

# 航天装备测试技术现状与发展

蔡远文<sup>1</sup>, 程 龙<sup>2</sup>, 辛朝军<sup>2</sup>, 刘党辉<sup>2</sup>, 李 岩<sup>2</sup>, 张 宇<sup>2</sup>, 解维奇<sup>2</sup>

(1. 航天工程大学 研究生院, 北京 101416;

2. 航天工程大学 宇航科学与技术系, 北京 101416)

**摘要:** 航天装备测试技术是航天工程项目顺利实施的基础保证, 其可靠性和高效性直接关系到任务的成功与否; 针对航天任务高时效性、高可靠性、高环境适应性要求, 文章系统分析了航天装备测试技术在“快”、“全”、“稳”、“准”4个领域面临的挑战, 然后从通用化、信息化、智能化方面对国内外航天装备测试技术发展现状进行了梳理和分析, 进而预测了其发展趋势, 即基于先进传感网络技术的高效全面检测、基于云技术和边缘计算的测试信息融合利用, 以及融合大数据与人工智能的健康管理技术; 最后, 围绕测试体系标准化建设、数据智能应用、发展国产化航天装备测试系统等问题对我国航天装备测试领域发展提出了几点建议。

**关键词:** 航天装备测试; 航天工程; 健康管理; 大数据; 信息融合

## Current Status and Development of Space Equipment Test Technology

CAI Yuanwen<sup>1</sup>, CHENG Long<sup>2</sup>, XIN Chaojun<sup>2</sup>, LIU Danghui<sup>2</sup>, LI Yan<sup>2</sup>, ZHANG Yu<sup>2</sup>, XIE Weiqi<sup>2</sup>

(1. Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101406, China;

2. Department of Aerospace Science and Technology, Space Engineering University, Beijing 101406, China)

**Abstract:** Space test technology is the basic guarantee for the implementation of space engineering projects, and its reliability and efficiency are directly related to the success of the space mission. In view of the requirements of high timeliness, high reliability and high environmental adaptability for space projects, the challenges of space test in the four fields of “fast”, “complete”, “stable” and “accurate” are analyzed systematically. After that, the development present situation of space test technology at home and abroad is analyzed in the aspects of generalization, informatization and intelligence. And then, the development trend is predicted, that is, efficient and comprehensive detection based on advanced sensor network technology, test information fusion and utilization based on cloud technology and edge computing, and health management technology integrating big data and artificial intelligence. Finally, some suggestions are put forward for the development of China's space test field, such as the standardization of test system construction, data intelligence application, and the development of domestic space test system.

**Keywords:** space test technology; space engineering; health management; big data; information integration

## 0 引言

航天工程在政治、经济、社会方面影响巨大, 是综合国力的重要体现。测试是航天工程项目实施的基础保证, 它以航天产品为对象, 开展状态、功能等测量与检查, 并依据工程目标给出分析结果。

航天装备测试贯穿于航天产品研制、试验鉴定、发射前准备、在轨运行与回收全过程, 其重要作用体现在以下几点:

1) 对航天产品性能和可靠性进行检查, 发现并排除故障, 尤其是发射前测试是否全面准确, 直接关系到发射任务的成功与否。

2) 对测试信息尤其是关键参数的实时监测和快速分析, 是航天工程指挥决策的重要依托。

3) 测试所得的大量数据和分析结果, 可为航天产品优

化设计与研制改进提供原始依据。

由于航天工程投入和影响巨大, 实施进度控制严格, 测试信号种类繁多, 测试流程复杂, 航天装备测试技术面临高时效性、高可靠性、高环境适应性等要求, 主要存在四方面的挑战:

1) 航天装备测试技术要“快”。确保测试数据获取快、传输快、分析处理快, 缩短测试时间, 以不断提高产品研制和缩短发射周期;

2) 航天装备测试技术要“全”。确保航天产品的各类电量、非电量信号的同步全面采集, 对数据格式、判读要求各异的海量测试信息进行综合处理分析;

3) 航天装备测试技术要“稳”。确保测试自身的高可靠性, 为航天产品全寿命运用提供全程稳定的检测分析服务;

4) 航天装备测试技术要“准”。确保在各类不同信号测

收稿日期: 2021-03-25; 修回日期: 2021-04-16。

基金项目: 军队级试验技术重点项目(1700050405)。

作者简介: 蔡远文(1967-), 男, 四川彭州人, 博士, 教授, 主要从事运载火箭测试技术方向的研究。

通讯作者: 辛朝军(1980-), 男, 陕西宝鸡人, 博士, 副教授, 主要从事运载火箭测试技术方向的研究。

引用格式: 蔡远文, 程 龙, 辛朝军, 等. 航天装备测试技术现状与发展[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(9): 1-4, 28.

试需求下,保证不同的精度要求,满足产品精细化设计改进和任务指挥决策要求。

全球各航天强国和技术实体都高度关注航天装备测试技术的可靠性和高效性,积极开展测试新体系、新技术的探索应用<sup>[1-6]</sup>。

我国早已进入了高密度航天发射时期,多种新型号运载器和航天器的研制试验任务密集,测试工作量与日俱增、需求不断拓展。

本文从航天装备测试技术在航天任务全过程中的需求出发,分析其重要性及面临的挑战,立足电气系统测试国内外现状对未来发展趋势进行分析梳理,并提出航天装备测试工作未来发展的思考与建议。

## 1 航天装备测试现状

### 1.1 国外航天装备测试现状

全世界范围来看,航天装备测试技术和测试系统最重要的进步可以概括为“三化”——即通用化、信息化和智能化。

#### 1) 通用化:

国外航天装备测试主要思路是采用货架式商业产品进行组合与适应性开发,在统一标准、规范的指导下,尽可能使用通用硬件平台和可重用的软件模块。

肯尼迪航天中心的两个发射工位和火箭总装厂房,均采用通用信号调理放大器加 VME 总线设备的方式进行数据的采集;在各类运载器、航天器的测试中基于 VXI、PXI 等总线的通用设备均有使用,这些硬件多与 LabVIEW 软件相结合构建功能通用的数据采集系统。俄罗斯、欧空局、日本等主要航天国家或组织也大都采用类似测试架构<sup>[7-10]</sup>。

#### 2) 信息化:

在采用上述通用化测试架构的基础上,航天装备测试系统围绕测试信息处理构建测试体系,实现了将测试工作重心从以往的前端数据采集到后方信息综合分析利用的转移,充分利用新型现代信息技术完成了测试信息的判读、故障诊断等工作。

美国猎鹰 9 运载火箭的测试系统中,系统核心为测试与飞行数据评估中心。航天发射任务中,测试系统在 3 个不同地点的测试中,均要将数据汇集于数据评估中心完成处理,再将结果反馈于各系统,如图 1 所示<sup>[11]</sup>。

此外,美国陆军的夸贾林导弹靶场、空军的东/西试验靶场,欧空局法属圭亚那航天中心以及日本 Epsilon 火箭发射系统先后研究了运载火箭测试信息的处理方法,实现了运载火箭测试信息的自动处理。尤其是日本在 Epsilon 火箭测试中,提出了移动测试发射控制的概念,借助箭载测试系统,实现测试信息处理前移的同时,借助网络信息技术,实现了测试发射的远程控制<sup>[12]</sup>。

#### 3) 智能化:

运用深度学习和大数据分析等智能方法实现高效测试,也是当前航天装备测试领域取得的一个重要进展。日本 Ep-

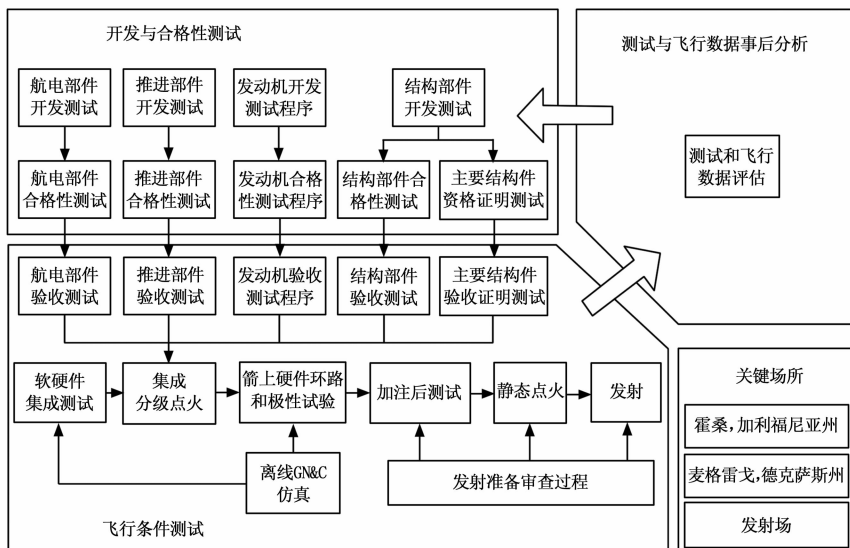


图 1 美国猎鹰 9 火箭测试系统与流程图

silon 火箭建立了一套动态数据的趋势评估系统,将历次呈现良好状态的波形数据确定为正常数据,存储在数据库中,采用模式识别技术,将评估对象与正常数据进行核对,确定“正常”还是“异常”<sup>[12-13]</sup>。

美国、欧空局也先后对航天运载器测试信息的处理方法进行了智能化改造。一方面,是基于人工智能技术构建了相应的测试信息自动判读系统,实现了测试信息的智能化处理与故障诊断。如,美国 NASA 在地面测试系统中运用基于专家系统的故障诊断隔离与恢复技术,将原有的人工数据分析转变为测试系统的智能自动分析,将上述技术集成于新型号火箭设计中后,大幅提升了测试过程的自主程度<sup>[14-15]</sup>。

智能化发展的另一个重要途径是测试与被测对象融为一体的智能化机内测试(BIT)技术,就是将数据融合等智能理论应用于 BIT 的设计、测试、诊断、修复等方面,提升 BIT 综合效能。如, NASA 运用 BIT 理念研制了一种将设备集成于被测对象的器件级电子装配维修系统,适合于航天器在轨故障的诊断和排除。

### 1.2 国内航天装备测试现状

经过多年的发展,我国成功研制了多代多类型航天装备自动化测试系统,形成了以计算机控制为中枢的自动化测试体系,逐步探索出以信息处理应用为主旨的智能化发展方向。主要表现在以下方面:

1) 形成了航天装备测试体系的通用化发展共识,测试方法不断完善:

根据运载器和航天器测试的共性要求,优化了航天装备测试体制,在部分型号的分系统测试中实现了硬件灵活增减、软件按需调整的柔性配置;初步形成了基于总线技术的通用化测试体系<sup>[16-17]</sup>。

航天东方红有限公司设计的有效载荷自动化测试系统,具备高内聚、低耦合的特点,提高了测试准确性<sup>[18]</sup>。上海微小卫星工程中心提出的批量卫星流水线自动化测试系统,

优化了卫星总装、集成与试验工作流程,提升了卫星自动化测试效率<sup>[19]</sup>。航天工程大学提出了基于标准总线的通用航天装备测试系统总体构架,研发的通用化运载火箭测试产品配置于我国四大发射场,常态化参加航天发射任务,覆盖了我国4个系列11型号在役主力火箭。

2) 开展测试一体化集成化设计,多功能多模式协同不断优化:

测试系统采用一体化设计,开展电测信号分类集成测试,从而具备了信号采集、发控配电、判读分析等功能,优化了测试系统整体效率。如,航天工程大学研发的远征上面级测发控系统,提出了基于协同控制的多卡多类信号综合采集测试方法,集测试、发控功能于一体,测发效率显著提升<sup>[20]</sup>。

测试模式上,采用内部外部测试兼容的集成模式,积极探索机内测试(Built-in Test)、无线测试等方法。航天科技集团、科工集团均开展了无线测试技术攻关,提出了基于远控装置的无线测发方案。

3) 拓展了以软件功能为重点的测试控制思路,综合处理多类型异构测试信息:

利用软件自适应控制测试进程,动态变换测试控制参数,可提高航天装备测试数据综合处理效率,实现测试信息的快速自动判读。

国内多家科研院所提出了基于知识库、历史数据包络、神经网络等技术的航天装备测试数据处理方法<sup>[21-25]</sup>。航天工程大学研发的通用化测试系统,设计了基于软件的变频率存储和多类型数据自动判读方法,判读效率得到大幅度提高。

总之,目前我国航天装备测试技术和系统基本能够满足特定型号任务需求,但也存在一定挑战和难题。首先是通用化测试标准尚未出台,专用航天装备测试系统类型繁多,测试系统设计协调面广,国产化软硬件应用不够广泛。其次,是测试有效性有待加强,存在“过测试”带来的测试效率低、保障需求高等问题,以及“欠测试”带来的测试覆盖性、可信性不足等问题。再次,是测试信息管理效率有待提升,海量异构数据共存,利用率不高,大数据、云计算平台应用不够深入。最后,是测试新技术应用偏于保守,测试信息分析、应用模式有待拓展,智能化技术应用不够广泛,故障溯源及决策支持水平有待提升。

## 2 航天装备测试技术的发展趋势

未来航天装备测试技术的发展,一定是在以测试数据为中心的基础上,融入人工智能技术、云计算、大数据等在新科技革命中闪耀着光辉的新技术,建成会学习、有经验、高效率的测试体系,研发可在复杂情况下自主应对突发、疑难故障的聪慧型测试系统,实现对被测对象的快速、准确、全面、可靠测试。

### 2.1 基于先进传感网络技术的高效全面检测

对被测对象全方位的有效测试数据获取,是测试能力提升的基础,而先进传感网络、嵌入式传感器以及非接触测量技术的发展,可为测试数据的全面充分获取提供技术基础。

低耗能、小尺寸,并可以安装在表面或嵌入内部的分分布式传感器网络<sup>[13]</sup>,将会越来越多的把神经末梢深入到航天产品的结构细节中,和航天产品融为一体,更全面、更持久的从多个维度获取测试数据,实现测试覆盖的大幅度提升,也可以为未来航天产品的重复使用提供便利、可靠的检测手段。先进的传感网络,将成为未来智能化航天产品的主要技术途径。例如,光纤传感器能够实现对温度、应力、加速度等100余种参量的测量,并能便利地实现单根光纤间隔1cm的高密度网络化分布,克服传统传感网络体积大、重量大、线缆多、易受电磁干扰的不足,具有很强的航天应用优势,有望成为下一代航天系统健康监测传感器网络技术核心。

### 2.2 基于云技术和边缘计算的测试信息融合利用

随着数据获取手段的提升,航天装备测试将会获得大量测试数据,仅单个测试系统的测试数据量将可达1Tbps量级,这些数据具有异构、非标准、多来源、海量等特点。由于航天任务的特殊性,判断与处置的时机往往稍纵即逝,从而要求测试系统能够提供快速甚至实时准确的判读结果以辅助决策,并将数据进行统一可靠的存储以备不时之需。

具备强大计算能力的云测试系统,通过构建共享资源池,可以提升测试系统大数据计算能力,支持测试操作人员任意位置测试操作<sup>[26-27]</sup>,而多点备份的储存方式,也保证了测试数据的高可靠性。但如果将所有测试数据短时间内快速传输给云计算中心,网络则可能产生拥堵,也可能影响数据的保密性,难以满足航天装备测试高实时性的要求。

基于边缘计算的测试中,计算和存储资源可部署在边缘上(边缘服务器或终端被测设备),从而可以进行本地的数据采集,就近进行数据的即时处理,避免网络传输和远端数据处理带来的时间延迟。这种分布式测试方法,可以分散云中心的数据处理压力、减轻网络传输负担,使云端应用程序更高效快速的运行。其中,由云中心对测试任务进行总体统筹,负责长周期测试数据的处理与决策,并将大数据分析结果下发至边缘处。边缘计算着眼于实时、短周期测试数据的分析处理,为云端提供预处理后的测试数据,支持云端数据分析。边缘计算与云计算互相协同,彼此优化互补。

2020年,百度公司在北京试验的Apollo无人汽车服务就是云技术和边缘计算结合的一个典型应用<sup>[28]</sup>。

### 2.3 融合大数据与人工智能的健康管理技术

航天产品的健康管理技术,主要利用测试数据进行健康状态的监测、故障的诊断与趋势预测,以及设备寿命预测等,是未来航天装备测试技术发展的主要方向之一<sup>[29-31]</sup>。目前的健康管理技术,尚只能简单的根据已知判据,例如阈值,进行故障诊断,而难以进行故障的预测以及对未知故障的诊断。

提升自主学习能力,是提高健康管理对故障的监测、诊断与预测能力的关键途径<sup>[32-35]</sup>。基于数据的健康管

理技术主要是根据系统的输出与故障之间的联系,对被测对象的测量信号进行分析处理,判断故障并定位。这种方法在理论上是完备的,但其诊断结果的准确性直接依赖于测试数据的质量。

然而,由于航天产品结构和工作过程的复杂性,故障表现形式各异,在故障模式不清晰不全面的情况下,健康管理很难实现对航天产品故障的准确预测、诊断和定位。故障数据小样本与模型训练需求大样本之间的矛盾,有望通过结合大数据的人工智能技术来解决。

生成对抗网络方法是当前人工智能技术领域的一个研究热点,借助这一方法,将有望解决故障数据缺乏的问题,如图 2 所示<sup>[36]</sup>。

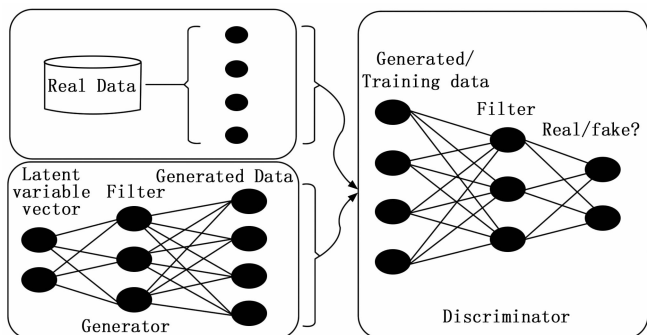


图 2 生成对抗网络方法概念图

首先,通过大量的正常测试数据对智能网络进行训练,得到正常数据的分布特征。然后,生成与正常数据分布差异最大的分布,作为故障数据的分布特征,也就是利用大量的正常数据,反向训练,生成大量的故障数据,解决故障数据不足的问题。最后,按照试验确定判据,就可以从实际测试数据中精确检测出故障数据,实现对测试异常数据的精确检测。

可以看出,在大数据、云技术以及人工智能技术的支持下,有望解决欠测试和过测试的不足,有效提升测试覆盖率,增强系统应对突发新型故障的能力,保障航天装备测试的全面、稳定、可靠。

### 3 思考与建议

通过对国内外现状以及发展趋势的分析梳理,我国在航天装备测试领域需要尽快开展以下几方面的工作。

1) 尽快统一航天装备测试体系和测试标准:

遵循测发控一体化设计规范,构建通用测试体系架构,加强前端边缘计算和后端云计算测试体系设计,制定航天装备测试的行业或国家军用标准,提升航天产品各阶段测试结果统一性和可信性。

2) 积极研究采用先进的无线测试技术:

万物互联是未来发展趋势,充分利用先进的无线传感器、物联网、无线远控技术等,借助无线广域网、高速 5G 等网络,简化测试接口,减少线缆布设,降低测试保障要求,提高测试效率。

3) 大力推进航天装备测试智能技术应用研究:

为提高航天装备测试的智能化,就必须加大前端测试信息的采集量,多方面发展基于数据驱动测试技术。在 BIT 测试信息的基础上建立故障模型,是进行智能故障诊断、健康管理的基础;发展人工智能的多源信息融合技术,可以有效提取测试数据的特征信息;发展人工智能的测试数据挖掘技术、远程数据处理分析技术,可以快速发现并识别复杂故障现象背后的故障机理,满足未来的智能一键测试、自主测试、并行测试等多种测试任务需求。

4) 加快航天装备测试大数据中心和测试技术创新中心建设:

加快构建航天装备测试大数据中心建设,共享数据资源,开展数据挖掘研究,是提高航天装备测试效益的必经之路。同时,加快航天发射测试测控自动化技术创新中心建设,加强运载器测试发控自主管理与智能决策新技术研发平台、运载器和航天器集成健康管理系统等建设,也是提升航天装备测试技术水平进步的有力手段。

5) 坚定不移发展国产化航天装备测试系统:

当前,航天装备测试系统部分传感器、数据采集、核心控制器等器件国内没有替代品,国产操作系统配套的高性能采集模块底层驱动缺乏,为确保在航天装备测试领域不被国外卡脖子,需要针对相关基础技术重点攻关,坚持走国产化、自主化发展之路。

### 4 结束语

近年来,我国在探月工程、深空探测、空间站建设等各个航天工程项目中不断取得突破和发展,航天装备测试技术在其中发挥了重要作用,未来,航天发射和各项建设任务会更繁重。为进一步提升我国航天装备测试的高效性和可靠性,保障各项航天工程项目顺利推进,在航天装备测试新体系、新技术方面仍需要开展更多更深入的研究。

#### 参考文献:

- [1] 周 珊, 杨雅雯, 王金波. 航天高可靠 FPGA 测试技术研究 [J]. 计算机技术与发展, 2017, 27 (3): 1-5.
- [2] 郑玉航. 航天测控系统测试资源优化配置策略 [J]. 中国设备工程, 2020, 443 (7): 169-171.
- [3] 吕殿君, 王小辉, 詹景坤, 等. 航天运输系统快速测试及其关键技术研究 [J]. 电子测试, 2018 (4): 62-64.
- [4] TOWSYFYAN H, et al. Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33 (3): 771-791.
- [5] FERRELL B, BROWN B, HALL D, et al. Usage of fault detection isolation & recovery (FDIR) in constellation (CxP) launch operations [C] //SpaceOps 2010 Conference Delivering on the Dream Hosted by NASA Marshall Space Flight Center and Organized by AIAA, 2010.
- [6] MARKOSIAN L Z, FEATHER M S, BRINZA D E. System health management: with aerospace applications [Z]. 2011.

(下转第 28 页)