



航天器自动化测试 语言及系统

马世龙 余丹 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国家科学技术学术著作出版基金

航天器自动化测试 语言及系统

马世龙 余丹 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

航天器自动化测试语言及系统 / 马世龙, 余丹著. —北京:
国防工业出版社, 2011. 2

ISBN 978 - 7 - 118 - 07095 - 8

I. ①航… II. ①马…②余… III. ①航天器 - 自动检
测系统 IV. ①V448.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 182142 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 298 千字

2011 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 48.00 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

“十一五”期间,我国对新型航天器研制在性能、数量和生产上提出了更高要求,因此需要在航天器领域不断加快信息化建设步伐。建设航天器测试信息化系统,将对实现航天器制造数字化,提高研制效率和水平起到推动作用。

航天器自动化测试系统是指将先进的信息技术、航天器测试技术、计算机技术以及网络技术、自动控制技术、通信技术等地、综合地运用于整个航天器测试而建立起来的一种实时、准确、高效、安全的航天器综合测试和控制系统。它以规范的航天器测试语言为中心,在现有测试系统软件的基础上,加强自动化测试软件设计开发,测试软件系统实现网络化,进一步优化和完善系统核心平台,使得研制的航天器测试软件的可靠性、安全性、通用性有较大提高。

航天器测试语言是描述航天器自动化测试的形式体系和航天器自动化测试过程的标准。当前,航天器测试工作模式已经从单航天器测试向多航天器批产网络化测试模式转变,航天器自动化测试系统与测试语言标准体系研究对于提高航天器测试自动化水平和保障测试过程安全具有理论意义和实用价值,将现代信息技术和网络技术应用于航天器测试工作十分迫切和必要。

航天器测试语言是关于各种测试标准描述的形式体系。测试人员通过测试语言编写的程序(测试计划)组织测试流程、描述和访问测试资源;同时用航天器测试语言编写的测试程序精确描述出航天器测试的需求,通过测试信息化系统运行测试程序就可以实现测试过程的自动化,完成航天器的测试任务。因此,积极开展航天器测试语言的定义和实现研究已经成为一个基础性问题 and 重要研究内容。

《航天器自动化测试语言及系统》一书是作者多年从事航天器自动化测

IV

试研究工作的成果总结,在国内首次系统地论述了网络环境下航天器自动化测试与测试语言的研究内容、关键技术和系统设计实现方法,用大量篇幅对国内外,特别是国外航天器自动化测试和航天器测试语言进行了详细的综述和分析,并且讨论了我国航天器测试自动化和航天器测试语言发展的途径。

本书由马世龙、余丹合著,李先军、李重文、叶钢、孙波、韩一、徐帆、王叶、郑雯、周家杰、吕伟、赵莉、李睿等课题组成员参与了书稿内容修改、校对及绘图工作。本书同时得到了北京航空航天大学有关领导和同志的大力支持,在此表示衷心的感谢。限于编者学识水平,书中不足与疏漏之处难免,恳请读者指正。

最后,本书的写作和出版得到了国家科学技术学术著作出版基金的支持,在此表示感谢!

作 者

2010年8月于北京航空航天大学

目 录

第一篇 航天器自动化测试系统

第 1 章 航天器自动化测试	2
1.1 航天器测试	2
1.1.1 航天器测试技术发展的三个阶段	2
1.1.2 航天器测试技术发展现状	3
1.1.3 航天器自动化测试技术	5
1.2 航天器自动化测试系统	6
1.2.1 航天器自动化测试分析	6
1.2.2 航天器自动化测试系统层次结构	8
1.2.3 航天器自动化测试系统总体架构	10
1.2.4 航天器自动化测试系统数据流	11
1.2.5 航天器自动化测试系统运行结构	13
1.2.6 航天器自动化测试系统的功能	14
1.3 航天器自动化测试系统的发展	16
1.3.1 航天器测试模式的转变	16
1.3.2 多航天器批产测试机制	17
第 2 章 基于先进计算和网络技术的航天器自动化测试系统	19
2.1 ABBET	19
2.1.1 ABBET 概述	19
2.1.2 ABBET 层次结构图	20
2.1.3 ABBET 框架	21
2.1.4 ABBET 体系结构	22
2.2 中间件技术	23
2.2.1 中间件技术概述	23

2.2.2 中间件结构	24
2.3 SOA 技术	24
2.3.1 SOA 技术概述	24
2.3.2 SOA 模型	25
2.4 新一代网络化航天器自动化测试系统框架	26
参考文献	28

第二篇 航天器测试语言及其发展

第3章 面向测试过程的国外航天器测试语言研究	31
3.1 ETOL	31
3.1.1 背景	31
3.1.2 功能	31
3.1.3 语言结构	34
3.1.4 语句	36
3.2 STOL	42
3.2.1 分布式语言解析器	42
3.2.2 程序解释器	43
3.2.3 语言结构	44
3.2.4 程序文件执行	48
3.2.5 流程环境	54
3.3 TCL/TK	55
3.3.1 背景	55
3.3.2 测试语句	56
第4章 面向测试人员的国外航天器测试语言研究	59
4.1 GOAL 背景	59
4.2 GOAL 目标和特征	60
4.3 GOAL 语言结构	61
4.4 GOAL 语句	65
4.4.1 声明语句	65
4.4.2 过程语句	72
4.4.3 系统语句	85
第5章 面向测试信号的国外航天器测试语言研究	89

5.1	ATLAS	89
5.1.1	背景	89
5.1.2	语言特点	90
5.1.3	语言结构	90
5.1.4	语句	91
5.2	ATLAS 2000	93
5.2.1	背景	93
5.2.2	新概念	93
5.2.3	语言框架	94
第6章	航天器测试语言研究总结与展望	98
6.1	语言比较与特色总结	98
6.2	我国航天器测试语言发展展望	100
参考文献	102

第三篇 航天器测试语言系统框架

第7章	CATOL 语言模型	107
7.1	CATOL 的总体结构和特征	107
7.2	航天器测试流程语言定义	108
7.2.1	操作类语句	109
7.2.2	数据类语句	111
7.2.3	时间类语句	113
7.2.4	控制类语句	113
第8章	CATOL 编辑环境	115
8.1	编辑环境的本质特征及其对支撑技术的需求	115
8.1.1	测试语言及其编辑环境	115
8.1.2	CATOL 编辑环境	116
8.2	航天器测试编辑工作平台	117
8.2.1	测试对象管理	125
8.2.2	编辑机制	128
8.2.3	可复用组件	136
第9章	CATOL 执行环境	139
9.1	航天器测试执行系统体系结构	140

9.1.1	体系结构模型	140
9.1.2	层次模型及其交互	142
9.2	航天器程序自动解释执行机制	144
9.2.1	测试程序管理	145
9.2.2	测试引擎	146
9.2.3	测试程序执行过程	146
9.3	航天器测试执行控制机制	149
9.3.1	变量处理	149
9.3.2	条件选择语句的处理	149
9.3.3	循环语句	150
9.3.4	测试过程的并行执行	151
第 10 章	CATOL 总结分析环境	153
10.1	航天器测试总结分析现状及问题	153
10.1.1	基于动态 SQL 的可定制查询	154
10.1.2	基于服务组合的可定制查询	154
10.2	可定制数据查询机制	155
10.2.1	领域建模	157
10.2.2	基本服务构建	158
10.2.3	用户定制策略	161
10.2.4	服务组合	167
10.2.5	组合服务执行与结果生成	173
10.3	测试数据一致性比对分析	175
10.3.1	测试数据一致性分析	175
10.3.2	测试覆盖性检查	175
参考文献		180

第四篇 航天器测试语言支撑环境及其应用

第 11 章	基本测试过程服务模型及应用	183
11.1	自动化测试系统中的测试过程抽象	183
11.2	航天器测试原子定义	184
11.3	航天器测试原子说明	185
第 12 章	测试数据服务模型及应用	192

12.1	航天器测试数据资源服务模型及应用	192
12.1.1	航天器测试数据资源特点	192
12.1.2	航天器测试数据资源的使用要求	193
12.2	航天器测试统一数据资源访问平台	194
12.2.1	航天器测试数据平台的体系结构模型	194
12.2.2	航天器测试数据资源统一访问机制	197
第13章	测试设备资源模型及应用	202
13.1	测试设备资源服务模型及应用	202
13.1.1	测试设备资源的特点	202
13.1.2	测试业务的特点	203
13.2	航天器测试设备资源平台	203
13.2.1	测试资源支撑平台体系结构模型	204
13.2.2	测试设备资源平台的支撑技术	206
第14章	航天器测试文档模型及应用	210
14.1	测试文档资源服务模型及应用	210
14.1.1	测试文档的特点	210
14.1.2	测试文档技术与标准	213
14.1.3	现有技术存在的问题	215
14.2	航天器测试文档描述与生成方式及实现机制	216
14.2.1	航天器测试文档描述与生成问题	216
14.2.2	航天器测试文档描述与生成方法	217
14.3	测试文档描述与生成方式的体系结构	218
14.3.1	测试文档描述与生成方式的体系结构模型	218
14.3.2	测试文档描述与生成环境的技术实现	221
第15章	航天器自动化测试本体	230
15.1	航天器自动化测试本体描述	230
15.1.1	航天器自动化测试本体类	231
15.1.2	航天器自动化测试本体的关系	234
15.1.3	航天器自动化测试中的公理	235
15.1.4	航天器自动化测试中的规则构建	236
15.2	航天器自动化测试本体的构建	239
15.3	航天器自动化测试本体的应用	243
参考文献		246

第五篇 航天器自动化测试与测试语言的发展方向

第 16 章 航天器自动化测试与测试语言的发展方向	248
16.1 ATML 体系	248
16.1.1 ATML 框架	248
16.1.2 ATML 组件标准	249
16.2 AI - ESTATE	251
16.3 航天器自动化测试系统及语言发展趋势	252
参考文献	255

第一篇 航天器自动化测试系统

“航天科技是科技皇冠上的明珠”，航天领域近几十年的技术进步使世界各国都看到了航天科技的发展对科技发展的极大促进作用。航天事业的不断发展对于提高我国的国际地位，服务于我国的经济建设、社会发展和国家安全等具有十分重大的现实意义和非常重要的历史意义。

航天器是在绕地球轨道或外层空间按受控飞行路线运行的飞行器。测试是航天器研制过程中必不可少的重要环节。手工测试的手段和方法已经不能满足航天器高可靠性和发展新型航天器的需要。因此需要对航天器测试进行规范和自动化，以提高测试效率，减轻测试人员的工作强度。

随着航天器技术的发展，单颗航天器的自动化测试工作已经成熟，但是多颗航天器的自动化测试工作才刚刚起步。多颗航天器同时进行测试，极大地增加了航天器自动化测试的复杂性。如何进行航天器的测试任务计划，如何减少多颗航天器并行测试的复杂度，如何统一管理多颗航天器的测试数据，如何实现测试数据的统一分析，如何实现测试过程的信息化管理，诸如此类的问题需要认真深入思考。

当前，信息化技术在航天器自动化测试系统中得到了应用，但是我国航天器测试的自动化水平依然较低，与国外航天器测试的自动化水平还有一定的差距。

本篇将对航天器自动化测试系统及其发展状况进行介绍。

第 1 章

航天器自动化测试

1.1 航天器测试

1.1.1 航天器测试技术发展的三个阶段

航天器系统的研制是一项复杂的系统工程。为了确认航天器的各项功能和性能是否满足设计要求,在试验中获取定性、定量参数并进行处理和评定,需要对航天器进行测试。测试是航天器型号研制过程中重要的组成部分,并与现代航天器系统的设计、制造和总装集成构成一个完整的整体。在发射之前对其进行测试是航天器应用系统研制过程中必不可少的重要环节。任何航天领域的科学理论和现代装备的成功试验和定型,都需要先进的测试技术支持,测试所得定性和定量的数据是研究、改进设计及试验分析的依据。

航天器测试技术是集测量技术、电子工程、通信技术、计算机应用技术、软件工程、工程管理等为一体的综合技术,包括测试策略方法、测试的支撑技术、测试过程的组织实施等。测试过程伴随航天器研制的整个周期,不同的阶段有不同的需求。

我国的航天器测试技术和测试设备的发展历程同国外同行业走过的道路大致相同,经历了以下三个发展阶段^[1]。

(1) 第一阶段为从手动操作起步的综合测试,其主要标志为中国第一颗人造卫星“东方红一号”的测试是手动操作和人工判读。这套综合测试设备是第一代测试设备的代表。尽管它存在很多不完善的地方,但确保了“东方红一号”卫星在工厂、试验站和发射场的测试,为“东方红一号”卫星的成功立下了汗马功劳,同“东方红一号”卫星一样载入史册。进入 20 世纪 70 年代后,中国空间技术研究院又先后为返回式卫星、早期通信卫星和科学试验卫星研制了综合测试设备。它们都属于第一代设备,这些设备都由通用仪器和专用设备组成,其

共同特点都是手动控制,没有数据处理能力,只有测量部分使用了顺序控制字样,跟踪测轨分系统都是采用由分系统承担单位提供的设备以及购置的通用仪表。

(2) 第二阶段为计算机进入航天器测试领域。20 世纪 70 年代中期,计算机在轨道计算、数据处理等领域开始应用。但是,航天器测试过程甚至数据处理过程全都是人工操作。20 世纪 80 年代初期,计算机在测试领域已经得到广泛应用。以 DJS-130 系统为代表的航天器测试系统是第二代测试设备,本质上它只是人工测试的一种模仿。它的主要特点是计算机在数据采集和处理中得到了应用,测试设备是分散的;没有航天器测试的操作软件,缺乏集中的测试过程管理和数据管理。

(3) 第三阶段为航天器测试自动化阶段。进入 20 世纪 90 年代后,部分软件开始使用高级语言,如 BASIC 语言、C 语言等,基于 Windows 和网络的程序设计也逐渐被应用和受到青睐。标准化接口总线逐步被接受和推广应用,航天器测试设备体系结构和测试软件的不断完善预示着真正的航天器自动化时代的来临。计算机技术的发展和应用、软件技术的发展和标准化接口的应用,使测试逐步走向自动化,进入了第三代测试设备的研制和应用阶段。

1.1.2 航天器测试技术发展现状

航天器测试系统是指基于计算机的软件和硬件技术开发的、用以完成航天器测试任务的信息系统。从 20 世纪 80 年代中期开始,微型计算机在卫星测试中的应用逐渐推广和普及,使卫星测试设备的水平不断提高。

现阶段,航天器测试系统采用以单星研制为主的测试组织模式,为一个卫星配置一套测试阶段方案,一套测试设备,开发配套的测试软件,从而导致测试系统软件开发过程中软件复用率低,存在重复开发的情况。图 1-1 所示为传统的航天器测试系统。

随着航天器研制和发射数据量的增加,测试任务越来越繁重。传统的航天器测试系统已经不能满足新的测试进度。需要提高测试手段,改进测试方法,引入多航天器并行测试的机制,开发新的航天器综合测试系统,以提高测试效率,保障测试可靠性。航天器综合测试系统需要能够支持多个同类航天器实体的并发测试需求,它是基于分布式的网络系统结构的,系统的一些测试资源和测试设备共享在网络节点中。航天器综合测试系统如图 1-2 所示。

从图 1-2 中可以看出,与传统的航天器测试系统相比,航天器综合测试系

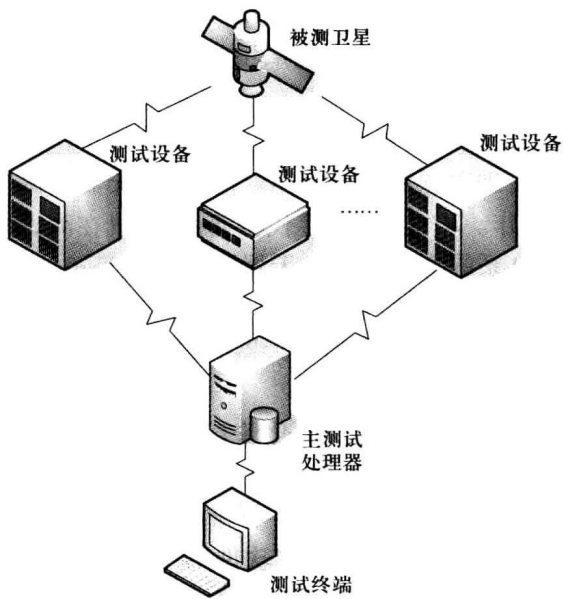


图 1-1 传统的航天器测试系统

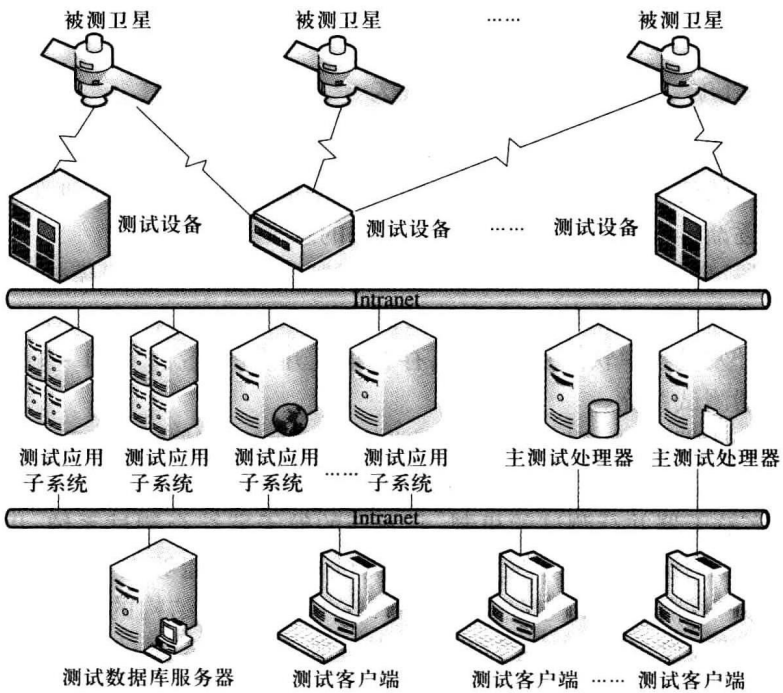


图 1-2 航天器综合测试系统

统的应用具有如下特点。

(1) 综合测试系统基于分布式的网络结构构建,测试应用子系统分布于不同的网络节点上,被测航天器共享网络节点中的测试设备和测试子系统。

(2) 测试业务逻辑更加复杂,在综合测试系统中需要构建各种测试应用子系统,对多航天器进行并行综合测试。

(3) 综合测试系统所使用的测试数据资源的数量和范围急剧膨胀,数据访问处理逻辑也更加复杂。数据资源分布式异构存储结构同时也增加了数据资源的管理和利用难度。

(4) 综合测试系统需要有良好的扩展性,从而支持因测试业务扩展而导致测试子系统的增加。

1.1.3 航天器自动化测试技术

当前我国航天器测试具有周期长、数据量巨大、数据种类繁多、数据空间分布特性较为分散等特点。一个航天器的测试周期一般为几个月到一年不等;在测试过程中,测试数据以毫秒级的速度产生,单一航天器的测试所产生的数据量能达到 TB 级;针对航天器的不同测试部件,所产生的数据种类繁多;航天器的测试涉及的部门多,因此,数据在地理上也分布在不同的组织部门。

针对以上特点,我国航天技术部门在测试中引入自动化测试的思想,提高测试系统的自动化和智能化水平,开发了航天器自动化测试系统,以满足航天器的测试需求。同时,在航天器自动化测试系统的设计中,充分考虑各种不同型号航天器的测试需求,增强系统的可扩展性,使其在航天器测试领域具有通用性。

航天器测试的整个过程包括测试准备、测试执行和测试总结三个阶段。航天器自动化测试系统的设计覆盖了这三个阶段的工作。按照这三个阶段的工作安排,航天器自动化测试系统分为三个子系统,即测试准备子系统、测试执行子系统、测试评估子系统,每个子系统完成对应测试阶段的测试工作。

航天器测试整体流程如图 1-3 所示。

从图 1-3 中可以看出,航天器自动化测试系统主要以测试数据资源为核心,以测试计划为测试过程的组织原则,各测试阶段应用子系统相互配合完成整个测试过程的组织与实施。在测试准备阶段,测试人员使用测试准备子系统,调用 IDS(Integrated Data Sheet)库等外部数据资源的访问接口,按照测试项目定义的测试组织结构,完成测试项目的定义,将由测试计划信息生成的测试程序存入测试数据库。在测试执行阶段,测试指挥人员通过测试任务管理子系统,组织和安排测试任务。测试人员根据此安排通过测试执行子系统进行相应

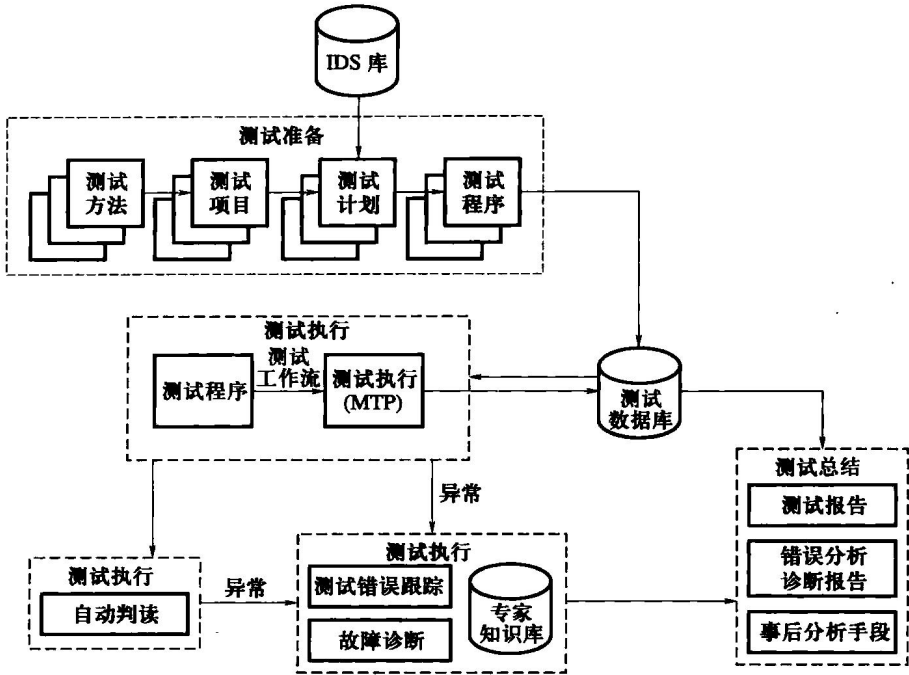
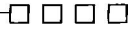


图 1-3 航天器测试整体流程

测试。测试执行子系统读取测试数据库中存储的测试程序信息,将测试程序内容解析成测试执行 workflow,按照定义的规则自动执行,并将测试结果存入测试数据库,完成测试的执行过程。在测试评估阶段,测试指挥与测试人员通过测试评估子系统生成测试报告,并对测试数据资源中存储的测试内容信息与测试数据信息进行查询与统计^[2]。

1.2 航天器自动化测试系统

1.2.1 航天器自动化测试分析

1. 航天器自动化测试过程分析

在航天器测试的三个阶段中,每个阶段完成相应的工作。在测试准备阶段主要是规范和统一测试方法,编写测试文档,生成测试细则;在测试执行阶段,分配测试任务,按照不同的方法执行测试任务,监视执行过程并将执行结果存储至数据库;在测试总结阶段,按照测试计划与分系统测试要求,生成测试报