

批产卫星自动化测试系统研究与实现*

袁建富, 易进, 李鑫, 李畅, 闫东, 叶琳琳

(长光卫星技术股份有限公司, 吉林 长春 130000)

摘要: 为了解决批量化卫星生产数量多、周期短、人员短缺等问题, 提出了一种新型卫星自动化测试系统。系统的硬件架构由综合测试服务器、遥控遥测地检设备、自动化测试终端等组成。软件核心架构基于TestStand和LabVIEW联合开发, LabVIEW编辑的代码模块实现与遥控遥测地检设备、服务器数据库等创建信息通道的功能; TestStand遵循测试细则的操作流程开展自动化序列的编辑工作, 实现了遥控指令发送、遥测数据判读、过程监控、测试报告生成、多星并行测试等流程的高度自动化。该架构测试序列编辑灵活性高、通用性强, 可以满足多种卫星自动化测试工况的需求, 目前已经成功应用在吉林一号高分03系列卫星的批量化生产与测试的流程中, 在大幅度提高测试效率的同时, 节省了大量人力。

关键词: 卫星; 自动化测试; TestStand; LabVIEW; 测试序列

中图分类号: TP271

文献标志码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.223631

中文引用格式: 袁建富, 易进, 李鑫, 等. 批产卫星自动化测试系统研究与实现[J]. 电子技术应用, 2023, 49(2): 133-139.

英文引用格式: Yuan Jianfu, Yi Jin, Li Xin, et al. Research and realization of automated test system for satellite batch production [J]. Application of Electronic Technique, 2023, 49(2): 133-139.

Research and realization of automated test system for satellite batch production

Yuan Jianfu, Yi Jin, Li Xin, Li Chang, Yan Dong, Ye Linlin

(Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130000, China)

Abstract: In order to solve the problems of large quantity of mass satellite production, short cycle, and shortage of personnel, a new type of satellite automatic test system is proposed. The hardware architecture of the system is composed of a comprehensive test server, remote-control telemetry ground inspection equipment, and an automated test terminal. The software architecture is based on the joint development by TestStand and LabVIEW. The code module edited by LabVIEW realizes the function of creating information channels with remote control and telemetering ground inspection equipment, server databases, etc. Following the operation process of the test instructions, TestStand edits the automated test sequence, realizing the highly automated processes such as remote control instruction sending, telemetry data interpretation, process monitoring, test report generation, and multi-satellite parallel testing. The test sequence of this architecture has high flexibility and strong versatility, and can meet the demands of a variety of satellite automated test conditions. It has been successfully applied in the mass production and testing process of Jilin-1 Gaofen 03 series satellites. While greatly improving the test efficiency, it saves a lot of manpower.

Key words: satellite; automated testing; TestStand; LabVIEW; test sequence

0 引言

随着“中国制造2025”和“新基建”战略的提出, 低成本发射、智能终端、分离技术、电推进等新技术和应用的不断涌现, 我国商业卫星发展迎来了关键期。微小卫星在响应速度、成本控制、安全性、维护性、功能重构等方面优势明显, 批量生产、快速发射、在轨组网已经成为了小卫星的发展趋势^[1-3]。

卫星系统级测试覆盖了卫星研制生产的全生命周期, 是卫星入轨正确开展业务工作的前提与保障^[4-7]。批量化生产演变为卫星制造新模式的同时, 对卫星电测试提出了更高的要求, 传统的人工测试手段已经无法满足新生产模式的需求。研制一套架构灵活、通用性好、高效的卫星自动化测试系统显得至关重要。近些年来, 我国小卫星批量化生产与制造行业的兴起, 不断地催生出了各类卫星自动化测试系统的研制^[8-14]。总结该类成

* 基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20210201114GX)

果可知,小卫星的自动化测试平台趋于流水线、并发作业、高效能的模式,但测试系统的设计的出发点大多基于被测对象的生产流程与测试项开展研究与设计,忽视了自动化测试系统的通用性、灵活性、可靠性以及兼容性。文献[15]总结了商业卫星发展与测试的理念,研发了商业卫星自动化测试平台,该平台着重开展了硬件测试系统的通用化设计,但作为自动化测试系统核心部分的软件架构基于服务层开发,灵活性较差,测试序列调试周期与难度较高。随着卫星数量的增多,型号种类的多样化,测试场景的复杂化,该自动化测试平台已经无法满足测试需求。

卫星自动化测试在国内属于新兴学科,并无成熟的体系或者方案。但是在工业生产领域,自动化测试技术经过多年的发展,已经构建出以软件为中心的生态系统^[16]。本文将从产业融合的角度出发,借鉴先进的工业自动化测试管理理念,设计一套适用于卫星批产的自动化测试系统,该系统自动化测试框架基于TestStand开发,该框架具备测试管理与执行、图形化的操作界面、支持多线程并行测试、内建符合多种应用场景的测试策略等。基于该框架设计的系统鲁棒性和可扩展性得到充分保证,自动化软件工程师也可以更加专注于卫星测试代码模块的开发,使系统的开发效率得到大幅度提高,测试系统也具备更长的生命周期。

1 方案设计

1.1 设计目标

批产卫星测试与装配采用脉动式产线的模式,产线主要包括9个工位,分别是桌面联试、单机热控实施、单机安装与线缆实施、A状态电测试、帆板天线安装、B状态电测试、力学与热真空试验、出厂电测试以及发射场电测试,如图1所示。

脉动式产线具备可扩展的特性,以两条流水线为例,批产卫星在桌面联试需满足6颗星并行测试,A状态电测试双星并行,B状态电测试双星并行,大型环境试验6~12颗星并行测试,出厂电测试6颗星并行测试,发射场测试最多需满足9颗星并行测试。为此提出了批量卫星自动化测试系统的需要实现的目标:

- (1) 自动化:可以通过自动化的技术手段来减少人工操作,缩短测试时间,消除操作失误,提高测试效率;
- (2) 并行化:满足多颗卫星的并行测试,在不增加人力和时间投入的前提下实现测试效能翻倍;
- (3) 信息化:原始数据存储与测试报告自动建立数据档案;
- (4) 自动协作:可自动优化测试资源间的协作调配,实现个别比较贵重的设备分时复用,节省测试系统的成本投入。

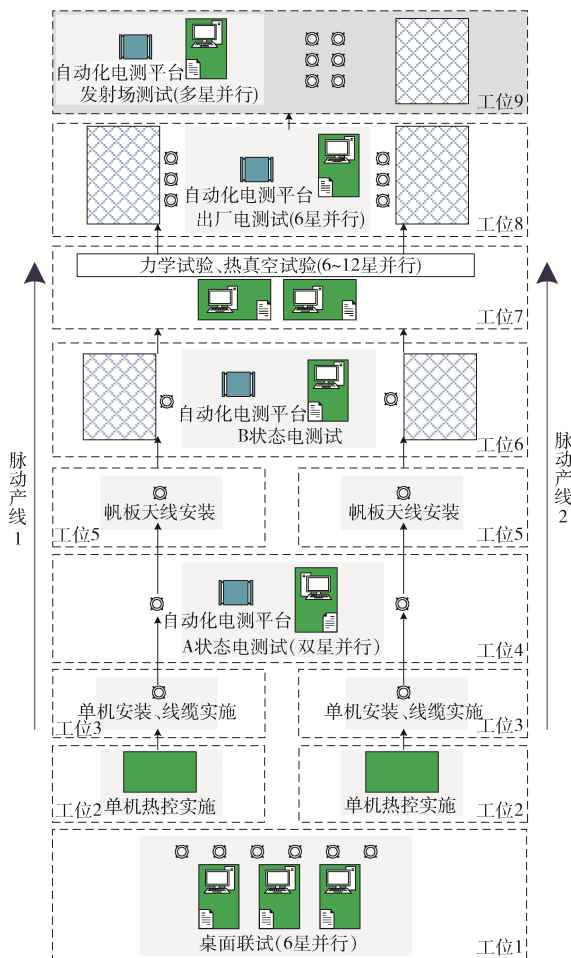


图1 批产整星测试流程图

1.2 测试系统架构

测试系统采用局域网互联,由自动化测试终端、服务器、太阳阵模拟器、CANPC、遥控遥测地检设备、高速数传解调器、GPS/BD信号模拟器以及交换机组成,如图2所示。

其中GPS/BD信号模拟器为星载GPS接收机提供模拟导航信号,验证接收机定位定轨功能的正确性,同时提供被测卫星的时间基准。高速数传解调器实时接收数传分系统下传的载荷图像数据并存储至本地磁盘中,支持远程配置射频信道参数与控制数据存储等操作。遥控遥测地检设备可以通过有线传输或无线传输的方式与星载测控应答机建立遥控遥测信息通道,并实时存储遥控遥测数据源码,支持多星、多测控体制并行数据传输。CANPC与星上多路CAN总线互联,内部运行CAN_UDP转发软件,可以实现CAN与UDP传输协议转换并实时存储所有CAN总线数据,由于卫星遥控遥测信息都需要经过CAN总线传输,使得CANPC信息通道成为了卫星测试的备份遥控遥测链路。综合测试服务器作为数据处理平台,并行运行多个虚拟机,每个虚拟机对应一颗被测卫星,不同的虚拟机通过不同的IP地址

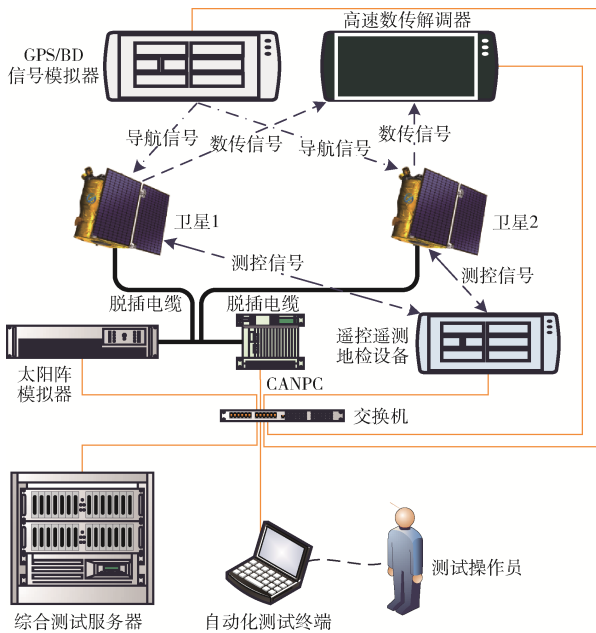


图2 测试系统框架图

进行认证,并部署遥控遥测解析软件和数据库,用来实时解析卫星下行的遥测数据并进行归档。自动化测试终端是测试系统的核心,用来运行严格依照测试细则编译的测试序列。太阳阵模拟器为卫星的供电设备。所有局域网内的测试设备可以通过千兆以太网进行数据交互,测试操作员主要通过操作自动化测试终端来实现自动化测试序列的运行和其他测试设备的远程操控。

1.3 自动化软件设计

测试卫星具备两条遥控遥测链路,分别是X测控射频链路和CAN总线链路。其中X测控射频链路为被测卫星遥控/遥测主通道。而CAN总线的遥控遥测作为X测控应答机的备份链路,主要用于CAN总线遥控遥测数据帧记录,当X测控的遥控/遥测链路故障时,CAN总线遥控/遥测链路可以作为故障排查链路,也可以接替X测控链路成为遥控/遥测的主链路。架构如图3所示。

自动化测试过程首先由测试细则制定测试项,对发送的遥控指令与判读的遥测内容进行定义。自动化测

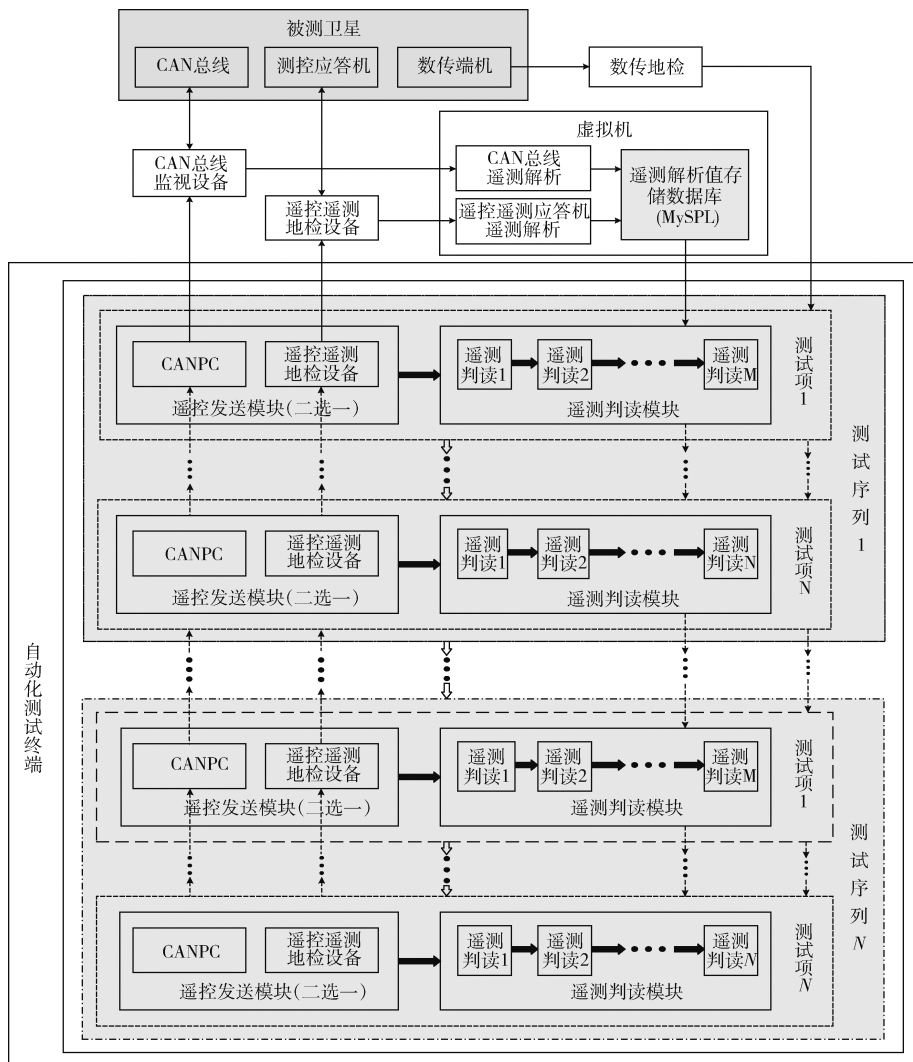


图3 自动化测试软件架构图

试终端的遥控发送模块基于 LabVIEW 进行创建,集成了两条遥控链路上行的功能,可在创建测试序列时按照测试需求选择上行通道,两条链路的遥控指令分别由天上的中心机 CAN 总线模块和测控应答机获取。X 波段测控应答机下行的遥测帧由自动化测试服务器 X 测控应答机遥测解析模块负责解析,并将解析值存入至 MySQL 目标数据库。CAN 总线监视设备的遥测帧则由服务器 CAN 总线遥测解析模块进行解析,解析值与 X 测控应答机遥测解析模块的解析值一同存入目标数据库。遥测判读模块基于 ODBC(开放数据库连接)接口对遥测存储数据库进行重访,获取需要判读的遥测解析值。遥测判读模块基于 LabVIEW 进行编辑,再由 TestStand 序列编辑器调用,通过数值比较、数组比较、字符串比较、布尔值判读等测试框架进行结果判读。判读结果由 passed 或 failed 进行表示,由此构成一个测试项。多个测试项进行串联执行则构成了测试序列。

多个测试序列通过嵌套、调用、顺序执行等则构成序列树。以吉林一号高分 03C 星为例,序列共分为 3 级,其中 1 级主序列为高分 03C 测试序列,2 级子序列包括 5 个分系统测试序列,3 级子序列包括 15 个部组件测试序列。序列树如图 4 所示。

1.4 并行测试方案

多星并行测试方案基于 TestStand 并行过程模型开发,作为多线程过程模型的一种,并行过程模型定义了一系列并行通用操作。支持自定义并行测试卫星数量。以 4 颗卫星并行测试为例,4 颗卫星运行同一个测试序列,并行过程模型测试的过程中不要求多颗卫星在同一时刻开始测试,依据测试内容时间的不同,结束时间也不统一。如图 5 所示,当卫星 2 完成测试时,卫星 1、卫星

3、卫星 4 还在测试过程中,此时可将卫星 2 转换至下一个测试工位并在此工位测试下一颗卫星。4 个并行测试的卫星是相互独立的,没有测试的先后顺序之分,也没有相互的依赖关系。并行测试的数量支持自定义,原则上自动化测试软件的测试数量没有上限,只需要有适配的硬件资源即可。并行自动化测试软件界面如图 6 所示。

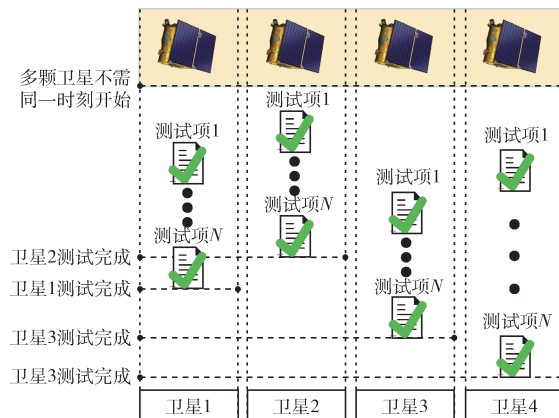


图 5 卫星并行测试流程示意图

1.4.1 并行测试资源分配

并行测试过程中,所有线程运行的自动化测试序列软件相同,需要为不同的卫星配置不同的设备参数来定义信息通道。由于各测试设备通过局域网的方式进行互联互通,IP 地址和端口号将作为有效的身份认证,多通道的测试设备还可以通过通道号作为绑定信息。参数配置表如表 1 所示。

当测试序列运行开始时,通过设备参数初始化的代码模块获取配置参数,并传递给定义好的本地局部变

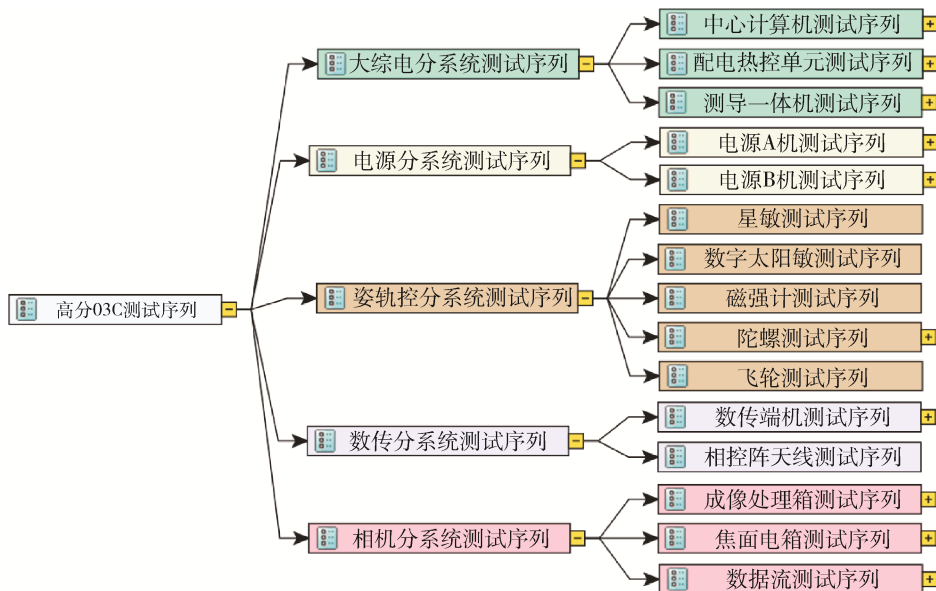


图 4 吉林一号高分 03C 星序列树图

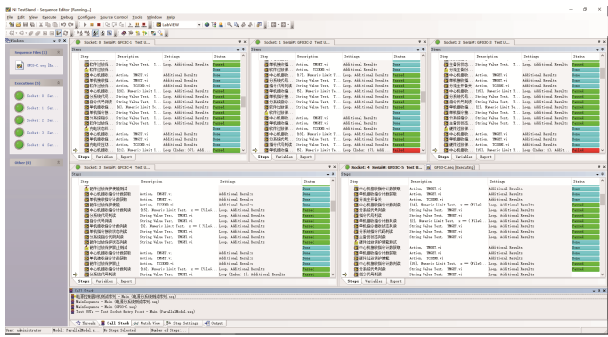


图6 并行自动化测试软件界面

量,局部变量可以传递给主序列调用的所有子序列。参量数据可以在所有子序列之间相互传递,子序列均可以在其测试步骤内调用这些参量,分系统测试序列内的参量定义如图7所示。

Parameters (‘相机分系统测试序列’)		
123 数传地检通道	0	Number (By value)
880 数传地检IP	""	String (By value)
123 S地检端口号	0	Number (By reference)
123 X地检端口号	0	Number (By reference)
123 CANPC端口号	0	Number (By reference)
880 CANPCIP	"10.10.17.25"	String (By value)
880 X地检IP	""	String (By value)
880 S地检IP	""	String (By value)
123 数据库驱动路径	0	Number (By reference)

图7 设备参数参量定义图

1.4.2 自动协作方案

并行测试要解决的另一个问题就是设备分时复用,例如高速数传解调器作为载荷图像数据的接收设备,单价比较昂贵并且在测试过程中不会全程使用,多星共享一台测试设备是一个经济效益比较好的选择。遥控遥测地检设备和导航模拟器在一些测试环节中也需要被分时复用。通过射频开关切换射频链路,在同一时刻一台测试设备只能被一颗被测卫星占用。TestStand 并行过程模型支持自定义自动协作组,可以通过上锁/解锁操作来锁定共享资源,而上锁和解锁是成对出现的,可以在其区间内的自动协作段添加占用设备的测试步骤,

如图8所示。以4颗卫星并行测试共享三台测试设备为例,采用自动协作的方式可以将测试时间缩短至串行测试的30%~50%,成本缩减为并行测试的25%。



图8 自动协作测试序列

1.5 数据档案建立

测试数据主要包括原始测试数据、测试过程数据以及测试结果数据。原始测试数据通过CANPC和遥控遥测地检设备两条通路传输至服务器数据库中。测试过程及结果数据存储至测试报告中。

原始数据存储的过程中,综合测试服务器作为一个数据处理中心,每台虚拟机内部均集成了MySQL与ClickHouse混合数据库。其中MySQL作为传统行式存储关系型数据库,主要用来存储配置文件信息、账户密码、遥控指令等信息。ClickHouse数据库为列式存储分析性数据库,用来存储遥测数据源码与解析值。

测试过程及结果数据主要包括测试系统配置设备参数、测试站名称、测试时间、测试项数目、测试结果、过程指令、过程重点遥测数据解析值、计算值、判读条件等。所有数据可通过配置选择是否记录至自动化测试报告中,自动化测试报告可通过TestStand报告配置菜单进行配置,在批产卫星自动化测试过程中,报告主要配置参数如下:

报告类型: ATML 5.00 Standards Report Document;

表格类型: tr5_report.xml;

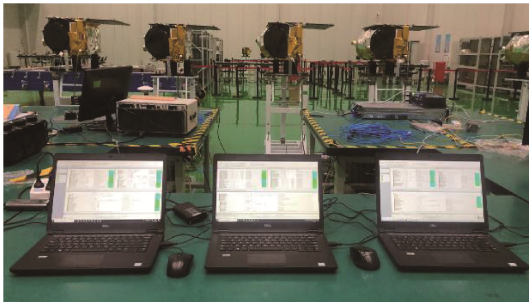
记录内容: 判读条件、所有测试结果、执行时间、在线报告支持、测试方法、测试属性信息。

表1 并行测试设备参数配置表

属性	GF03C-1	GF03C-2	GF03C-3	GF03C-4
CANPCIP	10.10.11.11	10.10.11.11	10.10.11.12	10.10.11.12
CANPC 端口号	6666	6670	6666	6670
X 地检 IP	10.10.11.21	10.10.11.21	10.10.11.22	10.10.11.22
X 地检端口号	6410	6510	6410	6510
数据库文件驱动路径	E:\数据库驱动文件\ GF03C-1.udl	E:\数据库驱动文件\ GF03C-2.udl	E:\数据库驱动文件\ GF03C-3.udl	E:\数据库驱动文件\ GF03C-4.udl
太阳阵 IP	10.10.11.61	10.10.11.61	10.10.11.62	10.10.11.62
太阳阵通道	Channel1	Channel2	Channel1	Channel2
数传地检 IP	10.10.11.71	10.10.11.71	10.10.11.71	10.10.11.71
数传地检通道	1	2	1	2

2 试验结果与分析

自动化测试系统研制成功后顺利应用到了吉林一号高分03系列卫星的脉动式产线当中。覆盖了卫星批产的测试全流程,系统运行稳定可靠,有效地替代测试人员进行遥控指令分发、遥测数据解析、存储、重访与判读、测试过程数据记录等操作。消除了人为操作失误、数据误判和漏判等质量问题。先后完成了累计63颗高分03卫星的测试。该系统相比较于传统的人工测试,在人员投入和测试时间方面均有一定的效率提升,其中人工效率提升最高12倍,时间效率提升最高27倍,综合效率提升最高54倍。经过实践发现,并行测试数量越多,往往综合效率提升越明显。统计如表2所示。除此之外,吉林一号红外遥感星等其他批产型号也顺利完成了批产自动化测试系统的部署,取得了可观的测试效率提升。卫星测试现场与自动化测试报告分别如图9与图10所示。



(a) 自动测试终端



(b) 被测卫星图

图9 9颗卫星并行自动化电测试

UUT Report	
Station ID:	DESKTOP-9Q16V5C
Test socket Index:	0
Serial Number:	GF03D-7 (30) A状态大颗电分系统测试
Date:	2021年12月17日
Time:	9:33:10
Operator:	administrator
Execution Time:	3364.92 seconds
Number of Results:	3097
UUT Result:	Passed
Path: Sequence: MainSequence	
C:\Users\Yanmei\Desktop\批产03电测自动化测试(工程文件)\A状态大颗电分系统测试(工程文件)\批产03电测自动化测试(工程文件)\	
名称	Result
Station ID:	DESKTOP-9Q16V5C
日期时间:	2021-12-17 09:33:11
测试序列:	01_10_11_01
测试设备ID:	98002494
测试通道:	Channel1
CANPC ID:	01_10_11_11
CANPC ID:	0608
测试ID:	01_10_11_21
测试ID:	0410
测试ID:	0
测试ID:	0
测试ID:	0
Status:	Passed
Parameters:	
Time:	00:10:11.01

图10 自动化测试报告截图

3 结论

在轨组网、快速发射需求的提出使批量化生产演变为卫星制造的新模式,传统的航天器制造模式不再适用。在工业4.0智能化生产、物联网等新技术快速发展的时代,应将卫星视作工业化产品,融合先进的智能制造理念和理念开展研制工作。批量化卫星测试系统设计的过程中摆脱了传统航天器测试系统的思维束缚,充分借鉴了先进的工业自动化测试管理技术。针对卫星批产过程中测试周期短、并发数量多、测试资源少的难点,提出了自动化测试、信息化数据管理的方法。攻克了多线程并行自动化测试、测试设备协作分时复用、混合式高性能数据库应用等关键技术,实现了减少大部分人工操作、建立测试全流程的数据档案、批产卫星综合测试效率呈倍数提升的目标。

参考文献

- [1] 龚其国,杨丽萍.“中国制造2025”背景下制造业的发展策略研究——基于社会网络分析和文本挖掘[J].科技促进发展,2020,16(8):917-923.
- [2] 刘艳红,黄雪涛,石博涵.中国“新基建”:概念、现状与问题[J].北京工业大学学报(社会科学版),2020,20(6):1-12.
- [3] 杨慧群,江文.我国商业卫星产业的现状及发展途径分析[J].中国工程咨询,2020(10):39-43.
- [4] 王庆成.航天器电测技术[M].北京:中国科学技术出版社,2007.

表2 自动化测试效率提升统计表

测试阶段	最大并行测试数量	人工测试		自动化测试		人工效率提升/倍	时间效率提升/倍	综合效率提升/倍
		人员	时间/h	人员	时间/h			
桌面分系统测试	6	2	36	1	2.5	2	14.4	28.8
总装A状态测试	2	2	12	1	2.3	2	5.2	10.4
总装B状态测试	2	3	3	2	1	1.5	3	4.5
热真空电测试	12	12	1	1	0.5	12	2	24
力学试验电测试	2	2	2	1	0.5	2	4	8
出厂测试	6	2	27	1	1.5	2	18	36
发射场综合电测试	9	2	40.5	1	1.5	2	27	54

- [5] Huang Lianbing, Pan Shunliang, Li Yuan, et al. An integrated testing system for spacecraft based on DDS adaptive QoS[C]//Proceedings of 2018 3rd International Workshop on Materials Engineering and Computer Sciences(IWMECS 2018),2018:402-407.
- [6] Liu Guangtong, Xu Kai, Guo Tao, et al. The test and verification methods for the transportation vibration absorption system of spacecraft[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2020,727(1): 012018.
- [7] Wang Junwei, Zhang Lei, Xiao Qingsheng, et al. Research on key techniques of the verification and testing system for spacecraft propulsion[J]. MATEC Web of Conferences,2018,179.
- [8] 高括,刘磊,杨杰峰,等.适用于多星并行测试的通用测控地面测试平台设计与实现[J].计算机测量与控制,2019,27(1):1-4,12.
- [9] 张朝路,刘聚,田瑞甫,等.卫星数传产品自动化测试系统设计[J].数字技术与应用,2019,37(4):133-134.
- [10] 高括,刘会杰,刘磊,等.批量卫星流水线自动化测试系统研究[J].计算机测量与控制,2020,28(8):13-17.
- [11] 葛建云,王建军.自动化测试系统在环境减灾-1A、1B卫星中的应用[J].航天器工程,2010,19(2):121-127.
- [12] 蔡成龙.卫星自动化测试数据分析系统设计与实现[D].西安:西安电子科技大学,2014.
- [13] 戴洞峰,袁媛,冯孝辉.基于工作流的小卫星自动化测试系统设计方法研究[J].计算机测量与控制,2011,19(12):2912-2915.
- [14] 王志勇.构建基于小卫星的自动化综合测试系统[D].西安:西安电子科技大学,2006.
- [15] 徐婧,邢斯瑞,刁国影,等.商业卫星自动化测试平台设计与实现[J].电子技术应用,2020,46(7):78-83.
- [16] 胡典钢. TestStand工业自动化测试管理[M].北京:电子工业出版社,2016.

(收稿日期:2022-12-08)

作者简介:

袁建富(1992-),通信作者,男,硕士研究生,助理研究员,主要研究方向:卫星测试设备、整星测试、自动化测试系统开发等,E-mail: Yuanxs0316@163.com。

易进(1989-),男,硕士研究生,副研究员,主要研究方向:卫星总体设计及卫星测试方案总体设计。

李鑫(1993-),男,硕士研究生,实习研究员,主要研究方向:卫星测试系统研发。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所