

批量卫星流水线自动化测试系统研究

高 括^{1,2}, 刘会杰^{1,2}, 刘 磊^{1,2}, 杨杰峰^{1,2}, 张 铭^{1,2}, 潘小彤^{1,2}

(1. 上海微小卫星工程中心, 上海 201203; 2. 中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 201203)

摘要: 随着世界各国快速进入太空的需求增加, 卫星大规模组网应用不断增多; 批量生产、并行测试、一箭多星、密集发射已经成为当前卫星技术的发展趋势, 对卫星的批量快速测试提出了新的需求; 为了提高批量卫星的测试效率、缩短卫星研制周期、降低卫星研制的测试成本, 研究并建立一套适用于批量卫星流水作业自动化测试系统至关重要; 通过对批量卫星 AIT 流程的优化设计, 提出了一种适用于批量卫星流水作业自动化测试系统的体系设计方案, 为批量卫星的流水作业自动化测试系统的建设提供参考。

关键词: 批量卫星; 流水作业; 自动化测试

Research on Pipeline Automated Test System for Batch of Satellites

Gao Kuo^{1,2}, Liu Huijie^{1,2}, Liu Lei^{1,2}, Yang Jiefeng^{1,2}, Zhang Ming^{1,2}, Pan Xiaotong^{1,2}

(1. Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 201203, China;

2. Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China)

Abstract: With the increasing demand for fast access to space in the world, the use of satellite large-scale networking is increasing. Mass production, parallel testing, one rocket & multi-satellites and dense emission have become the development trend of current satellite technology, and new requirements for rapid batch testing of satellites are put forward. In order to improve the efficiency of satellite testing, shorten the satellite development cycle, and reduce the cost of satellite testing, it is important to study the automated test system for batch satellite pipeline operations. Through the optimization design of AIT process of batch satellites, a scheme for automatic test system of batch satellite flow operation is proposed, which provides reference for automatic test of flow process of batch satellites.

Keywords: batch of satellites; flow process; automated test

0 引言

随着小卫星大规模组网应用的不断增多, 传统单颗卫星地面测试系统已不能满足批量化、并行测试的需求^[1]。卫星数量增多、测试要求逐步提高, 测试步骤繁琐、测试时间紧张。传统卫星测试过程, 各个测试环节均需人工操作, 效率低下, 测试系统集成度低, 手动测试操作复杂, 数据记录难度高, 测试记录准确度低, 测试耗时间长^[2-5]。因此, 迫切需要研究一套自动化程度较高的多星并行自动化测试系统, 同时支持多颗星的流水化测试。

国外现状: 卫星总装、测试与试验 AIT (assembly integration & test) 是卫星研制过程中至关重要的环节之一。国外快速 AIT 已发展多年且颇具成效, 已逐渐由试验验证向实际应用转变, 具有代表性的是针对美国“快速响应太空”(ORS) 计划的快速 AIT^[6]。

1996 年, 在美国国防部自动测试系统执行局 (DOD ATS EAO) 的协调下, 美军与工业界联合提出了下一代自动测试系统 Nx-Test 的体系结构, 卫星并行测试技术被列为关键技术之一^[7]。

收稿日期: 2019-12-04; 修回日期: 2020-01-17。

作者简介: 高 括(1987-), 男, 河南商丘人, 硕士, 工程师, 主要从事卫星测控总体设计、整星自动化测试系统设计等方向的研究。

国内现状: 当前, 国内几家卫星总体单位都承担过了某些星座模式卫星的研制任务, 虽然有些任务组网卫星总的数量多, 但在研制计划上并行研制的卫星数量不多。目前国内卫星测试现状:

1) 不具备流水作业的测试模式, 单机、分系统、整星均在相同桌面上串行测试;

2) 不具备整星级多星并行测试的能力, 自动化程度普遍较低。目前测试系统软件仅仅局限于单星或多星串行测试, 还不具备多星并行自动化测试的能力, 无法完成卫星快速自动化测试^[8-9]。

1 体系设计

1.1 批量卫星流水并行测试系统的组成

为满足批产卫星流水并行测试需求, 为测试提供方便、可靠的服务, 批量卫星流水并行测试硬件系统分为综合测试间、单机桌面联试区、装星区、模飞区、磁试验区、EMC 试验区、热试验区、力学试验区、老练及贮存区以及 UPS 供电系统等部分, 各部分内部设备通过局域网交换机连接在一起, 交换机之间通过以太网连接, 距离较远的跨区连接采用的光纤连接, 并且每个卫星操作区域均配备了至少一个语音调度工位。批量卫星 AIT 各阶段并行连接总体设计架构如图 1 所示^[10-11]。

批产卫星流水并行测试软件系统主要由主控中心、测

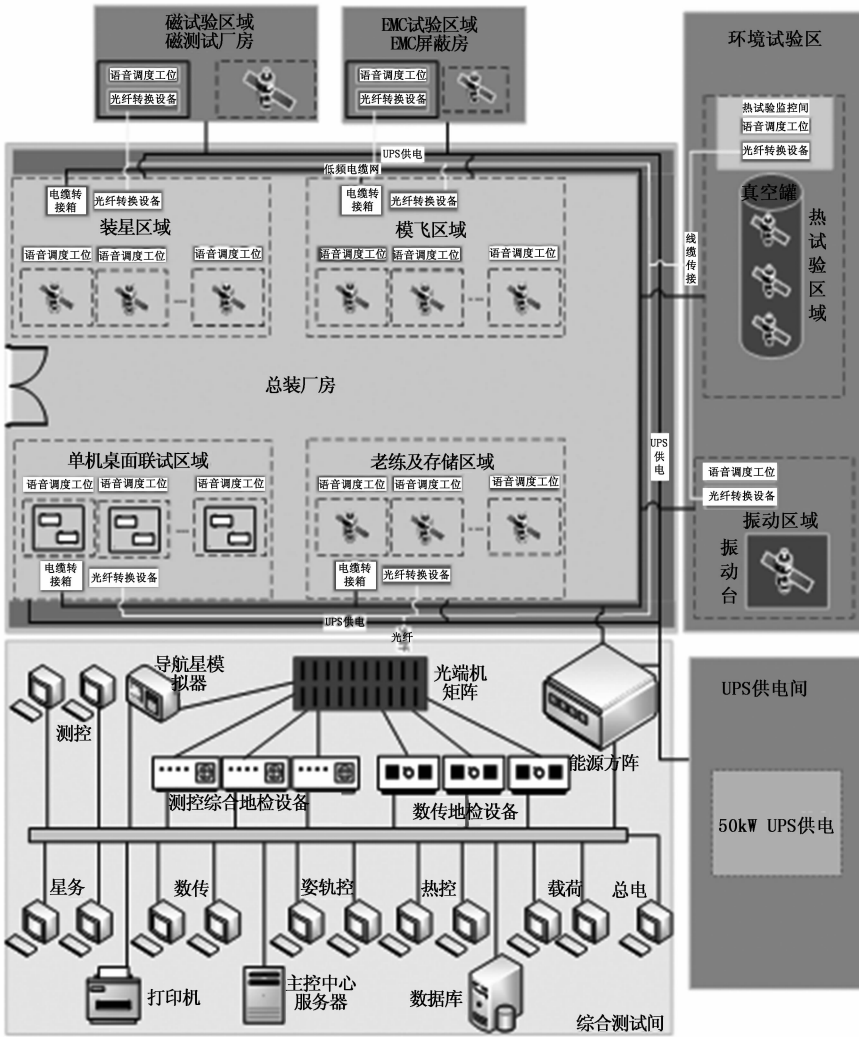


图 1 批量卫星 AIT 各阶段并行连接总图

试控制台模块、数据采集存储模块、自动判读显示模块、查询分析模块、通用测控前端软件以及星务前端模块组成。每一个模块都包含配套软件和硬件，7 部分的软件相互配合，共同组成“多星并行化测试系统软件”。除此之外还需要多星并行化测试硬件设备系统、GPS 地面校时系统、能源安全保障系统等其他设备的支持。

批量卫星流水自动化测试的一般过程包括任务提出、测试序列生成、序列执行和结果分析 4 个阶段，将测试序列部分或整体传入被测对象，执行后将实测结果和理论结果进行比较，给出最终测试的结论，批量卫星流水自动化测试过程如图 2 所示。

批量卫星流水自动化测试软件系统包括基础测试用例库管理模块、测试任务特征提取模块、测试序列管理模块、结果分析模块 4 部分组成。

基础测试用例库管理模块主要是存储卫星测试基本用例，是测试系统实现自学习的

基础，在测试过程中会一直不间断地补充完善基础测试用例库。

测试任务特征提取模块用于对测试任务做一些必要的处理，即测试任务预处理，预处理过程对测试任务进行一次大致的筛选，并将筛选的结果作为测试任务的待选特征集合。

测试序列管理模块，根据单元模块的测试时间和复杂度不同，结合序列优化方法，自动生成测试主机或者卫星中心计算机识别的可执行测试序列。

结果分析模块包括指令执行结果的自动化判读，测试数据的自动监视、故障诊断报警以及生成实测与理论对比报告 4 个部分。

1.2 批量卫星并行化任务管理与调度

1) 系统支持人机交互界面操作制定测试计划；

2) 系统支持自动按照测试序列顺序执行测试任务；

3) 调度有限测试资源的共享和并行测试，并避免资源冲突，优化测试效率。

批量卫星自动化测试系统，以单星测试系统为基础，扩展为可多星并行测试的开放式系统；另外，对数据的管理和监视显示增加了系统的开放性和兼容性，信息交互良好，数据协议一致，集中判读和处理为卫星联合判读和分析提供平台。

批量测试自动化系统的研究体系，以系统改进和搭建为核心，并行化的管理和调度为资源调度保障，多星测试产生海量数据的处理是系统改进和测试的最终分析对象，使多星测试和单星测试的测试手段一样更加便捷。批量卫星并行化任务管理与调度体系如图 3 所示。

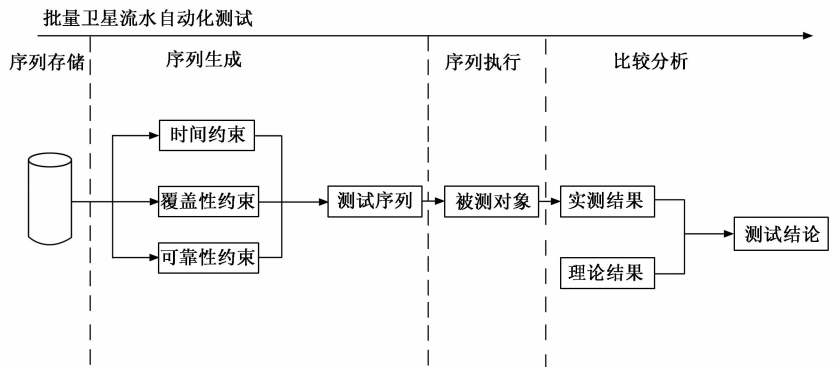


图 2 批量卫星流水自动化测试过程示意图



图 3 批量卫星并行化任务管理与调度体系

1.3 卫星分级并行流水自动化测试

在卫星组批研制过程中, 每台卫星单机交付验收以后, 需要在测试厂房相应的单机工位上进行功能测试, 完成测试后进行单机的接口对接测试。在单机功能状态正常的情况下, 接入分系统测试环境, 进行分系统的功能及性能的验证。完成验证的分系统进入整星的测试工位或整星的装配环节。单机、分系统及整星三层测试环节逐级递进、相互独立、互不干涉、流水作业, 并采用并行自动化测试方法, 从而保障组批研制星并行研制的测试需求。组批卫星分级并行测试流程如图 4 所示。

1.3.1 批量卫星单机级自动化测试

单机级自动化流水测试以测控单机为例, 测控单机指标验收自动化测试系统主要用于分系统单机交付时的验收测试, 测试指标包括遥控误码率、遥测误码率、下行载波频率精度、下行载波频率稳定度、输出功率、下行载波抑制度、带外杂波抑制、频谱对称性、下行信道功率比、捕获门限测试、捕获时间测试、闪断重捕时间测试、上行信号功率比测试等。因测控单机指标验收时单机数量和测试指标都比较多, 测试方法相对固定, 故适合采用自动化测试系统实现其测试, 以缩短测试时间、提高测试效率, 同时减少随机误差、提高测试精度。

测控单机指标验收自动化测试系统采用 PX-Ie 架构实现^[1], 结合单机自动测试软件, 其整体框架如图 5 所示。

测控单机指标验收自动化测试系统组成如下:

- 1) 系统采用 PXIe 架构, 可兼容多种测试设备;
- 2) 矢量信号发生器: 可提供射频信号的输出, 实现最佳动态范围性能;
- 3) 矢量信号分析仪: 用于分析射频信号的频域特性, 可对应答机的信号幅度(功率、上行信号功率比)、载波抑制度、杂波抑制度、频率(频率精度、稳定度)、调试信号幅值、频率差、

信噪比、通道能量、相位噪声等单机指标进行测量;

- 4) 测控综合地检设备: 上下变频、基带处理、高精度铷钟;
- 5) 示波器: 用于完成信号时域分析, 测试指标包括上升时间、下降时间、脉宽、延迟时间等;
- 6) 逻辑分析仪: 用于对多通道数字信号逻辑关系进行测试;
- 7) 直接遥测模块: 用于对低频遥测量进行直接采集, 包括多通道模拟量、数字量等, 从而完成被测应答机低频信号的采集测试;
- 8) 直接遥控模块: 提供多路遥控指令脉冲数据, 并预留多路 I/O 扩展接口;

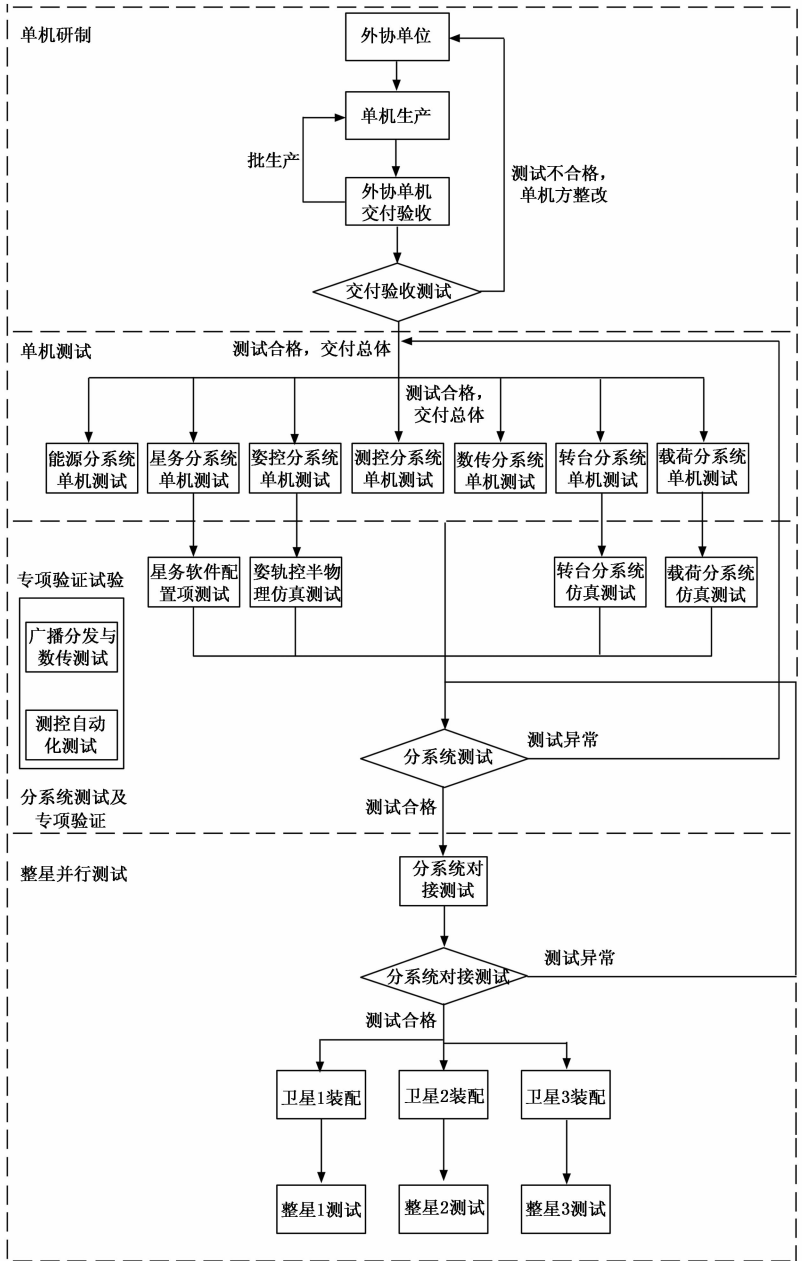


图 4 卫星分级并行测试系统流程示意图

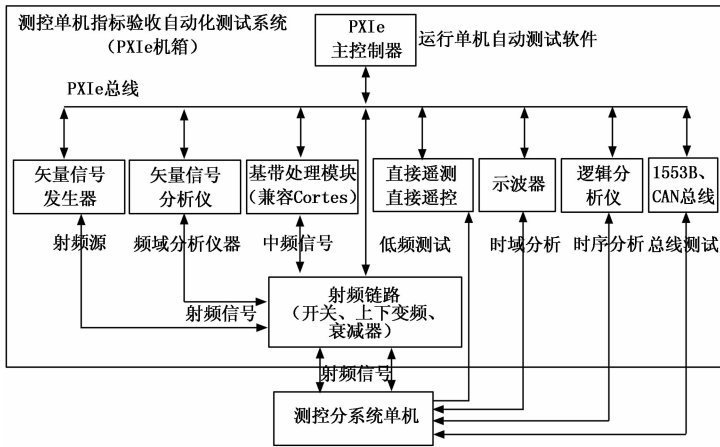


图 5 测控单机指标验收自动化测试系统构成图

测控分系统多星测试流水作业具体流程如图 7 所示。

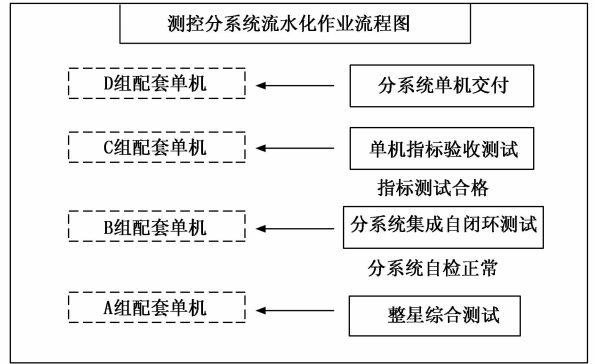


图 7 批量卫星测控分系统测试流程图

9) 总线测试：用于完成被测应答机的 1553B、CAN 总线通讯测试；

10) 射频链路：用于实现被测信号的开关切换以及功率调节。

测控单机自动化测试软件：

在上述硬件组成的基础上，配置一套通用自动化测试软件以满足自动化测试需求，其架构如图 6 所示。

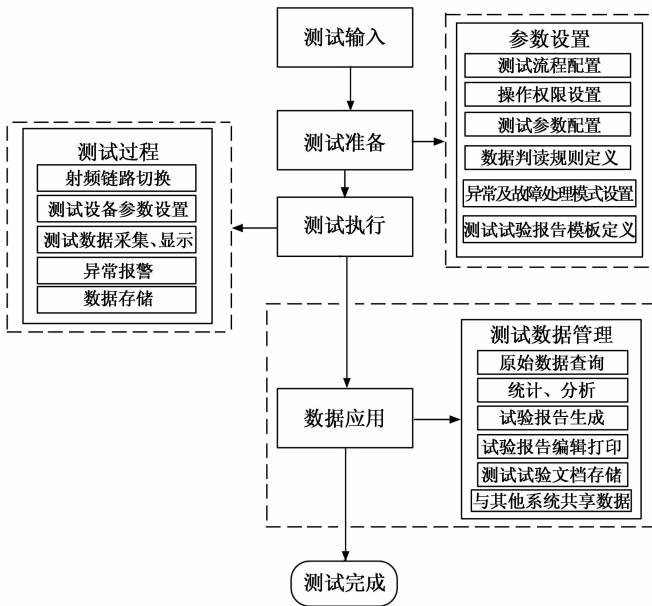


图 6 测控分系统单机自动化测试软件构架图

1.3.2 批量卫星分系统级自动化测试

卫星一般由星务、能源与总体电路、测控、热控、姿轨控等分系统组成，分系统级自动化流水测试系统以测控分系统为例进行介绍。测控分系统多星测试流水作业流程如下，在单机承制方交付分系统单机后，首先进行各个单机性能指标的验收测试，指标验收通过后，进行分系统集成自闭环测试，最后接入整星进行整星级综合测试。

1.3.3 批量卫星整星级自动化测试

整星级的批量卫星自动化测试，是在各个分系统完成并通过分系统级测试的基础上所进行的整星系统级测试。整星级测试任务是检验卫星各组成成分系统之间的连通性、兼容性，检验卫星整体功能的准确性，以及检验卫星是否达到所要求的技术指标。整星级卫星测试是整个测试过程中的必不可少的阶段，做好整星级卫星测试对发现隐藏的问题和风险、确保卫星按照既定指标要求稳定运行具有重要的作用。

卫星测试工作流程如下：

1) 遥控发送过程：

(1) 测试控制台分系统配置好指令序列和测试用例后，采用自动/手动的方式发送指令到主测试处理机。因为每颗卫星测试任务不同，所以每个测试控制台设备单独负责一颗卫星的指令发送任务。

(2) 主控中心（或称主测试处理机）接收测试控制台发送的上行指令，通过解析分辨发送目的卫星和通道并将其转发给星务前端或遥控前端。为了防止故障影响，每个主控中心负责一颗卫星的测试任务。

(3) 星务前端接收主控中心发来的指令数据，生成指令发送队列。测试人员可以选择自动或手动发送指令到卫星。对于自动发送的指令，星务前端还会监控验证指令的执行结果。

2) 遥测接收过程：

(1) 卫星下发的测试数据，从地测串口下发到星务前端分系统，星务前端实时解帧显示并预判相关信号量的值是否处于设定的预期值中，同时将源码转发至主测试处理机。为了保障数据运算效率，星务前端采用 Storm 分布式实时数据处理集群以达到数据实时解帧显示的要求。

(2) 主测试处理机分系统实时接收星务前端下发的地测源码和遥控前端下发的遥测源码并转发至自动判读及显示终端和数据采集存储系统。

(3) 自动判读及显示终端接收主测试处理机转发的下行数据,实时解帧并显示给测试人员查看,同时实现对自定义关键信号的自动判读,对异常的数据作自动报警。由于自动判读及显示终端需要进行每秒钟每颗卫星每个通道多至2 000个信号量实时解帧、显示、判读,运算量大,对时效性要求也高,因此该分系统也采用 Storm 分布式集群,利用 Storm 技术进行分布式实时处理。

(4) 数据采集存储系统跟自动判读及显示终端同时接收主测试处理机转发的下行测试数据并实时解帧存储。解帧运算量也达到自动判读及显示终端数量级且需要将同数量级的数据进行存储至数据库,频率高,数据量大,要及时处理完每一帧数据,不遗漏数据,保证数据的完整性,也采用 Storm 这种高容错及安全性分布式实时处理技术。

(6) 查询分析终端主要用来对存入数据库中的测试数据的查询和对比分析,初次之外还涵盖了数据格式配置、关键代码配置等各类配置功能。查询分析终端由 B/S 架构组成,1台服务器作为 Server 端部署应用,供任意一台局域网内电脑通过浏览器访问查询。

1.4 分布式并行流水自动化测试

多卫星批量快速测试实现应对高密度发射任务,满足并行测试需要,分布式批量并行测试的实现途径如图8所示。

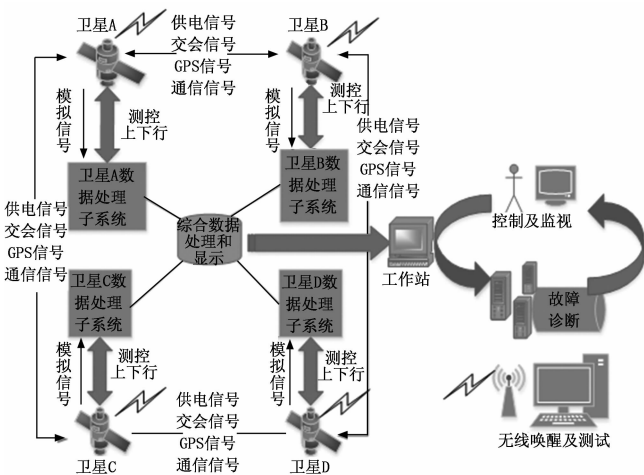


图8 批量卫星测试系统框架

批量卫星测试系统从功能上主要分为总装试验、综合测试两大部分。

1) 总装试验部分同时支持多颗卫星的总装试验、热真空试验、力学试验等;

2) 综合测试间与总装试验部分通过光纤连接,综合测试间主要完成卫星测试设备的管理控制、遥控指令上行、遥测数据的接收、处理和分发,并完成遥测原始数据以及解析后的数据的存储、查询服务;

并行流水自动化测试模式下,对卫星历史遥测数据服务器的接口进行统一设计,所有卫星综合测试平台通过局

域网实现信息交互,完成支持多种型号卫星遥测数据的并行接收、处理和可视化。

2 试验验证

以本文提出的批产卫星流水并行测试系统体系建立的批量卫星测试系统目前已经成功应用于某组网卫星的各阶段的测试任务,累计服务十几颗卫星,前期能够支持12颗星并行流水测试。非常好地完成了组批卫星流水作业并行测试任务,成功完成多星并行测控指令上注,多颗卫星并行测试的遥测数据接收、解析、转发、存储等,目前系统运行稳定可靠,大大缩短了批量卫星测试周期。

3 结束语

针对组网卫星研制周期短、测试任务重、测试人员短缺的特点,设计了一套批量卫星流水作业自动化测试系统体系架构,详细介绍了批量卫星流水并行测试系统组成、任务管理与调度、卫星分级并行流水自动化测试等。实现了提高批量卫星的测试效率、精简了测试人员队伍、间接缩短了批产卫星的研制周期,达到了很好的使用效果,为后续批量卫星流水作业自动化并行测试系统的完善设计提供参考。

参考文献:

- [1] 高括,刘磊,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.
- [2] 李培华.多星并行测试探讨[A].中国宇航学会飞行器总体专业委员会论文集[C]北京:中国宇航学会,2005:1034-1040.
- [3] 吴国强.编队小卫星星间通信系统设计方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009:2-3.
- [4] 程城,仇梦宇.面向批产化的小卫星自动化测试系统设计研究[J].计算机测量与控制,2018,26(2):5-8.
- [5] 朱小平.并行测试技术及其应用研究[D].西安:空军工程大学,2005.
- [6] 李丽琼,曾春平,吕高见.小卫星AIT流程简化探讨[J].航天器工程,2015,2(1):120-125.
- [7] 李文雯,曾鸿,等.卫星并行测试中测控前端通用化设计[J].航天器工程,2015,24(6):129-133.
- [8] 赵瑞峰,董房,陆洋,等.卫星通用自动化测试系统体系结构研究[J].信息技术,2011(1):65-68.
- [9] 李腾,王礼亮,杨勇,等.卫星导航终端批量测试系统设计[J].导航定位学报,2016,4(2):75-80.
- [10] 王建军,陈逢田,李培华.卫星星座综合测试系统研究[J].计算机测量与控制,2011,19(1):7-13.
- [11] 肖川,李立.多星并行测试技术在环境减灾-1A、1B卫星测试中的应用研究[J].航天器工程,2009,18(6):110-117.