

“嫦娥七号”探测器多器协同综合测试技术

傅晓晶, 蔡晓东, 刘一鸣, 田国亮, 温新

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 针对“嫦娥七号”月球南极探测器多器协同、高复杂、高耦合、高智能引发的联合供电测试模式复杂、器间以及器地通信场景多样化、模拟飞行测试设计验证要求高等问题, 对探测器系统级测试验证的难点进行分析, 提出一套适用于深空探测器、尤其是更大规模多器协同的数字化测试验证策略, 包括基于模型的多器联合供电智能安全辅助测试验证方法、基于多源数据自主决策的多场景高自主测控数传测试系统及基于飞行程序-模拟飞行一体化设计的多器联合模拟飞行设计验证系统等, 改变了当前复杂探测器电性能测试主要依靠人工或沿用传统单星自动化测试技术开展的局面。并将其应用于“嫦娥七号”探测器, 为充分验证月球南极探测器功能和电性能指标的正确性、一致性和稳定性, 实现全面、可靠、高效的测试验证提供有力支撑, 并推动航天器测试由单器传统自动化测试向多器协同数字化测试迈进一步。

关键词: 月球南极; 探测器; 综合测试; 多器协同; 关键技术

中图分类号: V476

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)06-0577-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20230103

引用格式: 傅晓晶, 蔡晓东, 刘一鸣, 等. “嫦娥七号”探测器多器协同综合测试技术[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(6): 577-585.

Reference format: FU X J, CAI X D, LIU Y M, et al. Comprehensive testing technology for multi spacecraft collaboration in Chang'E-7 lunar probe[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(6): 577-585.

引言

“嫦娥七号”月球南极探测任务过程包括发射入轨段、地月转移与近月制动段、轨道器环月飞行段、着巡飞组合体环月飞行与着陆下降段以及月面工作段。“嫦娥七号”探测器共有着陆器、巡视器、飞跃器、轨道器四器组成, 涵盖15个分系统。在探测器研制过程中, 需在初样机和正样机研制阶段对探测器全面的电性能测试, 测试探测器各分系统之间电接口的正确性和兼容性, 检测其是否满足设计要求; 验证探测器飞行程序设计的合理性和正确性; 暴露探测器设备设计和工艺的问题和缺陷并及时采取相应的改进措施, 地面测试的充分性、全面性对任务的成功至关重要。

王华茂^[1]从航天器综合测试技术体系架构、测试设计与实施要点、测试技术发展等方面, 全面介绍了航天器综合测试技术的基本内容与发展趋势。权爽等^[2]提出了“嫦娥四号”中继通信链路地面测试验证方案, 对器-星中继链路、星-地通信链路和器间通信链路的测试和数据处理等进行总结, 对深空中继通信系统设计和研制具有一定的参考价值。宋世民等^[3]针对“嫦娥五

号”探测器特点, 提出了一套“从基本启动、增量式叠加、分步骤集成”整体性测试与验证的解决方案, 以期在项目早期将系统置于真实的环境开展测试评估。富小微等^[4-6]提出了基于状态机(Finite State Machines, FSM)深空探测器面向全任务飞行过程的验证策略设计思路, 为实现探测器全任务飞行过程验证提供支持。孙泽洲等^[7]对“天问一号”地面研制试验技术和方法进行总结, 对深空着陆探测器地面验证试验具有重要的参考价值。金晟毅等^[8]提出了一种天地一体化双边型月面采样封装操控系统的设计方案, 对地外天体采样操控系统设计具有一定的指导和借鉴价值。

“嫦娥七号”探测器变结构、多器协同的规模较以往深空探测器进一步扩大, 器间协同工作耦合度、通信节点、体制及应用场景多样化、多器联合模拟飞行验证的要求大幅度提升, 给系统级测试带来了极大的挑战。

“嫦娥七号”探测器具有多器协同、高复杂、高耦合、高智能等特点, 对探测器综合测试的技术难点进行了分析, 提出了关键技术及解决途径, 形成了一套多器协同数字化测试验证策略, 其成果对后续月球与深空探测器研制任务具有借鉴意义。

1 “嫦娥七号”探测器测试模式分析

1.1 供电模式

月球南极探测器器地、器间供电接口繁多,在地面测试期间不同单器、组合体状态下有20余种供电方式,其中涉及器间联合供电方式近20种,供电模式复杂、工况繁多,是目前为止最复杂的供电系统^[7]之一。针对当前更大规模、多器协同工作的复杂探测器联合供电系统,由于测试工况多样,不同供电模式切换操作复杂,若状态识别不到位或操作错误,可能导致继电器动作时出现上电冲击或整器掉电等安全隐患,使得整器测试过程中供电安全风险控制面临严峻考验。目前,在AIT(Assemble Integrated Test)阶段,面向器间联合供电功能验证的方法较主观片面,尤其缺乏面向高耦合、高复杂多器联合供电功能的测试验证策略和方法体系支持。该现状已无法满足更大规模多器协同工作的复杂探测器联合供电功能测试覆盖性和测试安全性对测试设计和实施的要求,迫切需要寻找支撑高耦合多器联合供电功能的测试验证方法。

1.2 器地、器间通信

月球南极探测器通信链路复杂,包括地面测控、中继星和月面组网通信链路。同时为配合实现器上各类设备自主智能应用,测控数传功能性能逐渐升级,通信场景(通信方式、通信对象、通信体制、通信指标等)也愈加多样。随之而来地面测试过程中对器上配合的要求也愈加多样化、复杂化,呈现出通信通道择机选择、通信对象切换不连续、通信参数多且复杂的特点。若仍采用传统测试方式,繁琐、复杂的测试设备操作不仅效率低,还存在人为操作出错的风险,影响测试的正确性和安全性。一旦发现故障,由于设备关键参数分布于不同的软硬件设备,实现全域实时观测和记录的能力有限,故障排查和定位困难。因此,为实现对测控数传功能性能的全任务过程测试与模拟验证,需要地面测试系统可实时模拟各类通信场景,自主适应器上测控数传参数的变化,并完善对测试系统故障的分析、定位和处理。此外,测试系统的可靠和稳定是开展后续工作的基本保证和前提条件,如何权衡高自主性和可靠性之间的问题亦是测控数传测试系统要面临的挑战。

1.3 多器联合模拟飞行设计与验证

月球南极探测器通过一次任务实现“绕”“落”“巡”“飞跃”4种探测,工作模式多,存在四器组合体、着巡飞组合体、着飞组合体、轨道器单器、着陆器单器、巡视器单器、飞跃器单器等多种模式和多器协调控制模式。探测器信息拓扑结构复杂,器间和器地信息流

通路多、种类多、交互复杂,给测试信息流设计、地面总控数据处理、统一管理及面向复杂信息流的测试验证都带来了考验。同时,飞行程序复杂,具有环环相扣、时序紧张且不可逆等特点,任务可靠性要求非常高。针对上述特点和难点,在探测器地面研制过程中,必须反复开展系统级全任务模拟飞行测试,各分系统模拟真实飞行任务状态,按照与在轨飞行基本相同的程序,检验系统和分系统功能和性能指标是否满足设计要求,检验各分系统间电接口的正确性和匹配性,检验飞行程序设计的正确性和合理性,并为发射后在轨飞行控制提供参考。在工程研制过程中,随着任务过程设计的不断深入和细化,飞行程序通常会经历多轮迭代和调整,对应模飞测试也会经历反复迭代优化设计和测试验证,以往依靠人工对比飞行程序、编制器地协同模飞测试细则、制作指令和模飞序列的方式,测试设计和准备的工作量非常大,无法满足对模飞测试设计的正确性和快速响应高要求。

2 关键技术分析及解决路径

2.1 多器联合供电智能安全辅助测试验证技术

针对高耦合、高复杂多器联合供电功能测试,在测试设计和实施阶段,需识别在轨全阶段供电需求、地面测试受总装和器地接口配置约束条件下供电的需求等,确保测试全周期供电能力满足要求;识别不同供电模式下,各器的供电来源和能源流向,明确不同供电模式间状态迁移的测试用例,确保测试覆盖性和迁移路径满足要求;识别操作过程中可能导致上电冲击、潜通路或整器掉电的薄弱环节和安全控制点,设计安全辅助判读手段,快速判定当前供电模式,若出现异常时自主报警,从而确保测试期间整器供电安全。

首先建立覆盖在轨全过程的供电状态集,根据不同供电状态下各器母线供电来源,建立覆盖所有供电状态的供电模型;接着绘制探测器在轨飞行供电状态迁移图,通过对状态迁移图进行遍历,生成测试用例集;然后利用供电模型检查测试用例设计正确性,根据执行结果对测试用例或供电模型修订完善;最后利用供电模型在测试实施阶段提供智能安全辅助支持,根据模型计算自动提示可能的执行结果,人工确认结果是否满足预期后再进行操作。指令发送上星后自动判读执行结果正确性,一旦出现执行结果与预期结果不相符的情况,能够进行自主报警。

1) 建立供电状态集,根据设计报告在轨不同供电状态切换过程的描述,对该过程探测器经历过的单器以及不同组合体供电状态提炼和定义。这里要特别注

意, 被选择和定义的状态必须为可监视、可设置。比如, 定义 $S_0 \sim S_{n_1}$ 为单器供电状态、 $Z_0 \sim Z_{n_2}$ 为2器联合供电状态、 $U_0 \sim U_{n_3}$ 为3器联合供电状态、 $V_0 \sim V_{n_4}$ 为4器联合供电状态等。

2) 分析在轨任务剖面 and 地面测试状态下供电的模式, 根据各器母线供电来源, 建立覆盖所有供电状态的供电模型。供电模型, ①定义供电状态 $S_0 \sim S_{n_1}$ 、 $Z_0 \sim Z_{n_2}$ 、 $U_0 \sim U_{n_3}$ 、 $V_0 \sim V_{n_4}$ 取值为1表示该状态成立, 取值为0表示该状态不成立; ②供电模型表达式涉及的器上或地面模拟量遥测均转换成状态量进行计算; ③供电模型表达式中“+”表示OR, “·”表示AND, “'”表示NOT; ④加粗字体表示该状态有对应的地面或上行指令, 在后续模型使用时, 也可考虑指令与状态对应转换后, 利用指令予以判断。建立供电模型, ①对供电状态涉及的供电来源描述, 例如若某器“地面方阵供电状态or太阳阵输出电流转换成BL量”取值为1, 表示该器真实或模拟太阳方阵供电成立, 取值为0则表示不成立; 某器“放电开关接通状态or蓄电池电压AN转换成BL量”取值为1, 表示该器蓄电池供电成

立, 取值为0则表示不成立; ②对器间供电通路描述, 例如“器1和器2并网供电开关1接通状态and器1和器2并网供电开关2接通状态”取值为1时, 表示器1和器2间供电通路成立, 取值为0则表示不成立; ③各器接地开关状态, 一般多个器联合供电时, 只能有一个器的接地开关接地, 防止探测器多点接地。因此, 若“器1接地开关接通状态”取值为1时, 表示器1单器供电状态成立, 取值为0, 表示器1与其它器形成联合供电状态。

3) 绘制探测器在轨飞行供电状态迁移图, 建立输入集: 对不同供电状态间的切换路径进行模块化定义, 形成输入集。如探测器供电模式由U1 (3器蓄电池供电) 向U5 (两器太阳能电池阵-两器蓄电池联合供电) 迁移过程的输入为“路径②” (见图1), 其动作可分解为着陆器转外电→巡视器转外电→接通着飞并网供电开关→断开飞跃器蓄电池放电开关。建立输出集: 输入集的执行结果, 为供电状态迁移的输出集合。绘制出在轨飞行供电状态迁移图: 使用椭圆表示状态集、使用带箭头的弧线表示状态间的迁移动作, 并把输入集标注在弧线之上。

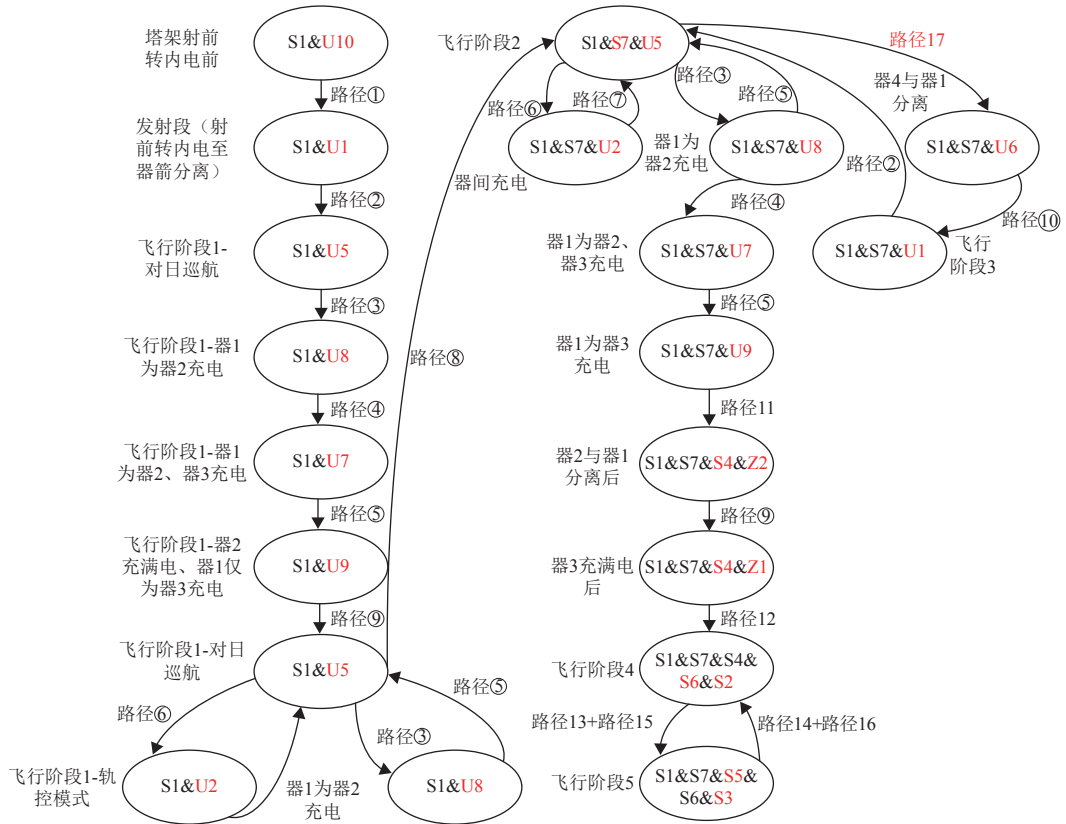


图1 供电模型设计与建立

Fig. 1 Design and establishment of power supply model

4) 根据逻辑及条件覆盖算法对状态迁移图遍历, 生成测试用例集, 遍历测试用例集中的各个用例, 实

现探测器系统级联合供电功能验证。

5) 检查测试用例设计正确性, 输入测试用例指

令,根据供电模型计算提示结果是否与预期相符,检查供电模型和测试用例是否正确,并开展修订完善。

6) 测试实施过程提供智能安全辅助支持,根据实时遥测、实时地面参数、指令转换的遥测或地面参数,模型计算并自动提示其后有变化的结果,人工确认结果是否满足预期后再进行操作。指令发送上星后自动判读执行结果正确性,一旦出现执行结果与预期结果不相符的情况时,能进行自主报警,人工确认结果是否满足预期,若不满足则结束测试,对测试用例再复核确认;若满足预期,则发送指令上星并自动判读执行结果,确认实际执行结果与预期相符,确保测试实施过程规范、状态受控。

以上方法提供了一种自上而下分析的思路,系统性地提出了适合中国自主研制深空探测器多器联合供电功能的验证方法。采用基于模型的测试设计,对不同组合体状态器间联合供电过程进行建模,并在此基础上形成测试用例集。生成的用例集能够覆盖在轨全

阶段飞行过程,探测器系统不同组合体状态下所有供电状态、迁移场景及状态迁移的路径,最大程度保证了对器间联合供电过程进行验证的测试覆盖性。同时该方法能依据模型规则快速判定当前处于哪种联合供电工作模式,并能够提前计算出对应不同的操作,母线可能出现的变化并给测试人员提示,从而避免在复杂联合供电场景下,因状态识别不到位误操作,导致的上电冲击或是整器掉电等安全问题。

2.2 多场景高自主性测控数传测试系统

针对深空探测器各弧段交替建链,各通信通道择机工作的多节点、多体制通信的特点^[9],地面测试系统通过模块化智能集成技术,建立面向服务的开放式测试系统生态架构,由中心服务器来进行所有设备信息交汇处理,多源数据自主决策,实现信道参数自主适应、多目标动态接入、多体制混合通信场景联试,实现对测控数传功能性能的全任务过程用天测试与模拟验证。测控数传测试系统完整示意图如图2所示。

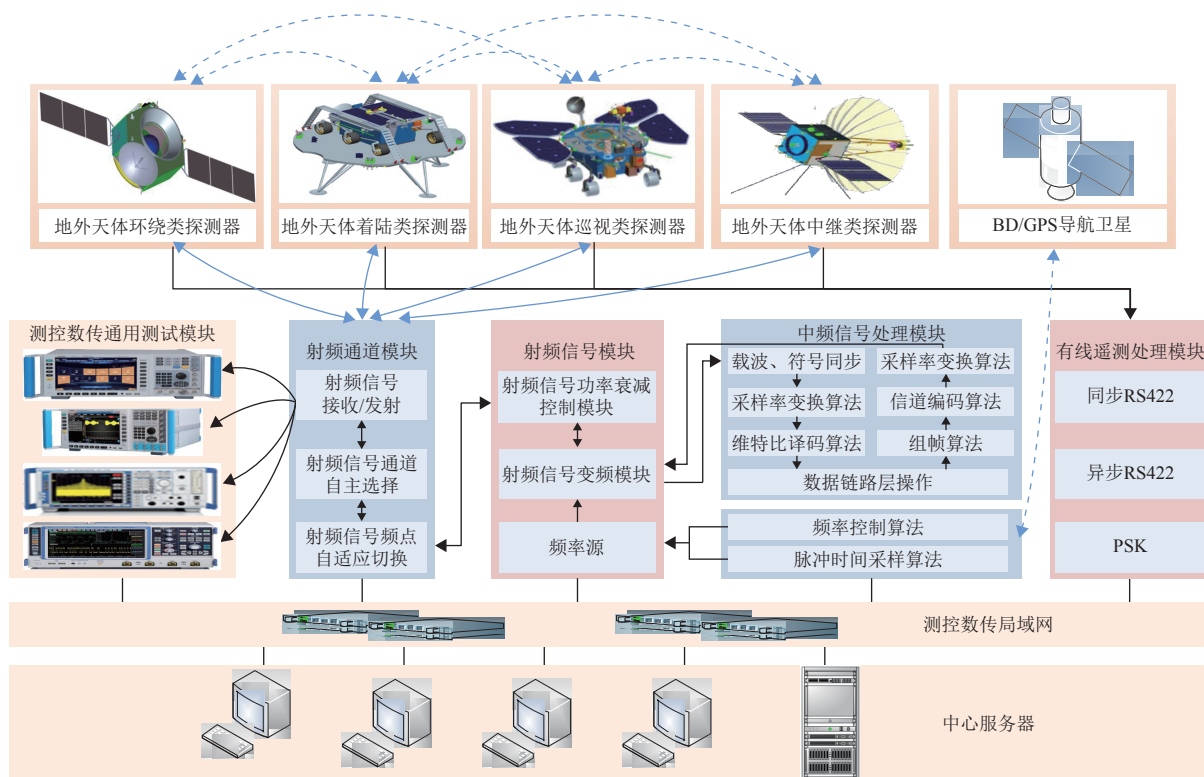


图2 测控数传测试系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measurement and control data transmission testing system

1) 信道可变参数自主适应设计

针对深空测控数传链路通信参数^[10]多且复杂需进行自适应验证的特点,本测试系统能实时模拟各类通信场景,自主适应器上测控数传参数变化。本文以深空探测器中最经常变化的码速率参数来说明,其自主

适应策略状态示意图详见图3。以通信场景经常采用Bi-phase-L码型(如:UHF)链路为例:利用该双相码的特点获得码速率先验信息。首先,测试系统通过分离信号支路与噪声支路,利用两个支路对信噪比估计,并通过多次取点、计算、拟合的手段,可靠地实

现解模糊, 占用极少的硬件处理资源完成更为简化准确的信噪比估计。中心服务器针对估计出来的信噪比, 与技术指标要求的阈值进行比较, 选择合适的传输速率。通过控制消息形式将合适的码速率反馈给基带设备。基带设备在正确的时间发出控制命令, 切换

传输速率。同时, 本测试系统可通过多级滤波抽取模式, 提取出各速率档抽头, 将各速率抽头上的Q支路信号进行匹配相关和能量积分, 通过正负能量累加判决, 可在没有先验信息的情况下, 判断出当前传输数据的速率, 实现通信码速率的自适应估计与解调。

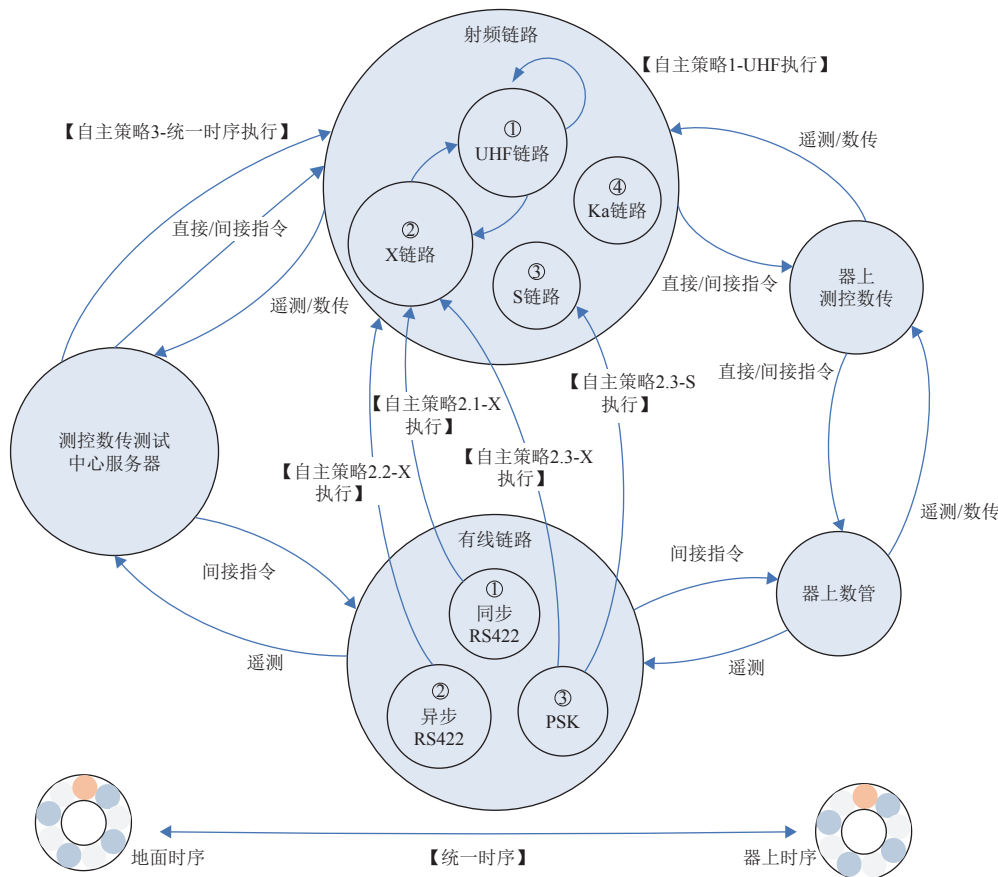


图3 测控数传测试系统通道参数自适应策略状态示意图

Fig. 3 Schematic diagram of channel parameter autonomous adaptation strategy status for measurement and control data transmission testing system

2) 复杂通信场景联试设计

测控数传测试系统不仅需要能根据地面试控数传测试系统的相关指标, 高自主性、实时地全方位模拟真实器间通信情况, 而且还应根据当前通信的最优指标及可能实现的最大传输能力来生成测控数传通信策略的定制建议, 并实现测控数传通道的自主选择。如: 测控数传测试系统根据有线遥测处理模块中RS422/PSK等先验知识, 以及通用测试模块中的通用测试设备进行实时时域、频域信号检测及时识别当前器上通信场景, 确定器上通信对象(需模拟对象), 并将得到的信息反馈至中心服务器, 中心服务器实时处理之后, 形成通道切换以及通道衰减设置命令发送至射频通道模块, 从而完成多目标动态接入、体制混合通信场景联试。

3) 自主检测设计

研究基于测试技术的自主检测是增强综合测试系统可靠性、安全性与防危性的最基本、最有效的方法和手段。测控数传测试系统具备如下几个方面的主要自主检测功能。

(1) 闭环自主校准功能: 根据测控数传测试系统中的通用测试模块(如信号源、频谱仪、功率计、频率计、示波器等), 对测控数传测试系统的专用测试设备(如综合基带设备、器间通信通道设备、RS422前端设备、开关矩阵、变频器等)进行自主检查及校准。

(2) 故障自主定位功能: 中心服务器通过实时监测各硬件软件连接处数据(有效指令、遥测、数传数据等)传递的连续性, 实时监测各设备中的关键参

数，在关键节点实时频谱观测记录，实现对测控数传通道全方位、多角度实时的观测与记录。当异常现象出现时，通过各通道、设备单点局部信息融合及联合比对判读，及时定位故障所在，并保留完整的详细日志。

（3）测控数传数据自主重传功能：本测控数传测试系统支持自动重传请求（Auto Repeat Request, ARQ），具体为差错控制处理的回退 N 帧ARQ方案。该方案主要包含差错检测、接收端反馈、数据重传和传输超时控制等功能，保证数据传输的正确性。

测控数传测试系统能够适应复杂多样及不断变化的通信场景，自主适配器上测控数传参数变化，实现测控数传通道的自主选择、完成对测控数传功能、性能的全任务过程测试与模拟验证。此外，该系统能够

实时监测各设备中的关键参数，实现对测控数传通道的全方位多角度实时观测与记录，提升故障定位和排查的快速性和准确性。

2.3 飞程序-模拟飞行设计验证一体化系统

模拟飞行是按照与实际飞行基本相同的程序，模拟探测器从发射入轨至完成全部飞行过程的真实任务状态，在地面综合测试的统一指挥和协调下模拟探测器飞行，对探测器功能和电性能进行测试的过程。在测试过程中，探测器系统和地面综合测试设备仪器配合工作，其目的在于检验航天器飞程序设计的正确和合理性，检验各分系统协同工作的能力及对飞行任务的适应性，检验航天器系统的功能及性能指标是否满足设计要求。探测器模拟飞行测试工作流程见图4。

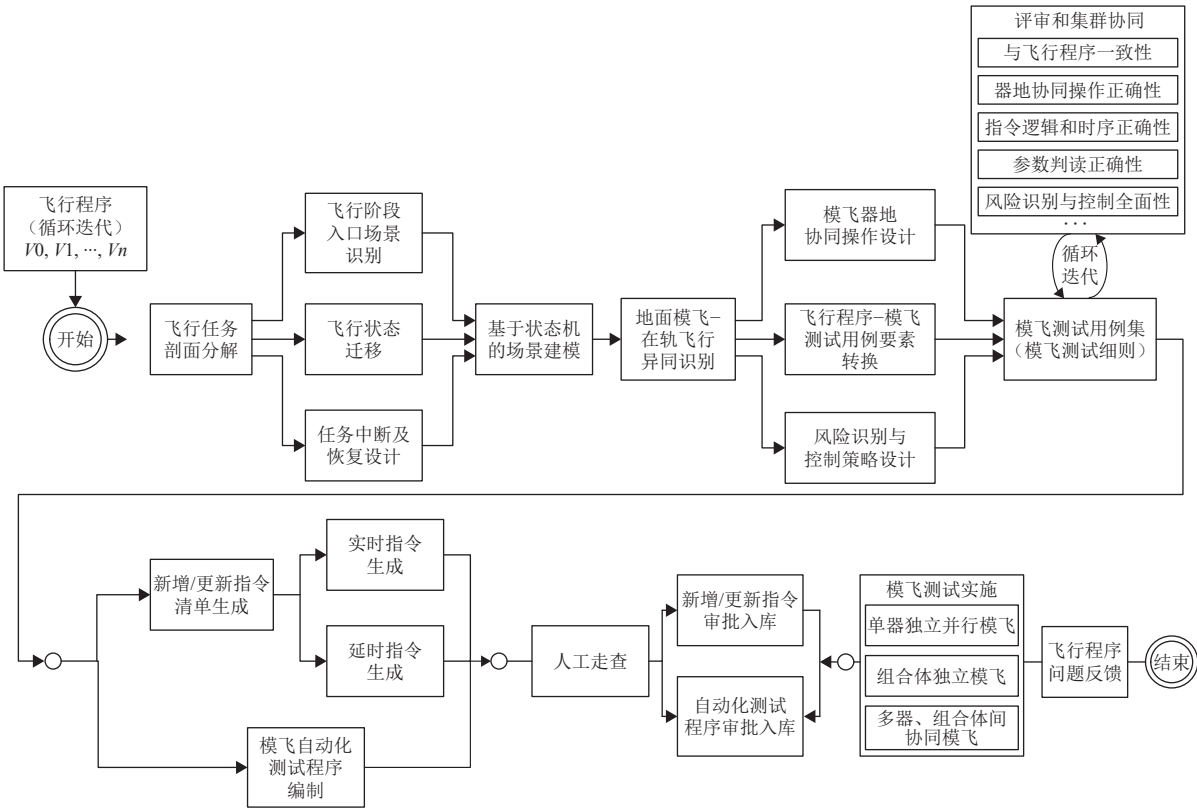


图4 探测器模拟飞行工作流程

Fig. 4 Detector simulation flight workflow

1) 模飞测试设计

以飞程序为输入，首先开展飞行阶段划分和任务剖面分解，识别各飞行阶段入口场景要素及飞行状态迁移流程。同时，设计若干任务中断点，支持模拟飞行场景跳跃或故障后状态恢复，提高模飞灵活性和可操作性。其次，开展基于状态机的飞行场景建模，识别探测器模拟飞行与在轨飞行异同点，开展飞程序-模飞测试用例要素转换、器地协同操作设计、风险

识别与控制策略设计。最后，生成模拟飞行测试用例设计集，通过评审和集同，对模飞与飞程序的一致性、器地协同操作的协调性、指令逻辑和时序的正确性、风险识别与控制的准确性等进行迭代优化，提升设计的准确度。

2) 模飞测试准备

根据飞程序给出的指令参数自动生成数据注入和延时指令，分配指令代号，完成模飞测试设计。主

要包括指令准备和自动化测试程序准备两个部分。识别模飞测试过程需要制作和更新的数据注入指令和延时指令清单, 并以此为依据生成指令文件。同时, 根据模飞测试用例编制模飞自动化测试程序, 支持一键式自动化测试。通过人工走查和审批确认的方式, 实现指令和测试程序的入库受控。

3) 模飞测试实施

在模飞测试实施阶段, 执行模飞自动化测试程序, 模拟在轨构型变化实施单器模飞、组合体模飞及多器/组合体协同模飞, 反馈发现的异常问题和设计缺陷, 支持探测器和飞行程序的迭代优化, 为支持在轨飞行任务提供有力支撑。

在工程研制过程中, 随着任务过程设计的不断深入和细化, 飞行程序通常会经历多轮迭代和调整, 对应模飞测试也会经历反复迭代优化设计和测试验证, 这对模飞测试设计的正确性和快速响应也提出了更高

的要求。以往基于文档的设计流程存在以下几方面缺点: 更新速度慢、设计工作量大、重复劳动多、在文档传递中容易发生错误等问题。随着自动化测试手段的提升, 测试细则与测试程序已经实现了一体化设计, 但是飞行程序设计与模飞测试设计仍然是两个独立的工作过程。建立基于模型的飞行程序与模飞测试一体化系统, 可以有效缩短设计迭代时间, 减少文件传递环节, 提高设计效率, 改善验证效果。

飞行程序-模拟飞行一体化设计验证系统业务框架见图5。其核心是构建飞行程序与模飞测试一体化设计验证方案, 将以往基于文档设计的方法转变为基于模型的设计方案, 打通飞行程序-模飞测试设计-准备-实施的全流程自动化业务, 实现参数、要素和设计结果在模型内部各环节之间自动流转并完成格式转换, 设计人员仅作必要的补充和调整。

该系统很好地支持飞行程序-模飞用例要素的自动

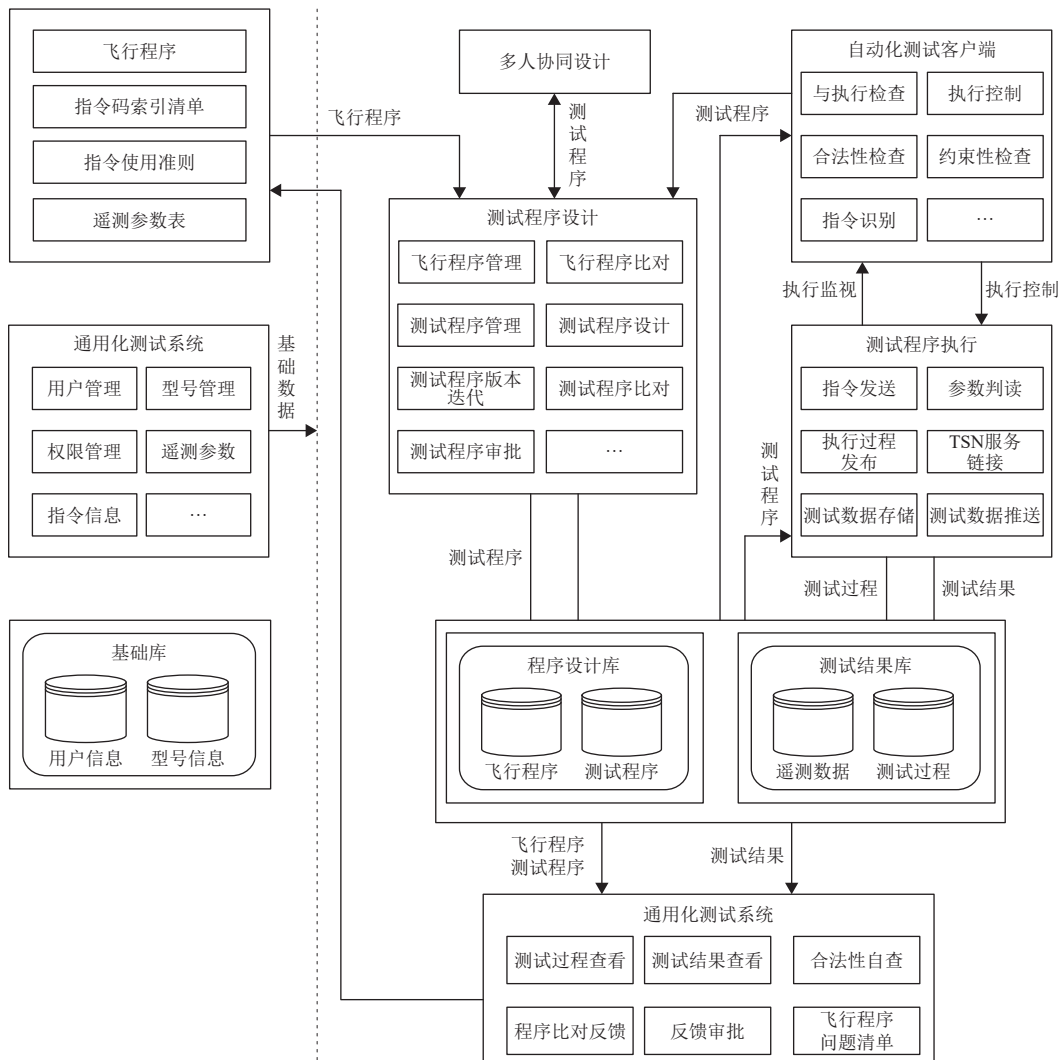


图5 飞行程序-模拟飞行一体化设计验证系统业务框架

Fig. 5 Business framework of integrated design and verification system for flight program simulation flight

转换、数字化测试验证、测试指令自动生成和更新、测试程序自动生成和执行、断点自动恢复以及测试结果记录反馈等功能。发生设计更改时,更改内容在模型内部快速传递,三类输出结果同步更新。

3 结 论

本文聚焦深空探测器多器协同测试任务的特点和难点,提出一套多器协同数字化测试验证方案。目前,该方案应用于“嫦娥七号”探测器研制任务,有效地支持了探测器系统级电性能的测试工作,并通过被测对象功能性发展牵引测试模式由单器传统自动化测试向多器协同数字化测试迈进一步。

参 考 文 献

- [1] 王华茂. 航天器综合测试技术发展与展望[J]. 航天器工程, 2021, 30(5): 125-132.
WANG H M. Spacecraft comprehensive testing technology development and prospects[J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(5): 125-132.
- [2] 权爽, 张静, 马千里, 等. 嫦娥四号任务中继通信链路地面测试验证及数据处理[J]. 航天器工程, 2019, 28(4): 109-115.
QUAN S, ZHANG J, MA Q L, et al. Relay communications link ground test and data processing of Chang'e-4 mission[J]. Spacecraft Engineering, 2019, 28(4): 109-115.
- [3] 宋世民, 张伍, 刘加明, 等. 嫦娥五号探测器系统级电性能测试设计与实践[J]. 宇航学报, 2021, 42(8): 961-966.
SONG S M, ZHANG W, LIU J M, et al. System level electrical test design and practice of Chang'e-5 lunar probe[J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(8): 961-966.
- [4] 富小微, 宋世民, 赵阳, 等. 探月三期月地高速再入返回飞行器全任务飞行过程验证策略设计与实践[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(2): 139-144.
FU X W, SONG S M, ZHAO Y, et al. Design and practice for the full mission flight process validation strategy[J]. Scientia Sinica(Technologica), 2015, 45(2): 139-144.
- [5] FU X W, WANG Z F, FU X J, et al. System level fault verification of high-level autonomic deep space exploration probe[C]//Proceedings of 69th International Astronautical Congress. Bremen: IAC, 2018.
- [6] FU X W, YANG M F, WANG Z F, et al. A FSM-based approach for system level flight procedure verification of deep space exploration probes[C]//Proceedings of 68th International Astronautical Congress. Adelaide: IAC, 2017.
- [7] 孙泽洲, 饶伟, 贾阳, 等. 天问一号探测器地面验证技术[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(8): 1145-1161.
SUN Z Z, RAO W, JIA Y, et al. Ground test technology for the Tianwen-1 Mars probe[J]. Scientia Sinica(Technologica), 2022, 52(8): 1145-1161.
- [8] 金晟毅, 邓湘金, 郑燕红, 等. 月面采样封装操作系统设计与实现[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(8): 912-920.
JIN S Y, DENG X J, ZHENG Y H, et al. Design and implementation of an operation system for lunar surface soil sampling & encapsulation[J]. Scientia Sinica(Technologica), 2021, 51(8): 912-920.
- [9] 孙泽洲, 韩宇, 白帆, 等. 天问一号火星探测器多节点、多体制中继通信系统设计与验证[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(2): 226-236.
SUN Z Z, HAN Y, BAI F, et al. Design and verification of the multimode and multisystem relay communication system for the Tianwen-1 Mars probe[J]. Scientia Sinica(Technologica), 2022, 52(2): 226-236.
- [10] 盛瑞卿, 赵洋, 邹乐洋, 等. 月面无人自动采样返回飞行程序设计与实现[J]. 中国空间科学技术, 2021, 41(6): 91-102.
SHENG R Q, ZHAO Y, ZOU L Y, et al. Flight program design and implementation of unmanned automatic lunar sampling and return mission[J]. Chinese Space Science and Technology, 2021, 41(6): 91-102.

作者简介:

傅晓晶(1987-), 女, 高级工程师, 主要研究方向: 深空探测器系统级测试与测试系统设计。

通信地址: 北京海淀区友谊路104号中国空间技术研究院(100094)

电话: (010)68744554

E-mail: fuxiaojing2021@126.com

Comprehensive Testing Technology for Multi Spacecraft Collaboration in Chang'E-7 Lunar Probe

FU Xiaojing, CAI Xiaodong, LIU Yiming, TIAN Guoliang, WEN Xin

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: In response to the complex joint power supply testing mode, diverse inter spacecraft and ground communication scenarios, and high requirements for simulation flight test design and verification caused by the collaboration, high complexity, high coupling, and high intelligence of Chang'E-7 lunar probe, the difficulties in system level electrical testing were analyzed, and a digital testing and verification strategy for multi vehicle collaboration was proposed. It includes a model based intelligent safety auxiliary testing for multi device joint power supply, a multi scenario high autonomous measurement and control data transmission testing system based on multi-source data autonomous decision-making, and a flight program-simulation flight test design verification system, which changes the current situation where complex system level electrical testing mainly relies on manual or traditional single satellite automated testing technology. It was applied to the development of Chang'E-7 lunar probe, to provide strong support for fully verifying the correctness, consistency, and stability of the functions and electrical performance indicators of the lunar south pole probe, achieve comprehensive, reliable, and efficient testing and verification, and promote spacecraft testing to move further from traditional automated testing of single spacecraft to collaborative intelligent testing of multiple spacecraft.

Keywords: lunar south pole; spacecraft; comprehensive testing; multi spacecraft collaboration; key technology

Highlights:

- Intelligent safety auxiliary testing and verification technology for multi device joint power supply is developed.
- A multi scenario high autonomy measurement and control data transmission testing system is designed.
- An integrated design and verification system for flight program simulation flight is introduced.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]