

# 卫星规模化测试任务流程及方法

刘 瑶, 李振凯, 王健有, 林至宇, 张 帅  
(太原卫星发射中心, 太原 030001)

**摘要:** 为满足将一定规模数量的卫星快速发射至预定轨道, 实现快速组网、补网的需求, 对卫星在发射场的工序流程进行规划设计, 以同类型、同状态的微小卫星为研究对象, 深入分析卫星在发射场的任务流程, 从场地、设备、工序以及人员等方面分析了其制约因素, 在现有技术基础上进行了卫星并行测试和自动化对接等数字化、智能化新技术的应用探索; 并在此基础上分析制定了多星交叉并行测试原则和方法, 科学制定卫星规模化测试任务流程, 指导任务实践; 以6颗星为一组, 规划设计了12颗和36颗卫星脉动式发射场任务流程, 为遂行快速发射任务提供理论基础。

**关键词:** 卫星测试; 任务流程; 规模化测试; 并行测试; 自动化对接

## Process and Methods for Large Scale Satellite Testing Tasks

LIU Yao, LI Zhenkai, WANG Jianyou, LIN Zhiyu, ZHANG Shuai  
(Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** In order to meet the requirements of rapidly launching a certain number of satellites to the predetermined orbit and achieving rapid networking and supplementary networking, the workflow process of satellites at the launch site was planned and designed. The microsattellites of the same type and state were taken as the research object to deeply analyze the task process of satellites at the launch site. The constraining factors were analyzed from aspects such as the site, equipment, process, and personnel. Based on existing technologies, digital and intelligent new technologies such as parallel testing and automatic docking of satellites were applied and explored. On this basis, the principles and methods for multi-satellite cross-parallel testing were developed, and the process of large-scale satellite testing was scientifically formulated to guide practice. With six satellites as a group, the process of pulsating launch for 12 and 36 satellites was planned and designed, providing a theoretical basis for rapid launch missions.

**Keywords:** satellite test; task process; scale test; parallel test; automated docking

## 0 引言

鉴于微小卫星在快速组网、补网等方面发挥着越来越重要的作用, 各国加强了对微小卫星的研究与开发, 使得微小卫星在航天领域的地位愈加凸显。它们的低成本和快速研发周期使得微小卫星能够被大量生产和部署, 形成分布式星座, 从而实现一些传统大卫星的功能。为实现快速组网发挥星座的作用, 通常采用一箭多星的发射方式将微小卫星送入预定轨道。美国 SpaceX 公司研制生产的“星链”卫星, 采用一箭60星的方式进行发射组网, 目前已在太空部署了6000多颗星链卫星。因此批量化生产、规模化测试、一箭多星发射、快速组网部署已经成为当前微小卫星发展的必然趋势。随着发射方式的变化, 卫星快速发射技术需要将一定规模数量的卫星载荷在规定的时间内运送至太空轨道。在此

期间需要对卫星载荷进行批量化、规模化的快速组装、快速测试、快速对接, 以一箭多星方式完成快速补网组网等任务要求。

当前卫星测试任务流程中仍通过传统的卫星组装、安装过程采用人工起吊的方式, 操作过程繁琐、操作人员较多。卫星测试涉及的地面测试设备复杂、庞大, 地面设备展开自检时间长, 供配电、测控、控制等分系统测试系统功能模块分散, 测试中状态转换频繁, 工作效率低。

传统卫星测试通常采用串行测试模式, 一支测试队伍使用一套测试设备一次仅测试一颗卫星, 串行测试模式下一般完成一颗卫星的全部测试项目后再对下一颗卫星进行测试<sup>[1]</sup>。测试设备在卫星的其它工作项目期间以及测试前状态准备阶段, 处于闲置或待机阶段, 相应的测试岗位人员也处于空闲阶段, 无法充分发挥人员和设

收稿日期: 2024-09-26; 修回日期: 2024-11-01。

作者简介: 刘 瑶(1993-), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 刘 瑶, 李振凯, 王健有, 等. 卫星规模化测试任务流程及方法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(2): 16-22.

备的利用率, 导致工作效率不高。

随着自动化技术的发展, 卫星的测试和总装也向智能化方向发展, 通过自动化、智能化的新技术应用提升测试设备的可靠性和测试效率, 通过测试设备的分时复用实现一台测试设备测试多颗卫星, 降低人力和时间成本, 有效解除人员和设备的制约因素。

因此针对当前卫星在发射场测试流程中存在工作项目多、周期时间长, 无法满足规模化测试发射需求的问题, 有必要针对发射场测试流程进行分析, 并结合新技术的探索应用, 建设性地提出意见建议, 优化当前发射场测试流程。

## 1 卫星发射场测试流程分析

### 1.1 卫星发射场任务工序

卫星进场后或从贮存状态转入发射场任务阶段后, 主要开展卫星连同包装箱在转载间卸车, 在技术区主要完成卫星综合测试、光照试验、无线测试、推进剂加注、与运载火箭对接、星箭组合体装配、状态检查、充电以及射前状态设置等内容, 主要阶段划分如图 1 所示。

#### 1.1.1 测试准备阶段

测试开始之前, 首先进行测试准备工作, 主要完成测试文件和图纸的核对与确认、完成测试场地和工作环境的考核。需要对测试现场进行全面的技安检查, 包括静电接地棒的连接, 卫星设备接地检查, 测试设备供电检查、接地检查、整星静态阻抗测试、单机壳与接地桩之间的搭接阻抗测试、接地桩之间的搭接阻抗测试、匹配电阻测试等。在安全检查确认后, 进行测试设备自检, 确保测试设备安全可靠运行。

将卫星从贮存或转运包装箱取出, 进行全面的外观检查, 确认卫星表面无多余物、无变形损坏。完成地面测试设备的展开、布设、调试、完成测试电缆确认。测试前总体与各分系统对卫星测试状态确认一致, 完成测试状态的设置 (包括连接的测试电缆、模拟器 and 等效器等)。

#### 1.1.2 综合测试阶段

综合测试阶段主要开展对卫星的分系统及整星的电性能测试, 考核各单机、分系统及整星的接口的正确性和匹配性, 考核各信息传输、参数配置的有效性, 验证星上各软件和通路的协调性和可靠性。测试准备工作就绪后, 需要进行星上供电检查, 包括整星外部供电电缆网检查、外部供电检查、整星阻抗检查等, 建立基本测试系统, 整星可以加电进行电测试。

综合电子分系统测试主要对中心计算机的总线通信、时统功能、遥控遥测功能进行测试; 电源分系统对配电热控单元的加电断电、加热器通断、温度采样进行检测; 姿轨控分系统主要对陀螺、磁强计、飞轮、太阳敏等单机的通信及输出响应进行测试; 测控数传分系统主要对遥控指令上注、遥测信息采样、数据下传、存储解析等指标进行测试; 载荷分系统主要对载荷功能的匹配性、可靠性考核。

综合电测主要对星箭分离开关动作状态采集以及使能自主加电进行测试, 对太阳帆板展开收拢进行测试, 确保展开过程顺畅无卡顿; 对测控、导航、数传进行无线试验考核, 分别给射频单机, 通过频谱仪等设备对单机灵敏度、无线发射功率、信噪比、接收功率等指标进行标定并记录, 验证天线收发灵敏度、信噪比、收星状态等功能正常。

#### 1.1.3 推进剂加注

推进剂加注主要在综合电测完成之后, 通过地面加注设备连接卫星和加注罐, 将卫星推进剂加注至卫星储罐内, 并进行检漏。

#### 1.1.4 最终状态设置

主要包括检查电池状态确保电量满足卫星使用要求, 清空星上业务和遥测信息, 确认软件版本和控制功能开关状态由测试状态设置为临射状态。

#### 1.1.5 对接前准备

对接前首先进行卫星多余物清洁, 并按照热控要求, 使用聚酰亚胺对卫星进行多层包覆。

卫星与适配器对接前, 安装好整星吊具, 将整星吊

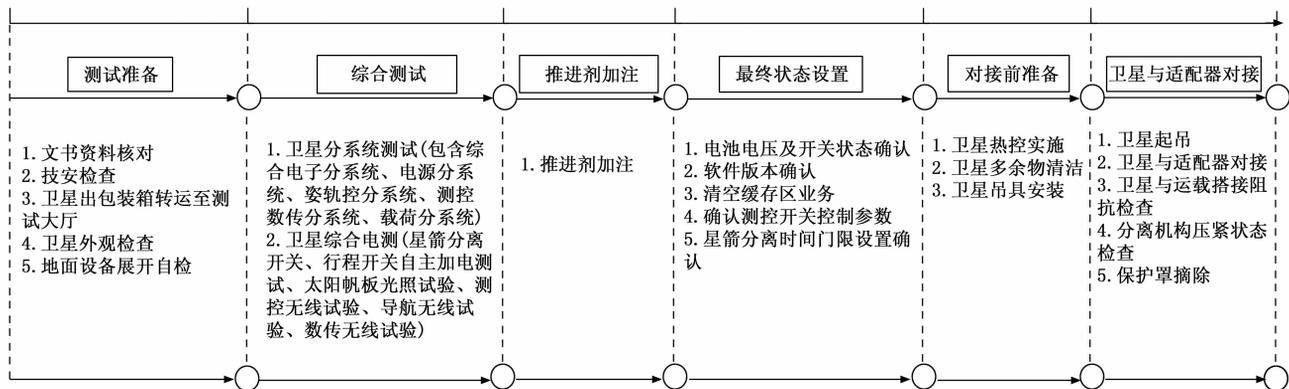


图 1 卫星发射场工序流程图

具安装在卫星结构体承力点, 确保起吊过程中卫星受力均衡稳定。

#### 1.1.6 卫星与适配器对接

卫星与适配器对接首先进行整星起吊, 将卫星吊至适配器相应位置, 不断调整对接位置, 安装固定螺栓或者其它锁紧机构, 并测量卫星与适配器的接触阻抗, 确保满足接通要求, 检查测量卫星分离形成开关的压紧长度, 确认状态无误后, 拆除卫星上保护罩, 完成卫星与适配器的对接。

当前在发射场进行批量化卫星的工序采用按照任务流程, 将各个项目进行串行开展, 全部的卫星完成当前工作项目后, 再转入下个工作项目, 人员的工作重复率较高, 整体效率较低。

### 1.2 卫星发射场任务制约因素分析

#### 1.2.1 场地

多颗卫星并行测试需要足够大的场地放置卫星, 同时在卫星测试时需要保证测试环境不受其他射频信号干扰, 影响卫星测试状态。通常的卫星总装测试厂房要满足卫星技术区所有工作的保障条件。要具备良好的温湿度、洁净度、接地、照明、通风、防爆等要求, 厂房内配备有风淋设备、铁轨、行吊、空调、供气、防爆电源、消防、推进剂洗消池等, 并能够兼顾进行火箭联合操作、整流罩扣罩等。通常卫星测试、总装对接等需要在不同区域进行, 场地需求应能满足同时开展总装、测试和转载的条件。根据 36 颗微小卫星的数量需求, 卫星测试大厅大小一般不小于 400 m<sup>2</sup>, 行吊吊高不低于 11 m, 设有 UPS 电源、氮气和氦气供气管路, 并配备附属的测试间、加注间等功能房间。

#### 1.2.2 设备

目前我国采用的地面测试设备主要满足发射场任务流程中分系统级和整星级测试, 卫星在进行自动化测试时, 每套设备目前最多可供 3 颗卫星进行并行测试, 多颗卫星并行测试需要多套设备支持。而且对测试数据的系统分析和判读, 主要依靠测试人员来完成, 与国外相比我国的测试设备普遍体积较大, 自动化程度较低, 流程较为繁琐复杂。在卫星总装和对接方面依靠传统厂房的行吊单步进行, 所需时间较长、自动化程度较低。

#### 1.2.3 工序

目前许多卫星在进入发射场完成电气系统综合测试之后, 要进行推进剂的加注和检漏, 在整个加注过程中需要对加注的地面设备进行自检, 完成加注管路的气密性检查和多余物吹除, 并且需要专门的加注操作间以及加注相关保障设施和耗材, 从加注准备开始至完成整个加注项目, 通常一颗卫星的加注工作需要 5 h 以上。推进剂加注整个工序在时间、人员、场地、设施设备等方面占用了发射场较多的资源条件, 不利于完成快速测试

发射。

#### 1.2.4 人员

在无线测试、极性测试、帆板展开等测试流程中, 需要人员手动进行操作和状态判读, 增加了测试时间。并且随着测试队伍年轻化, 人员更替较快等现状, 会存在测试经验不足、操作不熟练、应急处置问题的能力不足等现象, 可能会造成卫星测试中误指挥、误操作、误判读等问题, 增加卫星质量安全风险。并且进场人员与卫星设计生产人员通常为不同的人员队伍组成, 存在进场人员对卫星状态掌握不透彻情况。目前发射场人员通常只负责保障和质量审查工作, 暂无法独立开展卫星测试任务流程, 导致卫星从贮存状态转入对接状态有诸多限制因素。

### 2 卫星新技术应用

针对卫星发射场任务中场地、设备、工序及人员的制约因素, 从卫星本体以及测试和总装方面进行新技术的应用探索, 优化工序流程, 提升设备使用率, 减少人员的使用, 提升卫星发射场任务效率。主要从自动化、并行化测试技术和卫星自动对接技术, 卫星推进剂预包装技术和数字孪生技术等方面进行应用探索。

#### 2.1 卫星测试新技术

卫星测试是对卫星实物采用激励和响应的测试方法获取卫星的接口、功能、性能指标等参数信息, 通过数据处理分析来获得对卫星健康状态的评估<sup>[2]</sup>。通常的测试方法是利用地面测试设备组成星地测试模型, 地面测试设备作为控制和激励, 并对卫星的相应情况进行采集和判断<sup>[3]</sup>。

通过自动化、并行化、信息化及智能化等新技术应用以及接口通用化标准化方案设计, 在不增加人力时间的前提下, 可以优化测试项目, 提升测试效率。

##### 2.1.1 自动化技术

随着计算机技术的发展和卫星产品成熟度的提升, 卫星批量化、自动化测试程度不断提高。采用自动化测试技术就是在无人干预或者认为干预较少的情况下, 模拟人脑处理复杂逻辑和测试评估, 达到全流程智能化测试的水平。自动化技术可以提升工作效率和可靠性, 减少人为因素的失误。自动化测试主要包含自动化测试执行和智能判读, 在自动化执行模块中通过选择数据库中的执行规程, 将测试指令按照逻辑要求进行发送, 并将指令执行结果存储并发送至智能判读模块。智能判读模块将遥控指令和遥测数据按照代码、名称、类别、编号等标识进行处理整合<sup>[4]</sup>, 将这些信息按照数据库中的判读规则进行打印报表, 并将故障信息和定位的故障原因提供给测试人员。文献中设计了小卫星批量测试软件, 满足“一键式”测试, 测试人员无需自主设计测试序列

等内容, 只需根据设计程序操作执行具体测试工作, 可以有效解决岗位操作人员经验较少的问题<sup>[5]</sup>。在质量检验方面, 通过将各工序进行有机分解, 借助仪器仪表, 减少人为对检测结果的干扰, 建立基于自动化的全过程质量把控<sup>[6]</sup>, 搭建智能计量信息平台, 覆盖人、机、料、法、环全要素<sup>[7]</sup>。

### 2.1.2 并行测试技术

卫星的并行测试是指使用采用同一测试设备对多颗卫星或者同一卫星的多个测试任务在同一时间内进行测试, 实现卫星多项参数的同时测量<sup>[8]</sup>。并行测试模式通常用于同一型号、技术状态一致的批量卫星测试, 通过增加单位时间内测试卫星的数量来提升测试效率, 通过减少卫星测试设备、测试工位闲置时间提高设备利用率, 通过共享贵重测试设备节约测试成本。采用并行测试技术可以充分发挥设备、场地和人员等资源的利用率, 有效降低测试成本, 提升测试效率。

高括等人<sup>[9]</sup>通过体系设计, 提出了一种批量化卫星流水线自动测试系统, 该系统可实现在单机研制生产、测试到卫星分系统和整星测试以及总装试验等过程中的任务并行管理调度、分级并行测试、分布式并行测试, 能够较好地完成批量化的卫星的自动化并行测试任务。袁建富等人<sup>[10]</sup>以高分卫星为例, 研发了基于商业卫星自动化测试平台, 可以完成 6~12 颗卫星的自动化并行测试, 大大提高测试效率。

基于 TestStand 和 Labview 开发具备测试管理与执行、图形化的操作界面的测试系统, 该系统具备多线程并行测试功能, 可满足 6 颗卫星的并行测试<sup>[11]</sup>。6 星并行测试的关系如图 2 所示。

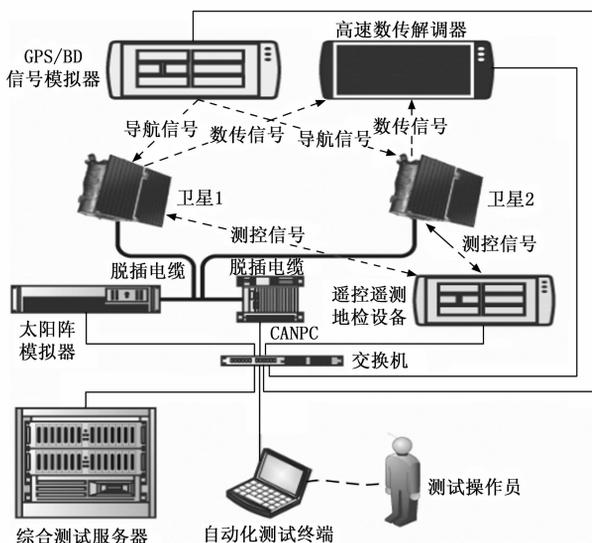


图 2 6 星并行测试关系图

在测试中所有线程执行相同的测试序列, 通过 IP 和端口号区分执行不同的测试对象。测试中 6 颗卫星之

间指令、信息等相互独立, 测试时间不要求同步, 没有先后顺序之分。实现了测试序列执行、数据分析处理、判读报告生成、全过程状态监控等高度自动化<sup>[3]</sup>。在发射场执行高分 03 系列卫星任务中, 基于该系统的测试模式相比以往的测试模式, 由原来两人测试 1 颗星变为一人测试 6 颗星, 能够节约人力成本数十人, 节约时间 10 h, 极大提高了测试效率; 通过自动化测试、判读减少因人员操作带来的质量问题, 提升了人员的工作效率。

### 2.2 卫星总装新技术

传统的卫星组装、安装过程中采用人工起吊的方式, 操作过程繁琐、操作人员较多, 目前卫星与运载适配器对接通常采用卫星吊具安装—卫星起吊—与适配器对接—安装螺栓—吊具及保护盖拆除等五步操作, 整个过程中需要人力安装卫星吊具, 并且需要厂房行吊进行辅助起吊, 对接过程用时较长, 通常对接完成一颗卫星至少需要 1.5 h 以上的时间。应用现代化的自动控制技术在总装对接系统中, 可完成多颗卫星与适配器的精准对接, 提升卫星组装工作效率。

针对当前厂房条件, 可运用信息化技术进行改进, 借鉴智慧厂房的设计理念, 从两个方面提升卫星对接自动化水平: 1) 改进行吊结构, 使其具备多自由度的柔性机械臂, 实现对吊装产品的多自由度精确控制; 2) 采用激光定位识别技术, 使得操作过程中, 能够实时识别周围的环境状态<sup>[12-13]</sup>。

卫星对接过程涉及多自由度的精确调整, 基于先进的自动化技术, 打造基于目标定位的柔性机械臂, 多自由度柔性机械臂设计方案该系统设计为两条 6 自由度柔性机械臂, 具备抓取、移动和释放功能。采用工业机器人末端执行器精确伺服技术, 借助激光跟踪仪、立体视觉系统对末端位置进行闭环控制。在实际星箭对接中, 星箭爆炸螺栓的孔的对准精度, 需要手动旋转箭体完成对准, 耗时较长。采用自动对接系统, 卫星与适配器的对接标志位可由机械臂末端的视觉快速定位系统进行识别, 建立自动对准系统并反馈至上位机, 对位置状态进行解析判断和决策。

视觉快速定位系统由 CCD 检测系统、图像处理系统、控制系统和执行机构组成。通过 CCD 相机将图像采集到主控计算机上, 通过图像对位处理软件, 算出对接孔位置偏差, 将相应的数据传送给外部运动控制系统, 形成闭环控制, 从而进行位置纠偏。视觉快速定位系统对准控制流程如图 3 所示。

通过以上新技术可以将卫星总装工作变得更快速高效, 减少了总装操作人员数量, 仅需检验人员完成检查校验工作, 减少了复杂工序带来的风险。

### 2.3 卫星预包装技术应用

目前卫星成规模化发射模式, 推进系统预包装技术

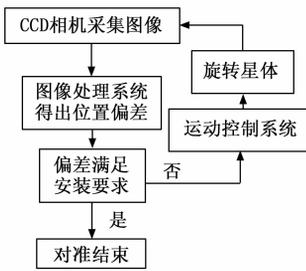


图 3 快速定位系统对准控制流程

能够简化发射场工序，提高效率。液体推进剂预包装可在卫星出厂前进行加注，后期在卫星贮存期间仅需要做简单的维护和检漏测试。汪钰等人<sup>[14]</sup>设计了一种推进剂安全性长贮预包装模块，通过在进气腔设置隔离活塞和贮箱液腔设置常闭电爆阀，并加装多个加排阀，从而有效隔离气液混合，保证推进剂的安全性。葛宁等人<sup>[15]</sup>设计了一种纯铝高致密、耐腐蚀的破裂膜片，放置在推进剂贮箱液路的出口处，通过膜片表面的高致密陶瓷涂层隔离推进剂和膜片，可解决密封和防腐问题，实现预包装长期存储。

电推进系统也可以提前加注进行预包装，并且可以满足低轨、静止轨道等几乎所有的推进任务。电推进主要包括电热型、静电型和电磁型 3 类，主要是通过电能对工质进行加热、电离和加速，产生高速带电粒子，利用反作用力产生推力。并且电推进技术具有体积小、重量轻和比冲高等优点<sup>[16]</sup>。目前电推进发展迅速，初步具备多模式、长寿命和大功率特性<sup>[17]</sup>，并且能够在工况较为稳定的航天器上实现全电推进设计。

在卫星运输至发射场前，对卫星动力系统采用预包装技术，对于推力要求在 300 mN 以内的卫星，采用电推进预包装<sup>[18]</sup>。对于推力要求更大的动力系统采用液体预包装技术，通过在贮箱气路设置隔离活塞，在液路设置高致密陶瓷涂层膜片增加可靠性。通过采用卫星推进剂预包装技术，可以减少发射场加注工序，仅需进行推进剂检漏工作，单颗卫星可节约 4 h 以上时间，可减少至少 3 个加注岗位人员，提升了工序效率。

### 3 卫星规模化流程设计

#### 3.1 卫星交叉并行测试原则

卫星进行交叉并行的约束条件主要包括岗位人员、配套设备、环境保障和时间等因素，并且每个项目开始前都有状态准备条件要求。在项目组织分配的过程中，按照一个岗位人员在同一时间段只能开展一个工作项目；一套设备按照其性能指标，在一个工作时段内不能超负荷运行；环境保障主要由厂房阵地、供配电、行吊、运输车等限制条件，项目开展过程中不能超出其最大容量限制；时间限制条件按照单个项目进行所需时间

为约束；工作流程按照现有任务流程顺序进行，以保证满足各个项目开展的准备条件。

参试产品、设备运往发射场到站后，在厂房卸车，开箱检查。发射场的主要工作包括产品卸车、展开就位、任务准备，以及总装、测试发射等。

以现有的资源条件为约束，以缩短时间为目的对交叉并行的任务进行优化，将占用资源一致的项目尽可能安排在一个时间段内进行，便于一发任务的项目完成之后直接转入另一发任务的项目，减少状态切换的时间。例如卸车、外观检查等项目占用资源一致，可实现从一发任务至另一发任务的无缝衔接。

#### 3.2 卫星测试区域分配

卫星规模化测试与对接采用脉动式模式，主要包括卫星综合测试区、卫星总装区、星箭对接区等 3 个区域<sup>[19]</sup>。

卫星综合测试区主要用于进行卫星的分系统测试和整星的综合测试，对卫星各单机、分系统功能模块进行考核，验证各接口的匹配性、信号通路的稳定性以及总体设计的正确性和协调性，确保光、机、热、电功能正常，并完成电池蓄电池充电以及最后的卫星状态设置。按照 6 星并行测试技术的要求，需要满足至少一套地面设备和 6 颗卫星的区域。

卫星总装区主要用于开展卫星的热控多层实施、多余物检查清洁、吊具安装等工作。

星箭对接区域主要负责将卫星与火箭适配器进行对接、卫星与运载搭接阻抗检查、分离机构压紧状态检查、保护罩拆除。在应用自动化对接设备基础上，星箭对接区域满足适配器转运、行吊移动、抓取卫星以及操作空间。

#### 3.3 卫星规模化测试流程设计

基于现有厂房、设备、人员等条件，结合卫星发射场任务流程和新技术应用，设计 12 颗卫星和 36 颗卫星规模化测试任务流程设计方案。

卫星进入正式电测试前，通常需要进行推进剂加注工作，通过采用卫星推进剂预包装技术，可以减少加注工序，直接进行并行加电测试，避免推进剂轮流加注对后续测试的干扰。采用推进剂与包装技术的卫星，仅需在卫星电测结束后装箭前进行推进剂检漏工作。

基本测试系统建立后，在卫星不展开状态下，建立有线/无线遥控遥测信道，随后进行卫星基本功能状态检查，并行进帆板展开等工作。

卫星的基本测试流程均采用“一键式”自动化测试软件和多星并行测试技术。本流程设计中，使用 1 套地面测试设备对 6 颗卫星进行测试。导航天线仅需安放一个就可以满足对多颗卫星的导航信号发送，且测试过程中无需进行多余操作。在测试过程中，采用自动化测试执行和智能判读相结合的自动化卫星测试软件，岗位人

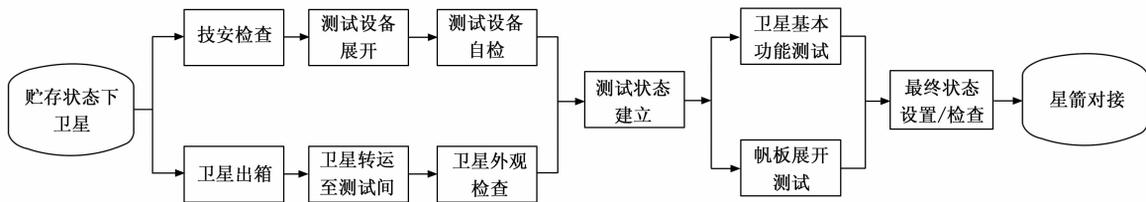


图 4 发射场批量测试技术流程

员仅需测试结束后下载数据报表来判断卫星状态是否正常以及测试结果是否合格。高分系列卫星在发射场进行 6 星并行测试时使用过相似的设备展开布局,证明了以上测试技术的可操作性。

卫星基本测试结束后,其总装操作采用改进后的行吊结构,即具备多自由度的柔性机械臂,可实现对吊装产品的多自由度精确控制。同时,利用激光定位识别技术,在操作过程中,主要由激光定位实现卫星爆炸螺栓安装和卫星与适配器对接的对接精度,人工仅需实时观察对接情况。该总装新技术应用可以大幅减少卫星对接过程多自由度的精确调整时间,提高效率。发射场批量测试技术流程如图 4 所示。

## 4 卫星测试流程应用与分析

### 4.1 卫星测试应用分析

以某小卫星 6 颗星为一组并行测试为例,测试现场卫星与地面设备连接关系如图 5 所示,6 颗及以上卫星测试采用脉动化测试方式需要供电设备 6 套,射频地检设备 2 套,配备测试人员 3 人,总装人员 4 人,热控实施人员 4 人,其他岗位人员 2 人。

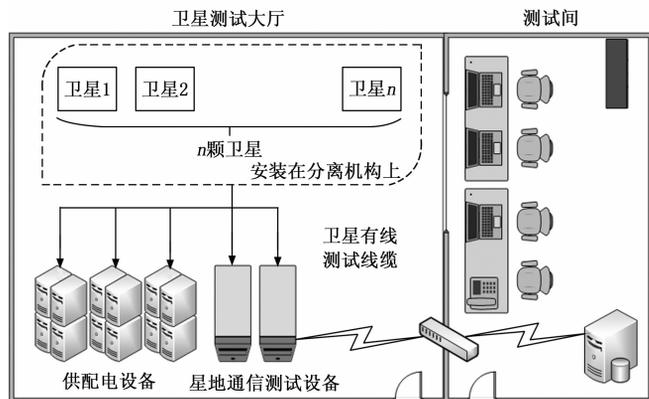


图 5 测试现场卫星与地面设备连接关系

6 颗卫星的发射场任务流程主要分为 5 个阶段。1) 测试准备阶段,主要在综合测试区和总装区完成设备转运、外观检查、技安检查、设备展开自检等工作,需要测试和总装岗位人员参加;2) 综合测试阶段主要在综合测试区和总装区完成卫星分系统测试、综合电测,测试工作需要电测岗位人员参加,其中太阳帆板展开测试和光照试验需要总装岗位人员参加;3) 最终状态设置

阶段,主要在综合测试区完成卫星电池电压确认和软件参数设置,需要电测岗位人员参加;4) 对接前准备阶段和火箭对接阶段,分别在总装区和火箭对接区完成吊具安装、多余物清洁、卫星起吊和与适配器对接,需要总装岗位人员参加,其中热控实施项目由热控岗位人员参加。在整个发射场任务流程过程中,灵活调配两名机动的人员作为各个工作项目实施时的辅助操作。

每组卫星工作项目按照流水化作业方式进行。即先进行外观检查、技安检查、设备展开自检等工作,而后 6 颗卫星一起进行综合测试,测试完成后流水化进行最终状态设置和对接前的准备工作。多颗卫星进行不同工作的过程中,除了占用资源的约束条件外,相互之间独立进行互不干扰。在任务流程进行过程中,岗位人员的工作量与单颗卫星相比成正比关系。整个测试为交叉串行测试,即采取设备展开(单颗星依次)—状态检查(6 颗一起)—综合测试(6 颗一起)—最终状态设置(6 颗一起)—对接前准备(单颗星依次)的测试方案。分队内部相同岗位人员具备相当的测试能力,在多发任务并行过程中可进行灵活调配,任务执行中可按照分系统为单元进行调配,调配过程中不改变人员的专业岗位和指挥关系。该测试模式已经在一箭多星任务上成功应用,在发射场节约了大量的时间,缩短了任务进场流程。

开展更多卫星测试可采用脉动式测试流程,如图 6 所示,开展脉动式测试以 6 颗卫星为一组作为开展流程的主线,多组卫星开展过程中主要通过对测试项目的人员、场地和设备资源进行灵活调配,将测试准备项目进行整合,将电气测试、帆板展开、对接准备以及火箭对接等项目按照不同分组,进行同时开展。

由于使用相同的地面设备,在测试准备阶段仅需增加对卫星的外观检查和推进剂检漏,在此阶段每增加一组卫星增加 0.5 h 的时长。在综合测试阶段第一组开展帆板展开测试时间内可同步开展第二组卫星的电气测试,以此进行脉动式测试流程。在同时开展帆板展开、最终状态设置、对接前准备以及火箭对接时,由于总装人员相对比较紧张,可由用于机动的另外两个人员作为岗位的辅助进行操作。则进行  $n$  组卫星的测试时长为  $24 + (n-1) \times (0.5 + 5.5)$ ,则 6 颗卫星的测试时长为 24 h, 12 颗卫星的测试时长为 30 h, 36 颗卫星测试时长为 54 h。

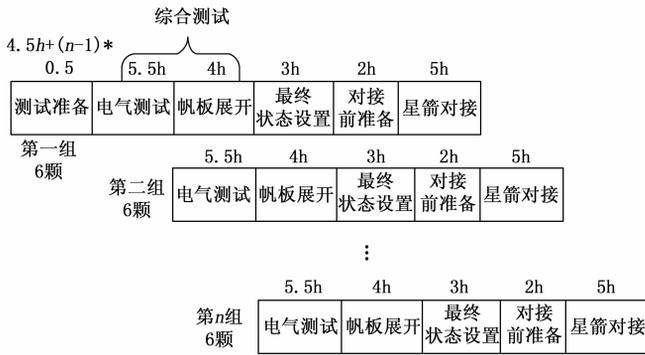


图 6 卫星脉动式测试流程

### 4.2 卫星规模化测试展望

基于航天测试技术的不断加速，先进测试技术日益成熟，为更大规模的测试提供了技术支撑。在 6 颗卫星测试流程的基础上，通过运用智能化的测试厂房，增加智能化一体测试设备，满足流水线测试需求，能够支持更多的卫星同时进行测试，节约更多卫星的测试时间。

并且基于数字孪生技术的发展，卫星发射场任务流程阶段通过地面数字孪生系统对卫星各系统数据（包括星上和地面的流程信息、控制指令、状态信息、模拟量等）进行自动监测和判读，对诊断为异常的参数进行定位分析，并给出相应的处理措施建议，辅助指挥人员决策<sup>[20]</sup>。通过数字孪生技术构建的数字卫星系统，可用于岗位人员日常的操作训练，提升人员在测试、星上设备安装、太阳帆板展开收拢测试、热控多层整理、星上状态设置等项目的能力，解决岗位人员经验不足问题。在卫星的贮存和发射场任务流程阶段，可通过数字孪生系统对卫星进行实时状态监测和健康诊断，提升工作效率和可靠性，并通过优化算法科学规划测试项目流程。

### 5 结束语

本文结合某微小卫星特点，总结了现有发射场卫星任务流程制约因素，并针对场地、设备在新技术应用上的系统设计进行了探究，并对人员的能力需求以及任务中的调配进行了论述。对多星交叉并行测试的原则进行了论证，在此基础上，立足未来进行测试总装新技术改进，最后面向卫星快速任务流程，设计了 12 颗和 36 颗的卫星规模化测试任务流程方案，为执行快速化、规模化的卫星任务流程开展提供了理论参考。

卫星规模化测试是未来发展的必然趋势，针对不同类别的卫星规模化测试模式及地面测试系统设计涉及的大数据处理、智能故障诊断、信息融合技术等还需进一步研究和详细设计。

#### 参考文献:

[1] 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.

[2] 王华茂. 航天器综合测试技术与展望 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (5): 125-132.

[3] 王华茂. 航天器综合测试技术与发展趋势综述 [J]. 测控技术, 2021, 40 (10): 1-8.

[4] 封家鹏, 朱永生, 何涛, 等. 基于字典查询的卫星并行自动化测试软件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (4): 124-127.

[5] 李利群, 庞建国, 孙海晶, 等. 小卫星快速一体化测试软件的设计与实现 [J]. 测控技术, 2021, 40 (6): 14-17.

[6] 高飞. 智能制造在卫星批量生产中的应用与发展 [J]. 国际太空, 2021 (11): 38-42.

[7] 杨同智, 党建成, 钟靓, 等. 面向批产的卫星综合测试技术体系研究 [J]. 宇航计测技术, 2021, 41 (2): 61-67.

[8] 肖明清, 朱小平, 夏锐. 并行测试技术综述 [J]. 空军工程大学学报 (自然科学版), 2005 (3): 22-25.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 李畅, 易进, 袁建富, 等. 面向批产卫星的并行模飞自动化测试系统设计与应用 [J]. 电子技术应用, 2023, 49 (12): 144-148.

[12] 赵相禹. 卫星智能化装配系统发展现状及关键技术 [J]. 国际太空, 2020 (3): 59-63.

[13] 魏乐愚, 杨宏青, 荣田. 自动对接装配技术在航天产品对接装配中的应用研究 [J]. 航天制造技术, 2011 (5): 42-44.

[14] 汪钰, 袁超, 李星, 等. 空间推进系统推进剂安全性长贮预包装模块及装配方法 [P]. 中国: 202211665375.0, 2023-07-04.

[15] 葛宁, 赵和明, 邱卫东, 等. 一种推进剂贮箱高致密、耐腐蚀破裂膜片密封结构 [P]. 中国: 201710158027.7, 2024-10-31.

[16] 徐亚男, 薛森文. 电推进技术在卫星星座中的应用及发展 [J]. 中国航天, 2023 (11): 74-79.

[17] 田雷超, 康小录, 刘佳, 等. 电推进空间应用现状与发展趋势 [J]. 中国航天, 2023 (11): 15-22.

[18] 李婧, 耿海, 孙新锋, 等. 微小卫星用低功率电推进技术研究进展 [J]. 真空与低温, 2023, 29 (6): 590-601.

[19] 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.

[20] 尚永爽, 赵秀丽, 孟上. 航空装备综合地面健康管理研究 [J]. 电子测量技术, 2010, 33 (9): 110-113.