



● 高等学校教学用书 ● [美] 萨布罗·穆尔加 著

VLSI 系统设计

—— 何时和如何设计超大规模集

电子工业出版社

VLSI系统设计

—何时和如何设计超大规模集成电路

[美]萨布罗·穆尔加 著

茅于海 刘宝琴 夏玲玲 译

杨之廉 张建人 黄令仪 校

电子工业出版社

内 容 简 介

本书在全面介绍LSI/VLSI的结构、逻辑设计、电子电路和版图设计的基础上,重点讨论了逻辑设计。全书共十章。讨论了LSI/VLSI芯片的优缺点、成本分析、各主要逻辑系列的特点、逻辑设计和版图设计过程、工艺发展趋势、用LSI/VLSI芯片设计可以实现的各种存储器及其用法、CAD、定制和半定制芯片的设计、系统设计问题和软件-硬件综合的问题、VLSI系统的未来问题。

本书可作为高校无线电技术、计算机和微电子技术专业的教材,也可供这些方面的科研和工程技术人员参考。

VLSI系统设计

—— 何时和如何设计超大规模集成电路

〔美〕 萨布罗·穆尔加 著

茅于海 刘宝琴 夏玲玲 译

杨之廉 张建人 黄令仪 校

责任编辑 郭延龄

*

电子工业出版社出版(北京海淀区万寿路)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京体育学院印刷厂印刷

*

开本: 850×1168毫米1/32 印张: 17.5 字数: 437千字

1989年8月第一版 1989年8月第一次印刷

印数: 1—1200册 定价4.15元

ISBN7—5053—0258—2/ TN·105

译 者 的 话

本书是根据Saburo Muroga编写的“VLSI System design—When and How to design very-Large-scale Integrated Circuit”（1982年出版）一书翻译的。

当前，小规模集成电路和大规模集成电路已在我国普遍制造和使用，大规模集成电路和超大规模集成电路的生产和使用也日益增多。由于超大规模集成电路具有体积小、功耗低、功能强、成本低、工作速度快和可靠性高等优点，可以预料，它在我国的研制、生产和使用将会更加迅速地发展。为此，我们翻译了本书。

这本“VLSI System design”（VLSI系统设计）是适合无线电技术专业学习的一本参考书，它以介绍逻辑设计为主，并介绍了一定的、其它方面必须的知识（例如工艺等）。文章浅显易懂，具备初步数字电路知识的人便可阅读（基础好的可以学得更深入）。本书是根据作者多年的教学笔记整理写成的，故此书可作为教材使用。

在翻译过程中，更正了原书一些印刷上的错误，并在有关之处加了注释。为了文章的连贯，原书中一些商业性的介绍，在翻译时，照原文译出。书中涉及的专业术语尽量按我国标准和习惯译出，新术语将原文附上以便读者查阅。

本书由茅于海教授主译并翻译了第一、二、八章，参加翻译的有刘宝琴（第四、七、十章）和夏玲玲（第三、五、六、九章）两位副教授。聘请下面三位同志担任了校对工作，清华大学微电子所杨之廉副研究员（第一、二、八、十章），张建人教授（第四、七章）和中国科学院计算技术研究所黄令仪副研究员（第三、五、六、九章），在此谨致谢意。

鉴于译者水平有限，难免有不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

译者 1987年于
北京清华大学无线电系

序 言

近年来,大规模集成(LSI)和超大规模集成(VLSI)电路已渗透到许多产品领域中,其范围日益扩大,从手表、玩具、电视游戏、家用电器和个人的计算机,一直到大型计算机。此外,软件和硬件系统已经一起溶合到这些芯片中了。因此,大规模集成和超大规模集成(LSI/VLSI)系统设计正成为工业界各种人员(从芯片设计师和制造工程师到器件使用者、软件设计师和经营管理人员)主要关心的问题。本书介绍LSI/VLSI设计的一般概念及其关键问题。

这本书是根据我的讲课笔记整理而成的。LSI/VLSI技术的进步使我非常兴奋,并且想把我的激情转达给学生们,经过几年的准备,1974年我开始讲授LSI/VLSI系统设计。此后,这些笔记又经过反复地修改和补充。由于集成电路设计要涉及到很多领域,而每一领域都很复杂,它们之间的关系甚至更为复杂,因此,编写LSI/VLSI系统设计一书不是一件容易的工作,然而学生们的热烈反响推动我去继续努力工作。

事实上,集成电路不仅把门、连线和存储器集成在一起,它 also 要求学生具有许多方面的综合知识。即使学生们学习了各方面的专业课程,获得这样综合的知识也是非常困难的,这是因为各方面的关系错综复杂,而且需要权衡考虑各种不同设计方案的利弊。于是,需要一门课程来综合归纳这些专门课程的内容。我相信,这样一门课程的重要性将会日益增加。

本书虽然对所有有关的方面,如结构、逻辑设计、电子电路和版图设计都进行了介绍,但重点是讨论逻辑设计。其原因如下:首先,可以预料逻辑设计师将严重短缺。每个制造厂都需要生产

许多专门定制的集成电路芯片，而每个芯片在它的全部设计过程中必须配有一定数量的逻辑设计师，（表4.7.1b中示出，版图设计是最花费时间的工作，虽然这主要是由绘图员做的，但是具备结构、电子电路设计知识的逻辑设计师，从芯片设计的最初阶段到最后的版图设计阶段，必须对各项芯片设计工作负责。）第二，对LSI/VLSI系统设计师而言，权衡考虑不同的逻辑设计方法是很重要的。设计方法的研究是逻辑设计中新的重要问题。在逻辑设计中，特别是在版图设计和测试中，选择合适的设计方法会缩短芯片的设计时间。例如，用可编程逻辑阵列（PLA）进行逻辑设计就可大大减少设计时间，这一方面是因为可以采用计算机辅助设计（CAD）的代数最小化方法，另一方面是因为PLA的规则结构使版图设计也较简单。相反，用随机逻辑电路进行逻辑设计就要花费多得多的时间，但这样设计出的芯片性能好得多，尺寸也比较小。在所有的情况下，我们都要比较不同的设计方法，并找出他们的利弊。第三，学生应该知道一些逻辑设计方面的基本原理，因为LSI/VLSI系统设计决不是一个初等学科，而是建立在许多不同领域（例如制造、电子电路、固体物理和总体结构）综合的基础上的。如果没有上述的任何一方面的预备知识，本书的讨论就会显得太浅。在这个意义上，学习本书最好应具备逻辑设计和初等电子学的一些知识。首先是逻辑设计，因为学生（甚至是没有电子学基础的人）学习它比较容易。在伊利诺斯大学，学生们先学习逻辑设计课，该课使用的教材是1979年出版的我写的“逻辑设计和开关理论”[该书提供了LSI/VLSI逻辑设计的理论基础和提高逻辑设计效率的CAD技术，如PLA的最小化、MOS电路分析、或非（或者与非）网络的设计、故障诊断和模拟]。但是学生们如果自学了其它书的一些有关部份，或通过课堂讲授补充了一定知识，他们就能直接使用这本书了。此外，如果读者对逻辑设计的细节不感兴趣，通过阅读这本书，而不用补充其它书籍，也能对LSI/VLSI系统的设计有一些粗浅的了解。其次，学

生要有初等电子学的知识，这是因为LSI/VLSI技术是直接和电子学有关的。但是这些知识要求很低，读者仅需知道二极管和三极管的外特性。读点电子学的书，例如R·J·Smith的“电路和器件”（第二版）将是有益的。

在第一章中，通过LSI/VLSI系统新产品的许多实例，概述使用LSI/VLSI芯片的优缺点。第二章在回顾了制造技术之后，讨论了LSI/VLSI芯片的成本分析。芯片的成本受许多复杂因素的影响，诸如产品成品率、芯片尺寸、设计工时、生产批量等。在后面一些章节讨论的芯片设计方法中，这些经济方面的考虑是很重要的。在某些情况下，设计数字系统时，用中规模集成（MSI）或小规模集成（SSI）组件代替LSI或VLSI芯片可能更适宜。第三章和第四章，讨论了各种主要逻辑系列的特点，以及逻辑设计和版图设计过程。第五章对所有的逻辑系列进行了比较，概述了工艺发展趋势。第六章摘要介绍了目前用LSI/VLSI芯片设计可以实现的各种类型的存贮器，并讨论了随机存取存贮器（RAM）作用逻辑网络的用法。第七章讨论了只读存贮器（ROM）作用逻辑网络的用法。当集成度增加时，过长的设计时间成为一个严重的障碍，其中的大部分耗费在测试和版图设计上，为了减少设计时间，越来越多地采用规则的电路结构，诸如ROM和PLA。本章讨论了用ROM代替逻辑门的利弊。ROM不能简单地运用，在使用ROM时，设计师必须开发合适的算法，使之适用于具体的计算任务。本章对这样的算法以及ROM尺寸的最小化方法都进行了讨论。第八章概述了在LSI/VLSI系统设计的每一方面是如何利用CAD的。第九章讨论了定制芯片和半定制芯片的设计。全定制设计的LSI/VLSI芯片可以很好地提高性能和减少成本，但设计时间最长。为了在设计时间、成本、性能和其它可能因素之间寻找适当的折衷，提出了半定制芯片设计的整套方法。例如，选用微型计算机是减少设计时间的一种途径。上述所有问题都用综合的观点进行了讨论。微处理器芯片的设计问题也作了介绍。第十

DAD 04/9

章讨论了系统设计问题和软件-硬件综合的问题，并预测了VLSI系统的未来问题。

我愉快地发现，许多原来对电子学和制造等有关方面没有一点兴趣的学生，在使用本书，经过芯片设计课程的学习受到启发后，竟开始学习有关的专门课程，其中相当数量的学生成为LSI/VLSI系统的设计师或者有关CAD的专业人员。

正如一个研究课题一样，由于LSI/VLSI设计的复杂性和通用性，编写一本试图提供技术上综述的书，就要出现某些问题。例如，为了避免过于复杂，有关方面的内容没有得到详细的讨论，为此，本书引用了较多的“专题讨论班”的资料或评述文章作为参考资料。此外，这本书的目的之一是对不同的技术进行比较。因为一个技术的新成就总是同其它技术的老成就相比较而言的，而技术又总是不断地变化着，所以要得到一个十分满意的比较仍是不现实的。同样，芯片设计的每一方面都有惊人数目的论文发表，我尽最大的努力，不漏看任何一篇和本书内容有关的关键论文，特别是在有关LSI/VLSI系统设计的广阔范围内，我尽一切努力，不曲解任何论点，不漏掉任何关键之处。早期文章中的模棱两可和错误有时会给我的工作带来困难，事实上，在已发表的许多版图设计图纸中都有些错误，在这方面，我感谢帮助我澄清或修正错误的著者们，我也感谢提供了照片和相应资料的制造者们。

在第九章和第十章中，虽然对芯片结构和通用计算机结构之间的差别进行了讨论，但对通用微处理器芯片的结构设计没有详细讨论，在当前，芯片结构同大型主计算机或小型通用计算机的结构没有明显的差别，读者能从详细讨论通用计算机结构的许多教科书中学习到有关的知识，LSI/VLSI技术更直接影响到低级设计阶段，即版图设计、电路设计和逻辑设计，而芯片结构同大型主计算机或小型计算机结构的差别则是这些影响的结果，前面的各章讨论了这些影响。

根据S·R·Lehman博士的计算机系统设计规划，在国家科学基金会的资助下，我的小组多年来做出了本书所提到的各项科研成果。我也非常感谢Z·Arbatsky夫人，她不辞辛劳地打印了这份手稿。

LSI/VLSI技术的进步本身是美妙的，并且学起来令人兴奋。我愿意把这些美妙的和令人兴奋的东西告诉读者们。

萨布罗·穆尔加

1982年夏于伊利诺斯州厄巴纳

说明

(一)在本书中，标注▲的章节(或小节)和附注部分介绍了目前较高深的内容，如果在阅读过程中略去它们，不会妨碍对后面内容的理解。在高等院校讲授时，建议将附注内容全部省略。

(二)书末附有大量的参考资料。正文中引用这些资料时，只在括号内写出了作者姓名和写作年代，或者刊物名称和出版年月，以便查找。

换 算 表

1 密耳 (mil)	10^{-3} 英寸 $25.4 (\mu\text{m})$
1 立方英尺	28 (l ³)
1 l ³	1 dm ³
1 Å	10^{-10} m
	10^{-8} cm
	10^{-6} μm
	10^{-4} nm
1.000 Å	0.1 μm

倍率—简称—缩写表

倍 率	简 称	缩 写	倍 率	简 称	缩 写
10^{12}	(tera)		10^{-2}	(centi)	c
10^9	(giga)	G	10^{-3}	(milli)	M
10^6	(mega)	M	10^{-6}	(micro)	μ
10^3	(kilo)	k	10^{-9}	(nano)	n
10^2	(hecto)		10^{-12}	(pico)	p
10	(deka)		10^{-15}	(femto)	f
10^{-1}	(deci)	d	10^{-18}	(atto)	

目 录

换算表	
倍率—简称—缩写表	
第一章 绪论	(1)
1.1 集成电路技术的进展及其影响	(1)
1.2 元件的实现	(10)
1.3 集成电路比分立元件的优越性	(23)
第二章 制造和成本分析	(29)
2.1 集成电路组件的制造	(29)
2.2 成品率	(43)
2.3 成本分析	(50)
2.4 制造工艺的进一步探讨	(59)
2.5 集成电路逻辑系列的选择和逻辑设计方法	(67)
习题	(70)
第三章 双极型逻辑系列的逻辑设计和掩模设计	(72)
3.1 双极型晶体管	(72)
3.2 晶体管—晶体管逻辑(TTL)	(78)
3.3 双极型晶体管的版图设计	(100)
习题	(110)
3.4 发射极耦合逻辑(ECL)	(112)
习题	(130)
3.5 其它双极型逻辑系列	(132)
习题	(146)
3.6 本章小结	(149)
第四章 MOS逻辑系列的逻辑设计和掩模设计	(150)
4.1 金属—氧化物—半导体场效应晶体管(MOS场效应管)	(150)
4.2 MOS网络的逻辑设计	(164)

4.3	电子电路设计中的问题.....	(177)
4.4	或非门和与非门混合的MOS网络的逻辑设计.....	(185)
4.5	常用和特殊MOS网络的实例.....	(188)
	习题.....	(191)
4.6	静态MOS电路的版图设计.....	(193)
4.7	芯片设计的全过程.....	(203)
	习题.....	(212)
4.8	动态MOS网络.....	(214)
	习题.....	(227)
4.9	互补MOS(CMOS).....	(228)
4.10	其它MOS工艺.....	(254)
	习题.....	(258)
4.11	本章小结.....	(260)
第五章 逻辑系列的比较和技术发展趋势.....		(262)
5.1	逻辑系列的比较.....	(262)
5.2	兼容性.....	(266)
5.3	系列的品种.....	(267)
5.4	技术趋势.....	(268)
	习题.....	(277)
第六章 存贮器.....		(278)
6.1	半导体存贮器的特点.....	(278)
6.2	随机存取存贮器(RAM).....	(280)
6.3	用RAM替代逻辑网络.....	(289)
6.4	掩模编程只读存贮器(ROM).....	(291)
6.5	可编程只读存贮器(PROM).....	(296)
6.6	可擦除ROM.....	(298)
6.7	半导体存贮器的比较.....	(301)
6.8	其它存贮器类型.....	(303)
6.9	各种存贮器的比较.....	(306)
	习题.....	(307)

第七章	在逻辑设计和任务实现算法中ROM的应用	(309)
7.1	在逻辑设计中 使用ROM的动机	(310)
7.2	波形和字符的产生	(313)
7.3	组合逻辑网络	(317)
7.4	时序逻辑网络	(327)
7.5	码制转换	(328)
	习题	(343)
7.6	用ROM实现各种运算	(344)
7.6.1	加法	(344)
7.6.2	乘法	(345)
7.6.3	开方	(348)
7.6.4	三角函数	(351)
7.6.5	其它函数	(354)
7.6.6	ROM网络的结论性评述	(355)
7.7	可编程逻辑阵列 (PLA) 及其变型	(355)
7.8	现场可编的阵列逻辑	(374)
7.9	多级门阵列 (MGA)	(376)
7.10	存贮器在计算机中的应用	(380)
7.11	本章小结	(383)
	习题	(385)
第八章	计算机辅助设计 (CAD)	(387)
8.1	系统指标的确定、功能设计和逻辑设计	(388)
8.2	逻辑模拟	(382)
8.3	分片和芯片设计	(390)
8.4	电子电路的模拟与分析	(390)
8.5	版图设计	(392)
8.6	设计的验证和测试	(396)
8.7	CAD程序的有关问题	(397)
8.8	CAD数据库系统和CAM	(399)

8.9 关于CAD的参考资料.....	(400)
习 题	(402)
第九章 全定制和半定制的设计方法	(401)
9.1 不同的设计动机	(401)
9.2 采用分立元件和成品组件的设计	(406)
9.3 全定制设计的方法	(408)
9.4 半定制设计方法	(413)
9.4.1 门阵列	(413)
9.4.2 单元库的设计方法	(441)
9.4.3 其它设计方法	(445)
9.5 各种设计方法的比较	(448)
9.5.1 采用成品组件的设计方法	(448)
9.5.2 定制设计方法.....	(449)
9.6 微计算机.....	(456)
9.6.1 特点和应用.....	(456)
9.6.2 新的或专用的微计算机	(464)
9.6.3 微处理器和微计算机的设计.....	(466)
9.7 各种设计方法的比较.....	(474)
习 题	(477)
第十章 系统设计和未来的问题	(478)
10.1 系统设计中的问题	(478)
10.2 硬件-软件的折衷.....	(481)
10.3 未来的问题	(490)
附录: 最少负门网络设计方法 4.2.1 的理论基础.....	(599)

第一章 绪 论

本章首先回顾集成电路的进展,接着讨论大规模集成(LSI)电路或超大规模集成(VLSI)电路技术对社会造成的巨大影响。最后,叙述LSI/VLSI的基本定义和性能。

1.1 集成电路技术的进展及其影响

近年来,由于集成电路技术的巨大进展,已经可以制造出许多种数字系统,它们具有极低的成本,极低的功耗,较高的工作速度和很小的体积,从而使我们日常生活中的许多事物都发生了变化。在表1.1.1中,比较了第一台计算机(ENIAC型)和Hewlett-Packard公司的便携式计算器HP-67性能,我们对这种进展有一些具体的印象。HP-67计算器实际上是一个可以握在手掌里的ENIAC计算机。此外,ENIAC具有18,000个电子管,并且占地 300m^2 ,而1978年研制出的Z8000微处理器芯片具有17,500个晶体管,但尺寸只有 3.9mm^2 。三十年的变化是极其惊人的。

Texas仪器公司生产的TI-59便携式计算器标价为300美元,它具有多达100个寄存器的数据存储器 and 900多条指令的程序存储器。Texas仪器公司声称, TI-59的计算能力相当于IBM公司1959年投产的1401型计算机,后者有一个房间那么大,售价为70,000美元。在1975年生产的IBM5100是一种台式计算机,它的存储器容量和早十年生产的IBM360/30相当,而其售价大致相当于360/30型计算机的每月租金费(在1978年生产的IBM5110的工作速度又要快3至30倍,而售价只有9,900美元)。在六十年代初

表1. 1. 1 老式计算机和新式计算机器的比较

	ENIAC 1946年	HP-67 1977年	大约的比值
字 长	10位十进位	10位十进位	1 : 1
数据存储器容量	20个寄存器	26个寄存器	1 : 1.3
程序存储器容量	750 条指令	224条指令	3.3 : 1
输入/输出	穿孔卡	磁 卡	
读数速率	200位/秒	50位/秒	4 : 1
手动开关	5000个	35 个	140 : 1
乘法次数	360/秒	15/秒	24 : 1
成 本	480,000 美元	375美元(1980年)	100,000 : 1
体 积	10×100×4英尺 ³ (4,000英尺 ³)	3.2×1.4×6英寸 ³ (27英寸 ³)	270,000 : 1
功 耗	50,000W	1/2W	100,000 : 1
重 量	30 Mg	298 g	100,000 : 1

期，大型机的主存储器还很少达到一兆字节(MByte)，然而，这样大的存储器现在已安装在Hewlett-Packard公司的Amigo-300小型商用系统的底座中，它是1978年生产的，价格为32,000美元，而其中所用的集成电路数量还在逐渐减少。在六十年代中期，一个典型的计算机器包含有90至150个双极型集成电路片。在1969年，只要4个MOS集成电路片就可以完成同样的功能，而到了1971年只要一个MOS芯片就足够了。而售价则大约下跌到原来的1/50。现在，单片的性能还在不断提高。可以预料，在今后的十年或十五年期间，体积、成本和性能都会有同样数量级的改进。

本书企图来追述这一进展，并提供有关集成电路设计的全貌：从集成电路的制造直到数字系统的设计的每个方面，然而，并不准备涉及电子学、固体物理或化学方面的细节。对于计算机工程师（或计算机科学家）和公司技术领导来说，学习和了解各种集

成电路的优缺点，以及如何应用它们，已经变得非常重要了。这是因为有如下的一些原因：

1. 集成电路将成为越来越完整的系统，其中包括逻辑网络、存贮器和软件。逻辑设计人员和程序设计人员之间的界限逐渐变得模糊不清了。通常设计师不仅须具有设计和编程的能力，而且还应该会开发新的算法，以便在集成电路上实现特定的任务。为了能在集成电路芯片上设计出好的数字系统，设计师必须知道在集成电路芯片上可以设计什么。我们在后面的几章中更可清楚地看到：设计师能否恰当地设计和使用集成电路芯片，会使得一个系统在性能上、成本上，以及其它性能上有很大的差别。

2. 由于采用现代的集成电路，使数字系统的成本越来越低、体积越来越小而性能却得到了改进，因而，在实现某一任务时，设计师必须在软件和硬件（即集成电路）之间考虑取舍和权衡利弊。假如此项任务是用硬件实现的，则其性能通常要比用软件实现的好得多，然而，为完成这项任务所花费的时间较长，并且在实现和改动时也较昂贵。例如，软件中的重要部分，特别是操作系统，可以在硬件上实现，以提高工作速度和便于编程。在利用硬件来实现软件时，有关LSI和VLSI的知识是很重要的（参看Falk, 1974, Computerworld, Apr, 1975, p47, Goetz, 1975; Wagner, 1976, p.91）。另一个例子是浮点运算，用硬件实现时，其速度至少要比软件实现快一个或两个数量级。同样，现在已经研制成功一些专用处理器芯片，这些芯片能够处理高级语言（例如，Pascal和Ada语言）编写的程序（参看Bursky, May10, 1980; Schindler, Jan8, 1981）。

3. 由于LSI和VLSI的成本低、体积小且功耗低，所以研制出了很多新产品。其中有些产品，只是在LSI或VLSI技术上取得突破后，才第一次有可能研制成功。普通的产品用LSI/VLSI实现后，就具有了新的功能，这往往使制造厂商获得更大的利润。同时，全新的产品打开了新的市场。下面列举出其中的一些例子：