

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.S.006

基于数字孪生的小卫星健康预测技术

曹雪蕊¹, 张学艺¹, 彭开香¹, 崔玉福²

(1. 北京科技大学自动化学院工业过程知识自动化教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要: 健康预测和数字孪生技术是实现小卫星数字化设计与在轨卫星健康管理的重要手段, 它可以为小卫星数字化设计提供必要的支持, 保证其安全、可靠地在轨服役运行。针对小卫星数字化程度低、各阶段数据流动少、运行环境复杂多变等特点, 本文提出了基于数字孪生的小卫星全生命周期智能诊断与健康预测框架。首先, 对健康预测、数字孪生和数字主线等技术及其在卫星领域的应用做了概述。其次, 充分利用小卫星在轨和地面等各类数据, 构建了面向小卫星健康预测的数字孪生模型, 以及小卫星全生命周期的数字主线。最后, 结合机理知识和性能数据, 提出了基于信息融合的薄弱环节识别、智能诊断、健康评估和在轨剩余寿命预测方法。所提出框架可以有效地实现物理和虚拟数据融合、虚实互连和数据处理, 为小卫星数字化设计与健康预测提供必要支撑。

关键词: 数字孪生; 数字主线; 智能诊断; 健康预测

中图分类号: V47 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)S-0035-08

Small Satellite Health Prediction Based on Digital Twin

CAO Xuerui¹, ZHANG Xueyi¹, PENG Kaixiang¹, CUI Yufu²

(1. Key Laboratory of Knowledge Automation for Industrial Processes of Ministry of Education, School of Automation, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: Health prediction and digital twin are essential to autonomous control and health management of satellites in orbit. They support small satellites' autonomous control and ensure their safe and reliable in-orbit operation. For small satellites' characteristics of low digitalization, low data flows and complex and variable operation environments, this paper proposes a framework of intelligent diagnosis and health prediction for the whole life cycle of small satellites based on digital twin. Firstly, an overview of health prediction, digital twin, digital mainline and their applications in the satellite field is provided. Secondly, the digital twin models for small satellite health prediction and a digital mainline for the whole life cycle of small satellites are constructed by making full use of various data. Finally, combining with the mechanism and performance data, the weak process identification, intelligent diagnosis, health assessment and remaining life prediction methods based on information fusion are proposed. The proposed framework can effectively realize physical and virtual data fusion, virtual-real interconnection, and data processing to achieve accurate health prediction of small satellites.

Key words: digital twin; digital mainline; intelligent diagnosis; health prediction

航空航天技术是探索、开发和利用外层空间的综合性高新技术, 卫星技术作为航空航天技术的中流砥柱, 在军事应用、科技进步和经济发展诸方面

都具有重要地位。近年来, 随着微电子和智能制造技术的发展, 卫星小型化的进程加快, 已经成为空间系统的重要组成部分, 特别是近年来小卫星性能

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3301200); 国家自然科学基金(61873024)。

收稿日期: 2022-07-01; **修订日期:** 2022-09-01

通信作者: 彭开香, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: kaixiang@ustb.edu.cn。

引用格式: 曹雪蕊, 张学艺, 彭开香, 等. 基于数字孪生的小卫星健康预测技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(S): 35-42. CAO Xuerui, ZHANG Xueyi, PENG Kaixiang, et al. Small satellite health prediction based on digital twin[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(S): 35-42.

的不断提高和应用领域的不断扩大,在航天服务体系中起到了重要的作用^[1-3]。小卫星通常具备研制周期短、发射成本低和发射方式灵活等优势,已经在遥感、测绘、通信、信息获取、深空探测、太空安全和新技术验证等领域广泛应用,为国家安全、国民经济发展发挥巨大作用。小卫星不仅质量小,功能简单,而且高度集成化、自动化特别是计算机技术的综合应用,实现其控制与处理计算小型化^[4]。小卫星从设计、制造、发射和在轨运行全过程可以快速实现,研制周期短,研制成本大大降低。其既可以单独完成相关任务,又可以组成星座或编队实现甚至超越传统大卫星所能提供的功能^[5-6]。

小卫星是现阶段卫星发展的主要趋势,因体积小、集成化高的特点,一定程度限制了冗余设计以及硬件备份的能力,但对其可靠性要求却未降低。此外,小卫星功能和结构的高度集成化,使其故障形式变得复杂、失效概率也随之增加。小卫星一旦发生故障会导致数据错误、信号干扰,甚至性能下降、部件失效、用户任务难以满足等,寿命结束提前退役,增加用户成本。因此,为了提高小卫星可靠性、可用性和完好性,使其能够“一次发射,长期运行”,有必要开展小卫星健康预测研究,对在轨运行的小卫星进行健康监测、诊断、评估和预测等,使小卫星能够根据自身的容错和冗余特性进行自主修复,尽可能减缓和避免发生严重故障,有效延长小卫星寿命,提高其服役时间,降低维护成本^[4,6]。

本文将数字孪生技术引入小卫星健康预测中,提出了一种基于数字孪生的小卫星健康预测框架。通过孪生模型、全生命周期数字主线技术,借助各类传感器及运行数据,实现小卫星的远程监控、状况评估、故障预测和故障诊断等,解决小卫星结构复杂、动态性强、运行环境复杂多变以及提高运行效率与安全性等关键性问题,对实现小卫星“高可靠、长寿命”具有非常重要的现实意义。

1 相关技术及其在卫星上的应用

1.1 健康预测及其在卫星上的应用

健康预测源自于机内测试(Built-in test, BIT)和飞行器健康监控(Vehicle health management, VHM)技术。随着监控技术的不断发展,健康监控理论从状态监控变为健康管理,预测与健康管理(Prognostics and health management, PHM)等概念也随之出现了。PHM技术作为近些年新兴技术,其主要通过各种智能算法对从先进传感器中采集的状态数据进行特征提取,获取系统的健康状态特征,实现对系统健康状态的监控、预测和管理,从整体上了解复杂系统的运行状态,及时预报系统健康的发展趋势,为维修决策提供依据^[7-11]。本文中,

健康预测被认为与PHM等同。

近年来,卫星智能化程度不断提升,健康预测技术已经成为航空航天领域自主维护与健康管理的核心技术。对于健康预测的研究逐渐从单纯理论研究过渡到理论与实际相结合,部分研究成果已经成功应用到了工程实践中。美国Honeywell公司利用综合飞行器/运载工具健康管理技术对深空探测航天器展开了故障预测的研究。欧洲航天局(European Space Agency, ESA)和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)对空间中活动部件的失效机理进行了研究,建立了挥发模型、变质模型等对润滑剂的失效和损耗进行预测^[8]。

国内针对卫星健康预测方面也取得了一定进步,包括航天科工集团公司通过对大量航天器数据运行规律研究,运用机器学习等方法对航天器故障预测方法展开了研究,对航天器可能发生的故障进行预警,有效减少了连续性故障发生。哈尔滨工业大学探索了外界作用对卫星的失效与性能退化的影响,实现对卫星在轨寿命的预测^[9]等。

总体来看,现有的健康预测技术已经在航天领域取得了丰硕的研究成果,但是对数学模型的依赖程度较大,不能满足卫星的实际需求,在系统的数学模型不精确时无法获得满意结果。基于此,在对卫星的运行工况与机理深入分析的基础上,研究基于机理模型与数据融合的卫星健康预测方法,具有重要的现实意义和广阔的工程应用前景,也为卫星设计与在轨运行健康管理等提供重要信息支撑。

1.2 数字孪生及其在卫星上的应用

Grieves教授^[12]在2003年最初提出数字孪生的概念,其早期主要应用于军工、航空航天等领域。数字孪生可被看作连接物理空间和数字空间的纽带,主要通过数字化方式建立从多维、多时空尺度、多学科、多物理量等建立物理对象的动态虚拟模型,来完成对其描述物理对象的多维属性描述、实际行为和状态刻、未来发展趋势分析,从而实现对物理对象的仿真、监控、预测、优化等^[13-16]。作为智能制造的一项新使能技术,数字孪生技术为信息物理系统虚实融合的实现指明了新的思路、解决路径。

为了以更经济有效的方式满足现代战争新作战模式对卫星可靠、高效、准确和敏捷的需求,数字孪生技术受到英、美等军事强国重视和广泛应用^[15]。NASA在2010年发布的“建模、仿真、信息技术和处理路线图”中明确了数字孪生的发展愿景。美国空军研究实验室为解决未来复杂服役环境下飞机运行维护的问题,于2011年提出了飞机数字孪生体的概念。加拿大皇家空军(Royal cana-

dian air force , RCAF)也开始评估机体数字孪生在RCAF机群管理中的应用,并以一架CF-118战斗机的全尺寸部件测试进行了验证。

数字孪生技术也受到了国内工业和学术界的关注并展开了相关研究与应用实践探索^[17-18]。北京世冠金洋科技发展有限公司研发了航天飞行器数字孪生技术及仿真平台,完成了对卫星各子系统仿真模型的集成和数字卫星组装构建与仿真的评估;精航伟泰测控仪器有限公司也在卫星数字孪生设计进行了开发研究。北京航空航天大学陶飞等^[18]基于数字孪生五维模型提出了数字孪生卫星/空间通信网络的应用设想。

总体来看,当前数字孪生技术在卫星应用还处在起步阶段,虽然在理论研究与探索中取得了一定进展,但对卫星数字孪生的系统工程应用较少。在卫星健康预测中应用数字孪生技术,研究基于数字孪生的健康预测技术,对于提高卫星在轨运行的稳定性、安全性以及降低能源的消耗都具有深远意义。

1.3 数字主线与数字孪生及其在卫星上的应用

数字主线是一个可扩展、可配置允许可连接数据流的通信框架,被认为是产品模型在各阶段演化利用的沟通渠道,覆盖产品制造过程全生命周期各个环节,支持全生命周期的数据访问、转换、分析和追溯,可为决策者提供产品全生命周期的信息^[19-20]。

数字孪生被认为是模型、数据和映射集,而数字主线则是贯穿全生命周期的方法、线索和映射,数字孪生的访问、整合以及转换能力均可由数字主线提供。数字主线可以明确数字孪生中互联小模型的关联关系并提供全生命周期过程数字和物理空间信息的双向共享、交互和全面追溯,实现数字和物理空间的闭环。

虽然数字主线计划在当今的商业与学术界受到欢迎,但其在卫星领域实践仍待发展。洛克希

德-马丁公司军用战机的开发与早期生产分阶段采用了数字主线理念。2018年,美国空军发布数字工程战略,将数字系统模型、数字主线、数字孪生作为构建未来美国数字工程生态系统核心纽带之一。此外,GE航空集团、参数技术公司等也探讨了数字主线在企业数字化转型中的应用。但数字主线在国内的研究尚处于起步阶段,国内的科研团队与机构在工业大数据、数字孪生和工业互联网等方面的理论探讨与新技术研究取得了一定的成果。

总体来看,作为高成本的航天产品,小卫星面对“高可靠、长寿命”的需求,传统的“事后维修”和“计划维修”不再适应。借助前述的数字孪生、数字主线等技术,通过建立物理系统的数字空间、实时监测系统状态并驱动模型动态更新实现更准确的描述与预报,从而实现在线优化决策与反馈控制。这就为解决上述问题提供了一个可行的新思路。

小卫星设计、制造、运维全生命周期长、运行环境复杂且各系统内部和系统之间互联耦合,传统的小卫星健康预测技术面临严峻的挑战。一方面,小卫星全生命周期中数字化与智能化程度低、各阶段数据流通少、流程间模型演化与数据关联差、系统间信息交互等问题,难以为健康预测提供可靠的数据-模型-知识支持。另一方面,小卫星运行工况复杂多变、工作状态影响因素多、健康诊断与评估实时响应速度慢,难以实现小卫星寿命的动态精准预测。因此,考虑到小卫星工作模式的时空特性、多维数据和复杂环境,采取有效的全生命周期数字化的健康预测是一个必要的趋势和迫切需求。

本节提出了一种针对全生命周期的小卫星健康智能诊断和寿命预测框架。所提出的框架包括4个方面:面向小卫星健康预测的数字孪生系统建模、小卫星全生命周期数字主线构建、基于多源数据融合的小卫星健康监测与智能诊断、复杂环境下小卫星健康评估与剩余寿命预测,如图1所示。

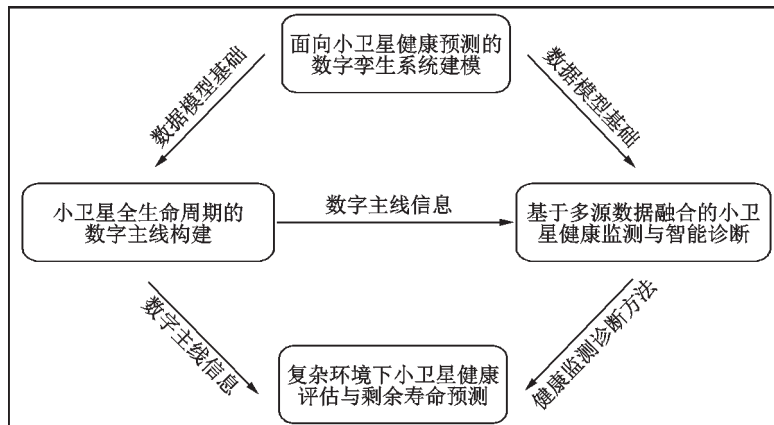


图1 基于数字孪生的小卫星健康预测框架

Fig.1 Health prediction of small satellite frame-work based on digital twin

2 小卫星健康预测技术

2.1 面向小卫星健康预测的数字孪生系统建模

在小卫星总体设计、生产制造(包含总装、集成和测试等)、发射环境、在轨服役环境、深空环境和空间对抗环境等全生命周期中,不同运行工况充分分析的基础上,采用数据驱动方法、复杂系统建模技术等,建立小卫星的五维数字孪生模型(小卫星物理实体、小卫星孪生体、孪生数据、服务系统、连接)。运用数据驱动方法,进行数据关联度分析,挖掘深层次的数据关联;利用机器学习的方法,对孪生数据进行特征选择和提取,实现数据特征空间维数的压缩,为后续的性能指标构建和健康度预测提供基础。综合考虑力、热以及电磁场等对卫星运行的影响,针对卫星系统多物理场耦合环境下,根据数字孪生对象的使命任务,基于有限元法进行多物理场建模。

基于小卫星孪生系统全局状态监测的功能需求与先验知识,分别选取面向系统级若干性能指标

(如可靠性、经济性和安全性等)和面向分系统级与部件级的若干性能指标(如成像质量、姿态指向精度、姿态稳定度和定位精度等),构成多层次冗余性能指标集。利用性能指标的物理内涵、机理模型结合统计分析方法,建立性能指标与可测状态参数间的非线性映射关系,构建性能指标计算模型。

根据小卫星各个部件疲劳损伤理论和贝叶斯理论的信息融合方法,揭示小卫星在退化过程中的多故障模式耦合损伤演化规律。根据物理内涵、机理模型与统计分析,采用软测量和自组织映射等方法,系统性、分层次地分析各关键部件、分系统、系统在发生故障过程中可测状态参数的变化规律,建立性能指标与可测状态参数间的非线性映射关系,并深入挖掘在轨小卫星孪生系统故障数据与耦合参量间的关联关系,采用有向图定量描述性能与故障之间带有方向性的因果关系模型,构建基于动态贝叶斯网络的小卫星孪生系统性能-故障传播网络模型。本节的研究思路如图2所示。

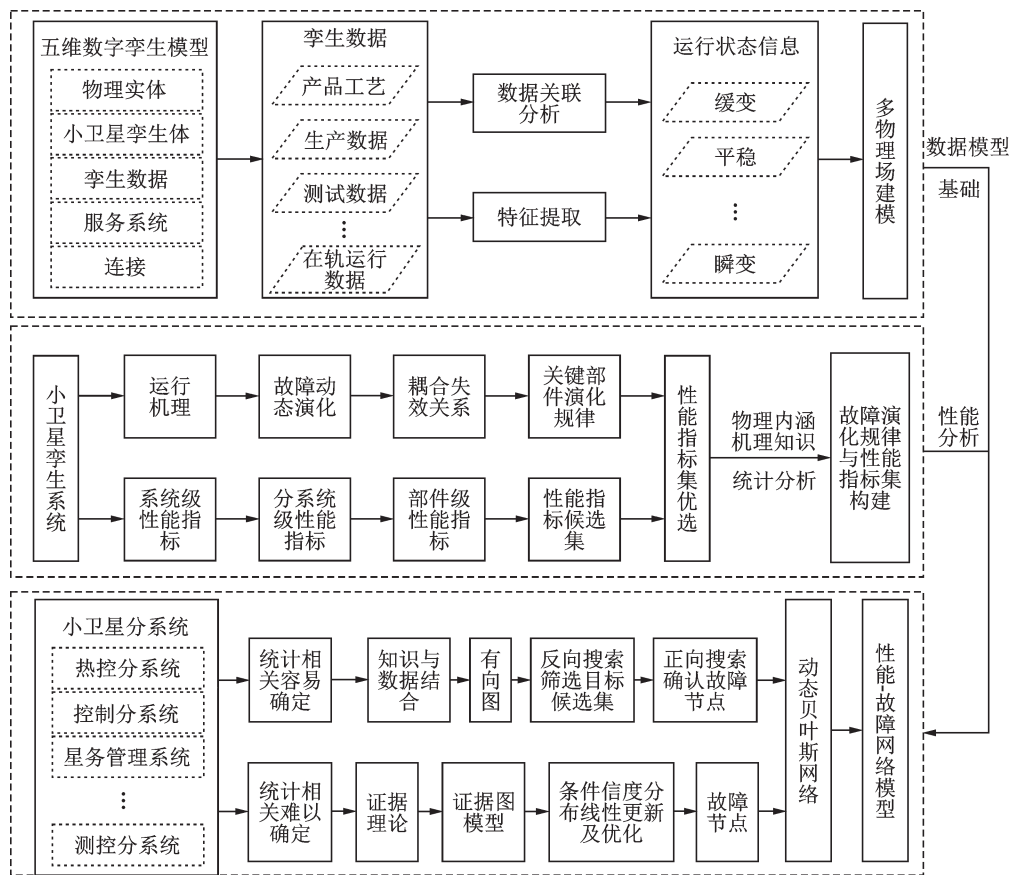


图2 面向小卫星健康预测的数字孪生系统建模研究路线图

Fig.2 Modeling framework of digital twin system for small satellite health prediction

2.2 小卫星全生命周期的数字主线构建

本节的研究思路如图3所示。面向小卫星设计、生产、测试、试验及在轨运行的各个周期,针对各阶段数据流通少、模型融合少、知识关联少的问题,构建面向全生命周期的数字主线技术。考虑小卫星全生命周期数据存在不完全、非平衡和局部缺

失等特性,以运行状态信息、模型机理和孪生数据等先验知识为指导约束,采用软测量、周期同步化和半监督即时学习等技术进行全生命周期数据扩充。利用技术元数据、过程元数据以及业务元数据构建层次化元数据结构模型,结合过程机理模型和在轨运行方式,形成小卫星全生命周期多层面(多

部件-多组件-多系统)的多源异构数据统一描述。协同考虑时间维度上的多尺度嵌套、复合动态性及空间范围内的传递延迟、耦合互联特性,借助机器学习、关联分析等技术进行多维特征提取。基于机器学习与过程先验知识进行多维特征的模式匹配,基于核学习与稀疏表达策略进行特征重构,结合张量分解、图卷积等技术实现多维特征融合。

分析小卫星各阶段模型间蕴含的频次分布、行为模式和规则信息,利用关键时间节点定位、时间同步规整和交互式时间窗选择等时间处理方法,获

得多阶段模型与时间序列相关关系。考虑空间模型的联动映射和层次差异,基于模糊认知图的演变演化推理方法,获取时空联动下模型的演变演化规律,通过聚类、鲁棒学习等方法,实现模型的空间协同匹配。分析模型差异信息和状态变化,运用近似熵描述模型潜在变化趋势,结合系统层级信息,通过深度因果关系图和格兰杰因果分析揭示性能-故障传播网络模型间跨域传递机制,并利用信息熵和关联规则分析并建立系统模型间直接或间接的关联与协同关系。

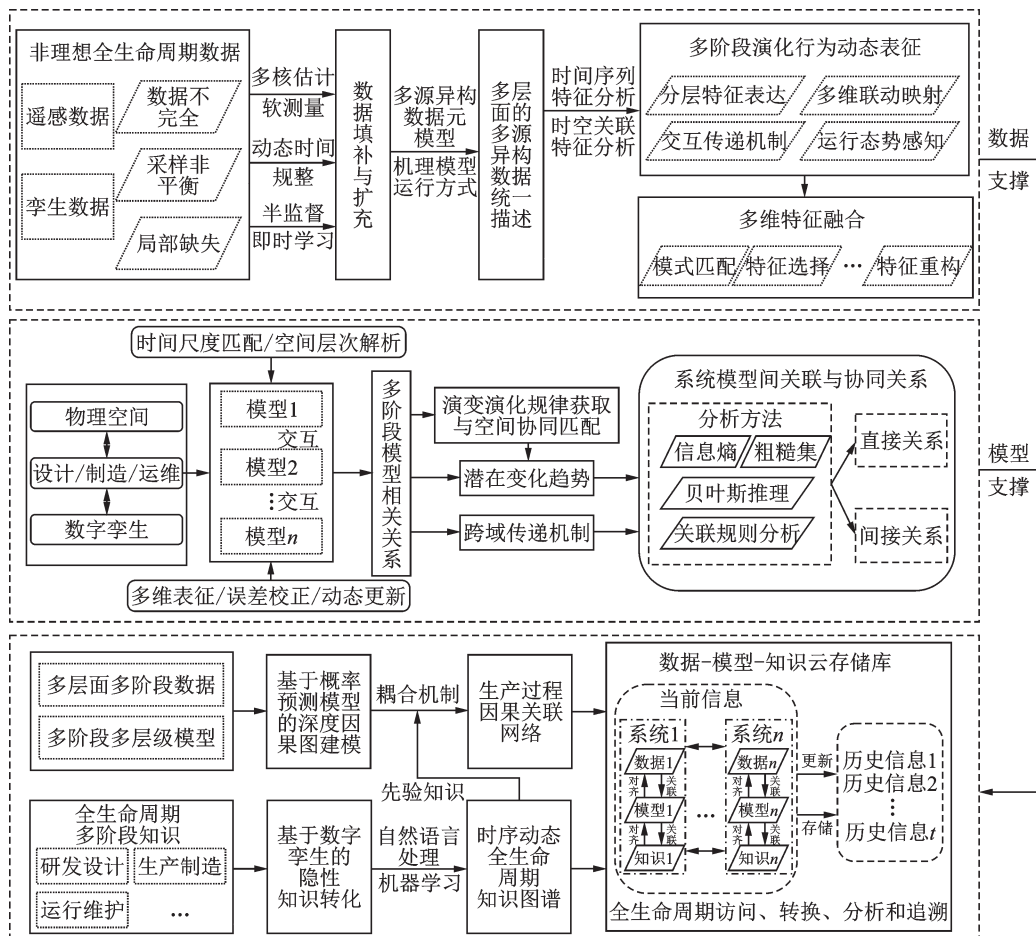


图3 小卫星数字主线构建研究路线图

Fig.3 Small satellite digital mainline framework

针对小卫星运维过程分层跨域要素互联的时空演变特性,利用图论、因果分析、神经网络等方法理清各层级间模型与数据的非线性因果关系,结合深度因果建模方法,构建因果关联网络。考虑实时更新演化的多阶段多源知识,采用基于数字孪生的隐性知识转化方法,构建时序动态的全生命周期知识图谱。基于动态演变的全生命周期知识图谱与生产过程因果关联网络,构造模型-数据-知识协同的小卫星全生命周期数字主线,实现全生命周期各要素的统一和协调,支持全生命周期的数据访问、转换、分析和追溯,为基于数字孪生的小卫星健康预测提供数据、模型和知识层面的支撑。

2.3 基于多源数据融合的小卫星健康监测与智能诊断

小卫星异常征兆具有隐蔽性、易被未知扰动和噪声覆盖的特点,特别是当噪声与微小故障混叠发生时,区分难度更大。“故障-征兆”之间的复杂对应关系,针对系统的不确定性和复杂性,从遥测数据和孪生数据中提取出重要的特征信息,从数据层、特征层和决策层进行信息融合,在此基础上利用多变量分析、主成分分析和聚类分析等方法提取不同征兆下多个传感器所测量的多变量之间的相关关系,进而利用这种相关关系进行异常征兆的识别,并实现对小卫星异常征兆的检测。

利用深度置信网络、循环神经网络等深度神经网络方法,从其测控数据和孪生数据中提取健康状态相关的特征信息,并构建一维健康指标,使用欧氏距离、马氏距离和KL散度等来度量实际值与健康值的偏离程度以构建健康指标监测模型,进行部件级健康度的监测。使用层次分析法分析各个部件、分系统层健康度对系统层健康度的影响大小,对各分系统层的健康度赋予合理的权重,综合计算得到系统层的健康度,最终实现小卫星部件级

与系统级的综合健康度监测。

结合数字主线技术提供的数据知识,分析并揭示故障和故障之间、征兆和征兆之间、故障和征兆之间的关系,建立小卫星故障实时诊断与处置的知识库,结合已建立的性能-故障网络模型,融合故障检测结果和各分系统的状态监测信息,基于故障分析、建模和知识库,通过知识推理,实现故障根源诊断与传播路径识别,从而实现基于性能的多源数据融合的在轨运行故障智能诊断。本节的研究思路如图4所示。

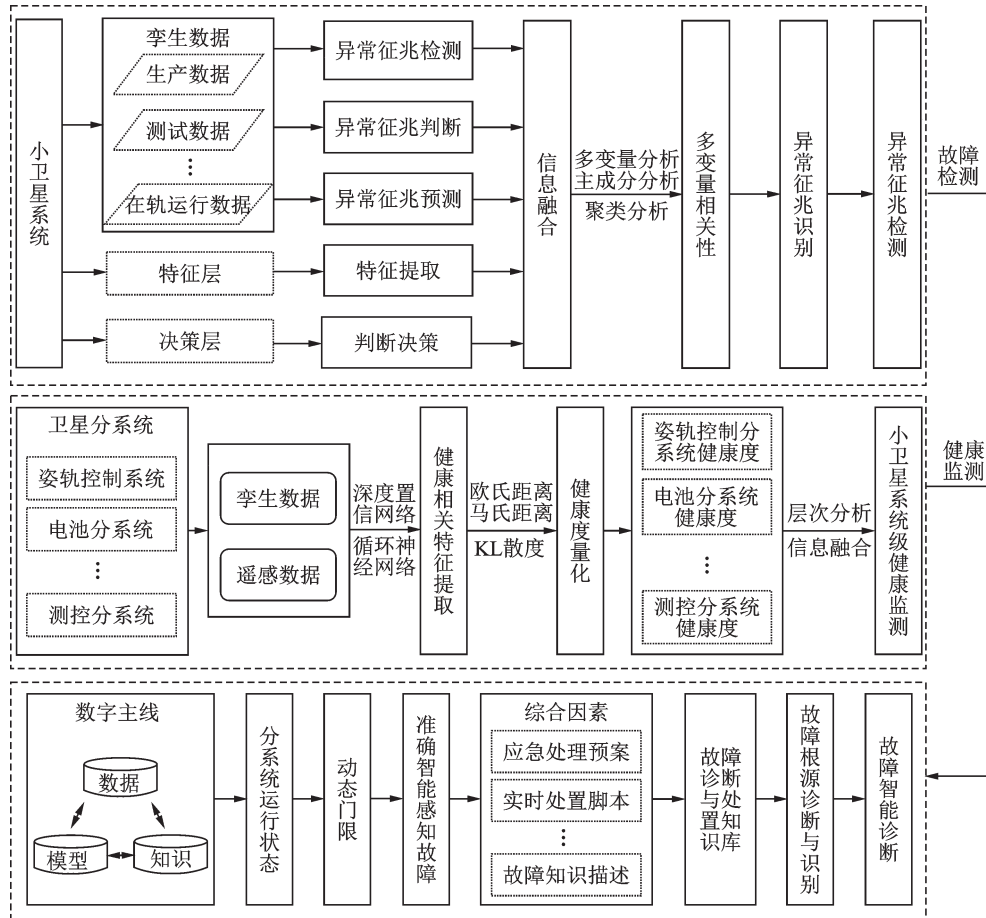


图4 小卫星健康监测与智能诊断研究路线图

Fig.4 Small satellite health monitoring and intelligent diagnosis framework

2.4 复杂环境下小卫星健康评估与剩余寿命预测

影响小卫星寿命的因素较多,复杂的外界环境、自身器件性能的退化都会对小卫星的寿命产生影响。利用采集的实时数据和数字孪生体模拟的孪生数据及小卫星运行系统的机理与先验知识,针对姿控分系统、电源分系统等,采用人工神经网络方法建立和存储典型工作模式下的健康评估网络,同时利用实时数据实时更新健康评估网络的结构和参数,以提高评估结果的准确性。针对部件之间耦合关系复杂的问题,利用广义线性回归等方法对小卫星数据进行回归分析,采用增广最小二乘法、极大似然估计等方法辨识系统中难以依靠机理分析构造的非线性耦合关系(部件

间耦合、多动力并联结构等),进一步采用模块化方法组装系统级模型,构建孪生系统耦合非线性物理模型。基于小卫星设计数据、生产数据、测试数据、在轨数据与孪生数据,采用关联规则、数据聚类 and 决策树等大数据分析,深度挖掘敏感特征与观测状态之间的映射关系,采用距离测度、贝叶斯推断等评估方法,开展基于数据的星上产品系统的健康评估。

针对不同的环境对在轨小卫星带来不同的性能退化模式,基于健康评估结果,采用广义判别分析、核主成分分析等方法从多维运行状态数据和孪生数据中提取反应小卫星性能衰退的综合退化特征。利用最小二乘支持向量机、非齐次隐含半马尔

科夫模型建立单一性能退化模式条件下系统可靠寿命的自适应预测模型。根据多退化模式之间的相互作用机制,获得退化模式之间的依赖关系,建立相依竞争退化模型,进而建立多性能退化模式下的可靠寿命自适应预测模型。

结合小卫星孪生数据、实时遥感监测数据和全生命周期数字主线信息,采用信息熵、相关系数分析等方法研究小卫星中系统级、分系统级和部件级剩余寿命之间的相关性,实现部件-分系统-系统的

剩余寿命关联关系发掘与融合,进而实现层次化小卫星剩余寿命的有效预测。进一步,运用 Treemap、动态散点图等可视化方法,结合先验知识及用户反馈意见,对各类数据可视化表现形式的优选,构建小卫星剩余寿命的可视化方法库,实现剩余寿命的最优化表达,为现场指挥人员、设备操作员及监测人员等非专家用户建立简洁、友好的交互式信息表达机制,实现小卫星剩余寿命的可视化。本节的研究思路如图5所示。

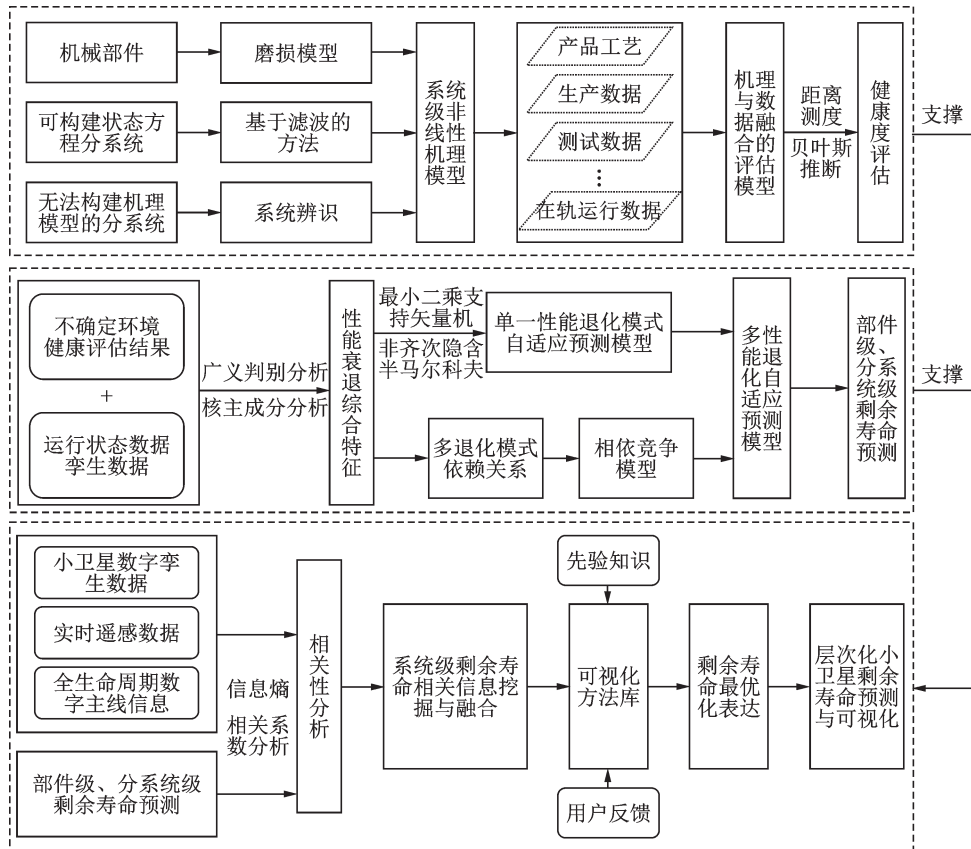


图5 小卫星健康评估与剩余寿命预测研究路线图

Fig.5 Small satellite health assessment and residual life prediction framework

3 结 论

针对小卫星“高可靠、长寿命”的要求,提出了一种基于数字孪生和数字主线技术的全生命周期智能诊断和健康预测框架,以应对小卫星数字化与智能化水平低、系统间信息交互能力弱、流程间模型演化与数据关联能力差等问题。与传统的健康预测方法相比,本文所提出的框架包括基于小卫星演化行为的数字孪生建模、面向小卫星全生命周期的数字主线、基于数字孪生的交互式健康度监测与智能诊断、基于数字孪生的小卫星健康状态在线评估与预测,可以快速、准确地实现小卫星在轨健康预测。

参考文献:

[1] 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 Li, WANG Shuyi. A review on development of intelligent health management technology for spacecraft control systems[J]. Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 525044.

[2] 万峰,邢香园,吴剑锋,等. 基于数字孪生的卫星总装过程管控系统[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 631-641.

WAN Feng, XING Xiangyuan, WU Jianfeng, et al. Assembly process management and control system for satellite based on digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2021, 27(2): 631-641.

[3] TAO Fei, QI Qinglin. Make more digital twins[J]. Nature, 2019, 573 (7775): 490-491.

[4] 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.
- [5] 陈畅宇, 贺文兴, 易旺民, 等. 航天器总装技术状态的数字化管理方法[J]. 航空学报, 2018, 39(S1): 139-147.
CHEN Changyu, HE Wenxing, YI Wangmin, et al. Digital configuration management method for spacecraft assembly[J]. Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica, 2018, 39(S1): 139-147.
- [6] 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 Hongkai, SHAO Haidong, LI Xingqiu. Deep learning theory with application in intelligent fault diagnosis of aircraft[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(7): 27-34.
- [7] 罗荣蒸, 孙波, 张雷, 等. 航天器预测与健康管理技术研究[J]. 航天器工程, 2013, 22(4): 95-102.
LUO Rongzheng, SUN Bo, ZHANG Lei, et al. Analysis of PHM technology for spacecraft[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 22(4): 95-102.
- [8] 彭宇, 刘大同. 数据驱动故障预测和健康管理的综述[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 481-495.
PENG Yu, LIU Datong. Data-driven prognostics and health management: A review of recent advances[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3): 481-495.
- [9] 何世禹. 航天器在轨寿命预测与可靠性评价[J]. 航天器环境工程, 2008(3): 209-211.
HE Shiyu. On-orbit lifetime prediction and reliability evaluation of spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2008(3): 209-211.
- [10] 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 Yan, WU Hongxin, WANG Xiaolei, et al. Survey of fault diagnosis and fault tolerant control technology for spacecraft[J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(3): 221-226.
- [11] 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 Dayi, TU Yuanyuan, FU Fangzhou, et al. Autonomous diagnosis and reconfiguration technology of spacecraft control system[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(12): 1966-1978.
- [12] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex system[C]//Proceedings of Trans-disciplinary Perspectives on Complex Systems. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2017.
- [13] GAO Zhifeng, JIANG Bin, SHI Peng, 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.
- [14] 刘敏. 数据驱动的卫星姿态控制系统微小故障检测与预测方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
LIU Min. Research on data-driven incipient fault detection and prediction methods for satellite attitude control system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [15] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望[J]. 自动化学报, 2019, 45(11): 2001-2031.
YANG Linyao, CHEN Siyuan, WANG Xiao, et al. Digital twins and parallel systems: State of the art, comparisons and prospect[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(11): 2001-2031.
- [16] 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 Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 753-768.
- [17] 孟松鹤, 叶雨玫, 杨强, 等. 数字孪生及其在航空航天中的应用[J]. 航空学报, 2020, 41(9): 6-17.
MENG Songhe, YE Yumei, YANG Qiang. Digital twin and its aerospace applications[J]. Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica, 2020, 41(9): 6-17.
- [18] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.
- [19] 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 Weiran, TAO Fei, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin satellite: Concept, key technologies and applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(4): 565-588.
- [20] 范春雷, 任行敏, 李国富, 等. 基于数字主线和数字孪生技术的生产过程安全预防系统生命周期应用[J]. 河南科技, 2018(26): 40-42.
FAN Chunlei, REN Xingmin, LI Guofu, et al. Application of production process safety precaution system life cycle based on digital thread and digital twin technology[J]. Henan Science and Technology, 2018(26): 40-42.