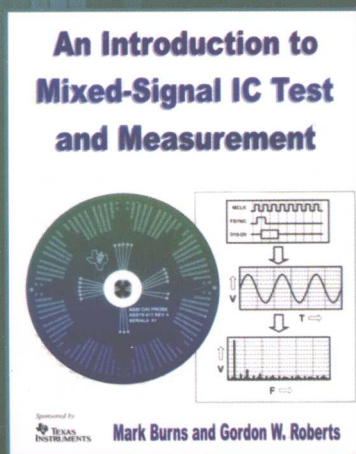


国外电子与通信教材系列

# 混合信号集成电路 测试与测量

An Introduction to Mixed-Signal IC Test and Measurement



[美] Mark Burns 著  
Gordon W. Roberts  
冯建华 肖钢 等译



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国外电子与通信教材系列

# 混合信号集成 电路测试与测量

An Introduction to  
Mixed-Signal IC Test and Measurement

[美] Mark Burns 等著  
Gordon W. Roberts

冯建华 肖 钢 等译

电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书详细介绍了模拟和混合信号集成电路测试和测量方法,是第一本有关全面系统地介绍混合信号集成电路测试的专著。该书是根据作者多年的科研成果和教学实践,结合国际上关注的最新研究热点并参考大量的文献撰写的。本书共为 16 章,内容包括混合信号测试概况、测试规范、直流和参数测量、测量精确性、测试仪硬件、采样理论、基于 DSP 的测试、模拟通道测试、采样通道测试、聚焦校准、DAC 测试、ADC 测试、DIB 设计、可测试性设计(DfT)、数据分析和测试经济学。

本书是面向电子工程的高年级本科生和研究生编写的,也可作为测试工程师的参考用书。本书要求读者具有模拟和数字电路、计算机编程、线性连续时间和离散时间系统、基本概率和统计概念、数字信号处理等基础知识。

Copyright © 2001 by Texas Instruments, Incorporated.

This translation of An Introduction to Mixed-Signal IC Test and Measurement, originally published in English in 2001, is published by arrangement with Oxford University Press, Inc., U. S. A.

Simplified Chinese translation edition Copyright © 2009 by Publishing House of Electronics Industry.

本书中文简体版专有出版权由美国 Oxford University Press 授权电子工业出版社。未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2007-0998

### 图书在版编目(CIP)数据

混合信号集成电路测试与测量/(美)伯恩斯(Burns, M.), (美)罗伯茨(Roberts, G. W.)著;冯建华,肖钢等译.

北京:电子工业出版社,2009.3

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:An Introduction to Mixed-Signal IC Test and Measurement

ISBN 978-7-121-08293-1

I. 混… II. ①伯…②罗…③冯…④肖… III. 混合集成电路-测试技术-教材 IV. TN450.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 020088 号

责任编辑:李秦华

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

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:787×1092 1/16 印张:34.25 字数:877 千字

印 次:2009 年 3 月第 1 次印刷

定 价:69.00 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 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

## 序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

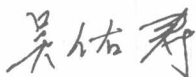
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授  
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

## 出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

## 教材出版委员会

主任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐 杨千里	北京邮电大学校长、教授、博士生导师 总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
委员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员 清华大学深圳研究生院副院长
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘 彩	中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长



## 译 者 序

随着集成电路工艺技术和设计水平的飞速发展,集成电路的各种模块(包括数字、存储器、模拟、混合信号和 RF 模块等)可集成到同一芯片上,称为系统芯片(SOC)。对于数字集成电路已经有了许多成熟的测试方法,并出版了大量有关数字电路测试和可测试性设计方面的教科书和专著。然而,对于模拟和混合信号电路,其测试方法还不够成熟,已经成为制约 SOC 测试的瓶颈,并且十分缺少有关模拟和混合信号测试方面的教科书和著作。Mark Burns 和 Gordon Roberts 两位教授合著的 *Introduction To Mixed-Signal IC Test and Measurement* 一书是第一本有关全面系统地介绍混合信号集成电路测试的专著,它的出版为广大在校学生和工程技术人员提供了一本很好地学习模拟和混合信号电路测试的参考书和教科书,所以我们和电子工业出版社联系决定将这本著作翻译出版,希望能对国内相关的技术人员有一定帮助。

全书共分为 16 章,第 1 章介绍了混合信号测试的概况。第 2 章介绍测试规范的制定。第 3 章介绍基本 DC 和参数测量。第 4 章介绍测量精度。第 5 章介绍混合信号 ATE 测试仪的结构。第 6 章介绍采样理论。第 7 章介绍基于 DSP 测试方法。第 8 章介绍模拟通道测试方法。第 9 章介绍采样通道测试方法。第 10 章介绍如何采用专用软件程序来改善 ATE 测试精度的聚焦校准方法。第 11 章介绍 DAC 测试方法。第 12 章介绍 ADC 测试方法。第 13 章介绍 DIB 设计技巧。第 14 章介绍模拟和混合信号可测试性设计(DfT)方法。第 15 章主要介绍基于统计分析和高斯分布的数据分析方法。第 16 章介绍生产测试的经济学。

本书反映了当今 VLSI 测试的研究现状和发展趋势,它是第一本全面覆盖混合信号集成电路测试的专著和教科书。本书可作为高等学校计算机、微电子、电子工程、无线电及自动控制、信号处理专业高年级学生和研究生的教材和参考书,也可供从事上述领域工作的科研人员参考,特别适合于从事 VLSI 电路设计和测试的工程技术人员使用。

全书由冯建华副教授主持翻译,肖钢高级工程师对书中部分章节进行了翻译和审校,北京大学微电子学系的博士和硕士研究生参与了初稿翻译工作,他们是林腾、任建国、王辉、张明东、朱立达、夏冰、刘乐、朱忠平、侯博威、孙孟军、李险峰、殷积磊等。

在本书的翻译出版过程中,北京大学微电子学系的各位领导和老师给予了我们多方面的关心、鼓励和帮助;电子工业出版社相关工作人员特别是李秦华老师、周宏敏老师、马岚老师等给予了全方位的配合与帮助。在此谨向为本书的翻译与出版付出辛勤劳动的各位老师、领导、同事、同学致以衷心的感谢。

由于译者水平所限,在翻译中难免有错误或不妥之处,真诚希望各位读者在阅读中发现错误时能及时指正。

另外,在本书出版之前,我们获得了原作者对本书一些错误的勘误,因此我们也在相应的地方进行了修改。

冯建华,肖钢

fengjh@ime.pku.edu.cn, xiaogang@bhtc.com.cn

2008 年 12 月

# 前 言

数字和模拟功能相结合的混合信号集成电路在半导体工业界变得越来越普及。目前复杂的数字电路通常与模拟电路组合,不断驱动电子系统向更大规模的器件集成。例如,复杂的微处理器通常与高性能模拟和混合信号电路结合形成“系统芯片”器件。这是数字信号处理器与精密的模/数和数/模功能集成到单个硅芯片上的单芯片调制解调器的例子。由于 SOC 器件可缩短芯片 - 芯片之间互连,使半导体消费者大大降低生产成本。

混合信号集成电路的测试和测量已经成为电子工程的相当专业领域。然而,与 IC 设计工程相比,测试工程还不太为人所熟知。聘用和培训新的工程师使他们成为熟练的混合信号测试工程师是相当困难的。为了使混合信号工程师积累足够的知识和经验,并且能够开发出合适的测试方法往往需要花费一到二年的时间。混合信号测试工程师漫长的学习过程主要是由于缺乏学习资料和大学未开设混合信号测试课程。虽然针对数字电路测试和可测试性方面已经出版了许多书籍,但是针对模拟和混合信号自动测试和测量方面的书还十分缺乏。

以往,混合信号测试工程师的训练从使用测试设备本身(不论好坏的训练课程)开始,几乎没有受过混合信号测试和测量的基础训练。这种以设备为中心的训练方法类似于教一个学生如何通过简单解释汽车本身的结构来开车(拉手刹、踩踏板等)。指派未受过适当训练的学生开车从洛杉矶到匹兹堡,没有路线图和详细的应用知识(如路信号灯和警察指挥),是不够明智的。同样,未经过基本测试定义和常规测试方法训练的入门测试工程师经常被指派去开发复杂电路的测试也是不明智的。

测试工程师也希望提供可测试性电路的定义结合到被测器件的设计中去。此外,关于混合信号可测试性设计(DfT)基础方面,也只有少量正式的参考资料或培训。结果,新入门的测试工程师往往忽视电路结构的基本缺陷,不能完整地和经济地测试器件。

本书是为了应对混合信号集成电路测试和测量的基础课程教材的缺乏而编写的。本书假设读者具有模拟和数字电路扎实的背景知识以及计算机和计算机编程知识。数字信号处理和统计分析的背景也是有帮助的,但不是绝对的。本书作为大学教材和新入门的专业测试工程师的参考手册都是非常有用的。像许多专业技术材料一样,在出版之前,本书可能在某种程度上来说已经过时了。但至少希望它成为 20 世纪如何进行混合信号集成电路测试的有趣的历史记载。

本书首要必备的初级课程是线性连续时间和分立时间系统,以及基本的概率和统计概念。幸运地是,这两门课程通常是大多数大学所要求的。

本书分为 16 章。第 1 章介绍混合信号测试的概况和为什么混合信号测试是必需的。第 2 章研究生成测试程序的过程,从器件数据文件、测试计划到测试代码。第 2 章还要讨论测试程序结构和功能性。第 3 章介绍基本 DC 测量定义,包括连接性、漏电、偏差、增益、DC 电源抑制比和许多其他类型的 DC 基本测量。

第 4 章包括绝对精度、分辨率、软件校准、标准可溯源性和测量重复性的基础。另外,第 4 章还介绍基本数据分析。第 15 章会对数据分析和统计分析做更全面的论述。



第5章用较短的篇幅论述一般混合信号 ATE 测试仪的结构。通常测试仪包括 DC 源、仪表、波形数字化仪、任意波形发生器,以及具有发送和俘获功能的数字向量生成器。

第6章介绍 ADC 和 DAC 的采样理论。DAC 采样理论可应用于被测器件的 DAC 电路和混合信号测试仪中任意波形发生器。ADC 采样理论可应用于被测器件的 ADC 电路和混合信号测试仪中数字化仪。相干多音采样集也作为基于 DSP 的测试进行介绍。

第7章进一步研究采样理论的概念和基于 DSP 的测试方法,它是许多混合信号测试和测量方法的核心。第6章和第7章包括 FFT 基础、窗口技术、频域滤波和其他基于 DSP 测试的基础。

第8章表明如何采用基于 DSP 测试方法经济地进行基本 AC 通道测试。这一章仅包括非采样通道,它由运放、模拟滤波器、PGA 和其他连续时间电路的组合组成。

第9章讨论在采样通道中许多相同的测试,包括 DAC、ADC、采样和保持(S/H)放大器等。

第10章解释如何采用专用软件程序改善 ATE 测试程序的基本精度。这个题目在正常 ATE 测试仪课程中不是必须讲授的,但是它在许多 DUT 性能参数的精确测量方面是非常重要的。

第11章讲述 DAC 测试。研究几种 DAC 结构,包括传统二进制加权、电阻阶梯、脉宽调制(PWM)和  $\Sigma - \Delta$  结构。讨论传统测量方法,如 INL、DNL 和绝对误差。研究几种 DAC 结构,着重讨论它们各自的缺点和通用的测试方法。

第12章在第11章建立的概念基础上说明通常是如何测试 ADC 的。研究几种不同类型的 ADC,包括二进制加权、双斜率、Flash、Semiflash 和  $\Sigma - \Delta$  结构。解释各种 ADC 设计的弱点以及探测它们弱点的常规方法。

第13章研究混合信号 DIB 设计的技巧。包括元件选择、电源线和地线布局、串扰、防护、传输线和测试仪负载。第13章也说明了几种常用的 DIB 电路和它们在混合信号测试方面的应用。

第14章主要介绍模拟和混合信号可测试性设计方法。混合信号 DIT 的结构方法比纯数字 DIT 少。说明更常用的专用(ad hoc)方法以及某些工业标准,如 IEEE Std. 1149.1 和 1149.4。

第15章主要回顾统计分析和高斯分布。这一章也表明如何分析测量的结果,采用各种软件工具和显示格式。讨论 Datalog 表、Shmoo 图和直方图。也解释统计工艺控制(SPC),包括工艺控制标准讨论,如  $C_p$  和  $C_{pk}$ 。

第16章研究生产测试的经济学。测试的经济学受许多因素影响,如设备购买价格、测试场地价格、测试时间、双头测试、多点测试和上市时间。测试工程师的调试技巧严重影响上市时间。第16章考察测试调试过程,企图为调试混合信号测试程序设置一些一般规则。最后,第16章给出了影响测试经济学和测试开发时间出现的趋势。这些趋势将构成混合信号测试和测量的未来课程。

本书整个手稿的初稿是由许多学生和测试工程师整理的。真心感谢给我们提出许多改正建议来完善这本书的专业人士和学生: Steve Lyons(Lucent Technologies/Teradyne, Inc.), Jim Larson 和 Gary Moraes(Teradyne, Inc.), Justin Ewing(Texas A&M 大学/ Texas Instruments, Inc.), Pramodchandran Variyam(Georgia Tech/ Texas Instruments, Inc.)和 Geoffrey Zhang(Texas Instruments, Inc.)。也要感谢 Juli Boman(Teradyne, Inc.)和 Ted Lundquist(Schlumberger Test Equipment)提供了第1章的图片。

我们还真诚感谢 Texas A&M 大学的 Rainer Fink 和 Jay Porter, Prairieview A&M 大学的 Cajetan Akujuobi 和 Arkansas 大学的 Simon Ang 博士,在编写本书时对我们的帮助。在这项工作开始的时候,他们帮助完成本书的内容并指出它的缺点。

我们十分感谢牛津大学出版社的职员,感谢在撰写本书的整个过程中,他们对我们的帮助和指导。首先,要感谢出版编辑 Peter Gordon 的帮助和建设性意见。感谢 Karen Shapiro 在编辑方面的帮助。

最后,测试工程专家 Mark Burns 向 Del Whittaker, David VanWinkle, Bob Schwartz, Ming Chiang, Brian Evans 和所有德州仪器公司(TI)的员工表示感谢,感谢他们允许他在过去三年里将耕耘此书作为工程师工作职责的一部分。对公司的管理层来说,决定在这样一个最终可能会提升竞争力的工作上投入人力物力是需要巨大的勇气和敏锐的洞察力的。Mark 还感谢他的父母, Burt 和 Shirley Burns,他们在经济和情感上的支持,帮助他度过了在麻省理工学院(MIT)的四年。

Gordon Roberts 感谢 McGill University 大学微电子和计算机系统(MACS)实验室的所有工作人员和研究生。感谢电子和计算机工程系的前任和现任主任 Nicholas Rumin 和 David Lowther 教授,最初为支持这个方案所给予的特殊关注,允许它在 McGill University 大学扎根和生长。他也要感谢他的朋友们的大量贡献,感谢他过去的研究生导师和现在的导师——Toronto University 大学的 Adel Sedra 教授,是 Sedra 教授将他带入微电子世界。最后,更重要的是, Gordon Roberts 表达他对他的最好的朋友和伙伴 Eileen O'Reilly 最诚挚的感谢,感谢他在本书整个写作过程中给予一如既往的支持和鼓励。

Mark Burns  
Texas Instruments, Inc.  
Dallas, Texas

Gordon W. Roberts,  
McGill University  
Montreal, Quebec, Canada

# 目 录

第 1 章 混合信号测试概况 .....	1
1.1 混合信号电路 .....	1
1.2 为什么要进行混合信号器件测试 .....	4
1.3 制造流程的后工艺 .....	8
1.4 测试和诊断设备 .....	9
1.5 新产品开发 .....	12
1.6 混合信号测试面临的挑战 .....	14
习题 .....	16
参考文献 .....	17
第 2 章 测试规范 .....	18
2.1 器件数据文件 .....	18
2.2 制定测试计划 .....	26
2.3 测试程序的组成 .....	29
2.4 小结 .....	33
习题 .....	34
参考文献 .....	34
第 3 章 直流和参数测试 .....	35
3.1 连接性 .....	35
3.2 漏电流 .....	39
3.3 电源电流 .....	40
3.4 DC 参考电压和调节器 .....	41
3.5 阻抗测量 .....	44
3.6 DC 偏移测量 .....	46
3.7 DC 增益测量 .....	50
3.8 DC 电源抑制比 .....	54
3.9 DC 共模抑制比 .....	55
3.10 比较器 DC 测试 .....	58
3.11 电压搜索方法 .....	60
3.12 数字电路的 DC 测试 .....	62
3.13 小结 .....	63
习题 .....	64
参考文献 .....	65

第 4 章 测量精度 .....	66
4.1 术语 .....	66
4.2 校准和检查 .....	70
4.3 测量误差的处理 .....	80
4.4 基本数据分析 .....	86
4.5 小结 .....	90
习题 .....	91
参考文献 .....	92
第 5 章 测试仪硬件 .....	93
5.1 混合信号测试仪概况 .....	93
5.2 DC 源 .....	93
5.3 数字子系统 .....	99
5.4 AC 源和测量 .....	105
5.5 时间测量系统 .....	107
5.6 计算硬件 .....	108
5.7 小结 .....	109
习题 .....	109
第 6 章 采样理论 .....	111
6.1 采用 DSP 进行模拟电路测量 .....	111
6.2 采样和重构 .....	111
6.3 重复采样集 .....	128
6.4 采样系统同步 .....	135
6.5 小结 .....	139
习题 .....	139
参考文献 .....	141
第 7 章 基于 DSP 的测试 .....	142
7.1 基于 DSP 测试的优点 .....	142
7.2 数字信号处理 .....	142
7.3 离散时间变换 .....	160
7.4 反向 FFT .....	172
7.5 小结 .....	180
附录 A.7.1 相干采样信号的傅里叶级数表达式 .....	180
习题 .....	182
参考文献 .....	185
第 8 章 模拟通道测试 .....	186
8.1 概述 .....	186
8.2 增益和电平测试 .....	188
8.3 相位测试 .....	203

8.4	失真测试	209
8.5	信号抑制测试	212
8.6	噪声测试	219
8.7	模拟通道测试的模拟	226
8.8	小结	230
	习题	230
	参考文献	233
<b>第 9 章</b>	<b>采样通道测试</b>	<b>234</b>
9.1	概述	234
9.2	采样考虑	238
9.3	编码和解码	252
9.4	采样通道测试	261
9.5	小结	272
	习题	273
	参考文献	275
<b>第 10 章</b>	<b>聚焦校准</b>	<b>276</b>
10.1	概述	276
10.2	直流校准	282
10.3	交流振幅校准	286
10.4	其他的交流校准	294
10.5	误差消除方法	298
10.6	小结	300
	习题	300
<b>第 11 章</b>	<b>DAC 测试</b>	<b>302</b>
11.1	转换器测试基础	302
11.2	基本 DC 测试	304
11.3	转换曲线测试	307
11.4	动态 DAC 测试	318
11.5	DAC 结构	322
11.6	通常 DAC 应用的测试	326
11.7	小结	328
	附录 A.11.1 DAC 特征化的 MATLAB 程序	328
	习题	333
	参考文献	335
<b>第 12 章</b>	<b>ADC 测试</b>	<b>336</b>
12.1	ADC 测试与 DAC 测试	336
12.2	ADC 代码边沿的测量	341
12.3	直流测试和转换曲线测试	351

12.4	动态 ADC 测试 .....	353
12.5	ADC 结构 .....	356
12.6	常规 ADC 应用的测试 .....	359
12.7	小结 .....	361
	习题 .....	361
	参考文献 .....	362
<b>第 13 章</b>	<b>DIB 设计 .....</b>	<b>364</b>
13.1	DIB 基础 .....	364
13.2	印制电路板 .....	366
13.3	DIB 引线、屏蔽和保护 .....	369
13.4	传输线 .....	380
13.5	接地和电源的分布 .....	387
13.6	DIB 组件 .....	392
13.7	常见的 DIB 电路 .....	399
13.8	常见的 DIB 错误 .....	407
13.9	小结 .....	409
附录 A.13.1	回顾:RC 和 RL 滤波器 .....	410
	习题 .....	411
	参考文献 .....	412
<b>第 14 章</b>	<b>可测试性设计 .....</b>	<b>413</b>
14.1	概述 .....	413
14.2	DfT 的优点 .....	414
14.3	数字扫描 .....	419
14.4	数字 BIST .....	423
14.5	混合信号电路的数字 DfT .....	425
14.6	混合信号边界扫描和 BIST .....	429
14.7	ad hoc 混合信号电路 DfT .....	432
14.8	精巧的模拟电路 DfT 形式 .....	442
14.9	$I_{DDQ}$ .....	444
14.10	小结 .....	445
附录 A.14.1	DfT 清单 .....	445
	习题 .....	447
	参考文献 .....	449
<b>第 15 章</b>	<b>数据分析 .....</b>	<b>451</b>
15.1	数据分析简介 .....	451
15.2	数据可视化工具 .....	451
15.3	统计分析 .....	458
15.4	统计过程控制 .....	474



15.5 小结 .....	479
习题 .....	479
参考文献 .....	483
<b>第 16 章 测试经济学 .....</b>	<b>484</b>
16.1 收益因素 .....	484
16.2 直接测试成本 .....	485
16.3 诊断技巧 .....	490
16.4 新的趋势 .....	495
16.5 小结 .....	498
习题 .....	499
参考文献 .....	500
部分习题答案 .....	502
术语表 .....	519

# 第 1 章 混合信号测试概况

## 1.1 混合信号电路

### 1.1.1 模拟、数字还是混合信号

在深入了解混合信号测试与测量的细节之前,人们可能会提出很多疑问。到底什么是混合信号电路?它们是如何应用在实际系统中的?为什么必须对其进行测试?测试工程师是什么样的一个角色,与设计及产品工程师有何区别?在公司里,针对混合信号测试工程师开设的培训课程大都假设他们在大学学习中已经知道了这些问题的答案。例如,在一个典型的自动测试仪(ATE)培训课程上,学员们会学习如何对测试仪里测量每个引脚漏电流的仪器进行编程,但是他们可能还不知道为什么必须测量漏电流?本书将会解答诸如此类的一些问题。什么是混合信号测试?什么时候,为什么进行混合信号测试?当然,如何进行混合信号测试?在此,我们先讨论一个基本的问题:什么是混合信号电路?

混合信号电路可以被定义成包括数字和模拟模块的电路。根据这个定义,比较器就是一个最简单的混合信号电路。它对两个模拟电压信号进行比较,判断哪一个更大。它的数字输出可取为两个状态,决定于比较的结果。实际上,比较器可认为是一位模数转换器(ADC)。可能有人认为一个简单的数字反相器就是一个混合信号电路,因为它的数字输入按照模拟电路的工作原理控制着模拟输出的电平、上升、下降、过冲、下冲等。实际上,在一些极高频的应用中,工程师是用混合信号测试的方法对数字电路的输出进行测试的<sup>[1]</sup>。

但是,一些混合信号专家可能会认为比较器和反相器根本就不是混合信号电路。比较器一般被认为是模拟电路,而反相器则被认为是数字电路(如图 1.1 所示)。有争议的混合信号电路的例子还有模拟开关和可编程增益放大器等。纯化论者可能认为混合信号电路只是那些包含了数字信号和模拟信号重要接口的器件。否则,器件就只能被认为是在同一个管芯或电路板上同时包含了数字和模拟电路而已。对于那些迂腐的学者,混合信号、模拟和数字电路之间的界线则并不十分清晰。

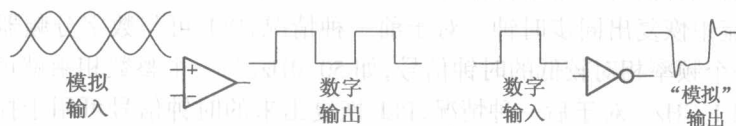


图 1.1 比较器和反相器——模拟、数字还是混合信号电路

幸运的是,从混合信号测试和测量的观点来看,混合信号、模拟和数字电路之间的界线清晰与否并没有任何影响。大多数混合信号器件中都包含了与数字电路没有任何关系的模拟电路。因此,深入学习混合信号测试时,必须要学习诸如运放电路、比较器、电平基准电路等纯模拟电路的测试。本书包括了模拟和混合信号电路的测试,也包括了一些介于它们之间的电路测试。而数字电路的测试只会稍微涉及,因为纯数字电路的测试在其他很多书中已经做了深入地探讨<sup>[2~4]</sup>。

### 1.1.2 模拟与混合信号电路的常见类型

模拟电路(也称为线性电路)包括运算放大器、有源(或无源)滤波器、比较器、电压调节器、模拟混频器、模拟开关,以及其他诸如霍尔效应晶体管之类的特殊功能电路。一个可认为是混合信号电路的简单例子就是模拟开关。在这个电路中,MOS晶体管的电阻受数字信号的控制可为高阻或低阻。关断状态的电阻可为兆欧量级(甚至更高),而开启状态下的电阻仅为百欧量级(甚至更小)。可以通过不同的方式将大量的模拟开关连接形成更为复杂的电路,如模拟多路复用器和多路分解器,以及模拟开关阵列等。

另一个混合信号电路的简单例子就是可编程增益放大器(PGA)。PGA经常用于混合信号电路的前端以允许输入幅值范围较大的信号。在数字信号的控制下,当输入信号较小时,PGA具有较大的增益;而当输入信号较大时,PGA的增益则比较小。这样,PGA的下级电路就可以得到大小基本一致的输入信号。而很多电路都希望输入信号的大小基本一致以获得最佳的性能特性。因此这些电路的性能得益于PGA的应用。

PGA和模拟开关都只是实现了模拟和数字电路之间的简单对接,这也是它们经常不被认为是混合信号电路的原因之一。最常见的真正混合信号电路是模数转换器(A/D或ADC)和数模转换器(D/A或DAC)。A/D和ADC的缩写形式在电子工业界内是通用的,但是考虑到一致性,本书中将使用ADC作为模数转换器的缩写形式。同样,本书中将一直使用DAC而不是D/A作为数模转换器的缩写形式。ADC是一个在某些特定时刻对连续模拟信号进行采样,并将采样得到的电压或电流值转化成数字编码形式的电路。每一个数字编码值被称为是一个采样值。相反,DAC则是将数字采样值转化成模拟电压或电流信号的电路。在复杂的混合信号电路中,ADC和DAC是十分常见的模块,因为它们构成了物理世界和数字逻辑世界的接口。

对DAC和ADC的全面测试包含很多内容,因为ADC和DAC有很多种不同的设计方案,而针对这些设计方案的测试技术也是多种多样的。例如,一个每秒仅采样一次的ADC可能采用双斜率转化结构,而应用于视频信号处理的采样频率100 MHz的ADC则可能不得不采用更快的存储转化结构。这两种结构的弱点是完全不同的。因此,针对这两种结构的ADC测试方案也完全不同。对于不同结构的DAC也同样存在类似的情况。

另一种常见的混合信号电路是锁相环(PLL)。PLL通常用于产生一个高频的参考时钟或者从异步的数据流中恢复出同步时钟。对于前一种情况,PLL可与数字分频器组成一个频率乘法器。这样,一个频率相对较低的时钟信号,如50 MHz,与一个整数相乘就可产生一个高频的主时钟信号,如1 GHz。对于后一种情况,PLL恢复出来的时钟信号可用于控制数据流中每一位或每一字节的锁存。同样,对于不同的设计方案和具体应用,PLL的弱点和测试要求也是各不相同的。

### 1.1.3 混合信号电路的应用

许多混合信号电路包括了放大器、滤波器、开关、ADC、DAC和其他的专用模拟和数字功能电路的组合。几乎所有的终端应用,如蜂窝式电话、硬盘驱动电路、调制解调器、发动机控制器、多媒体视频音频产品等,都包含了复杂的混合信号电路。与分立的复杂信号器件测试一样,在系统级进行测试也是十分重要的。系统级测试可以保证各个分立器件组成一个整体时