

CCiD

Testing and Evaluation Technology for Intelligent Manufacturing

智能制造测试与评价技术丛书

FPGA软件 测试与评价技术

中国电子信息产业发展研究院 | 编著

Testing and Evaluation Technology for FPGA

FPGA是在PAL、GAL、CPLD等可编程器件的基础上进一步发展的产物

主要从顶层设计、模块分层、逻辑实现、软硬件调试等方面开发



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

FPGA软件 测试与评价技术

Testing and Evaluation Technology for FPGA

中国电子信息产业发展研究院 | 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

FPGA软件测试与评价技术 / 中国电子信息产业发展
研究院编著. — 北京 : 人民邮电出版社, 2017. 2
(智能制造测试与评价技术丛书)
ISBN 978-7-115-44863-7

I. ①F… II. ①中… III. ①可编程序逻辑器件—软
件开发—程序测试 IV. ①TP332.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第029873号

内 容 提 要

本书主要介绍了业内主流FPGA的结构及特点,基于开发流程,介绍了各种测试工具、第三方仿真工具,主要内容包括FPGA开发流程,FPGA软件测试标准、模型和方法,FPGA测试过程中要使用的工具,FPGA软件测试实例分析,以及FPGA软件测试过程与管理。

本书适合广大从事FPGA测试相关工作的技术人员,以及对测试感兴趣的学生和电子爱好者阅读参考。

-
- ◆ 编 著 中国电子信息产业发展研究院
责任编辑 杨 凌
责任编辑 彭志环
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
 - ◆ 开本: 700×1000 1/16
印张: 24.75 2017年2月第1版
字数: 409千字 2017年2月河北第1次印刷
-

定价: 99.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316
反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京东工商广字第8052号

丛书序言

在蒸汽机出现后的短短 200 多年间，工业文明所缔造的社会财富，远远超过过去数千年的总和。它是人类文明的精华，又创造了更璀璨的文明。这个世界从来没有像今天这样繁荣、昌盛和强大，但也从没有像今天这样迷茫和脆弱。能源危机、生态危机、金融危机、经济危机已在不断告诫人们历经三次革命的工业体系需要新的变革。工业改变世界，谁在改变工业？

进入 21 世纪以来，新一轮科技革命和产业变革正在孕育兴起，全球科技创新呈现出新的发展态势和特征。以智能制造为核心，信息技术、生物技术、新材料技术、新能源技术广泛渗透，带动几乎所有领域都发生了以数字化、网络化、智能化、绿色化、服务化为特征的群体性技术革命，这是新一轮的工业革命。

在新一轮的工业革命浪潮中，无论是德国的“工业 4.0”、美国的“工业互联网”，还是日本提出的发展战略，都是在突出本国技术优势的基础上，力争抢占世界制造业的制高点。由于各国科技与工业发展的优势和基础不同，智能制造呈现出各自不同的特点。美国作为世界互联网的发源地，正在使用其强大的信息技术，提出了以信息物理系统（CPS）为主要特征的智能制造。德国依靠工业的厚重根基，提出了“工业 4.0”的技术解决方案。日本始终不遗地坚持贯彻精益生产的理念。中国制定了符合我国情况的发展战略——“中国制造 2025”，积极推动“互联网+”行动，破解制造业发展存在的若干问题，这是强国之策、利民之举！


智能制造是用人工智能技术解决制造的问题。摆在我们面前的问题，第一是要解决做什么，第二是解决怎么做。

做什么？《中国制造 2025》给出了行动纲领，它吸取了美国、德国、日本的所长，又结合了中国的特点，聚焦在五大工程——创新体系工程、智能制造工程、绿色制造工程、工业强基工程、高端装备工程。其中把智能制造工程作为主攻方向，以使我们的制造业由大变强。《中国制造 2025》明确要聚焦新一代信息技术产业、高档数控机床和机器人、航空航天装备、海洋工程装备及高技术船舶、先进轨道交通装备、节能与新能源汽车、电力装备、农机装备、新材料、生物医药及高性能医疗器械十大重点领域。

怎么做？习近平总书记强调，实施创新驱动发展战略，最根本的是要增强自主创新能力，最关键的是要把核心技术和关键技术牢牢掌握在自己手中，最重要的是要坚定不移地走中国特色自主创新道路。在日趋激烈的全球综合国力竞争中，我们没有更多选择，非走自主创新道路不可。

本书在当前发展智能制造为迫切任务之时，应时推出，给出了智能制造的基本概念及主要内容介绍，为广大读者作向导，实为难得。尤其本书聚焦智能制造关键应用的测试与评价技术，有望为智能制造提出一套建设参考标准和规范，更是智能制造规范发展的重要工作。丛书由中国电子信息产业发展研究院卢山院长和黄子河副院长牵头，研究院及中国软件评测中心四十多位一线有丰富检测评估经验的专家和技术人员参与了本套丛书的撰写工作。目前该丛书已经完成《智能制造测试与评价概论》《工业控制系统测试与评价技术》《工业机器人测试和评价技术》《智能网联汽车测试与评价技术》《工业大数据测试与评价技术》及《FPGA 软件测试与评价技术》的编写工作。尽管可能有些人对书中的一些具体概念、提法、重点把握及技术细节会有不同的看法，但我认为，一方面，学术需要争论，另一方面，我们会通过智能制造的实践与发展逐步走向共识和更正确、更深刻。智能制造与制造业的产品和服务一样，需要高质量实施。因此，这一套丛书在我国是先行的、引领性的、有重要价值的。相信本书能为中国制造从数量到质量，从制造到智造发挥重要作用。

中国工程院院士



2017年2月20日于西安交通大学

《FPGA 软件测试与评价技术》

编 委 会

编 委（按姓氏笔画排序）：

卢 山 刘法旺 陈淦萍 杨苗苗 张辉 范兆霞

罗文兵 姚振智 高焯扬 陶新昕 黄子河

前 言

近年来，FPGA (Field Programmable Gate Array, 现场可编程门阵列) 作为现场可编程器件，由于其设计开发灵活、可靠性高，可以方便地实现各种数字电路功能（如 FFT 算法功能、通信功能等）及部分软件功能（如控制功能、校验和功能等），已被广泛应用于通信、医疗、工业控制、汽车电子、航空、航天等民用及军用领域，并发挥着重要作用。

在民用领域，我国探月工程中的嫦娥三号卫星的大量关键功能（如有效载荷系统）是由可编程逻辑器件实现的，其上的可编程逻辑器件的数量已经大大超过了软件的数量，载人航天工程中的神舟八号飞船的控制单元、数据处理等系统同样是由可编程逻辑器件设计实现的。在军用领域，可编程逻辑器件已被大量应用于制导控制系统、导引系统、动力系统、电气系统等系统中。中控机数 / 模转换控制、开关控制、雷达脉冲压缩控制、发动机数字综合控制器控制、底层通信等大量关键功能，部分型号中可编程逻辑器件的数量甚至已经超过了软件的数量。

正是基于 FPGA 的上述广泛应用，FPGA 产品的质量也越来越受到大家的关注和重视，国际上多个空间大国在 FPGA 技术研究与应用、标准制定与推广等方面都取得了重要成果，已形成一系列标准和规范。同时，我国在 FPGA 研究方面也已经开展了部分工作，并取得了一定的研究进展。但针对 FPGA 产品测试的有关研究，目前我国尚处于初级阶段，相关文献和专业论述也比较少。作者通过查阅众多 FPGA 研发、测试相关书籍及资料，并结合自身部分项目实

施经验，编写了《FPGA 软件测试与评价技术》一书，并编入《智能制造测试与评价技术丛书》中。

本书以 FPGA 测试与评价技术为主线，共分为 6 章。

第 1 章简要介绍了 FPGA 的发展历史、工作原理、主流 FPGA 生产厂家及其产品等，并通过介绍近年来各领域中 FPGA 的应用来阐述 FPGA 测试的意义及必要性。

第 2 章主要以 ISE 软件为实例简要介绍了 FPGA 开发流程，通过了解 FPGA 的开发流程来进一步了解 FPGA 软件的结构，并为后续的测试奠定基础。

第 3 章从测试标准和测试模型的角度对 FPGA 产品的主要测试内容进行分析 and 阐述，并在第 4 章中根据 FPGA 的测试特点分别介绍了几款专业的测试工具。

第 5 章主要结合 FPGA 产品实例，详细分析了 FPGA 产品的测试内容及测试方法，通过直观的感受引导读者准确地把握测试的整个过程，并在第 6 章中对 FPGA 产品测试的整体流程和过程管理方法进行了介绍。

限于时间、条件与水平，本书还存在需要进一步完善与提高的地方，衷心希望广大读者与各界人士给予批评指正。

作者

2016 年 10 月于北京

目 录

第1章 FPGA软件概述	1
1.1 FPGA 概述	1
1.1.1 FPGA 的发展历程	2
1.1.2 FPGA 的工作原理	8
1.1.3 FPGA 的生产厂家及其产品	14
1.1.4 FPGA 软件在各领域的地位与重要意义	82
1.2 FPGA 软件结构分析	86
1.2.1 FPGA 的设计结构	87
1.2.2 FPGA 芯片的内部结构	88
1.3 本章小结	94
第2章 FPGA的开发流程	95
2.1 ISE 软件综述	96
2.1.1 ISE 软件的特点	96
2.1.2 ISE 软件的工具及功能简介	97
2.2 开发流程	103
2.2.1 需求分析	103
2.2.2 器件选型	104

2.2.3	设计输入	106
2.2.4	约束	109
2.2.5	功能性仿真	116
2.2.6	综合	117
2.2.7	实现	150
2.2.8	后仿真	157
2.2.9	配置及固化	157
2.3	本章小结	162

第3章 FPGA 软件测试标准、模型和方法 163

3.1	FPGA 测试标准	163
3.1.1	DO-254 标准	163
3.1.2	IEC 61508	166
3.1.3	ECSS 标准	167
3.2	FPGA 测试模型	168
3.2.1	V 模型	168
3.2.2	FPGA 中 V 模型的缺点	171
3.2.3	具有 FPGA 特点的 W 模型	171
3.3	FPGA 测试方法与内容	173
3.3.1	编码规则检查	173
3.3.2	跨时钟域分析	182
3.3.3	静态时序分析	187
3.3.4	仿真测试	206
3.3.5	覆盖率分析	224
3.4	本章小结	228

第4章 FPGA 软件测试工具 229

4.1	编码规则检查工具	229
-----	----------	-----

4.1.1	LEDA	230
4.1.2	HDL Designer	231
4.1.3	ALINT	232
4.2	静态时序分析工具	235
4.2.1	PrimeTime 的特点和功能	235
4.2.2	PrimeTime 的使用	236
4.3	跨时钟域分析工具	246
4.3.1	CDC 的特点和功能	246
4.3.2	CDC 的使用	248
4.4	功能仿真工具	256
4.4.1	ModelSIM	257
4.4.2	VCS	266
4.5	本章小结	270
第 5 章	FPGA 软件测试实例分析	271
5.1	代码测试	271
5.1.1	代码测试内容	271
5.1.2	代码测试实例	277
5.2	逻辑测试	297
5.2.1	逻辑测试内容	298
5.2.2	逻辑测试实例	298
5.3	静态分析	302
5.3.1	静态分析内容	302
5.3.2	静态分析实例	303
5.4	仿真测试	320
5.4.1	仿真实例内容	320
5.4.2	仿真测试实例	320
5.5	本章小结	332

第6章	FPGA软件测试过程与管理	333
6.1	FPGA 软件测试过程	333
6.1.1	测试需求分析阶段	334
6.1.2	测试设计阶段	338
6.1.3	测试执行阶段	342
6.1.4	测试总结阶段	343
6.2	FPGA 软件测试管理	344
6.2.1	配置管理	345
6.2.2	组织与人员管理	349
6.2.3	时间管理	358
6.2.4	质量管理	362
6.2.5	风险管理	369
6.3	本章小结	382
	参考文献	383



Chapter 1 第 1 章

FPGA 软件概述

随着 FPGA 设计工艺的日新月异，FPGA 的成本越来越低，并且越来越多地被应用在各个领域。由于 FPGA 的设计越来越复杂，越来越多的产品需要在设计投入生产之前进行功能验证，因此验证变得尤为重要。但要做好验证，首先要了解 FPGA 的结构及原理。本章将介绍 FPGA 的发展历程、工作原理以及 FPGA 的生产厂家及产品，最后介绍了 FPGA 软件在各领域的地位与重要作用。

1.1 FPGA概述

FPGA 是英文 Field Programmable Gate Array 的缩写，即现场可编程门阵列，它是在 PAL、GAL、CPLD 等可编程器件的基础上进一步发展的产物。FPGA 是作为专用集成电路（ASIC）领域中的一种半定制电路而出现的，既解决了定制电路的不足，又克服了原有可编程器件门电路数有限的缺点。它是当今数字系统设计的主要硬件平台，其主要特点就是完全由用户通过软件进行配置和编程，从而完成某种特定的功能，且可以反复擦写。在修改和升级时，不需额外地改变 PCB 电路板，只是在计算机上修改和更新程序，使硬件设计

工作成为软件开发工作，既缩短了系统设计的周期，又提高了实现的灵活性，并降低了成本。

1.1.1 FPGA的发展历程

FPGA 不是凭空产生的，它是技术不断革新的成果，是在晶体管、SRAM、PAL、CPLD、ASIC 等技术的基础上发展起来的。图 1-1 给出了 FPGA 的发展历程。

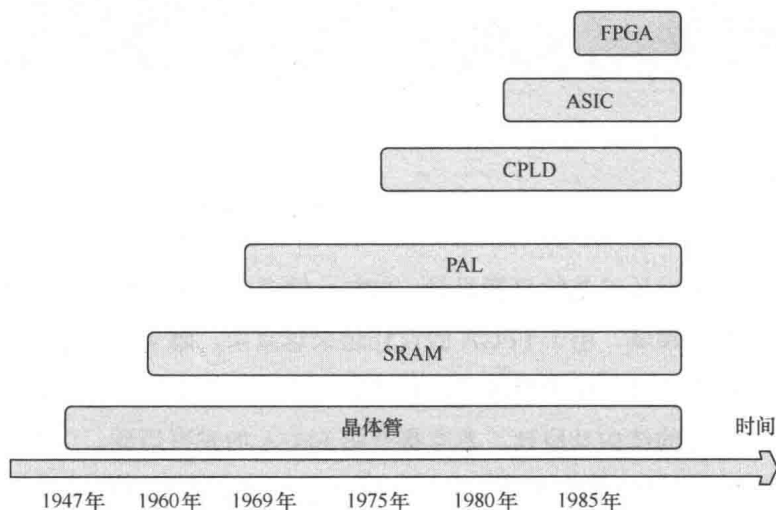


图 1-1 FPGA 发展历程图

1. 晶体管

1947 年 12 月 23 日，在美国新泽西州的贝尔实验室诞生了第一个晶体管。它的出现，使得我们能够使用体积非常小、消耗非常低的电子元件来代替当时体积庞大、功耗大的电子管。直到 1950 年，一种更加复杂的，被称为双极型晶体管的器件诞生了。相比第一个晶体管，双极型晶体管具有更高的可靠性，制造更为容易，造价也更为低廉，这一点非常重要，因为现在任何一个集成电路都是由成百上千，甚至百万的晶体管构成，所以一个晶体管性能的提高对集成电路整体性能的提升具有巨大的影响。

1962 年，在美国新泽西州的普林斯顿微电子研究所，金属氧化物半导体场效应晶体管诞生了，这就是我们俗称的 MOSFET，简称 FET，它具有更小的尺寸、

更廉价的制造成本、更低的功耗。

晶体管是构成可编程逻辑器件的原材料，好比沙子、泥土和房子的关系，但是却没有砖头和房子的关系那么直接，在由晶体管构成可编程逻辑器件中充当砖头角色的就是门电路。而门电路的构成可以分为两种：对于双极型晶体管，如果以特定方式将它们相连，就可以形成晶体管—晶体管逻辑门，简称 TTL；对于金属氧化物半导体场效应晶体管，由 NMOS 与 PMOS 以互补方式就可以构成我们所熟知的互补金属氧化物半导体，简称 CMOS。虽然不同的晶体管构成的逻辑门不一样，但是功能是一致的，区别在于：用 CMOS 实现的逻辑门比用 TTL 实现的速度要慢一些，但是 CMOS 逻辑门具有静态功率低、占用面积小的优势，这也是采用 TTL 实现还是 CMOS 实现的集成电路的区别。

技术或事物总是朝着由简至繁的方向发展的，仅仅依靠这些逻辑门做的事情还是非常有限的。在从晶体管发展到可编程逻辑器件 PROM 的过程中，还有这么一个环节，就是集成电路的形成。最初的晶体管是独立封装在一个小金属外壳中作为分立元件提供的，后来人们开始觉得把整个电路的制造放在一个半导体里是个好主意。

2. SRAM/DRAM与微处理器

1970 年 Intel 宣布第一个 1024 位 DRAM 诞生，与此同时，Fairchild 公司也开发了第一个 256 位的 SRAM。

一年后的 1971 年，Intel 公司开发了世界上第一个微处理器 4004，是由 Marcian“Ted”Hoff、Stan Mazor 和 Federico Faggin 设想并开发的。它也被称为“片上计算机”，4004 包含有大约 2300 个晶体管，每秒可以执行 60 000 次操作。实际上，尽管 4004 被大多数文献记录为第一个微处理器，但存在争议。1968 年 2 月，International Research Corporation 开发了一种他们称为“片上计算机”的体系结构。并且在 1970 年 12 月，4004 面世的一年前，一个名叫 Gilbert Hyatt 的人申请了名为“单片集成电路计算机体系结构”的专利（关于这个专利的争论一直持续到现在）。不管争执的结果如何，但事实上，4004 是第一个在物理上实现的、投入市场并且实际应用的微处理器。

3. PAL/GAL

PAL(Programmable Array Logic, 可编程阵列逻辑)是 20 世纪 70 年代末由 MMI 公司率先推出的一种低密度一次性可编程逻辑器件,是第一个具有典型实际意义的可编程逻辑器件(Programmable Logic Device, PLD)。它采用双极型工艺制作,熔丝编程方式。PAL 在 EDA 中是指一种现场可编程的门阵列逻辑器件,内部电路是在 PLA 的基础上进行改进的。

PAL/GAL 是早期可编程逻辑器件的发展形式,其特点是大多基于 E²CMOS 工艺,结构较为简单,可编程逻辑单元多为与 / 或阵列,可编程单元密度较低,仅能适用于某些简单的数字逻辑电路。虽然 PAL/GAL 密度较低,但是它们一出现即以其低功耗、低成本、高可靠性、软件可编程、可重复更改等特点引发了数字电路领域的巨大震动。虽然目前较为复杂的逻辑电路一般使用 CPLD 甚至 FPGA 去完成,但是对于很多简单的数字逻辑,GAL 等简单的可编程逻辑器件仍然被大量使用。

PAL 器件由可编程的与逻辑阵列、固定的或逻辑阵列和输出电路三部分组成。通过对与逻辑阵列编程可以获得不同形式的组合逻辑函数。另外,在有些型号的 PAL 器件中,输出电路中设置有触发器和从触发器输出到与逻辑阵列的反馈线,利用这种 PAL 器件还可以很方便地构成各种时序逻辑电路。

4. CPLD

CPLD(Complex Programmable Logic Device, 复杂可编程逻辑器件)主要是由可编程逻辑宏单元(Macro Cell, MC)围绕中心的可编程互联矩阵单元组成。20 世纪 80 年代中期,CPLD 问世,此应用已深入网络、仪器仪表、汽车电子、数控机床、航天测控设备等方面。它具有编程灵活、集成度高、设计开发周期短、适用范围宽、开发工具先进、设计制造成本低、对设计者的硬件经验要求低、标准产品无需测试、保密性强、价格大众化等特点,可实现较大规模的电路设计,因此被广泛应用于产品的原型设计和产品生产(一般在 10 000 件以下)之中。几乎所有应用中小规模通用数字集成电路的场合均可应用 CPLD 器件。CPLD 器件已成为电子产品不可缺少的组成部分。

CPLD 是一种用户根据各自需要而自行构造逻辑功能的数字集成电路。其基本设计方法是借助集成开发软件平台,用原理图、硬件描述语言等方法,生成相应的目标文件,通过下载电缆(“在系统”编程)将代码传送到目标芯片中,从而实现设计的数字系统。

5. ASIC

专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit, ASIC)是针对整机或系统的需要,专门为之设计制造的集成电路。专用集成电路可以把分别承担一些功能的数个、数十个、甚至上百个通用中、小规模集成电路的功能集成在一块芯片上,进而可将整个系统集成在一块芯片上实现系统的需要。它使整机电路优化,元件数减少,布线缩短,体积和重量减小,因而提高了系统可靠性。产品的特点是功能强,品种多;但批量较小,设计周期长,工艺生产与测试难度增加,故成本较高。

专用集成电路的开发可分为设计、加工与测试3个主要环节,但因其功能的多样而更具特色。功能设计的目的是为电路设计做准备,将系统功能用于系统实现,便于按系统、电路、元件的级别做层次式设计。逻辑设计的结果是给出满足功能块所要求的逻辑关系的逻辑构成。它是用门级电路或功能模块电路来实现,用表、布尔公式或特定的语言来表示的。电路设计的目的是确定电路结构(元件连接关系)和元件特性(元件值、晶体管参数),以满足所要求的功能电路的特性,同时考虑电源电压变动、温度变动以及制造误差所引起的性能变化。

版图设计直接服务于工艺制造。它根据逻辑电路图或电子电路图决定元件、功能模块在芯片上的配置,以及它们之间的连线路径。为节约芯片面积,要进行多种方案比较,直到满意为止。

验证是借助计算机辅助设计系统对电路功能、逻辑和版图的设计,以及考虑实际产品可能出现的时延和故障而进行分析的过程。在模拟分析的基础上对设计参数进行修正。为了争取产品一次投片成功,设计工作的每一阶段都要对其结果反复进行比较取优,以取得最好的设计结果。