4.5.1	简单全差模 CMOS OTA	(194)
4.5.2	非饱和 MOS 管共模反馈全差模 OTA	(195)
4.5.3	具有独立共模误差放大器的全差模 OTA	(197)
4.5.4	开关电容共模反馈的全差模 OTA	(201)
4.6	满摆幅放大器	(202)
4.6.1	互补差分对输入级	(202)
4.6.2	满摆幅输出级	(207)
4.6.3	满摆幅运放	(210)
第五章	连续时间滤波器	(227)
5.1	连续时间滤波器基础	(227)
5.1.1	线性滤波器	(228)
5.1.2	滤波器功能分类	(228)
5.1.3	连续时间有源滤波器主要实现方法	(230)
5.1.4	对称差模结构	(231)
5.1.5	高阶有源滤波器的级联设计	(234)
5.1.6	梯形有源滤波器设计	(235)

5.2	有源 MOST-C 滤波器	(239)
5.2.1	MOS 管实现电压控制电阻	(239)
5.2.2	对称结构有源 MOST-C 滤波器	(240)
5.2.3	集成滤波器设计原则	(241)
5.2.4	一阶有源 RC 滤波器	(242)
5.2.5	二阶有源 RC 滤波器	(243)
5.2.6	梯形有源 MOST-C 滤波器	(249)
5.3	有源 G_m -C 滤波器	(251)
5.3.1	OTA-基电路	(251)
5.3.2	OTA-基滤波模块电路	(253)
5.3.3	高线性度 OTA 设计	(257)
5.4	芯片内部自动调谐	(264)
5.4.1	片内调谐的基本方法	(265)
5.4.2	用 PLL 的频率调谐	(269)
5.4.3	用 MLL 进行 Q 调谐	(270)
5.4.4	可编程数字量控制的宽范围调谐	(271)
第六章	开关电容电路	(286)
6.1	离散时间信号	(286)
6.1.1	离散信号频谱	(286)
6.1.2	z -域传递函数	(288)
6.1.3	s -域到 z -域变换	(288)
6.2	基本模块电路	(291)
6.2.1	MOS 开关	(293)
6.2.2	开关电容等效电阻	(295)
6.2.3	采样保持电路	(296)
6.2.4	零点电路	(298)
6.2.5	增益电路	(301)
6.3	开关电容积分器	(304)
6.3.1	反相积分器	(304)
6.3.2	同相积分器	(306)
6.3.3	差模积分器	(308)
6.3.4	大电容比积分器	(308)
6.3.5	双线性积分器	(309)
6.3.6	阻尼积分器	(311)
6.4	开关电容滤波器	(313)

6.4.1	一阶滤波器	(313)
6.4.2	二阶滤波器	(315)
6.4.3	梯形滤波器	(322)
6.5	非线性开关电容电路及电压转换电路	(329)
6.5.1	调制电路	(329)
6.5.2	峰值检测电路	(330)
6.5.3	振荡器	(332)
6.5.4	直流电压转换器(DC-DC 转换器)	(336)
第七章	过采样数据转换器	(348)
7.1	过采样数据转换原理	(348)
7.1.1	模拟与数字信号之间的转换	(348)
7.1.2	过采样数据转换器原理	(354)
7.1.3	噪声变形过采样数据转换原理	(356)
7.1.4	增量-总和调制与其他类型数据转换器比较	(358)
7.2	增量-总和调制器	(361)
7.2.1	Δ - Σ 调制器的信噪比	(361)
7.2.2	一位增量-总和调制器	(364)
7.2.3	量化噪声	(369)
7.2.4	稳定性	(371)
7.2.5	级联结构	(374)
7.3	过采样增量总和模数转换器设计	(379)
7.3.1	Δ - Σ 调制器电路设计考虑	(379)
7.3.2	Δ - Σ 调制器 ADC 设计	(387)
7.4	过采样增量-总和数模转换器	(392)
7.4.1	一位 Δ - Σ 调制器构成的 DAC	(393)
7.4.2	电压驱动一位 DAC	(394)
7.4.3	电流驱动一位 DAC	(399)
7.4.4	多位 Δ - Σ 调制器的 DAC	(401)
	本书主要参考书目	(423)
	参考文献	(424)
	关键词索引	(428)

第一章 绪 论

天下万物生于有，有生于无。

李耳《老子·第四十章》

由于技术进步、市场需求增长和各种新兴应用出现，芯片近年来有了迅速发展，已经成为构建当代信息社会的物质基础。模拟集成电路作为芯片的重要组成部分，也相类相从得到迅速发展。芯片是人类智慧的非生物载体，具有创造性的设计工作非常重要，也已成为集成电路发展的核心任务之一。作为开篇，本章简单综论模拟电路与芯片级集成系统，结合具体例子抛砖引玉地阐述模拟集成电路设计旨要，针对当前模拟集成电路发展中的热点问题说明本书的侧重点，最后对本书特点以及字符和符号使用做扼要说明。

1.1 模拟电路与芯片级集成系统

1.1.1 CMOS 模拟电路缘起

物类之起，必有所始，互补金属—氧化物—半导体 (complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS) 模拟集成电路也是如此。图 1.1 表示不同时期技术进步引起的集成电路创新量变化大致情况，通过这条曲线可以粗线条地回顾模拟电路和金属—氧化物—半导体 (metal-oxide-semiconductor, MOS) 模拟集成电路发展。20 世纪 60 年代前，电路主要由电子管实现，研究大多集中在半导体器件的特性，主要包括结型晶体管、结型二极管和隧道二极管等，这些结果已经成为今天双极晶体管应用的理论基础，而半导体放大和振荡等模拟电路还在探索和展示阶段^[1]。

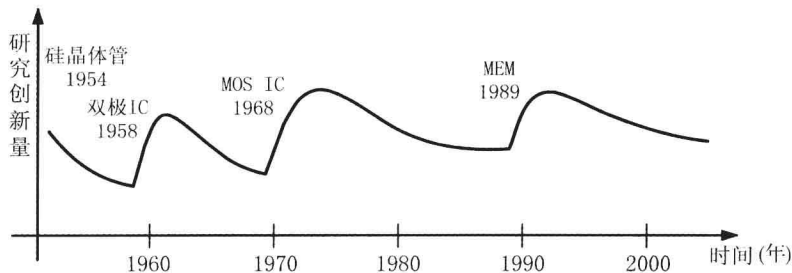


图 1.1 技术进步引发的研究创新量变化简单示意图

20 世纪 60 年代,随着模拟电路集成技术的发展,研究逐渐过渡到利用半导体器件构成电路方面,包括实现信号增益的运算放大器、对温度稳定的基准电路和锁相环等。建立在双极管指数电流电压关系之上的信号处理电路也初见端倪。在应用方面,20 世纪 70 年代以前电子系统几乎都是由分立器件模拟电路构成的。由于集成电路无法制造高精度电阻和电容,因此只能制作简单的放大器等,集成电路技术以双极型电路为主。

进入 20 世纪 70 年代,随着集成电路技术的进步,数字电路逐渐替代模拟电路成为许多电子系统的核心,而模拟集成电路因为设计复杂和制造工艺的限制发展缓慢。与此同时,由于数字信号处理器的壮大,产生了对模/数和数/模转换器的需求。正是这种要求驱动着模拟集成电路发展,包括晶体管、电路、结构各个层次。运算放大器得到逐步优化,并像电阻及电容一样成为模拟电路设计的通用器件。另外,开始探索和采用开关技术解决模拟信号处理问题,如用斩波原理稳定放大器,用开关电容实现滤波器等。开关电容技术的出现将时间常数精度从电阻电容积转换为电容比,从而促使 MOS 模拟集成电路走向实用化和大规模化。应用方面,这个时期的电子系统可以清楚地分成两大部分:以 MOS 技术实现存贮和逻辑运算的数字集成电路;以双极技术实现运算放大器的模拟集成电路。这一时期 MOS 模拟电路主要是 pMOS 电路和 E/D(增强/耗尽)nMOS 电路。

20 世纪 80 年代,MOS 集成电路已发展成为 CMOS 电路,数字集成电路设计已渐成熟。受成本和可靠性以及体积等因素影响,电子系统迫切需要将模拟电路与数字电路集成在一起。为便于与 MOS 数字电路集成,MOS 模拟集成电路得到迅速发展。在此过程中,CMOS 模拟集成电路,特别是开关电容电路的成熟,大幅提高了 MOS 模拟集成电路的动态范围,采用自动校准技术解决经典模拟电路的匹配问题,出现了总和—增量转换器等,集成电路进入了模数混合时代。在典型的模数混合系统中,模拟电路模块主要是用于完成信号从模拟量到数字量的转换或从数字量到模拟量的转换。

进入 20 世纪 90 年代,随着器件尺寸缩小和布线层数增加,数字电路工艺技术更易于与存贮器技术结合,加之集成电路计算机辅助设计(integrated circuit computer-aided design, ICCAD)工具的不断完善和市场需求,超大规模集成(very large-scale integration, VLSI)向着更高集成度进一步发展,形成了初级的芯片级系统(system on a chip, SOC)。典型的初级芯片级系统是将数字电路、模拟电路和存贮器集成在同一个芯片内,构成一个较为完整的独立电学系统。在技术方面,小尺寸 MOS 和双极+互补金属—氧化物—半导体(BiCMOS)技术发挥越来越重要的作用。以亚微米为标志的 MOS 器件已把模拟电路的信号处理频率提高到吉赫兹量级,同时电源电压的降低也对模拟电路设计提出了新的挑战。为适应工艺技术进步,模拟电路出现许多创新结构。虽然 BiCMOS 生产费用比 CMOS 生产费用稍高,但它可以使设计者充分利用双极和 MOS 器件的优点设计高性能电路。例如,BiCMOS 技术可以将模拟电路与高速 ECL 数字电路以及高密度 CMOS 逻辑电路制作在同一芯片内。另外,微电子机械系统(MEMS)技术的发展,进一步拓宽了芯片的应用领域,使芯片处理信号从传统的电学信号扩展到非电学信号^[2]。出于优化电子产品成本和功耗的需要,用现代 CMOS 技术生产的初级 SOC 成为这一时期的特征。

进入 21 世纪,随着集成电路(IC)技术的进一步发展,特别是微加工技术的发展,最终在芯片上制造微系统愿望正在逐步实现。这种高级阶段的芯片级集成系统包含模拟和数字电路、存储器、射频信号处理模块、非电学信号处理模块、将各种非电学量转换为电学量的敏感器件以及将电能转换为其他能量的执行器^[3,4]。同时,随着器件尺寸不断缩小,工作频率不断提高,硅材料 CMOS 集成电路在射频(RF)应用领域正大显身手。在微系统制造方面,BiCMOS 已与微加工技术结合,可以制作出更高质量的具有敏感器和执行器的微系统。微加工技术制造的各种信号处理结构也使硅片在 RF 领域应用中展现出美好的前景^[5]。在 CMOS 技术方面,器件特征尺寸已经进入深亚微米阶段,典型的数字电路工作频率已经在 1 GHz 以上。根据产品的需要,多种工艺技术的优化组合已经成为这一时期的技术特征。

1.1.2 模拟电路在芯片级集成系统中的作用

经过几十年发展,模拟电路在芯片级系统中所起的作用与传统模拟电路比较发生了明显变化。从处理信号的频带宽度和实现的功能以及对数字电路设计、分析的指导意义等方面可以清楚地看到这一点。

1. 处理信号的频率范围

目前模拟电路主要用于模拟信号处理方面,而用于模拟计算机方面发展很慢。在信号处理方面,图 1.2 表示常用信号带宽、目前技术水平、不同电路处理信号的频率范围以及相应的集成电路技术。对于低、中频信号,如生物和地震信号、音频和视频信号等,数字电路、模拟采样数据电路和模拟电路都可以处理,但在同样的技术水平和芯片面积下,数字电路或模拟采样数据电路一般能得到比传统连续时间模拟电路更好的性能,因此在这一频域数字电路或模拟采样数据电路已经取代传统的模拟电路。这个应用范围的电路主要由硅 MOS 和双极技术实现。对于高频信号,如移动通信和雷达等射频信号,数字电路现在还无法处理,仍需模拟电路或光学器件处理。高频模拟电路采用的技术主要是小尺寸 CMOS、硅双

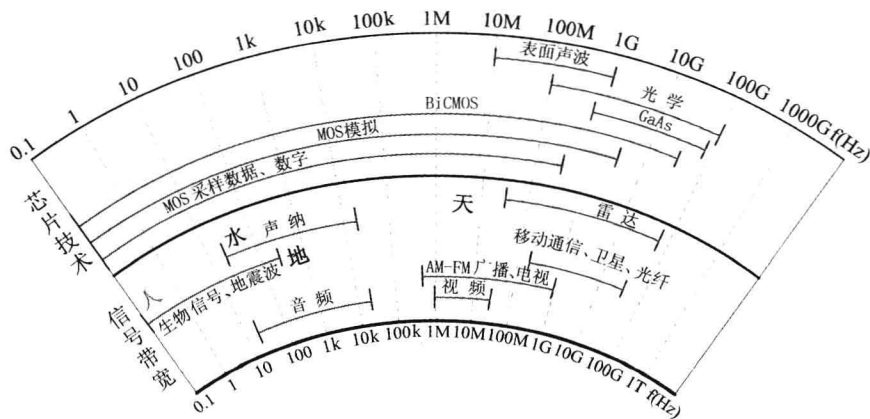


图 1.2 常用信号频率以及不同芯片技术的带宽

极或 BiCMOS 以及砷化镓电路等^[6]。尽管随着工艺进步,芯片处理信号频率不断提高,但在电子与光子信息处理系统之间尚存在一个从 300 GHz 到 30 THz 的“太赫缺口(terahertz gap)”^[7],填补这个缺口仍需要电子信息处理系统提高频率,因此模拟电路的频率优势还将继续发挥作用。

2. 在芯片级系统中的作用

根据芯片级系统所处理信号的混合方式,芯片可以分为三大类:模拟和数字混合的模数混合系统芯片,数字和模拟混合的数模混合系统芯片,电路和传感器/执行器混合的微系统芯片,如图 1.3 所示。

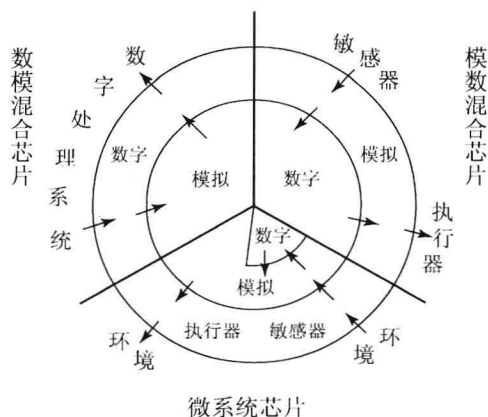


图 1.3 模拟电路在芯片级系统中的作用

在这三大类芯片级系统中,模拟电路所起的作用各有不同。在模拟与数字混合系统中,模拟电路通常作为外围电路,为核心的数字电路提供输入输出接口,如数据转换、信号放大、功率驱动、传感器接口、保护电路和辅助运算等,这些电路的性能对于整个系统往往是非常关键的^[8,9]。在数字与模拟混合系统中,数字电路为传统模拟电路提供可编程的控制信号和接口^[10]或为新型的核心模拟电路提供与数字设备连接的输入输出接口。其中新型核心模拟电路具有类似于生物神经系统的结构和处理信息的机理^[11]。它通过大量简单、低精度器件的充分互连形成整体计算能力,是一种更接近生物系统的新型集成电路,并在解决模式识别等方面具有很大潜力。在电路与传感器/执行器混合的微系统中,大多数传感器对外部测量信号的直接响应非常弱,需要进行放大并根据需要转换成不同的电学量形式,如电压、电流、频率、占空比、脉冲持续时间等,以及进行必要的预处理,这些工作都要由模拟电路来完成,而数字电路可以完成线性化、对各种非理想因素影响的补偿、输入输出接口以及其他必要的处理。其实,在这方面越来越难以清楚地划分模拟电路和数字电路的任务。对于具体系统,采用数字电路还是采用模拟电路实现信号处理,要根据系统具体情况进行综合分析。例如,在硅视觉(silicon vision)系统中,光学信号转换成电学信号后用模拟电路并行地进行初级视觉处理(early visual processing)^[12,13];在单片多媒体摄像机微系统中^[14],光敏 PN 结阵列将光学信号转换成电学信号阵列,再经读出电路和模/数转换器转换成数字信号,然后进行数字信号处理,再输出给接口电路。

3. 对数字电路设计的指导作用

在集成电路内部,数字信号是由模拟信号近似表示的。模拟信号表示数字信号的能力,如上升、下降时间,噪声容限等都直接与模拟量分析相关。模拟电路的基本概念和分析方法,无论数字电路发展到什么程度都是需要的,从这个意义上可以说模拟电路是数字电路实现的基础。越是高性能的数字电路设计,越离不开模拟电路的知识和经验。另外,在一些应

用领域,如滤波器设计,模拟电路经常作为数字电路设计的原型机,只有深入了解、掌握模拟电路知识才能设计高水平的数字电路。

1.1.3 模拟集成电路与生物学

人造非生物体计算系统,在完成人造算法方面,能力已经远远高于生物计算系统,但是在完成非人造算法构成的各项任务方面,生物系统的能力远远大于非生物计算系统。例如,家蝇可以完成各种精确和复杂的飞行动作,用低速计算实现的控制胜过人造飞行器;在房间里嗡嗡穿梭飞行的家蝇,能够以两倍重力加速度加速到每小时 10 千米;圆圈飞行的家蝇,每秒可飞六圈,可在 2%秒内达到最大角速度;家蝇可以直上直下飞行,反身停落在天花板上。按现在人们对控制信息处理系统的理解,最先进的战斗机尚无法以同样的资源消耗完成类似的任务^[15]。在这方面主要困难不仅来自于如何实现这样系统,更主要来自于人们尚不知道生物体是怎样解决这样问题的。尽管如此,可以肯定在人造数字计算系统以外,还存在其他更高效的非数字化信息处理方法,只是目前人们还没有了解、掌握它。

生物体以非数字量形式处理信息的过程,使模拟电子学与生物学存在着天然的联系。生物学系统为人们研究更高效系统提供了范例。模拟电路,特别是超大规模集成微系统,可以为进一步认识生物系统提供更有效的手段。反过来,对生物系统认识的深化,也有利于进一步提高模拟超大规模系统的信息处理能力。目前,模拟电子学和生物学之间的关系可以分为三大类,如图 1.4 所示,① 生物学对模拟电子学影响,主要表现为生物启迪芯片(biologically inspired chip)的研究,目的是利用生物学的启发设计新型电路或系统^[16];② 模拟电子学和生物学相互影响,主要表现为可植入仿生芯片(implant bionic chip)的研究,主要目的是实现部分生物体功能,与生物体联合使用修复或提高生物体功能^[17];③ 模拟电子学对生物学的影响,主要表现为生物芯片(biochip)的研究,目的是利用芯片技术更有效地了解和利用生物系统^[18,19],利用电子学知识解析和构建生物系统信息处理过程^[20]。

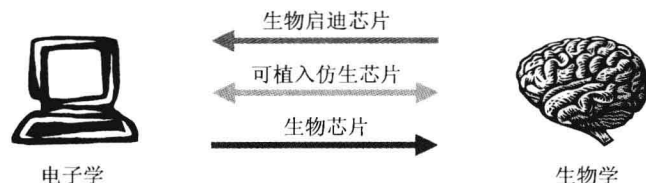


图 1.4 电子学与生物学的关系

生物学给人们什么启示呢?最大启示之一是没有理由完全相信生物体是以数字信号形式完成信息处理的,非数字电路存在实现更高效信息处理的可能性和潜力。传统的模拟量计算机被数字计算机发展所淹没,完全是因为采用的计算机工作原理所致,并不意味着模拟系统无法实现大规模计算任务。因此,模拟电路研究对于未来更高效仿生计算系统的认识和开发是必不可少的。