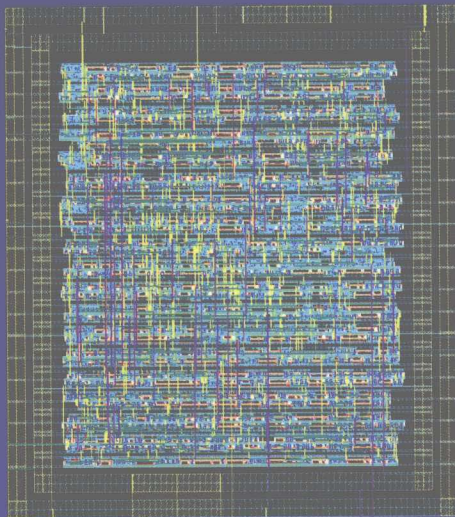


微电子与集成电路技术丛书

国家集成电路人才培养基地专家指导委员会组编



Asynchronous Circuits Design

异步电路设计

陈虹 张晓昱 编著

Chen Hong Zhang Xiaoyu

陈弘毅 主审

Chen Hongyi

清华大学出版社



微电子与集成电路技术丛书

国家集成电路人才培养基地专家指导委员会组编

Asynchronous Circuits Design

异步电路设计

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

随着集成电路技术进入深亚微米时代,同步电路越来越难以满足实际应用中低功耗高速等要求。异步电路没有时钟,具有功耗低、速度快、兼容性好和可靠性高等优点,越来越受到设计者的青睐。

本书第1、2章介绍异步电路中的基本概念和基本单元,第3章解释流水线操作和环操作。第4章介绍异步电路的一些量化性能参数及其定义,并举例进行性能分析。第5章举例说明功能模块实现的原理和技术。第6章介绍当前国内外的异步电路研究成果。第7章介绍几个典型的设计实例,并给出设计分析方法及实现。第8章介绍异步电路设计语言——Balsa语言及设计流程。

本书可以作为电子、通信类专业高年级本科生或研究生的教材,也可以作为电路设计工程师的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

异步电路设计/陈虹,张骁昱编著. —北京:清华大学出版社,2010.11
(微电子与集成电路技术丛书)

ISBN 978-7-302-23502-6

I. ①异… II. ①陈… ②张… III. ①电路设计 IV. ①TM02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 157177 号

责任编辑:文 怡

责任校对:李建庄

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62795954,jsjic@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015,zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:11 字 数:265千字

版 次:2010年11月第1版 印 次:2010年11月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:29.00元

产品编号:035667-01

《微电子与集成电路技术丛书》 编审委员会

顾问

丁文武(国家工业和信息化部)
叶甜春(中国科学院)
冯记春(国家科技部)
邬江兴(解放军信息工程大学)
严晓浪(浙江大学)
张尧学(教育部)
郝跃(西安电子科技大学)
潘建岳(新思科技)

王阳元(北京大学)
包为民(中国航天科技集团公司)
吴德馨(中国科学院)
许居衍(华晶集团)
李志坚(清华大学)
郑南宁(西安交通大学)
侯朝焕(中国科学院)
魏少军(清华大学)

主任

王志华(清华大学)

副主任

张兴(北京大学)
洪先龙(清华大学)
董在望(清华大学)

陈弘毅(清华大学)
姚素英(天津大学)

审稿委员

张建人(清华大学)
张大成(北京大学)
闵应骅(中国科学院)
徐秋霞(中国科学院)
赵元富(航天 772 研究所)
李斌桥(天津大学)

边计年(清华大学)
高明伦(南京大学)
刘章发(北京交通大学)
陈贵灿(西安交通大学)
吉利久(北京大学)
曾晓洋(复旦大学)

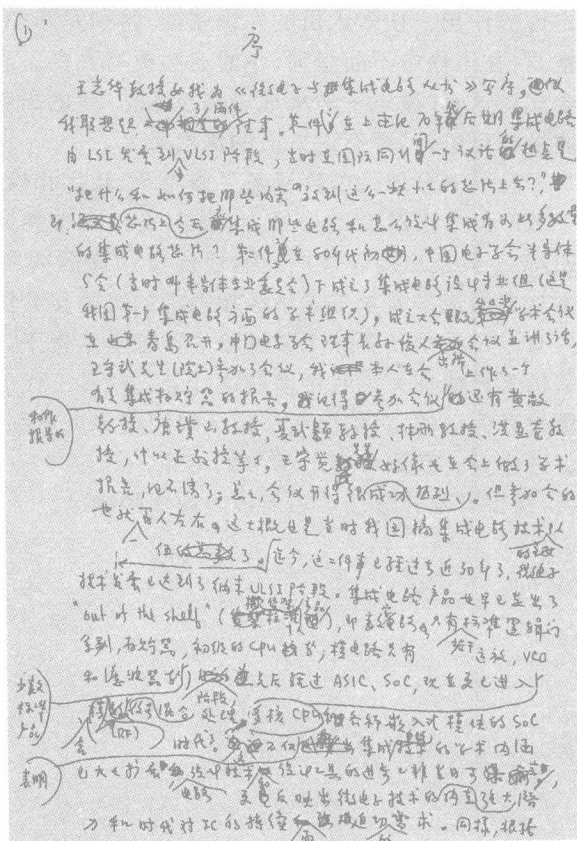
丛书秘书

朱秋玲(清华大学)

序一

王志华教授要我为《微电子与集成电路技术丛书》写序,使我联想起了两件往事。第一件:上世纪70年代后期,集成电路由LSI发展到VLSI阶段,当时在国际同行间一个讨论的热点是:“把什么内容和如何把这些内容放到这么一块小小的芯片上去?”即今后芯片上应集成哪些电路和怎么设计集成有如此多电路的芯片?第二件:在上世纪80年代初,中国电子学会半导体分会(当时叫半导体专业委员会)下成立了集成电路设计专业组(这是我国第一个集成电路方面的学术组织),成立大会暨第一次学术会议在青岛召开,中国电子学会理事长孙俊人出席会议并讲了话,王守武先生(院士)参加了会议,我本人在会上作了一个有关集成存储器的报告,参加会议和作报告的还有黄敞教授、唐璞山教授、夏武颖教授、林雨教授、洪先龙教授、叶以正教授等等,记得王守武先生也在会上作了学术报告。总之,会议开得很热烈、很成功。但参加会议的也就一百人左右,这大概也是当时我国搞集成电路技术的主要队伍。

迄今,这两件事已经过去近30年了,微电子技术已发展到了纳米 ULSI 阶段,集成电路产品也早已走出了 out of the shelf 的阶段,即数字电路只有若干标准逻辑门系列、存储器、初级的 CPU 等,模拟电路只有运放、VCO 和滤波器等少数标准产品的阶段,先后经过 ASIC、SOC,现今已进入了多核 CPU、含射频、模拟与混合信号处理和各种嵌入式模块的 SOC 时代了。这不仅表明集成电路技术的学术内涵已大大扩展,电路设计技术和设计工具的进步已非当日可比,更反映出微电子技术的强大内在潜力和时代对 IC 的持续而迫切的需求。同样,根据中国半导体行业协会企业名册,我国有规模的 IC 设计企业已达到一百几十家,由此估计从业人员应该以万计算了,技术上我们已能独立设计出诸如 3G 手机核心芯片、嵌入式和高性能的 CPU 以及高档的保密芯片等产品,这表明我国的集成电路设计产业

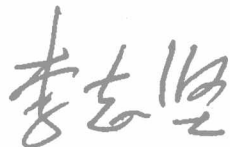


(李志坚院士为本丛书写的序言手稿)

和技术队伍也有了相应的很大进步。

微电子和集成电路是现代信息技术发展的基石,集成电路产业关系到国家的经济命脉、人民生活品质和国防与国家安全。作为现代主要高科技之一,集成电路技术方面的国际竞争十分激烈:谁的产品功能强、质量优、推出早、成本低,谁就占领主要市场,为胜者;谁落后一步,往往会被无情淘汰。夸大一些说,这一竞争往往是“只有第一,没有第二”。微电子和集成电路技术要求的基础知识十分广博,又与众多的高新技术相互交叉。集成电路产品更新换代极其迅速,产品从研制到投产周期日益缩短。这一切都决定了从业人员必须要有极高的业务素质,其中技术人员的基础知识、专业水平,特别是技术创新能力更有决定性的作用。技术人员的基础知识,特别是新知识的补充,越来越重要;不仅在学校学习很重要,在工作中不断学习、不断充实更有必要。我想,国家集成电路人才培养基地专家委员会支持这套“微电子与集成电路技术丛书”的出版,除了要达到提高在校学生专业课程教学质量的目的外,更有这方面的深层意义。

丛书各分册的内容涵盖了微电子、数字和模拟集成电路的基本原理和技术知识,还包括了RF和数模混合信号处理、嵌入式和高性能处理器、低功耗芯片设计、SoC设计方法学、EDA工具及应用等等广泛的现代专门课题内容。选题广阔、全面,符合与时俱进的精神。本丛书由清华大学王志华教授领衔的编委员会组织编写,各册编写者主要是工作在第一线具有一定教学和实际工作经验的年轻学术骨干,同时聘请了一批国内同行中的资深专家为审稿人严格把关。我相信在这样老、中、青三代业内人士的共同努力下,本丛书的内容和质量是有保证的,它的出版一定会对我国集成电路人才培养和现有科技人员素质的提升起到促进作用。我更希望本丛书的编审一定要十分重视学术上的严谨性,并期盼,经过不断完善,至少有部分分册今后能成为教学的精品。



2010年1月10日

序二

我曾经说过,每当我拿起笔为年轻学者出版一套丛书或一本书写序的时候,心中总是怀有特别的喜悦,因为这意味着辛勤耕耘后的丰硕收获,也意味着年轻的学者在进步与发展的道路上又迈出了新的一步,所以我总是乐意而为之。

自1958年TI公司的Jack S. Kilby和1959年仙童公司的Robert Noyce发明集成电路和硅平面集成电路以来,50年间,微电子和集成电路技术可谓发展神速,如同摩尔规律(Moore Law)所描述与预期的那样,按存储器算,集成度每18个月翻一番;就微处理器而言,集成度每两年翻一番;相应特征尺寸则缩小为上一技术节点的0.7。当前集成电路的集成度已从发明时的12个元件(2个晶体管、2个电容和8个电阻)发展到今天的数十亿个元件。集成电路功能日新月异,而成本迅速降低,微处理器上晶体管的价格每年平均下降约26%。2006年,Intel曾发表了一个很有意味的广告词:“现在一个晶体管的价格大约与报纸上一个印刷字母的价格相当”。这就是说,人们只要买得起报纸,就消费得起集成电路。正因为如此,集成电路已广泛渗透到国民经济、国家安全和人民生活的各个领域,其应用的深度和广度远远超过了其他技术,是当代信息社会发展的基石。信息是人类社会三大资源之一,而且是目前利用得最不充分的资源。信息的本质是物质运动过程中的特征,信息技术包括信息的获取、传输、处理、存储、显示和随动执行等一系列的环节,而集成电路从狭义上讲则集信息处理、传输、存储等于一个小小的芯片中;从广义上讲,集成系统芯片(System on Chip, SoC)则集成了上述诸方面功能于一个芯片上或一个封装内的若干芯片(SiP)中,而这种可靠性高、功耗低的芯片又可以大批量、低成本地生产出来,因而势必大大地提高人们处理信息和应用信息的能力,大大地提高社会信息化的程度。它已如同细胞组成人体一样,成为现代工农业、国防装备和家庭耐用消费品不可分割的组成部分。集成电路科学技术的水平和它的产业规模也就理所当然地成为衡量一个国家或地区综合实力的重要标志之一,成为一个具有战略性的基础产业和高新科学技术领域。在过去的50年,在人类科学技术发展的沧海横流中,集成电路已经并正在不断显示其英雄本色。在人类社会步入信息化时代后,特别是在我国走“工业化带动信息化、信息化促进工业化”的具有中国特色的新型工业化道路中,在市场需求和国家中长期科学规划重大专项投入的双重促进下,我国集成电路科技和产业必将得到更多的发展机遇,带来更多的创新。

现代社会的科技竞争,包括微电子与集成电路技术的竞争,归根到底是人才的竞争。得人才者得天下,集人心者集大成,希望在人才。培育人才最重要的工作在于教育,只要人类社会存在,教育就是永恒的主题;只要人的生命存在,学习就是不竭的任务。不管是学校教育还是在实践基础上的自学进修都需要教材或称之为教本,所谓“教本、教本,乃教学之本”。

集成电路不是直接与消费者见面的最终产品,因而系统应用是使集成电路产生巨大增值的关键环节,而设计是微电子技术和集成电路产业链中最接近应用、也就是最接近市场的

领域,具有巨大的创新与市场空间。50年来集成电路的发展史是需求牵引和科学发现、技术发明推动相结合的历史,是一部技术创新和机制创新的历史。需求牵引往往由市场和系统应用提出,而设计首先就需要面对这种新的需求。一个好的算法、标准和设计往往可以引领市场的发展,为微电子和集成电路开拓一个崭新的领域。因此,“微电子与集成电路技术丛书”首批启动就将重点放在与设计相关的专业课程是十分恰当的。

《微电子与集成电路技术丛书》由国家集成电路人才培养基地专家委员会主持编写,第一批启动16册,第二批将再启动10余册,其内容涵盖了微电子及集成电路领域的主要范畴,尤以设计为主体。由年轻的学科带头人、清华大学王志华教授领衔丛书编委会,参加编写的有30多位年轻的学科带头人和学术骨干,这反映了我国年轻一代学者正在茁壮成长。同时,丛书还邀请了一批治学严谨的年长一代科学家和学者担任审稿工作,在这些学者的名单中我看到了在上世纪80年代就曾共事过的如洪先龙教授、吉利久教授、张建人教授等老朋友。我坚信:由年轻学者执笔,由年长一代科学家把关,丛书学术内容的新颖性和严谨性就一定能得到可靠的保证。

这套丛书特别适合于微电子与集成电路专业高年级本科生、研究生阅读,也适合相关领域的工程技术人员作为参考书。我相信,阅读本丛书的学生和科技人员必将受益匪浅。



2010年1月5日于北京大学

序三

有一个古老的中国寓言,说的是一个年轻的读书人看到一位仙翁用手指点一下石头,石头就能变成金砖,这是成语“点石成金”的来源。多年后的今天,人们常常只关注到那腐朽化神奇的“一点”而忘了故事寓意中最重要的一环,即练得此法术的方法和为此所需要付出的数十年的功德和修为。自1995年我从业以来,就一直惊叹微电子及集成电路是一个多么像“点石成金”的行业,而同时又是一个多么讲究方法、多么需要付出艰苦努力的领域!

多年来我和我在 Synopsys 公司的同事们一起在国内推广基于逻辑综合的自顶向下的集成电路设计方法,经历了逆向设计解剖版图的初始阶段,那时全国设计业产值不过上亿元人民币、设计企业不过数十家、从业人员以百十计,而现在,中国大陆已是全球最大的集成电路市场、全国设计业产值超过300亿(依然是方兴未艾)、设计企业超过500家、从业人员数以万计;从那时开设集成电路设计课程并装备集成电路设计工具环境的寥寥几所高校,到目前19所院校建有集成电路工程特色专业、20个(含在建)集成电路人才培养基地、约40个大学招收集成电路工程硕士、近50个大学(所、系)配置了我公司的IC设计工具的大学计划包。这真是个天翻地覆的变化。IC设计是个智力密集型、创新密集型的行业。没有高素质、实践型的人才和人才培养支撑体系,就没有持续发展的可能。人才依然是我们发展过程中遇到的最大瓶颈之一,我们仍然感到缺少一套系统化的、覆盖该领域最新技术的微电子及集成电路教材。公司总部有一个教材指导委员会(Curriculum Advisory Board),他们基于多年的研究积累,针对本科生和研究生主持开发了一套微电子及集成电路课程体系,当我了解到相应的教学课程内容后,便立即想到如果以此为参考帮助国内开发一套微电子及集成电路领域的教材和参考书,应该是非常有意义的。此想法得到了时任国家集成电路人才培养基地专家委员会主任委员浙江大学严晓浪教授和委员会副主任委员清华大学王志华教授的赞同,也得到了 Synopsys 公司全球总裁陈志宽博士的积极支持。一年多后的今天,我们终于见到了这套丛书第一批16本的面世!这是主编王志华教授和30多位编审者们辛勤劳动的成果,也要感谢李志坚院士、王阳元院士这样德高望重的多位业界前辈对丛书编著选题的把握、对方向的关注、对内容的裁夺等。我也非常高兴我的同事和我的公司在这件事情上面所作的微薄贡献。

一直以来,参与并推动中国集成电路产业的腾飞是我们的梦想。回望过去,中国每一天都在进步,中国集成电路产业每一年都在成长。世界范围内产业的大迁移、国内市场需求的强劲拉动、有利的产业政策和创业环境,正带给中国集成电路产业发展最佳的契机。而人才

培养是最重要的环节和基础,是漫长的付出和努力、是艰辛的孕育和耕耘、是由量变到质变的积累,直到腾飞前的化蛹成蝶。在老中青几代人的共同努力下,相信在不久的将来我们的行业一定会创造出一座座的金山、一定会拥有一大批“点石成金”手!“长风破浪会有时,直挂云帆济沧海”。我由衷地希望这套丛书的出版可以帮助实现我们共同的心愿,并殷切期待丛书下一批十多本著作的尽早面世!



2009年12月于北京

主编序言

潘建岳先生和我是清华校友,一直以来,他和他的同仁对国内集成电路行业的发展给予了极大的关注和支持。2007年初,时任 Synopsys 中国区总裁的潘建岳先生提出,将 Synopsys 公司教材指导委员会(Curriculum Advisory Board)主持开发的课程体系和一套以 IC 设计为主的教学课件赠送给国家集成电路人才培养基地专家委员会,期望对国内集成电路设计人才培养特别是教材建设有所帮助。当时,教育部和科技部已经批准在 20 所大学建立(含筹建)集成电路人才培养基地,国务院学位办已经批准在约 40 个大学招收集成电路工程领域的工程类硕士研究生,教育部也于 2007 年已经批准在 19 所院校建设微电子学专业集成电路领域的特色本科专业建设。除此之外,电子科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术等学科的高层次人才,也都需要具备集成电路知识。受潘建岳先生的建议及赠送的材料的启发,集成电路人才培养基地专家委员决定编写《微电子与集成电路技术丛书》并委托我担任主编。

为做好丛书的编写工作,潘建岳先生和我一起专门拜访了王阳元院士,请求指导和支持。王阳元院士是我国杰出的教育家和科学家,为我国微电子事业的创立和发展做出了不可磨灭的功绩。得知我们计划编写一套《微电子与集成电路技术丛书》之后,王院士除了表示支持之外,还特别叮嘱我们关心图书的内容和质量。丛书要为读者提供完整的知识体系,提供正确和准确的技术内容,对于飞速发展和变化的微电子和集成电路领域,要力求反映最新的技术进展。但图书的价值,不仅体现在当前最新知识的传播上,在图书的技术内容过时之后,书籍依然承载着历史和文化的价值。

担任主编工作后我一直有一种忐忑不安的心情,主要是感到自己不足以把握日新月异的集成电路知识,更没有勇气面对王阳元院士讲的书籍的历史文化价值的承载作用。作为国家集成电路人才培养基地专家委员会中的一员,在诸多年高德劭的前辈的指派下,我诚惶诚恐地承担了 this 任务。

我们邀请了国内在微电子和集成电路领域第一线工作的年轻学术骨干参加丛书编写。他们不但具有相当丰富的教学经验,而且活跃在相关科学研究的前沿,其中还有部分教师参加过国家集成电路人才培养基地专家委员会和国家外国专家局支持的技术培训。他们的知识、经验和奉献精神,是本丛书面世的基础;我们同时聘请了一批国内同行中的资深专家参加丛书编委会,他们除了为图书选题、内容取舍出谋划策之外,还作为审稿人对图书的技术内容、讲述方法甚至语言文字严格把关。他们的工作,不仅保证了图书编写质量,而且是对国内微电子和集成电路领域年轻才俊的大力扶持和帮助。感谢这些知识渊博、德高望重的前辈。感谢教育部高等教育司、科技部高新技术及产业化司、原信息产业部电子产品司的领导对图书编写和出版的支持,他们对教育、科技发展以及微电子行业需求的深入了解,使丛书的编写得以适应行业的需求。感谢浙江大学严晓浪教授,他作为国家集成电路人才培养

基地专家委员会的主任委员,始终关心和指导着丛书编写的各个环节。

现在,《微电子与集成电路技术丛书》第一批 16 种图书终于面世了!本丛书内容涵盖了微电子、数字和模拟集成电路的基本原理和技术知识,还包括了射频电路设计、数模混合信号处理、嵌入式和高性能处理器、低功耗芯片设计、SoC 设计方法学、EDA 工具及应用等广泛的现代专门课题内容。我们期望丛书不辜负微电子和集成电路领域专家的期望,以全面的选题、丰富的内容、准确的知识、科学的表述传播微电子和集成电路领域的知识,满足我国集成电路领域人才培养的需求。如果该丛书能为我国微电子和集成电路领域的科技发展作出点滴贡献,功劳属于图书的编写者以及为图书的面世贡献了力量的众多无名英雄。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '王震' (Wang Zhen), written in a cursive style.

2009 年 11 月于北京清华园

前言

当前,大部分的数字电路都是同步的。同步电路作为主导设计方法,其成熟的 EDA 工具几乎覆盖了整个大规模数字集成电路设计流程,从高层次语言描述到一个完整的芯片版图只需极少的人工干预。但是,随着集成电路技术的发展,芯片对功耗和速度的要求越来越高,同步电路越来越难以满足实际应用的要求。特别是随着片上系统(system on a chip, SoC)的出现,全局同步时钟的实现已越来越困难;同时,由于时钟导致的功耗问题也令设计者束手无策。

异步电路始于 20 世纪 50 年代,它没有全局时钟,具有功耗低、速度快、兼容性好和可靠性高等优点。但是由于同步电路足以满足当时应用的需求,直到 20 世纪 90 年代异步电路才重新引起学术界和工业界的关注。异步电路也具有一些缺点:对信号毛刺敏感、握手控制过程需产生额外的电路开销、缺乏成熟的 EDA 设计工具以及性能分析和优化困难等。不过,在实际的电路设计过程中,设计者一般会同时采用异步电路和同步电路设计技术,两种设计技术取长补短,从而满足电路的实际需求。

虽然异步电路设计技术越来越受到设计者青睐,但是大部分人对此技术不是很熟悉。并且,目前关于异步电路设计的中文图书非常有限。基于此,编者结合实际的经验以及目前的一些异步电路书籍(如经典的异步电路英文书: *Principles of Asynchronous Circuits Design—A System Perspective*)和大量已发表的文献编写了本书。希望读者在阅读本书的过程中能深入浅出地理解异步电路并能独立设计出异步电路。

本书内容安排如下:第 1 章概述了同步电路和异步电路的特点及异步电路的发展概况。第 2 章介绍异步电路中的基本概念和电路,从握手协议、数据编码方式和延时模型三个方面对异步电路进行分类,然后介绍异步电路的基本单元:C 单元。第 3 章从类似同步电路设计的“寄存器传输级”来分析异步电路设计,解释流水线操作和环操作。第 4 章介绍异步电路的一些量化性能参数及其定义,然后举例对异步电路进行性能分析。第 5 章研究各种握手部件的实现,而且举例说明功能模块实现的原理和技术。第 6 章介绍当前国内外的异步电路研究成果。第 7 章主要介绍几个典型的设计实例,并给出相应的异步电路设计分析方法及其实现。第 8 章详细介绍异步电路设计语言——Balsa 语言及设计流程。

本书的完成得到了芯慧同用公司的大力支持,在此特别感谢芯慧同用技术总监罗晋先生以及罗晏女士。感谢研究生高丽江同学的工作,感谢清华大学微电子所陈弘毅老师对此书的指点。

由于水平有限,不足之处敬请读者批评指正!不胜感谢!

陈虹 张晓昱

2010 年 9 月于北京

目录

第 1 章 概述	1
1.1 同步电路和异步电路的特点	1
1.1.1 同步电路的问题	1
1.1.2 异步电路的优势与问题	2
1.2 时钟和握手 ^[1]	4
1.3 异步电路设计的发展概况	6
1.4 章节介绍	7
第 2 章 异步电路分类和 C 单元	8
2.1 握手协议	8
2.1.1 四相位握手协议	8
2.1.2 两相位握手协议	8
2.2 数据编码方式 ^[10]	9
2.2.1 单轨编码	9
2.2.2 双轨编码	9
2.2.3 1/4 编码	10
2.3 延迟模型	10
2.3.1 速度无关电路	11
2.3.2 延迟不敏感电路	11
2.3.3 准延迟不敏感电路	11
2.4 C 单元	12
2.5 Muller 流水线 ^[1]	13
2.6 电路实现风格 ^[1]	14
2.6.1 捆绑数据协议	15
2.6.2 两相位握手协议	15
2.6.3 四相位捆绑数据	16
2.6.4 两相位捆绑数据(微流水线)	17
2.6.5 四相位双轨流水线	18
2.7 总结	19
第 3 章 静态数据流结构	20
3.1 概述 ^[1]	20

3.2	基本单元	21
3.3	基本单元应用	23
3.3.1	异步电路令牌流 ^[1]	23
3.3.2	时序电路 ^[1]	23
3.4	FOR、IF 和 WHILE 结构 ^[1]	25
3.5	最大公约数计算电路	26
3.6	其他电路设计介绍 ^[1]	27
3.6.1	低功耗滤波器组	27
3.6.2	异步微处理器	27
3.7	总结	28
第 4 章	异步流水线性能	29
4.1	引言	29
4.2	性能参数及分析	30
4.2.1	延迟、吞吐量和波长	30
4.2.2	FIFO 性能分析	32
4.2.3	一个 3 级环的性能分析	34
4.2.4	小结	35
4.3	流水线的依赖图分析 ^[1]	35
4.4	总结	37
第 5 章	异步电路实现	38
5.1	简介	38
5.2	基本单元结构	38
5.2.1	锁存器	38
5.2.2	流控制单元	39
5.2.3	功能模块 ^[1]	43
5.3	捆绑数据协议的功能模块	45
5.4	双轨功能模块	46
5.4.1	延迟不敏感的最小项综合	46
5.4.2	非传统逻辑	47
5.4.3	加法器的 CMOS 晶体管实现	48
5.4.4	Martin 的加法器	48
5.5	多协议功能模块	50
5.6	总结	51
第 6 章	国内外研究成果	52
6.1	概述	52
6.2	异步处理器	52

6.2.1	异步处理器的发展 ^[60]	52
6.2.2	异步开放代码 DLX 处理器(ASPIDA) ^[61]	55
6.2.3	异步 FPGA 处理器 ^[99]	56
6.3	异步数字信号处理(DSP)电路 ^[65]	58
6.4	异步通信电路	60
6.5	其他应用	61
6.6	异步电路设计研究现状	61
6.6.1	面向语法的行为级综合 ^[73]	61
6.6.2	基于 SystemC 的结构综合 ^[83]	64
6.6.3	异步组合电路网表优化 ^[84]	66
6.6.4	在亚阈值电路中采用异步电路设计技术 ^[87]	69
6.6.5	深亚微米 CMOS 电路的高容错异步电路设计 ^[88]	73
6.6.6	异步电路 FPGA 设计技术 ^[101]	81
6.7	小结	84
第 7 章	异步电路设计举例	85
7.1	概述	85
7.2	计数器	86
7.2.1	同步计数器	86
7.2.2	行波计数器	86
7.2.3	异步电路实现的计数器	87
7.2.4	更高阶的异步电路计数器——脉动计数器	93
7.3	CRC 模块	96
7.3.1	CRC 多项式	96
7.3.2	同步电路实现 CRC 编码	96
7.3.3	异步电路实现	97
7.4	基带模块	98
7.4.1	功能描述	98
7.4.2	同步电路实现方案	99
7.4.3	异步电路实现方案	101
7.5	其他例子	105
7.5.1	总数计数器(population counter) ^[1]	105
7.5.2	Balsa 移位器 ^[1]	107
7.5.3	判决器树 ^[1]	109
7.5.4	简单的 DMA 控制器 ^[1]	111
第 8 章	Balsa 语言介绍	122
8.1	概述	122
8.1.1	基础概念	123

8.1.2	工具集和设计流程	125
8.2	Balsa 语言的使用	126
8.2.1	单级缓冲器	126
8.2.2	双级缓冲器	128
8.2.3	并行设计和模块复用	129
8.2.4	多重结构设计	130
8.3	Balsa 的附属工具	131
8.3.1	生成 Makefile	131
8.3.2	面积估算	132
8.3.3	查看握手电路的示意图	132
8.3.4	仿真	132
8.4	Balsa 语言	135
8.4.1	数据类型	135
8.4.2	关于数据类型的说明	137
8.4.3	控制流程和相关命令	139
8.4.4	二元运算符和单目运算符	142
8.4.5	程序结构	142
8.4.6	通道选择	143
8.5	建立元件库	144
8.5.1	参数化描述	144
8.5.2	递归定义：一个 n 路复用器	145
	参考文献	148