

基于多源运行数据的机载航电系统故障模式预测性健康监测方法研究

周谦杰 周汶燕 毛 威

陕西飞机工业有限责任公司 陕西 汉中 723200

摘 要：机载航电系统运行工况复杂、故障隐蔽性与渐进性特征突出，传统监测方式难以捕捉早期潜在故障。本文围绕航电系统多源运行数据开展系统性分析，梳理数据构成体系与缺陷特征，搭建针对性预处理流程，通过多层级数据融合算法挖掘设备运行关联特征。结合故障模式分类标准与时序演化规律，剖析航电故障萌生、发展的内在机理，依托特征数据构建适配机载场景的健康监测架构与故障预测模型，形成完整的动态健康监测技术体系。研究可为航电系统前置化故障监测、设备状态管控提供系统化的技术支持。

关键词：机载航电系统；多源运行数据；数据融合；故障模式；预测性健康监测

引言：机载航电系统作为航空器的核心功能载体，运行状态直接决定飞行作业的安全性与稳定性。复杂高空作业环境、多模块协同运行模式，让航电设备运行数据呈现多源异构、时序波动、干扰性强的特点，各类隐性、渐进性故障难以通过常规手段识别。现有监测技术对多维度运行数据的挖掘深度不足，无法精准捕捉设备性能衰减与故障演化趋势。针对以上行业痛点，开展航电系统多源数据处理、故障机理挖掘与动态监测技术研究，构建适配复杂机载场景的预测性健康监测体系，提升航电设备状态感知与故障预判能力。

1 机载航电系统多源运行数据特性分析与预处理方法

1.1 机载航电系统运行数据多源构成体系

机载航电系统运行数据覆盖设备运行全流程，包含多种独立的采集品类。机载传感器持续采集各类硬件设备的运行状态数据，记录设备工作过程中的核心物理参数与运行指标。机载总线在设备交互过程中生成大量传输交互数据，承载系统模块之间的信号指令与信息交互内容。机载设备内置自检程序可自主完成硬件检测与功能校验，持续输出设备运维类数据，留存设备日常运行的基础记录。飞机飞行全过程会积累海量工况时序数据，完整记录飞行状态变化过程中的各类参数信息。各类数据源拥有专属的采集维度与数据形态，对应差异化的传输机制与生成逻辑，分别覆盖航电系统硬件工况、信号传输、设备运维、飞行状态等不同监测领域，可构建层级清晰、品类完备的航电系统多源运行数据体系，精准区分各类数据的表征范

围与监测侧重^[1]。

1.2 机载多源运行数据典型干扰与缺陷特征

机载航电设备的工作环境包含高空低压、高速机动、复杂电磁辐射等特殊条件，特殊环境会持续影响数据采集与传输链路。各类运行数据会频繁出现时序缺失问题，采集链路波动会造成部分时段数据内容断层。大规模的数据采集作业会产生大量维度冗余信息，无效数据占据数据主体内容。复杂电磁环境会干扰信号传输质量，催生各类噪声干扰，改变原始数据的真实参数。不同采集终端和传输链路的设计标准存在差异，直接造成整体数据集的数据异构问题。飞行状态变动和链路传输延迟会引发数据时序错位，打乱数据的时间排布顺序。各类数据缺陷均对应专属的形成诱因，会从数据完整性、真实度、有序度等多个层面干扰航电系统故障识别与状态监测工作。

1.3 面向故障监测的多源数据统一预处理方法

机载航电多源数据普遍存在结构异构、排布杂乱、干扰成分较多的问题，原始数据无法直接用于故障模式挖掘与健康监测。结合机载航电设备的运行场景特点，设计适配性更强的标准化数据预处理流程。针对数据结构与量级不统一的问题，建立固定的维度映射规则，完成各类异构数据的标准化转换。针对时间排布混乱的问题，执行精准的时序对齐操作，规范整体数据的时间排布逻辑。针对内容繁杂的问题，开展冗余信息剔除作业，筛选留存有效数据内容。针对信号干扰问题，落实精细化噪声净化处理，还原原始数据参数。整合各类处理环节可搭建完整的多源数据

融合预处理框架,实现不同类型、不同精度、不同时序属性数据的标准化转换输出。

2 机载航电系统多源运行数据融合方法研究

2.1 航电系统数据融合层级与融合逻辑构建

机载航电系统整体采用分层架构,各功能模块运行机制相互独立,数据输出形式也存在明显区别。按照数据处理深度和信息解析逻辑,可以将航电多源运行数据划分为数据层、特征层、关联层三类融合层级。数据层主要完成原始数据的基础规整与标准化处理,让各类异构数据能够接入统一的数据处理链路。特征层基于规整后的数据集开展信息拆解与参数提炼,挖掘原始数据中隐藏的设备运行细节。关联层侧重跨模块、跨维度的数据交叉分析,挖掘不同工况、不同设备数据之间的内在联系。明确各融合层级的处理边界与工作侧重点,梳理层级间的数据递进规律与耦合特征,理清数据逐层加工、逐级深挖的完整处理链路^[2]。结合航电故障监测的实际需求搭建多层次数据融合逻辑框架,打破各类数据源相互割裂的状态,打通不同数据维度之间的信息通路。

2.2 多源异构数据深度融合算法优化

机载航电系统采集的多源运行数据结构差异较大,时序排布并不统一,各项参数之间存在复杂的非线性关联。传统融合算法难以适配这类复杂的数据特性,无法实现深层信息的充分挖掘。结合航电运行数据的固有属性,选用适配场景的深度数据融合算法,匹配机载设备复杂的数据输出规律。通过调整数据处理逻辑,优化多源数据的特征互补机制,弥补单一数据维度信息覆盖不足的问题。升级关联挖掘逻辑,精准捕捉海量运行数据中隐藏的参数关联规律。完善信息聚合方式,对零散分布的原始数据进行集中整合。有效改善单一数据源信息片面、参数关联度不足的问题,深度挖掘设备运行过程中的状态关联信息,将碎片化的原始运行数据转化为结构完整、维度统一的系统状态特征。

2.3 融合数据的航电系统状态特征提取方法

多源数据经过多层融合处理后,整体规整度和信息完整性显著提升,能够为航电系统运行状态的深度解析提供可靠的数据支撑。以融合处理后的标准化数据为基础,搭建适配机载工作场景的设备状态特征提取机制。围绕航电系统故障监测核心需求,聚焦设备运行稳定程度、工况动态变化规律、多参数耦合联动关系等关键监测维度。对海量融合数据进行分层筛选,甄别具备异常指示价值的核心参数。提取能够

直观反映系统性能波动与性能退化趋势的深度特征,精准捕捉设备运行过程中潜藏的故障隐患。去除辨识度低、和系统运行关联较弱的无效特征,保留灵敏度高、针对性强的有效参数。汇总各类优质特征构建完整的航电系统健康状态特征集,为故障模式识别与预测性监测工作提供稳定的特征支撑。

3 机载航电系统故障模式挖掘与状态演化机理研究

3.1 机载航电系统典型故障模式分类与特征表征

机载航电系统由多个功能各异、相互配合的子系统组成,不同子系统的运行方式和工作逻辑各有不同,故障产生的类型和诱因也存在明显区别。结合各子系统的运行机制与工作特性,可以全面梳理设备运行过程中潜藏的各类故障形式。常见故障涵盖通信链路故障、传感采集失效、机载总线异常以及功能模块运行紊乱等类型,基本覆盖航电系统数据采集、信号传输、模块运转的全部工作环节。深入拆解各类故障的内部成因,分析设备长期损耗、外部信号干扰、运行载荷超标、控制指令异常等因素如何诱发故障产生。总结不同故障在系统运行过程中呈现的状态表现,区分各类故障的差异化特征^[3]。结合多源运行数据的参数变化规律,总结每类故障对应的参数波动特点,建立清晰的故障数据映射规则,实现故障类型、故障机理与运行数据特征的精准匹配。

3.2 基于多源融合数据的故障模式挖掘机制

经过筛选整合的航电系统健康特征数据集,包含设备运行过程中的各类核心参数变化信息,能够精准捕捉系统运行的细微状态波动。以完善的健康特征为基础,搭建适配航电设备运行特性的故障挖掘机制,重点针对隐蔽性强、发展周期长的隐性故障与渐进性故障开展深度挖掘。航电系统故障大多不存在瞬时爆发的特征,大多源于长期的参数偏移与模块耦合异常,经过持续累积逐步形成性能异常。依托多源融合数据的时序记录内容,捕捉参数缓慢偏移、时序曲线波动、多参数联动异常等细微变化。从海量动态数据中提炼故障萌生的隐性特征,梳理故障从轻微异常到明显病变的发展脉络。打破传统故障识别只能判别显性异常的局限,深度挖掘数据底层潜藏的故障信息,实现隐性故障与渐进性故障的有效识别,丰富航电系统故障模式识别的完整体系。

3.3 航电系统故障状态时序演化规律分析

机载航电系统不间断输出的时序运行数据,完整留存设备全生命周期的运行状态变化,能够真实还原故障动态发展的完整过程。依托连续性时序数据,追

踪故障从初期萌芽、持续发展到底彻底凸显的完整演化进程。结合各类飞行环境与设备运行工况,观察故障状态的动态演变趋势,记录不同发展阶段的特征参数变化特点。探究各功能模块之间的故障传导逻辑,分析单一模块异常如何逐步扩散至关联模块,最终影响整个系统运行。挖掘参数偏移幅度、多参数联动变化与故障发展程度的内在关联,厘清数据波动对故障演化进程的影响。梳理故障动态发展的底层机理,总结航电系统故障演化的核心规律,为预测性健康监测技术的落地提供扎实的机理支撑。

4 机载航电系统预测性健康监测模型构建与方法实现

4.1 预测性健康监测整体架构设计

依托多源运行数据预处理技术、多层级数据融合机制以及航电系统故障状态演化机理,搭建专属机载航电系统的预测性健康监测整体架构。架构设计遵循机载设备轻量化、高实时性、高稳定性的运行要求,适配航空复杂工况下的状态监测需求。完整架构划分多个独立功能层级,主要包含原始数据输入层级、多源数据规整处理层级、深度特征挖掘层级、故障模式研判层级、健康状态趋势预判层级以及监测信息输出层级。界定每一个功能层级的核心工作内容与技术处理范畴,规范各层级的数据处理形式与信息流转方式^[4]。梳理不同功能模块之间的衔接逻辑、数据传递规则与层级联动机制,打通数据处理、特征提取、故障分析、状态预判的全技术链路。明确各层级的技术约束与运行指标,匹配机载航电设备有限算力与实时运行条件。

4.2 航电系统故障趋势预测模型构建

结合机载航电系统故障时序演化的内在规律,针对航空设备故障渐进性、隐蔽性、耦合性的固有特征,设计适配机载运行场景的故障趋势预测模型。以经过融合处理的多源运行特征数据为基础数据支撑,聚焦航电设备参数慢变异常、工况偏移波动、模块性能衰减等隐性故障特征,搭建面向渐进性故障识别与潜在故障预判的预测模型。针对航电运行数据时序性强、非线性特征突出、工况动态波动明显的特点,优化模型内部时序特征学习结构,强化模型对长周期运行数据细微变化、缓慢偏移特征的捕捉能力。调整模型特征权重分配机制,提升模型对不同类型故障演化特征的感知与解析能力。完善模型状态趋势推演逻辑,适配机载航电系统高低速切

换、多工况交替、环境参数多变的复杂运行场景,细化不同运行工况下的特征适配逻辑,提升模型对复杂机载环境的适应性。

4.3 航电系统动态健康状态监测方法实现

依托前文故障模式挖掘成果与优化完成的故障趋势预测模型,建立适配机载航电系统的动态健康状态监测技术体系。围绕航电系统实时运行状态管控与潜在故障前置预警的核心需求,搭建系统化的健康状态动态研判机制。细化航电系统健康状态的判别标准与状态划分依据,依托实时采集的多源运行数据,完成设备运行参数、模块工作状态、系统耦合工况的持续性解析。建立动态化的状态更新与趋势研判流程,对航电系统运行状态进行持续性跟踪研判。挖掘设备运行过程中的隐性异常信号,识别故障萌芽阶段的微弱特征变化,完成故障发展趋势的动态预判^[5]。同时统一各环节接口与数据标准,满足航电分布式运行模式要求,实现全系统状态实时感知、异常同步识别与趋势协同研判,为机载动态健康监测落地提供完整技术路径。

结束语

整套研究完整完成航电系统多源运行数据处理、数据融合、故障机理分析与监测方法搭建的全链条技术研究工作。通过剖析多源数据缺陷特征并构建标准化预处理体系,解决异构数据难以深度利用的问题,依托多层融合算法提炼精准的设备健康特征,结合故障演化规律搭建专属预测模型与监测架构,实现航电系统隐性故障与渐进性故障的有效预判。研究形成的技术体系,能够有效适配机载航电设备的复杂运行场景,为航空机载设备健康状态管控提供可靠的技术参考。

参考文献

- [1] 王梦. 航空机载镉镍蓄电池组开路故障检测技术研究[J]. 技术与市场,2026,33(3):81-84.
- [2] 白云航. 现代机载航电设备常见故障类型分析及精准排查策略研究[J]. 信息记录材料,2026,27(9):35-37.
- [3] 宋利,米建伟,王如意,等. 面向机载电缆的故障诊断与可视化系统研究[J]. 电子机械工程,2026,42(1):24-29.
- [4] 肖卫镇,杜辙. 机载电子连接器接触不良故障诊断与预防措施研究[J]. 消费电子,2026(2):17-19.
- [5] 杨漫,许斌,吉沛琦. 一种机载航电设备软件故障监控技术的设计与实现[J]. 航空电子技术,2021,52(4):33-37.