

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508422

飞控系统健康管理及故障预测技术研究进展*

李博^{1,2} 崔展博^{1,2,3} 王进^{1,2} 王佳伟¹ 唐洪霞^{1,2} 李玉晓¹

(1. 石家庄海山实业发展总公司 石家庄 050208; 2. 河北省航空器检测与修复技术科技重点实验室 石家庄 050208;
3. 航空工业西安飞行自动控制研究所 西安 710076)

摘要:先进飞控系统实现了飞机全时全权限航姿控制,直接决定着飞行品质优劣,也使其成为飞机故障预测与健康管理的(primary object)。由于飞控系统的功能耦合度高、结构交联关系复杂、退化失效模式多样化等特点,导致其故障特征提取难、寿命预测实时性差、健康评估模型验证难等问题。飞控系统故障特征和关系提取是当前飞控系统PHM领域的一项关键技术,从海量飞行数据中筛选出精准表征故障的关键信息,提升故障识别的准确性和效率;剩余寿命(residual useful life, RUL)预测是PHM系统的另一项关键技术,通过装备运维数据预测后期性能走势,达到提前故障预警的目的。在飞控系统PHM技术工程应用中,模型的建立是系统能否实现的关键,系统的实时性和可视化也对模型的更新升级不断提出新要求。因此从飞控系统故障信息多源提取、RUL预测的研究现状、飞控系统PHM工程化研究现状等3个方面展开综述。

关键词:飞控系统;故障关系提取;剩余寿命预测;PHM工程化应用

中图分类号: TP29; TN919 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

Research progress on health management and fault prediction technology of flight control system

Li Bo^{1,2} Cui Zhanbo^{1,2,3} Wang Jin^{1,2} Wang Jiawei¹ Tang Hongxia^{1,2} Li Yuxiao¹

(1. Shijiazhuang Hai Shan Aviation Electronic Technology Company Ltd, Shijiazhuang 050208, China;
2. Key Laboratory of Aircraft Inspection and Repair Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050208, China;
3. AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710076, China)

Abstract: The advanced flight control system realizes the full time and full authority of the aircraft's flying attitude control, which directly determines the flight quality and makes it the primary object of aircraft fault prediction and health management. Due to the high degree of functional coupling, complex structural cross-link relationship, and diversified degradation failure modes of flight control system, it is difficult to extract fault characteristics, poor real-time life prediction, and difficult to verify health assessment model. The extraction of fault characteristics and relationships in flight control systems is a key technology in the current PHM field of flight control systems. By screening out key information that accurately represents faults from massive flight data, the accuracy and efficiency of fault identification can be improved. Remaining life prediction is another key technology of the PHM system. It predicts the later performance trend through equipment operation and maintenance data to achieve the purpose of early fault warning. In the engineering application of PHM technology in the flight control system, the establishment of the model is the key to whether the system can be realized. The real-time performance and visualization of the system also constantly put forward new requirements for the update and upgrade of the model. Therefore, this paper conducts a review from three aspects: multiple extraction of fault information of the flight control system, the research status of RUL prediction, and the research status of PHM engineering of the flight control system.

Keywords: flight control system; fault relationship extraction; residual life prediction; engineering application of PHM

0 引言

随着信息技术的不断发展以及“中国制造 2025”战略目标逐步达成,大数据、人工智能、云计算、物联网等高科技取得了丰硕的创新成果^[1],航空产业进一步迭代更新,飞机的智能化水平、复杂程度越来越高。飞行控制系统(简称飞控系统)的正常运行对于保证飞行安全起到了至关重要的作用^[2],因此这类系统需要具备很高的可靠性^[3]。为了降低飞行过程中的故障率、及时进行故障确认和隔离,需要对飞控系统的状态和故障进行实时的检测和诊断^[4]。另外,故障结果报告可帮助飞行员对机载系统进行重构和任务降级^[5]来避免故障蔓延,保障飞行安全^[6]。随着飞控系统信息化、综合化程度和造价不断提高以及使用环境的日渐严酷,对飞控系统运行的可靠性、维修性、安全性要求越加严格和迫切。而智能故障预测与健康管理技术(prognostics and health management, PHM)为解决该问题提供了有效途径^[7]。

PHM 是指装备能够在使用中自动完成故障检测、预测、隔离和监控,并及时进行故障评价、故障报告和飞机状态管理的功能系统,采用先进微传感器的集成,借助各种算法和智能模型来预测、监控和管理飞行控制系统的运行状态。能够根据已知对象的失效机理、结构特性、参数、环境条件及运行历史,结合飞控系统使用状态,对使用中发生的故障进行检测、隔离、预测和管理控制。飞控系统 PHM,相比与传统监测系统,能够实现全机状态数据的集成,最新的民用飞机具备了初步的健康管理能力,可以提供健康管理代码(health management code, HMC),在维护流程上得到了一定的优化,排故效率有了明显的提升。

国外关于 PHM 已经开展大量关键技术研究 and 系统验证工作,目前英、美等国已进入军民用推广应用阶段^[8]。英国从 20 世纪 90 年代后期开发直升机使用状态管理(health and usage monitoring system, HUMS)系统^[9],用来监控转子轨迹与平衡、发动机性能与完好状态、齿轮箱状态等参数,跟踪疲劳寿命,提供维修趋势信息,并已在美、加等国的 AH-64、“虎”等直升机使用^[10]。2015 年以来,在“阵风”、C-130“大力神”等固定翼飞行器上也应用了综合 HUMS 系统^[11]。美国早在 20 世纪 90 年代就开始研究 F-35 飞机的故障预测与健康管理技术^[12],并在飞机的研制过程中进行了丰富的试验,经过多年积累,积攒了大量的试验数据、飞行数据和维护数据,通过对数据的充分挖掘利用,大大促进了 PHM 技术的发展和成熟,相比于第 3 代飞机,F-35 飞机在 PHM 技术的支持下,实现了在任务能力、可靠性、安全性和保障性方面的大幅提高,其任务可靠性提高 50% 以上,出动架次率提高 25%

以上,故障复现率大幅提高,在很大程度上降低了使用保障成本,实现了寿命延长^[13]。美国智能自动化公司研发的超级 HUMS 被引入美陆军 RQ-7A/B“阴影”200 战术无人机系统^[14]。

本文从飞控系统的组成及其故障推理难点问题入手,探究了故障信息提取、剩余寿命预测技术常见方法的特点,并就工程应用的实时化、模型化和可视化要求对应用现状进行了论述分析。最后,总结并展望了人工智能技术支持下的飞控系统 PHM 发展趋势。为后续机载系统海量数据的挖掘分析、维修决策提供技术支撑。

1 飞控系统 PHM 概述

飞控系统一般由电传飞行控制分系统、机械操纵分系统、高升力控制分系统、自动飞行控制分系统组成,如图 1 所示。

飞控系统能够实现飞机的滚转、俯仰、偏航控制,并提供满意的操稳品质。此外,为保证其可用性所需的维护成本也越来越高,如何减少其有效寿命周期内的维修保障费用也显得尤为重要。飞控系统领域知识具有实体和关系较复杂、实体的具体界定难、飞控系统 PHM 目标识别繁杂、飞控系统实体和关系抽取涉及机上各系统交联、耦合度高等显著特点。另外,飞控系统 PHM 领域无公开成熟稳定的维修记录数据集,而可供训练和验证用的记录仅可通过所在维修基地数据库中获得,且数据量较少。这些因素对飞控系统的故障诊断推理带来了极大的挑战。飞控系统故障特征和关系提取是当前飞控系统 PHM 领域的关键技术,利用自然语义分析技术快速审查数千篇故障分析报告并自动提取故障信息,可以为飞控系统 PHM 提供辅助决策,进而为精准航空维修提供重要依据。然而飞控系统实际服役过程中引发的故障往往为多种模式复杂叠加,导致其故障信息提取难度大。

飞控系统 PHM 技术的核心功能是智能故障诊断和剩余寿命预测,在维修保障方面^[15],体现了从被动维修到主动维修的转变过程,对于系统的安全、可靠运行发挥了重要作用^[16]。当前,国内外对 PHM 方法进行了大量研究,提出了基于失效物理模型(physics of failure, Pof)、统计可靠性和数据驱动等不同的 PHM 方法^[17]。Pof 模型是在深入剖析系统结构、环境应力、材料特性以及失效机理的基础上,建立系统或设备的性能退化模型,从而实现剩余寿命(remaining useful life, RUL)预测^[18]。但是信息技术和工业制造技术的快速发展,导致机载设备的功能结构耦合愈发复杂^[19],难以建立精确的 Pof 模型。基于统计可靠性的方法,采用大样本条件下的失效时间数据^[20],建立机载设备的可靠性评估模型。但是对于高可靠、长寿命、小样本的机载设备^[21],一方面,不具备大量

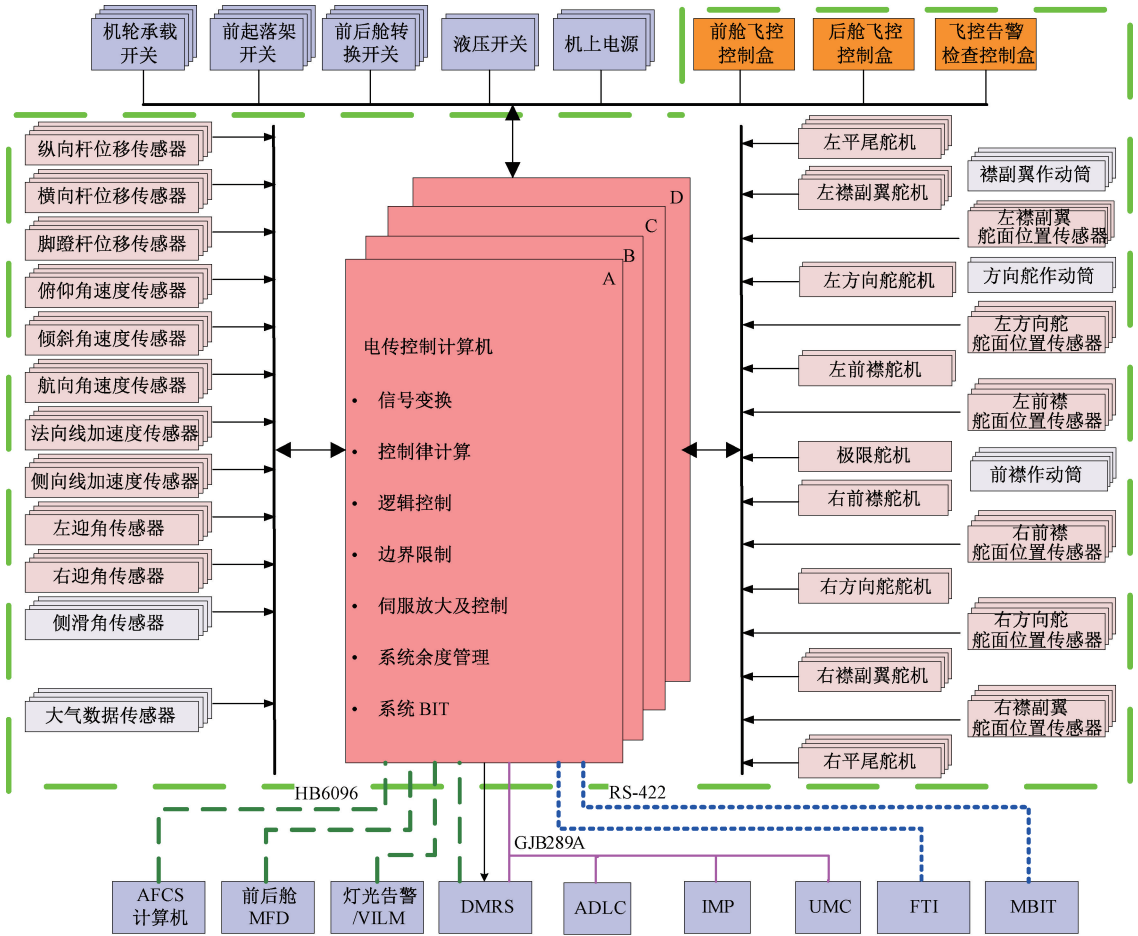


图1 飞控系统基本构成

Fig. 1 Basic composition diagram of the flight control system

的失效时间数据;另一方面,仅仅依靠失效时间数据,不考虑机载设备使用环境和负载的动态变化等不确定性因素对机载设备性能状态的影响^[22],不能全面有效地评估机载设备的健康状态。基于数据驱动的方法,利用系统的状态监测数据和历史性能数据,结合智能算法拟合性能退化趋势^[23],实现智能故障诊断和 RUL 预测,在复杂机载系统的健康监测、智能故障诊断和 RUL 预测方面具有较大的优势^[24]。

2 飞控系统 PHM 关键技术研究现状

2.1 故障信息多源提取技术

在飞控系统 PHM 领域中,事件通常指发生在特定时间点或时间段、在特定地域范围内由一个或多个参与者执行的动作或状态改变。同一个类型的故障事件中不同的要素,代表不同的知识。事件抽取是获取事件要素的主要任务^[25],给定一个飞控系统故障事件的描述文本,

故障事件抽取应该预测出带有特定事件类型的触发词以及具有指定决策的事件要素。事件抽取旨在发现具有特定类型及其参数的事件触发器^[26],一般分为两个步骤。1)对飞控故障事件的发现和分类;2)故障事件要素的抽取。

飞控系统的全寿命周期多源异构数据主要包括内外场维护历史数据、试验数据以及实时运行数据。其中,历史数据主要是指飞控系统的故障和维护数据,使用环境信息数据,状态参数的历史记录数据。历史数据主要通过从防护型综合记录器和维护数据记录器下载获得,还有部分状态和故障数据通过空地传输获得,地面故障数据以及修理的维护数据通过信息系统获得^[27]。试验数据主要是指设备在地面试验中采集的数据,以及在试飞过程中加装测试设备获取的数据。实时运行数据表示设备运行过程中实时监测的数据,这些数据经过记录后也成为历史数据的一部分。飞控系统故障交联耦合,数据关系复杂,部分典型故障模式如表 1 所示。

表1 伺服作动器典型故障模式

Table 1 Typical failure modes of servo actuators

典型故障模式	故障数据组数	置信度/%
伺服阀阀偏	120	80
零偏电流异常	120	100
余度一致性异常	120	80
MCV 线位移传感器	120	100
跟踪精度超差	120	80
主控阀零偏超差	120	80
作动筒零偏超差	120	80
FD1 虚警	120	80
FD2 虚警	120	70
系统液压 I 异常	120	90
系统液压 II 异常	120	90

飞控系统故障关系提取的任务是预测实体对之间的语义关系,利用输入句子的依赖解析的模型,捕获仅从表面形式就模糊不清的长期句法关系^[28]。首先建立基于递归矩阵向量空间的语义关系提取方法,使用有效的图卷积操作对输入句子的依赖结构进行编码,然后提取中心实体,进行稳健的关系预测,同时应用一种新的以路径为中心的修剪技术来重新从树中移动不相关的信息,最大限度地保留相关内容。利用依赖信息的一种常见方法是沿着解析树或实体的最低共同父节点下方的子树执行自下而上或自上而下的计算^[29],就是将解析树缩减为实体之间的最短依赖路径。

多模态信息通常作为辅助信息来丰富其他实体的信息,在对实体之间的推理关系进行建模之前,需要一种直接交互的方式,将多模态信息显式地融合到其对应的实体中。基于模式匹配的方法在特定领域性能较好便于理解和后续应用,但对于语言领域和文档形式都有不同程度的依赖,覆盖度和可移植性较差^[30],模式匹配方法中模板的准确性是影响整个方法性能的重要要素,主要特点是高准确率和低召回率,不同于模式匹配的方法,机器学习的方法建立在统计模型的基础上,统计模型通常将事件建模为多个分类问题^[31]。因此,该方法侧重于特征和分类器的选择,根据所使用信息的不同,可以根据特征、结构和神经网络分为3种主要方法。基于特征的方法^[32]侧重于如何提取和整合可区分的特征,如词性、实体类型、依赖树等,从而生成描述事实实例的局部和全局特征,作为特征向量输入分类器。传统的基于特征的二元关系提取方法,需要依靠人工设计的特征进行模型训练,并经常整合不同的证据来源,如实体序列和语法上下文。基于结构的方法设计了各种子序列或树内核来捕获结构化信息。基于神经网络的模型通过自动学习强大的特征表示来提高技术水平,将实体嵌入作为输入并生成上下文实体表示,并利用关系分类器进行最终预测。

海量的飞控系统状态参数中,存在着大量的不完整

(有缺失值)、不一致、有异常的数据,现有的基于数据驱动的方法在很大程度上忽略了多模态信息,例如,飞控系统速率陀螺安装图像和大量内外场维护记录文本数据。这些视觉或文本特征将在飞控系统故障关联提取中发挥重要作用^[33]。在飞机飞行之前,地勤维护人员开展定检和放飞前检查并翻阅一些维修记录。在进行排故时,通常会首先查阅履历文件、修理记录、维护点检工作卡以及以往的拆卸记录和排故记录,例如换件记录和故障原因分析。在飞控系统故障信息多尺度关系提取中,多模态知识图将视觉或文本信息等状态参数引入飞控系统PHM,将状态参数视为飞控系统故障实体或实体的属性。关系提取的任务是预测实体对之间的语义关系,之前探索了使用卷积深度神经网络(deep neural networks, DNN)为自然语言处理(natural language processing, NLP)提取特征的想法^[34],在词性标注、分块、命名实体识别和语义角色标签的背景下,所有任务都被视为顺序标注问题,其中输入句子中的每个实体都被赋予一个标签。然而,任务“关系提取”可以被认为是一个多类分类问题,这会形成不同的目标函数。此外,关系提取被定义为将关系标签分配给成对的词^[35]。关系提取涉及辨别句子中两个实体之间是否存在关系(通常分别称为主语和宾语)。成功的关系提取是需要对非结构化文本进行大规模关系理解的应用程序的基石。

2.2 剩余寿命预测技术

飞控系统对飞机的飞行姿态、运动轨迹及飞行安全起决定性作用^[36],因其是机-电-液混合系统,作动器伺服控制系统由于组成复杂、对数字计算机和模拟备份计算机的指令进行跟随,所面临的工况多变,以及所处的工作环境恶劣,模型在线监控,以往的飞控系统故障诊断主要依靠机内自检测来完成,自动切除故障及机内自检测^[37],其伺服控制系统出现故障的概率较大。内外场故障率高居不下^[38],此类检测的虚警率较高,且多数偶发故障难以复现,给飞控系统PHM业务开展提出新挑战。因此对其进行状态监控和剩余寿命预测是保障飞行安全的重要手段^[39]。

作为PHM的关键技术,RUL预测可以为维护和维修提供有价值的信息,其定义为“从当前时间到使用寿命结束的长度”^[40]。杨鹏^[41]论述了多故障、多层次、多回路等复杂情况下装备的诊断策略优化设计方法。现阶段对于性能退化建模方法的分类并不统一。尤明懿^[42]介绍了回归模型、Wiener过程、Gamma过程、Markov链、时间序列、人工智能、以及相似性的建模方法;Si等^[43]提出了基于直接监测数据与间接监测数据的退化建模方法。随着工业技术的发展,装备的不确定性在增加,其物理退化失效过程难以掌握。特别对于复杂系统,运用失效物理建立模型非常困难;对于受多种应力共同作用的装备,

即使掌握了失效机理,其失效物理模型也难以准确导出^[44]。人工智能方法能拟合出性能退化数据的趋势,适合对各种退化轨迹的模型进行建模,特别适合对非线性退化过程进行分析,但人工智能方法由于需要训练样本,对样本量要求较高^[45]。

一般来说,RUL预测方法可以分为两类,即基于物理的方法和数据驱动的方法。基于物理的方法由于参考了研究目标的工作原理,可以得到相对准确的预测结果^[46],但是,建立复杂系统的模型是很困难的。而数据驱动方法依赖于收集到的被监控系统的状态数据,随着传感器和工业互联网技术的发展,越来越多的条件数据可用。此外,加速寿命试验还有助于提供全生命周期的工况。多种数据驱动方法可用于实现RUL预测^[47]。例如,统计建模可以提供健康状况的两个阶段,包括早期缺陷和RUL预测^[48]。利用贝叶斯推理和马尔可夫链蒙特卡罗来计算可用于实现RUL预测的概率密度函数^[49]。基于滤波器的方法已广泛应用于实现RUL预测。原始传感器数据的选择直接影响RUL预测结果。为了将适当的传感数据用于数据驱动方法,熵及其变体可用于测量传感器数据中包含的有用信息^[50]。这样,可以在一定程度上解决数据驱动方法的数据依赖问题(即利用的数据对预测结果的影响)。机器学习是数据驱动方法领域的一个重要分支。例如,支持向量回归(support vector regression, SVR)可以用作RUL预测的基本方法,通过关键特征提取和异常方法,实现设备的准确RUL预测,使提出的方法具有通用性,如图2所示,阴影区域为目标预测精度。所提出的算法对此测试用例的预测范围约为50个周期,并在设备剩余25%以内准确预测RUL^[51]。支持向量机的分类和回归特性可用于实现实时RUL预测^[52],如图3所示,针对运行过程中存在变工况的系统/设备,在相似性框架下提出了一种区分工况的剩余使用寿命方法,建立针对特定工况的线性回归退化模型,区分测试样本在每个运行周期的工况,分别计算测试样本健康指数,采用候选集加权方式得到测试样本的RUL,预测准确率和运算效率上有较大提升。这些传统方法已被广泛研究以帮助改进RUL预测结果。

机器学习领域的人工智能(artificial intelligence, AI)方法在实现RUL预测方面备受关注。例如,提出了一种基于受限玻尔兹曼机和长短期记忆(long short-time memory, LSTM)的半监督深度学习方法来实现在涡扇发动机退化的RUL预测^[53]。通过卷积神经网络提取多尺度特征,有望增强RUL预测结果。冉剑等^[54]提出了一种新的循环卷积神经网络来解决不同退化状态的时间依赖性和RUL预测结果的不确定性估计^[55]。Zhao等^[56]提出了一种用于故障识别和RUL预测的联合损失卷积神经网络,其优点是降低了过拟合风险和计算成本,提取的退化

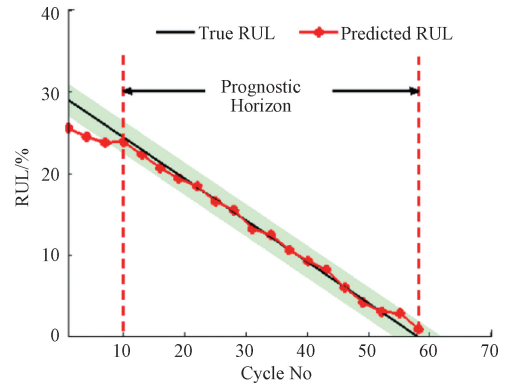


图2 支持向量回归方法的准确预测范围^[51]

Fig. 2 The accurate prediction range of support vector regression method^[51]

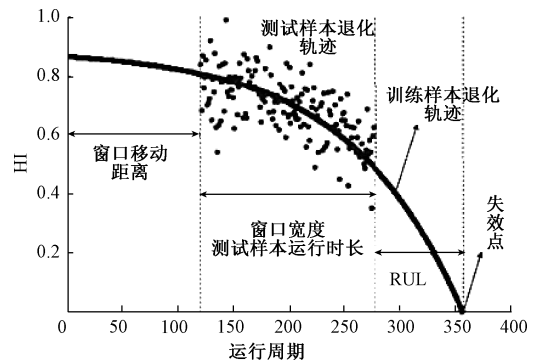


图3 特定工况的线性回归RUL预测过程^[52]

Fig. 3 Linear regression RUL prediction process for specific operating conditions^[52]

能量指标和原始传感数据之间的隐藏模式由深度卷积神经网络识别,用于实现RUL预测。

从相关研究来看,比较流行的ChatGPT等大模型训练模型,大的研究方向集中在数学模型、随机过程、统计模型、机器学习等模型的应用与创新,一系列算法及其变体例如受限玻尔兹曼机、循环神经网络、长短周期记忆网络、生成对抗网络等,为寿命预测提供了众多实现途径^[57]。有学者在此基础上开展模型优化设计,采用基于形态波动一致性偏移距离的方法,是寿命预测精度得到有效提升^[58]。从信息获取的角度来看,数据驱动方法是从装备历史数据中获取相关经验知识,模型的预测能力与数据的完备程度紧密相关。然而,在实际服役条件下,训练样本匮乏,其中蕴含的飞行器信息知识有限,预测模型难以达到预期效果。同时,在试验条件下能够获得较为完备的飞行器退化数据,但由于与实际服役环境下存在差异,在应用上存在不适配的问题。如何有效开展模型迁移,是制约预测模型实际应用的难题。

一种双任务深度LSTM用于同时实现退化评估和

RUL 预测。周青研究了如何利用操作数据来增强双向 LSTM^[59] 的 RUL 预测结果。这些基于人工智能的方法可以有效挖掘目标原始传感数据中包含的隐藏特征,有助于增强 RUL 预测结果。虽然基于 AI 的方法可以实现相对较好的 RUL 预测,但它们在很大程度上依赖于大量的训练数据。对于 APU 的 RUL 预测,最重要的性能参数是排气温度。只有一维数据可能无法达到满意的预测。为了解决这个问题,马超提出了一种基于 LSTM 和 Wiener 过程的混合方法。如果目标可以用维纳过程描述,它的物理特性可以给 RUL 预测结果带来积极的影响^[60]。由于不同的操作和条件而彼此不同,Bott 等^[61]设计了一种基于维纳过程并考虑单元间可变性的 RUL 预测方法,多相退化系统的问题由基于两相维纳过程的模型框架解决。通过传感器数据、维纳过程和神经网络相混合的方法也可实现 RUL 预测。利用布朗运动的自适应维纳过程模型实现了对恶化产品的 RUL 预测^[62]。这些基于混合方法的 RUL 预测研究确实提供了有价值的参考。

3 PHM 工程应用现状

3.1 实时化研究现状

在 PHM 系统中,模型的在线/实时使用是系统能否实现的关键,同时,模型在平台上的部署应用是 PHM 技术落地的关键环节与技术难题。

PHM 平台通常采用中央处理器(central processing unit, CPU)或微控制器等计算架构来实现故障诊断、寿命预测和健康管理等功能。其在系统实时性和 PHM 复杂算法应用方面的功能极为重要。亟需开发具备实时计算和算法加速能力的低功耗、高性能、体积小的 PHM 功能开发平台^[63]。

国外在 PHM 功能平台发展起步较早,Guo 等^[64]设计了一种通过搭建联合 CPU+GPU 的架构,通过借助 CPU 用于执行串行事务、图形处理器(graphics processing unit, GPU)执行并行任务,将性能提升了 16 倍。对 GPU 全局存储器在处理大输入问题方面的不足,Wu 等^[65]在 CPU+GPU 异构架构的基础上开发了快速傅里叶变换(FFT)泊松求解器,该系统的运算能力超过 40 GFLOPS,利用 PCI-E 进行数据传输带宽能达到 5 GB/s。为解决现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)并行处理机器学习算法时的编程困难问题,学者们基于 CPU + FPGA 的(FPGA-based mapreduce framework, FPMR)异构架构基础开展研究。Shan 等^[66]通过采用 MapReduce 模型将处理速度提升了约 32 倍。Jha 等^[67]搭建了每个计算节点包含两个双核 AMD Opteron CPU,4 个 NVIDIA Quadro FX 5600 GPU 卡和 1 个 Nallatech H101

FPGA 加速卡的计算结构集群。Que 等^[68]搭建了异构处理集群,并将其命名为 Axel,该异构处理集群内部通过 PCI 总线将 16 个节点高速互联实现整体性能从 4.4 倍提升至约 23 倍。Axel 异构处理集群的每个节点包含 1 个 AMD Phenom 四核 CPU、1 个 NVIDIA Tesla C1060 卡和 1 个 ADM-XRC-5T2 FPGA 卡。针对无线电算法实时处理的需求,Alawieh 等^[69]通过搭建异构集群平台,巧妙的在性能、成本和灵活性之间取得了平衡。

经过多年的努力,国内也取得了一定的进展。为实现底层硬件驱动程序及相应的数据传输程序设计,张振环等^[70]基于双数字信号处理器(digital signal processor, DSP)+FPGA 架构开发了并行互联可重构系统,完成了数字图像的高效传输;由于图像处理系统在高实时性、小体积、大计算量等方面的显著优势。高菲等^[71]通过将 DSP 作为主处理器、FPGA 作为辅助器为架构,开发了异构图像处理系统,通过将算法进行划分并分别交给 DSP 和 FPGA 处理,有效满足了系统的功能需求。

针对深度学习平台资源丰富和灵活性强等需求,周松江^[72]基于 CPU 与多 FPGA 架构设计了深度学习异构平台,其中 CPU 用于数据流传输控制,FPGA 用于实现深度学习算法的核心计算,在功耗增加 0.6 倍情况下实现了 15 倍的加速效果。赖睿等^[73]采用 CPU+FPGA 异构系统对图像处理中的分片双边滤波算法和导向滤波算法进行了异构加速,其内核程序设计通过借助开放运算语言(open computing language, OpenCL)完成,该异构系统在单位功耗下的速度约为 CPU 的 9 倍,GPU 的 1.8 倍,加速效果显著。黄兴贵等^[74]针对计算密集的波动方程差分算法,采用 CPUs+GPU 异构计算架构对其实现高性能计算,性能提升为约为纯 CPUs 约 1.6 倍,纯 GPUs 的约 1.3 倍。为提升稀疏矩阵向量乘的计算效率,李安民等^[75]通过结合 CPU 通用计算和 GPU 并行计算的优势,基于 CPU+GPU 架构开发的异构系统相比于 GPU 实现了约 70%的加速效果。

当前全球超级计算机排行榜的前十名中有约七名采用了异构架构,可见异构架构在超算系统构建层面被广泛接受,且成为了构建顶级超算系统的大势所趋。PHM 平台通常采用 CPU 或微控制器等计算架构,实现故障诊断、寿命预测和健康管理等功能,然而在 PHM 开发平台的计算架构分析与设计方面开发还不充分,后续还需着重开展系统的实时性和 PHM 复杂算法应用适用性方面的研究,以满足 PHM 系统实际的应用场景。

3.2 模型化研究现状

基于模型的系统工程(model based systems engineering, MBSE)是新一轮工业革命的关键技术之一^[76-77],2014 年以来,中航工业、中国商用飞机有限责任公司(简称中国商飞)等企业开始体系化推进 MBSE^[9]

“通过导入 MBSE 方法论,促进航空产品开发模式转型升级”。2016年,航空工业明确提出^[78]“在飞行器、发动机和系统领域全面推广基于模型的系统工程理论、方法、知识体系和信息化平台建设,建立以 V 形模型和系统流程集为指导的产品开发体系。”以波音 787 和 F-35 为代表的大型飞机项目具有高度复杂性和高风险^[79],即使过程中严格的遵循系统工程(systems engineering, SE)进行管理^[80],却仍然频繁出现交付延迟和成本超支等问题,由此引发了业界的深刻反思^[81]。由于研制过程基于文档的原因,加之直到系统数字仿真和模拟实验时才进行综合测试^[82],所以导致信息孤岛、系统不可测试、开发效率不高等问题^[83]。

鲜有结合飞机的设计过程讨论基于 MBSE 的飞控系统 PHM 设计等问题^[84],而结合飞机的设计研发过程开展基于 MBSE 的飞机系统设计正是飞机研发正向设计应走的途径^[85]。景博等^[86]基于 PHM 系统功能、结构、数据 3 个维度设计准则要求,结合系统工程 V&V 模型,提出了 PHM 系统设计开发流程如图 4 所示,并在此基础上应用 MBSE 方法优化了设计开发流程,通过模型的手段建立设计阶段与实现阶段的联系,如图 5 所示,有效缩短了系统迭代周期,降低了系统设计成本。因此,针对飞机,关注复杂的飞控系统 PHM,探索基于 MBSE 的飞控系统 PHM 设计和仿真方案。采用 MBSE 方法进行飞控系统 PHM 设计,实现了 MBSE 落地,不仅成功实践了 MBSE 方法和流程,而且找到了从系统需求模型到飞控系统 PHM 软件设计模型的转换途径,基于自主飞控系统 PHM 实现了 MBSE 到嵌入式软件开发(embedded software, ESW)的无缝集成^[87],对系统设计进行仿真验证。MBSE 在航空航天领域的应用现状和航空航天领域的项目以系统庞大^[88]、安全性要求高、研究周期长著称。为了实现这些系统的设计和统一管理,该领域引入了 MBSE 方法^[89]。为了解决传统基于文本设计的子系统独立、数据难以跟踪、需求难以更改等缺点。“基于模型的系统工程是通过形式化的建模手段,从概念设计阶段就能够支持系统需求、设计、分析、验证和确认等活动,并持续贯穿整个开发过程和后续的生命周期阶段”^[90]。

随着 MBSE 在国外的迅速发展,国内的研究也是一个热门的发展趋势。为了跟上系统工程方法的发展趋势,有必要对 MBSE 方法进行进一步的研究,以飞控系统 PHM 为对象,将 MBSE 在航空关键系统进行研究推广。

3.3 可视化研究现状

多模式飞控系统 PHM 知识图谱是飞机计算系统的重要组成部分,在搜索、结构化数据管理、推荐、问答和信息检索中都有应用。然而,知识库经常遭受不完整、噪音以及不确定性下的低效推理的困扰。为了解决这些问

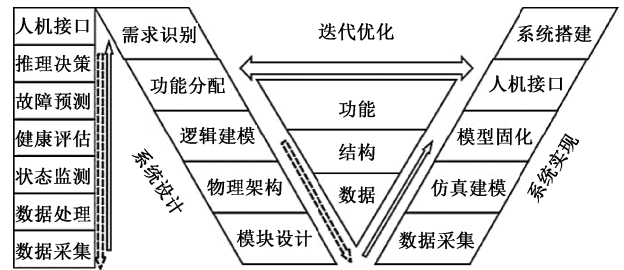


图 4 PHM 系统设计开发流程^[86]

Fig. 4 Design and development process of PHM system^[86]

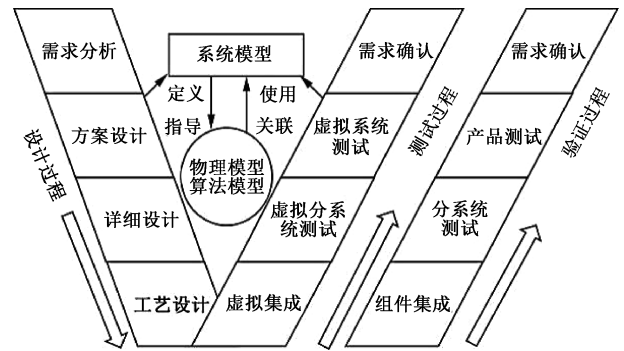


图 5 基于 MBSE 的军用飞机 PHM 系统设计^[86]

Fig. 5 Design of PHM system for military aircraft based on MBSE^[86]

题,学习关系知识表示一直是积极研究的关注点^[91]。这些方法表示关系三元组,由主题实体、关系和对象实体组成,通过从观察中学习每个实体和关系的固定、低维表示,编码不确定性并准确地推断缺失的事实。主题和对象实体来自知识库中出现的一组固定的、可枚举的实体。

飞控系统 PHM 技术,正迎合了面向飞控系统维修技术体系的安全保障需求,它以其强大的理解和解释优势,为飞控系统维修技术体系提供了一种新的解决方案。目前飞控系统维修已经搭建了大数据服务平台,为飞控系统维修决策应用提供了重要的支撑基础。有学者对飞控系统维修安全知识图谱进行了初步的探索和尝试。通过连接独立实体,弥补了传统方法难以分析和挖掘复杂多模态数据的缺陷,但缺乏对关键部件维修故障之间的强逻辑关联分析^[92-93]。为了进一步挖掘安全大数据的隐藏价值,针对飞机安全与内外部现场故障数据之间的强逻辑关系,引入事件图的技术手段,将知识图与事件图进行整合,提出了基于知识图谱的飞机关键部件维修工艺方案建设^[94]。以复杂的故障数据和事件图谱为技术基础,从安全事件出发解读海量的飞控系统维修数据,运用自然语言处理技术,提供事件发现、事件分析和事件分类等能力。

4 结 论

飞控系统 PHM 体系结构是飞控系统 PHM 系统设计及功能实现的依据和标准,其通用性和工程化是制约 PHM 技术发展的核心问题之一。目前依托人工智能技术,充分利用海量数据,获取了状态特征参数或退化趋势,针对机载系统海量数据的研究需求,具备了海量数据管理和分析处理能力。但是,如何解决飞控系统的健康管理设计的需求,以及快速实现 PHM 技术在不同复杂系统上的应用是当前面临的难题。为保障航空装备使用安全、减少偶发故障、提高维护效能,需要设计更为科学的飞控系统 PHM,打破信息流之间的约束,集合内外场使用情况、故障分析报告、研发、制造、维修全链条数据可更加高效的对伺服作动器当下和未来进行健康状态评估,最终实现飞控系统的智能化健康管理。

参考文献

- [1] 王喜文. 中国制造 2025 解读:从工业大国到工业强国[M]. 北京:机械工业出版社,2015.
WANG X W. Demystifying Made in China 2015: From the Large Industrial Country to the Powerful Industrial Country[M]. Beijing: Machinery Industry Press,2015.
- [2] 马波,刘慧宇,陈银超,等. 预测与健康管理工作在飞行器飞控系统中的应用研究[J]. 航空兵器,2020,27(6):91-96.
MA B, LIU H Y, CHEN Y CH, et al. Research on the application of prediction and health management technology in aircraft flight control system [J]. Ordnance Industry,2020,27(6):91-96.
- [3] QU X Y, GUO T F. Research on flight control system reliability distribution method based on multi-objective optimization [J]. Techniques of Automation and Applications, 2016,35 (8): 18-22.
- [4] 年夫顺. 关于故障预测与健康管理工作技术的几点认识[J]. 仪器仪表学报, 2018,39(8): 1-14.
NIAN F SH. Some understandings on fault prediction and health management technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2018,39(8): 1-14.
- [5] MAEIK A D, BUTLERIS R. MBSEsec: Model-based systems engineering method for creating secure systems[J]. Applied Sciences, 2020, 10(7):2574.
- [6] PECHT M, JAAI R. A prognostics and health management roadmap for information and electronics-rich systems[J]. Microelectronics Reliability, 2010, 50(3): 317-323.
- [7] 陈志强,陈旭东, VALENTE DE OLIVIRA J,等. 深度学习在设备故障预测与健康管理工作中的应用[J]. 仪器仪表学报,2019,40(9):206-226.
CHEN ZH Q, CHEN X D, VALENTE DE OLIVIRA J, et al. Application of deep learning in equipment fault prediction and health management [J]. Journal of Instrumentation, 2019, 40 (9): 206-226.
- [8] 苏明,张斌. 基于外场数据的飞机 PHM 系统测试性评估方法[J]. 电子技术与软件工程,2017,6(16): 186-187.
SU M, ZHANG B. Testability evaluation method of aircraft PHM system based on field data [J] Electronic Technology and Software Engineering, 2017, 6 (16): 186-187.
- [9] 张宝珍,王萍,尤晨宇. 国外飞机预测与健康管理工作技术发展计划综述[J]. 计算机测量与控制,2016,24(6): 1-7.
ZHANG B ZH, WANG P, YOU CH Y. Review of the development plan of foreign aircraft prediction and health management technology [J]. Computer Measurement & Control,2016,24(6): 1-7.
- [10] VAYALALI P, MCKAY M, KRISHNAMURTHI J, et al. Horizontal stabilator utilization for post swashplate failure operation on a UH-60 black hawk helicopter[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2020, 65(2):1-13.
- [11] 金小强,李新民,孙伟. 直升机健康状态与使用监测系统(HUMS)发展综述[C]. 第三十届全国直升机年会论文集. 北京:中国航空学会,2014:81-86.
JIN X Q, LI X M, SUN W. Review of the development of helicopter health status and usage monitoring system (HUMS) [C]. Proceedings of the 30th National Helicopter Conference Beijing; Chinese Aeronautical Society, 2014:81-86.
- [12] HAN D, YU J, GONG M, et al. A remaining useful life prediction approach based on low-frequency current data for bearings in spacecraft [J]. IEEE Sensors Journal, 2021,17(21):18978-18989.
- [13] 秦荀,李三军. F-35 战斗机的状态预测与健康管理工作系统[J]. 航空维修与工程,2017(4):33-37.
QIN X, LI S J. State prediction and health management system of F-35 fighter aircraft [J]. Aviation Maintenance and Engineering,2017(4):33-37.
- [14] 柯林. HUMS 在美军直升机群的使用[J]. 世界直升机信息, 2002(3):28-29.
KE L. The use of HUMS in the US military helicopter group [J]. World Helicopter Information, 2002 (3): 28-29.
- [15] 陈宗基,魏金钟,王英勋,等. 无人机自主控制等级及其系统结构研究[J]. 航空学报,2011,32(6): 1075-1083.

- CHEN Z J, WEI J ZH, WANG Y X, et al. Research on the autonomous control level of unmanned aerial vehicles and its system structure [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(6): 1075-1083.
- [16] 纪泽源, 许晓凡, 孙伟, 等. 融合多传感器的飞行器电缆网状态在线监测系统[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(3): 77-85.
- JI Z Y, XU X F, SUN W, et al. Integrated multi-sensor online monitoring system for aircraft cable network status [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(3): 77-85.
- [17] 胡少成. 基于AADL的飞控软件建模与可靠性验证[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- HU SH CH. Modeling and reliability verification of flight control software based on AADL [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [18] SUN H, CAO D, ZHAO Z, et al. A hybrid approach to cutting tool remaining useful life prediction based on the wiener process [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2018, 67(3): 1294-1303.
- [19] ZHANG Y, LI Y, WANG Y, et al. Adaptive spatio-temporal graph information fusion for remaining useful life prediction [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(4): 3334-3347.
- [20] 孙家正, 宋宇晨, 崔展博, 等. 基于长时间尺度特性建模优化的飞行器遥测数据集异常检测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(11): 312-321.
- SUN J ZH, SONG Y CH, CUI ZH B, et al. Optimization of aircraft telemetry data set anomaly detection method based on long time scale characteristics modeling [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(11): 312-321.
- [21] 刘屹巍, 李尧, 王宇健. 基于扩展GO-FLOW的多状态系统动态可靠性建模方法[J]. *飞机设计*, 2019, 39(3): 1-5.
- LIU Y W, LI Y, WANG Y J. Dynamic reliability modeling method for multi-state systems based on extended GO-FLOW [J]. *Aircraft Design*, 2019, 39(3): 1-5.
- [22] 范军华. 飞机飞控集成测试关键技术研究[J]. *中国新技术新产品*, 2019(11): 17-18.
- FAN J H. Research on key technologies of aircraft flight control integrated testing [J]. *China New Technology and New Products*, 2019(11): 17-18.
- [23] 孙晓哲, 杨珍书, 陈棒, 等. 飞控机电作动系统典型故障模式影响分析[J]. *微特电机*, 2019, 47(10): 25-30.
- SUN X ZH, YANG ZH SH, CHEN B, et al. Analysis of the impact of typical fault modes on the actuation system of flight control electromechanical [J]. *Micro & Special Electric Machinery*, 2019, 47(10): 25-30.
- [24] 魏晓晴. 飞控系统专家诊断平台的设计[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2019(5): 40-43.
- WEI X Q. Design of expert diagnosis platform for flight control system [J]. *Industrial Instruments & Automation Devices*, 2019(5): 40-43.
- [25] 罗干, 刘秀磊, 张永刚, 等. 基于深度学习的事件抽取研究综述[J]. *电子测试*, 2023, 37(1): 48-52.
- LUO G, LIU X L, ZHANG Y G, et al. A review of event extraction based on deep learning [J]. *Electronic Testing*, 2023, 37(1): 48-52.
- [26] 朱斌, 陈龙, 强弢, 等. 美军F-35战斗机PHM体系结构分析[J]. *计算机测量与控制*, 2015, 23(1): 1-3, 7.
- ZHU B, CHEN L, QIANG T, et al. Analysis of the PHM architecture of the US F-35 fighter aircraft [J]. *Computer Measurement & Control*, 2015, 23(1): 1-3, 7.
- [27] 莊露, 陆中, 宋海靖, 等. 基于故障注入模型的电传飞控系统安全性分析[J]. *航空学报*, 2023, 44(9): 272-285.
- ZHUANG L, LU ZH, SONG H J, et al. Safety analysis of fly-by-wire flight control system based on fault injection model [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(9): 272-285.
- [28] 陈银超, 王涛, 闫泓宇, 等. 飞控系统多元数据融合虚拟试验仿真模型验证[J]. *国外电子测量技术*, 2024, 43(9): 8-15.
- CHEN Y CH, WANG T, YAN H Y, et al. Verification of virtual test simulation model for multi-data fusion of flight control system [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2024, 43(9): 8-15.
- [29] YANGKANG Z, XUFEI P, YU L, et al. Research on MBSE application for radio navigation system [J]. *International Journal of Plant Engineering and Management*, 2024, 29(2): 78-96.
- [30] CRONAN C, JASON W, LEON B, et al. Natural language processing (almost) from scratch [J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2011, 12(1): 2493-2537.
- [31] 邢致恺, 何怡刚, 姚其新. 基于多模态信息融合的变压器在线故障诊断方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(9): 95-103.
- XING ZH K, HE Y G, YAO Q X. Transformer online fault diagnosis method based on multimodal information fusion [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(9): 95-103.
- [32] ZIMMERMANN T C, MASUHR C, STARK R. MBSE-entwicklungsfähigkeit für digitale zwillinge [J]. *ZWF*

- Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2020, 115(s1):51-54.
- [33] 乔璐,孙有朝,吴红兰. 面向飞机故障文本的信息抽取[J]. 计算机与现代化, 2024(3):61-66.
QIAO L, SUN Y CH, WU H L. Information extraction for aircraft fault text [J]. Computer and Modernization, 2024(3):61-66.
- [34] CHOLEY J Y. Towards model synchronization for consistency management of mechatronic systems [J]. Applied Sciences, 2020, 10(10):3577.
- [35] 马凯国. 基于信息融合的飞机故障检测与估计方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2022.
MA K G. Research on aircraft fault detection and estimation method based on information fusion [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2022.
- [36] 李耀华,尚金秋. 基于云计算的飞机 PHM 体系架构研究[J]. 计算机工程, 2017, 43(12): 6-10.
LI Y H, SHANG J Q. Research on aircraft PHM architecture based on cloud computing [J]. Computer Engineering, 2017, 43(12): 6-10.
- [37] 宋博,祝青钰,曾照洋,等. PHM 技术在航空结构疲劳寿命预测中的应用[J]. 机械强度, 2017, 39(2): 435-440.
SONG B, ZHU Q Y, ZENG ZH Y, et al. Application of PHM technology in fatigue life prediction of aviation structures [J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(2): 435-440.
- [38] 韩建辉,张芬,杜永良. 自动飞行控制计算机通用自动测试平台设计 [J]. 航空工程进展, 2020, 11(1): 122-131.
HAN J H, ZHANG F, DU Y L. Design of general automatic test platform for automatic flight control computer [J]. Advances in Aeronautical Engineering, 2020,11(1):122-131.
- [39] XIAO C, DYMETMAN M, GARDENT C. Sequence-based structured prediction for semantic parsing [P]. US201615209135. 2017-11-28.
- [40] SI X S, WANG W, HU CH, et al. Remaining useful life estimation: A review on the statistical data driven approaches [J]. European Journal of Operational Research, 2011, 213(1):1-14.
- [41] 杨鹏. 基于非均匀采样的信号频谱检测和参数估计方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2014.
YANG P. Research on signal spectrum detection and parameter estimation method based on non-uniform sampling [D] Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [42] 尤明懿. 基于相似性的剩余寿命预测:鲁棒性与不确定性研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2011, 29(6):10-18.
YOU M Y. Residual life prediction based on similarity: A study on robustness and uncertainty [J]. Reliability and Environmental Testing of Electronic Products, 2011, 29(6):10-18.
- [43] SI X, HU C, ZHOU D. Nonlinear degradation process modeling and remaining useful life estimation subject to measurement error [J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 39(5):530-541.
- [44] 刘亚兵,花璐,杨国勇. 故障预测与健康半物理实时仿真验证研究[J]. 飞机设计,2019,39(3):65-68.
LIU Y B, HUA L, YANG G Y. Research on semi-physical real-time simulation verification of fault prediction and health management [J]. Aircraft Design, 2019,39(3):65-68.
- [45] KIM S J, BAE S J. Cost-effective degradation test plan for a nonlinear random-coefficients model[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 110: 68-79.
- [46] 高雅娟,徐小芳,刘钊. 基于模型的系统工程在通用质量特性评估验证中的应用研究[J]. 测控技术,2020, 39(3):9-12.
GAO Y J, XU X F, LIU ZH. Research on the application of model-based systems engineering in the evaluation and verification of general quality characteristics [J] Measurement and Control Technology, 2020,39(3):9-12.
- [47] 常艳华. 基于数据驱动模拟电路故障预测算法实现与软件开发[D]. 成都:电子科技大学 2015.
CHANG Y H. Implementation and software development of fault prediction algorithm for data-driven analog circuits[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [48] 葛承堃,朱元昌,邸彦强,等. 面向装备 RUL 预测的平行仿真框架 [J]. 系统仿真学报, 2018, 30(6): 2216-2224.
GE CH L, ZHU Y CH, DI Y Q, et al. Parallel simulation framework for equipment RUL prediction [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6):2216-2224.
- [49] CHEN X, REN H, BIL C, et al. Aircraft complex system diagnosis based on design knowledge and real-time monitoring information [J]. Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, 2018, 15(7):414-426.
- [50] PATIL M A, TAGADE P, HARIHARAN K S, et al. A novel multistage support vector machine based approach for Li ion battery remaining useful life estimation [J].

- Applied Energy, 2015, 159:285-297.
- [51] 刘紫阳,陶佩,郑韩飞,等.一种新的基于工况区分和轨迹相似性的RUL预测方法[J].电子测量技术,2020,43(13):31-36.
- LIU Z Y, TAO P, ZHENG H F, etc. A new RUL prediction method based on condition differentiation and trajectory similarity [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43 (13): 31-36.
- [52] 张玉金,黄博,廖文和.面向场景的航空发动机基于模型系统工程设计[J].计算机集成制造系统,2021,11(27):3039-3102.
- ZHANG Y J, HUANG B, LIAO W H. Model-based system engineering design for scenario-based aero engines [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 11 (27):3039-3102.
- [53] SCHLICHTKRULL M, KIPF T N, BLOEM P, et al. Modeling relational data with graph convolutional networks [C]. The Semantic Web: 15th International Conference. Berlin: Springer International Publishing, 2018: 593-607.
- [54] 冉剑,佟佳慧.基于在线仿真的无人机飞控系统智能校正技术[J].南京航空航天大学学报,2019,51(6):795-800.
- RAN J, TONG J H. Intelligent correction technology of unmanned aerial vehicle flight control system based on online simulation [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 51(6):795-800.
- [55] LU S, QIAN G, HE Q, et al. In situ motor fault diagnosis using enhanced convolutional neural network in an embedded system [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(15):8287-8296.
- [56] ZHAO R, YAN R, CHEN Z, et al. Deep learning and its applications to machine health monitoring [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 115: 213-237.
- [57] 秦娅,马军,熊新,等.基于形态波动一致性偏移距离的滚动轴承剩余寿命预测方法[J].电子测量与仪器学报,2024,38(3):32-44.
- QIN Y, MA J, XIONG X, etc. Remaining life prediction method for rolling bearings based on morphological wave consistency offset distance [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38 (3): 32-44.
- [58] HAN P, ELLEFSEN A. L, Li G, et al. Fault prognostics using LSTM networks: Application to marine diesel engine [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 22 (21): 25986-25994.
- [59] 周青,张锐.波音777电传飞控系统的容错设计浅析[J].信息通信,2019,32(10):46-47.
- ZHOU Q, ZHANG R. A Brief analysis of fault-tolerant design of fly-by-wire flight control system for Boeing 777 [J]. Information and Communication, 2019, 32(10):46-47.
- [60] 马超,戴小氏,郭勇.四余度飞控计算机设计及基于马尔可夫模型的可靠性分析[J].信息通信,2019,32(10):10-11.
- MA CH, DAI X D, GUO Y. Design of four-redundancy flight control computer and reliability analysis based on Markov model [J]. Information and Communication, 2019, 32(10):10-11.
- [61] BOTT M, MESMER B L. An analysis of theories supporting agile scrum and the use of scrum in systems engineering [J]. Engineering Management Journal, 2020, 32(2):76-85.
- [62] WANG X, BALAKRISHNAN N, GUO B. Residual life estimation based on a generalized Wiener degradation process [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 84(3):545-563.
- [63] ZHAI Q, YE Z S. RUL prediction of deteriorating products using an adaptive wiener process model [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 6(13):2911-2921.
- [64] GUO W, LI Y, SHA M, et al. GPU-accelerated subgraph enumeration on partitioned graphs [C]. SIGMOD/PODS' 20: International Conference on Management of Data, 2020: 1067-1082.
- [65] WU Z, LIU Y B, ZHANG L, et al. Highly efficient synthetic aperture radar processing system for airborne sensors using CPU + GPU architecture [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2015, 9(1):285-297.
- [66] SHAN Y, CHEN Y. Scalable query optimization for efficient data processing using mapreduce [C]. 2015 IEEE International Congress on Big Data. IEEE, 2015: 649-652.
- [67] JHA S, BRANDT J, GENTILE A, et al. Holistic measurement-driven system assessment [C]. 2017 IEEE International Conference on Cluster Computing. IEEE, 2017: 797-800.
- [68] QUE Z, NAKAHARA H, NURVITADHI E, et al. Recurrent neural networks with column-wise Matrix-vector multiplication on FPGAs [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2022, 30(2):227-237.
- [69] ALAWIEH M, PATINO-STUDENCKA L, DAHLHAUS D. Stochastic modeling of pseudolite clock errors using enhanced AR methods [C]. 2010 7th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing. IEEE, 2010:178-183.

- [70] 张振环,刘会金,李琼林,等. 基于欧拉-拉格朗日模型的单相有源电力滤波器无源性控制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(9):37-44.
ZHANG ZH H, LIU H J, LI Q L, et al. A new passive control method for single-phase active power filters based on euler-lagrange model [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(9):37-44.
- [71] 高菲,贾涛. 基于 DSP+FPGA 线性结构的计算机图像处理系统设计研究[J]. 电子设计工程, 2018, 26(17):189-194.
GAO F, JIA T. Research on the design of computer image processing system based on DSP + FPGA linear structure [J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(17):189-194.
- [72] 周松江. 基于 CPU 与多 FPGA 架构的深度学习异构计算平台研究与实现[D]. 北京:北京邮电大学,2023.
ZHOU S J. Research and implementation of deep learning heterogeneous computing platform based on CPU and multi-FPGA architecture [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023.
- [73] 赖睿,李吉昌,张剑贤,等. 基于 CPU+FPGA 的图像快速去雾方法[P]. CN201710116000. 1. 2017-07-07.
LAI R, LI J CH, ZHANG J X, et al. Fast image defogging method based on CPU + FPGA [P]. CN201710116000. 1. 2017-07-07.
- [74] 黄兴贵,隆波,皮红梅,等. 波动方程的差分算法在高性能异构并行计算的实现方法分析[C]. 中国石油学会 2019 年物探技术研讨会论文集. 北京:石油工业出版社,2019:1415-1419.
HUANG X G, LONG B, PI H M, et al. Analysis of the implementation method of difference algorithm for wave equation in high-performance heterogeneous parallel computing [C]. Proceedings of the 2019 Geophysical Exploration Technology Symposium of the China Petroleum Society. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019:1415-1419.
- [75] 李安民,计卫星,廖心怡,等. 一种面向异构计算的结构化并行编程框架[J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(3):424-432.
LI AN M, JI W X, LIAO X Y, et al. A structured parallel programming framework for heterogeneous computing [J]. Computer Engineering and Science, 2019, 41(3):424-432.
- [76] ZHENG X C, LU X D, LU J Z, et al. An aircraft assembly process formalism and verification method based on semantic modeling and MBSE. Advanced Engineering Informatics, 2024, 60: 102412.
- [77] 李子航,王国新,马君达,等. 复杂系统的 MBSE 建模及可靠性评估方法[J]. 国防科技大学学报, 2025, 47(2):183-192.
LI Z H, WANG G X, MA J D, et al. MBSE modeling and reliability evaluation methods for complex systems [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(2):183-192.
- [78] 杜国红,陆树林,郑启. 基于 MBSE 的作战概念建模框架研究[J]. 指挥控制与仿真, 2020, 42(3):14-20.
DU G H, LU SH L, ZHENG Q. Research on combat concept modeling framework based on MBSE [J]. Command Control and Simulation, 2020, 42(3):14-20.
- [79] GUO J, WANG G, LU J, et al. General modeling language supporting model transformations of MBSE (Part 2) [C]. INCOSE International Symposium, 2020, 30(1):1460-1473.
- [80] TSUI R K, BORKY J M, BRADLEY T H. Applying model-based systems architecture processes (MBSAP) methodology for diversified MBSE projects with efficient systems of systems accomplishments [J]. INCOSE International Symposium, 2020, 30(1):1557-1569.
- [81] LLANO M I, QUAPPEN G. MBSE methodology applied for a technology demonstrator in the space transportation sector [J]. INCOSE International Symposium, 2020, 30(1):1474-1488.
- [82] 张程灏. 机载软件建模及其形式化验证方法研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.
ZHANG CH H. Research on airborne software modeling and its formal verification method [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [83] 陈雪峰. 智能运维与健康维护[M]. 北京:机械工业出版社,2018.
CHEN X F. Intelligent operation and maintenance and health management [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2018.
- [84] 路红飞,曹东,葛美星. 三余度飞控计算机重构与恢复策略研究[J]. 光电与控制, 2020, 27(3):84-88.
LU H F, CAO D, GE M X. Research on reconstruction and recovery strategy of three-redundancy flight control computer [J]. Electro-optics & Control, 2020, 27(3):84-88.
- [85] 杨渊. 基于 MBSE 的民机数据加载系统建模及模型验证[D]. 成都:电子科技大学,2020.
YANG Y. Modeling and model verification of civil aircraft data loading system based on MBSE [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [86] 景博,黄崧琳,王生龙,等. 军用飞机 PHM 系统一体化

- 设计架构分析[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 64-73.
- JING B, HUANG S L, WANG SH L, etc. Analysis of integrated design architecture for PHM system of military aircraft [J]. Advances in Aerospace Engineering, 2022, 13(3): 64-73.
- [87] CHOLEY J Y. Towards model synchronization for consistency management of mechatronic systems [J]. Applied Sciences, 2020, 10(10): 3577.
- [88] 张柏楠, 戚发轫, 邢涛, 等. 基于模型的载人航天器研制方法研究与实践[J]. 航空学报, 2020, 41(7): 78-86.
- ZHANG B N, QI F R, XING T, et al. Research and practice on model-based development method of manned spacecraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(7): 78-86.
- [89] FANG Z M, ZHOU X Z, SONG A, et al. Architectural models enabled dynamic optimization for system-of-systems evolution [J]. Complexity, 2020, DOI: 10.1155/2020/7534819.
- [90] 白玉轩. 基于神经网络的飞控机电作动系统传感器故障检测研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
- BAI Y X. Research on sensor fault detection of flight control electromechanical actuation system based on neural network [D] Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.
- [91] 任金虎, 张小雯, 许成伟, 等. 基于 MBSE 的副翼及其操纵系统研发技术及应用[J]. 民用飞机设计与研究, 2020(1): 70-79.
- REN J H, ZHANG X W, XU CH W, et al. Research and development technology and application of ailerons and their control systems based on MBSE [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2020(1): 70-79.
- [92] 朱文博, 陈绍炜, 赵帅. 航电系统故障预测与健康管理体系结构分析[J]. 电光与控制, 2018, 25(12): 59-62.
- ZHU W B, CHEN SH W, ZHAO SH. Analysis of fault prediction and health management architecture of avionics system [J]. Electro-optics & Control, 2018, 25(12): 59-62.
- [93] 杨挺, 王媛, 王瑛琪, 等. 基于时空关联的飞控传感器数据异常检测[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(8): 21-31.
- YANG T, WANG Y, WANG Y Q, et al. Anomaly detection of flight control sensor data based on spatiotemporal correlation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(8): 21-31.
- [94] 罗善策. 面向飞控维修知识图谱的智能问答系统设计与实现[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- LUO SH C. Design and implementation of an intelligent question and answer system for flight control maintenance knowledge graph [D]. Nanjing: Southeast University, 2023.

作者简介



李博, 2020 年于北京工业大学获得硕士学位, 现为石家庄海山实业发展总公司工程师, 主要研究方向为飞控系统智能维修与自动检测技术。

E-mail: 15731698417@163.com

Li Bo received her M. Sc. degree from Beijing University of Technology in 2020. She is now an engineer at Shijiazhuang Haishan Industrial Development Corporation. Her main research interests include intelligent maintenance and automatic detection technology for flight control systems.



崔展博(通信作者), 2023 年于空军工程大学获得博士学位, 现为石家庄海山实业发展总公司正高级工程师, 航空工业西安飞行自动控制研究所博士后, 河北省航空器检测与修复技术科技重点实验室主任, 主要研究方向为仪器与测试技术、故障预测与健康管理技术、飞控系统自动检测技术等。

Cui Zhanbo (Corresponding author) received his Ph. D. from Air Force Engineering University in 2023. He is now a senior engineer at Shijiazhuang Haishan Industrial Development Corporation and a post-doctoral student at Xi'an Flight Automatic Control Research Institute of Aviation Industry, Director of the Hebei Provincial Key Laboratory of Aircraft Detection and Repair Technologies. His main research interests include instrument and testing technology, failure prediction and health management technology, automatic detection technology for flight control system, etc.