



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



电子信息与电气学科规划教材 · 电子科学与技术专业

VLSI设计基础

(第二版)

李伟华 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电子信息与电气学科规划教材·电子科学与技术专业

VLSI 设计基础

(第二版)

李伟华 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本教材为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”,全书共有 10 章。第 1~3 章重点介绍了 VLSI 设计的大基础,包括三个主要部分:信息接收、传输、处理体系结构及与相关硬件的关系;MOS 器件、工艺、版图等共性基础,以及设计与工艺接口技术、规范与应用。第 4~6 章介绍了数字 VLSI 设计的技术与方法,其中第 6 章以微处理器为对象,综合介绍了数字系统设计方法的具体应用。第 7 章介绍了数字系统的测试问题和可测试性设计技术。第 8 章介绍了 VLSIC 中的模拟单元和变换电路的设计技术。第 9 章介绍了微机电系统(MEMS)及其在系统集成中的关键技术。第 10 章主要介绍了设计系统、HDL,对可制造性设计(DFM)的一些特殊问题进行了讨论。

本书作为弱电专业本科生 VLSI 设计技术基础教材,注重相关理论的结论和知识的应用,内容深入浅出。相关专业的本科生可以根据具体专业,选择部分或全部进行教学。本教材也可作为微电子专业硕士研究生 VLSI 系统设计技术的参考书。同时,因本教材中涉及了较多的工程设计技术,也可供有关专业的工程技术人员参考。

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。

图书在版编目(CIP)数据

VLSI 设计基础/李伟华编著. —2 版. —北京:电子工业出版社,2010. 2

电子信息与电气学科规划教材. 电子科学与技术专业

ISBN 978-7-121-10255-4

I. V… II. 李… III. 超大规模集成电路—电路设计—高等学校—教材 IV. TN470. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 011863 号

责任编辑:陈晓莉

印 刷:北京天宇星印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:19.25 字数:493 千字 彩插:2

印 次:2010 年 2 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:35.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

再版前言

《VLSI 设计基础》从 2002 年出版到现在已经过去了将近 7 年,在这 7 年中,微电子技术已经取得了巨大的发展,VLSI 的特征尺寸已经达到了几十纳米量级。新结构、新设计、新工艺、新材料等一系列新技术不断地为新产品提供了实现的基础与可能。VLSI 设计的基础水平已经得到提升,标准加工技术成为常规生产手段,系统集成已不再仅仅是电路体系,而是发展到多能域信息处理体系的集成。

经过 7 年对原教材的使用和教学实践,一方面感觉到教材内容应该补充和删减,一方面也感觉到内容体系本身也应该进行一些调整和完善。非常感谢电子工业出版社将《VLSI 设计基础》(第二版)推荐列入“普通高等教育‘十一五’国家级教材规划”,为完善本教材提供了机会。

《VLSI 设计基础》(第二版)在原书的基础上进行了较大篇幅的修改、补充和完善,几乎每一章都进行了修订。修订篇幅较大的是第 1、2、3、6、8、10 章,对原先的第 9 章进行了大幅度的删减,并将其并入到第 10 章,新的第 9 章则介绍了微机电系统(MEMS)。

内容组织的基本宗旨是结合 VLSI 实际问题,根据系统信号链的组织、工程实践问题与要求、VLSI 设计的基本理念与方法、各相关部分的逻辑关系与内在联系,从发展的角度和对发展规律的总结出发,全面地、系统地介绍基本理论、基本方法、基本技术,以设计基础内容为对象,以 VLSI 问题为主线,在 VLSI 这个大纲下将其所涉及的各个主要方面组织到一起,成为综合性的基础教材。

在第二版中,对主要章节增加了结束语,对章节内容进行了小结。除第 10 章外,每一章增加了思考与练习题。除教学内容的作业与练习外,思考与练习题中还列入了上网查阅资料的要求,希望学生学会充分地利用网络资源,不断地自主扩充知识。

当教材文字写完的时候,还感到意犹未尽,因为确实有太多的内容、太快的发展,总感到跟不上发展的速度和知识的扩充,专业技术课程教材编写的遗憾莫过于此。

在本书的修编过程中,得到了东南大学教务处、电子科学与工程学院和周围同事们以及家人的帮助与支持,在此一并表示感谢。

李伟华

liwh@seu.edu.cn

2009 年 12 月于东南大学

前 言

微电子技术的飞速发展以及各学科之间的相互渗透使得超大规模集成电路及其相关技术不再仅仅是微电子学科的专门知识,它已成为电子与电气各相关学科需要掌握和了解的基础知识。正是在这样的背景下,根据教育部培养宽口径人才的精神,东南大学开设了跨二级学科选修课“VLSI 设计基础”课程,面向校内各相关弱电专业。我们通过授课实践,在有关讲义的基础上,通过补充、修改和完善,完成了本教材的编写。

考虑到作为教材必须做到科学性、先进性以及内容的完整性相结合,同时考虑到授课对象的知识背景,教材在内容组织上注重基础知识,注重先进技术,注重各部分内容的逻辑关系,力求使学生通过本教材的学习,对 VLSI 的相关技术有一个比较全面的了解,对 VLSI 所涉及的方方面面有一个基本认识。在注重基础方面,本教材侧重的是基本理论的有关结论、设计规则以及这些结论和规则在设计方面的应用;在注重先进技术方面,本教材注意组织先进的结构、先进的方法、先进的设计手段等内容;在注重各部分内容的逻辑关系方面,注意几个结合:器件与逻辑/电路的结合,工艺与逻辑/电路设计的结合,电路与版图的结合,单元模块与系统的结合。

本教材共分为 4 个部分:第一部分(第 1~3 章)在介绍了 VLSI 设计所涉及的主要的基本问题的基础上,重点介绍了 MOS 晶体管基础、工艺基础和有关的基本逻辑电路的设计基础。第二部分(第 4~7 章)主要介绍了 VLSI 设计方法和手段以及在 VLSI 设计中所需考虑的测试问题与相关技术,其中,第 6 章通过对微处理器主要模块设计的介绍,对第 4 章、第 5 两章所介绍的设计技术进行了综合。第三部分(第 8 章)介绍了在 VLSI 中的模拟集成电路单元的设计。第四部分(第 9 章、第 10 章)介绍了现代设计技术中的两个重要内容:硬件描述语言和设计系统。

在本书的编撰过程中,东南大学微电子中心的茅盘松教授、清华大学微电子所的周润德教授和西安电子科技大学微电子所的张鹤鸣教授提出了宝贵的修改意见和建议,在此表示深深的感谢。本书的编撰得到了东南大学微电子中心和东南大学其他各有关院系老师的支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

VLSI 技术的发展日新月异,书中所介绍的知识难免有不足之处。由于作者水平有限,对书中的错误之处,恳请读者批评指正。

作 者

2002 年 6 月于东南大学

目 录

第 1 章 VLSI 设计概述	1
1.1 系统及系统集成	1
1.1.1 信息链	1
1.1.2 模块与硬件	2
1.1.3 系统集成	6
1.2 VLSI 设计方法与管理	8
1.2.1 设计层次与设计方法	8
1.2.2 复杂性管理	11
1.2.3 版图设计理念	13
1.3 VLSI 设计技术基础与主流制造技术	15
1.4 新技术对 VLSI 的贡献	16
1.5 设计问题与设计工具	17
1.6 一些术语与概念	18
1.7 本书主要内容与学习方法指导	20
练习与思考一	21
第 2 章 MOS 器件与工艺基础	22
2.1 MOS 晶体管基础	22
2.1.1 MOS 晶体管结构及基本工作原理	22
2.1.2 MOS 晶体管的阈值电压 V_T	25
2.1.3 MOS 晶体管的电流—电压方程	26
2.1.4 MOS 器件的平方律转移特性	27
2.1.5 MOS 晶体管的跨导 g_m	27
2.1.6 MOS 器件的直流导通电阻	28
2.1.7 MOS 器件的交流电阻	28
2.1.8 MOS 器件的最高工作频率	29
2.1.9 MOS 器件的衬底偏置效应	29
2.1.10 CMOS 结构	30
2.2 CMOS 逻辑部件	30
2.2.1 CMOS 倒相器设计	30
2.2.2 CMOS 与非门和或非门的结构及其等效倒相器设计方法	32
2.2.3 其他 CMOS 逻辑门	33
2.2.4 D 触发器	39
2.2.5 内部信号的分布式驱动结构	40
2.3 MOS 集成电路工艺基础	40
2.3.1 基本的集成电路加工工艺	40
2.3.2 CMOS 工艺简化流程	44
2.3.3 Bi-CMOS 工艺技术	47

2.4 版图设计	48
2.4.1 简单 MOSFET 版图	48
2.4.2 大尺寸 MOSFET 的版图设计	50
2.4.3 失配与匹配设计	53
2.5 发展的 MOS 器件技术	60
2.5.1 物理效应对器件特性的影响	60
2.5.2 材料技术	63
2.5.3 器件结构	65
练习与思考二	68
第3章 设计与工艺接口	69
3.1 设计与工艺接口问题	69
3.1.1 基本问题——工艺线选择	69
3.1.2 设计的困惑	69
3.1.3 设计与工艺接口	71
3.2 工艺抽象	72
3.2.1 工艺对设计的制约	72
3.2.2 工艺抽象	73
3.3 电学设计规则	76
3.3.1 电学规则的一般描述	76
3.3.2 器件模型参数	78
3.3.3 模型参数的离散及仿真方法	80
3.4 几何设计规则	83
3.4.1 几何设计规则描述	83
3.4.2 一个版图设计的例子	90
3.5 工艺检查与监控	90
3.5.1 PCM(Process Control Monitor)	90
3.5.2 测试图形及参数测量	92
本章结束语	96
练习与思考三	97
第4章 晶体管规则阵列设计技术	98
4.1 晶体管阵列及其逻辑设计应用	98
4.1.1 全 NMOS 结构 ROM	99
4.1.2 ROM 版图	100
4.2 MOS 晶体管开关逻辑	104
4.3 PLA 及其拓展结构	107
4.3.1 “与非—与非”阵列结构	108
4.3.2 “或非—或非”阵列结构	108
4.3.3 多级门阵列(MGA)	110
4.4 门阵列	112
4.4.1 门阵列单元	113
4.4.2 整体结构设计准则	116
4.4.3 门阵列在 VLSI 设计中的应用形式	117

4.5 晶体管规则阵列设计技术应用示例	117
练习与思考四	119
第5章 单元库设计技术	122
5.1 单元库概念	122
5.2 标准单元设计技术	123
5.2.1 标准单元描述	123
5.2.2 标准单元库设计	124
5.2.3 输入/输出单元(I/O PAD)	126
5.3 积木块设计技术	135
5.4 单元库技术的拓展	136
本章结束语	136
练习与思考五	137
第6章 微处理器	139
6.1 系统结构概述	139
6.2 微处理器单元设计	140
6.2.1 控制器单元	140
6.2.2 算术逻辑单元 ALU	143
6.2.3 乘法器	153
6.2.4 移位器	154
6.2.5 寄存器	156
6.2.6 堆栈	159
6.3 存储器组织	160
6.3.1 存储器组织结构	160
6.3.2 行译码器结构	161
6.3.3 列选择电路结构	164
6.4 微处理器的输入/输出单元	167
6.4.1 P0 口单元结构	167
6.4.2 P1 口单元结构	168
6.4.3 P2 口单元结构	168
6.4.4 P3 口单元结构	169
本章结束语	169
练习与思考六	169
第7章 测试技术和可测试性设计	172
7.1 VLSI 可测试性的重要性	172
7.2 测试基础	173
7.2.1 内部节点测试方法的测试思想	173
7.2.2 故障模型	174
7.2.3 可测试性分析	177
7.2.4 测试矢量生成	179
7.3 可测试性设计	181
7.3.1 分块测试	181
7.3.2 可测试性的改善设计	181

7.3.3 内建自测试技术·····	185
7.3.4 扫描测试技术·····	186
本章结束语·····	186
练习与思考七·····	186
第8章 模拟单元与变换电路 ·····	188
8.1 模拟集成单元中的基本元件·····	188
8.1.1 电阻·····	188
8.1.2 电容·····	193
8.2 基本偏置电路·····	195
8.2.1 电流偏置电路·····	195
8.2.2 电压偏置电路·····	203
8.3 放大电路·····	206
8.3.1 单级倒相放大器·····	206
8.3.2 差分放大器·····	212
8.3.3 源极跟随器·····	217
8.3.4 MOS输出放大器·····	219
8.4 运算放大器·····	221
8.4.1 普通两级CMOS运放·····	221
8.4.2 采用共源—共栅(cascode)输出级的CMOS运放·····	222
8.4.3 采用推挽输出级的CMOS运放·····	223
8.4.4 采用衬底NPN管输出级的CMOS运放·····	223
8.4.5 采用共源—共栅输入级的CMOS运放·····	224
8.5 电压比较器·····	225
8.5.1 电压比较器的电压传输特性·····	226
8.5.2 差分电压比较器·····	226
8.5.3 两级电压比较器·····	226
8.6 D/A、A/D变换电路·····	227
8.6.1 D/A变换电路·····	227
8.6.2 A/D变换电路·····	230
本章结束语·····	235
练习与思考八·····	235
第9章 微机电系统(MEMS) ·····	237
9.1 MEMS器件概念·····	237
9.1.1 几种简单的MEMS结构·····	238
9.1.2 集成微系统·····	244
9.1.3 多能域问题和复杂性设计问题·····	248
9.2 CMOS MEMS·····	249
9.2.1 材料的复用性·····	249
9.2.2 工艺的兼容性·····	251
9.3 MEMS器件描述与分析·····	252
9.3.1 简单梁受力与运动分析·····	252
9.3.2 Pull-in现象·····	254

9.4 MEMS 器件建模与仿真	255
9.4.1 等效电路建模基础:类比	256
9.4.2 MEMS 器件等效电路宏模型	260
9.4.3 器件特性与仿真	264
本章结束语	270
练习与思考九	270
第 10 章 设计系统与设计技术	271
10.1 设计系统的组织	271
10.1.1 管理和支持软件模块	271
10.1.2 数据库	271
10.1.3 应用软件	273
10.2 设计流程与软件的应用	276
10.2.1 高度自动化的设计	277
10.2.2 计算机辅助版图设计	278
10.2.3 单元库设计	279
10.3 设计综合技术	280
10.3.1 硬件描述语言 HDL	281
10.3.2 设计优化	290
10.4 可制造性设计(DFM)	291
10.4.1 一些特殊的问题	292
10.4.2 DFM 技术示例	293
结束语	295
参考文献	296

第 1 章 VLSI 设计概述

微电子学是源于并脱胎于固体物理学与无线电电子学的一门新兴技术学科,其发生发展历史并不是很长。从 1947 年 Bell Lab. 发明第一只晶体管到现在,也只经过了约 60 年,但微电子技术的飞速发展,已将现代社会推进到了信息时代。从第一块集成电路发明(1958 年),经历了约 40 年的时间,集成电路已从小规模集成(SSI)、中规模集成(MSI)、大规模集成(LSI)发展到超大规模集成(VLSI)、特大规模集成(ULSI),每个芯片已可以集成数亿个以上的晶体管。微电子技术的飞速发展推动了社会信息化的发展,反过来,社会信息化的进一步需求又促使微电子技术在设计技术和制造技术方面不断地进步。

1.1 系统及系统集成

一个完整的电子信息系统应该能够及时地捕捉信息、处理信息、传递信息。那么,信息是什么呢?显然,信息除了自然界的物理量,还包含了需求,包含了方法,包含了信息处理系统设计者的知识甚至是文化。VLSI 系统根据信息和人们需要解决的问题,采用电子信息处理方式对信息进行感知和处理,将广义的信息转换成狭义的电子信息并进行处理。

信息和信息处理可以是链式的,也可以是并发的。对于并发信息与信息处理需要更大规模的硬件来实现。对于大多数的并发处理机制其局部体系通常还是以串行方式工作。目前大部分的 VLSI 系统信息及信息处理是链式的,但并发的或称为平行的处理模式是一个重要的发展方向。

1.1.1 信息链

通常的链式信息处理机制是和信息链的结构密切相关的,图 1.1 给出了一个信息链及其处理模块的关联图。

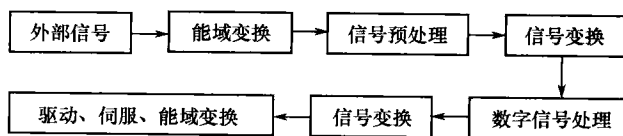


图 1.1 信息链及其处理模块关联图

外部信号主要是自然界的各种物理量,包括电、热、磁、声、光以及各种机械力等,它们属于不同能域的物理量;能域变换主要是将这些不同能域的物理量转换成电学量,以便统一的进行进一步处理;由能域变换单元得到的电信号通常是比较微弱的模拟信号,这些信号要经过预处理模块进行放大或选择,使之成为具有一定幅度并且稳定可靠的信号;接下来是进行信号的变换,将模拟小信号变成满足信号处理要求的数字信号。对于收到的外部信号所代表的信息需要通过一定的方法进行判断与处理,这些方法通常是一些算法,而算法既可以由硬件来实现,也可以由软件来实现。但不论是硬件实现的算法或是软件实现的算法,目前只能是数字信号

形式,因此,必须将外部的信号变换成可用的数字信号;因为输出的信息经常需要以大小、强弱、速度等模拟量进行表示,也常常需要以热、力、磁、声、光等信号形式进行表示,所以,数字信号处理的结果还需要进行转换,将数字信号再变为模拟信号,以满足对外输出的要求;最终,通过驱动、伺服或能域变换单元输出经过处理的信息。

以上是对于一般的信号链及其相关处理模块的介绍。根据这样的信号或信息关系,VLSI系统被大致分为了几大模块:感知信息模块;电信号处理与变换模块;算法模块;输出处理模块。

当今的 VLSI 系统主要是集成在硅材料基片之上的,为了能够实现工艺的兼容和设计的兼容,要求以上的这些模块都以硅及硅微加工技术为基础,所有的设计、加工、封装都必须在这个基础上进行。

1.1.2 模块与硬件

1. 感知信息模块

传感器是感知信息的一类器件,在 VLSI 中的传感器主要有半导体传感器和微机电(MEMS)传感器。

传感器的基本功能是完成不同能域的信号转换,所以,有时也将传感器称为换能器。在电子系统中主要是将非电量的信号转换为电量的信号。例如,将压力信号转换为电阻的变化,将湿度信号转换为电容的变化,将光强信号转换为电流的变化,等等。从设计角度看,这属于传感器设计范畴。

VLSI 中的半导体传感器主要工作原理是基于半导体的材料特性,例如硅的热学特性,PN 结的温度特性、光伏特性,硅的压阻特性等,可以利用的半导体材料除了单晶硅外,还可以是多晶硅,还可以是其他与工艺兼容的硅合金材料,可以是体硅材料,也可以是薄膜材料。例如,普通的 PN 结具有负的温度系数,即随着温度升高,PN 结的正向导通阈值会下降,可以利用 PN 结的这个特性进行环境温度传感。

微机电(MEMS)传感器则可以采用运动部件来进行传感。MEMS 是 Micro Electro Mechanical System 的缩写,它并不是宏观上的机电系统,而是利用微电子或其他非机械微加工技术实现的,具有特定功能的多能域工作的微型系统。MEMS 器件有别于一般微电子器件的重要特征是可以具有运动部件和可以多能域工作,但这并不表示 MEMS 器件一定是可动的。MEMS 传感器有许多种形式和结构,这里列举两个 MEMS 传感器来介绍:第一个例子是应用于汽车安全气囊中的加速度传感器。该传感器中有一个可以运动的质量块,当然,这个质量块非常轻,只有几毫克到十几毫克。当汽车平稳运动时,加速度很小,传感器中的质量块不发生相对运动或运动很小,但当汽车发生突然事故时,产生了很大的加速度(实际上是负的加速度),质量块由于惯性发生相对于基片的较大的运动,结构产生较大的位移并将这种变化转变为电量,如电阻或电容的变化,由此传感加速度的变化。加速度传感器将力学量转变成了电学量。第二个例子是 MEMS 风速计,设计的基本原理可以通过检测风在单位时间内所带走的热量来传感。传感器中并没有可以运动的部件,它有一个被架空的发热元件,例如一个电阻条,被架空是为了减小热量对衬底的传递以提高敏感精度。在发热元件的两边各有一组感温元件。当没有风的时候,由发热元件所建立的热场使两边的感温元件得到相同的热量。当具有一定速度的风吹过的时候,热场的均衡被破坏,两边的感温元件可以检测出这种变化,显然,风速越大,带走的热量越多,两边的温度越失衡。两边这种温度的变化被转换成电压的变化,

由此感知风速。

2. 电信号处理与变换模块

通常的电信号处理与变换模块完成模拟信号的放大或者是调制信号的检出、模拟信号到数字信号的转换(ADC)、数字信号到模拟信号的转换(DAC)、信号的调制等。主要内容属于模拟集成电路的设计范畴。

从传感器来的信号通常都比较微弱或者噪声很大,因此,电信号处理电路必须解决微弱信号放大或滤噪。但是,因为在整个系统中,算法模块部分占有了主要的和重要的位置,它占用了 VLSI 系统的大部分资源,同时,因为以数字部分为主,模拟电路必须与数字部分工艺兼容,因此,VLSI 系统中的模拟信号放大部分实际上是比较简单的电路,但必须满足信号放大指标的要求。滤噪可以通过算法部分实现,这也部分地减轻了模拟电路的设计难度。

为克服 VLSI 系统中模拟电路的设计难度,使传感信号能够被有效检出,有时利用传感器的电量去调制载波。例如,传感器电量是以电容变化表现的,则可以采用调制振荡器频率的方式来传递信号,算法部分通过判读频率并进行处理,由此判断外部信号的意义。例如,在某些湿度传感器应用中,湿度改变了电容介质的介电常数,从而引起电容量的变化,而该电容决定了多谐振荡器的 RC 时间常数,当振荡器在规定时间内输出的方波个数被读取后,可以计算得到电容发生了多大的变化并进而得到湿度的大小。

ADC 完成将模拟信号变换为数字信号,DAC 则实现将数字信号转换成模拟信号。因为 VLSI 系统大部分采用 MOS 工艺实现,所以,DAC 和 ADC 也常采用权电容或电荷分配方式工作,在高速信号处理方面则采用并行变换和过采样技术。

信号调制也是一种常用的变换形式,根据需要,可以将模拟信号调制到一个载波上。例如,一个报警系统,传感器感知了突发事件,处理模块判断了事件类型或性质,系统以电话通信方式远程传送信息。这时,需要将信息调制到电话系统所能够支持的传送模式,例如双音频方式。

3. 算法模块

毫无疑问,目前的算法模块以数字方式进行工作。它对应了数字硬件和算法软件或软硬协作。

微处理器的出现实现了用软件控制算术逻辑单元(ALU)完成算术运算和逻辑操作,将单一的硬件模块 ALU 变成为可以实现一系列功能的可复用的逻辑模块,在软件(实际上是控制码)的控制下,ALU 或成为加法器,或成为逻辑门,等等。硬件乘法器的出现解决了用普通 ALU 进行乘法操作的长运算问题,使得一段软件代码变成一个操作步骤,在单指令周期或双指令周期内完成两个几十位的二进制数的乘操作。从这个例子,我们可以看到软件和硬件在完成特定工作中各有优势,因此,算法模块的设计需要综合考虑资源与效率的需求。

经典的逻辑设计技术在 VLSI 系统中得到了优化与提升。随着系统复杂程度的大大提高,传统的设计技术已不能满足 VLSI 系统的要求。

首先是描述方式,逻辑图、电路原理图的描述方式对 VLSI 系统已变的越来越困难,硬件描述语言(HDL)被用于了设计描述,目前的 HDL 既可以描述数字逻辑系统,也可以支持模拟电路的描述,具有代表性的 HDL 是 VHDL 和 VerilogHDL。

其次是设计方法,这里来看一个系统行为的描述,图 1.2 给出了一个普通的系统行为描述图。

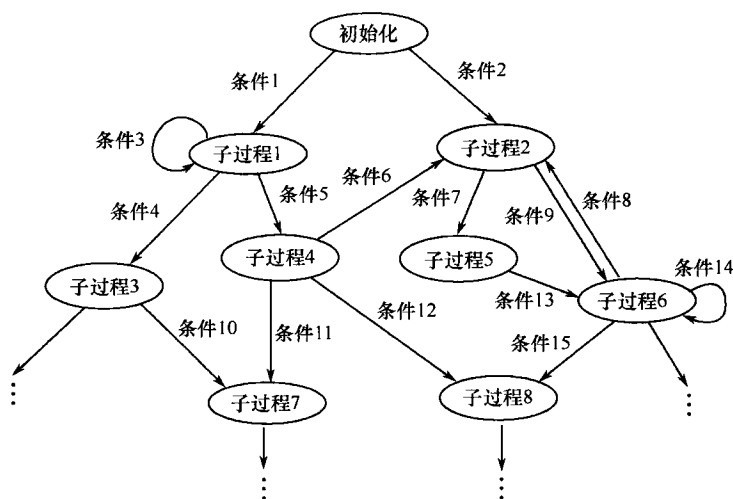


图 1.2 系统行为描述

将这个系统进一步的分解,对其中的每一个子过程再进行描述,如图 1.3 所示。

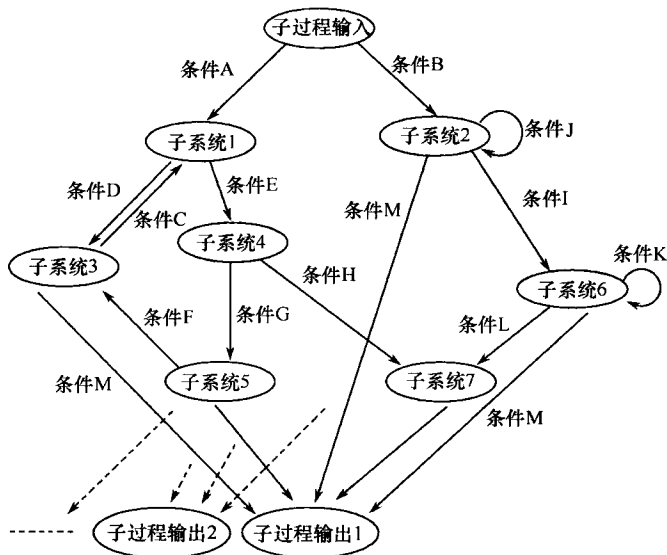


图 1.3 子过程描述

显然,在这一步我们看到过程已经与子系统发生了联系,再进一步对子系统进行描述,得到图 1.4 所示的状态转换图。

从上面三个不同层次的描述可以看到,其非常像算法流程的描述,只不过这里没有具体描述每一个环节的具体行为。对这样的系统可以采用类似于软件的方式进行调试,可以采用模拟器对系统进行初步的验证。当调试验证通过后可以采用设计工具,例如综合工具,将行为描述“变成”为硬件。所谓的综合,是将行为描述与具体的硬件库或 IP(Intellectual Property)库相结合,直接生成硬件层的设计。目前,硬件库和 IP 库的单元设计仍采用了传统的设计方法。借助于这些设计工具和底层硬件单元,VLSI 系统设计被实现。为了能够提高设计效率,算法部分设计通常采用简单、规则、可重复或可重构的基本结构。

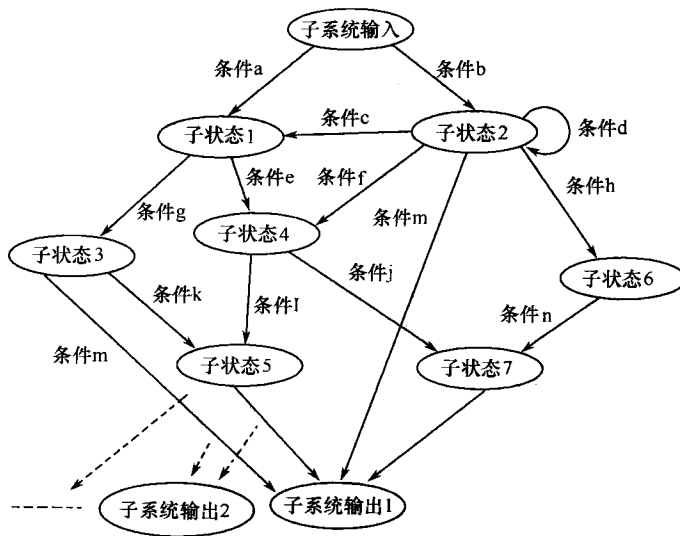


图 1.4 子系统描述

4. 输出处理模块

输出处理模块的任务是根据信息输出的需要,将信息转换成一定的输出形式或直接完成某些动作。例如,产生一定幅度的高压,产生某额度的电流,产生某些显示所规定的序列,甚至产生某些机械动作,等等。

我们来看一个例子:系统自带的液晶显示(LCD)驱动(假设尺寸为 4×34)。这样的 LCD 驱动器包括一个控制器,一个电压发生器,4 个公共(common)信号输出端口,34 个图段(segment)信号输出端口。要求有两种偏压模式($1/3$ 和 $1/2$ 偏压)和三种占空比模式($1/4$, $1/3$ 和 $1/2$ 占空比),它们都是可编程的。LCD RAM 是一个输入/输出双口 RAM,它不需要过程控制,能自动将数据传送到 segment 输出。因此,除了需要设计相应的 RAM 单元、控制器单元、还需要设计专门的电压产生电路,图 1.5 给出了 $1/4$ 占空比, $1/3$ 偏压($V_{DD}=3.0V$, $V_1=4.5V$, $V_2=1.5V$, $GND=0V$)要求下的波形图。从图上可以看到,电压产生电路需要在单电源 $3V$ 下产生 $4.5V$ 和 $1.5V$ 的电压。

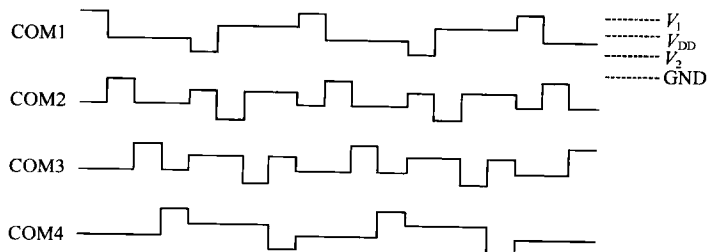


图 1.5 COM_i 的波形要求

显然,这样的功能电路设计需要了解液晶显示的原理,了解如何控制液晶对应像素(或笔画)被点亮的原理,了解扫描控制的原理等知识。

以上所介绍的内容在一个特定的 VLSI 中并不一定都存在,例如,一般的微处理器的输入信息是数字信号,没有前后的相关模块。这里只是从一般信息链的角度进行了讨论,具体系统

的组成应根据具体要求来组织。

从信息链的结构我们可以得到具体的设计分类,甚至可以具体到电路或逻辑设计。从上面的分析可以看到,根据具体的问题,当分析了信息链结构后,实际上已将一个信息描述问题分解为具体的硬件类型划分,继续分解或分析后又可以得到更具体的设计问题。这样的过程体现了一个由顶向下逐级分解直至可以有效设计的过程。

1.1.3 系统集成

所谓系统集成是指将系统所包括的模块单元集成到一个硅衬底材料(芯片)上。由于工艺限制,目前也有采用两片或三片芯片通过封装技术将其做成一个封装体的方法。

我们来看两个硅集成系统的示例。

图 1.6 显示的是一个采用 ARM8 为核的可重构数字信号处理器芯片。

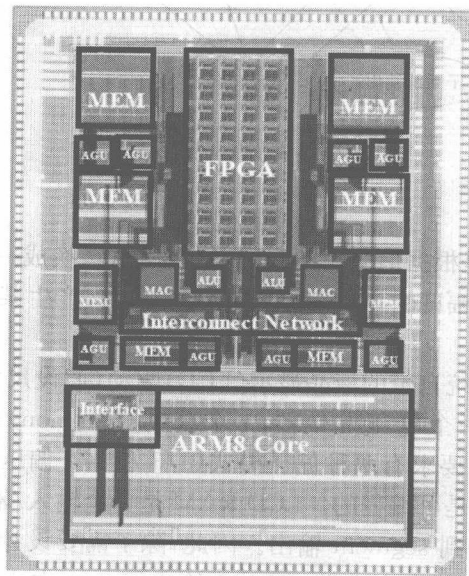


图 1.6 系统集成示例 1

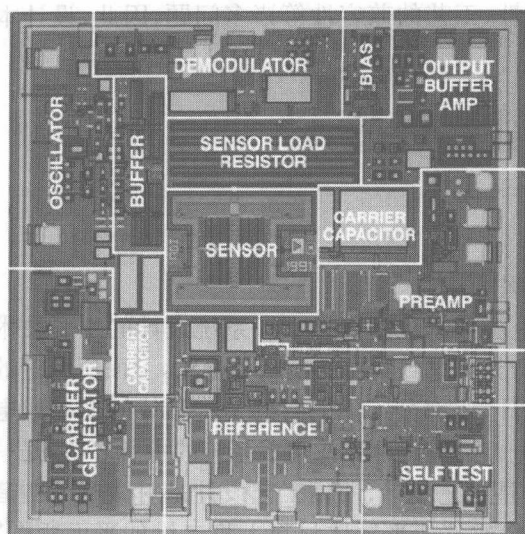
参考: Marlene Wan; Design Methodology for Low Power Heterogeneous Reconfigurable Digital Signal Processors, University of California at Berkeley

从芯片上可以看到,该芯片具有一个先进的 ARM 核,这是一个精简指令系统(RISC)的处理器核,以此核为中心,集成了 FPGA 模块、接口模块、ALU 模块、存储器,等等。采用 $0.25\mu\text{m}$ 、6 层金属布线的 CMOS 工艺,集成了约 120 万个晶体管,芯片面积 $5.2\text{mm} \times 6.7\text{mm}$,低电源供电。

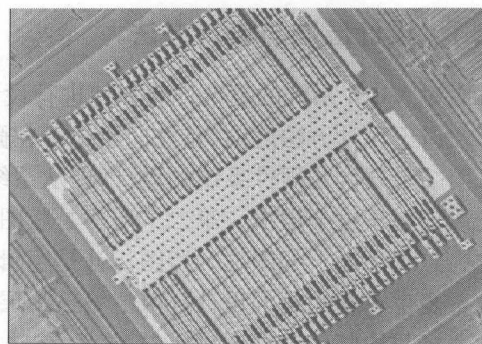
图 1.7 显示的是 ADI 公司(Analog Devices, Inc.)的一个用于汽车安全气囊的加速度传感器芯片 ADXL—50。

图 1.7(a)显示的是整个芯片的照片,芯片尺寸约为 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$, (b)图显示的是在该芯片中集成的 MEMS 部件, (c)图则给出了该芯片的电原理图。

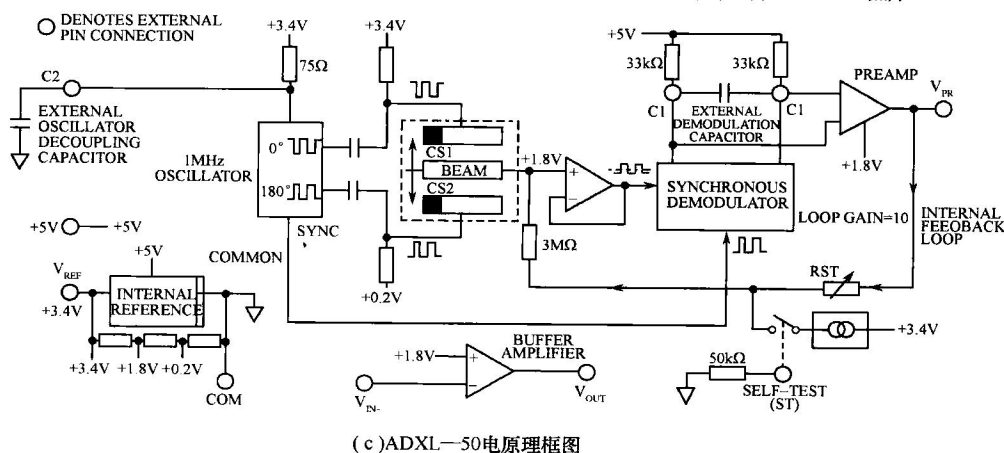
这个芯片和传统的集成电路芯片的最大不同就是其中集成了 MEMS 结构。该结构是一块可以运动的硅材料,悬浮在硅衬底之上约 $2\mu\text{m}$,其部分点被固定在衬底上,而大部分其他区域可以运动。在(c)图上可以看到一个用虚线框起来的结构,中间的一个标注为“BEAM”的极



(a) ADXL-50芯片照片



(b) 芯片中SENSOR照片



(c) ADXL-50电原理框图

图 1.7 系统集成示例 2

参考: Jack W Judy: Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications, SMART MATERIALS AND STRUCTURES

板正是表示了这个可以运动的部分,它与上下的两个极板形成了两个电容器。当中间极板未运动时,这两个电容器的大小相等,当中间极板由于某种原因偏离了平衡位置,两个电容器的大小发生了变化。在电容器的上下极板上各施加了一个大小相等、相位相差 180° 的脉冲信号,平衡时中间极板保持固定的电位。当中间极板偏离了平衡位置,则在中间极板上就得到了变化的脉冲,偏移量越大,脉冲的幅度也越大,即脉冲信号的幅度反映了位置偏移的大小,而脉冲信号的相位则反映了位移的方向。被检出的这个脉冲信号经后面电路的处理,输出有用的加速度信息。

从(a)图显示的芯片照片和(c)图给出的电路结构,可以看到在该芯片中集成了 MEMS 结构、脉冲信号发生器、电压跟随器、解调电路、前置放大器电路和缓冲放大器电路等多种电路部件。

从上面两个硅集成系统可以看出,VLSI 系统将是一个复杂的集成系统,除了每个模块的