

极端气象大气条件下机载大气数据传感器故障辨识研究

周 靖 刘雅鑫 祁佳宇

陕西飞机工业有限责任公司 陕西 汉中 723000

摘 要: 极端气象场景会打破常规大气的稳定状态, 强对流、低温结冰等因素持续干扰机载大气数据传感器的正常运行, 环境扰动信号与设备故障信号相互混杂, 大幅提升故障识别的整体难度, 本文从极端气象下传感器的运行特征与扰动机制切入, 梳理故障生成的内在诱因与现有辨识模式的适配短板, 搭建多层级特征提取、气象干扰分离、多维度分类研判的完整技术路径, 提出特征体系完善、算法改良、多源数据融合等优化方向, 有效提升复杂工况下机载传感器故障辨识的精准度与稳定性。

关键词: 机载大气数据传感器; 极端气象; 故障辨识; 信号特征提取; 气象干扰分离

引言: 机载大气数据传感器是飞行器获取空域核心参数的关键设备, 其运行状态直接影响飞行数据采集的可靠性。常规平稳空域环境下的故障辨识逻辑, 难以适配极端气象带来的强扰动工况, 气象干扰与设备故障的信号边界逐步模糊, 极易引发异常误判、故障漏判等问题。结合极端气象下大气环境的动态变化特征, 梳理传感器受环境胁迫的扰动规律, 针对性搭建适配复杂工况的故障辨识技术体系, 对保障极端气象条件下飞行器大气参数探测的准确性具备重要的现实意义。

1 极端气象条件下机载传感器工作环境与运行特征

1.1 极端气象大气环境的典型干扰属性

极端气象场景会打破常规大气的稳定状态, 形成结构复杂、动态多变的大气环境。强对流、强湍流、低温结冰、高湿积雾等气象状态, 都会改变空域大气的温度、压强与气流分布结构。不稳定气流会造成空域气流无序扰动, 大气参数处于持续波动状态。低温高湿环境会改变空气介质的物理特性, 让大气介质密度与黏性产生不规则变化。各类极端气象因素相互交织, 形成无序且多变的干扰环境^[1]。这类环境不具备稳定、均匀的介质条件, 会对机载探测设备的正常工作形成持续干扰, 为传感器精准采集大气参数带来诸多不利条件。

1.2 机载大气数据传感器基本工作原理与运行模式

机载大气数据传感器依托大气动力学相关机理开展参数采集, 通过感应机体外部气流压力、温度等物理量, 完成空域核心参数的实时解算。设备依靠探头结构捕捉气流信号, 将物理信号转化为可识别的电信号, 经由内部运算单元完成数据转换与输出。整套运行流程保持连续循环状态, 跟随飞行器飞行姿态与空域环境变化持续更新数据。设备长期处于高频连续的工作模式, 对大气介质稳定性与气流状态平稳性具备较高要求, 稳定

的外界环境是保障数据采集精度的基础条件。

1.3 极端气象对传感器运行状态的扰动机制

极端气象引发的大气参数异变, 会从信号采集、传输与解算多个环节干扰传感器工作。气流湍流会打乱探头表面的气流流线, 造成感应信号出现无序波动。低温结冰会改变探头外形结构, 堵塞感应通道, 削弱设备对大气信号的捕捉能力。高湿雾气会在探头表层形成水膜, 改变信号感应的接触介质, 引发采集信号偏移。各类气象扰动会改变传感器输入信号的真实状态, 让内部运算单元获取的原始数据存在偏差, 间接干扰设备整体运行精度。

1.4 复杂气象场景下传感器工作状态变化规律

大气环境的动态波动, 会让传感器工作状态呈现明显的动态变化特征。气象扰动强度偏弱时, 设备运行状态相对平稳, 数据偏差维持在较小范围。气象扰动持续加剧后, 信号波动幅度逐步提升, 数据紊乱程度不断加剧。不同类型的极端气象会催生差异化的设备异常表现, 湍流多引发数据高频波动, 结冰多造成数据整体性偏移。环境状态的持续改变, 让传感器工作精度处于动态浮动状态, 整体运行稳定性大幅下降。

2 极端气象下机载传感器故障诱因与辨识难点分析

2.1 气象环境胁迫引发的传感器异常诱因

极端气象环境会持续对机载传感器形成外部胁迫作用, 催生各类数据异常与工作故障。强湍流气流会持续冲击传感探头, 造成气流感应状态无序波动, 干扰压力与温度信号的正常采集。低温结冰环境会在探头表面形成凝冰结构, 堵塞感应孔隙, 改变探头原本的气流感应形态。高湿浓雾天气会提升空气介质黏性, 水汽附着在传感元件表层, 弱化信号感应灵敏度^[2]。剧烈的温度与气压突变, 会让传感器内部元件处于频繁交变的工作

状态,加速元件性能衰减。持续的环境胁迫会逐步打破设备稳定运行状态,诱发间歇性、突发性的传感异常问题。

2.2 传感器自身结构特性带来的故障诱发条件

机载大气数据传感器整体结构精密,内部感应元件、传导通道与转换模块对工作环境敏感度较高。探头多为镂空精密结构,对外界异物遮挡、结构形变与介质变化具备极低耐受度。内部传感元件长期高频响应外界大气参数变化,持续处于动态负荷运行状态。精密集成化的设计方式压缩内部结构冗余空间,抵抗外界扰动的能力较弱。飞行过程中的气流冲刷、结构振动会累积细微结构损伤,在极端气象环境的叠加作用下加速暴露,成为设备故障滋生的内在基础条件。

2.3 极端工况下故障与气象干扰的混杂特征

极端气象工况中,环境干扰信号与设备故障信号会相互交织叠加,形成复杂的信号混杂状态。气象扰动带来的数据波动具备随机性、无规律的动态特征,会完全覆盖微弱的故障信号特征。设备早期故障引发的数据偏移、波动畸变,与气象干扰造成的数据异常表现高度相似。两类信号的特征边界趋于模糊,无法依靠直观数据变化区分信号来源。混杂的信号形态会掩盖设备真实故障趋势,让异常状态难以有效区分,大幅提升故障识别的整体难度。

2.4 现有故障辨识模式的适配短板与局限

常规故障辨识体系依托平稳大气环境搭建,识别逻辑针对典型故障特征设计,适配常规飞行工况。辨识标准多依据固定信号特征阈值开展异常判定,难以应对动态多变的极端气象场景。复杂工况下信号形态持续变化,固定判定规则无法适配信号特征的动态演变,无法剥离环境干扰对辨识结果的影响。传统模式难以区分环境扰动与设备故障带来的差异化信号变化,极易出现异常误判、故障漏判问题,难以满足极端气象条件下传感器故障精准辨识的工作需求。

3 机载大气数据传感器故障辨识关键技术

3.1 传感器运行状态数据特征提取方式

机载大气数据传感器在极端气象环境中输出的时序信号普遍存在杂乱性强、有效特征隐蔽的问题。常规浅层提取手段只能捕捉表层的数据波动变化,无法挖掘设备运行过程中潜藏的隐性异常,难以支撑高精度故障辨识工作。针对性的特征提取技术围绕信号深层信息挖掘展开,对空速、气压、温度等核心监测信号做系统性梳理与解析。依托时序信号的整体演化规律,甄别数据波动、趋势偏移、响应滞后等各类异常状态信息。筛选采

集链路中产生的冗余杂讯与无效信号分量,留存能够真实反映传感器运行状态的核心特征^[3]。精细化的提取流程可以有效剥离无序环境扰动带来的信号干扰,凸显设备异常对应的信号变化规律,为后续故障甄别工作筑牢扎实的前置技术基础。

3.2 气象干扰特征分离与剔除技术路径

极端气象诱发的气流扰动、温压突变等各类外界干扰,会深度混杂在传感器实时采集的监测信号当中。环境扰动催生的信号畸变会完全掩盖设备自身的故障特征,让异常辨识流程出现持续性偏差,严重干扰故障判定结果。专属干扰分离与剔除技术依托环境扰动、设备故障两类信号的本质属性差异,搭建科学完善的信号处理技术框架。结合气象干扰随机性强、波动无序、变化速率快的固有信号特点,建立针对性、分层化的信号筛分处理逻辑。通过逐级提纯的信号处理方式,逐步剥离各类气象因素催生的畸变分量,完整保留传感器本体运行的真实信号特征。持续优化混杂信号的净化处理流程,最大限度弱化复杂气象工况对传感数据品质的负面影响,有效解决极端场景下的信号混杂难题,为精准开展故障辨识提供纯净可靠的数据支撑。

3.3 多维度故障特征甄别与分类辨识技术

单一维度的判别方式覆盖范围有限,无法适配极端工况下多样化的传感器异常表现,识别盲区容易引发判别失误。多维度辨识技术跳出单一指标评判的局限,从信号幅值、波动形态、演化趋势、畸变类型等多个角度搭建完整判别体系。针对信号偏移、响应衰减、输出失真、无序抖动等各类异常形态,建立对应的特征判别标准,形成体系化的故障识别依据。利用多维度特征交叉校验的方式,弥补单一识别维度存在的短板。精准区分设备结构损伤、元件性能衰减、信号传输异常等不同故障类型,提升复杂混杂工况下故障分类的精细程度与判别准确度。

3.4 动态工况下传感器故障识别研判机制

飞行空域的气象工况处于持续动态演变的状态,固定固化的静态研判规则难以适配不断变化的复杂环境,适配性短板在极端场景中会持续凸显。动态研判机制结合复杂工况的演变规律重构识别逻辑,彻底摆脱传统静态判定模式的束缚。依据外界气象扰动的强弱变化,灵活调整特征判别阈值与识别权重,适配不同复杂程度的飞行作业场景。搭建连续性时序研判逻辑,结合阶段性信号的整体演变趋势综合判定设备运行状态,规避瞬时信号随机波动引发的误判问题。灵活可调的动态研判模式可以充分适配多变的极端气象环境,让故障识别逻辑

贴合现场工况实时调整,保障机载传感器故障辨识工作在全飞行阶段维持稳定、精准的运行状态。

4 极端气象条件下故障辨识体系的优化提升路径

4.1 故障辨识特征体系的精细化完善方式

常规故障辨识特征体系大多依托平稳空域环境搭建,特征维度较为单一,仅可适配常规飞行工况的故障识别需求。面对极端气象引发的复杂信号畸变,原有体系对渐进式、间歇性的微弱故障识别能力不足,大量隐性异常特征容易被环境扰动信号覆盖。针对这类短板,可对现有特征框架进行精细化扩充升级,新增多项时序变化、信号畸变、响应偏移相关的特征指标,丰富异常状态的识别维度^[4]。结合湍流、低温积冰、强温压波动等四类典型极端气象场景,设置差异化的层级判定标准,有效拓宽特征体系的环境适配范围。完善后的特征框架能够有效提升复杂工况下的故障甄别精度,大幅降低异常误判与漏判的发生概率。

4.2 气象干扰适配型辨识算法的改良思路

传统辨识算法运算逻辑固化,参数调节空间狭小,抗干扰性能难以适配高扰动极端气象场景。复杂气象环境产生的杂乱信号会干扰算法特征提取流程,造成有效故障特征提取不完整,直接拉低整体辨识精度。算法改良围绕环境自适应能力展开优化,重构信号预处理与特征提取的核心模块。针对不同类型的气象干扰重新调校筛选阈值,加深深层故障特征的挖掘程度,强化对无序杂讯的过滤效果。合理调整特征增益配比,重点保留设备自身产生的异常信号分量,压制环境扰动带来的无效信号。改良后的算法可有效适应不同强度的气象扰动,提升复杂工况下故障辨识工作的稳定性。

4.3 多源数据融合的故障辨识模式优化

单一传感数据承载的信息维度有限,极端气象工况下极易出现信号失真,单独依靠单路数据开展故障研判存在较大识别盲区。多源数据融合模式打破传统单维度识别局限,整合机载空速、气压、温度、迎角等多路传感数据,构建多维一体化辨识分析框架。打通不同传感通道的数据交互壁垒,实现多类监测信息的互补联动。依托参数间的内在关联规律开展交叉核验,精准区分环

境扰动虚假异常与设备真实故障,弥补单源数据识别稳定性不足的缺陷。融合模式可全面提升复杂气象场景下的故障识别可信度,适配多变的飞行工况。

4.4 全时段动态故障辨识体系的构建策略

传统辨识模式采用间歇式采样研判方式,监测流程存在明显时段空缺,无法覆盖全程动态变化的气象工况,短时突发的传感器故障难以被及时捕捉。全时段动态辨识体系重构整体运行逻辑,搭建连续不间断的数据采集、特征分析与状态研判链路。结合实时气象环境的波动特征灵活调整辨识权重与判定标准,适配复杂飞行工况的动态演化特点。依托长时序连续数据的变化趋势综合判别设备运行状态,规避瞬时信号波动引发的判定偏差^[5]。整套体系能够全方位适配各类极端气象场景,实现机载传感器故障的常态化、精准化辨识。

结束语

极端气象环境下机载大气数据传感器的故障辨识,始终是飞行探测领域需要持续优化的核心环节。从环境扰动特征、设备运行规律、信号甄别逻辑等多个维度出发,逐步完善复杂工况下的异常识别框架,能够有效剥离气象干扰对传感信号的负面影响,精准捕捉埋藏在杂乱数据中的设备异常特征。整套适配极端场景的辨识体系落地应用后,可大幅提升机载大气数据探测系统在复杂空域环境下的运行稳定性,为各类极端气象条件下的飞行安全保障提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]唐杰,刘清倦,李振宇,等.机载下投式探空温度传感器设计与研究[J].中国科技论文,2026,21(2):148-160.
- [2]毛家龙,刘清倦,潘旭,等.机载探空温度传感器设计与研究[J].电子测量技术,2024,47(13):1-9.
- [3]章拔邦.微型大气数据机载系统的设计研究[J].中国航班,2025(8):44-46.
- [4]孙丽,杨洋.高精度大气污染物检测系统的设计与实现[J].仪器仪表学报,2024,40(2):112-119.
- [5]陈浩天.新型传感技术对提升空气质量监测精确度的研究进展[J].现代电子技术,2025,38(1):78-83.