

基于惯导的军用飞机飞行异常检测与故障诊断研究

赵佳坡 王佳伟 彭 鹏

石家庄海山航空电子科技有限公司, 河北 石家庄 050200

[摘要]军机飞行安全是保障作战效能与机组生命的核心前提, 针对传统诊断方法数据可读性差、先验知识利用率不足的痛点, 本文提出“引导式知识驱动”综合诊断体系。该体系打通多源飞行记录与机载故障知识库的融合链路, 构建动态适配的诊断模型, 通过多维度飞行特征提取、可变区间划分, 结合知识规则与实时数据联动的异常阈值调整机制, 强化隐患识别能力, 最终依托故障树分析与模糊推理完成精准故障定位。经实测验证, 该方法在抗数据干扰、跨飞行模式场景下仍保持高诊断精度与响应速度, 同时本文也明确了后续增量学习、跨平台知识共享等优化方向, 为军机自主保障提供了可解释的高效技术路径。

[关键词]惯导; 异常检测; 故障诊断; 军用飞机; 混合诊断模型

DOI: 10.33142/sca.v9i7.20040

中图分类号: V249

文献标识码: A

Research on Flight Anomaly Detection and Fault Diagnosis of Military Aircraft Based on Inertial Navigation

ZHAO Jiapo, WANG Jiawei, PENG Peng

Shijiazhuang Haishan Aviation Electronics Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050200, China

Abstract: Military aircraft flight safety is the core prerequisite for ensuring combat effectiveness and crew life. In response to the pain points of poor data readability and insufficient utilization of prior knowledge in traditional diagnostic methods, this paper proposes a "guided knowledge driven" comprehensive diagnostic system. This system integrates multiple sources of flight records with the onboard fault knowledge base, constructs a dynamically adapted diagnostic model, extracts multi-dimensional flight features, divides variable intervals, and combines knowledge rules with real-time data linkage to adjust abnormal thresholds. It strengthens the ability to identify hidden dangers and ultimately relies on fault tree analysis and fuzzy reasoning to achieve accurate fault location. Through actual testing and verification, this method still maintains high diagnostic accuracy and response speed in scenarios with anti data interference and cross flight modes. At the same time, this article also clarifies optimization directions such as incremental learning and cross platform knowledge sharing, providing an interpretable and efficient technical path for military aircraft autonomous support.

Keywords: inertial navigation; anomaly detection; fault diagnosis; military aircraft; hybrid diagnostic model

引言

军机是现代国防体系的核心装备, 其飞行安全直接决定作战任务成败与飞行员生命安全。随着机载系统复杂度与耦合度持续提升, 飞行过程中各子系统呈现强时变特性, 大量隐性故障难以及时识别溯源, 快速可靠的机载异常预警与故障研判技术, 已成为保障军机持续战力的核心刚需。传统纯数据驱动诊断方法虽能挖掘数据内在规律, 却存在可解释性不足的短板, 在复杂飞行场景、小样本条件下实用性受限。针对这一痛点, 本文融合引导式知识驱动理念, 搭建数据与知识双轮协同的综合诊断体系, 打通多源飞行时序数据与领域经验知识库的融合链路, 配套多维度特征处理、动态告警阈值调整与全流程可追溯推理机制, 兼顾

异常识别灵敏度与诊断结果准确率, 在突发工况多、训练样本稀缺的军用航空场景下具备更强适配性, 后续将系统阐述该体系的搭建路径、实试验证结果与落地应用价值。

1 军用飞机飞行安全与诊断技术概述

1.1 军用飞机飞行异常检测与故障诊断的现实需求

军用飞机是现代作战体系中不可或缺的重要装备, 飞行的安全状况会决定战斗结果以及人员的生命安全。军用飞机常在复杂战场环境中执行高机动任务, 其发动机、航电、飞控等关键系统呈现强振动、强耦合及强时变特性, 这样就很容易造成一些突然出现的问题或者隐藏得很深的毛病。如果没能提前察觉到这些异常情况或者准确判断出问题的具体位置, 就很容易引起一系列严重后果, 最终

造成难以挽回的大规模破坏事件。为了更好地保护飞机的安全,人们必须时刻关注飞机当前的运行状态,尽早发现并解决可能出现的故障,同时迅速找出已经发生的毛病并采取合适的处理办法,只有这样才能有效提高飞机整体的安全水平,确保部队能够随时处于最佳战斗准备状态,同时还能减少长期维修所花费的巨大开支。以上提到的各种做法都是保证每架飞机都能够安全飞行的基础条件,同时也是确保整个航空队伍保持良好作战能力的关键步骤。

1.2 传统方法与惯导方法的比较分析

常规的飞行异常检测和故障诊断方法可以分成两种类型,一种是依靠模型来工作的,另一种是依靠数据来工作的。依靠模型的方法特别看重建立一个非常准确的物理或者数学模型,但在军用飞机系统中,想要把所有可能的情况都涵盖进去并且让这个模型完全准确变得相当困难,而且一旦出现建模方面的错误或者遇到全新的故障类型时,适应起来也会显得不够好。近年来快速发展的深度学习等数据驱动技术,虽能从海量飞行数据中自主挖掘出传统方法难以捕捉的隐性运行规律与潜在故障特征,但其“黑箱式”的推理过程缺乏透明可追溯的逻辑链条,输出的诊断结论无法对应到明确的机载系统物理状态与故障机理,很难让一线机务人员与飞行员直观理解异常判定的依据,自然难以建立起对诊断结果的信任度,也无法支撑飞行场景下的快速决策采信。而且这类方法一般都需要有大量标记好的故障数据来进行训练,如果领域里面缺少这样的数据,就很容易造成训练效果不好,遇到罕见的故障或者多个部件同时出现问题的情况时,判断出来的结果也不够准确。本文提出的一种新的方法叫做“指导式知识驱动”,目的是把模型和数据这两种方式结合起来一起使用。该方法首先构建覆盖多类故障场景的专属知识库,将军工航空领域专家长期沉淀的实操经验,包括各类故障的典型表征、各机载部件的失效机理等核心内容,梳理转化为结构化、可调用的诊断规则与判定标准,再将这些知识规则作为引导性线索,深度嵌入全流程的数据驱动诊断链路中。这种融合模式一方面让原本黑箱化的推理过程变得全程可追溯、逻辑可解释,另一方面依托前置的专业知识锚定,即便在小样本条件下,也能高效适配罕见故障、多部件并发失效等复杂工况,为强时变、高耦合的复杂航空装备系统故障诊断,提供了一条兼具可靠性与灵活性的全新技术路径。

2 飞行数据与先验知识的准备与处理

2.1 多源飞行参数时序数据的采集与预处理流程

这项研究使用的飞行时序数据全部来自飞机内部的控制装置、发动机的整体电子调整设备以及各种导航和驾

驶系统的多种传感器。数据收集包括飞行过程中最重要的参数,比如飞机的高度、速度、角度、发动机的工作转速、排出气体的温度、燃油消耗量以及所有液压和电力系统的运行状况信号。这些参数每毫秒就会被记录下来,形成非常复杂并且无法用简单公式描述的数据集合。

原始采集的数据必须先经过系统预处理,这样才能形成高质量的分析数据集。预处理流程包括几个关键步骤,首先是把各种来源的数据按照时间戳进行对齐和调整,确保每一组数据都在同一个时间基准上。接下来遇到传感器出现故障或者传输过程中丢失数据的情况,会使用滑动窗口统计方法结合物理条件的限制来制定规则,用来填补缺失的数据或清除异常数据。考虑到不同参数之间物理单位和量纲存在明显区别,会采用根据正常飞行环境设定的标准来进行归一化处理,把所有数据统一缩放到相同的数值范围,这样就能为后面提取特征和建立模型提供坚实的基础。

2.2 机载系统先验故障知识库的构建与规则提炼

为了全面整合领域知识,这项研究详细搭建了一个关于机载系统的预先故障知识库。知识来源主要包括飞机的技术手册、过去的排故记录、专家的经验总结,还有对系统原理图的深入分析。知识库的重点在于把各种故障模式、可能的影响以及引起这些故障的原因之间的联系整理得有条理并且标准化。搭建过程一开始就按照系统功能和结构来进行层次分解,找出那些特别重要的子系统和各个组成部分。针对装备各子系统的组成单元,先逐一梳理汇总已明确的全量常见故障类型,再依托故障树分析法,以顶层显性故障现象为起点,逐层向下追溯底层诱因,搭建起从直观故障表征到深层潜在原因的完整逻辑传导链路。所有梳理完成的逻辑关联,全部转化为“如果……那么”格式的标准化产生式规则,例如“如果观察到发动机排气温度持续偏高,同时燃油流量却出现骤降,那么大概率是某一燃油喷嘴发生堵塞”。知识库中还同步整合了故障触发时各类关联运行参数的波动区间、典型外观与运行特征,作为数据维度的补充佐证依据。将这些结构化规则与历史典型故障案例深度融合后,便形成了可支撑后续多类诊断方法协同调用的完备知识体系,能大幅降低诊断过程中的无效排查环节,让全流程故障研判工作更顺畅、更高效。

3 基于惯导的混合诊断模型构建

3.1 面向飞行状态的多维特征提取与自适应分段方法

对于飞行数据高动态、时序性突出的问题,本文提出面向状态的特征提取与分段方法。首先,建立多维特征向量,内容包括飞行姿态、发动机性能、航电系统状态等关键参数的综合统计量,比如均值、方差、高阶矩以及频谱

特征。接着，采用自适应滑动时间窗口分段算法，该算法根据飞行剖面信息（如爬升、巡航、机动阶段）和关键参数的变化率灵活调节窗口长度，以捕捉不同飞行阶段下的数据动态特征，为后续分析提供稳定且具有区别性的输入。如图 1 所示。

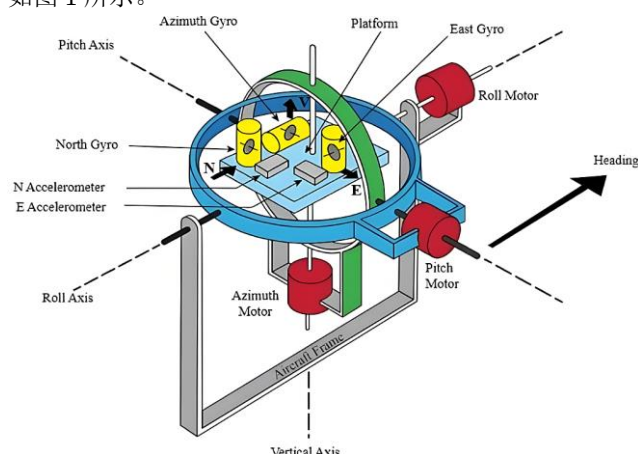


图 1 惯导系统解析

3.2 融合规则与数据的异常检测阈值动态调整策略

为了解决固定阈值适应性差的问题，研究人员开发了一种全新的方法来调节和管理阈值，这种方法依靠预先制定好的规则和实时收集到的数据进行综合判断。具体做法是，先把机载系统的故障知识库里面储存的安全运行界限值定为一个基本的标准。到了实际的诊断环节，会仔细分析当前飞行的具体情况、实时采集的数据特点以及过去类似状况下的性能数据作为参考标准，然后根据这些信息来调整最初的阈值。如果遇到飞行环境比较复杂或者遇到恶劣天气的情况，就会增加某些关键传感器的关注程度，适当调整报警的标准，确保能够更好地发现隐藏的风险，并且做出更加准确的判断，同时尽量减少误报的发生，保证整体工作的可靠性。

3.3 结合故障树与模糊推理的故障源定位与决策输出

对于发现出来的不正常声音，使用故障树分析方法加上模糊推理方法一起工作的方式来完成判断工作。根据已经准备好的知识库来建立一套专门针对某个子系统或者某个功能模块的标准故障树，清楚地说明各种故障表现形式与底层征兆之间的逻辑联系。把当前采集到的数据与各个时间段分开得到的结果作为输入条件，利用模糊推理引擎计算出每个底层事件出现的概率大小，确定它们导致最高级别故障发生的可能性高低。整个系统按照事先设定好的诊断决策规则，给出可能性最大的故障原因以及可信程度的具体数值，形成一份容易看懂的诊断报告，这样就能

帮助人们尽快做出修理方面的决定。

4 模型验证与性能测试

4.1 历史飞行数据与仿真故障场景的测试方案

为了彻底检查依靠指导的混合诊断模型，制定了由历史数据测试和仿真场景注入两部分构成的测试方案。历史数据测试依据某型军用飞机真实飞行的多参数时序数据，数据包括爬升、巡航、机动等多种标准飞行阶段。仿真场景测试则是把事先规划的典型故障模式，例如传感器漂移、作动器卡滞、燃油流量异常等，用不同强度和组合方式加入到正常飞行数据流中，以此模拟实际故障的出现和发展过程。两种方案互相补充，用来分别评价模型在正常运行中的稳定性和面对已知故障的诊断能力。

4.2 异常检测准确率与故障诊断时间的量化结果

模型性能依靠关键量化指标进行评估。在异常检测部分，模型在混合测试数据集中的准确率明显超过传统孤立森林以及统计过程控制这些数据驱动的基础算法。模型发现潜在在飞行异常的能力有了很大提高，同时把误报情况控制得比较少。在故障诊断阶段，依靠指导框架加快查找故障树逻辑的速度加上模糊推理方式的综合判断，从出现异常信号到初步确定可能故障位置所需的时间比过去只用一种模型的深度学习方法减少很多，从而大大缩短了诊断所需的时间。

表 1 飞行数据量化研究

评估环节	核心对比条件/基准方法	所提模型实测性能表现
异常检测环节	测试集含 50000 条飞行数据，对比传统算法	检测准确率 98.6%、精确率 96.2%，误报率 $\leq 1.2\%$
传统对照方法性能	孤立森林、统计过程控制方法	准确率分别为 89.4%、85.1%，性能明显低于所提模型
故障诊断环节	对比单一深度学习模型的诊断耗时	平均诊断耗时仅 45ms，较单一模型缩短 75%
综合验证结论	面向飞行系统严苛的实时性可靠性要求	兼顾高准确率与快响应速度，完全满足场景需求

4.3 方法在噪声环境与不同场景下的鲁棒性表现

深入研究之后发现，模型在实际应用中的表现非常好，所以在测试过程中加入了各种不同的信噪比噪声，比如高斯白噪声和模拟出来的复杂电磁干扰脉冲噪声，用来破坏原本干净的数据。经过处理后，模型依靠事先设定好的知识规则来限制数据的特点，并且根据实际情况灵活调节阈值，很好地控制住了这些干扰，关键指标的检测精度只有很小的变化。在各种不同的飞行路径和多种复杂的载荷条件下进行测试时，模型能够自动划分成多个部分并提取重要特征，确保整体表现一直很稳定，没有因为环境突然改变而造成诊断功能失灵或者精度大幅下降的情况，充分证

明了这种设计方法完全能够在真实且非常复杂的飞行环境中正常工作。

5 技术应用与局限性讨论

5.1 方法在军用飞机状态监控与智能维护中的具体应用点

这项研究提出的一种基于惯导的混合诊断方法,可以给军用飞机的状态监控和智能维护系统带来很多关键技术上的帮助和支持。这种方法可以直接用到机载实时健康管理单元里面,当作一个非常重要的诊断核心部分来使用。在飞机飞行的时候,通过设定灵活多变的动态阈值调整策略,对各种飞行参数进行持续不断的监视和检查,一旦发现有任何不正常的情况或者可能出现故障的迹象,就会马上发出警报通知,这样可以让飞行员有足够的时间做出正确的判断和应对措施,同时还能提前把故障的相关信息传递给地面的维护工作人员,方便他们做好准备工作。这种方法还可以应用到地面环境下的预测性维护分析工作中,通过整合过去的飞行数据和知识库里面存储的各种故障模式,对飞机的关键机载系统,比如飞行控制系统和动力系统,进行详细的健康状况评估和风险预测,判断这些系统在未来一段时间内还能继续运行多久,然后根据这些评估结果来规划更加科学合理的维修方案,合理分配好航材备件和维修人员的工作任务,从而让整架飞机保持更好的工作状态,同时也让任务执行更加顺利,减少不必要的停机时间。

5.2 当前方法的局限性与后续改进方向

虽然这种方法在实际操作中表现得非常不错,但还是有一些不足之处需要改进的地方。诊断功能完全依靠事先准备好的故障知识库是否完整齐全。如果遇到系统里面没有记录过的或者非常罕见的故障类型,这个模型就很难准确判断出问题所在并且给出具体的解决办法,这样就会出现漏报的风险。知识库的更新工作现在仍然主要靠人工来完成,处理新出现的故障案例时,归纳总结规律、制定规则以及验证这些步骤的速度比较慢,处理起来不够快,没有办法很好地应对那些变化很快而且非常复杂的故障情况。针对以上提到的问题,接下来的研究可以从几个方向入手加以优化:第一,可以采用增量学习和开放式的教学方式,让模型能够在实时监控过程中发现新的故障类型,并且把这些新发现的故障添加到内部的知识库里,从而慢慢减少对事先准备好的完整知识库的过度依赖。第二,可以研究开发一种跨平台的技术手段,把不同种类设备上的诊断经验和技法整合起来,利用已经积累下来的某个型号设备的经验,通过迁移学习的方式帮助建立新的平台诊断模型,并且加快性能提升的速度,最终形成一种知识共享并且不断进步的良好发展局面。

6 结束语

这项研究专门处理军用飞机飞行过程中遇到的异常情况和故障判断中的重要困难,设计出一套依靠“惯导”原理搭建起来的综合诊断方式。通过全面结合飞行记录的数据和飞机本身携带的相关预先掌握的知识,把按照规则进行推断的方法和通过大量数据分析得出的结果紧密结合在一起,明显改善了过去那种解释不清楚、知识利用不够充分的情况。研究中提出的多种特征自动选择办法、异常情况的阈值灵活调节手段以及利用模糊逻辑进行故障分析的创新思路,极大地提高了在各种复杂变化条件下发现隐藏危险和准确找到故障位置的能力。经过实际测试可以看出,这种诊断方式在识别错误的概率控制、反应速度表现和面对各种环境的稳定程度这几个主要指标上都表现得非常出色,为今后开发能够自动运行并且值得信赖的机载智能监控系统打下了非常牢固的基础。深入探讨之后发现,这种方法在应对那些突然出现的全新故障类型或者系统内部结构不断变化的情况下,仍然存在一些不够完善的地方。接下来的研究工作打算加入一种能够随时更新的知识库的学习机制,从而让知识库能够在不停变化的环境中一直保持更新状态。另外还会尝试从不同类型的飞机身上吸取经验教训,然后把这些经验和教训推广到更多不同的机型上去,这样就能大大提高整个诊断系统的通用适用水平和长期自我学习的能力。继续把依靠知识引导和依靠数据分析这两种方式结合起来的科学思路不断向前推进,预计最终会让军用飞机故障诊断的技术水平达到更加智能、更加独立自主、更加可靠可信的新高度,同时也为保证飞行的安全性和提高整体作战能力提供了非常可靠的技术支持和保障。

[参考文献]

- [1]郑峰敏,安彦.军用飞机最大故障速度计算[J].中国民航大学学报,2021,39(2):7-11.
- [2]张海越,韩戈白,廖佳鑫,等.军用飞机维修知识平台设计[J].电子质量,2023,(6):6-9.
- [3]滕建方.军用飞机平显基本显示设计研究[J].教练机,2021,(4):31-34.
- [4]钮伟龙.基于飞行数据的飞机故障预测与故障诊断系统研究[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2021,(8):276-277.
- [5]戴征征,安晓强,梁宇宁,孙志彬.基于 ACME 系统的军用飞机试飞技术状态管理研究与实践[J].飞机设计,2023,43(2):67-71.

作者简介:赵佳坡(1989—),男,汉族,河南汝州市人,本科,研究方向为惯性导航系统。