

通信系统大规模集成电路

郑君里 白应奎 龚明甫 编著

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书讨论通信系统大规模集成电路的原理与计算机辅助设计方法。着重讲述模拟MOS电路。作者结合近年来的研究工作,以授课讲义为基础写成本书。全书共10章。前五章介绍模拟MOS集成电路中的器件和单元电路原理,六至八章研究开关电容滤波器、PCM与 ΔM 编解码器原理和实例,九和十章分别介绍模拟MOS IC CAD方法与布图的初步概念。

本书可作为通信与电子系统专业研究生或工程技术人员继续教育学习班相应课程的教材,也可供研究人员、设计人员参考。

通信系统大规模集成电路

郑君里 白应奎 龚明甫 编著

责任编辑:李振刚

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 1988年8月第一版
印张: $10^{16}/8$; 页数: 168 1988年8月河北第1次印刷
字数: 278千字 插页: 1 印数: 1—2 600册

ISBN7115—03529-6/TN

定价: 3.40元

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 大规模集成电路与系统发展概况	(1)
1.2 大规模集成电路与系统设计特点	(3)
1.3 现代通信系统大规模集成电路	(8)
参考文献.....	(11)
第二章 MOSFET与MOS集成电路工艺	(12)
2.1 引言	(12)
2.2 MOSFET工作原理	(14)
2.3 MOSFET电路模型	(23)
2.4 MOSFET与BJT的比较.....	(28)
2.5 电路图—棍图—版图	(31)
2.6 MOS集成电路工艺	(35)
2.7 MOS集成电路中的电阻电容	(39)
参考文献.....	(44)
第三章 MOS模拟LSI电路的基本单元	(45)
3.1 引言	(45)
3.2 MOS场效应管有源负载	(45)
3.3 电流源	(49)
3.4 三种基本增益级	(52)
3.5 共源—共栅电路	(57)
3.6 差动放大电路	(60)
3.7 输出级电路	(65)

3.8 电平移动及双端—单端输出转换	(70)
参考文献.....	(75)
第四章 MOS集成运算放大器.....	(76)
4.1 NMOS运放	(76)
4.2 CMOS运放.....	(81)
4.3 MOS运放的频率补偿电路	(82)
4.4 MOS运放的噪声性能	(89)
4.5 MOS运放的摆率	(95)
4.6 MOS动态运算放大器	(97)
4.7 闭环斩波稳零运放	(102)
4.8 开环斩波稳零运放	(106)
参考文献.....	(112)
第五章 MOS参考电压源.....	(113)
5.1 引言	(113)
5.2 CMOS基准电压源	(114)
5.3 NMOS基准电压源	(119)
5.4 CMOS参考电压源实例	(123)
5.5 NMOS参考电压源实例	(130)
参考文献.....	(134)
第六章 开关电容滤波器.....	(135)
6.1 引言	(135)
6.2 开关电容传递电荷原理	(137)
6.3 基本开关电容电路	(140)
6.4 减小寄生电容影响的改进电路	(151)
6.5 二阶开关电容滤波器	(156)
6.6 高阶开关电容滤波器	(170)

6.7	S域—Z域映射方法用于开关电容滤波器设计	(175)
6.8	开关电容滤波器一般设计方法	(185)
6.9	2912开关电容话路滤波器	(190)
	参考文献	(196)
第七章	PCM编解码器	(197)
7.1	引言	(197)
7.2	电阻分压式MOS D/A网络	(199)
7.3	电容阵列式(电荷分布式)MOS D/A网络	(203)
7.4	A律PCM解码器原理	(206)
7.5	逐次逼近A律PCM编码器原理	(211)
7.6	2911A PCM编解码器	(214)
7.7	2913和2914PCM编解码器	(222)
7.8	MC14402型PCM编解码器	(225)
	参考文献	(244)
第八章	增量调制编解码器和用户接口电路	(245)
8.1	引言	(245)
8.2	MC3518 ΔM 编解码器	(246)
8.3	MC3419单片SLIC	(260)
	参考文献	(268)
第九章	MOS模拟电路的计算机辅助设计	(269)
9.1	引言	(269)
9.2	SPICE通用电路模拟程序简介	(272)
9.3	SPICE程序中MOS器件模型参数选取	(278)
9.4	使用SPICE程序时收敛性的改进	(296)
9.5	MOS运放宏模型	(303)
9.6	开关电容电路的计算机辅助分析	(305)

参考文献.....	(312)
-----------	---------

第十章 MOS模拟电路布图的一些实际问题.....	(314)
----------------------------------	----------------

10.1 引言	(314)
---------------	---------

10.2 电源、时钟、地线引入的噪声及其抑制	(316)
------------------------------	---------

10.3 衬底噪声的抑制	(319)
--------------------	---------

10.4 MOS运放布图示例	(323)
----------------------	---------

参考文献.....	(327)
-----------	---------

第 一 章

绪 论

1.1 大规模集成电路与系统发展概况

自从五十年代末平面型晶体管问世以来,硅片上的元器件数目逐年递增。六十年代末制成单片含千支晶体管的所谓大规模(LSI)集成电路,到七十年代中期,每块芯片内晶体管数提高到上万支,称为超大规模(VLSI)集成电路。目前,单片集成度已达数十万,预计1990年将超过百万个元件。

随着LSI/VLSI技术的广泛应用,电子系统的技术装置面貌发生了根本变化。电子设备在功能、速率、耗电、体积、成本和可靠性诸方面都取得了惊人的成就。这是一次意义深远的技术革命。电子科学技术的发展进入了“微电子学”时代。微电子学、计算机技术和通信工程的研究与应用相互依赖,构成当代“信息革命”的技术基础。

由于数字电路的大规模集成较模拟电路易于实现,因而早在七十年代初LSI技术已经在数字计算机硬件研制中发挥了重要作用。十余年来,飞速发展。如果将七十年代末期以LSI/VLSI电路构成的数字计算机与四十年代末的计算机相比较,重量从几十吨下降至数百克($1/10^5$),体积大约减少到 $1/10^5 \sim 1/10^6$,功耗从几十千瓦降低到数百毫瓦($1/10^5$),成本则从数十万美元下降到几百美元($1/10^3$),而且工作速度提高、功能扩展。目前,各项性能指

：标仍在继续改善。

模拟电路集成化的发展滞后于数字电路。这主要是由于模拟电路品种繁多、性能指标精度苛刻、电源电压可能较高等因素给集成电路带来困难。近年来，由于MOS和双极电路研究与工艺制作的进步，使得LSI/VLSI技术已经跨入模拟领域。模拟与数字混合的LSI/VLSI电路与系统得到广泛应用。其中，最重要的应用领域是通信系统。

近代通信技术的发展与LSI/VLSI技术发展有着不可分割的联系。本世纪三十年代已经有人提出利用脉冲编码调制(PCM)技术进行电话通信，并且证明它具有抗干扰性能好、适用于远距离中继通信和便于保密等优点。然而，在七十年代之前，它的应用进展缓慢，其原因主要是由于设备复杂、体积大、耗电量高、价格昂贵。七十年代中期，LSI技术的进步以及软件应用的发展为PCM通信设备减小体积重量、降低功耗、简化调试与维护的复杂性、实现智能化等带来了巨大的推动力。与此类似，语音信号处理技术(例如声码器)的发展和付诸实用的历史，也和LSI技术的应用密切相关。目前，在数字通信和语音处理设备中，LSI/VLSI技术主要应用于模拟复用接口、时分复用接口和数字信号处理三个方面。在后两方面，利用了计算机系统VLSI数字电路已经取得的成果；在模拟复用接口方面，则充分显示了模拟集成技术的最新成就，例如，PCM编译码器(Codec)、话路滤波器(开关电容滤波)、用户线路接口电路(SLIC)单片等等。从应用角度考虑，不仅要求现有各品种单片电性能指标和稳定性继续改进、耗电量降低、电源供给的种类减少，而且随着芯片集成度的提高，各功能块可以合并。例如，PCM编译码器与话路滤波器组合单片已有多种产品。此外，新的专用集成片有待开发，其中，压缩语音信号数码率将是一个重要的研究课题。目前，PCM信号的标准数码率为64千比/秒，如果能在保证性能的条件下将数码率减至32千比/秒，则已有信道的通信容量可以增加一倍，这方面的理论分析与软件研究已经作了大量工

作，实用化的关键仍然是LSI单片电路的制造。为解决各种信号处理软件的硬件化，也可以利用数字信号处理器（DSP）单片，它包括时钟、存储器、接口电路和微处理器，使用可擦可编程的只读存储器EPROM来存储程序指令，具有很强的通用性，可以实现各种信号处理算法。某些DSP单片内含A/D、D/A转换器，可以直接进行模拟信号处理。随着数字电话交换系统的广泛应用以及用户与局之间数字传输的实现，模拟复用接口专用集成片的需求量将迅速增长。

LSI技术在其它模拟通信领域中的应用也取得了许多进展。例如，黑白电视接收机电路只需一支单片（外附滤波、电源）即可完成；彩色电视接收机1970年由7~10支集成片组成，到1980年已减少至2支。在移动通信系统中，单片锁相环、单片AM/FM接收机品种繁多，近年来又研制成功一些低功率的单片发射机。

综上所述，当前LSI/VLSI电路与系统技术发展特征突出地表现在以下三个方面：

- （1）从数字电路LSI到模拟与数字混合或模拟的LSI电路。
- （2）从计算机领域进入到通信领域。
- （3）从通用集成片设计到广泛的专用（或半专用）集成片设计。

八十年代初期，我国一些高等院校和研究机构也开始着手研制模拟数字混合的通信专用大规模集成电路，到1985年研制成功CC2911型单片PCM编解码器和CF2912型开关电容话路滤波器等通信专用电路单片。这标志着我国微电子技术发展水平达到了一个新的高度。目前，进一步的研究工作正在广泛开展。

1.2 大规模集成电路与系统设计特点

传统的电路与系统设计方法已经不能适应LSI/VLSI技术发展的需要。当前，在电路与系统研究和生产领域中，正在进行一场设

计革命。电路与系统工作者面临许多新的问题

(一)计算机辅助设计(CAD)与设计自动化(DA)

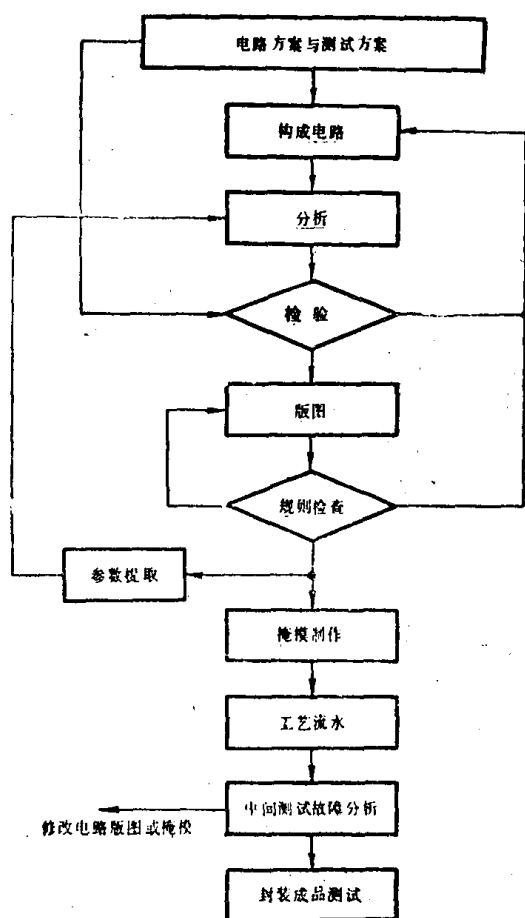


图 1-1

图1-1示出研制LSI/VLSI单片的原理流程图。全部过程的各个环节都需要依靠计算机辅助设计。利用CAD的重要意义在于缩短LSI/VLSI单片开发时间、减少设计差错、利于调整和改变设计方案、减小校核与测试时间、使全部工作趋于自动化以节省人力并提高可靠性。可以说，离开计算机的应用，LSI/VLSI电路与系统研

研究工作的开展将寸步难行。计算机应用的范围包括逻辑模拟、电路模拟、版图设计与工艺过程模拟以及自动测试和故障诊断等等。在国外,已有较成熟的通用程序可供使用,例如,美国加利福尼亚大学贝克莱分校开发的SPICE电路分析程序得到广泛应用,在我国已有许多院校和研究机构移植了这类程序。

近年来,国外进一步研究与开发包括多种CAD功能的大规模集成系统设计软件,例如美国的Daisy系统、Valid logic系统、Mentor Graphics系统等等。利用这类系统构成计算机辅助工程(CAE)工作站,从逻辑设计到版图产生以及校核、测试全部过程可实现自动化。

(二)电路、系统与工艺密切联系

在LSI/VLSI电路设计中,可实现的逻辑功能、电性能指标、集成密度等都受工艺选择的影响。对于数字电路和模拟电路应从不同观点考虑它们的性能指标。最重要的数字性能因素是每门的功耗—延迟时间乘积以及逻辑功能。而模拟电路性能的关键是有源器件和电阻、电容的匹配性与稳定性,以及高增益低噪声运放的实现。集成密度指标通常用单位面积的单元电路数目——功能密度来表示。目前,可供选用的制造工艺有NMOS、CMOS、 I^2L /双极三大类型。它们都可提供较高的功能密度、低的功耗、良好的可靠性以及兼容模拟与数字功能。当需要低功耗或者把模拟与数字功能结合起来时,CMOS工艺具有明显的优点,但是所需面积稍大,工艺较复杂,成本高。如果以数字电路密度为主要目标,例如在动态存储器或微处理机中,用NMOS工艺是较好的方案。如果需要高速逻辑电路,目前MOS工艺仍相形见绌,可以选择 I^2L 、TTL、ECL电路,然而它们的功耗将依次增高,且集成度下降。对于要求精确的模拟功能而只需少量逻辑功能的电路来说,特别是需要高电压和大电流的模拟电路,往往采用工艺复杂、集成度较低的 I^2L /双极电路工艺。从发展考虑,在LSI/VLSI系统中,CMOS工艺将占据主要地

位，这里包括SOS (*Silicon-on-Sapphire*即蓝宝石上的硅片) 工艺。

为进一步提高集成度，在MOS工艺中采用“按比例缩小” (*Scaling Down*) 的方法将是一种重要手段。在数字电路方面，这种技术比较成熟。

LSI/VLSI内部电路的构成原理都与工艺制造特点有着密切联系。许多在分立或小规模集成电路中的观念已不适用。例如，在LSI电路中普遍采用有源器件取代无源器件。在芯片上，连线与压焊点占用面积很大，一般情况下，设计者无须追求元件数量的节省，而是更加关心合理的布线，以期达到芯片面积最小。集成电路设计思想的另一特点是充分利用同一硅片上相邻元件参数所固有的匹配特性，使电路性能指标主要取决于元件参数的匹配程度而极少依赖于参数值本身，从而大大改善了电路的稳定性。例如，开关电容滤波器，它的频率特性（时间常数）由硅片上的电容比值决定，而不依赖于元件的绝对数值。

从以上分析可以看出，LSI/VLSI系统设计人员的任务就是在给定的系统功能与使用环境要求的约束下，选择电路元件模型和工艺条件，完成逻辑与电路设计，进而获得芯片上各类元件布局与连线的最佳几何图形。随着集成度的提高，已经容易实现所谓“硅片上的系统”。设计者面临的问题难以按照系统、电路、工艺等不同阶段严格划分。一方面要求设计师不断更新知识、拓宽专业面，以适应综合设计能力的需要，另一方面，必须大力开发CAD软件，设计工作尽可能借助计算机完成。

(三) MOS开关电容技术

从中、小规模集成到大规模集成，在电路构成原理方面的一个重要变化是MOS开关电容电路的广泛应用。MOS开关电容电路从网络设计与工艺技术两方面摆脱了多年来模拟集成电路构成原理和制作方法的约束。将连续信号离散化处理，利用MOS数字集成电路已有的成果，充分发挥了MOS器件低功耗、高阻抗、工艺简单、占用

芯片面积小等优点，为模拟电路的大规模集成开拓了广阔天地。目前，这类电路主要用作通信系统的滤波器，也可用于自激振荡器、压控振荡器、低功耗放大器、多路复用放大器等等。它的主要特点是借助时钟控制容易实现稳定、准确的时间常数；借助时钟电路的不同连接方式易于实现各种运算功能；容易与数字电路兼容，实现模拟—数字混合的大规模集成。

(四)版图设计

在完成电路设计之后，必须把电路图转换为相应的掩膜制作布局图形，这种几何布局称为版图。版图设计包含两方面的工作：一是布局—安放器件位置；另一是布线—设计器件之间相互连线的通道走线。可以先作布局再完成布线，也可将两种安排同时进行。在设计版图时，希望电路密度高或设计时间短。如果从提高电路密度考虑，宜采用“全用户版图”（*Full-Custom*或称全用户）法，这时，每一器件的形成和连接有最少的限制。这种方法可以达到电路密度最佳化，并且能使电路工作速度高、功耗低，但所需设计时间较长。另一种方法称为半用户版图（*Semi-Custom*或称半定制）法，此方法将已设计成熟的基本功能单元安放好位置，然后按照用户提出的逻辑表达式布线，此过程借助计算机辅助设计系统完成。这种方法的设计时间短，但是电路密度并非最佳，宜用于试制或小批量生产。在半用户版图设计方法中，目前，最为流行的是门阵列（*Gate Arrays*）法，此外，还有多单元（*Polycell*）法和门矩阵（*Gate matrix*）法等等。已经设计好的版图还需利用计算机校验设计规则差错、功能差错、相互连接差错。利用计算机绘出版图并制成掩膜版的各层分图，经缩版之后就可复制成供光刻之用的工作版。最后完成的制版图形可以和原设计电路相互校核，这时可借助模式识别技术，仍由计算机完成。

(五) 电路微调与自动测试

在LSI电路制作过程中,模拟参量的调整需在芯片封装之前完成,目前,普遍采用片上微调(*On chip trimming*)方法。在设计电路时根据待调整部分的需要,附加一个数字网络提供D/A转换功能,受外部数字量控制可以完成片内模拟量的微调工作。当调整达到预定指标时,利用激光束或电流熔断多晶电阻等方法将D/A网络参量固定,相应的待调模拟量随之确定。由于调整过程是利用数字量控制,因而便于利用微处理机自动进行。例如,Codec参考稳压电源的高精度电压值,滤波器的增益和带宽都利用这种方法进行微调。

随着集成度的增高,单片功能复杂,测试项目增多,无论试制、鉴定、生产、使用、可靠性研究等工作都希望高速、自动化测试,这时必须依靠计算机完成。LSI/VLSI测试仪由小型机或微型机控制,所谓“测试处理器”即控制测试仪用的计算机,其主要作用是调试和编译以高级语言写成的测试程序,控制所有测试单元,管理测试程序的执行,调度测试图案文件,以及自动处理测试数据等等。针对某些单片,研制了一些专用的智能化测试仪,已有商品出售(例如PCM Codec测试仪)。

自动测试涉及故障诊断理论,目前,对于数字系统已有一套行之有效的诊断方法,而模拟电路故障诊断的研究进展缓慢。

1.3 现代通信系统大规模集成电路

在现代通信系统中,不仅广泛应用诸如存储器(RAM、ROM)、可编程逻辑阵列、微处理机……等各类通用集成电路,而且,专用大规模集成电路的研究与应用也取得了很大进展。据国外报导,1983年通信专用集成电路的销售额已经达到集成电路总销售额的

20%，1986年可达30%，1990年以后预计达到50%。

与分立器件或中、小规模集成电路组成的通信系统相比较，专用与通用大规模集成电路组成的通信系统具有如下特点：低成本、低功耗、低的重量和体积，高性能、高可靠性和高保密性。所谓高保密性意味着专用集成电路难以仿制。

目前，通信专用大规模集成电路的种类繁多，涉及的应用方面十分广泛，这里列举一些典型应用。

(1) 数字电话终端复用设备中的语音编解码器 (Codec)。包括PCM Codec、 Δ MCCodec以及ADPCMCodec等各类编解码器芯片。

(2) 话路滤波器。包括开关电容滤波器和各种数字滤波器。目前，处于研制阶段的连续时间 (MOS-、电容反馈控制) 滤波器也将逐步得到广泛应用。

为进一步提高芯片集成度、改善芯片性能，近年来，比较流行的设计方案是将PCMCodec与话路滤波器集成在同一芯片，现在已有多种型号的这类产品。

(3) 用户线路接口电路 (Subscriber Line Interface Circuit, 缩写为SLIC)。这类单片的主要功能是完成二—四线转换以及抑制纵向感应、雷电保护等等。往往要与48V高压连接，因此目前多采用双极工艺。

将PCMCodec、开关电容话路滤波器以及SLIC集成于同一芯片的研究工作已经初步取得成果，预计近年将有商品问世。

(4) 数字电话系统时分多路复用设备中的专用时隙分配器、HDB₃码变换器。

(5) 多功能模拟电话机。包括双音多频 (DTMF) 产生与检测、号码存储、号码重拨等多种功能芯片。

(6) 程控交换机专用电路。包括模拟多路开关、矩阵、时隙交换网络等。

(7) 语音合成与语音识别。这类电路将完成某种确定的语音信

号数字处理功能。语音合成与识别以及上述(1)类中的ADPCM等都可借助DSP(数字信号处理器)完成,也可按用户要求制作专用电路。

(8)高、低速数据传输的调制、解调器(Modem)。例如300波特、600波特、1200波特FSK调制、解调器以及2400波特、4800波特、9600波特QAM调制、解调器。

(9)移动电台专用电路。短波、超短波段移动电台中的频率合成器、锁相环以及信令产生与控制电路等。

(10)数字电视接收机。例如数字电视接收设备中的视频、音频信号传送、扫描、双声道传送电路等。

以上各类通信专用大规模集成电路的主要特点是:多种芯片需要模拟与数字技术兼容;一般讲集成度不很高,单片约几千至几个元件;除少量电路外,大多工作速度不很高;MOS工艺占据主导地位。

为帮助通信系统设计师与集成电路设计师在原有基础上尽快适应新技术发展的需要,在本书中着重介绍大规模集成电路中MOS模拟电路的基本原理,然后重点剖析一些典型的通信专用单片,如数字电话终端复用设备中的语音编码解码器以及开关电容话路滤波器等。最后介绍利用计算机通用程序设计MOS模拟大规模集成电路的基本方法。

参 考 文 献

- 〔1〕 S.Muroga "VLSI System Design When and How to Design VLSI Circuits" John Wiley & Sons.1982
- 〔2〕 Carver Mead and Lynn Conway "Introduction to VLSI Systems" Addison-Wesley 1980
- 〔3〕 J. Mavor, M.A.Jack, P.B.Denyer "Introduction to MOS LSI Design" Addison-Wesley 1983
- 〔4〕 C.A.T. Salama "VLSI Technology for Telecommunication IC'S" IEEE J. Solid State Circuits Vol. SC-16, August 1981
- 〔5〕 郑君里 "数字和模拟LSI/VLSI电路与系统" 中国电子学会线路与系统学会第五届年会文集 1984.5 西安