

航天器健康管理平台设计技术研究

张雷, 李志栋, 孙波

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 随着我国航天器数量增加以及广泛应用, 提高我国航天领域健康管理技术水平的重要性日趋凸显; 针对我国航天领域健康管理技术体系不完善, 航天器全生命周期健康管理能力较弱, 缺少健康管理系统设计、验证技术和工具等问题, 设计了航天器天地一体化健康管理平台, 建立了航天器健康管理技术体系框架, 探讨了航天器健康管理设计开发和验证技术, 构建了航天器天地一体化健康管理系统, 为最终形成未来我国航天器设计、开发、验证与运行管理过程中的全生命周期健康管理解决方案, 解决未来多航天器全寿命周期综合保障问题, 进行了有益的技术探索。

关键词: 航天器; 天地一体化; 健康管理; 平台

Research on Spacecraft Integrated Health Management Platform

Zhang Lei, Li Zhidong, Sun Bo

(Institute of Spacecraft System Engineering 100094, China)

Abstract: As the number of spacecraft in China increases and is widely used, it is more and more important to improve health management technology of spacecraft. As the aerospace health management technology system is imperfect, the spacecraft life cycle health management ability is weak, the health management system design, verification technology and tools are lacking. In this paper, the spacecraft integrated health management platform is designed. The framework of health management technology system is established. The development and verification technology of spacecraft health management is discussed. It is a beneficial technical exploration which will eventually form the whole life health management of the design, development, verification and on-orbit management of spacecraft in China.

Keywords: spacecraft; integrate; health management; platform

0 引言

我国航天领域正处于快速发展阶段, 到“十四五”末期, 地面测控系统将管理总价值数百亿元各类在轨航天器, 将建成规模较大、长期有人参与的国家级太空实验室, 实现导航星座的多星组网运行。随着航天器数量增加以及广泛应用, 航天器安全可靠运行对我国国家安全及经济发展的重要性日趋凸显。

为了满足航天器运维高可靠性、安全性和提高经济性的需求, 须提高我国航天器的寿命预测与健康管(PHM: Prognostics and Health Management) 技术水平。国外在 PHM 技术方面发展程度较高, 形成了比较完善的标准、体系和规范, 并建立了较为完整的 PHM 系统开发软件工具体系, 并逐步在航天领域进行了应用。以美国、欧盟为代表的西方发达国家在航空、航天和高新武器的研究和试制中, 都有先进的设计、试验和管理手段的支持, 并在飞机、电子系统设计等领域得到应用。典型成果如波音公司提出的基于逻辑分层的 7 层 PHM 体系结构, 该结构应用于无人作战飞行器和波音 777 飞机研制^[1]; 2008 年马兰里大学 J. Gu 和 M. Pecht 提出了基于故障机理的预测和健康管

理, 建立基于模型的 PHM 通用结构^[2]; 美国 NASA 提出了“综合系统健康管理 (ISHM)” 技术^[3]; NASA 和波音公司提出了飞行器综合健康管理 (IVHM) 技术^[4], 通过对飞行器进行状态监控与故障诊断, 并进行故障预测, 可以有效降低飞行器运行过程中的意外风险。另外, 国外在各类 PHM 工具研发上投入较大, 设计了多种测试性设计、FMECA 分析、安全性、保障性及维修性设计等分析工具软件, 用于辅助 PHM 系统设计与应用, 作为系统维修与保障决策的参考依据。

PHM 技术在我国国内起步较晚, 近年来, PHM 技术逐渐成为航空航天、武器装备等工业领域的研究热点。在 PHM 体系架构方面, 北京航空航天大学吕琛等提出了一种开放的面向对象的层次化 PHM 体系结构, 可适应于层次化、标准化系统设计需求, 降低飞机等飞行器的维护费用及难度^[5]; 空军工程大学张亮等人从功能逻辑上初步提出了一种由模块/单元层 PHM、子系统级 PHM、区域级 PHM 和平台级 PHM 等 4 层集成的面向机载 PHM 的分层融合式体系架构^[6]; 北京空间技术总体设计部针对卫星信息系统通道资源有限、遥测采样率较低等特点, 提出了适用于卫星信息系统的星地协同、三级闭环的卫星健康管理系统架构^[7]。在测试性设计和验证方面, 航天测控技术有限公司、北京航空航天大学、国防科技大学、西安电子科技大学研究所等一系列研究所或高校针对飞机、雷达、电子设

收稿日期: 2019-05-03; 修回日期: 2019-05-18。

作者简介: 张雷 (1982-), 男, 黑龙江人, 硕士, 高级工程师, 主要从事航天器测试与健康管方向的研究。

备以及惯导系统的 BIT 设计与验证技术进行了较为深入研究^[8-11], 为面向 PHM 的可测性设计提供了技术基础。在 PHM 算法方面, 航天测控技术有限公司开展了大量理论研究工作, 并在 C919、四代机等新一代民用航空和武器装备中得到了应用; 北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、浙江大学、南京理工大学等一系列高校在航空、武器装备、电力电气系统等应用领域均有较多深入研究成果^[12-19]。

相较于国外先进的 PHM 技术水平, 尤其在航天领域, 我国仍存在较大差距, 主要体现在: 1) 我国的 PHM 缺少面向航天器运行特点的健康管理技术体系设计; 2) 缺乏航天器系统级健康管理设计经验, 缺少航天器健康管理系统的工具; 3) 航天器单机的测试性设计薄弱, 故障模型与试验数据积累不足; 4) 需要针对现代航天器运行管理特点, 开展适合航天器的健康管理技术研究; 5) 需要研究针对航天器健康管理系统的验证技术与平台。

针对国内外 PHM 技术的差距以及航天领域 PHM 技术的不足, 本文讨论了航天器天地一体化健康管理平台的设计思路, 从未来航天器的设计、测试和保障服务需求入手, 结合国际上健康管理领域的先进技术标准, 制定集成先进 PHM 技术的航天器健康管理技术体系架构, 并最终将技术成果推广至各航天器研制单位及各个相关行业用户, 紧密围绕研究目标, 最终形成“一个体系, 两个平台, 一套系统”, 即航天器健康管理设计规范和体系, 航天器 PHM 系统设计开发平台, 航天器 PHM 系统验证平台以及航天器天地一体化健康管理平台, 为后续我国航天器健康管理系统的推广应用奠定技术基础。

1 航天器健康管理技术体系设计

构建适用于航天器特点的健康管理系统是一项复杂的系统工程, 在设计和构建航天器健康管理平台前, 首先需要建立航天器健康管理技术体系, 针对我国缺少面向航天器运行特点的健康管理体系的问题, 不仅需要参考国际上先进的健康管理技术, 包括标准体系架构及规范, 还需总结我国已有的保障技术规范, 而后综合航天器总体单位对健康管理的要求, 构建符合未来发展要求的航天器健康管理技术体系模型。

针对航天器功能与应用场景特点, 从功能层次的角度来看, 航天器健康管理技术体系可分为 7 个功能层次:

1) 基础数据层, 盖层提供了所有的数据信息包括航天器设计数据、单机及整星的测试与试验数据、历史与实时遥测数据等, 为以上各层提供强大的数据源支持。

2) 协议传输层, 完成从传感器到星载健康管理单元, 从星载系统到地面系统, 以及地面系统各单元间的数据传输, 根据不同的终端与数据链路特点, 研究不同传输方式与协议。

3) 方法资源层, 包括航天器健康管理平台和平台业务的关键技术和方法, 以资源库的形式存在, 主要包括测试

性设计方法、BIT 设计方法、模型设计与修正方法、状态监测方法、故障诊断与预测方法、寿命预测方法、健康状态评估方法等。

4) 技术规范层, 包括航天器健康管理平台和平台所需要的标准规范和设计指南: 在体系设计方面, 主要包括指标体系设计、系统框架设计、通信设计等内容; 在体系设计和平台搭建方面, 主要包括航天器健康管理平台的研制要求规范、流程设计规范、应用设计指南以及系统验收规范。

5) 平台应用层, 该层依据技术规范层的指导, 负责将方法资源层的算法固化为工程应用, 针对航天器执行具体的故障预测与健康管理系统任务, 是航天器健康管理平台的实体运行部分。

6) 平台验证层, 负责对健康管理方法、体系和系统等进行验证, 主要包括数字仿真验证、地面半物理试验验证和在轨应用评估验证等 3 种验证形式。

7) 系统工具层, 作为航天器健康管理平台的推广应用部分, 主要包括航天器健康管理系统设计工具集和验证工具集两部分, 为健康管理平台的运行提供辅助设计与验证支撑。

航天器健康管理平台技术的研究对象具体体现为“一个体系, 两个平台, 一套系统”。“一个体系”代表航天器健康管理指标体系、设计规范及功能体系结构框架。“两个平台”包括航天器健康管理技术开发平台和验证平台; 其中航天器健康管理技术开发平台提供各类分析开发工具和知识库, 帮助开发人员快速实现 PHM 系统级和单机级的多层 PHM 设计与优化, 可基于知识库和全生命周期数据借助 PHM 建模工具快速开发算法模型; 航天器健康管理技术验证平台可与航天器健康管理平台形成闭环, 用于验证航天器健康管理技术和系统功能的正确性, 同时还具备演示验证功能, 提供航天器运行状态、健康状态及验证过程状态等方面的可视化展示。“一套系统”代表航天器健康管理平台, 实现天地协同健康管理。航天器天地一体化健康管理平台架构如图 1 所示。

2 航天器健康管理系统设计技术研究

航天器健康管理平台架构设计是系统开发的基础和前提, 是由航天器应用任务向 PHM 设计要求、工作内容界定等转化的关键环节, 是明确航天器健康管理平台开发目标, 指导后续系统实现及验证的基础。

对航天器任务的深入理解与剖析对设计航天器健康管理平台具有至关重要的作用。系统设计的第一步是对航天器任务(如星箭分离、程控帆板展开、轨道机动、建立执行任务状态等)进行分解, 明确影响任务成功的具体因素, 根据任务执行的具体流程, 结合 PHM 系统对于各个分任务的影响, 确定 PHM 系统与任务成功率的关系。在此基础上, 根据 PHM 系统与任务成功的关系, 进行 PHM 功能需求分析, 从故障诊断、性能评估、故障预测能力出发, 考

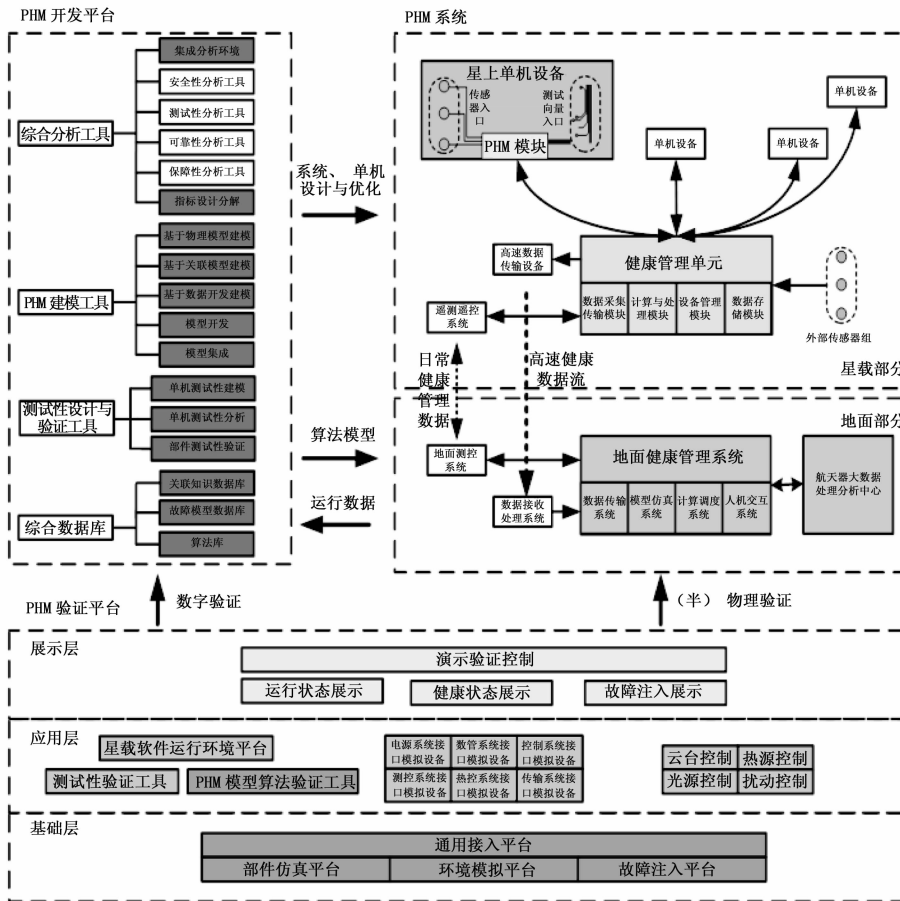


图 1 航天器天地一体化健康管理平台架构图

考虑及时性和准确性需求，分析建立 PHM 系统的定性要求和定量要求。综合利用指标计算、仿真分析等方法进行定量要求的权衡分析，确定出航天器 PHM 总体设计要求，形成通用的权衡分析方法和权衡分析程序。在确定 PHM 定量要求和指标体系的基础上，设计航天器 PHM 系统架构，形成航天器典型分系统与单机的健康管理设计规范，从而指导航天器单机健康管理设计与研制。

航天器在轨运行时，星载端具有数据实时性好、数据质量高等优势，然而在轨计算资源有限，无法处理大量数据和复杂计算，需要依靠地面端的大数据处理能力实现全生命周期的数据分析和健康管理，因此需要研究天地一体化航天器全生命周期健康管理技术。星载子系统的管理范围需包括电源系统、姿态控制系统、测控系统、数管系统、有效载荷系统等典型星载系统与单机，具体设计内容涵盖各系统内的传感器和 BIT 配置，数据采样与传输设计，以及星载健康管理单元（HMU，Health Management Unit）的故障诊断推理、智能决策等功能配置；地面健康管理子系统的设计内容涵盖复杂故障诊断推理、故障与寿命预测、系统状态评估以及星载健康管理模型的生成与修正等。在此基础上，基于航天器 PHM 系统的通用架构形式，梳理出航天器 PHM 系统的组成元素和详细要求，如物理结构、功

能配置、性能设计、接口与信息、BIT、传感器、健康管理单元、数据链等具体要求，以及数据存储、综合数据库、网络服务、数据模型、故障诊断、故障预测、状态监测、智能决策等细化设计要求。

在航天器 PHM 系统通用框架设计过程中，收集整理可靠性、维修性、测试性、保障性和硬件设计、软件设计的工作项目，以故障分析为核心，选择确定航天器 PHM 设计分析可用的工作项目。在建立航天器 PHM 设计分析工作项目集的基础上，分析每个工作的输入数据和输出数据，以及设计分析工作迭代关系，建立航天器 PHM 设计分析工作项目的关联关系。根据关联关系，进一步研究数据流和工作流的协同设计以及配套工具的选配，形成航天器 PHM 设计的协同设计分析流程。

3 航天器天地一体化健康管理系统的功能与组成

航天器天地一体化健康管理平台由星载和地面两个子系统组成，两个子系统根据自身特点各司其职。星载子系统可实现实时性要求高的在轨 PHM 监测处理任务。然而，由于星载处理器的计算能力较弱，存储容量较小，不适合大规模分析运算处理，因此在系统设计中，星载子系统的异常或故障现场数据可通过星地链路下传至地面子系统，地面子系统通过更加复杂精细的方法实现详细故障诊断分

析,甚至故障提前预警。另外,地面子系统也可汇聚多星海量历史数据和专家知识,通过大数据方法和 PHM 算法实现航天器全生命周期健康管理,地面端子系统通过机器学习方法训练的分析模型或专家知识可作为知识模型库通过星地上行通路上注至星载子系统在线使用,支撑星载子系统模型知识更新和扩展,实现天地一体化协同健康管理。

星载健康管理子系统的设计采取主从模式,由健康管理单元 HMU 和分布在各单机中的 PHM 模块组成。HMU 负责整星健康管理系统的运行管理,具备总线通信功能、运算功能、存储功能与信息采集功能,实现系统级健康状态监测、评估与控制功能,包括各单机健康信息的采集、自检指令的发出以及整星健康信息的整合发送,它可以对汇总的各单机健康信息进行融合分析,从系统层面对某个单机的异常状态进行检测。各 PHM 模块内嵌在各分系统单机内,在对单机传感器布局 and 可测试性设计优化的基础上,负责所在单机的故障自检、健康信息采集、BIT 及与星上健康管理单元的信息交互。

星载 HMU 的 PHM 算法在综合权衡计算效率、资

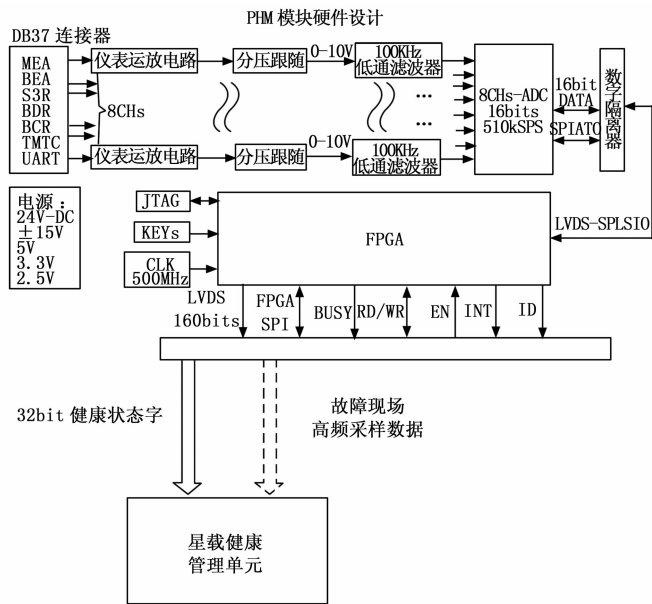


图 2 典型单机 PHM 模块设计

源需求以及方法有效性、准确性后,结合航天器分系统特点和规律,可选择计算效率高、型号特点结合性好,精巧化的 PHM 算法模型,PHM 算法模型可以先在地面子系统离线训练好后再上传至 HMU 应用。HMU 可利用算法模型监测在轨遥测数据的异常,并利用领域知识或诊断模型实现在轨故障实时诊断和决策。

星载子系统可通过天地数据链路下传健康事件包到地面健康管理子系统,地面子系统由于不存在计算资源和存储容量的限制,因此可充分利用遥测数据,使用复杂度高,

准确度高,智能化和通用化程度更强的深度学习、大数据挖掘技术构建健康管理模型。另外,除了在轨遥测数据外,

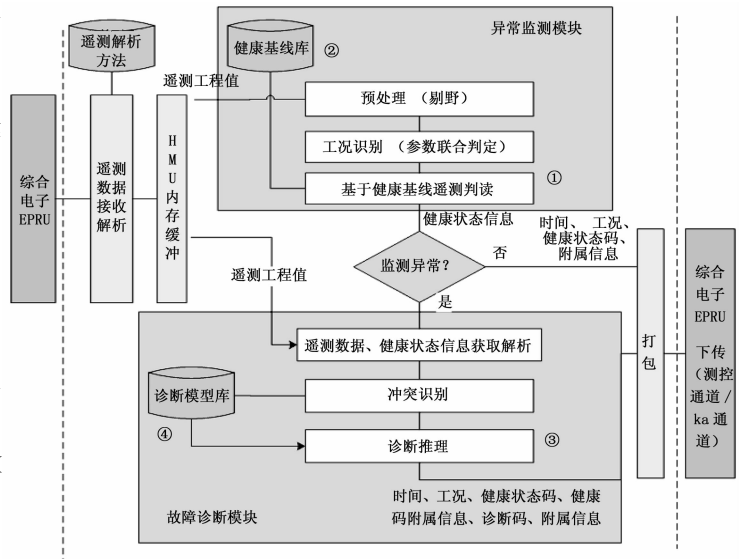


图 3 星载 HMU 算法处理流程

地面健康管理子系统还可汇聚海量历史遥测数据或单机 \ 系统设计、测试、试验数据,同时结合领域专家知识,实现航天器全生命周期健康管理。

地面健康管理子系统基于大数据云计算技术和构件化技术搭建。地面子系统在汇聚海量数据和专家知识的基础上,基于专家知识、物理模型并结合数据驱动分析,可实现故障诊断、寿命预测与健康评估,提供丰富的健康管理功能。对于单个航天器而言,考虑到研制各阶段航天器数据或物理特性具有某些一致性规律,可以通过数据挖掘、机器学习技术从大量测试数据寻找数据模式、特点或规律,从而辅助航天器在轨运行时的健康管理工作;对于多个航天器而言,可基于迁移学习技术根据同类航天器已有 PHM 算法模型快速迁移到新发射的航天器中。

4 航天器健康管理验证技术研究

依靠航天器健康管理验证平台,基于仿真验证方法、试验验证方法以及评估验证方法对航天器一体化健康管理平台的功能和技术指标充分验证。

仿真验证方法采用基于数字仿真模型的方式,代替实际系统进行试验验证。它针对特定工况建立数学物理模型模拟系统实际运行情况,用定量的方法分析系统运行过程。仿真验证方法主要针对系统试验成本高或不适合做实物试验的场景。采用该方法可以适当降低对实物验证试验的需求,但由于该方法需要一定精度的数学模型,因此对系统建模和仿真的能力提出了更高的要求。在航天器健康管理平台的验证中,对系统设计指标的验证、对故障诊断预测评估相关算法的验证都需要利用仿真验证方法,特别是在对健康管理系统的验证中,经常需要进行运行环境下的故障模拟注入,而很多故障在真实航天器上是无法注入的,

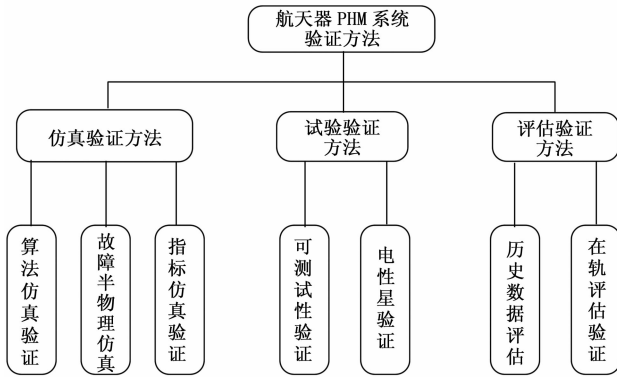


图 4 航天器健康管理系统的验证方法

因此需要搭建基于仿真的半物理仿真验证平台，实现系统真实使用前的验证。

试验验证方法是指按照预定的试验方案和试验计划，在规定的条件下针对实物进行故障或故障趋势的模拟和注入，获得与故障诊断与健康管理系统验证相关的有关数据，通过分析、处理、计算与评定等过程，确定被验证的参数指标是否符合规定要求所采用的一种验证方法。在航天器健康管理系统的的设计开发中，很多技术需要利用试验的方法进行验证，如单机级的测试性设计验证试验、寿命试验等，以及系统级的大型环境试验等。

评估验证方法分为数据评估法和类比分析法两类。数据评估方法是针对健康管理技术定量要求，按照用户认可的计算、分析、评估模型和计算方法，利用试验或在轨运行中已经得到的遥测数据，以及系统的所有相关数据（测试数据、试验数据）等进行评估分析，以判定航天器产品的健康管理水平是否满足规定要求的一种验证方法。类比分析方法是针对健康管理技术定量要求，将受验航天器产品同已经通过验证或实际使用结果证明满足要求的相似产品，进行结构、功能、制造工艺、采用的原材料、使用环境条件、故障诊断能力、故障预测能力等方面的对比分析，若比相似产品的要求严格，则可以根据相似产品的验证结果做出受验产品故障诊断与健康管理系统技术水平是否满足规定要求的结论。

5 结束语

航天器健康管理技术可减少航天器在轨运行过程中的各类意外风险，提高航天器运行的可靠性和安全性，对于提高我国航天装备的可靠性、安全性、保障水平具有重要意义。本文介绍了航天器天地一体化健康管理平台和平台设计的相关技术研究情况，在建立航天器健康管理平台框架的基础上，讨论了航天器健康管理平台设计与验证技术，探讨了天地一体化的航天器健康管理平台系统的设计思路。通过对航天器健康管理平台技术的研究，为我国新一代航天器应用 PHM 技术，最终形成未来航天器设计、测试、地面验证和在轨使用全过程的健康管理解决方案打下坚实的

技术基础。

参考文献：

- [1] 吕琛, 马剑, 王自力. PHM 技术国内外发展情况综述 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (9): 1-4.
- [2] Gu J, Pecht M. Prognostics and health management using physics-of-failure [A]. Reliability and Maintainability Symposium 2008 RAMS 2008. Annual [C]. IEEE, 2008: 481-487.
- [3] Patterson-Hine A, Biswas G, Aaseng G, et al. A review of diagnostic techniques for ISHM applications [J]. 2005.
- [4] Baroth E, Powers W, Fox J, et al. IVHM (Integrated Vehicle Health Management) techniques for future space vehicles [A]. 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit [C]. 2001: 3523.
- [5] 马宁, 吕琛. 飞机故障预测与健康管理体系研究 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2009, 37 (1): 207-209.
- [6] 张亮, 张凤鸣, 李俊涛, 等. 机载预测与健康管理体系的体系结构 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2008, 9 (2): 6-9.
- [7] 罗荣蒸, 孙波, 张雷, 等. 航天器预测与健康管理体系研究 [J]. 航天器工程, 2013, 22 (4): 95-102.
- [8] 奚全生, 史慧, 刘丽亚, 等. 基于 BIT 的导弹测试与诊断技术 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (4): 743-745.
- [9] 李春化, 张云展. 关于雷达系统 BIT 模块化工作的考虑 [J]. 火控雷达技术, 1995, 24 (1): 5-10.
- [10] 石君友, 纪超, 李海伟. 测试性验证技术与应用现状分析 [J]. 测控技术, 2012, 31 (5): 29-32.
- [11] 唐银银, 乔纯捷, 欧阳环, 等. 鱼雷自导系统 BIT 验证平台设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (9): 2483-2485.
- [12] 房红征, 史慧, 韩立明, 等. 基于粒子群优化神经网络的卫星故障预测方法 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (7): 1730-1733.
- [13] 艾力, 房红征, 于功敬, 等. 基于数据驱动的卫星锂离子电池寿命预测方法 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (4): 1262-1265.
- [14] 房红征, 马好东, 罗凯, 等. 基于遥测数据的航天器长期性能预示方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (7): 1792-1796.
- [15] 房红征, 邹克旭, 伊大伟. 一种与状态和事件相关的卫星实时故障预警方法 [C]. 第 20 届测控, 计量, 仪器仪表学术年会论文集, 2010.
- [16] 宋登巍, 吕琛, 齐乐, 等. 基于健康基线和马氏距离的液压系统变工况健康评估 [J]. 系统仿真技术, 2017 (3): 201-208.
- [17] 鹿鸣明, 王逸飞, 郭创新, 等. 一种基于 PHM 考虑老化和设备状态的油浸式变压器故障率模型 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (18): 66-71.
- [18] 金洋. 基于传递系统模型的在轨卫星故障诊断方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [19] 吕王朋, 蔡卫峰, 穆鹏. 发射车电气系统故障预测与健康管理体系研究 [J]. 工业控制计算机, 2016, 29 (10): 43-44.