

**引用格式:** 袁利, 王淑一. 航天器控制系统智能健康管理技术发展综述[J]. 航空学报, 2021, 42(4): 525044. YUAN L, WANG S Y. A review on development of intelligent health management technology for spacecraft control systems[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 525044 (in Chinese). doi:10.7527/S1000-6893.2020.25044

# 航天器控制系统智能健康管理技术发展综述

综述

袁利<sup>1, 2</sup>, 王淑一<sup>1, 2, \*</sup>

1. 北京控制工程研究所, 北京 100094

2. 空间智能控制技术重点实验室, 北京 100094

**摘要:** 健康管理作为智能自主控制亟待突破的关键技术之一, 是提升航天器安全可靠稳定运行能力的有效手段。结合人工智能技术的发展趋势, 基于前期已建立的新型航天器智能自主控制系统通用架构, 详细综述航天器控制系统的智能健康管理技术现状与发展趋势。首先, 根据现有航天器设计、研制和在轨的具体情况, 梳理出航天器控制系统健康管理技术所面临的挑战; 然后, 分别从故障预警、故障诊断和寿命评估 3 个方面, 详细阐述基于人工智能的健康管理技术研究现状及其在航天领域的应用情况; 最后, 提炼出航天器控制系统健康管理技术的发展方向。

**关键词:** 航天器控制系统; 人工智能; 健康管理; 故障预警; 故障诊断; 寿命评估

中图分类号: V448.25<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893(2021)04-525044-15

近年来, 以机器学习为代表的新一代人工智能技术在农业、医疗、教育等众多领域获得了成功应用<sup>[1]</sup>。为抢占战略制高点, 各航天强国也都推出了“人工智能+航天”的国家政策<sup>[2-4]</sup>; 美国于 2019 年颁布了《美国人工智能倡议》, 旨在确保其人工智能技术在航空航天等领域的优势地位; 法国于 2018 年发布了《法国人工智能发展战略》, 旨在包括航天在内的优势行业中开展人工智能技术的广泛应用; 日本于 2017 年发布了《航天产业展望 2030》, 确立了基于人工智能技术的航天产业未来发展方向; 中国正处于从航天大国走向航天强国的关键阶段, 在此阶段国务院发布了《新一代人工智能发展规划》, 将发展人工智能技术上升到国家战略层面, 并明确指出到 2030 年人工智能理论、技术与应用要在总体达到世界领先水平。

结合未来航天器的研制需求和人工智能技术

的发展趋势, 构建了一种航天器智能自主控制系统的新型通用架构<sup>[5]</sup>, 主要包括: 感知、决策、操控和健康管理 4 个部分, 具体如图 1 所示。从该图中可以看出: 对于该新型通用架构而言, 健康管理作为一个独立的智能模块, 基于其与决策、操控和感知模块之间的信息交互, 通过建立航天器的状态特征与异常征兆之间的映射关系, 来实现故障预警; 通过构建“正常到异常到失效”的故障演化模型, 来实现故障诊断和寿命评估。

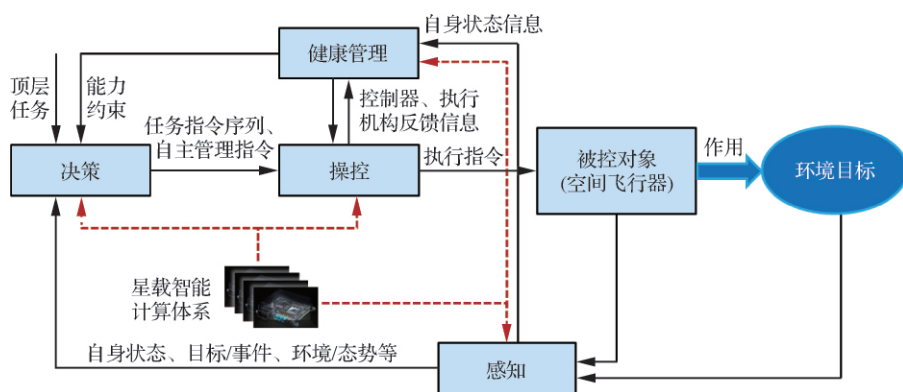
健康管理作为航天器实现智能自主控制亟待突破的关键技术之一, 是从系统层面克服产品固有可靠性不足、提升航天器安全可靠稳定运行能力的有效手段。基于前期已建立的航天器智能自主控制系统新架构, 本文重点关注基于人工智能的航天器控制系统健康管理技术现状与发展趋势; 首先, 根据现有航天型号设计、研制和在轨的具体情况, 梳理出航天器控制系统健康管理技术

收稿日期: 2020-12-01; 退修日期: 2020-12-21; 录用日期: 2021-01-24; 网络出版时间: 2021-02-03 10:26

网络出版地址: <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20210407.html>

基金项目: 国家自然科学基金(61573060); 国防预研项目(6142208180101)

\* 通信作者。E-mail: wangshuyi78@sina.com

图 1 航天器智能自主控制系统的新型通用架构<sup>[5]</sup>Fig. 1 General architecture of new intelligent autonomous spacecraft control systems<sup>[5]</sup>

所面临的挑战性问题；然后，分别从故障预警、故障诊断和寿命评估 3 个方面，详细阐述健康管理技术的研究现状及其在航天领域的具体情况；最后，提炼出基于人工智能的航天器控制系统健康管理技术未来发展方向。

## 1 面临的挑战

目前，航天器控制系统的健康管理技术，可以概括为“硬件备份+解析冗余+专家支持+安全模式”<sup>[5]</sup>。然而，近几年来国内外多次出现的由于控制分系统故障而导致航天器业务中断、甚至整器完全失效的严重事件表明：现有健康管理技术与航天器安全可靠稳定运行需求之间的差距较大。根据健康管理技术的定义内涵<sup>[6]</sup>，本节分别从故障预警、故障诊断和寿命评估 3 个方面，梳理出来航天器控制系统所面临的挑战。

### 1.1 故障预警技术

航天器控制系统的故障预警技术，能够提取微小故障的特征信息，对系统未来可能发生的故障进行预测，在故障发生之前给出报警，采取适当的处置策略进行及时干预，尽量使故障不扩大、不扩散，有效避免航天器任务的间断，最大限度发挥航天器能力。因此，故障预警技术是实现控制系统健康管理、确保航天器安全稳定运行的重要前提；其目的在于：“提前发现征兆、适时维保系统、确保业务连续”。

虽然故障预警的方法研究和技术应用均有了快速发展，但针对航天器控制系统的闭环特性和

强不确定性、数据的强耦合性和多样性，现有故障预警技术在实际工程应用方面尚存在以下不足：

1) 现有基于时间序列、卡尔曼滤波等预警技术，难以应对闭环和强耦合特性，无法综合考虑姿态、轨道、环境等多维参数，并从中准确提取微小故障的隐性特征，这导致故障初期的征兆难以被有效提取和及时发现，一旦发现异常，则故障已经演化到了一定程度，留给故障预警的提前时间量较短。

2) 基于因果关系的预警防范措施，难以处理强不确定性数据，且难以融合考虑研制、测试和在轨的多源数据，数据信息使用不全导致故障预警结果的准确性低，极易造成漏警和误警。

### 1.2 故障诊断技术

航天器控制系统的故障诊断技术，能够快速检测并准确定位故障源，为后续的系统重构和容错控制决策实施提供依据，以期在故障发生之后，采取合理可行的措施，通过花费最小代价来最大程度地恢复系统的既定功能与性能。因此，故障诊断技术是实现控制系统健康管理、确保航天器安全稳定运行的关键核心；其目的在于“准确定位故障、采取合理措施、辅助重构决策”。

现有成熟的故障诊断技术方法集中于基于模型和信号处理这两类，但在数据利用率和在轨适应性方面仍存在以下不足：

1) 仅根据在轨故障表象进行故障诊断，没有充分利用专家知识以及产品研制、测试的数据，尚未深入挖掘和利用各阶段的历史数据。事实上，

航天器的在轨表现与其在研制过程和地面测试过程的表现息息相关,在历史数据中蕴含了大量反映健康状态的规律、知识和特征,是客观反映运行状态的重要依据。

2) 难以根据环境和任务的变化来自适应地调整故障诊断策略,现有的措施一般都是根据地面的测试结果来设定阈值,不具备在轨自主更新诊断参数的能力。由于地面测试阶段与在轨真实运行的环境和数据都存在差异,导致即使地面充分验证过的技术方法,实际在轨使用中也未必有效。

### 1.3 寿命评估技术

航天器控制系统的寿命评估技术,能够根据当前航天器的实际在轨运行状态,构建出“正常到异常到失效”的故障演化模型,进而可以提前预知航天器的在轨剩余服役时间,为后续任务调整、重构方案实施、离轨策略制定等提供科学依据。因此,寿命评估技术是实现航天器健康管理、确保安全稳定运行的重要手段;其目的在于:“预测剩余寿命、提前制定预案、择机离轨替换”。

现有其他领域较为成熟的寿命评估方法在航天器控制领域的实际应用效果不佳,这主要体现在:

1) 基于物理失效模型的寿命评估方法,不能同时兼顾突发失效和性能退化 2 种失效模式。航天器控制系统的寿命终止,主要有 2 种表现形式:一是功能突发失效,由于部件存在失效概率,部件的失效将导致控制分系统突发功能失效;二是性能严重退化,虽然部件正常工作,但其性能逐渐退化,引起控制分系统某些性能指标低于任务所需阈值。现有的研究成果大多以上述失效形式中的某一种具体情况作为判据,尚未将两种形式结合起来开展寿命评估研究。

2) 基于数据驱动的寿命评估方法,未充分挖掘多源数据和相似样本信息。现有研究成果表明:一方面,交变的在轨空间环境温度是引起航天器控制系统关键部件性能退化的一个重要因素;遥测数据能够真实反映系统在轨实时运行状态和性能变化过程。另一方面,控制系统的研制、测试和试验等数据,以及同类型系统在轨运行、退役的寿命信息,对于研究当前系统剩余寿命能够提供

重要的信息支持。现有方法尚未充分挖掘上述多源数据中隐含的有效信息,再加上统计控制系统寿命的数据极少,导致现有方法难以直接应用于航天器控制系统。

## 2 研究现状与应用情况

本节重点从研究现状和技术应用 2 个维度,分别对故障预警、故障诊断和寿命评估 3 个方面的国内外现状进行分析和归纳。

### 2.1 故障预警技术

#### 2.1.1 故障预警技术的研究现状

根据实现机理的不同,现有故障预警技术主要分为基于模型和数据驱动 2 种。

基于模型的故障预警技术,通过定性描述和定量表达的方式来建立研究对象失效机理的数学模型,并考虑物理实现过程和各部件之间的相互作用,从机理实现的角度来深入分析故障特性、预测系统的未来状态。相对于其他领域,以航天器控制系统为对象,开展部件和系统级故障预警技术研究的相关成果较少:文献[7]以动量轮为研究对象,考虑金属磨损、保持架磨损、润滑剂损失等影响因素,建立了基于随机阈值的 Gauss-Brown 失效物理模型,并以该模型为基础对动量轮的运行状态进行评估分析,进而得到符合工程实际的故障预警结果;类似的,文献[8]以近十年的运行数据为基础,重点考虑润滑剂的影响,建立了动量轮的退化模型,实现了故障的提前预警;文献[9]考虑了故障的传播规律,基于有向图建立了航天器控制系统的故障预测模型,并通过系统节点保留的技术手段,在预警精度保持不变的前提下,有效提升了故障预警的效率。由于航天器控制系统属于典型的机电类复杂系统,其实际物理特性具有极强的耦合性和随机性,难以完全建立该复杂系统的物理模型,这使得基于模型的故障预警技术在实际航天型号应用中受到较大限制<sup>[10]</sup>。

基于数据驱动的故障预警技术,通过挖掘历史数据、系统状态、故障征兆与工作环境之间的内在联系,建立相应变量之间的映射关系,从而利用数据对系统状态进行估计和预测。基于数据驱动的故障预警技术,其理论研究最为广泛,主要包

括<sup>[11-17]</sup>:灰色聚类理论、贝叶斯网络、神经网络、Petri 网、支持向量机和时间序列分析等。航天器控制系统故障预警技术的代表性成果,主要包括:文献<sup>[18]</sup>以半球谐振陀螺为研究对象,将灰色聚类理论与支持向量机进行有机结合,建立了一种残差修正的自回归灰色模型,能够有效提升故障预警的时效性;文献<sup>[19]</sup>结合粒子群优化(PSO)与支持向量机(SVR)两种技术,构建了一种基于 PSO-SVR 的航天器健康状态趋势预测新方法;文献<sup>[20]</sup>以航天器控制系统为对象,提出了一种基于改进近邻保持嵌入的故障预警方法,该方法能够根据样本点的邻域密度来动态地调整邻域参数的取值,同时结合指数加权移动平均控制图来累积历史故障信息,能够有效提升其对微小故障的敏感程度,进而实现故障预警。

目前,NASA 已将相关故障预警技术固化成多款软件工具<sup>[21]</sup>,比如 ORCA 和 IMS,对国际空间站中控制力矩陀螺的故障进行了预警,并准确识别出了失效的早期征兆;同时,欧洲航天局(ESA)也开发了 DrMUST 软件,系统地对其型号航天器的飞行数据进行了分析,检查其状态是否异常,通过隐性状态的准确识别找出了异常数据模式,并通过相应处置手段,预防异常状态再次发生<sup>[22]</sup>。

随着深度学习理论方法的不断突破,该技术已逐步尝试被引入到故障预警的研究领域。深度学习技术的实质是:通过建立多隐层网络模型,利用海量训练数据来学习并提取更加有用的故障特征,从而提升故障预警结果的精确度;具有代表性的研究成果<sup>[23]</sup>:Elsaid 等利用深度学习技术中的长短时记忆网络,来预测航空发动机的振动,成功预测了未来 5~20 s 内的振动值,实现了因振动值变化而引起的系统级故障预警。由于深度学习技术具有强大的学习和特征提取能力,能够识别出微小故障的前期征兆特性,是未来航天器控制系统故障预警技术发展的一个重要方向。

### 2.1.2 故障预警技术的应用情况

故障预警技术在航天领域的典型应用案例,主要包括:

1) 美国:开发了航天领域的第 1 套功能较为完善的基于分粒度建模和多模推理的航天器趋势

分析系统(AMTAS)<sup>[24]</sup>;对包括控制系统在内的多个分系统遥测数据进行自动趋势分析,以避免潜在问题发生,并修复检测到的故障。AMTAS 的扩展升级版本是“监视和自治调整系统”,该系统从硬件的健康和安全管理扩展到动态应用,使用机器学习方法来处理趋势分析问题中的不确定性,减少计算复杂度。

2) 欧洲:瑞典空间物理学院研制了卫星异常分析和预测系统(SAAPS)<sup>[25]</sup>;其异常状态预测模型由神经网络在指定的异常状态数据集中训练得到,对控制系统等故障预警的准确率大于 70%,能够给出预警的可信度。意大利的 VITR-OCISSET 公司为欧盟发射的 XMM-Newton 科学探测卫星专门开发了一个交互式遥测数据分析工具<sup>[26]</sup>;通过对控制系统等分系统的遥测数据进行分析,能够确认遥测数据的偏差、判定设备恶化的运行模式,检测和隔离整星及各分系统设备的故障,进而确保航天器健康状态、延长在轨寿命。

3) 日本:在 HAYABUSA 卫星上部署了第 3 代的监视和诊断专家系统 ISACS-DOC<sup>[27]</sup>,该系统的主要工作就是监视、预测整星及控制、电源等分系统的健康状况,为不具备可靠处理运行过程问题的用户提供辅助操作,并提供航天器运行的参数、状态、趋势等显示,以确保航天器安全运行,减少运行风险。

4) 中国:利用控制力矩陀螺(CMG)和动量轮等执行机构在不同阶段的数据,通过多源异构数据的有机融合,基于深度神经网络已开展了故障演化规律的建模研究工作,能够在地面实现航天器控制系统执行机构微小缓变故障的提前预警。

## 2.2 故障诊断技术

### 2.2.1 故障诊断技术的研究现状

从 20 世纪 70 年代开始,航天器控制系统故障诊断技术一直备受国内外广大科学家的重视<sup>[28-34]</sup>。相对于故障预警与寿命评估技术的发展,航天器故障诊断技术的发展历程最长、研究成果最多。

按照实现机理的不同,故障诊断技术可以分为以下 3 类<sup>[35-38]</sup>:基于解析模型、信号处理和人工

智能。其中,基于解析模型的故障诊断技术,是最先发展起来的,该技术充分利用了航天器控制系统的动力学和运动学模型,能够从影响机理的层面给出准确的故障检测与隔离结果;由于不可避免的建模误差、未知扰动及环境噪声等多种因素的耦合影响,这对诊断算法的鲁棒性提出了极高要求;采用的主要研究方法包括<sup>[39-57]</sup>:基于观测器、基于滤波器、等价空间和集员估计等;具有特色的研究成果有:文献[49]利用高阶滑模滤波器对于系统不确定性的强鲁棒能力,设计了一种适用于陀螺和推力器故障的诊断方法,并将其用于ESA“Mars Express”火星探测卫星的型号任务中;文献[52,56]以系统故障诊断能力的定性判定和定量表达为突破口,基于提出的可诊断性理论,将工作重点前移至系统设计阶段,解决了航天器控制系统自主故障诊断所面临的基础性难题。

基于信号处理的故障诊断技术,利用系统输出与故障源之间存在的关联关系(主要包括:幅值、相位、频率与相关性)来检测和隔离故障,原理实现简单、动态实时性好,但对潜在故障的诊断准确性不高。采用的主要研究方法包括<sup>[58-60]</sup>:小波分析和经验模态分解(EMD)等。其中,文献[58]针对红外地球敏感器的输出均值阶跃突变故障、陀螺的常值漂移阶跃变化故障、姿控发动机的堵塞和泄漏故障,利用多种小波变换技术手段,有效提升了故障诊断的性能。

基于人工智能的故障诊断技术,利用系统各变量之间存在的模糊逻辑、建立的因果模型、制定的专家规则以及确定的故障征兆案例等,来获得故障诊断模型;在此基础上,通过模仿人类在整个诊断过程中的思维方式和行为举措,来自动实现故障诊断功能。现阶段,基于人工智能的故障诊断技术是航天器健康管理领域发展的重点和热点,可细分为<sup>[61-77]</sup>:基于知识、神经网络、定性模型和数据挖掘的智能故障诊断技术。其中,基于知识和神经网络是人工智能故障诊断技术的重要分支,其基本思路分别是:汇总该领域长期的实践经验和大量的故障信息,模仿专家的推理方式,并将其总结提炼成计算机能够识别的规则知识库;在此基础上,将需要诊断的实时数据与已生成的规则知识库进行分析和推理,从而推算出是否发生故障以及故障发生的可能位置;使用历史数据

来训练分类器,通过对比实测值与分类器之间的差异特性,实现故障的检测与定位。具有代表性的研究成果包括:文献[62]设计了一种适用于某类型卫星的地面检测及飞行状态地面监测的实时故障诊断专家系统(SCRDES),该系统通过总结原理性、结构性知识和专家经验型知识,采用深、浅层知识的混合模型并基于引入特征量及其动态属性的概念,实现了卫星姿态控制系统闭环特性的有效动态表达,在此基础上,采用数据处理与知识处理并行工作的系统结构,实现了在线实时故障诊断;文献[70]针对闭环航天器控制系统中执行机构的微小故障,提出了一种联合观测器和神经网络的故障检测和隔离方法,该方法首先基于模型的故障诊断方法,实现外部干扰和故障的解耦,然后利用神经网络进一步减少剩余的外部干扰、模型不确定性影响,通过设计决策逻辑,成功检测出执行机构的微小故障。

基于定性模型的智能故障诊断技术,根据系统结构与组件之间的连接关系或是各参数之间的依赖关系,建立诊断系统的结构、行为或功能模型;在此基础上,通过定性推理技术得到系统在正常情况下模型的预测行为,并通过其与系统的实际行为比对,获取系统的异常征兆;最后,在系统模型中搜索各种可能行为的状态假设,使得预测行为与实际行为一致,从而找到偏离正常行为的状态假设(系统的故障源)。具有代表性的研究成果包括:文献[73]针对航天器星上资源有限、推进系统在轨测量参数少的特点,提出了一种动态故障诊断方法,利用符号有向图(SDG)模型的完备性以及故障随时间的传播特性,有效提升了“DFH”卫星推进系统的故障诊断分辨率。

基于数据挖掘的智能故障诊断技术,通过对海量的历史数据进行处理来获得系统的行为模型;在此基础上,利用先验知识来及时发现并准确定位故障。具有代表性的研究成果包括:文献[74]针对航天器控制系统的陀螺故障检测与辨识问题,首先采用阈值法进行故障检测,然后提出了一种基于独立分量分析(ICA)的故障辨识算法,该算法利用混合矩阵的相关系数和先验信息,克服了传统ICA的模糊性,提升了辨识精度;文献[75]提出了一种新颖的模糊C均值方法(KFCM),利用该方法的无监督学习特性,能够有效诊断动量轮的

已知和未知故障模式,与有监督学习的数据挖掘方法(例如,传统的神经网络方法)相比,具有明显优势。

根据现有技术的调研情况可知,与机器学习、智能决策等新一代人工智能技术相结合,已成为目前智能故障诊断的技术研究热点<sup>[76-78]</sup>。

### 2.2.2 故障诊断技术的应用情况

故障诊断技术在航天领域的典型应用案例,主要包括:

1) 美国:自由号空间站研制了姿态确定与控制系统的维护与诊断系统(MDS)<sup>[79]</sup>,分为在线系统和离线推理系统2个部分。在线系统,嵌入到自由号空间站的姿态确定与控制系统中,主要用于实现数据收集、数据压缩、数据传输和简单的推理;离线推理系统,主要分为3个模块,即故障诊断模块、预测模块和辅助维修模块。其中,故障诊断模块,主要包括诊断推理器和恢复专家器两部分;诊断推理器,采用了人工智能技术(主要包括:模式比较、启发式分类、基于历史信息、符号推理和基于模型推理等)来诊断故障源和评价该故障对其它部件的影响,其中最关键的技术就是基于模型的推理方法。恢复专家器,能够制定旨在排除故障的方案。Livingstone软件利用系统行为和内部结构模型(组件连接模型、转换模型和行为模型)来实现故障诊断<sup>[6, 71]</sup>。该软件结合冲突指向搜索和快速命题推理等算法,消除了人工智能中演绎和反推之间的矛盾,实现了快速的搜索和推理。该软件已成功应用于“深空一号”探测器、“X-37”飞行器和“Earth Observing One”任务,使航天器具备了自主故障诊断与系统重构的能力。

2) 欧洲:SPOT-1卫星采用了自主监控、故障检测和重构技术<sup>[30, 80]</sup>。其中,姿态控制系统自主完成的检测分为2类:一类是技术检验,包括标准检验(与电压、温度等参数有关)和特殊检验;一类是功能检验,包括单个部件专用的推断检验、冗余配置部件的一致性检验、不同部件输出量之间的相关性检验3个子类。SMART-1月球探测器中故障诊断与重构系统的目标是<sup>[81]</sup>:在与地面通讯长期中断的情况下,维持该探测器的正常任务运行;当发生故障时,能使得控制等分系统自主诊断故障,并通过切换备份部件或切换其他可选操作

模式来自主进行功能恢复,不影响正常业务。具体而言,当单个部件故障时,通过局部冗余配置处理;当分系统或系统级发生故障时,通过多部件重构或工作模式切换来处理。一旦影响到系统安全性,探测器将切换到安全模式,在没有地面联系的情况下存活两个月,直到地面操作介入。

3) 日本:在GEOTAIL卫星中研制了ISACS-DOC软件,其包含了一个具有500个诊断规则的数据库,依据这些规则即可快速分析卫星状态,它的着眼点是“异常诊断”,即采用了概率诊断方法,按发生异常的概率由高至低依次提示若干种可能发生的异常及其原因。这种方法能够将可导致异常的主要原因比较全面地提示给地面应用人员;在此基础上,通过升级换代,ISACS-DOC软件又应用于“隼鸟号”深空探测器中,这也是最具代表性、最新型的在轨异常监测与诊断系统,主要解决深空探测航天器通信时间延迟以及监测、诊断可用信息量少的问题<sup>[27]</sup>。

4) 中国:目前已在一些型号的飞行试验任务中,采用了故障诊断和系统重构等智能化技术,并收到了良好效果<sup>[82]</sup>。近几年来,利用各种离线和在线数据,已开展了基于人工智能的航天器控制系统故障诊断技术的研究工作,设计了决策树与深度学习相结合的诊断网络,能够有效提升故障诊断的精度和适应性。

## 2.3 寿命评估技术

### 2.3.1 寿命评估技术的研究现状

按照研究对象等级的不同,寿命评估技术一般可以分为2类,即系统级和部件级。目前,寿命评估技术的研究成果多集中于部件级;又可以细分为<sup>[83-91]</sup>:基于失效机理模型、基于数据驱动和基于混合模型3种。

基于失效机理模型的寿命评估技术,是对部件的性能特征进行分析,并根据其性能退化特征建立相应的数学模型;基于该模型,对部件的退化演变趋势和剩余使用寿命进行评估与分析。具有代表性的研究成果包括:文献<sup>[85]</sup>基于维纳退化模型,提出了一种基于期望最大化(EM)算法的动量轮可靠性建模和寿命评估方法,该方法通过失效模式、机理和影响分析,建立了具有随机效应

的维纳过程退化模型;进而,利用第一次碰撞时间来描述失效时间,并根据维纳退化模型推导出可靠性函数的显式结果;最后,利用 EM 算法来获取该可靠性函数的最大似然估计量。

基于数据驱动的使用寿命评估技术,无需研究设备的失效机理,仅通过设备的监测数据或历史数据,运用概率统计、数据挖掘等相关技术完成预测和评估等功能。具有代表性的研究成果包括:文献[87]针对具有多退化变量的陀螺寿命预测问题,提出了一种基于 Copula 函数的系统剩余寿命预测方法,该方法利用陀螺漂移系数样本的标准差数据波动性随时间递增特性,建立了方差时变的正态随机过程退化模型,得到了陀螺剩余寿命的边缘分布函数;进而,基于 Copula 函数对各退化变量之间的相关性进行融合并得到联合分布函数,实现了陀螺剩余寿命的有效评估。

基于混合模型的使用寿命评估技术,通过将不同模型进行组合(包括:历史数据与物理模型),建立不同模型、数据以及数据与模型之间的函数关系来完成寿命评估。具有代表性的研究成果包括:文献[91]提出了一种用于混合寿命评估方法,该方法将最小二乘支持向量回归(LSSVR)和隐马尔可夫模型(HMM)2种方法进行结合;其基本思路是:从传感器信号中提取特征,用于训练代表不同健康水平的 HMM;LSSVR 算法用于预测特征趋势;根据每个 HMM 的概率,确定未来的健康状态,并对剩余寿命进行有效评估。

系统级寿命评估的研究思路,具体分为2种:①将完整系统的寿命评估转化为关键脆弱部件的寿命评估;②直接对完整系统进行寿命评估。主要研究方法包括<sup>[92-96]</sup>:Petri 网、动态故障树(DFT)、随机混杂自动机(SHA)等。具有代表性的研究成果包括:文献[92]引入了退化状态/局部失效的概念,全面分析了不同失效对系统的影响,并考虑了不同失效的严重程度,利用 Kaplan-Meier 估计器来估计不同状态之间的转移概率;在此基础上,基于上述状态和转移概率,构建了 Petri 网模型,可以有效评估航天器控制系统的剩余寿命。

相比于部件级寿命评估,系统级寿命评估技术的研究还处于发展阶段;事实上,开展系统级寿命评估技术方法的研究,更有实际意义且更具有

挑战性。

### 2.3.2 寿命评估技术的应用情况

寿命评估技术在航天领域的典型应用案例,主要包括<sup>[86]</sup>:美国霍尼韦尔公司通过测量航天器控制系统中陀螺部件的激光强度和读出强度,导出了每个模式下的电压以及相关参数,将最近 1000 h 的性能数据进行预定的多项式拟合,进而能够根据预定的临界工作温度来生成寿命性能特性数据,从而外推并预测出航天器控制系统中关键部件——激光陀螺的剩余寿命。Failure Analysis 公司在 EUVE 卫星寿命评估工作中,采用了统计模式识别方法来确定系统的失效征兆,并基于历史失效记录成功预测了控制等各分系统中相关部件的剩余寿命。

中国针对某型号动量轮轴承的润滑失效机理进行了研究,并对润滑剂的损耗和微循环进行了分析及建模,进而对该动量轮的轴承进行了寿命预测<sup>[93]</sup>。近几年来,已从部件突发失效与系统性能退化两种失效形式出发,挖掘了隐含在高维海量历史数据中的健康特征,研究了数据驱动和退化机理相结合的航天器控制系统动态剩余寿命预测技术。

## 3 航天器健康管理技术的未来发展方向

针对上述的挑战问题和研究现状,本节分别提炼了故障预警、故障诊断和寿命评估3个方面亟需突破的理论方法和关键技术;在此基础上,构建数字孪生的原型系统,在地面等效模拟在轨航天器的工作状况,并基于在轨遥测数据实现健康管理方法的协同进化。

### 3.1 航天器控制系统的智能故障预警技术

#### 1) 多源高维数据融合的故障预警技术

目前,故障预警技术在航天领域的应用并不广泛,其主要原因有2个方面:一方面,现有技术主要适用于低维数据、单因素影响的情况;对于航天器而言,其运行状态往往综合反映在多维遥测数据中,且受到高低温、辐照、应力等复杂空间环境影响;另一方面,航天产品在轨失效的样本数量有限,现有技术难以综合利用设计、研制、试验和在轨的多源数据,故障预警准确率低。因此,有必



要结合人工智能技术,开展基于多源高维数据融合的故障预警技术研究。

## 2) 数据与知识相结合的故障预警技术

从人类发射第一颗航天器到今天,全球发射航天器的总数已超过上千颗,中国已超过 300 颗。在几十年的发展历程中,积累了大量航天器故障预警的经验和知识。但现有较为成熟的基于可靠性统计、失效物理模型以及数据驱动的技术方法,均难以将这些知识充分的融入到故障预警过程中。借助人工智能技术,实现数据与知识的充分融合和利用,将会是未来航天器故障预警的一个重要发展方向。

## 3.2 航天器控制系统的智能故障诊断技术

### 1) 跨时空域度的故障诊断技术

现有的航天器故障诊断技术仅考虑在轨运行数据,未充分利用其他航天器的在轨历史数据以及产品的研制、测试数据,造成大量有用信息的浪费。开展跨时空域度的故障诊断技术研究,能够对不同历史阶段、不同型号以及不同阶段发生的故障进行融合,提高故障信息的利用率,提升故障诊断的准确性和对环境的适应性。

### 2) 故障诊断模型的迁移与压缩方法

为实现跨时空域度的故障诊断,需要开展故障诊断模型迁移方法的研究:在将其他航天器的在轨数据和历史数据引入本航天器故障诊断时,需要考虑不同航天器之间的差异,实现“历史”与“在轨”的迁移;在将产品的研制、测试数据引入故障诊断时,需要考虑天地异构环境的差异,实现“地面”与“在轨”的迁移。同时,考虑到现有星载计算机的数据存储和处理能力较为有限,难以支持智能故障诊断算法庞大的计算开销,因此需要开展故障诊断模型压缩方法的研究,实现地面复杂智能算法的在轨等效应用。

## 3.3 航天器控制系统的智能寿命评估技术

### 1) 考虑非线性演化规律和权重自适应调整的寿命评估技术

现有寿命评估技术在航天领域的应用范围有限,主要原因在于:一方面,现有技术在建立寿命评估模型的过程中,主要考虑了数据的近似线性化表征,而忽略了非线性因素的影响;事实上,在

航天器控制系统的退化特征中,存在极强的非线性。因此,为了进一步提升评估的准确性,需要研究航天器控制系统的非线性退化轨迹函数,使其更符合实际系统的退化数据特性。另一方面,在多源数据融合模型中,其融合权重的分配至关重要,对于权重方法的选择也要更加谨慎,融合权重的方法有主观性的,有客观性的,还有主观客观相结合的,选用不同权重分析方法,其融合先验分布不同,寿命评估结果的精度也会有所偏差。因此,需要研究一种权重自适应确定方法来确定合适的融合权重。

### 2) 具有有效评价机制的寿命评估技术

由于底层部件的寿命是系统寿命的基础,而底层部件的寿命又依赖于建模所用模型以及部件 SHA 的输入。在对部件性能退化、参数退化、可靠性的建模过程中,模型误差不可避免,使得寿命评估结果的准确性存在偏差。因此,需要研究系统寿命评估结果的评价机制,用于定性甚至定量分析寿命评估结果的准确性。

## 3.4 数字孪生在航天器健康管理技术中的应用

航天数字化将从基于模型的系统工程(MBSE)阶段过渡到全生命周期基于数字孪生的设计、制造和运维,充分满足天地平行管控、在轨快速响应等未来大规模航天器的在轨操控和健康管理等应用需求<sup>[97-101]</sup>。数字孪生,利用数字技术对物理实体对象的特征、行为、性能、以及运行场景等进行描述和建模<sup>[102]</sup>,并基于实时数据同步逼近物理实体在真实环境中的属性、行为、规则等,为实现物理空间与信息空间交互与共融提供了解决方案。

在航天器健康管理领域,数字孪生技术的应用需要依靠航天器全生命周期的数据,不断培植和完善孪生体模型,具体如图 2 所示。

在航天器设计与研制阶段,利用地面和在轨数据(含研制和测试数据、历史运行数据等),通过在线的学习与训练,实现航天器系统功能级数字孪生模型的建立与完善,并结合知识算法模型,基于“系统协同设计平台”形成航天器系统功能级数字孪生体,在此基础上加入故障模型库、智能健康管理方法库,通过故障注入和模型训练等操作和过程,实现对在轨故障状态



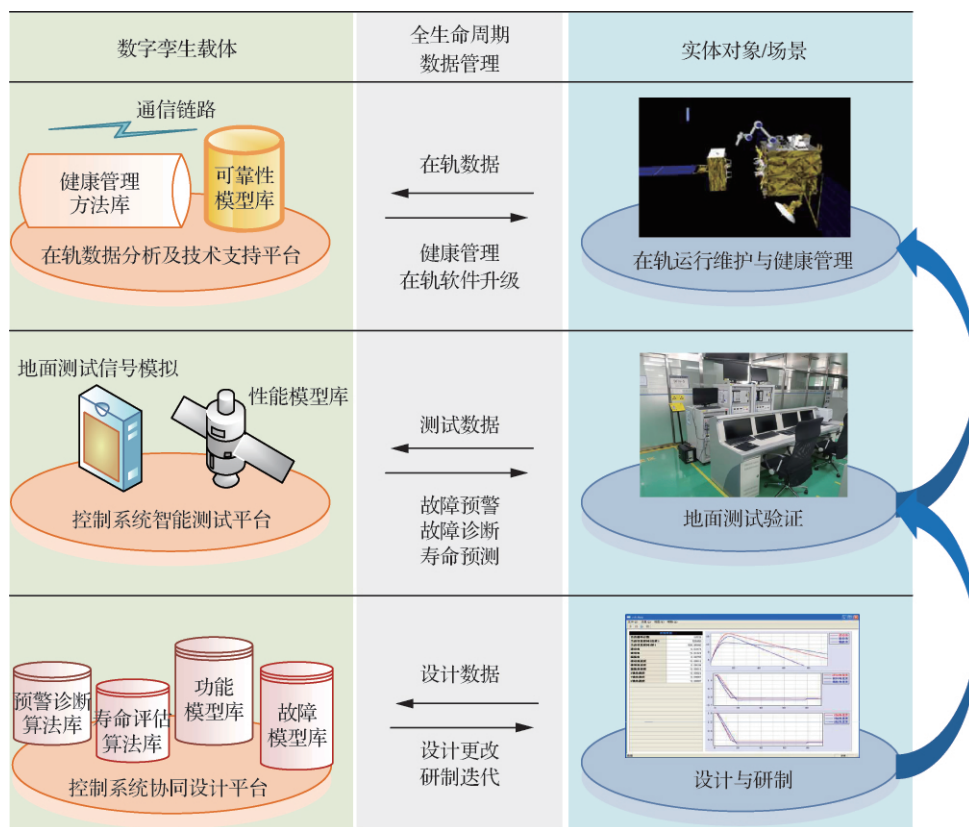


图 2 航天器数字孪生系统的构建与应用

Fig. 2 Construction of digital twin system for spacecraft and its application

的地面数字化模拟,验证星上自主健康管理技术的完备性和有效性。

进入系统的集成测试阶段后,需要建立与地面测试设备平行一致的数字孪生体,在功能级模型的基础上集成测试孪生体模型,进一步融入对部件性能、计算机与部件之间的接口测试等过程的模拟能力,基于地面测试阶段的航天器数字孪生体,能够仿真生成测试过程可能触发的各类故障数据,基于“系统智能测试平台”训练提升地面测试过程的自主异常定位能力,从而实现对系统地面验证的无人值守自主测试及异常定位。

在轨飞行阶段通过实际在轨数据驱动地面数字孪生体进行模型完善与修正,从而对在轨航天器的实时状态进行动态、真实、细致的反映。基于在轨航天器及其运行环境的地面数字孪生系统,一方面可实时掌握在轨航天器的健康状态,用于进行故障预警、故障诊断、寿命评估等健康管理,将在轨维护从事后处理向事前维修转换;另一方

面根据数字孪生系统对在轨状态的动态模拟,对星上智能自治算法进行再训练,具备更新能力的诊断方法验证成熟后可同步上注到在轨航天器,实现天地系统与模型之间基于在轨数据的协同进化,技术途径如图 3 所示。

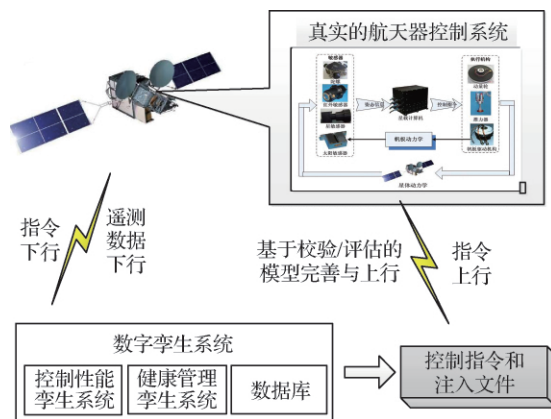


图 3 基于在线学习的天地协同进化示意图

Fig. 3 Diagram of co-evolution of Heaven and Earth based on online learning

## 4 结 论

本文在已有的航天器智能自主控制系统新架构基础上,梳理了现有航天器健康管理技术在实际工程应用中所面临的挑战,从故障预警、故障诊断和寿命评估 3 个方面归纳、总结了该技术领域现有理论研究与应用的具体情况,并提出了未来可能的技术发展方向。

通过对航天器控制系统智能健康管理技术发展情况的详细调研,可以发现:健康管理作为航天器智能自主控制系统的重要支撑,为航天器在轨自主运行提供了稳定可靠的自检、自治、自救能力,是未来实现大规模星群自适应、自组织、智能化发展的重要保障;同时,随着大数据时代和人工智能技术的迅速发展为航天产业赋能,发展航天器控制系统的智能健康管理技术既是航天产业发展的必然阶段,更是航天强国建设的时代需求,将人工智能技术与健康管理技术融合,必将成为航天器从自动化向智能化发展的新起点。

## 参 考 文 献

- [1] 郑南宁. 人工智能新时代[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 1-3.  
ZHENG N N. The new era of artificial intelligence[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 1-3 (in Chinese).
- [2] 包为民, 祁振强, 张玉. 智能控制技术发展的思考[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50 (8): 1267-1272.  
BAO W M, QI Z Q, ZHANG Y. Thoughts on the development of intelligent control technology[J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2020, 50 (8): 1267-1272(in Chinese).
- [3] 包为民. 航天智能控制技术让运载火箭“会学习”[J]. 航空学报, 2021, 42(11): 525055.  
BAO W M. Space Intelligent control technology enables launch vehicle to “Self-Learning”[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42 (11): 525055 (in Chinese).
- [4] 中华人民共和国国务院. 新一代人工智能发展规划. [EB/OL]. <http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content5211996.htm>.  
The State Council of the People's Republic of China. New Generation Artificial Intelligence Development Plan[EB/OL]. <http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content5211996.htm>.
- [5] 袁利, 黄煌. 空间飞行器智能自主控制技术现状与发展思考[J]. 空间控制技术与应用, 2019, 45(4): 7-18.  
YUAN L, HUANG H. Current trends of spacecraft intelligent autonomous control[J]. Aerospace Control and Application 2019, 45(4): 7-18(in Chinese).
- [6] SCHWABACHER M, SAMUELS J, BROWNSTON L. The NASA integrated vehicle health management technology experiment for X-37[C]// Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2002, 4733: 49-60.
- [7] 刘强, 周经伦, 金光, 等. 基于随机阈值的 Gauss-Brown 失效物理模型的动量轮可靠性评估[J]. 宇航学报, 2009, 30(5): 2109-2115.  
LIU Q, ZHOU J L, JIN G, et al. The reliability estimation of the momentum wheel based on the stochastic threshold Gauss-Brown failure physics model[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(5): 2109-2115 (in Chinese).
- [8] MCMAHON P, LAVÈN R. Results from 10 years of reaction/momentum wheel life testing[C]// 11th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, 2005.
- [9] 南煜. 基于有向图的航天器健康管理算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 53-70.  
NAN Y. Research on health management algorithm of spacecraft based on directed graph[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 53-70 (in Chinese).
- [10] 吕琛. 故障诊断与预测技术——原理、技术及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 262-265.  
LV S. Fault diagnosis and prediction techniques-Principles, techniques and applications[M]. Beijing: Beihang University Press, 2012: 262-265 (in Chinese).
- [11] 郭小红, 徐小辉, 赵树强, 等. 基于新息灰预测的卫星遥测参数状态预测及应用[J]. 宇航学报, 2010, 31(8): 1939-1943.  
GUO X H, XU X H, ZHAO S Q, et al. Satellite telemetry parameter trend forecast algorithm based on new information and applications [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(8): 1939-1943 (in Chinese).
- [12] CHONLAGRN I, ALI M, MOHAMMAD M. Computational algorithm for dynamic hybrid bayesian network in on-line system health management applications[C]// 2014 International Conference on Prognostics and Health Management, 2014.
- [13] COLANTONIO S, DI B M, PIERI G, et al. System health state monitoring using multilevel artificial neural networks[C]// 2005 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications. Piscataway: IEEE Press, 2005: 50-55.
- [14] SURESH K, SRINIVASAN R, AMARESH N, et al. Modeling of various phases of micro satellite using timed petri nets[C]// 2007 International Conference on Signal Processing, Communications and Networking, 2007: 195-

- 198.
- [15] 朱丽莎, 姜斌, 程月华, 等. 一种卫星遥测参数动态 AR-MA 建模方法[J]. 航天控制, 2017, 35(2): 37-43.  
ZHU L S, JIANG B, CHENG Y H, et al. A dynamic ARMA modeling method for satellite telemetry data[J]. Aerospace Control, 2017, 35(2): 37-43(in Chinese).
- [16] LOSIK L. Stopping launch pad delays, launch failure, satellite infant mortalities and on-orbit satellite failure using telemetry prognostic technology[C]// Proceedings of the International Telemetry Conference, 2007.
- [17] 彭宇, 刘大同. 数据驱动故障预测和健康管理综述[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 481-495.  
PENG Y, LIU D T. Data-driven prognostics and health management: A review of recent advances[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3): 481-495(in Chinese).
- [18] DAI C L, PI D C, FANG Z, et al. A novel long-term prediction model for hemispherical resonator gyroscope's drift data [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14 (6): 1886-1897.
- [19] GAO Y, YANG T, LI W, et al. State trend prediction of spacecraft using PSO-SVR[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2014, 323: 337-345.
- [20] LIU M, LU N, CHENG Y, et al. Data-based incipient fault detection and prediction for satellite's attitude control system[C]//IEEE Control and Decision Conference. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1202-1207.
- [21] LEN L. Results from the prognostic analysis completed on the NASA extreme ultra violet explore satellite[C]//2012 IEEE Aerospace Conference. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-16.
- [22] JOSE-ANTONIO M, ALESSANDRO D, BRUNO S, et al. DrMUST-a data mining approach for anomaly investigation[C]// Proceedings of the SpaceOps 2012 Conference. Piscataway: IEEE Press, 2012: 11-15.
- [23] ELSAID A E, WILD B, HIGGINS J, et al. Using LSTM recurrent neural networks to predict excess vibration events in aircraft engines[C]// 2016 IEEE 12th International Conference on e-Science (e-Science). Piscataway: IEEE Press, 2016.
- [24] SARY C, PETERSON C, ROWE J, et al. Trend analysis for spacecraft systems using multimodal reasoning: Technical Report SS-98-04[R]. Greenbelt: AAAI, 1998: 157-162.
- [25] WINTOFT P, LUNDSTEDT H, ELIASSON L, et al. Spacecraft anomaly analysis and prediction system-SAAPS [C]// Proceedings of the 7th International Conference, 2001: 169-176.
- [26] KIRSCH M G F, AIREY S, CHAPMAN P, et al. Bearing noise detection, modeling and mitigation measures on ESA's X-ray observatory XMM-NEWTON[C]// 2014 GN&C Conference, 2014: 827-838.
- [27] TAKAKI R, HASHIMOTO M, HONDA H, et al. ISACS-DOC automatic monitoring and diagnostic system for spacecraft[C]// The 6th International Symposium on Reducing the Costs of Spacecraft Ground Systems & Operations, 2005.
- [28] HUNDMAN K, CONSTANTINOU V, LAPORTE C, et al. Detecting spacecraft anomalies using LSTMs and nonparametric dynamic thresholding[C]// The 24th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2018.
- [29] DALY K C, GAI E, HARRISON J V. Generalized likelihood test for FDI in redundant sensor configurations[J]. Journal of Guidance and Control, 1979, 2(1): 9-17.
- [30] 邢琰, 吴宏鑫, 王晓磊, 等. 航天器故障诊断与容错控制技术综述[J]. 宇航学报, 2003, 24(3): 221-226.  
XING Y, WU H X, WANG X L, et al. Survey of fault diagnosis and fault-tolerant control technology for spacecraft[J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(3): 221-226 (in Chinese).
- [31] ZOLGHADRI A. Advanced model-based FDIR techniques for aerospace systems: Today challenges and opportunities [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2012, 53: 18-29.
- [32] YIN S, XIAO B, DING S X, et al. A review on recent development of spacecraft attitude fault tolerant control system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 3311-3320.
- [33] 王大轶, 屠园园, 符方舟, 等. 航天器控制系统的自主诊断重构技术 [J]. 控制理论与应用, 2019, 36(12): 1966-1978.  
WANG D Y, TU Y Y, FU F Z, et al. Autonomous diagnosis and reconfiguration technology of spacecraft control system[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(12): 1966-1978 (in Chinese).
- [34] WILLIAMSON W R, SPEYER J L, DANG V T, et al. Fault detection and isolation for deep space satellites[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2009, 32(5): 1570-1584.
- [35] 沈毅, 李利亮, 王振华. 航天器故障诊断与容错控制技术综述[J]. 宇航学报, 2020, 41(6): 647-656.  
SHEN Y, LI L L, WANG Z H. A review of fault diagnosis and fault-tolerant control techniques for spacecraft[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(6): 647-656 (in Chinese).
- [36] PATTON R J, FRANK P M, CLARK R N. Issues of fault diagnosis for dynamic systems[M]. London: Springer-Verlag, 2000: 1-12.
- [37] FRANK P M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy a survey and

- some new results [J]. Automatica, 1990, 26 (3): 459-474.
- [38] FRANK P M. Analytical and qualitative model-based fault diagnosis a survey and some new results[J]. European Journal of Control, 1996, 2(1): 6-28.
- [39] MARZAT J, PIET-LAHANIER H, DAMONGEOT F, et al. Model-based fault diagnosis for aerospace systems; a survey[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2012, 226 (10): 1329-1360.
- [40] 邢琰, 魏春岭. 基于四元数估计角速率的陀螺故障定位[J]. 宇航学报, 2003, 24(4): 410-413.  
XING Y, WEI C L. Fault location of single redundant gyroscopes based on estimated angular rate using quaternion [J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(4): 410-413 (in Chinese).
- [41] 邢琰, 吴宏鑫. 一种红外地球敏感器和陀螺的故障隔离方法[J]. 计算技术与自动化, 2003, 22(2): 74-76.  
XING Y, WU H X. A fault isolation method for infrared Earth sensors and gyroscopes[J]. Computing Technology and Automation, 2003, 22(2): 74-76 (in Chinese).
- [42] BOSKOVIC J D, BERGSTROM S E, MEHRA R K. Robust integrated flight control design under failures, damage, and state-dependent disturbances [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005, 28: 902-917.
- [43] CHEN W, SAIF M. Observer-based fault diagnosis of satellite systems subject to time-varying thruster faults [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2007, 129(3): 352-356.
- [44] XIONG K, CHAN C W, ZHANG H Y. Detection of satellite attitude sensor faults using the UKF [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(2): 480-491.
- [45] TUDOROIU N, KHORASANI K. Satellite fault diagnosis using a bank of interacting Kalman filters[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(4): 1334-1350.
- [46] HENRY D. Fault diagnosis of microscope satellite thrusters using H-infinity/H-filters[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2008, 31: 699-711.
- [47] PIRMORADI F N, SASSANI F, SILVA C W D. Fault detection and diagnosis in a spacecraft attitude determination system [J]. Acta Astronautica, 2009, 65 (5-6): 710-729.
- [48] GAO Z F, JIANG B, SHI P, et al. Sensor fault estimation and compensation for microsatellite attitude control systems[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2010, 8(2): 228-237.
- [49] ALWI H, EDWARDS C, MARCOS A. FDI for a Mars orbiting satellite based on a sliding mode observer scheme [C]//IEEE 2010 Conference on Control and Fault Tolerant Systems. Piscataway: IEEE Press, 2010: 125-130.
- [50] GAO C, ZHAO Q, DUAN G R. Robust actuator fault diagnosis scheme for satellite attitude control systems[J]. Journal of the Franklin Institute, 2013, 350 (9): 2560-2580.
- [51] ZHANG J, SWAIN A K, NGUANG S K. Robust sensor fault estimation scheme for satellite attitude control systems[J]. Journal of the Franklin Institute, 2013, 350(9): 2581-2604.
- [52] 李文博, 王大轶, 刘成瑞. 动态系统实际故障可诊断性的量化评价研究[J]. 自动化学报, 2015, 41(3): 497-507.  
LI W B, WANG D Y, LIU C R. Quantitative evaluation of actual fault diagnosability for dynamic systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(3): 497-507 (in Chinese).
- [53] 汤文涛, 王振华, 王烨, 等. 基于未知输入集员滤波器的不确定系统故障诊断[J]. 自动化学报, 2018, 44(9): 1717-1724.  
TANG W T, WANG Z H, WANG Y, et al. Fault diagnosis for uncertain systems based on unknown input set-membership filters[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44 (9): 1717-1724 (in Chinese).
- [54] ZHONG M Y, LIU C R, ZHOU D H, et al. Probability analysis of fault diagnosis performance for satellite attitude control systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(11): 5867-5876.
- [55] 李利亮, 牛睿, 邵志杰, 等. 基于专用卡尔曼滤波器思想的陀螺故障诊断[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(9): 1501-1508.  
LI L L, NIU R, SHAO Z J, et al. Gyroscope fault diagnosis based on dedicated Kalman filter scheme[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(9): 1501-1508 (in Chinese).
- [56] WANG D Y, FU F Z, LI W B, et al. A review of the diagnosability of control systems with applications to spacecraft[J]. Annual Reviews in Control, 2020, 49: 212-229.
- [57] RAHIMI A, KUMAR K D, ALIGHANBARI H. Fault isolation of reaction wheels for satellite attitude control[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(1): 610-629.
- [58] 郝慧, 王南华. 基于小波分析的航天器姿态控制系统故障诊断方法研究[J]. 航天控制, 2005, 23(5): 73-78.  
HAO H, WANG N H. Research on wavelet analysis based fault diagnosis for attitude control subsystem of spacecraft[J]. Aerospace Control, 2005, 23(5): 73-78 (in Chinese).
- [59] WU Q, SAIF M. Robust fault detection and diagnosis for a multiple satellite formation flying system using second order sliding mode and wavelet networks [C] // 2007 American Control Conference, 2007: 426-431.
- [60] 王振华, 沈毅, 张筱磊. 基于等价关系和经验模态分解的

- 卫星陀螺故障诊断方法[J]. 南京理工大学学报, 2011, 35(S2): 127-131.
- WANG Z H, SHEN Y, ZHANG X L. Satellite gyroscope fault diagnosis based on parity relation and empirical mode decomposition[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011, 35(S2): 127-131(in Chinese).
- [61] ALI A, SCHARNHORST D A, AI C S, et al. A flight expert system (FLES) for on-board fault monitoring and diagnosis[C]//Proceeding of SPIE, 1986: 58-61.
- [62] 王南华, 倪行震, 李丹, 等. 卫星控制系统地面实时故障诊断专家系统 SCRDES[J]. 航天控制, 1991, 9(3): 37-44.
- WANG N H, NI X Z, LI D, et al. An on-ground real-time fault diagnosis expert system for the satellite attitude control system (SCRDES)[J]. Aerospace Control, 1991, 9(3): 37-44(in Chinese).
- [63] 谢敏, 楼鑫, 罗芊. 航天器故障诊断技术综述及发展趋势[J]. 软件, 2016, 37(7): 70-74.
- XIE M, LOU X, LUO Q. Reviewed and developing trend of spacecraft fault diagnosis technology[J]. Computer Engineering & Software, 2016, 37(7): 70-74(in Chinese).
- [64] 苏林, 尚朝轩, 刘文静. 航天器姿态控制系统故障诊断方法概述[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2010, 33(4): 23-27.
- SU L, SHANG C X, LIU W J. Survey on the technology of fault diagnosis for spacecraft attitude control system[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 33(4): 23-27(in Chinese).
- [65] WU Q, SAIF M. Robust fault diagnosis for a satellite large angle attitude system using an iterative neuron PID (INPID) observer[C]//2006 American Control Conference, 2006: 5710-5715.
- [66] TALEBI H A, KHORASANI K, TAFAZOLI S. A recurrent neural-network-based sensor and actuator fault detection and isolation for nonlinear systems with application to the satellite's attitude control subsystem[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2009, 20(1): 45-60.
- [67] HUANG Y, LI S, SUN J. Mars entry fault-tolerant control via neural network and structure adaptive model inversion[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(1): 557-571.
- [68] LI Z Q, MA L, KHORASANI K. A dynamic neural network-based reaction wheel fault diagnosis for satellites[C]//International Joint Conference on Neural Networks, 2006: 3714-3721.
- [69] GAO S, ZHANG W, HE X, et al. Neural network-based fault diagnosis scheme for satellite attitude control system [C]//2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2018: 3990-3995.
- [70] CHENG Y, WANG R X, XU M Q. A combined model-based and intelligent method for small fault detection and isolation of actuators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4): 2403-2413.
- [71] SANDRA C H, ADAM J S. Livingstone model-based diagnosis of earth observing One[C]//AIAA 1 st Intelligent Systems Technical Conference. Reston: AIAA, 2004: 1-11.
- [72] 高伟, 邢琰, 王南华. 基于定性模型的故障诊断方法[J]. 空间控制技术与应用, 2009, 35(1): 25-29.
- GAO W, XING Y, WANG N H. Fault diagnosis approach based on qualitative model[J]. Aerospace Control and Application, 2009, 35(1): 25-29(in Chinese).
- [73] 晏政. 航天器推进系统基于定性模型的故障诊断方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013: 7-24.
- YAN Z. Investigation on model-based fault diagnosis methods for spacecraft propulsion system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013: 7-24(in Chinese).
- [74] LI Z, LIU G, ZHANG R, et al. Fault detection, identification and reconstruction for gyroscope in satellite based on independent component analysis[J]. Acta Astronautica, 2011, 68(7-8): 1015-1023.
- [75] HU D, SAROSH A, DONG Y F. A novel KFCM based fault diagnosis method for unknown faults in satellite reaction wheels[J]. ISA Transactions, 2012, 51: 309-316.
- [76] 黄旭星, 李爽, 孙盼, 等. 人工智能在航天器制导与控制中的应用综述[J]. 航空学报, 2021, 42(4): 524201.
- HUANG X X, LI S, SUN P, et al. Review of spacecraft guidance and control based on artificial intelligence[J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 524201 (in Chinese).
- [77] 姜洪开, 邵海东, 李兴球. 基于深度学习的飞行器智能故障诊断方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(7): 27-34.
- JIANG H K, SHAO H D, LI X Q. Deep learning theory with application in intelligent fault diagnosis of aircraft [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(7): 27-34 (in Chinese).
- [78] ORTIZ N, HERNÁNDEZ R D, JIMENEZ R, et al. Survey of biometric pattern recognition via machine learning techniques [J]. Contemporary Engineering Sciences, 2018, 11(34): 1677-1694.
- [79] TOMS D, HADDEN G D, HARRINGTON J. Attitude determination and control system(ADCS) and maintenance and diagnostic system(MDS): A maintenance and diagnostic system for Space Station Freedom[C]//The 5th Conference on Artificial Intelligence for Space Applications, 1990: 175-184.
- [80] MENDONA L F, SOUSA J M C, COSTA K M G S D.

- An architecture for fault detection and isolation based on fuzzy methods[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(2): 1092-1104.
- [81] SMART FDIR Project Team. SMART FDIR final report: SD-RP-AI-0378[R]. Turin: ALENIA SPAZIO S. p. A., 2003.
- [82] 姜连祥, 李华旺, 杨根庆, 等. 航天器自主故障诊断技术研究进展[J]. *宇航学报*, 2009, 30(4): 1320-1326.  
JIANG L X, LI H W, YANG G Q, et al. A survey of spacecraft autonomous fault diagnosis research[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(4): 1320-1326 (in Chinese).
- [83] 唐圣金, 郭晓松, 司小胜, 等. 基于维纳过程的卫星用光纤陀螺剩余寿命预测[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(12): 3347-3352.  
TANG S J, GUO X S, SI X S, et al. Remaining useful life prediction of FOGs used for satellite based on Wiener process[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3347-3352(in Chinese).
- [84] LI H, PAN D, CHEN C L P. Reliability modeling and life estimation using an expectation maximization based wiener degradation model for momentum wheels [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2015, 45(5): 969-977.
- [85] ZHU L S, JIANG B, CHENG Y H. Life prediction methods based on data-driven: Review and trend[C]//Proceedings of 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference, Piscataway: IEEE Press, 2016: 1682-1686.
- [86] 郝旭东. 基于 RVM-PF 的卫星关键部件寿命预测[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011: 5-7.  
HAO X D. Life prediction of satellite key components based on RVM-PF[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011: 5-7 (in Chinese).
- [87] 张建勋, 胡昌华, 周志杰, 等. 多退化变量下基于 Copula 函数的陀螺仪剩余寿命预测方法[J]. *航空学报*, 2014, 35(4): 1111-1121.  
ZHANG J X, HU C H, ZHOU Z J, et al. Multiple degradation variables modeling for remaining useful life estimation of gyros based on copula function[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(4): 1111-1121 (in Chinese).
- [88] 刘胜南, 陆宁云, 程月华, 等. 基于多退化量的动量轮剩余寿命预测方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2015, 47(3): 360-366.  
LIU S N, LU N Y, CHENG Y H, et al. Remaining lifetime prediction for momentum wheel based on multiple degradation parameters[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2015, 47(3): 360-366(in Chinese).
- [89] 丁瑞, 陆宁云, 程月华, 等. 基于 D-S 证据理论的航天设备寿命预测方法[J]. *中国空间科学技术*, 2016, 36(4): 58-66.  
DING R, LU N Y, CHENG Y H, et al. Lifetime prediction of aerospace equipment based on D-S evidence theory [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2016, 36(4): 58-66(in Chinese).
- [90] HU C, YOUN B D, WANG P, et al. Ensemble of data-driven prognostic algorithms for robust prediction of remaining useful life[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2012, 103: 120-135.
- [91] LIU Z, LI Q, MU C. A hybrid LSSVR-HMM based prognostics approach[C]//The 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, 2012: 275-278.
- [92] QI H M, CHENG Y H, JIANG B, et al. The residual life prediction of the satellite attitude control system based on Petri net[C]//2014 Prognostics and System Health Management Conference, 2014: 266-270.
- [93] 田静. 基于动态故障树的卫星姿态控制系统寿命预测方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016: 67-82.  
TIAN J. Research on prediction of residual use life for attitude control system of satellite based on dynamic fault tree[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016: 67-82(in Chinese).
- [94] 祁海铭, 程月华, 姜斌, 等. 基于多状态故障的卫星姿态控制系统剩余寿命预测方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2015, 47(1): 29-36.  
QI H M, CHENG Y H, JIANG B, et al. Residual life prediction of satellite attitude control system based on multistate failures[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2015, 47(1): 29-36(in Chinese).
- [95] CASTET J F, SALEH J H. Single versus mixture Weibull distributions for nonparametric satellite reliability [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2010, 95(3): 295-300.
- [96] CASTANEDA G A P, AUBRY J F, BRINZEI N. Stochastic hybrid automata model for dynamic reliability assessment[J]. *Journal of Risk and Reliability*, 2011, 225(1): 28-41.
- [97] FISCHER P M, LUDTKE D, LANGE C, et al. Implementing model-based system engineering for the whole lifecycle of a spacecraft[J]. *CEAS Space Journal*, 2017, 9(3): 351-365.
- [98] LIU X, GUO J, GILL E. Towards model-driven development of AOCS/GNC for small satellite missions[C]//The 65th International Astronautical Congress (IAC), 2014.
- [99] TAO F, SUI F, LIU A, et al. Digital twin-driven product design framework[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(12): 3935-3953.

- [100] TUEGEL E J. The airframe digital twin: some challenges to realization[C]// Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston: AIAA, 2012.
- [101] CAI Y, STARLY B, COHEN P, et al. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing[C]// Proceedings of the 45th SME North American Manufacturing Research Conference, 2017: 1031-1042.
- [102] 刘蔚然, 陶飞, 程江峰, 等. 数字孪生卫星: 概念、关键技术及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(3): 565-588.
- LIU W R, TAO F, CHENG J F, et al. Digital twin satellite: concept, key technologies and applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(3): 565-588 (in Chinese).

(责任编辑: 苏磊)

## A review on development of intelligent health management technology for spacecraft control systems

YUAN Li<sup>1, 2</sup>, WANG Shuyi<sup>1, 2, \*</sup>

1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China

2. Key Laboratory of Space Intelligent Control Technology, Beijing 100094, China

**Abstract:** As one of the key technologies for spacecraft intelligent autonomous control, health management is an effective way to improve the security, reliability and stability of spacecraft. Based on the development trend of artificial intelligence technology and the new general architecture of spacecraft intelligent autonomous control system that is developed by our team, this paper gives a review of the status and development trend of intelligent health management technology for spacecraft control system. First, the challenges of health management technology for spacecraft control systems in the process of design, test and in-orbit operation are presented. Then, the states of the art of the health management technology based on artificial intelligence and its applications in the aerospace field are discussed in terms of fault prognosis, fault diagnosis and life assessment. Finally, possible development directions of the health management technology for spacecraft control system are summarized.

**Keywords:** spacecraft control system; artificial intelligence; health management; fault prognosis; fault diagnosis; life assessment

Received: 2020-12-01; Revised: 2020-12-21; Accepted: 2021-01-24; Published online: 2021-02-03 10:26

URL: <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20210407.html>

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (61573060); National Defence Pre-research Foundation (6142208180101)

\* Corresponding author. E-mail: wangshuyi78@sina.com