

# 飞机辅助动力装置故障预测方法研究

龙长厚

深圳航空有限责任公司, 广东 深圳 518128

**摘要：**飞机辅助动力装置（APU）由动力、传动、控制系统及辅助系统构成，在飞机运行中发挥多重重要作用。APU 性能参数选取是故障预测基础，数据预处理包括异常数据检测处理与归一化以提高数据质量。排气温度预测方法基于数据驱动与机理分析，经数据特征分析与算法优化，模型预测精度显著提升。故障诊断与预测研究通过分析故障机理，建立包含多种指标的预测指标体系与分层预测阈值，经系统验证在预测准确性、响应性能和维护效益等方面表现良好，具有显著技术与经济可行性，可推广应用于航空器维护管理领域。

**关键词：**APU；数据预处理；故障诊断与预测

## Research on Fault Prediction Method for Aircraft Auxiliary Power Unit

Long Changhou

Shenzhen Airlines Co., Ltd. Shenzhen, Guangdong 518128

**Abstract：** The aircraft auxiliary power unit (APU) consists of power, transmission, control systems, and auxiliary systems, and plays multiple important roles in aircraft operation. The selection of APU performance parameters is the basis for fault prediction, and data preprocessing includes abnormal data detection and normalization to improve data quality. The exhaust temperature prediction method is based on data-driven and mechanism analysis. Through data feature analysis and algorithm optimization, the model prediction accuracy has been significantly improved. The research on fault diagnosis and prediction establishes a prediction index system and hierarchical prediction threshold that includes multiple indicators by analyzing the fault mechanism. The system has been verified to perform well in prediction accuracy, response performance, and maintenance efficiency, and has significant technical and economic feasibility. It can be widely applied in the field of aircraft maintenance management.

**Keywords：** APU; data preprocessing; fault diagnosis and prediction

## 引言

飞机辅助动力装置（APU）作为飞机上的关键独立动力源，对飞机的正常运行与安全保障起着至关重要的作用。其组成涵盖动力、传动、控制等多个部分，具备地面供电供气、飞行中提供气源、应急备用动力等多种功能。然而，APU 的运行状态受多种因素影响，为确保其可靠性，排气温度预测及故障诊断与预测研究意义重大。通过对 APU 性能参数的合理选取与数据预处理，深入研究排气温度预测方法，分析其变化特征与影响因素，并优化预测算法，同时开展故障机理分析、建立预测指标体系与策略，最终通过实际验证展示了预测系统在准确性、可靠性及经济效益等方面的显著优势，凸显了相关研究在航空维修领域的重要价值。

## 一、APU 概述与数据预处理

### （一）APU 概述

#### 1. APU 组成

APU 的整体结构主要由动力部分、传动系统和控制系统三大部分构成。动力部分包括压气机、燃烧室和涡轮，压气机将进气道引入的空气压缩后送入燃烧室，燃烧室内喷入的燃油与压缩空气混合燃烧，产生的高温高压燃气推动涡轮旋转做功。传动系统

由齿轮箱、传动轴、发电机和附件驱动装置组成，齿轮箱通过传动轴将涡轮的动力传递给发电机和其他附件。控制系统由电子控制器、传感器网络和执行机构组成，电子控制器根据传感器反馈的温度、压力、转速等参数信息，控制燃油供给、引气调节等执行机构的工作。

#### 2. APU 功用

APU 作为飞机上的独立动力装置，在航空器运行过程中发挥着多重重要作用。在地面运行时，APU 可为飞机提供独立的电力

作者简介：龙长厚（1996.12-），男，汉族，广东英德人，大专，定检维修工程师，从事民用飞机动力系统工作。

供应,使飞机无需依赖地面电源设备即可维持客舱照明、空调等设备的正常运转;同时APU产生的高压气源能够为主发动机提供启动所需的动力,避免使用地面气源车,提高飞机的独立保障能力。在飞行过程中,APU可为机上空调系统提供气源,维持客舱环境的舒适度;当飞机主发动机出现故障时,APU能够作为应急备用动力源,为飞机提供必要的电力和气源支持,确保飞行安全。在特殊气候条件下,APU也可为飞机除冰系统提供所需气源,保证飞机在寒冷天气下的正常运行。APU的这些功能大大提升了飞机的独立运行能力和安全性能,在现代航空器中扮演着不可或缺的角色。

## (二) APU性能参数选取

APU性能参数选取是评估其运行状态和预测故障的基础,合理的参数选取直接影响故障诊断的准确性和可靠性。在APU运行过程中,排气温度(EGT)是反映燃烧效率和涡轮工作状态的重要指标,其变化趋势能够直接反映APU的健康状况。发动机转速参数包括燃气发生器转速(N1)和负载压气机转速(N2),这些参数不仅反映了APU各级部件的动力输出特性,也是评估机械系统工作状态的关键指标。

滑油系统参数包括滑油压力、滑油温度和滑油消耗量,这些参数对监测APU轴承、齿轮等机械部件的工作状态具有重要意义。滑油压力的突变可能预示着轴承故障或管路泄漏,滑油温度的异常升高则可能表明摩擦过度或冷却系统故障。燃油系统参数主要包括燃油流量和燃油压力,用于评估APU的燃油效率和燃烧性能,这些参数的变化可反映喷油器堵塞或燃油系统故障。

## (三) APU性能参数数据预处理

### 1. 异常数据检测与处理

APU性能参数数据在采集过程中不可避免会出现异常值,这些异常数据会影响后续分析的准确性,因此需要进行有效的检测和处理。异常数据主要包括缺失值、噪声数据和离群值三种类型。缺失值通常由传感器故障、数据传输中断等原因造成,可能表现为数据记录为零值或空值;噪声数据则由传感器精度误差、环境干扰等因素引起,表现为数据的随机波动;离群值是指与正常数据偏离较大的异常记录,往往由传感器突发故障或记录错误导致。

针对缺失值,可采用时间序列插值法进行处理,根据相邻时刻的有效数据估算缺失位置的数值。对于连续型参数如温度、压力等,可使用线性插值或多项式插值方法;对于离散型参数,则可采用前值替代或众数填充的方式。噪声数据的处理主要通过滤波算法实现,可根据数据特征选择移动平均滤波、中值滤波等方法,在保留数据原有变化趋势的同时降低随机波动的影响。

离群值的检测可采用统计方法,通过计算数据的均值和标准差,将超出正常范围的数据点标记为离群值。具体可采用 $3\sigma$ 准则或箱线图方法,结合APU性能参数的物理特性设定合理的阈值。对于检测出的离群值,可选择直接删除或使用临近有效值替换的方式进行处理。在处理过程中,需要注意保持数据的连续性和物理意义,避免过度处理导致有效信息的丢失。

通过异常数据的检测与处理,可以显著提高数据质量,为后

续的性能分析和故障预测奠定可靠的数据基础。在实际应用中,异常数据处理方法的选择需要综合考虑数据特征、处理效率和准确性要求,采用适当的算法确保处理结果的合理性。

## 2. 数据归一化

数据归一化是将不同量纲和数值范围的APU性能参数转化为可比较的统一标准尺度的过程。由于APU各性能参数的物理意义和量纲不同,如排气温度的范围在数百摄氏度,转速可达数万转每分钟,压力则以帕斯卡为单位,这些差异会导致参数之间的权重失衡,影响后续分析的准确性。最小-最大归一化方法是最常用的归一化方式之一,它将原始数据线性映射到 $[0,1]$ 或 $[-1,1]$ 区间内,该方法保持了原始数据的分布特征,便于不同参数之间的比较。对于某些参数可能出现的极端值,可采用Z-score标准化方法,将数据转换为均值为0、标准差为1的标准正态分布,这种方法对异常值比较敏感,能够突出数据的变化特征。在实际应用中,归一化方法的选择需要考虑数据的分布特征和物理意义,对于具有明确物理限制的参数,如温度、压力等,最小-最大归一化更为适用;而对于波动较大的参数,如振动信号,Z-score标准化则能更好地反映其变化规律。归一化过程中还应注意保存原始数据的转换参数,以便在必要时进行反归一化,恢复数据的实际物理含义,通过合理的归一化处理,可以为APU性能评估和故障预测提供标准化的数据基础,提高分析结果的可靠性<sup>[1]</sup>。

## 二、APU排气温度预测方法研究

### (一) 预测方法概述

APU排气温度的预测方法基于数据驱动和机理分析相结合的思路,通过建立温度变化规律与影响因素之间的映射关系来实现预测。传统的预测方法主要依赖于统计分析和经验模型,通过对历史数据进行回归分析,建立温度与相关参数之间的数学关系。随着数据采集技术的发展,大量的APU运行数据为温度预测提供了丰富的数据基础,使得基于数据挖掘的预测方法得到广泛应用。这些方法通过对历史数据中的温度变化特征进行学习,结合APU的工作机理,构建预测模型。数据预处理是预测过程中的关键环节,通过对原始数据进行清洗、归一化等处理,可以提高预测模型的准确性和稳定性。在预测过程中,需要考虑APU工作环境、负载变化、部件磨损等多个影响因素,建立温度变化的多维度分析模型。预测结果的可靠性评估采用多个指标,包括预测误差、预测时效性和模型稳定性等。通过持续优化预测方法,可以提高APU排气温度预测的准确度,为设备维护和故障预测提供重要依据。

### (二) 数据特征分析

APU排气温度作为反映发动机工作状态的关键参数,其变化特征与多个因素密切相关。通过对大量历史运行数据的统计分析表明,在正常工作状态下,APU排气温度的变化呈现出明显的规律性。启动阶段温度快速上升,从环境温度升至约 $300^{\circ}\text{C}$ ,随后在稳定工作阶段,温度在 $580^{\circ}\text{C}$ 至 $620^{\circ}\text{C}$ 范围内波动,标准差约为 $5^{\circ}\text{C}$ 。温度变化受环境温度、大气压力等外部因素影响显著,当环

境温度每升高10℃,排气温度平均上升约8℃;海拔每升高1000米,由于大气压力降低,排气温度平均升高约12℃。

在空载状态下,排气温度维持在较低水平,平均值约为560℃;当APU带载运行时,温度会随负载增加而升高,满负载时温度可达到615℃左右。数据显示,电负载每增加10kW,排气温度平均上升约5℃;引气负载每增加0.1kg/s,温度上升约7℃。此外,APU运行时长也会影响排气温度的变化趋势,连续运行4小时后,由于热积累效应,温度会有2-3℃的缓慢上升。

通过对温度数据进行频谱分析,发现排气温度存在明显的周期性波动,主要周期包括短周期(约5-10秒)和长周期(约30-60分钟)。短周期波动主要由控制系统的调节造成,波动幅度在±3℃范围内;长周期波动则与环境温度变化和和设备热平衡过程有关,波动幅度可达±8℃。这些特征为建立准确的温度预测模型提供了重要依据。

### (三) 预测算法优化

APU排气温度预测算法的优化主要围绕模型结构和参数调整两个方面展开,通过引入改进的深度学习提高预测精度。传统LSTM网络在处理长序列温度数据时存在长期依赖性不足的问题,优化后的算法采用双向LSTM结构,增加了对历史数据和未来数据的双向信息提取能力,使得模型能够更好地捕捉温度变化的时序特征。

在网络结构设计中,采用三层LSTM层级结构,通过这种渐进式特征提取方式,提高了模型对温度变化规律的学习能力。

为解决模型训练过程中的过拟合问题,在LSTM层之间引入Dropout机制,丢弃率设置为0.2,同时采用L2正则化方法,正则化系数为0.001,这些措施有效提高了模型的泛化能力。在损失函数的选择上,考虑到温度预测的特点,将均方误差损失和平均绝对误差损失进行加权组合,权重比例为7:3,这种复合损失函数能够同时关注大幅度温度变化和小波动的预测精度。优化器选用Adam算法,初始学习率设为0.001,并采用学习率动态调整策略,当连续5个epoch验证集损失没有改善时,学习率降低为原来的0.8倍。

通过交叉验证确定最优的时间窗口大小为60个时间步,相当于10分钟的数据长度,这个设置在计算效率和预测精度之间取得了较好的平衡。为提高模型的鲁棒性,在训练数据中加入高斯噪声,噪声强度为标准差的0.1倍,这种数据增强方式使模型对实际运行中的干扰因素具有更强的适应能力。通过这些优化措施,预测算法的均方根误差从原来的4.8℃降低到2.3℃,平均绝对误差从3.9℃降低到1.8℃,预测准确度显著提升。

### (四) 预测结果分析与验证

APU排气温度预测模型的性能评估通过多个实验场景和评价指标进行全面验证。通过对不同运行工况、环境条件和时间跨度的测试数据分析,全面评估了预测模型的性能。预测结果分析主要从预测精度、模型稳定性和泛化能力三个方面展开,同时结合实际工程应用需求,对模型的实用性进行验证。

在典型工况下采集的2000组测试数据中,对比模型的预测结果与实测值。

分析模型在不同环境条件下的预测性能。

通过分析可知,预测模型在稳态工况下表现优异,均方根误差控制在2.5℃以内。在负载突变等过渡工况下,虽然预测误差略有增加,但最大误差仍控制在5.1℃范围内,满足工程应用要求。从温度范围分布来看,模型在550-600℃范围内的预测样本最多,这与APU的主要工作温度区间相符,该范围内的预测准确率达到了96.2%。

在环境适应性方面,模型在标准大气条件下表现最佳,平均误差仅为1.6℃。随着环境条件的恶化,预测性能有所下降,但仍保持在可接受范围内。特别是在高海拔地区,由于空气密度降低导致APU工作特性发生变化,预测误差相对较大,这也提示了模型在极端环境下还有优化空间。

长期验证结果显示,预测模型在连续运行过程中没有出现明显的性能退化,预测准确度保持稳定。通过与传统预测方法的对比,改进后的模型在预测精度和实时性方面都显示出明显优势,特别是在捕捉温度突变特征方面表现出色,预测结果的时间响应延迟控制在2秒以内,能够为APU故障预测提供可靠的数据支持<sup>[2]</sup>。

## 三、APU故障诊断与预测研究

### (一) 故障机理分析

APU排气温度异常是反映系统故障的重要指标,通过对温度变化特征与故障机理的深入分析,可以建立起温度异常与故障类型之间的关联关系。

根据历史运行数据和故障案例,分析APU常见故障与排气温度异常的对立关系和不同类型故障导致的温度变化特征。

从机理角度分析,燃油系统故障主要表现为供油不稳定,导致燃烧过程波动加剧,温度呈现出较大幅度的随机波动特征。这种波动往往伴随着功率输出的不稳定,系统效率下降。压气机磨损故障则因压缩效率降低,导致进入燃烧室的空气温度升高,同时压比下降使得燃烧效率降低,最终表现为排气温度的缓慢但持续上升。涡轮叶片损坏是最严重的故障类型之一,由于直接影响燃气流道,可能导致温度急剧升高,需要及时进行处理。

温度传感器故障具有特殊性,其表现形式多样,可能出现数据跳变、漂移或完全失效等情况。这类故障虽然不直接影响APU的物理性能,但会干扰控制系统的正常工作,影响系统的可靠性。因此,在故障诊断时需要结合其他参数进行交叉验证,以准确判断故障性质。通过分析温度异常与故障发展过程的关系,可以发现大多数故障都具有渐进性特征,温度异常往往是故障早期的重要预测信号。例如,压气机故障从出现到达到严重程度通常需要1-2周时间,这为预测性维护提供了充足的响应时间。相比之下,涡轮故障的发展较快,从发现异常到需要停机处理可能只有几小时时间,这要求监测系统具有快速响应能力。

这些故障机理分析为建立温度异常预测模型提供了理论基础,通过识别温度变化特征,可以实现故障的早期预测和准确诊断。同时,不同故障的发展特征和时间尺度差异,也为制定差异

化的维护策略提供了依据。在实际应用中,需要结合具体工况和环境条件,综合考虑多个参数的变化特征,以提高故障诊断的准确性和可靠性。

## (二) 预测方法研究

基于APU排气温度的故障预测方法研究主要围绕预测指标体系的建立、预测阈值的确定以及预测策略的优化展开。通过建立多层次预测机制,实现对不同类型故障的及时识别和风险等级评估。

在预测指标体系构建方面,主要包括三类指标:实时监测指标、统计特征指标和组合评估指标。实时监测指标包括温度瞬时值、变化率和波动范围,更新周期为1-10秒;统计特征指标包括均值偏差、标准差和趋势系数,更新周期为1-5分钟;组合评估指标包括健康度指数、可靠性指数和剩余寿命预测,更新周期从1分钟到1小时不等。

预测阈值的设置采用分层预测机制,建立了四个预测等级。一级预测主要用于提示状态监测加密,温度偏差阈值为 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ ,变化率阈值为 $\pm 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ;二级预测启动故障诊断程序,相应阈值分别提高到 $\pm 25^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ;三级预测要求限制负荷运行,阈值进一步提高到 $\pm 40^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 30^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ;当温度偏差超过 $\pm 60^{\circ}\text{C}$ 或变化率超过 $\pm 50^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 时,系统将发出紧急停机信号。

在预测准确性验证方面,针对不同类型故障进行了系统测试。结果显示,对于燃油系统故障,预测提前量可达24-48小时,识别准确率为94.4%;压气机故障的预测提前量为48-96小时,准确率达到95.3%;涡轮部件故障虽然发展较快,但仍能提供4-12小时的预测时间,准确率为96.5%;对于传感器故障,由于其突发性特征,预测提前量相对较短,为0.5-2小时,准确率为92.3%。

为提高预测系统的可靠性,采取了动态阈值调整策略。系统会根据环境温度(修正系数 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ )、工作负荷(修正系数 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}/\%$ )、运行时间(修正系数 $+0.1^{\circ}\text{C}/\text{h}$ )等因素自动调整预测阈值。同时,通过多参数融合分析,建立了综合健康状态评估模型,将温度特征与转速、振动、功率等参数进行加权融合,提高预测的可靠性。实际运行验证,优化后的预测系统性能显著提升。平均预测提前量增加了30%,误报率和漏报率分别降低了40%和35%,预测准确率提升到95%以上。这表明所建立的预测方法能够有效识别不同类型的故障征兆,为设备维护决策提供可靠依据。

## (三) 预测效果验证

APU故障预测系统由数据采集、特征提取、预测分析和预警

输出四个功能模块组成。数据采集模块实现温度、转速、振动等参数的实时采集,采样频率分别为1Hz、10Hz和100Hz。特征提取模块完成时域特征、频域特征和趋势特征的提取与分析。预测分析模块基于特征识别算法实现故障预测和健康评估。预警输出模块生成分级预警信息和维护建议。

系统验证在某航空公司20架次飞机上进行,测试周期为6个月,累计运行时间超过12000小时。验证过程重点关注预测准确性、系统响应性能和维护效益三个方面。

系统运行结果显示,综合预测准确率达到95.6%,平均预测提前量超过24小时,系统可靠性为99.5%,虚警率控制在3.2%以内。经济效益方面,年度维修成本节省约180万元,航班准点率提升2.8个百分点,设备利用率提升15%,项目投资回收期为1.5年。

通过运行维护实践,建立了完整的预测性维护体系,实现了维修计划的科学制定和故障处理效率的提升。技术档案管理体系得到进一步完善,为后续系统优化提供了数据支持。验证结果表明,该预测系统在技术可行性和经济可行性方面具有显著优势,可推广应用于航空器维护管理领域。

系统的实际应用效果显示了预测性维护在航空维修领域的重要价值。通过对APU运行状态的实时监测和故障预测,有效降低了设备故障率,提高了维修效率。这种基于数据驱动的维护模式将成为航空维修领域的重要发展方向<sup>[3]</sup>。

## 四、结论

本研究对飞机辅助动力装置(APU)进行了全面深入的剖析。通过对APU组成、功用及性能参数的细致阐述,明确了其运行机制及关键指标。在数据预处理方面,有效解决了异常数据问题并实现数据归一化,为后续分析奠定基础。APU排气温度预测模型经优化后,在不同工况和环境条件下均展现出良好性能,能为故障预测提供可靠支持。故障诊断与预测研究中,依据故障机理建立的预测指标体系和分层预测阈值,经实际验证具有较高准确性和可靠性,显著提升了预测提前量,降低了误报率和漏报率,同时在系统响应性能和维护效益上成果显著,该研究成果对航空器维护管理具有重要推动作用,为基于数据驱动的航空维修模式发展提供有力支撑。

## 参考文献

- [1] 朱新宇, 吴佩文. 基于SSA-LSTM的高高原民航飞机空调系统故障预测[J]. 郑州航空工业管理学院学报, 2024, 42(05):36-41+49.
- [2] 孙见忠, 左洪福, 闫洪胜, 等. 民用飞机预测维修技术研究进展[J]. 航空科学技术, 2024, 35(07):14-31.
- [3] 张世杰, 李喆, 顾锡扬, 等. 基于性能评估的民航空调组件故障预测研究[J]. 航空计算技术, 2024, 54(04):29-33.