

航天器综合测试技术与发展趋势综述

王华茂

(北京空间飞行器总体设计部,北京 100094)

摘要:航天器综合测试技术是在航天器总装和试验过程中,依据“激励-响应”基本测试原理,运用“实物+仿真”测试方法,获取被测航天器定性、定量参数信息,并进行处理和评定的技术。从航天器综合测试需求出发,以综合测试技术流程为主线,以测试原理与方法、测试设计与研制、测试验证与评估为重点,从测试性设计、测试方案设计到测试实施全过程概述了航天器综合测试技术与发展趋势。

关键词:航天器;综合测试技术;发展趋势

中图分类号:V416 文献标识码:A 文章编号:1000-8829(2021)10-0001-08

doi:10.19708/j.ckjs.2021.10.001

Overview on Spacecraft Electrical Testing Technology and Developement Trend

WANG Hua-mao

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

Abstract: The spacecraft electrical testing technology is to obtain qualitative and quantitative parameter information of the spacecraft under testing, and to process and evaluate according to the basic testing principle of “incentive-response” and the use of “physical + simulation” testing methods in the process of spacecraft assembly and test. Based on the needs of spacecraft electrical testing, taking the testing technology flow as the main line, focusing on the testing principle and method, testing design and development, testing verification and evaluation, the electrical testing technology and developement trend are summarized from the whole process of testability design, testing design, testing implementation.

Key words: spacecraft; electrical testing technology; developement trend

航天器综合测试是指航天器从总装开始直至发射之前对航天器电气性能的测试。航天器综合测试技术是一项具有总体属性的专业技术;是在航天器总装和试验过程中,依据“激励-响应”基本测试原理,运用“实物+仿真”测试方法,获取被测航天器定性、定量参数信息,并进行处理和评定的技术;是在航天器系统集成和模拟环境试验条件下,对航天器接口、功能、性能指标,正常模式、故障模式、动态模飞,以及系统间、大系统兼容性等进行全面测试验证和诊断评估的技术^[1]。由于航天器具有长寿命、高可靠性、高风险,以及一旦发射入轨就不易维修等特点,综合测试便成了航天器系统研制的最后关键环节,是评价航天器研制

质量的重要依据,以及确保航天器发射成功、在轨稳定运行的重要保证^[2]。自我国第一颗人造地球卫星研制以来,航天器综合测试成功支持并保障了通信卫星、遥感卫星、导航卫星、载人航天、月球及深空探测等各类航天器的研制和发射任务,形成了涵盖总控、供配电、测控、数管、热控、综合电子、控制、载荷等分系统的完整的综合测试专业体系,具备测试任务分析、测试方案设计、测试系统研制、测试用例设计、测试实施和测试分析评估等全流程的综合测试能力。目前,我国正在开展空间站建设、月球着陆巡视探测、月球基地、载人登月及火星着陆巡视探测、小行星探测等型号研制工作,航天器综合测试也将面临更广阔的发展机遇和

收稿日期:2021-07-28

引用格式: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.

WANG H M. Overview on Spacecraft Electrical Testing Technology and Developement Trend[J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(10):1-8.

前所未有的挑战。

1 航天器综合测试技术体系架构

伽利略 400 多年前就赋予了科学家测量的使命：“使不可测成为可测”(What is not measurable make measurable)。

测量或测试是依据“激励 - 响应”基本原理,获得反映事物物理属性信息的过程。对一个系统进行测试的过程,实际上是为了获取表征被测试系统特性信息的过程。

航天器设计的实物测试验证,同样是对设计产品施加各种形式的外部激励,包括机、电、热、压、磁等, 获取产品产生的响应,并根据判别准则判定航天器产品设计的正确性,或发现产品存在的故障和隐患。

虽然实物测试验证方法能够解决目前航天器设计的测试验证的大部分问题。但仍有很多实物测试无法在地面完成,例如在轨环境下的失重、真空、起爆、伸展等。只能通过重力卸载、抽真空等手段模拟在轨环境进行有限的测试验证。但实物测试验证方法无法对在轨姿态和轨道控制进行测试验证。

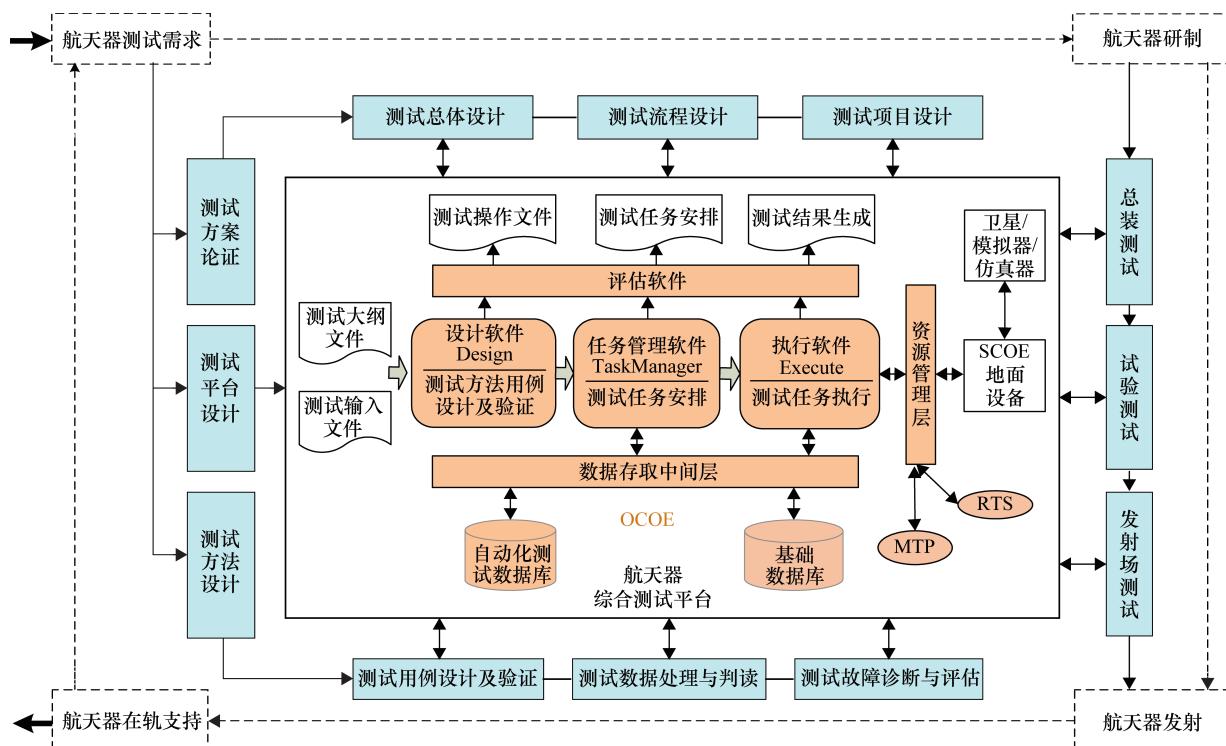
使不可测成为可测,也是航天器测试人的使命。通过数字仿真、半物理仿真、全物理仿真模型(如姿态和轨道的动力学仿真),很好地解决了仅靠实物测试

无法实现的难题。

在奠定了“实物 + 仿真”的测试验证方法的基础上,以“遥控遥测”作为整星测试“激励 - 响应”手段,通过基于自动化测试序列的测试用例设计,实现航天器软硬件的功能类的测试;以“仪器设备”作为整星测试“激励 - 响应”手段,通过基于板卡驱动程序的测试插件的自动化测试用例设计,实现航天器软硬件的性能指标类的测试,从而实现了基于“测试序列 + 驱动程序”的自动测试,同时尝试了基于“专家知识 + 人工智能”的智能测试,并探索了基于“全数字模型”的虚拟测试。

中国空间技术研究院总体设计部(北京空间飞行器总体设计部)是我国组建成立最早、总体领域最多、专业技术最齐备的空间飞行器研制核心总体单位,其在航天器综合测试领域已深耕 50 多年。从我国首颗 DFH-1 卫星的手动操作和人工判读的测试开始,到 20 世纪 80 年代末在学习引进 ESA 的 ETOL(European Test Operating Language)自动化测试技术的基础上,跟踪 ESA 的 SCOS-2000 和 NASA 的 GMSEC(Goddard Mission Services Evolution Center)等航天器测试技术,形成了今天覆盖各类航天器测试需求的、专业齐全的、全业务的综合测试技术体系^[3-6]。

航天器综合测试技术体系架构如图 1 所示。



注:MTP (Master Test Processor)—主测试计算机;OCOE(Overall Check Out Equipment)—总控测试设备;

SCOE(Special Check Out Equipment)—分系统专用测试设备;RTS(Real Time Server)—实时数据服务器

图 1 航天器综合测试技术体系架构

2 航天器综合测试原理、方法与设计

2.1 测试性设计研究

测试一般处于产品研制流程的末端,被动地对已完成设计和生产的产品来开展。在产品设计阶段,开发人员往往只重点考虑功能、性能的实现,而忽视了产品的可测试性或测试性设计。事实上,测试性与被测试产品的设计密不可分。

航天器结构和功能复杂度集成度的提高,带来了测试覆盖不充分、故障检测不完全、故障隔离不到位等问题,给航天器的发射和在轨运行留下了可靠性安全隐患,也降低了系统效能和研制效率。测试性代表方便测试和故障处理的能力,是指产品能及时、准确地确定其状态并隔离其内部故障的一种设计特性^[7-8]。

系统的测试性要求要与可靠性、维修性、保障性、安全性等相关特性及资源相协调,保证与任务需求、使用要求、维修保障策略一致,并满足可靠性、维修性、保障性、安全性工作的有关输入要求,减少重复,从而降低寿命周期费用。为此,系统应当满足测试性的定量和定性要求^[9-15]。

当前国内外虽然出台了很多与测试性设计相关的标准规范,但仍停留在定性要求的层面,没能给出具体的定量设计方法,也没有成熟的工具手段。

要想实现定量设计,应依次解决以下问题:①如何分解系统设计指标,将其转化为测试性设计指标;②如何对系统设计进行测试性建模,得出模型的初步测试性指标值;③根据测试性设计指标与模型指标的差异,如何对模型进行迭代和优化。这里的模型就是满足测试性设计指标的系统设计模型。通过定量的系统设计指标,借助测试性设计工具,从初始模型逐步得出优化的系统设计模型。测试性设计工作流程围绕测试性设计定量指标(故障检测率、隔离率、检测时间、隔离时间和虚警率等)展开。

首先,测试性设计面向测试,其指标要求的输入来源于系统可用度、可靠度、最优化设计等影响因素,通过对系统测试过程的 DSPN(Deterministic and Stochastic Petri Net,确定与随机 Petri 网)建模分析,以及对模型的数学求解,确定测试性指标输入输出函数关系式,并最终得出测试性指标的输出值。

其次,根据星地大回路的激励-响应测试原理,基于多信号流图建模方法,利用 TEAMS(Testability Engineering And Maintenance System)软件建立具备通用性的航天器系统级测试性模型。从系统级出发,以航天器多层次功能结构为框架,按照功能和信息流逐级向下确定各级功能模块的能量、信息和故障传播关系。

然后,利用测试性分析对设计进行量化评估,可以反映系统的测试性设计的质量。测试性分析包括测试性概况报告、故障诊断状况、冗余测试项目等几部分工作,需要综合各项结果对系统进行评估,并由 TEAMS 给出测试性量化评估报告。

最后,为使系统级测试性分析结果满足测试性指标要求,需要对测试性初始模型进行优化。根据测试性初步分析,以测点设计、故障隔离开关设计和 BIT(Built-in Test)设计为主要优化方向,并使最终设计模型满足测试性指标要求。

对于航天器来说,无论是地面测试还是在轨运行,测试性设计都十分重要。例如,对于遥感卫星的光学相机等复杂光机电设备的测试性设计,通过采用故障码和菊花链设计,成功解决了卫星相机地面测试和在轨使用的难题。相机工作前,只需通过菊花链检测和相机自检,便可了解相机的工作状态,如果出现故障,便可通过故障码进行故障排查。

2.2 航天器测试原理

(1) 系统测试研究的两类科学问题。

系统测试研究以下两类科学问题:一类是给被测试对象一系列输入(或称激励) X_i 并测量相应的一系列输出值 Y_i ,通过分析和处理输入和输出之间的关系,求出变换函数 F ,从而得出 $Y_i = F(X_i)$ 。这类测试是为了获取系统的“数学模型”或“系统特性”。另一类是系统的“数学模型”或“系统特性”已知,通过对输入和输出特性的分析,检查和确认系统是否达到了要求,以及系统中是否存在故障。这类测试是对系统的“功能和性能测试检查和确认,以及判断系统是否有故障”的过程。航天器综合测试一般侧重的是第二类科学问题。

(2) 测试基本原理。

测试的基本原理,即“激励-响应”基本原理,是通过上行链路对被测对象进行控制和激励,通过下行链路对其响应情况进行采集和判断。对于航天器测试来说,环境激励必不可少。

(3) 测试建模。

建模就是通过抽象、理想化、简化和类比等方法形成仿真模型的过程。一个设计的成功与否取决于物理系统是否正确地被描述。物理系统可以用它的仿真模型正确地描述。航天器测试通常需要建立三类模型:航天器模型、测试系统模型和测试模型。

① 航天器模型:即被测对象模型,由航天器(Spacecraft, S/C)上遥控(TeleCommand, TC)、遥测(TeleMetry, TM)或数管(On Board Data Handling, OB-DH)和相关分系统组成。

② 测试系统模型:由测试仪器、设备及软件等组

成的测试系统模型。理想测试系统模型为线性时不变系统;实际测试系统模型为时变、非线性系统,且存在系统干扰。

③ 测试模型:由测试系统模型和被测对象模型组成的星-地测试模型。在建立星-地测试模型后,便

可开展上述两类科学问题的研究。针对第二类科学问题,由于被测航天器的“数学模型”已知,通过星-地测试模型,根据激励-响应测试原理,给出输入激励,可获得输出响应,再根据相应判据,便可最终获得测试结果。星-地测试模型如图2所示。

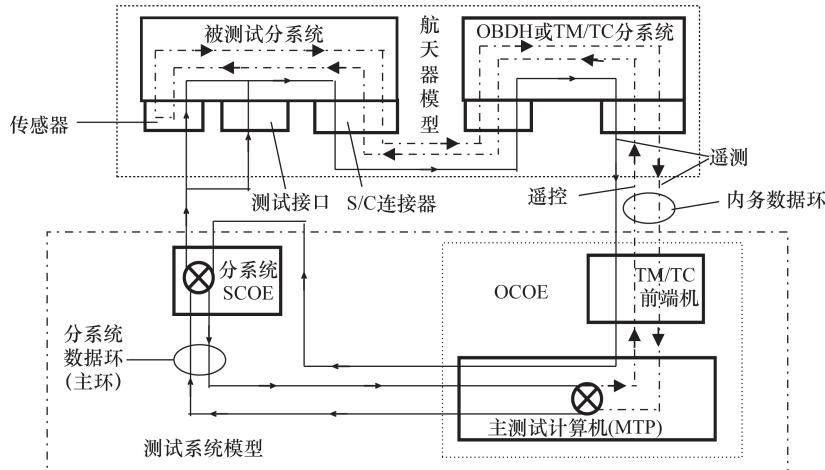


图2 星-地测试模型

2.3 航天器测试方案设计

(1) 测试验证基本策略

测试验证基本策略如下。

① 遵循先进行“通过/不通过”(GO/NO GO)链测试,再进一步进行故障寻迹或诊断性测试的原则。

② 由上至下方法(Start-Top),也称降级法,把被测试对象分为几大部分,例如A、B、C等。对A进行测试,若A通过,则测试B,若B通过,则测试C,直到各部分测试都通过。

③ 由下至上方法(Start-Down),也称为升级法或滚雪球法。从被测试对象的最小可测试部分 T_1 开始进行测试。若 T_1 通过了测试,则把被测试对象的另一小部分 T_2 加上去,同 T_1 一起进行测试,直到整个系统通过测试为止。

④ 混合方法,也称重新划分法。对被测对象的某一部分(由A、B组成)进行测试 T_1 ,然后再对另一部分(由B、C组成)进行测试 T_2 。这两次测试的部分有一部分是公共部分B,不同的部分是A和C。测试 T_1 包含了A和B,测试 T_2 包含了B和C。综合运用上述策略,进行逻辑推理,就能最终进行故障定位。

(2) 航天器测试总体设计。

航天器系统的功能性能验证通过电性能测试来完成,一般分为总装测试、试验测试和发射场测试3个阶段,具体如下。

① 总装测试是航天器总装过程的测试,根据航天器的总装状态的不同,分A、B、C、D等电测状态。

② 试验测试包括航天器模拟EMC(Electro Mag-

netic Compatibility)、力学、热真空、在轨运行等空间环境的电性能测试。

③ 发射场测试包括航天器再总装测试、与运载和发射场系统联合测试、射前设置等工作。

航天器系统的功能性能测试验证流程及测试内容如下。

① 单机、分系统交付整星总装集成后,通过地面测试系统模拟整星供电,建立上、下行信息通道和测试环路,在整星环境下,对航天器系统进行综合测试。

② 分系统级测试。整星主要测试的分系统包括供配电分系统、测控分系统、数管分系统、热控分系统、控制分系统、载荷分系统等。

③ 系统级测试。航天器系统级测试内容主要包括系统级功能和主要技术指标、正常工作模式、故障工作模式、冗余设计项目的测试,以及系统联试、模式测试、模飞测试、大系统测控对接测试、运控对接测试、专项试验测试等。

④ 环境试验测试。其中,环境适应性试验测包括地面运输环境、发射环境、空间环境、磁环境等的试验测试。

(3) 星-地测试系统。

要完成上述综合测试任务,需要依据前述航天器测试原理,设计地面测试系统EGSE(Electrical Ground Support Equipment,电气地面支持设备),并与被测航天器一起构成星-地测试系统,如图3所示。

EGSE各部分主要功能如下。

① OCOE(Overall Check Out Equipment):完成测

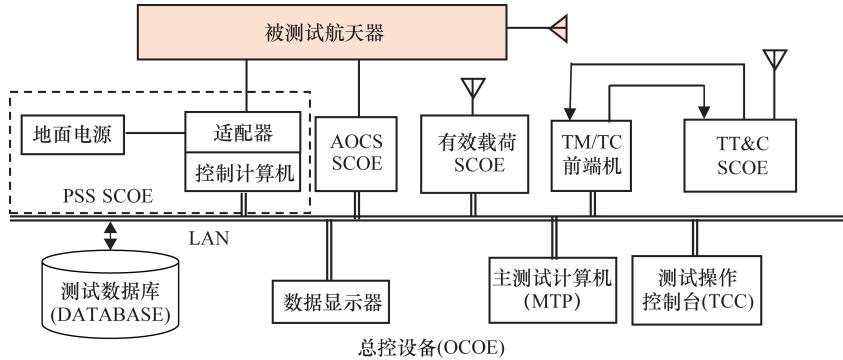


图 3 星 - 地测试系统的基本组成

试数据库准备、测试过程管理、数据处理、数据归档和事后离线回放处理,包括主测试计算机(Master Test Processor, MTP)、遥测前端设备(TMFE)、遥控前端设备(TCFEE)、测试操作控制台(TCC),其中 MTP 是 OCOE 的核心。

② SCOE(Special Check Out Equipment): 完成本分系统级测试,在系统级测试时,在 MTP 管理下,完成相关的测试和信号激励。

③ LAN:以太网、TCP/IP 协议。通过局域网互联,构成完整的 EGSE。

④ DATABASE:保存有测试过程的记录和历史数据,可进行事件查询。

(4) 测试环路设计。

航天器系统级测试是在星 - 地测试系统上构建两个基本测试环路来实现的,包括指令激励/响应测试环路和信号激励/响应测试环路,即图 2 所示的内务数据环(点划线所示)和分系统数据环(实线所示)。

① 指令激励/响应测试环路,即通过上行遥控指令激励和下行遥测响应就能完成一项测试的环路,该环路一般用于完成功能类项目的测试。这个环路同航天器在轨运行时的测控环路相似。

② 信号激励/响应测试环路,即除上述指令激励/响应测试环路配合外,还需要对被测对象进行物理信号的激励并获取其响应才能完成一项测试的环路,该环路一般用于完成性能指标类项目的测试。

2.4 航天器测试详细设计

在完成航天器测试方案设计后,便要进行测试方案的详细设计,包括测试系统设计、测试文档设计、测试方法用例设计、测试判读设计等,这里重点介绍测试用例设计、遥测数据处理方法设计和测试数据判读方法设计。

(1) 测试用例设计。

测试用例设计的依据是测试方法标准规范、测试用例设计规范和测试用例设计方法。测试用例需要覆盖航天器单机、分系统、系统和大系统等各个层级,以

及从初样、正样、环境试验到发射等各个阶段的所有电测项目的测试原理和测试方法的设计需求和实现^[16-18]。

① 测试方法标准规范:根据测试项目,选择相关测试原理和测试方法,依据相应测试方法的标准规范,具体化测试用例设计。这里的标准规范是指国际标准、国家标准、行业标准或部门规范等。

② 测试用例设计规范:为测试人员提供测试用例设计的指导,确保测试用例设计要素的完整性,提高测试用例设计的科学性、合理性和可执行性,从而有助于提高测试覆盖性和测试效率。

③ 测试用例设计方法:为了满足测试覆盖性和测试有效性要求,需要运用专业的测试用例设计方法,一般包括基于 FSM 的用例设计方法、等价类划分法、边界值分析法、错误推测法、因果图法、正交表分析法、任务场景分析法等。

(2) 遥测数据处理方法设计。

航天器的测试响应通常呈现为遥测数据的形式。遥测数据处理通常是以一个遥测帧为周期,一个完整的帧结束使处理程序启动,通常把一帧结束作为“帧事件”。程序根据“数据表”定义的属性,逐一对数据进行处理,直到这一帧的所有数据处理完毕,再等待下一个帧事件到来。遥测数据处理是按照流程来驱动数据表、启动帧事件,数据处理过程中要多次访问数据表。

(3) 测试数据判读方法设计。

测试数据判读方法一般包括实时数据判读分析方法(如图 4 所示)和历史(离线)数据判读分析方法。

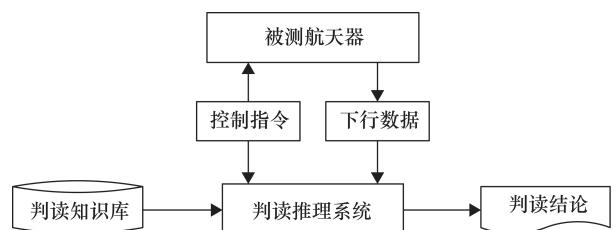


图 4 航天器测试数据实时判读原理示意图

① 实时数据判读分析方法。

对于某个参数 P_i 来说, 其期望值 V 与当前下行遥测 P 、控制指令 C 、飞行事件 E 以及当前时刻 T 之间的关系是确定的, 可以表示成如下函数: $V = f(P, C, E, T)$ 。那么有关参数 P_i 的数据判读过程, 即在相应条件下计算函数 $V = f(P, C, E, T)$ 的值是否与设计指标相符的过程。

② 历史(离线)数据判读分析方法。

历史(离线)数据判读分析方法是一种离线的、时间跨度较长的、针对数据历史趋势同时结合不同数据间相关性的(包括数据分类和提取)基于知识过程分析和利用统计学比对的方法。历史数据判读比对分析方法按流程可以大体划分为: 数据分类、数据提取、相关性分析、一致性比对分析、结合知识的过程分析共5个模块。

2.5 航天器测试故障诊断

在航天器研制和在轨运行过程中, 一旦出现故障, 首先要对故障进行定位。故障定位的一般步骤为: 先地面后星上、先系统后部件、从大到小、从易到难、逐步缩小检查范围, 直至定位故障部位为止。然后要对故障原因进行分析和验证。只有准确地找出故障原因, 才能进行故障对策研究。有许多因素都能引起故障, 故障的表现形式多种多样, 故障处理和诊断的方法也各不相同。通常使用故障仿真的方法来进行故障诊断、分析和验证: ① 分析讨论故障的各种可能原因; ② 应用故障仿真方法对可能原因进行仿真试验, 排除不可能原因后, 最后不能排除的即为故障的真正原因, 至此完成对故障的诊断定位; ③ 讨论此故障的对策, 即在完成故障诊断定位后, 讨论并制定故障对策; ④ 应用故障仿真方法对制定出的对策进行仿真试验, 验证对策有效性; ⑤ 完成对策验证后, 发出相应遥控指令, 执行故障对策^[19-25]。

故障仿真可以通过以下3种方式进行: 数学仿真、半物理仿真和全物理仿真

(1) 数学仿真。

对于不同轨道的航天器, 以其轨道动力学的数学模型为基础, 进行在轨卫星轨道和姿态等设计的测试验证或故障排查, 包括正常模式仿真、故障模式仿真和故障对策仿真等。其重点是建立和完善卫星模型库, 包括故障模型。数学仿真方法是最基础的方法, 对硬件的要求最简单, 有合适的计算机即可以进行数学仿真。当有比较精确的数学模型时, 数学仿真可以得到较满意的结果。

(2) 半物理仿真。

通常在进行飞行程序、复杂逻辑、并发性、实时性等设计的测试验证或故障排查时, 星上计算机用实物,

其余用数学模型。由于星上计算机的行为十分复杂, 很难用精确的数学模型去表达, 若用纯数学仿真方法很难有满意结果, 而采用半物理仿真有利于故障模式实现。

(3) 全物理仿真。

仿真试验中应用模拟器设备(如气浮台、重力卸载架、振动台、真空罐、微波暗室等)来模拟卫星工作环境状态, 将整星或部分卫星设备实物接入了仿真试验回路, 进行卫星设计的测试验证或故障排查。该方法仿真逼真度最高, 仿真试验系统也最复杂。

3 航天器综合测试技术发展趋势

进入“十四五”后, 航天任务的复杂性和高风险要求航天器具有高可靠性、高安全性, 这给综合测试带来了新挑战, 传统的航天器综合测试技术受到了极大制约, 如复杂航天任务在轨活动细节地难以精确验证、地面环境大型复杂机构实物不可测试、基于专家知识和人工智能的智能测试手段缺乏等, 迫切需要进行技术创新和研究, 例如信息物理融合的一体化综合试验验证技术、自主无人装备多级协同测试验证技术、基于航天器数字模型的测试设计与验证技术、基于数字孪生的虚拟测试技术等。航天器综合测试核心是以数据和模型为基础, 以物理空间和数字空间的数据传递与信息反馈为途径, 按照基于模型的系统工程(Model-Based Systems Engineering, MBSE)的基本思路, 构建实物航天器的数字孪生体, 实现对航天器实物模型的状态、行为和性能的数字映射和镜像, 从而获得航天器数字模型。为此, 建立航天器数字化测试技术体系架构, 开展航天器系统级、分系统级、单机级测试建模, 搭建数字航天器及其测试验证平台和环境, 形成复杂航天器数字化测试验证、一体化智能测试验证及诊断能力, 是航天器综合测试技术的发展趋势^[26-36]。航天器数字化测试技术体系架构如图5所示。

(1) 航天器数字化测试技术体系架构。

围绕航天器综合测试业务, 建立航天器数字化测试技术体系架构。全面引入数字孪生、智能硬件、物联网、云平台、大数据、人工智能等新一代信息技术, 从全要素、全流程、全业务等角度推进测试现场的深度感知与智能分析, 核心是建立包括航天器数字化测试模型、测试验证平台、星地虚拟测试验证环境等为主体的航天器数字化测试体系架构, 并通过数字孪生系统指导测试项目优化、测试流程优化、测试方法优化、测试过程风险识别和预警, 实现关键测试过程和关键参数的持续优化迭代, 促进测试资源优化配置和测试效率提升, 实现精准、高效测试评估。

(2) 航天器数字化测试建模技术。

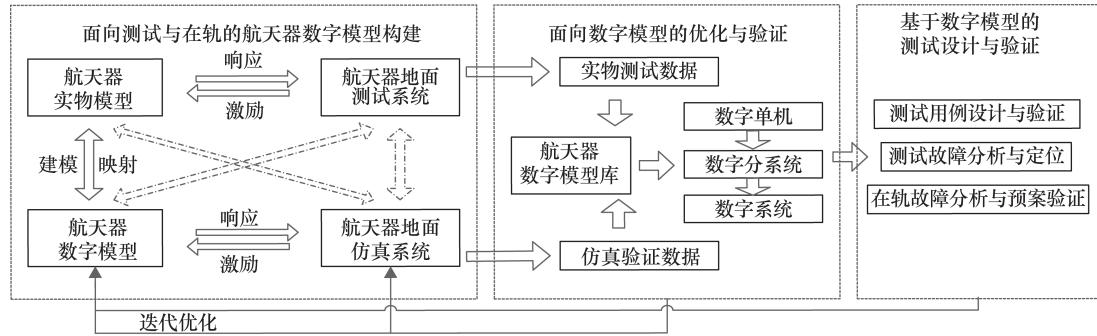


图 5 航天器数字化测试技术体系架构

围绕航天器产品的高可靠性、高安全性需求,通过对卫星电气分系统通用性能的分析,建立可重用、可扩充的航天器系统级、分系统级、单机级数字化模型。研究分系统、单机多源异构模型一体化仿真技术,模型联合调度、驱动技术,并基于标准规范研究通用仿真架构技术,空间动力学仿真环境构建技术,星地、星间、星内数据流仿真技术,形成复杂航天器运行状态、任务执行状态等全方位仿真验证能力,支撑虚拟测试、测控对接、运控模拟、在轨故障处理等业务应用。

(3) 航天器集成测试验证平台技术。

针对航天器自主性、可靠性、功能更加复杂等特点,搭建具备系统级、分系统级、单机级数字化模型接口及协议的航天器测试验证平台,研究测试模型构建关键技术、测试用例自动生成技术,建立从测试需求追溯到设计需求关联、测试模型与需求统一的追溯路径,形成测试模型自检、功能和性能的测试验证,打通测试需求分析、模型设计、用例生成、用例验证流程,实现对被测对象全生命周期的测试设计验证,形成航天器系统级测试性模型搭建、测试性分析与量化评估方法,工作流程和设计优化迭代规范,以及针对故障诊断和健康管理能力的测试性优化方法,最终建立测试评价方法和体系。

(4) 航天器数字模型的测试验证环境构建技术。

围绕航天器产品的高可靠性、高安全性需求,结合航天器电磁、温度、应力、振动等传感器采集数据,以理论模型为基础,以数字化测试模型为试验测试对象,与测试验证平台组成星地测试系统,建立数据驱动的航天器星地虚拟测试验证环境模型。研究航天器热真空环境模拟技术、入轨主动段及位置保持力学环境模拟技术、太阳辐照及高能粒子环境模拟技术、地磁场及空间磁场环境模拟技术、引力场及微重力环境模拟技术等,形成复杂航天器运行环境的仿真验证能力,从而完善航天器工作环境要素,使测试场景更贴近实际,实现航天器星地虚拟测试验证环境的精确模拟。

(5) 基于数字孪生的航天器测试验证技术。

针对复杂多变的航天器综合测试任务,开展面向

测试验证的航天器数字化建模技术、航天器数字化模型集成验证技术、面向虚实交互的精确时间同步技术、基于数字单机的航天器虚实结合测试技术、基于 AR/VR/MR 的航天器人机交互技术等研究,构建全面、真实、实时、直观的航天器及地面测试系统数字孪生体,完成航天器各指标虚实结合测试验证,支撑航天器虚拟测试、数字伴飞、高保真演练、运行控制模拟等任务需求。

(6) 航天器一体化智能测试验证及诊断技术。

开展适应未来航天器应用的微小型低功耗智能传感器一体化设计与集成验证技术、新型光纤传感技术、复杂空间环境动态快速感知和诊断预判技术,实现传感器感知高度集成和智能计算、传感器网络优化设计和集成验证能力、复杂空间环境快速感知和预判能力等,以及磁场、温度场、应力场、振动、结构变形等多源感知的传感器一体化设计,使航天器具备自采集、自检测、自校准、自诊断和自评估能力,形成航天器一体化智能测试验证及诊断能力。

参考文献:

- [1] 王华茂. 航天器综合测试技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2018.
WANG H M. Spacecraft electrical test technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018 (in Chinese).
- [2] 王华茂,闫金栋. 航天器电性能测试技术[M]. 北京:国防工业出版社,2017.
WANG H M, YAN J D. Electrical test technology of space-craft[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017 (in Chinese).
- [3] YAN J D, WANG H M. Automatic EGSE system for batch testing of spacecraft[C]// The 5th CSA-IAA Conference on Advanced Space Technology. 2013:139 – 145.
- [4] COUCH M, CINA G, MONTRONI G, et al. SCOS-2000 release 5:a milestone in the evolution of the MCS infrastructure at ESOC [C]//SpaceOps 2006 Conference. 2006: 5607.
- [5] CHAMOUN J P, RISNER S, BEECH T, et al. Bridging ESA and NASA worlds: lessons learned from the integration of

- hifly®/SCOS-2000 in NASA's GMSEC [C]//2006 IEEE Aerospace Conference. 2006:1 – 8.
- [6] 富小薇,王华茂,闫金栋,等.航天器系统级测试现状分析[J].航天器工程,2017,26(1):120 – 126.
FU X W,WANG H M,YAN J D,et al. Current situation overview of spacecraft system level test[J]. Spacecraft Engineering,2017,26(1):120 – 126(in Chinese).
- [7] Testability program for electronic systems and equipments: MIL-STD-2165[S]. 1985.
- [8] 装备测试性工作通用要求:GJB 2547A—2012 [S]. 2012.
General requirements for equipment testability: GJB 2547A—2012[S]. 2012(in Chinese).
- [9] 李彬,张强,任焜,等.航天器可测试性设计研究[J].空间控制技术与应用,2010,36(5):13 – 17.
LI B,ZHANG Q,REN K,et al. Research on test design for spacecraft[J]. Aerospace Control and Application,2010,36(5):13 – 17(in Chinese).
- [10] 田仲,石君友.系统测试性设计分析与验证[M].北京:北京航空航天大学出版社,2003.
TIAN Z,SHI J Y. System testability design analysis and verification [M]. Beijing:Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press,2003(in Chinese).
- [11] 石君友.测试性设计分析与验证[M].北京:国防工业出版社,2011.
SHI J Y. Testability design analysis and verification [M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2011 (in Chinese).
- [12] 邱静,刘冠军,杨鹏.装备测试性建模与设计技术[M].北京:科学出版社,2012.
QIU J,LIU G J,YANG P. Equipment testability modeling and design technology [M]. Beijing: Science Press, 2012 (in Chinese).
- [13] BAREISA E,JUSAS V,MOTIEJUNAS K,et al. Evaluation of testability enhancement using software prototype[J]. IET Computers & Digital Techniques,2012,6(3):166.
- [14] 李建楠,胡健生,吴文.基于确定与随机 Petri 网的CS-MA/CD 协议建模与分析[J].计算机应用与软件,2012,29(7):207 – 209.
LI J N,HU J S,WU W. DSPN-based CSMA/CD protocol modeling and analysis[J]. Computer Applications and Software,2012,29(7):207 – 209(in Chinese).
- [15] 白力舸,王华茂,闫金栋.基于 DSPN 的航天器系统级可测试性指标确定方法[J].航天器工程,2013,22(6):127 – 133.
BAI L G,WANG H M,YAN J D. Spacecraft system testability figure requirement determination method based on DSPN[J]. Spacecraft Engineering,2013,22(6):127 – 133 (in Chinese).
- [16] 刘攀,缪淮扣,曾红卫,等.基于 FSM 的测试理论、方法及评估[J].计算机学报,2011,34(6):965 – 984.
LIU P,MIAO H K,ZENG H W,et al. FSM-based testing: theory,method and evaluation[J]. Chinese Journal of Computers,2011,34(6):965 – 984(in Chinese).
- [17] 陈亚龙,江国华.基于 FSM 的 Web 应用测试用例生成研究[J].电子科技,2013,26(4):17 – 21.
CHEN Y L,JIANG G H. Research on Web application test case generation based on FSM [J]. Electronic Science and Technology,2013,26(4):17 – 21 (in Chinese).
- [18] 吕笑慰,王华茂,闫金栋.基于状态图的航天器测试用例设计[J].航天器工程,2014,23(6):135 – 140.
LYU X W,WANG H M,YAN J D. Research of statecharts-based test case design in spacecraft test [J]. Spacecraft Engineering,2014,23(6):135 – 140 (in Chinese).
- [19] 故障树分析指南:GJB/Z 768A[S]. 1998.
Guide to fault tree analysis: GJB/Z 768A[S]. 1998 (in Chinese).
- [20] 张新邦,索旭华.卫星控制系统故障仿真技术研究[J].航天控制,2002,20(1):51 – 56.
ZHANG X B,SUO X H. Study on the failure simulation techniques for satellite control system [J]. Aerospace Control,2002,20(1):51 – 56 (in Chinese).
- [21] 向睿.在轨卫星远程诊断关键技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2009.
XIANG R. Research on key technology of remote diagnosis system for in-orbit satellite [D]. Changsha:National University of Defense Technology,2009 (in Chinese).
- [22] 张新邦.航天器仿真技术[C]//2003 全国仿真技术学术会议论文集. 2003:99 – 106.
ZHANG X B. Spacecraft simulation technology [C]// Proceedings of the National Conference on Simulation Technology. 2003:99 – 106 (in Chinese).
- [23] 潘安君,奚全生,孟汉城,等.综合测试与故障诊断技术发展及对策[J].计算机测量与控制,2011,19(1):1 – 6.
PAN A J,XI Q S,MENG H C,et al. Integrated test and fault diagnosis technology development and countermeasures [J]. Computer Measurement & Control,2011,19(1):1 – 6 (in Chinese).
- [24] HAMMAC J. L. Expert systems for future european space flight operations [J]. Journal of the British Interplanetary Society,1993,46:232 – 236.
- [25] DURRANI S,PERKINS D,CARLTON P. Expert systems and advanced automation for space missions operations [J]. Space Technology,1992,12(3):293 – 304.
- [26] 沈自才,邱家稳,丁义刚,等.航天器空间多因素环境协同效应研究[J].中国空间科学技术,2012,32(5):54 – 60.
SHEN Z C, QIU J W, DING Y G, et al. Space environment synergistic effect on spacecraft [J]. Chinese Space Science and Technology,2012,32(5):54 – 60 (in Chinese).

(下转第 16 页)

- [6] 柯鹏,杨春信,吴江浩,等.结冰实验段空气-水混合流动过程的数值模拟[J].航空动力学报,2009,24(7):1449-1456.
- KE P, YANG C X, WU J H, et al. Numerical simulation of mixing flow of air and water droplet in the test duct of icing research tunnel [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7):1449-1456 (in Chinese).
- [7] 易贤,马洪林,王开春,等.结冰风洞液滴运动及传质传热特性分析[J].四川大学学报(工程科学版),2012,44(S2):132-135.
- YI X, MA H L, WANG K C, et al. Analysis of water droplet movement and heat/mass transfer in an icing wind tunnel [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(S2):132-135 (in Chinese).
- [8] 李晓峰,常士楠,冷梦尧.冰风洞内水滴参数沿程变化的数值模拟[J].计算机仿真,2018,35(10):66-71.
- LI X F, CHANG S N, LENG M Y. Numerical simulation of water droplet parameters variation along the icing wind tunnel [J]. Computer Simulation, 2018, 35(10):66-71 (in Chinese).
- [9] CLIFT R, GRACE J R, WEBER M E. Bubbles, Drops and Particles[M]. New York: Academic Press, 1978:111-112.
- [10] 安东诺夫 A H,阿克谢诺夫 H K,戈里亚切夫 A B,等.航空燃气涡轮发动机防冰系统设计原理和试验方法[Z].刘静,等,译.俄罗斯中央航空发动机研究院,2001:25-26.
- ANTONOV A H, AKSHENOV H K, GOLYACHEV A B, et al. Aeronautical gas turbine engine anti-ice system design principles and test methods [Z]. Translator: LIU J, et al. Russian Central Aero Engine Research Institute, 2001:25-26 (in Chinese).
- [11] 裴燮纲,韩凤华.飞机防冰系统[Z].北京:航空教材编审组,1985:176-178.
- QIU B G, HAN F H. Aircraft anti-ice system [Z]. Beijing: Aviation Textbook Editing and Validation Team, 1985: 176-178 (in Chinese).
- [12] YOUNG R M, PFENDER E. Nusselt number correlations for heat transfer to small spheres in thermal plasma flows [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1987, 7(2): 211-229.
- [13] DEHGHANI-SANJI A R, MUZYCHKA Y S, NATERER G F. Droplet trajectory and thermal analysis of impinging saline spray flow on marine platforms in cold seas and ocean regions [J]. Ocean Engineering, 2018, 148:538-547.
- [14] TEKASAKUL P, NUNTADUSIT C, WAE-HAYEE M. Influence of nozzle arrangement on flow and heat transfer characteristics of arrays of circular impinging jets [J]. Songklanakarin Journal of Science and Technology, 2013, 35(2):203-212.
- [15] WANG Y, YANG Y, ZOU Y, et al. Evaporation and movement of fine water droplets influenced by initial diameter and relative humidity [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2016, 16(2):301-313.

(上接第8页)

- [27] 高亚奎,支超有,张芬.现代飞机综合试验与测试技术研究[J].航空制造技术,2012,55(22):40-44.
- GAO Y K, ZHI C Y, ZHANG F. Synthetic experiment and testing technology of modern aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(22):40-44 (in Chinese).
- [28] 杨庆华,蔡云芳.大型客机总装地面功能试验综合测试管理平台综述[J].航空制造技术,2014,57(5):88-91.
- YANG Q H, CAI Y F. Review of aircraft integrated test management platform on ground assembly functional test [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(5): 88-91 (in Chinese).
- [29] 庄存波,刘检华,熊辉,等.产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J].计算机集成制造系统,2017,23(4):753-768.
- ZHUANG C B, LIU J H, XIONG H, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 753-768 (in Chinese).
- [30] HEMMATI H, ARCURI A, BRIAND L. Achieving scalable model-based testing through test case diversity [J]. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology,

- 2013, 22(1):1-42.
- [31] LI M, KUMAR R. Model-based automatic test generation for Simulink/Stateflow using extended finite automaton [C]// 2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. 2012.
- [32] ESTEFAN J A. Survey of model-based systems engineering (MBSE) methodologies [EB/OL]. 2013-05-23. https://www.omg.org/MBSE_Methodology_Survey_RevB.pdf.
- [33] BHASIN Kul, BARNES P, REINERT J, et al. Applying model based systems engineering to NASA's space communications networks [C]// 2013 IEEE International Systems Conference. 2013.
- [34] WALSH A, PECCHIOLI M, REGGESTAD V, et al. ESA's model based approach for the development of operational spacecraft simulators [C]// SpaceOps 2014 Conference. 2014.
- [35] SCOS-2000[EB/OL]. http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Ground_Systems_Engineering/SCOS-2000.
- [36] GMSEC[EB/OL]. <https://www.nasa.gov/content/gmsec-home>.