

适应于组网卫星的数字化及自动化测试技术研究

张福桢, 闫海平, 曾志敏, 周鑫, 史礼婷, 吴晓宇

(航天行云科技有限公司, 武汉 430040)

摘要: 随着各类卫星星座计划的提出和部署, 航天卫星数量的逐步增加, 传统的卫星研制模式已逐渐不能满足卫星快速发射需求, 为缩短卫星研制周期, 卫星批量化、自动化测试手段逐渐成为新形势下卫星研制的关键一环; 面向当前微小卫星高密度快速组网应用的需求, 结合批产化卫星技术特点, 研究了一种适用于组网卫星的数字化和自动化测试技术; 对卫星综合测试系统架构进行优化, 可满足多星批量化及并行测试; 在卫星综合测试系统中增加自动化测试功能, 可通过在线配置自动化序列实现卫星自动化测试; 研发了一种数字卫星仿真测试平台, 可用于卫星单机产品齐套前整星功能开发、测试等; 克服了传统卫星研制周期长、测试过程数据判读和数据处理难度大以及重复性工作较多的缺陷。

关键词: 数字卫星; 批量化测试; 自动化测试

Research on Digital and Automatic Test Technique for Networking Satellites

ZHANG Fuzhen, YAN Haiping, ZENG Zhimin, ZHOU Xin, SHI Liting, WU Xiaoyu

(Leobit Technology Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: With the proposal and deployment of various satellite constellation plans and the gradual increase of the satellites, the traditional satellite development model has been unable to meet the rapid launch requirement of the satellite. Under the current situation, the batch and automatic testing methods for the satellite have gradually become a crucial step to shorten the satellite development cycle. Focusing on the demands of networking satellites high-density rapid launch, combining the technique characteristics of the batch satellites, a digital and automatic testing technology is presented to be suitable for the networking satellites. The architecture of the satellite comprehensive test system is optimized to meet the multi-satellite batch and parallel testing; the automatic test function is added to the satellite comprehensive test system, and the automatic satellite test can be realized by the online configuration of the automatic sequence; A digital satellite simulation test platform is developed, which can be used for the development and testing of the whole satellite function before the stand-alone products for the satellite are completed. Compared with the presented methods, it overcomes the defects of long period of the traditional satellites, difficult data interpretation and processing in the test process, and many repetitive tasks.

Keywords: digital satellite; batch test; automatic test

0 引言

近年来, 随着航天技术的飞速发展, 航天产品逐渐渗透到以通信、导航、遥感为代表的典型应用场景的各个领域。数据业务数据量的增加和对业务时间分辨率容忍度的降低使得单颗卫星工作模式难以满足当前的业务需求。因此, 以多星组网协同工作为基础的卫星星座有利于提高系统覆盖特性、缩短重访周期、增加数据落地速度。因此, 随着卫星的高集成度、轻量化以及运载能力的提升, 一箭多星、卫星批量化成为新的发展趋势。星链(Starlink)计划共发射4.2万颗互联网通信卫星构建全球互联网通信天基网络, 为适应卫星组网需求, 星链建立了卫星生产线, 通过卫星自动化测试手段每月可实现接近120星的批产能力^[1-2]。

早期, 卫星主要采用定制化模式, 地面综合测试采用串行测试方式^[3], 单次测试仅能进行一个被测卫星单元, 进而造成卫星地面测试周期占整个卫星研制周期接近70%, 且卫星测试主要采用人工操作和判读的方式, 需要大量的人力投入, 这是传统卫星研制周期长、成本投入高的最主要原因^[4]。随着国内外微小卫星星座的规划和应用, 采用自动化测试手段开展卫星并行测试, 对于缩短卫星研制周期、实现星座快速组网和应用具有重要的价值。然而, 目前国内卫星在卫星自动化、批量化和并行化地面测试方面的研究尚处于起步阶段^[5-6]。2009~2011年, 航天东方红卫星有限公司提出基于工作流的分布式小卫星自动测试系统^[7-8], 小卫星自动化综合测试开始得到实践。在此基础上, 对卫星测试系统布局、远程测试网络布局等地面测试总体技术方案进行优化^[9], 并研制了智能化测试系统^[10]用

收稿日期: 2022-03-16; 修回日期: 2022-05-17。

基金项目: 湖北省军民融合重点研发计划项目(2020BIB003)。

作者简介: 张福桢(1992-), 男, 湖南怀化人, 博士研究生, 工程师, 主要从事卫星总体设计方向的研究。

引用格式: 张福桢, 闫海平, 曾志敏, 等. 适应于组网卫星的数字化及自动化测试技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(12): 18-22, 50.

于卫星单机验收测试、整星电性能测试等环节。上海微小卫星工程中心对批量卫星流水线自动化测试系统进行研究^[11-12], 对卫星批量流水式自动化测试系统的体系进行设计, 并应用于卫星分级测试中。上述研究虽然在一定程度上提高了卫星测试效率, 但研制仍旧采用串行工作方式, 测试工作需要待产品齐套交付后方可开展后续 AIT 工作, 且部分需要交互性的测试仍旧需要采用手动测试、人工判读的方式进行。进一步的, 银河航天、九天微星、时空道宇以及航天科工空间工程有限公司等单位在多个地方建立卫星 AIT (总装、集成和测试) 厂房和柔性智能生产线, 并在厂房内部署自动化生产和测试设备, 但在实际卫星研制过程中, 仍旧以手动方式、串行测试为主, 卫星测试自动化程度较低^[13]。

本文提出了基于数字卫星的批量卫星自动测试技术, 通过对综合测试系统架构进行优化设计, 可满足单星或多星自动化测试; 所提出数字卫星仿真控制平台, 通过单机模拟、分系统模拟可在单机研制阶段便完成卫星的软件测试工作, 对卫星整体功能进行提前测试、验证和优化, 可大幅缩短后续测试时间。此外, 通过在测试系统中加入机械臂等自动化设备, 借助综合测试系统, 可实现对批产卫星的自动测试。

1 测试总体方案设计

随着微小卫星组网应用需求的不断扩张, 卫星批量化研制、快速发射成为必然趋势, 而传统的卫星串行测试模式存在步骤繁琐、重复性工作多、人力成本投入高等缺陷, 无法满足快速组网需求, 并且目前国内卫星测试以人工操作为主, 操作流程复杂, 耗费时间长, 记录准确度低。此外, 传统的基于真实单机的联调测试对各单机研制进度同步性依赖性较高, 而卫星研制过程中, 各单机继承性不同, 研制进度差别较大, 进而导致星务软件反复更改、软件版本短时间内无法固化。基于数字卫星的地面自动化测试技术借助数字孪生技术, 以数字卫星代替真实卫星进行主要功能、接口协议的调试和测试。

1.1 综合测试系统架构设计

为满足卫星批量化研制和测试需求, 同时兼顾型号发展的拓展需求, 测试系统架构按照“测试可自动、并行可拓展、远程可交互”原则进行设计。

1.1.1 综合测试系统组成

如图 1 所示, 测试区域由卫星测试区域和测试控制区域两部分组成。

卫星测试区域主要包括卫星、射频专检设备 (如测控专检、数传专检、GNSS 信号源等)、地面供电设备、星地 CAN 接口以及测试交互设备 (操作机械臂及其控制设备等) 等。单颗卫星采用独立供电, 供电设备可通过测试系统上位机进行控制; 星上射频单机通过射频切换设备与地检设备间实现无线通信。测试时, 对设备切换矩阵设置不同参数, 可实现地面设备与不同卫星间的无线通信, 从而

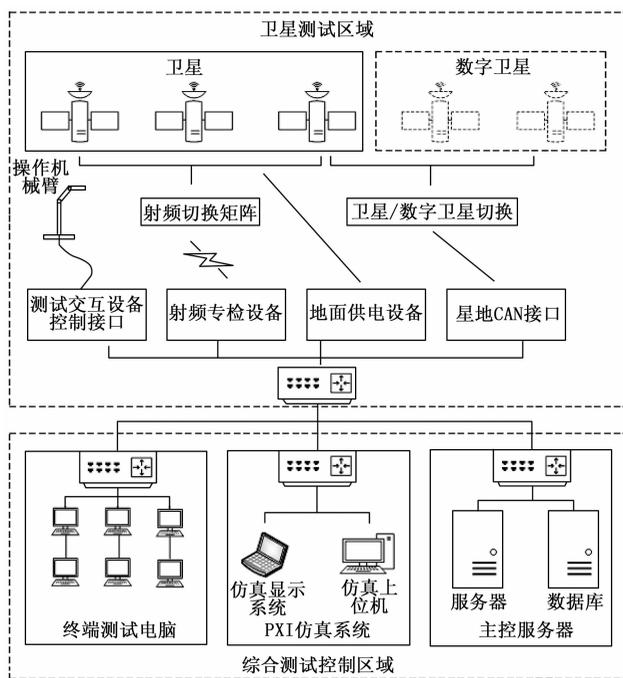


图 1 卫星综合测试系统架构图

实现多星并行测试^[14]。此外, 卫星测试区域同时部署数字卫星, 用于整星数字化测试以及卫星测试过程中的排故等, 可用于部分代替电性星的功能。

测试控制区域包括主控服务器、PXI 仿真设备、以及终端测试电脑等。主控服务器运行地面测试软件, 负责卫星型号管理、遥控指令发送、遥测参数解析、自动化测试任务执行监控、测试数据保存、用户权限管理、遥控指令配置、遥测数据协议配置、参数的实时订阅、历史数据查询和分析等^[15]。PXI 仿真设备主要为卫星测试时提供相应的时间、轨道、姿态等信息, 以模拟卫星飞行状态; 终端测试电脑主要用于测试的操作等。由于不同卫星数据格式、解析方式、工程值转换的不同, 为保证系统通用性^[16-17], 遥控指令和遥测数据解析按照相同数据格式配置的方式进行, 并存储在数据库中。当遥控指令和遥测数据发生变化时, 只需要修改配置文件即可实现。

相比传统的卫星综合测试系统^[9,11-12], 本方案在测试区域增加操作机械臂等测试交互设备及其控制接口, 用于卫星测试过程中单机交互操作。例如进行星敏有效性测试或极性测试中, 要求将星模拟器靠近星敏感器, 判断星敏数据状态是否满足预期。传统方法采用手工操作, 既存在一定的安全风险, 也降低了测试效率。将操作机械臂的上位机集成到综合测试系统中, 使用综合测试系统统一管理, 可用于手动或自动化测试过程。

1.1.2 综合测试系统工作方式

综合测试系统由地面测试软件进行管理, 基于 B/S 架构实现测试设备资源分配和计划调度、数据查询和分析、遥控指令发送和遥测数据解析、软件上注、自动化测试指

令配置和执行等，可满足单星或多星测试。

单星测试可采用手动或自动方式进行。手动测试时根据测试任务需求发送遥控指令，并对遥测数据结果是否符合进行人工判读。此外，测试系统可对遥测数据有效范围进行配置和异常数据预警提示。自动测试则主要通过测试序列方式进行，测试序列可在线或离线配置，对指令执行逻辑、时序、执行条件、循环次数、判定依据等进行规定，综合测试系统则可自动执行指令发送、遥测数据判读以及异常数据预警等功能，并生成测试报告，自动测试流程如图 2 所示。

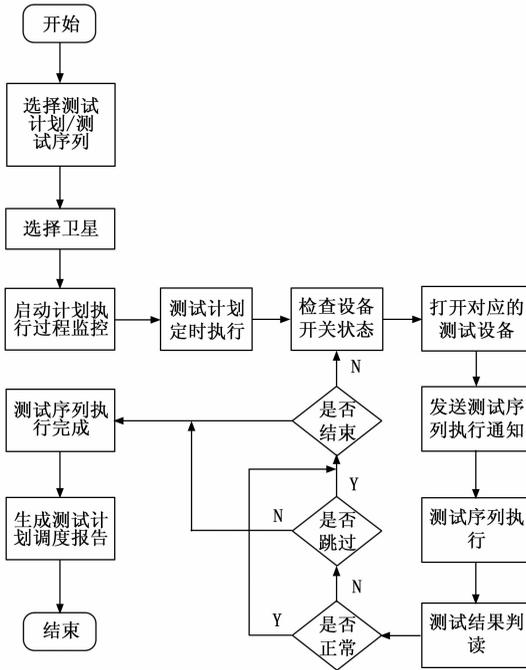


图 2 卫星自动化测试流程示意图

多星并行测试以单星测试为基础，在不同测试区域部署卫星及相应测试设备，并通过星地有线或无线接口连接到服务器。如图 1 所示，地面测试系统和不同卫星间的通信通过星码进行标识，星码具有唯一性^[18]，为综合测试系统数据分类处理的依据。发送遥控指令时，综合测试系统根据所选卫星型号对遥控指令进行再组包，增加星码信息

并发送至相应卫星，只有本星预置星码与指令中星码信息匹配，卫星才会执行指令；星务处理遥测数据时，在遥测数据包中同样增加本星星码，综合测试系统根据星码对遥测数据进行解析、分发和存储。并行测试时，在终端测试电脑选择不同卫星型号，便可针对该星按照手动或自动测试方式进行测试。

1.2 数字卫星仿真测试平台

数字卫星是借助数字孪生技术，采用数字化方法模拟卫星物理状态，实现对卫星接口、功能、数据处理等的封装和应用^[19]。利用数字卫星模拟星务计算机硬件平台和操作系统软件平台，可用于单机齐套前星务软件逻辑控制层面软件的调试和测试，如单元测试、配置项测试、星务各模式切换逻辑测试、单机或分系统管理测试、分离时序测试、单机遥控指令和遥测数据测试、分系统集成测试等。另一方面，数字卫星还可用于通信卫星组网状态下多节点通信模拟测试等。

如图 3 所示，基于数字卫星的仿真测试平台主要由服务端与客户端组成。客户端主要实现命令行界面以及进行通信序列化和解序列化。数字卫星主要运行在服务端内，集成星务计算机操作系统模拟、硬件模拟、应用层模拟以及各单机和分系统模拟等，用于模拟卫星飞行状况；同时集成数字卫星多种模型库（如姿态动力学模型库、轨道模型库等），为数字卫星仿真提供条件。综合测试系统和星务软件应用层模拟进行数据交互，实现数字卫星的遥控指令发送和遥测数据接收和处理。

单颗数字卫星进程部署于单个 docker 内，并使用 Kubernetes 进行动态管理。单星数字化测试时，通过设置模型库参数，可为单机模拟、分系统模拟提供输入，并以闭环方式进行实时更新。例如，调整模型库中姿态轨道模型中时间、轨道和初始姿态等参数，模拟卫星星箭分离后整星状态，结合其它模型库，进而模拟卫星在各模式下姿态轨道变化、卫星能源平衡、卫星表面热变化、过境特性等。数字卫星和真实卫星间通过星码建立一一对应关系，可通过调动多个 docker 内的数字卫星进行模拟组网测试。数字卫星支持内部授时和外部授时两种。单星模拟测试主要采用内部授时进行控制，多星模拟测试主要采用外部授时进

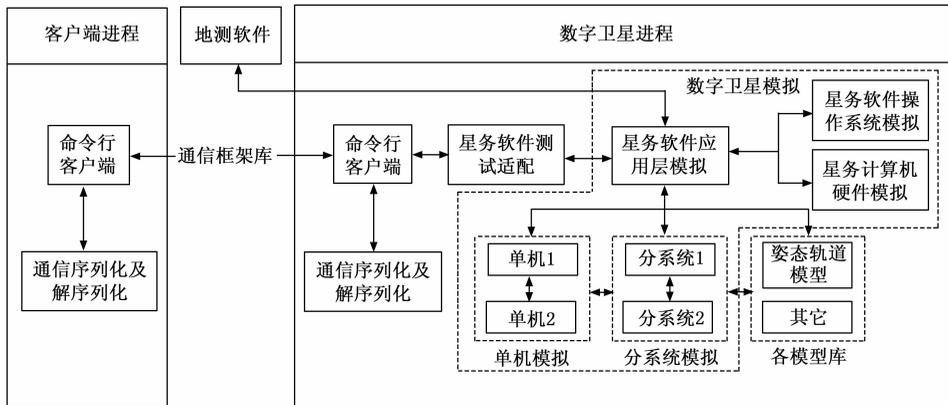


图 3 数字卫星仿真测试平台架构图

行控制, 以保证多星时间统一性。

2 卫星测试流程

通常卫星一般由结构与机构、电源、热控、综合电子、测控、姿态与轨道控制和载荷分系统等几部分组成^[20], 卫星在各单机完成验收交付后, 进行分系统级测试和桌面联试。完成桌面测试后交付总装并在总装完成后进行整星综合电性能测试。批量化卫星由于技术状态具有高度一致性, 借鉴美国 GlobalStar 系统 AIT 测试成功经验^[21], 仅在首发星进行完整测试, 其余各星主要通过采用自动化测试手段进行测试。如图 4 所示, 星上产品验收交付前, 主要进行单星数字化测试, 进行星上软件功能的验证; 单机验收后, 按照分系统划分进行分系统级接口、功能和性能指标的测试验证, 并根据测试情况进行数字卫星的模型修正; 分系统验证完毕后, 进行整星级桌面和总装后卫星测试, 同时再次进行数字卫星模型修正。

借助数字卫星仿真测试平台, 可在卫星分系统测试前, 提前开展卫星单机级、分系统级和整星级数字化测试, 对星务软件的软件配置、单机管理、模式切换、故障处理等多种功能进行提前测试验证。在星务软件研制完成后, 通过数字卫星实现单机模拟和分系统模拟进行卫星软件测试, 对星务软件、分系统以及整星的功能进行测试验证和优化, 从而大幅减小后续分系统和整星测试工作。

2.1 首星测试

卫星首星测试主要用于卫星接口、功能和性能指标的调试验证, 进而明确后续卫星技术状态基线。首星测试分为数字化测试、单星分系统级测试和单星整星级测试。

2.1.1 卫星数字化测试

首星数字化测试主要用于验证星上软件功能、软接口协议验证。在星务软件研制完成后, 利用数字卫星仿真测试系统可开展单星单机级、分系统级和整星级功能验证。

1) 单机级: 按照单机与星务或者单机与单机之间的通信协议进行配置, 在单机模拟层进行单机模拟, 对接口协议进行测试。

2) 分系统级: 按照分系统组成, 由各数字单机组成分系统, 进行分系统数字化测试。分系统级测试主要验证各分系统功能是否符合总体设计需求。以姿轨控分系统为例, 如图 5 所示, 姿轨控分系统主要包括星敏、陀螺、磁强计、太阳敏感器等姿态测量装置以及飞轮、磁力矩器、推进装置等控制装置。数字卫星模型库中姿态动力学模块、轨道动力学模块以及时间模块产生相应的信号发送至数字单机, 姿轨控分系统模拟层中姿态轨道控制软件结合单机信号产生相应的控制信号, 驱动姿态控制数字单机产生控制信号并传输至模型库姿态、轨道动力学模块, 实现数据闭环, 从而可对姿态轨道控制算法进行验证。

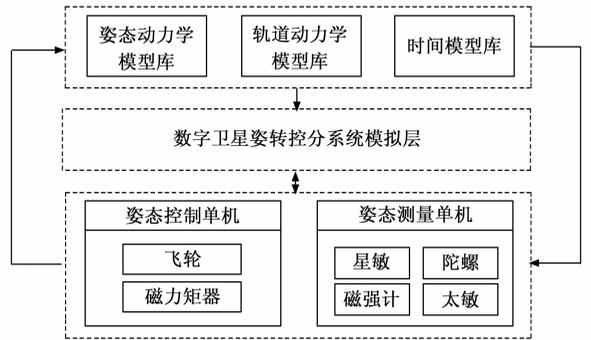


图 5 卫星姿轨控分系统数字化测试

3) 整星级: 完成单机级和分系统级测试后, 通过数字卫星模拟, 由各模型库提供必要输入, 可进行整星级在轨功能数字测试。例如, 姿态轨道模型库提供测试期间任一时刻卫星的时间、轨道、姿态等信息; 热控系统模拟库计算出卫星外热流情况和各部组件温度等信息; 电源分系统模拟库对卫星供电情况进行仿真等。通过数字模拟测试, 可验证卫星入轨后模式切换等多种功能。同时, 通过对模型库进行修改, 制造各种异常工况, 对卫星故障处理逻辑设计的正确性进行验证。

2.1.2 单星分系统级测试

单星分系统级测试是整星单机齐套后, 对分系统各单机接口、功能和性能指标的符合性进行验证, 同时对数字卫星单机模拟、分系统模拟的模型进行修正, 并根据测试情况形成自动化测试序列, 用于后续卫星的自动化测试。

以热控分系统为例, 热控分系统主要包括控温组件(如加热带、热管等)和测温组件(如热敏电阻等)。测试时, 打开控温组件使控温点附近温度上升, 监测测温组件反馈遥测量是否正常; 关闭控温组件, 一段时间后, 测温点处温度应回到环境温度。

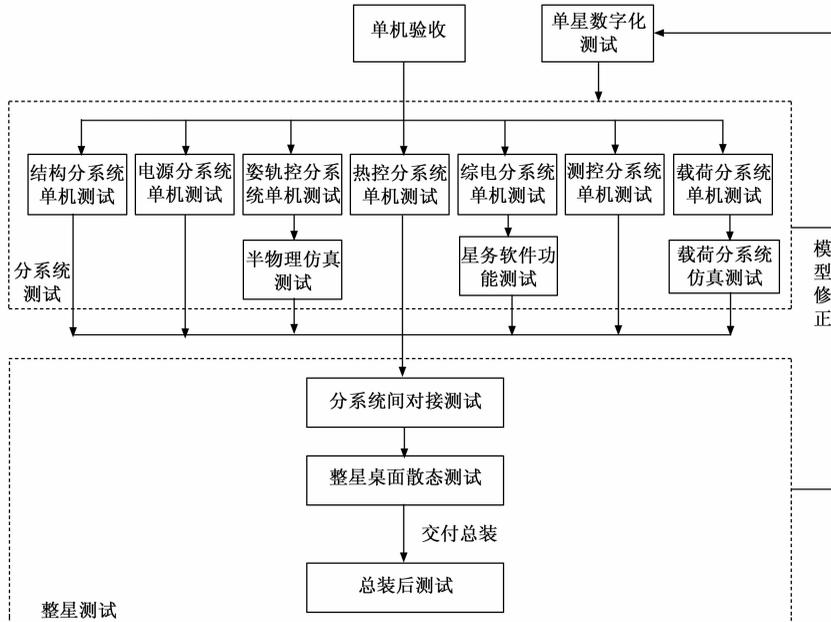


图 4 卫星测试流程

2.1.3 单星整星级测试

整星级测试主要验证卫星分系统间的连通性和兼容性以及考核整星整体的功能和性能,按照是否总装分为桌面散态和卫星总装后测试。

整星级测试主要包括整星电性能测试、整星模飞测试以及总装后整星综合电性能测试。以整星模飞测试为例,通过 PXI 仿真系统设置卫星飞行环境(如 UTC 时间、轨道高度、卫星轨道姿态、光照情况等),模拟卫星星箭分离、初始入轨、在轨测试、业务运行以及各种故障工况,对整星在轨各项功能进行测试验证。测试完成后,将上述流程整理并配置成自动化序列,用于后续卫星模拟飞行测试。

2.2 卫星自动化测试

首星测试阶段,主要采用手动方式完成单机测试、分系统测试、桌面散态测试和总装后测试,根据首星测试情况对测试逻辑、测试流程、测试结果进行确认,优化测试流程,并按照要求配置自动化测试序列。批量自动化测试阶段,通过配置的自动化测试序列执行单机测试、分系统测试、桌面散态测试以及总装后测试。自动化测试流程如图 6 所示,主要分为测试序列配置、测试序列执行和测试序列判读以及测试报告生成等。

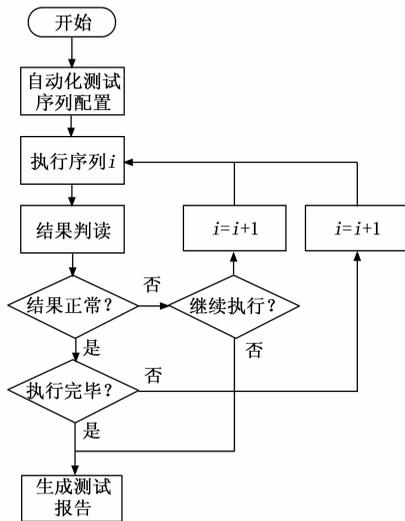


图 6 自动化测试执行流程

1) 测试序列配置:可根据测试要求在线创建或导入测试指令序列,并设置相邻指令间的间隔时间、执行次数、判决条件等。测试序列的配置和测试在首星测试阶段完成。

2) 测试序列执行:根据配置的测试序列指令集以及间隔时间等信息,自动化测试系统以闭环方式自动向卫星发送遥控指令,并向需要的测试设备发送指令信息,控制其进行配合测试。例如卫星太阳敏感器进行极性测试时,该项测试前自动化测试系统将控制机械臂设备夹持测试设备到达指定位置,执行完成后向单机发送遥控指令。

3) 测试序列判读:单机根据测试序列配置的判决条件对遥测数据进行自动判读,若判读结果正常,继续执行下一条序列,直至测试结束;若测试结果异常,将对异常信

息进行提示,并根据异常情况判断是否中断测试。

4) 测试报告生成:每次自动化测试指令结束后,自动化测试系统将自主生成测试记录,保存每条测试指令执行情况、判读单机或设备反馈数据原码和工程解析值以及判读条件、指令执行时间等信息。可根据测试报告对异常情况进行人工二次判断,定位异常原因。

2.3 卫星并行测试

首星测试完成后,其余各星可进行并行测试,即可根据各星测试需求在同一时间内针对多星进行测试。如图 1 所示,以 6 星测试为例,将全部待测试卫星置于卫星测试区域,各星采用独立供电,星上射频单机与射频专检设备间通过射频切换矩阵进行连接。测试区域内各星测试人员登录测试系统,选择卫星型号(与星码对应)、数据发送/接收通道等,并按照需求进行射频切换矩阵设置,随后便可按照测试计划开展测试。不同测试人员通过选择不同卫星型号进行并行测试,综合测试系统根据星码进行遥控指令发送和遥测数据解析、存储和分析。

3 试验结果与分析

卫星自动化测试是实现卫星高密度发射的关键一环。针对行云工程卫星项目,对卫星测试流程进行合理优化,即单机齐套前以数字卫星为基础进行星务软件的研发、测试工作;单机齐套后,以真实卫星为基础进行分系统或整星功能的复测确认,并进行数字卫星模型修正,对星务软件功能进行修改后可通过数字卫星进行复测,验证通过后再在正样星上进行软件上注。多星测试阶段,通过测试系统中的设备切换矩阵,可同时将多星接入系统中进行并行测试。此外,测试系统加入自动化测试功能,可根据测试需求进行测试序列功能配置和测试结果自动化判读,并对非预期结果进行预警,方便测试人员进行故障定位,大大提高了测试效率。当然,上述测试流程对数字卫星、真实卫星和综合测试系统间的匹配性要求较高,因此测试前期也出现较多问题,如数字卫星功能不完善而不能完全代替真实卫星。因此,首星测试阶段重点对数字卫星功能进行迭代优化,为后续测试奠定基础。上述测试流程的合理性在行云工程多星测试阶段得到较好的验证。

此外,综合测试系统虽然可满足多星并行测试,但受到硬件资源配置的限制。例如,射频地检设备仅可同时满足和一颗星之间的交互,因此若进行多星射频单机同时测试,需要配置多台地检设备。

4 结束语

随着各种低轨卫星组网计划的提出,未来卫星批量化设计、制造和生产成为新的趋势。因此,在工程设计之初,便需要考虑卫星地面测试系统的可拓展性和自动化。本文结合卫星批量化研制流程,对基于数字卫星的地面批量自动化测试技术进行研究,提出了卫星自动化测试系统架构和测试流程,除首颗卫星外,基本可实现分系统测试阶段、

(下转第 50 页)