

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.06.018

## 在轨检测研究综述

史建伟<sup>1</sup>, 蔡远文<sup>2</sup>, 李岩<sup>3</sup>

(1. 装备指挥技术学院 研究生队, 北京 101416; 2. 装备指挥技术学院 试验指挥系, 北京 101416;  
3. 装备指挥技术学院 航天装备系, 北京 101416)

**摘要:** 在轨检测在在轨服务的任务中具有一定的普遍性和代表性。在分析在轨检测需求的基础上, 着重从执行系统和目标系统 2 个方面对在轨检测的关键技术进行介绍, 并概括了在轨检测策略, 总结了在轨检测发展趋势。

**关键词:** eM-Plant; 地面站; 资源优化

**中图分类号:** TP274 **文献标志码:** A

## Research Summarizing of On-Orbit Testing

Shi Jianwei<sup>1</sup>, Cai Yuanwen<sup>2</sup>, Li Yan<sup>3</sup>

(1. Brigade of Postgraduate, Institute of Command & Technology of Equipment, Beijing 101416, China;  
2. Dept. of Testing & Command, Institute of Command & Technology of Equipment, Beijing 101416, China;  
3. Dept. of Spaceflight Equipment, Institute of Command & Technology of Equipment, Beijing 101416, China)

**Abstract:** On-orbit testing (OOT) has universal and representative activity in on orbit service. Based on analyzing on orbit testing requirements, introduce the key technologies from operation system and target system, and generalize the on-orbit testing strategy and development tendency.

**Keywords:** eM-Plant; ground station; resources optimizing

### 0 引言

在轨检测是在轨服务的重要组成部分, 既可以作为相对独立的在轨服务任务而单独执行, 又可穿插于其他在轨服务任务的执行过程之中, 在在轨服务的任务中具有一定的普遍性和代表性。

在轨检测是指在轨服务主卫星飞至己方目标航天器附近, 并利用各种传感设备对其进行检查和测试, 以了解目标航天器的状态<sup>[1]</sup>。典型的方式包括利用摄像机进行摄像、采用 X 射线进行无损检测或者采用化学传感器进行蒸汽(或各种化学物质)泄露检查等。在轨检测包括检查和测试 2 部分, 笔者将重点对测试进行研究。

### 1 在轨检测需求分析

对于在轨运行的航天器, 因为当初设计与制造等自身因素以及空间环境影响等原因, 仍无法完全避免在轨服务误操作等各种故障及意外情况的发生。2003 年, 出现故障的航天器为 16 个, 2001—2003 年每年平均约有 12 颗卫星损坏或出现故障; 而且 1991—2000 年, 平均每年卫星发生故障的数目与前者差不多<sup>[2]</sup>。在 1990—2001 年间成功发射的 764 个航天器中, 有 121 个发生了故障, 占航天器

总数的 15.8%。这些数据说明, 航天器对在轨检测是有实际需求的。

如图 1, 根据在轨检测的目的不同, 可以将航天器在轨检测需求归纳为在轨组装检测、在轨维护检测和后勤支持检测 3 类。

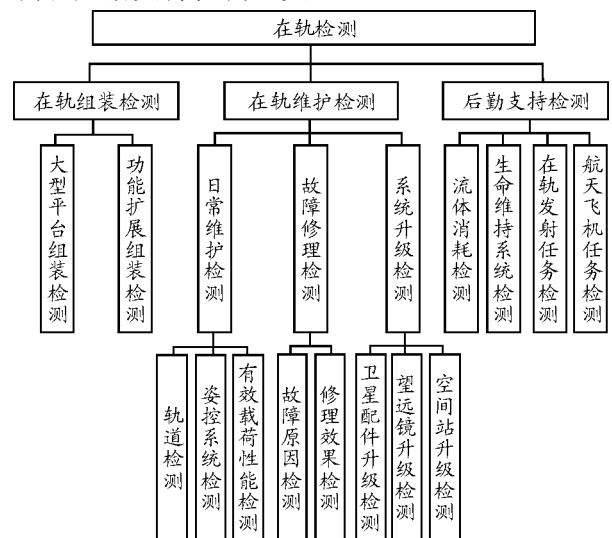


图 1 在轨检测需求分析图

#### 1.1 在轨组装检测

在轨组装检测主要包括以下 2 方面:

1) 大型航天器平台需要在轨组装。航天器的规

收稿日期: 2011-01-10; 修回日期: 2011-03-21

基金项目: 国家高技术研究发展技术 863 课题资助 (2010AA7045007)

作者简介: 史建伟 (1984—), 男, 河北人, 博士研究生, 从事航天测试发射控制理论与技术研究。

模扩大受到当前发射运载器的极大约束，对于复杂大型航天器平台，如空间站、大型空间望远镜等，在当前运载器发射条件下还不能进行整星一次发射，需要将大型结构分块发射入轨，通过在轨组装实现大型航天器的搭建。

2) 通过增加模块实现航天器功能扩展的，也需要进行组装检测。

### 1.2 在轨维护检测

在轨维护检测又可以分为日常维护检测、故障修理检测和系统升级检测。

#### 1) 日常维护检测

卫星是在轨检测的主要和典型对象，其它航天器同样具有维护检测需求。长期运行在真空、失重、高低温、强辐射和充满空间碎片的环境下，日常维护检测必不可少。主要的维护检测有：

① 卫星轨道或姿控系统维护检测，主要是检测卫星是否偏离预定轨道或者姿态失控，以便及时进行校正或维修，减少不必要的损失。

② 卫星有效载荷性能检测，主要是针对有效载荷的工作参数、传输数据的正确性及准确性等进行检测。

#### 2) 故障修理检测

当航天器发生故障不能正常工作时，需要进行修理检测，而这种在轨检测常常包括在其它在轨服务活动之中。比如，美国航天员对太阳峰年任务卫星进行的在轨维修、Hubble 太空望远镜进行的在轨维修、国际空间站的在轨维修等等，都离不开在轨检测的支持。在轨检测用于以下方面：

① 通过检测查明原因、确定故障位置，进而判断卫星是否必要、是否能够进行在轨服务（如更换故障模块）。

② 对在轨服务后的航天器进行检测，确定服务效果。

#### 3) 系统升级检测

① 配件更换升级时的检测。比如，成像设备镜头、太阳能电池阵、蓄电池、陀螺仪以及其他在轨可更换部件进行更新升级时，需要检测更新升级效果。

② Hubble 太空望远镜系统升级检测。Hubble 太空望远镜是一种特殊的在轨卫星系统，必须尽可能长时间的在轨运行才能不断发挥效用<sup>[3]</sup>。因此，对于系统升级检测需求较一般卫星系统要大。

③ 空间站系统升级检测，主要是空间站进行

系统升级所进行的检测。

### 1.3 后勤支持检测

针对后勤支持活动的检测主要包括：

1) 流体消耗检测。姿态调整发动机燃料或者气瓶气体、制冷剂、润滑剂、电源介质等的补给。

2) 空间站上生命维持系统的检测，包括航天员的氧气、食物补给，垃圾排放、二氧化碳过滤装置维持检测等等。

3) 在轨发射任务检测，主要指在轨发射各种航天器时需要检测发射系统和所发射的航天器进行检测。

4) 航天飞机任务检测，主要指航天飞机执行任务前后所进行的检测。

## 2 在轨检测关键技术<sup>[4]</sup>

与一般的单航天器技术不同，航天器在轨服务技术本质上是一个体系，既要考虑提供服务的能力，又要考虑接受服务的能力。可从执行检测任务的航天器（执行航天器）和接受检测的航天器（目标航天器）2 个方面对在轨检测关键技术进行梳理，如表 1。

表 1 在轨检测关键技术

角色	关键技术
执行航天器	轨道机动技术
	交会对接和绕飞伴飞技术
	先进的机械臂技术
	并行测试技术
	测试软件开发技术
目标航天器	可测试性设计技术
	机内测试技术
	模块化技术
	接口匹配技术
	总线技术
	星务管理技术

### 2.1 执行系统关键技术

为满足在轨检测要求，执行航天器要提高其执行检测任务的能力，使其能够完成空间条件下的检测任务，主要关键技术如下：

#### 1) 轨道机动技术

执行航天器在轨机动到目标航天器轨道，为在轨检测操作提供基本条件。主要技术有：轨道机动规划技术，轨道机动动力学技术，轨道机动过程中的制导、导航与控制技术和大推力、高比冲推进技术。

#### 2) 交会对接与绕飞伴飞技术

实现交会对接和绕飞伴飞，也是实施在轨检测

的一个基础。主要技术有: 交会策略及轨迹规划技术、交会对接测量技术、高精度逼近技术、目标姿态跟踪与指向控制技术、捕获技术、对接技术和机动绕飞轨迹控制技术。

### 3) 先进的机械臂技术

在轨检测需要机械臂参与, 目前对机械臂运动规划与管理方法的研究较多。需要重点突出的机械臂技术有: 一体化关节技术, 空间手爪技术, 变质心、变构型动力学技术, 机械臂运动轨迹规划技术和运动轨迹规划中的避障技术。

### 4) 通用外部接口技术

航天器通用的外部接口包括电源、信号等接口, 用于执行检测任务的航天器和目标航天器之间的简便可靠连接, 支持对目标航天器测试参数的获取, 对其工作状态进行检测。目标航天器的外部接口按照传统的标准设计, 满足通用性的原则, 并能够与执行航天器的外部接口实现匹配连接。

### 5) 并行测试技术

目前, 通用自动测试系统一般采用串行工作模式, 测试吞吐率不高。并行测试技术是把并行技术引入到测试领域中所形成的一系列方法和技术, 通过对系统资源的优化利用来提高测试效能及测试质量, 提高测试资源利用率, 降低测试成本。

### 6) 测试软件开发技术

测试过程和测试仪器功能的复杂化和多样化使现代自动测试系统的组建, 特别是测试软件的设计难度成倍增加。测试设备中大量使用虚拟仪器, 充分利用软件技术来实现和扩展传统的仪器功能, 需要构建良好的测试系统软件体系结构来指导系统的开发。

### 7) 可测试性设计技术

要求像目标航天器那样, 使执行航天器具备接受检测的能力, 具体内容参照目标航天器关键技术。

## 2.2 目标系统关键技术

对目标航天器进行可测试性设计, 使在轨检测任务尽可能的简单。主要技术包括:

### 1) 机内测试技术

机内测试是系统或设备内部提供检测的自动测试能力, 是改善系统或设备测试性的重要技术和途径。其设计理念是通过在系统或设备内部嵌入附加硬件和软件来改善系统或设备测试性。

机内测试技术能够提高测试效率, 减少人为诱发的故障, 降低对测试人员及其技术等级的要求,

可以对系统、模块、芯片级实施测试, 并能检测隐蔽故障提高任务可靠度。

### 2) 模块化技术

为便于在轨检测任务的操作执行, 目标航天器应采用模块化设计技术。航天器组件模块化设计就是将功能系统合理划分为不同的功能模块, 其关键就在于模块接口标准化的设计。模块间光、机、电、热与数据信息的标准接口设计, 能提高目标航天器接受检测的能力。

### 3) 总线技术

总线技术的应用与升级, 不仅可以提高测试速度, 还可以节省测试经费。应用总线体制时, 目标系统设备与测试设备都面向总线, 总线是整个系统信息交换的公共通道, 所有挂载在总线上的仪器都作为总线的—个终端, 向总线提供信息, 从总线上获取信息。如 MIL-STD-1553B 已被北约和一些其他国家采用, 广泛应用于飞机、卫星, 甚至国际空间站等航空航天领域。

### 4) 接口匹配技术

以模块化设计为基础, 以总线技术为标准, 满足通用性原则, 有即插即用功能, 实现与执行航天器外部接口的匹配连接。

### 5) 星务管理技术

在轨检测要求星务管理系统具有的功能有: ① 统一的数据总线和电源总线; ② 可接受执行航天器的控制; ③ 测试设备硬件的自动识别。

## 3 在轨检测策略

策略即策划与谋略, 是为达到某一特定目标而采取的行动计划, 用于全局性策划与指挥大规模的作战或其他行动。在轨检测的实施策略是: 为完成在轨检测任务而制定的全局性的规划和实施方案。从任务要素角度讲, 检测策略包括检测执行者选择、检测对象设计和接近方式选择等。

### 3.1 检测执行者

根据检测过程中起主导作用的角色不同, 在轨检测可以分为自主检测、航天员主导的检测、机器人(机械臂)主导的检测和服务飞行器主导的检测。检测执行者选择就是要根据具体任务要求在这4种方式中选择一种执行方式。

#### 1) 自主检测

对于应用机内测试技术的航天器或者航天器的部分功能模块, 实施自主检测, 主要是针对日常维

护检测；对于高轨道运行的航天器，实施自主检测，因为地面指控人员的指令到达会有延时。

#### 2) 航天员主导的检测

有 2 种实现方式：一是航天员通过太空行走，进行检测；二是航天员通过控制机械臂进行遥操作检测。航天员主导的检测能通过充分发挥航天员的主观能动性，运用智力、身体上的优势进行一些复杂精细的操作，并能灵活应对各种情况和突发问题。

#### 3) 机器人主导的检测

机器人（机械臂）替代航天员完成检测。

#### 4) 服务飞行器主导的检测

服务飞行器通过机械臂遥操作对目标航天器进行检测，或者服务飞行器通过绕飞/伴飞进行检测。

### 3.2 检测对象设计

根据目标航天器的数量不同，可以将轨服务分为“一对一”和“一对多”2种方式。“一对一”方式是指在一次在轨服务任务中，由一个服务航天器对单个目标航天器进行在轨服务；而“一对多”方式则是指对多个目标航天器进行在轨服务。

国外研究表明，“一对多”的在轨服务方式具有较大优势，也是未来在轨服务的主流方式。这是因为在轨服务的方案会使航天器本身的复杂度大大提高，从而增加航天器的成本，若只对单个目标航天器进行在轨服务操作，其成本可能会比重新发射一个相同的航天器还高。对于“一对多”的在轨服务任务来说，其本身是一个规划问题，通过建立合理的数学模型并进行优化，可以有效地减少整个在轨服务的成本。

在轨检测任务执行时，根据检测对象，选择对执行航天器的要求。

### 3.3 接近策略<sup>[5]</sup>

#### 1) 异面接近策略

异面接近策略利用振荡型相对运动的原理，不需要改变服务航天器的轨道面就可以在小时间段对目标航天器进行观测。优点是：不需要改变轨道面，可以节省大量的推进剂，提高了服务航天器的在轨时间。缺点是：接近窗口很短，一般只有几十秒至几分钟。

#### 2) 盘旋接近策略

盘旋接近策略应用跳跃型相对运动的原理。优点是：通过定期施加速度增量，可以维持为周期性相对运动，并且与目标航天器的最小距离可以通过

速度增量的大小来调整，可以提供更大的灵活性。此外，利用盘旋相对运动，可以方便地实现沿径向的交会。

#### 3) 全向接近策略

全向接近策略的出发点是把椭圆型相对运动中的伴飞轨迹旋转起来，也就是椭圆型和振荡型的合成。全向接近策略也是采用周期性相对运动轨迹，优点是：不需要消耗能量便可以长时间观测。

#### 4) 共轨接近策略

共轨接近策略的基本思想是使服务航天器进入目标轨道，与目标在相位上存在微小差异，从而相对目标航天器静止。优点是：可以对目标进行长时间的侦察、监视和检测，在必要时还可通过逐步改变相位完成与目标的交会对接。

## 4 发展趋势

随着任务的增加和技术的进步，在轨检测将向体系化测试、自主化测试和并行化测试发展。

### 4.1 向体系化测试发展

随着航天技术的进一步发展，在轨检测的要求将越来越多，而检测执行航天器有各自的范围，比如利用同一种检测执行航天器不可能同时完成对 LEO、MEO 和 GEO 航天器的在轨服务。因此，在轨检测向体系化发展，建立以在轨服务母航天器为中心，由若干个在轨服务子航天器协同服务的在轨服务体系，根据任务需要进行合理的资源优化分配。

### 4.2 向自主化检测发展

机内测试及智能技术的推动，使得目标航天器能够实现自主化，能够独立决策、思考完成检测任务。同时一些在轨检测任务需要自主化完成，比如，对地球静止轨道卫星进行检测等任务，地面控制人员可能不能引导航天器间的连接，因为他们的指令需要延时才能到达那里。所以，要以自主检测为主。

### 4.3 向并行化测试发展

串行模式的测试不能同时对多个被测对象进行测试，测试吞吐率不高，在强调测试保障效率的情况下，很难满足要求。并行测试通过建立合理的数学模型并进行优化，可有提高测试效率，提高资源利用率，有效地减少整个在轨检测的成本，降低在轨检测的风险。