

并行测试 技术及应用

Parallel Test
Technology and Application

肖明清 付新华 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

TD220

并行测试技术及应用

Parallel Test Technology and Application

肖明清 付新华 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书内容包括并行测试技术概述、并行测试系统开发过程、并行测试系统的资源优化配置、并行测试任务调度算法、并行测试系统接口适配器、并行测试系统面向对象的软件框架、并行测试系统的性能评估及并行测试系统的工程实现等。内容新颖、系统性强、理论联系实际,具有较高的理论和工程应用参考价值,是作者多年理论研究成果和工程实践经验的总结。

本书可供测试领域尤其是从事自动测试系统集成开发和研究的科技工作者使用,也可作为高等院校相关专业的教师和研究生进行有关课题研究或课程学习的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

并行测试技术及应用/肖明清,付新华著. —北京:国防工业出版社,2010.2

ISBN 978-7-118-06630-2

I. ①并... II. ①肖... ②付... III. ①并行控制—测试系统 IV. ①TP206

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 236715 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 17 字数 296 千字

2010 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

随着科学技术的飞速发展,军用武器系统等高技术产品的复杂程度日益提高,传统的人工检测维护手段已经无法满足现代化武器装备的维护保障要求,自动测试系统(ATS)正逐步成为武器装备可靠运行的必要保证。武器装备高新技术含量的日益增加,使得其测试内容和测试项目不断扩大,武器装备的快速保障需求,要求测试时间尽量缩短,现有的传统自动测试系统采用顺序测试方式,一次仅能测试一个被测对象(UUT),吞吐量低,限制了快速作战能力的提高,难以满足实际使用需求。

表现为多个测试任务同时进行测试的并行测试技术,是支撑下一代自动测试系统 NxTest 的关键技术之一,可以有效地提高测试吞吐量和效率,缩短测试时间,降低测试成本。并行测试技术是在自动测试领域引入了并行处理技术而形成的,是测试领域的一项重大技术突破。并行测试技术是一项交叉技术,它综合了并行处理技术与现代测试技术,其核心是并行概念。并行测试技术是对传统顺序测试思想的突破,是对测试思维方式与解决测试问题途径的变革。

本书是并行测试技术的一本专著,是作者多年理论研究成果和工程实践经验的总结。本书全面系统地论述了并行测试技术的有关理论和关键技术,并结合工程实际对并行测试系统的设计与开发方法进行了详细阐述。本书内容新颖,系统性强,理论联系实际,具有较高的科学技术水平和工程应用价值。

全书共分 8 章,具体内容安排如下:第 1 章并行测试技术概述,介绍了并行测试技术的有关概念;第 2 章并行测试系统开发过程,介绍了并行测试系统开发的一般流程及其方法;第 3 章并行测试系统的资源优化配置,介绍

了并行测试系统任务分解策略、资源优化配置模型及准则;第4章并行测试任务调度算法,介绍了并行测试任务调度的概念、策略及典型调度算法;第5章并行测试系统接口适配器,介绍了可编程并行测试接口适配器设计的方法;第6章并行测试系统面向对象的软件框架,介绍了基于构件的并行测试系统软件框架设计;第7章并行测试系统的性能评估,介绍了一种并行测试系统性能评估模型及基于该模型的性能评估方法;第8章并行测试系统的工程实现,介绍了一个实际并行测试系统的设计实例。

在本书的撰写过程中,朱小平、夏锐参与了前期的研究和资料收集整理工作,胡雷刚、禹航、王邑参与了后期排版及校对的有关工作,在此一并表示感谢。

由于本书涉及内容较新,有些问题还在进一步的深入研究,加之作者水平有限和时间仓促,书中难免有不少缺点和不足之处,恳请读者不吝指正和赐教。

作者

2010年1月

目 录

第 1 章 并行测试技术概述	1
1.1 并行测试的基本概念	1
1.1.1 并行测试的定义	1
1.1.2 并行测试的优势	5
1.1.3 并行测试的实现方式	7
1.1.4 并行测试系统的基本架构	10
1.1.5 并行测试的几个相关概念	15
1.2 并行测试的支撑技术	19
1.2.1 并行处理技术	19
1.2.2 支持并行测试的硬件资源	20
1.2.3 支持并行测试的软件设计和任务智能调度	20
1.3 并行测试技术的发展及其应用	21
1.3.1 并行测试技术是 NxTest 的关键技术	21
1.3.2 并行测试技术的应用	24
参考文献	25
第 2 章 并行测试系统开发过程	29
2.1 一般系统开发过程	29
2.1.1 一般系统开发过程的基本元素	29
2.1.2 一般系统开发过程的生命周期模型	31
2.1.3 一般系统开发过程模型	33
2.1.4 一般系统开发过程能力成熟度	33
2.1.5 一般系统开发过程的意义	34

2.2 并行测试系统的结构及开发过程	35
2.2.1 ATS 的组成及开发过程	35
2.2.2 并行测试系统的结构	37
2.2.3 并行测试系统开发过程	39
2.3 需求开发阶段	41
2.3.1 系统需求分析	41
2.3.2 测试需求分析	43
2.4 系统设计阶段	44
2.4.1 系统设计的基本原则	44
2.4.2 系统设计的基本内容	45
2.5 并行测试系统的集成	49
2.5.1 仪器与开关选型	49
2.5.2 开关网络设计	52
2.5.3 TUA 设计	52
2.6 并行测试系统软件设计	54
2.6.1 并行 TP 设计	55
2.6.2 测试数据库设计	56
2.7 系统集成测试阶段	59
2.8 并行测试系统开发过程的工作流建模与仿真	60
2.8.1 工作流的基本概念	60
2.8.2 基于 Petri 网的工作流建模与分析	61
2.8.3 ExSpect 语言	65
2.8.4 基于 ExSpect 的并行测试系统开发过程建模	67
2.8.5 模型的仿真、分析与优化	72
参考文献	74
第 3 章 并行测试系统的资源优化配置	77
3.1 并行测试的形式化定义及任务分解策略	77
3.2 测试流程的 TCPN 建模	79
3.2.1 赋时有色 Petri 网 TCPN	79

3.2.2	单测试任务的 TCPN 描述	80
3.2.3	测试流程的 TCPN 模型的构建	81
3.2.4	TCPN 模型构造实例	82
3.3	测试用时为常量情况下的模型分析	83
3.3.1	最短测试时间	84
3.3.2	最小资源集	85
3.3.3	算例分析和仿真	91
3.3.4	弹性资源下的最小资源集	92
3.4	测试用时为时间区间情况下的模型分析	96
3.4.1	理想测试方案和稳妥测试方案	96
3.4.2	实例分析	98
	参考文献	100
第 4 章	并行测试任务调度算法	101
4.1	并行测试任务调度概述	101
4.1.1	任务调度的概念及策略	101
4.1.2	并行测试任务调度研究现状	103
4.2	并行测试任务调度的数学描述	103
4.3	基于随机理论的并行测试静态调度算法	105
4.3.1	随机变量的产生	105
4.3.2	随机静态调度原理	105
4.3.3	基于随机理论的静态调度算法实现	106
4.3.4	随机静态调度算法仿真实例	108
4.4	基于多目标混合遗传退火算法的并行测试任务调度	109
4.4.1	混合 GASA 简介	109
4.4.2	相关定义	112
4.4.3	算法设计	114
4.4.4	仿真实验与结果分析	118
4.5	基于蚁群算法的并行测试任务调度	125
4.5.1	蚁群算法简介	126

4.5.2	任务调度算法设计	126
4.6	基于蚁群算法和 Petri 网结合的并行测试任务调度	131
4.6.1	并行测试任务调度的 TCPN 模型	131
4.6.2	TCPN - ACA 算法	132
4.6.3	仿真实验与结果分析、比较	136
4.7	多核情况下的并行测试任务调度	143
4.7.1	并行测试任务的描述	144
4.7.2	条件假设与相关定义	145
4.7.3	多融合矩阵	145
4.7.4	基于工作量的并行调度策略	146
4.7.5	多核平台实例性能分析	147
	参考文献	149
第 5 章	并行测试系统接口适配器	152
5.1	RTUA 设计流程	152
5.2	通用端口设计	153
5.3	测试点与仪器端口的自动匹配	154
5.3.1	资源配置模型	154
5.3.2	匹配函数	154
5.3.3	资源配置策略	159
5.3.4	资源配置实例分析	161
5.4	开关网络设计	163
5.5	RTUA 内部硬件设计	166
5.5.1	RTUA 总体架构及设计原则	166
5.5.2	内部模块具体实现	167
5.5.3	无固定容量的 FIFO 栈设计	172
5.6	RTUA 软件设计与实现	178
	参考文献	180
第 6 章	并行测试系统面向对象的软件框架	182
6.1	面向对象框架技术	182

6.1.1	框架的基本概念	182
6.1.2	框架的组成	185
6.1.3	框架的开发方式	190
6.1.4	基于元模型的框架开发方法	192
6.2	并行测试系统领域分析	195
6.2.1	并行测试系统体系结构标准分析	196
6.2.2	并行测试系统软件需求分析	196
6.2.3	并行测试系统软件的元类图	197
6.3	基于构件的并行测试系统软件框架	199
6.4	支持并行操作的构件设计	201
6.5	框架热点及相应的并行模式	204
6.6	并行测试数据库访问设计	207
	参考文献	210
第 7 章	并行测试系统的性能评估	212
7.1	随机 Petri 网	212
7.1.1	SPN 的定义	212
7.1.2	SPN 的分析方法	213
7.2	广义随机 Petri 网	216
7.3	并行测试系统的 GSPN 建模及正确性验证	217
7.3.1	任务调度序列的 GSPN 模型	217
7.3.2	任务调度序列的正确性验证	219
7.4	基于 GSPN 模型的并行测试系统性能分析	222
7.4.1	并行测试系统的性能参数	222
7.4.2	GSPN 模型的化简方法	224
7.4.3	性能分析	226
	参考文献	227
第 8 章	并行测试系统的工程实现	228
8.1	某型导弹并行测试需求分析	228
8.2	并行测试流程建模与调度策略	229

8.2.1 某型导弹测试流程建模·····	229
8.2.2 某型导弹任务调度策略·····	231
8.3 并行测试系统硬件平台构建·····	240
8.3.1 硬件平台设计基本原则·····	240
8.3.2 硬件总体方案与资源配置·····	242
8.4 并行测试系统软件设计与实现·····	244
8.4.1 并行测试系统软件总体框架·····	244
8.4.2 基于状态机的线程内并行测试·····	245
8.5 系统集成与性能分析·····	251
参考文献·····	252
符号说明·····	253

Contents

Chapter 1 Introduction of Parallel Test Technology	1
1.1 Parallel Test; Basic Concepts	1
1.1.1 Definition of Parallel Test	1
1.1.2 Advantages of Parallel Test	5
1.1.3 Implementation of Parallel Test	7
1.1.4 Basic Architecture of Parallel Test System	10
1.1.5 Relevant Concepts of Parallel Test	15
1.2 Supporting Technologies of Parallel Test	19
1.2.1 Parallel Processing Technology	19
1.2.2 Hardware Resources Supporting Parallel Test	20
1.2.3 Software Design and Intelligent Task Scheduling	20
1.3 Applications and Development of Parallel Test Technology	21
1.3.1 Parallel Test; the Key Technology to Nxttest	21
1.3.2 Applications of Parallel Test	24
References	25
Chapter 2 Development Process of Parallel Test System	29
2.1 General System Development Process	29
2.1.1 Fundamental Elements of General System Development Process	29
2.1.2 Lifecycle Model of General System Development Process	31

2.1.3	Model of General System Development Process	33
2.1.4	Capability Maturity of General System Development process	33
2.1.5	Significances of General System Development Process	34
2.2	Architecture and Development Process of	
	Parallel Test System	35
2.2.1	Composition and Development Process of ATS	35
2.2.2	Architecture of Parallel Test System	37
2.2.3	Development Process of Parallel Test System	39
2.3	Requirement Development Phase	41
2.3.1	System Requirement Analysis	41
2.3.2	Test Requirement Analysis	43
2.4	System Design Phase	44
2.4.1	Basic Principles of System Design	44
2.4.2	Basic Contents of System Design	45
2.5	Integration of Parallel Test System	49
2.5.1	Selection of Instruments and Switches	49
2.5.2	Design of Switch Networks	52
2.5.3	TUA Design	52
2.6	Software Design of Parallel Test System	54
2.6.1	Parallel Test Program Design	55
2.6.2	Test Database Development	56
2.7	System Test Phase	59
2.8	Workflow Modeling and Simulation of Parallel	
	Test System Development	60
2.8.1	Basic Concepts of Workflow	60
2.8.2	Workflow Modeling and Analysis Based on Petri-net	61
2.8.3	The ExSpect Language	65

2.8.4	ExSpect-Based Parallel Test System Development Process	
	Modeling	67
2.8.5	Model Simulation, Analysis and Optimization	72
	References	74
Chapter 3	Resource Optimization of Parallel Test System	77
3.1	Formal Definition and Task Decomposition	
	Strategy of Parallel Test	77
3.2	TCPN Modeling of Test Procedure	79
3.2.1	Timed Colored Petri-net	79
3.2.2	TCPN Description of Single Test Task	80
3.2.3	TCPN Model of Test Flow	81
3.2.4	A Case of TCPN Model	82
3.3	Model Analysis Based on Fixed Test Time	83
3.3.1	Least Test Time	84
3.3.2	Minimum Resource Set	85
3.3.3	Algorithm Simulation and Analysis	91
3.3.4	Minimum Resource Set with Flexible Resource	92
3.4	Model Analysis Based on Flexible Test Time	96
3.4.1	Ideal Test Solution and Safe Test Solution	96
3.4.2	Case Study	98
	References	100
Chapter 4	Parallel Test Task Scheduling Algorithms	101
4.1	Introduction of Parallel Test Task Scheduling	101
4.1.1	Definition and Strategy of Task Scheduling	101
4.1.2	Current Situation of Parallel Test Task Scheduling	103
4.2	Mathematical Description of Parallel Test Task	
	Scheduling	103

4.3	Parallel Test Static Scheduling Algorithm Based On	
	Stochastic Theory	105
4.3.1	Generation of Stochastic Variable	105
4.3.2	Theory of Stochastic Static Scheduling	105
4.3.3	Application of Stochastic Static Scheduling Algorithm	106
4.3.4	Case Study of Stochastic Static Scheduling Algorithm	108
4.4	Parallel Test Task Scheduling Based on Multi-Target	
	Hybrid GASA	109
4.4.1	Introduction of Hybrid GASA	109
4.4.2	Definitions	112
4.4.3	Algorithm Design	114
4.4.4	Simulation and Result Analysis	118
4.5	Parallel Test Task Scheduling Based	
	on Ant Colong Algorithm	125
4.5.1	Introduction to Ant Colony Algorithm	126
4.5.2	Task Scheduling Algorithm Design	126
4.6	Parallel Test Task Scheduling Based on Ant Colony	
	Algorithm and Petri-net	131
4.6.1	TCPN Model of Parallel Test Task Scheduling	131
4.6.2	TCPN-ACA Algorithm	132
4.6.3	Simulation Result Analysis and Comparison	136
4.7	Parallel Test Task Scheduling Based on Multi-Core	
	Computing Platform	143
4.7.1	Description of Parallel Test Task	144
4.7.2	Assumptions and Definitions	145
4.7.3	Multi-Fusion Matrix	145
4.7.4	Parallel Scheduling Strategy Based On Workload	146
4.7.5	Performance Analysis On Multi-Core Platform	147
	References	149

Chapter 5 Test Unit Adapter of Parallel Test System	152
5.1 Design Process of RTUA	152
5.2 General Port Design	153
5.3 Automatic Match of Test Points and Instrument Ports	154
5.3.1 Resource Allocation Model	154
5.3.2 Matching Function	154
5.3.3 Resource Allocating Strategy	159
5.3.4 Case Study of Resource Allocation	161
5.4 Switch Network Design	163
5.5 Hardware Design of RTUA	166
5.5.1 Architecture and Design Principles of RTUA	166
5.5.2 Implementation of Internal Module	167
5.5.3 Non-Fixed-Capacity FIFO Stack Design	172
5.6 Software Design and Implementation of RTUA	178
References	180
Chapter 6 Parallel Test System OOP Software	182
Framework	182
6.1 Object-Oriented Framework Technology	182
6.1.1 Basic Definition of Framework	182
6.1.2 Composition of Framework	185
6.1.3 Development Scheme of Framework	190
6.1.4 Framework Design Method Based on Meta-Model	192
6.2 Domain Analysis of Parallel Test System	195
6.2.1 Architecture Standard Analysis	196
6.2.2 Software Requirements Analysis	196
6.2.3 Meta-Class Map of Software	197

6.3	Software Framework Based on Component	199
6.4	Component Design Supporting Parallel Operation	201
6.5	Framework Hot Point and Parallel Pattern	204
6.6	Parallel Test Database Design	207
	References	210
Chapter 7	Performance Evaluation of Parallel Test System	212
7.1	Stochastic Petri-net	212
7.1.1	Definition of SPN	212
7.1.2	Analysis Method of SPN	213
7.2	Generalized Stochastic Petri-net	216
7.3	GSPN Modeling and Validation of Parallel Test	217
7.3.1	GSPN Model of Task Scheduling Array	217
7.3.2	Validation of Task Scheduling Array	219
7.4	Performance Analysis Based on GSPN Model For Parallel Test System	222
7.4.1	Performance Parameters of Parallel Test System	222
7.4.2	Simplification of GSPN Model	224
7.4.3	Performance Analysis	226
	References	227
Chapter 8	Implementation of Parallel Test System	228
8.1	Test Requirement Analysis of Certain Type Missile	228
8.2	Model and Scheduling Strategy of Parallel Test Flow	229
8.2.1	Test Flow Modeling of Certain Type Missile	229
8.2.2	Task Scheduling Strategy of Certain Type Missile	231
8.3	Hardware Platform of Parallel Test System	240
8.3.1	Principles of Hardware Platform Design	240
8.3.2	Solution and Resource Allocation of Hardware	242