

文章编号: 1000-8055(2026)10-20250064-17

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20250064

直升机传动系统主减速器健康监测 技术研究进展

刘文正¹, 朱如鹏¹, 朱欣华², 李苗苗¹, 周文广¹, 余亦曦²

(1. 南京航空航天大学 直升机传动技术国家级重点实验室, 南京 210016;

2. 中国航发湖南动力机械研究所 直升机传动技术国家级重点实验室, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 随着低空经济的快速发展和直升机应用场景的不断拓展, 直升机的安全性、维护性和可靠性要求持续升级。主减速器作为直升机传动系统的核心部件, 其健康状态直接影响整机服役寿命与飞行安全。然而, 主减复杂的结构与苛刻的工况使得健康监测面临信号成分复杂、特征提取困难、传感器布置受限等挑战。近三十年来, 围绕直升机主减速器健康监测技术开展了大量研究, 主要涵盖振动信号处理、状态监测指标、传感器技术、机器学习与数字孪生等方向。通过对比分析各类技术的优势边界与适用局限, 总结未来研究应聚焦于构建系统化全域研究体系、发展多源传感信息融合技术、增强状态指标物理可解释性, 深化数字孪生及迁移学习的工程化应用。研究成果可为主减速器健康监测系统的优化提供技术支撑, 提升直升机安全性、可靠性及维护效率。

关 键 词: 直升机; 主减速器; 健康监测; 信号处理; 智能诊断

中图分类号: V275.1; TP306.3

文献标志码: A

Research progress on health monitoring technology for helicopter main gearbox in transmission systems

Liu Wenzheng¹, Zhu Rupeng¹, Zhu Xinhua², Li Miaomiao¹, Zhou Wenguang¹, She Yixi²

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission,

Hunan Aviation Powerplant Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: With the rapid growth of the low-altitude economy and expanding helicopter applications, demands for safety, maintainability, and reliability are increasing. As the core of the transmission system, the main gearbox's health directly impacts service life and flight safety. However, its complex structure and harsh operating conditions pose challenges such as signal complexity, feature extraction difficulties, and sensor placement limitations. Over the past three decades, research on helicopter main gearbox health monitoring has focused on vibration signal processing, condition monitoring indicators, sensor technology, machine learning, and digital twins. Studies have analyzed the advantages and limitations of these technologies. Future efforts should emphasize establishing a systematic research framework, advancing multi-source sensor fusion, enhancing the interpretability of condition monitoring indicators, and

收稿日期: 2025-02-10

基金项目: 某传动预研专项(KY-1044-2023-0493)

作者简介: 刘文正(1997—), 男, 工程师, 博士, 从事直升机传动系统动力学及健康监测研究。E-mail: wz_liu@nuaa.edu.cn

通信作者: 朱如鹏(1959—), 男, 教授, 博士, 从事航空动力传动技术、先进机械结构和系统设计理论研究。E-mail: rpzhu_nuaa@163.com

引用格式: 刘文正, 朱如鹏, 朱欣华, 等. 直升机传动系统主减速器健康监测技术研究进展[J]. 航空动力学报, 2026, 41(10): 20250064. Liu Wenzheng, Zhu Rupeng, Zhu Xinhua, et al. Research progress on health monitoring technology for helicopter main gearbox in transmission systems[J]. Journal of Aerospace Power, 2026, 41(10): 20250064.

promoting the engineering application of digital twins and transfer learning. These findings support optimizing main gearbox health monitoring systems, enhancing helicopter safety, reliability, and maintenance efficiency.

Keywords: helicopter; main gearbox; health monitoring; signal processing; intelligent diagnosis

随着航空技术的快速发展,直升机在低空空域的应用日益广泛,不仅在军事作战中发挥着不可替代的作用,还在低空经济的兴起中成为关键载体。作为低空经济的重要基础设施,直升机的可靠性、可维护性和安全性至关重要。主减速器作为直升机传动系统的核心部件,其运行状态直接关系到整机的使用寿命及飞行安全^[1]。近年来,多起直升机因齿轮箱故障导致的重大事故,再次凸显了主减速器健康监测的重要性。

2024 年 11 月, CV-22B“鱼鹰”直升机坠毁,造成 8 名美国空军特种作战司令部服役人员死亡,该机型随即被美军全面停飞^[2]。事故调查报告显示,事故源于齿轮箱内一个金属小齿轮的裂缝扩展,导致飞行过程中传动系统失效。2016 年 4 月,挪威 H225 Super Puma 直升机在特罗尔海坦海域坠毁,机上 13 人全部遇难^[3]。调查显示,事故起因是主减速器内部的疲劳裂纹在现有监测系统难以检测到的方式下扩展,最终导致灾难性失效。这些事故不仅揭示了齿轮箱故障的严重性,也推动了全球范围内对直升机健康监测技术的关注。

在过去的几十年里,西方国家对直升机健康与使用监测系统(health and usage monitoring system, HUMS)的研究与应用,取得了显著进展^[4]。HUMS 系统通过对直升机各关键部件的实时监

控,能够及时识别潜在故障,极大地提升了直升机的可靠性与战备性。然而,根据对我国直升机维修现状的调研可以发现,对传动系统的维护策略仍集中于定期返厂翻修的预防性维修策略,与西方军事国家还存在较大差距。随着我国新一代直升机的批量交付以及低空经济的快速发展,加快推进直升机健康监测技术的研究与工程应用已成为当务之急。

本文围绕直升机主减速器健康监测的关键技术展开系统性综述,涵盖振动信号处理、状态监测指标、传感器技术、机器学习与数字孪生等方面的研究进展。文章重点分析现有技术的优势与局限,并探讨未来可能的发展方向,为直升机健康监测体系的完善提供理论支撑和技术参考。

1 直升机主减速器结构特点及监测需求

1.1 主减速器结构特点

直升机主减速器是传动系统的核心部件,其主要功能是将发动机输出的高转速、低扭矩动力转换为旋翼所需的低转速、高扭矩动力,同时实现动力的转向和分配。如图 1 所示,主减速器通常采用齿轮传动结构,具备减速、转向及并车等功能,以满足不同飞行工况下的传动需求。由于

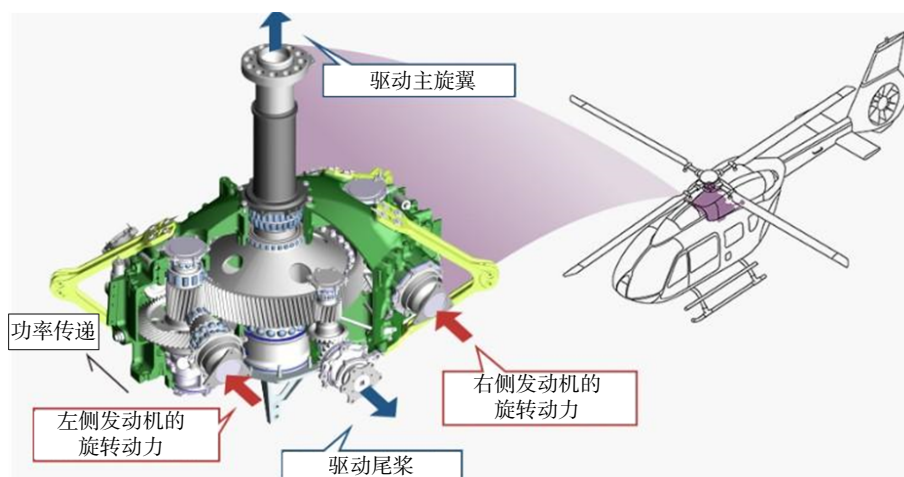


图 1 某型直升机主减速器结构^[8]

Fig. 1 Structure of the main gearbox of a certain type of helicopter^[8]

其承受高负荷且结构复杂,主减速器在设计上具有以下显著特点:

1) 主减速器通常采用多级齿轮传动,包括行星轮系、弧齿锥齿轮等。例如,Bell-204 直升机主减速器采用锥齿轮-两级行星齿轮的三级传动方式^[5]。

2) 直升机主减速器需要将发动机输出的高转速降至主旋翼适用的低转速,同时承受高扭矩负荷。例如直九型直升机使用的发动机转子转速达四万多转,而输出转速仅为 6 000 r/min^[6]。

3) 主减速器的高集成度机匣设计使齿轮、轴承及润滑系统紧密排列^[7]。此外,机匣外部通常设有加强筋、冷却通道等结构,这种紧凑的设计在提升性能的同时,也导致机匣表面结构复杂^[8]。

1.2 主减速器健康监测的难点分析

由于直升机主减速器结构的复杂性,增加了主减速器健康监测的难度,主要体现在:

1) 结构复杂导致信号成分复杂。主减速器内部包含多级齿轮传动、轴承及润滑系统,其紧密排列的高集成度设计使得振动信号、冲击噪声、干扰信号等相互耦合,导致监测信号成分复杂。此外,复杂的机匣结构会影响振动信号的传播路径,使得信号能量在传播过程中衰减,导致传感器采集的信号可能出现失真或耦合干扰。多对齿轮啮合的复杂传动链决定了故障频率呈现出复杂且独特的分布规律。

2) 传感器布置受限。主减速器内部结构紧凑,齿轮和轴承紧密排列,同时机匣的封闭性较强,传感器无法直接安装在关键部位,例如行星齿轮内圈及某些轴承部位^[9]。此外,在高速旋转部件上安装传感器还需要考虑惯性及电磁干扰影响。

3) 故障特征识别复杂。由于主减速器信号具有成分复杂,频谱混叠严重、噪声干扰大等特点,导致信号分析方法难以准确识别故障,尤其是早期故障。例如,在 SA330 直升机主减速器试验中,发现广泛应用的状态监测指标(condition indicator, CI)对早期轴承故障并不敏感^[10]。此外,不同部件之间的故障信号可能会出现相似的特征频率,这增加了健康监测的难度。

4) 数据驱动方法的局限性。数据驱动方法依赖高质量的训练数据,但由于主减速器的高可靠性,实际发生的故障案例较少。其次,数据驱动方法通常缺乏物理意义,难以解释模型的决策机制。

5) 恶劣工况对监测设备要求高。主减速器在高温、高振动等极端工况下运行,监测设备需

要具备较强的环境适应能力。

2 直升机主减速器健康监测的关键技术研究进展

2.1 振动信号处理技术

在直升机 HUMS 系统中,振动信号是实现主减速器健康监测的核心数据来源。通过齿轮箱中的加速度传感器采集振动数据,开发出的算法及状态指标可以检测齿轮损坏的发生并识别其特征。过去几十年里,研究者开发了多种基于振动的减速器部件损伤检测算法。深入理解故障机理是信号处理算法设计的关键,其核心建立在以下两点原则之上^[11]: ①由于旋转的周期性,大部分健康状态信息集中在有限的频率范围内;②根据组件的规格(如尺寸、类型等)可以计算其特征频率。

如图 2 所示,一般的振动信号分析通过筛选感兴趣的频段以减小干扰,利用角度重采样实现相位同步,结合信号增强手段突出关键特性,最终提取与健康状态相关的特征并生成健康指标,用于故障评估和分类。

基于上述过程,信号处理技术为实现直升机主减速器的健康监测奠定了基础,且现有的状态指标大多源于不同的信号处理方法。因此,本文首先总结了针对直升机传动系统主减速器的典型信号处理方法。

2.1.1 时域同步平均

时域同步平均(temporal synchronous averaging, TSA)是一种能够显著提升信噪比的信号处理技术,通过最小化测量周期信号中的非同步分量,减少其他旋转部件的干扰和随机噪声^[12]。在 TSA 方法中,信号被划分为连续的单个周期,并对这些周期进行平均,使得非同步部分表现为均值为零的随机分量^[13]。该技术流程如图 3 所示,其计算过程如式(1)进行计算^[14]。

$$s_a[n] = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} S[m \cdot N + n] \quad (1)$$

$$\text{Var}(s_a[n]) = \frac{1}{M^2} \sum_{m=0}^{M-1} \text{Var}(S[m \cdot N + n]) = \frac{\sigma^2}{M} \quad (2)$$

其中 s_a 代表计算的 N 个样本的同步平均值, M 为平均段数, m 表示信号段索引, n 为样本点索引, S 为周期中具有 $m \cdot N$ 个采样信号。假设随机噪声是独立同分布的,可以得出每个样本的原始方差从 σ^2 减小到 σ^2/M , 如式(2)所示。

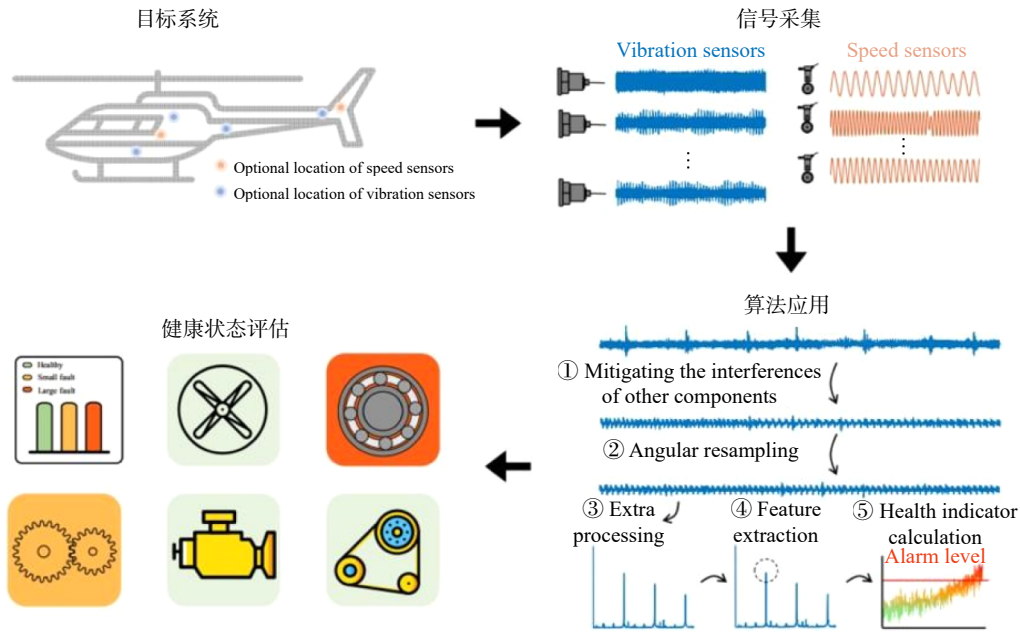


图 2 通过振动分析进行状态维护^[11]

Fig. 2 Condition-based maintenance through vibration analysis^[11]

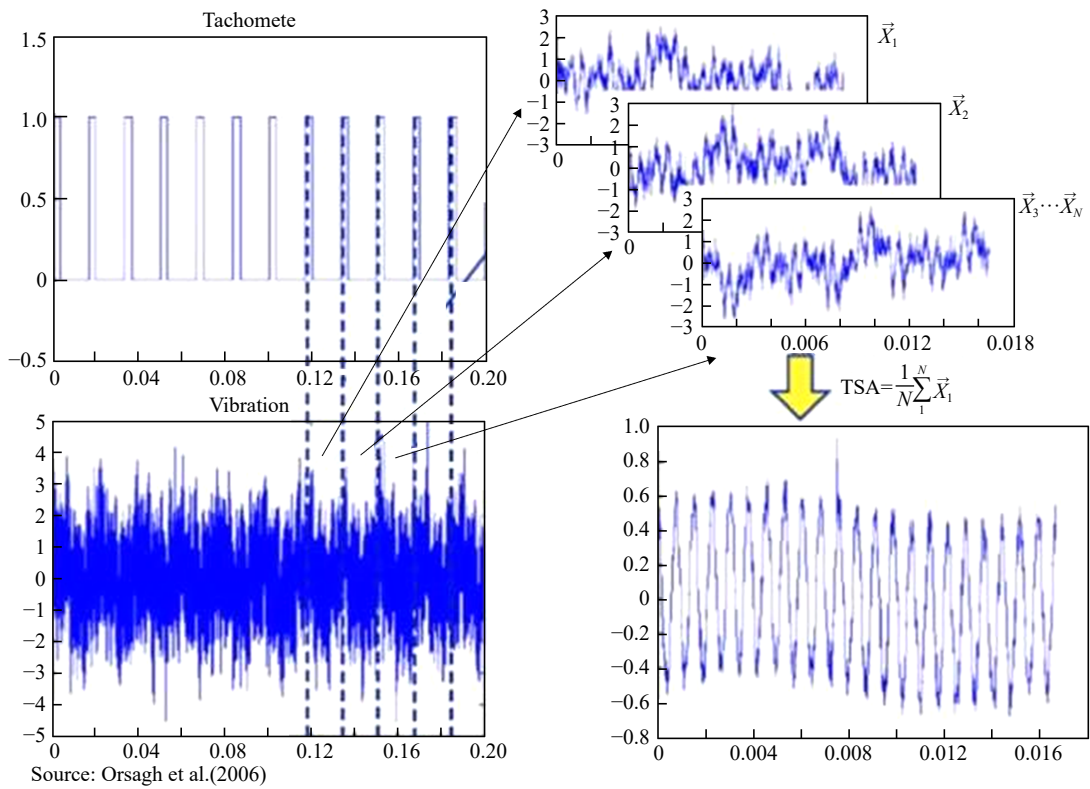
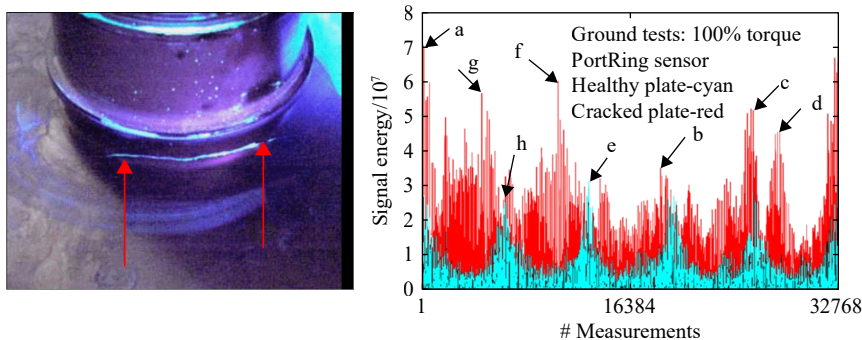


图 3 TSA 处理流程^[14]

Fig. 3 Flowchart of TSA Processing^[14]

TSA 技术在直升机主减速器健康监测应用中的有效性已得到广泛验证。Hood 等^[15] 针对 OH-58C 直升机的振动信号进行了 TSA 处理, 试验结果表明 TSA 具有较强的降噪能力, 并能够有效提取故障状态中的关键信息。此外, Sparis 等^[16] 于

2005 年针对美国陆军 UH-60A“黑鹰”直升机变速箱开展了研究, 聚焦于因油压低导致的裂纹问题, 如图 4 所示。研究基于地面与飞行测试数据, 探讨了裂纹引发的振动信号对理想 TSA 信号形态的影响, 并通过增强行星架旋转基频及其谐波,

图 4 UH-60A 变速箱底板裂纹引起的 TSA 能量变化^[16]Fig. 4 TSA energy variation caused by cracks in the bottom plate of the UH-60A gearbox^[16]

同时抑制其他周期信号和噪声,绘制了信号能量的波形图。

尽管 TSA 技术在健康监测中表现出较大的优势,但其应用仍存在一定的局限性。Mironov 等^[17]指出, TSA 及常见的振动数据分析算法通常需要高分辨率的相位信号,但大多数直升机仅配备转速计用于测量转速,而缺少相位指示器,这在一定程度上限制了 TSA 的精确度及应用范围。

2.1.2 差分信号及残差信号

差分信号与残差信号是直升机主减速器状态监测的关键信号处理方法,其统计特性被广泛用于健康状态评估。通过分析信号的统计分布,可有效识别机械部件的潜在故障。当待测信号包含一个完整的轴周期时,采用采样频率 $f_s = 1/(N \cdot \Delta t)$ 进行标准傅里叶变换,此方法确保傅里叶系数在轴频的整数倍处计算。随后,通过去除信号中的齿轮啮合频率及其谐波,再转换至时域,以提取故障相关信息。其中,残差信号通常指从原始振动信号中去除了正常运行状态下的周期性成分后所得到的信号。而差分信号是在残差信号的基础上进一步处理得到的信号,通过去除边频分量,使其更加聚焦于故障特征^[18]。

当齿轮出现故障时,差分信号与残差信号的直方图将呈现出不同的分布特性。例如,2006 年, NASA Glenn 研究中心^[18]通过飞行试验采集了 OH-58 直升机的振动信号,并利用安装在变速器外壳上的加速度计生成了差分信号。进一步分析中,研究人员^[19]计算了指标 FM4 的相对频率图,用于表征差分信号的特性。Liu 等^[20]基于差分信号进一步提出了齿轮故障的差分提取方法。差分信号及残差信号的应用通常与 FM4、NA4 等状态指标相结合,其具体内容将在后续章节详细介绍。

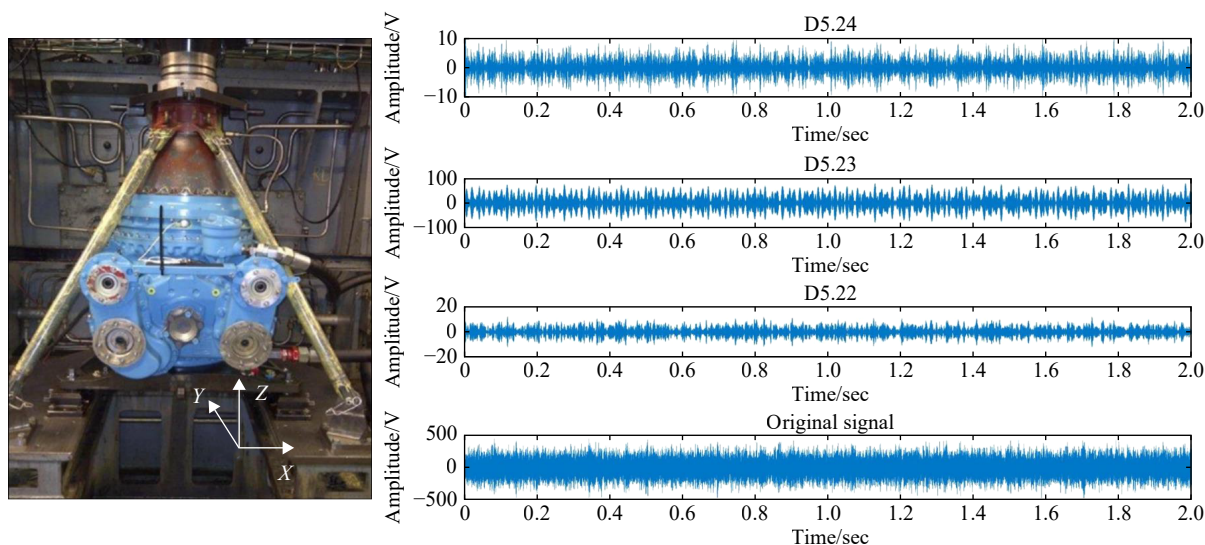
2.1.3 小波分析

小波分析(wavelet analysis, WA)作为傅里叶

分析的延伸,是一种兼具时间和频率局部化特性的信号处理方法。其窗口大小固定,但窗口形状、时间窗和频率窗可变,能够在低频部分实现较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,而在高频部分实现较高的时间分辨率和较低的频率分辨率。这种特点使小波分析非常适合检测正常信号中的瞬态异常并分析其成分。

近年来,研究者们针对直升机主减速器的故障特征,开发了多种基于小波分析的信号处理方法。Liu 等^[21]将离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)和神经网络相结合构建直升机主减速器故障诊断系统。Gouda 等^[22]提出了基于 Morlet 连续小波变换的分析指标,并将其用于 AH-64“阿帕奇”直升机变速箱的故障监测中。此外,中国人民解放军陆航学院^[23]利用小波降噪理论提出了一种基于小波重构的针对直升机振动信号的降噪方法。Hassan 等^[24]开发了一种基于母小波的多分辨率分析方法,并通过计算香农熵确定信息量最丰富的部分,该方法被成功应用于 AH-64D 直升机尾桨驱动轴的故障检测与诊断。此外,英国 Coventry 大学^[25]通过捕获 CS-29 类“A”型直升机试验台的振动测量结果,开发了一种基于小波包分解的滤波器频带选择方法,采用峰度与方均根值的组合指标最高的分解作为故障检测指标,用于检测主变速箱行星模块的轴承故障。图 5 展示了 CS-29 试验台以及该方法对非确定性信号的分解结果。

进一步地,波茨杰拉德大学^[26]开发了一种基于小波的神经网络。该方法结合了小波变换的时频局部化特性与神经网络的自学习能力,展现出强大的逼近与模式识别能力。通过这种融合,在直升机变速箱振动故障的诊断中表现出卓越的效果。

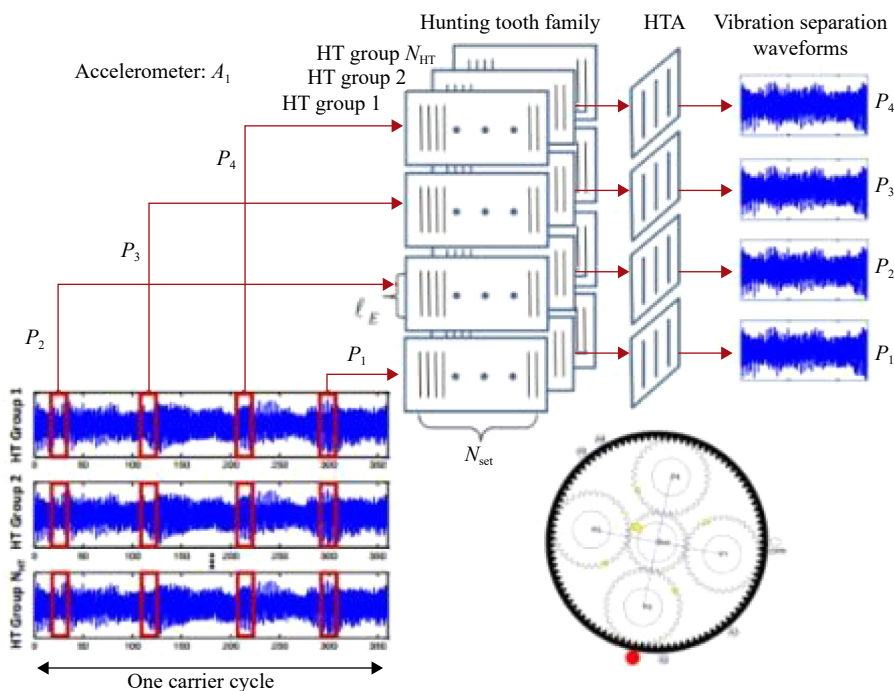
图 5 CS-29 试验台及其小波分解信号对比^[25]Fig. 5 Comparison of CS-29 test bench and its wavelet decomposition signal^[25]

2.1.4 振动信号分离

直升机行星传动轮系的振动信号通常受噪声污染, 信号成分复杂, 难以直接提取隐含的故障信息。为此, 研究人员提出了一系列基于信号降噪和信号分离的诊断方法。Samuel 和 Pines^[27] 在 TSA 的基础上, 提出了一种单传感器与多传感器结合的行星轮振动信号分离方法, 并将其应用于直升机行星传动轮系的监测。随后, Blunt 等^[28] 对该方法进行了改进, 在 UH-60A“黑鹰”直升机传感器布置下验证了太阳轮振动信号的分离效果。

结果表明所提方法在测试条件下可靠, 但在低扭矩飞行条件下效果较差, 原因可能是负载环境不稳定。进一步地, NASA Glenn 研究中心^[29] 验证了行星齿轮振动信号分离法(planetary gear vibration separation, PGVS)和太阳轮振动信号分离法(sun gear vibration separation, SGVS), 并对其在 OH-58 直升机的全尺寸单级行星传动轮系试验装置上进行了验证, 提取过程如图 6 所示。

试验的主要目标是评估 PGVS 与 SGVS 方法是否能够有效隔离太阳齿轮的动力学特性并检测

图 6 行星轮系振动信号分离过程^[29]Fig. 6 Planetary gear train vibration signal separation process^[29]

损伤,如图 7 所示。试验结果表明,这两种方法在检测齿面损伤方面表现出良好的效果,但对于太阳齿轮裂纹的检测效果有限。相较之下,齿圈裂纹只能通过安装在裂纹位置附近或直接穿过裂纹的加速度计进行清晰检测。

此外,Elasha 等^[30]采用自适应滤波并结合 TSA 算法进行信号分离,提取信号中的不确定性部分。随后研究人员使用包络分析对生成的特征进行进一步处理以提取故障特征,并通过

CS-29 A 类直升机变速箱试验进行了测试验证。Elasha 等^[31]针对商用 A 级直升机主减速器,在第二行星齿轮级轴承中植入故障,采用离散随机分离法进行齿轮和轴承信号的分离。该方法主要利用齿轮信号和轴承信号之间的相关性差异,即齿轮信号周期性较强,相关时间较长;轴承信号具有随机性,相关时间较短。基于上述特性,研究人员成功分离出轴承故障信号,结果如图 8 所示。

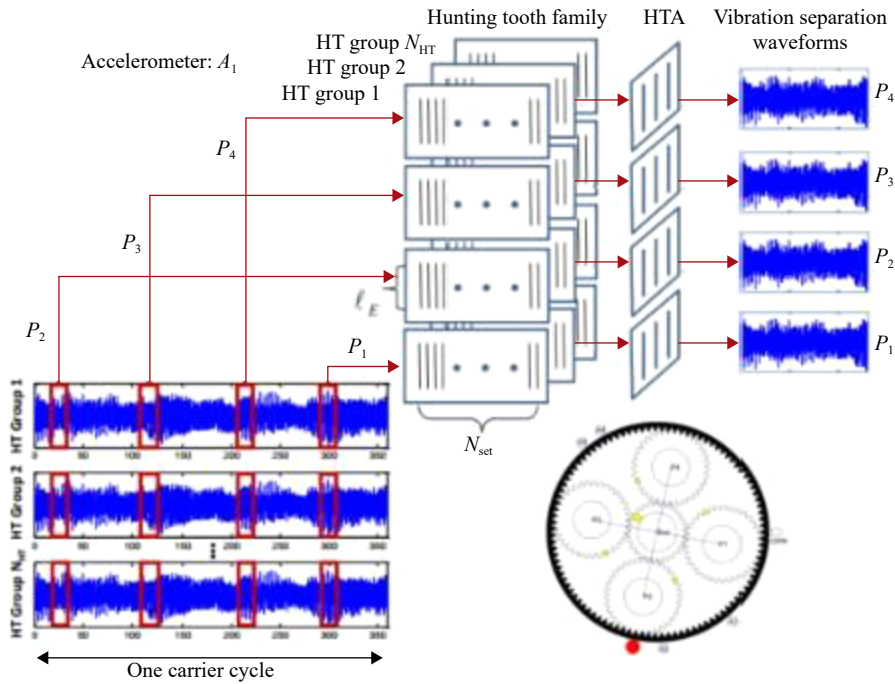


图 7 OH-58 直升机试验台及传感器布置^[29]

Fig. 7 OH-58 500HP helicopter transmission test bench and sensor layout^[29]

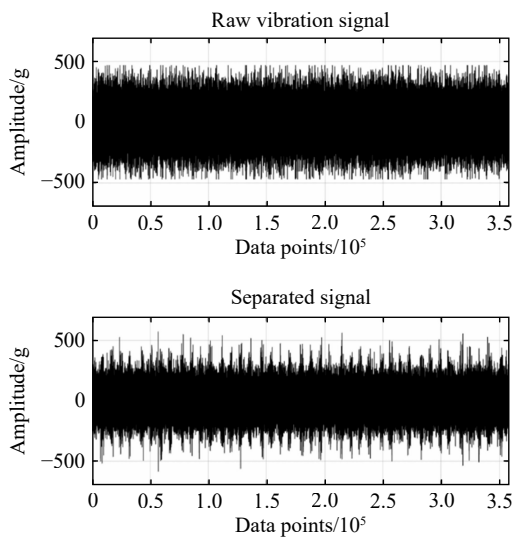


图 8 轴承故障信号分离结果^[31]

Fig. 8 Bearing fault signal separation results^[31]

振动信号分离技术主要用于行星轮系信号分离及齿轮、轴承等部件的信号分离,其核心思想是抑制无关信号,增强故障特征的提取能力。未来,该技术可结合多传感器信息融合与深度学习算法,利用数据驱动方法优化信号分离策略,提升在复杂工况下的适应性,从而进一步提高故障检测的准确性与实时性。

2.2 状态指标

振动健康监测(vibration health monitoring, VHM)系统是 HUMS 的重要组成部分,其主要功能是利用高精度振动传感器和数据采集设备,在飞行过程中实时测量旋转关键部件的振动特性^[32]。通过信号处理算法分析采集到的数据,提取与故障模式相关的状态指标,以评估部件的健康状态并预测潜在故障趋势。

基于振动的状态指标被广泛应用于直升机动力总成系统的健康评估。例如, NASA Glenn 研究中心^[33]评估了配备 HUMS 的 Bell 412 直升机, 量化了误报警率与漏检率, 其传感器位置及故障样本如图 9 所示。研究样本包括 20 架直升机, 其中 12 架已确认存在传动系统和齿轮箱故障(均由状态指标确认)。

面向直升机主减速器的典型振动状态指标主要包括: 方均根 RMS, 定义为信号样本平方和的平均值的平方根; 波峰因数 CF, 定义为信号的最大峰值与 RMS 的比值; FM0(由 Stewart^[34]开发), 是齿轮啮合中主要故障的可靠指标; FM4, 旨在通过检测仅隔离到有限数量的齿的故障来补充

FM0^[35], 定义为差分信号 d 的四阶矩与其平均方差平方之比; NA4(由 Zakrajsek 等^[36]提出), 定义为残差信号 r 的四阶矩与其平均方差平方之比; FM4*和 NA4*分别为 FM4 和 NA4 的改进指标, 定义为相应信号的四阶矩与健康状态方差平方之比^[37]。

FM4 作为商用直升机 HUMS 中广泛应用的振动监测指标^[38], 主要用于监测局限于少量齿轮齿的故障, 其计算流程如图 10 所示。当传感器采集到振动数据后, 首先通过 TSA 及差分信号处理, 随后该信号被转换回时域, 并用于计算关键的统计特征, 即差分信号的第四阶归一化统计矩, 从而表征齿轮局部故障的特征。

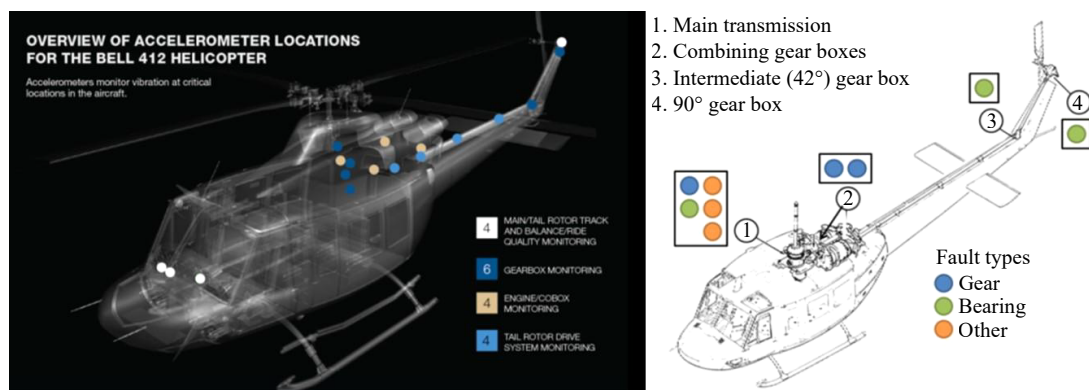


图 9 Bell 412 直升机 HUMS 传感器位置及故障样本^[33]

Fig. 9 Bell 412 helicopter HUMS sensor locations and fault sample conditions^[33]

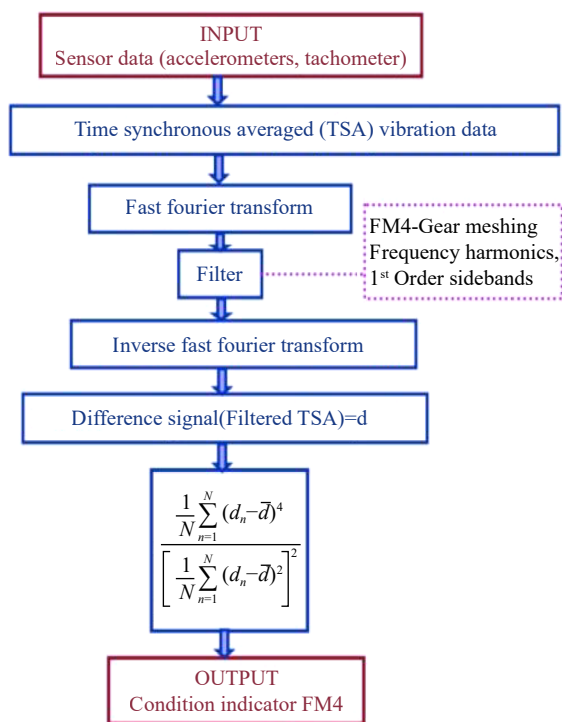


图 10 FM4 计算流程^[38]

Fig. 10 FM4 calculation process^[38]

Hochmann 等^[39]通过直升机尾桨齿轮箱的预制故障试验, 验证了 FM4 在健康监测中的有效性。NASA Glenn 研究中心^[18]进一步在 OH-58 直升机的 14 次机动飞行试验和传动试验台裂纹扩展试验中, 比较了齿轮状态指示器 FM4 的值。此外, 中国直升机设计研究所^[40]采用基于状态指标的方法, 对行星齿轮故障进行了诊断分析, 并在直升机传动系统故障植入试验台上进行了试验验证, 选区的状态指标包括 RMS、FM0、FM4(文中称为 EO)以及 DA1。结果表明采用状态指标可以明显区分出单个故障状态下齿轮的状态指标值和健康阈值, 具有很好的诊断效果, 对于两个故障均出现的复合故障还需进一步研究。

NASA Glenn 研究中心^[41]还基于现役直升机 HUMS 采集的弧齿锥齿轮组故障数据, 分析了试验室试验与实际飞行环境下状态监测指标的响应特性。研究选取了 40 架服役直升机 HUMS 数据, 其中 20 架直升机在数据采集期间发生了弧齿锥齿轮损伤, 其余 20 架未发现异常。研究对比分析

了试验台数据与 AH-64 直升机实机数据的状态指标响应特性, 并通过亚尺度试验台故障演化测

试验证了状态监测指标的有效性, 试验台情况及试验结果如图 11 所示。

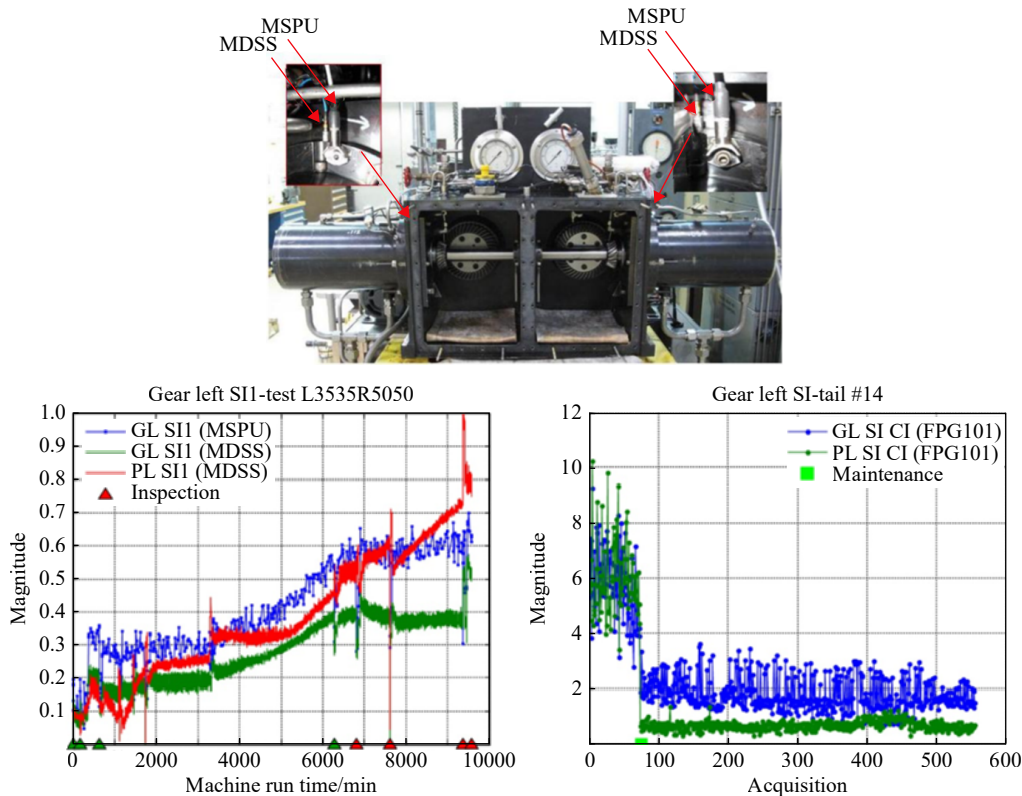


图 11 弧齿锥齿轮故障试验台及指标对比^[41]

Fig. 11 Spiral bevel gear fault test bench and index comparison^[41]

近年来, 研究者们针对直升机主减速器健康监测, 持续优化状态监测指标。中国直升机研究与发展研究所^[42]通过轴承故障试验数据, 提出了一种基于状态指示器的滚动轴承故障诊断方法, 并基于高斯分布统计计算健康状态阈值。Camerini 等^[43]研究了直升机传动系统部件的机械退化, 开发了基于振动信号的自动化程序, 可量化机械状态的偏离程度。Bechhoefer 等^[44]利用齿数互质和 TSA, 改进了主减速器齿轮故障监测, 并提出了新的状态指标, 实现了更精准的故障量化分析。Leoni 等^[45]提出了一系列基于振动与健康指数的监测指标, 用于识别直升机传动系统的机械退化, 并通过两种机器学习模型协同完成分类任务, 同时引入后处理过滤策略, 有效降低误报警数量。

状态监测指标作为振动健康监测系统的核心, 能够定量评估直升机主减速器及传动系统的健康状态, 但仍存在一定局限性。①大多数状态指标针对单一故障有效, 但在复合故障场景下存在干扰, 未来需优化状态指标的融合策略, 提升其适应性。②引入深度学习与数据驱动方法, 提高状

态指标在早期故障检测中的灵敏度, 并优化阈值计算方法。③现有指标依赖统计方法设定健康阈值, 难以直观解释故障机理, 不同故障类型可能表现出相似的指标变化, 易导致误判或漏检。

2.3 传感器技术

HUMS 供应商 Goodrich 的旋翼机和车辆健康系统业务总监弗尔曼指出, 仅依靠振动分析无法全面评估直升机的健康状态。尽管振动分析能够在部件即将失效前几小时检测到严重缺陷, 但仍然存在一定的局限性。贝尔直升机公司也在研究多传感器集成, 以提升健康监测能力。西科斯基公司则表示, 其研究正致力于利用现场数据的多种信息源提高飞行安全性, 最终目标是提供预测性维护支持^[46]。因此, 针对振动信号之外的传感器技术发展及多传感器融合成为直升机健康监测系统优化的关键方向。

2.3.1 光纤传感器

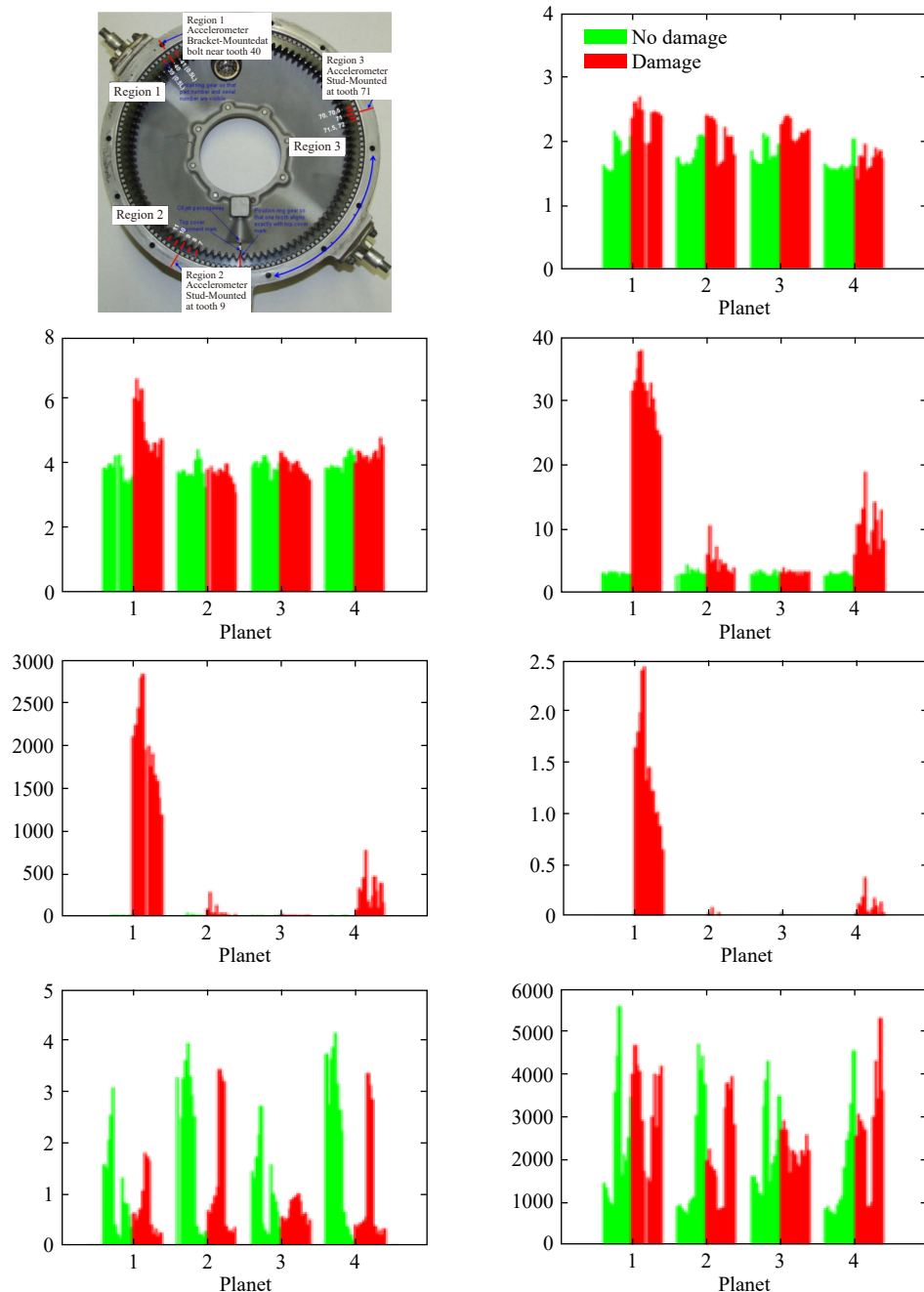
针对传统传感器安装复杂、精度受限、易受干扰等问题, 特别是在行星齿轮箱等结构紧凑、旋转部件复杂的环境下, 光纤传感器因其无需直

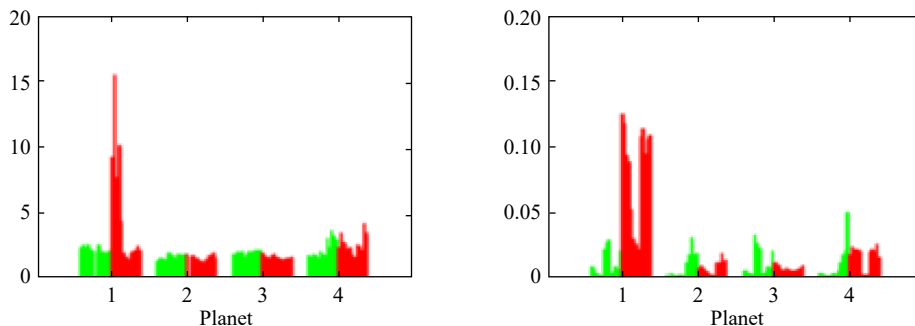
接接触测量对象,成为一种潜在的解决方案。其检测原理是光信号在调制器中受外界参数影响发生调制,经光纤传输至探测器并解调,从而获取被测量值^[47]。通过在机身、齿轮箱等结构表面布置光纤传感器,可实时监测应力、变形与振动等关键参数,为直升机结构健康评估提供精准支持。

NASA Glenn 研究中心及马里兰大学^[48]研究了光纤传感器在行星齿轮故障诊断中的应用,解决了行星轮系几何结构复杂、传感器难以安装的问题。其传感器的布置情况如图 12 所示,该传感器带包括 13 个应变传感器阵列,安装在贝尔 OH-58C 直升机变速器的齿圈上,并将其数据与加速

度计进行对比分析。此外,严治强等^[47]研究了光纤传感器在直升机试飞测试中的应用,并分析了其在复杂环境中的挑战。Lvov 等^[49]提出了一种黏合光纤传感器到复杂受控结构的新方法,用于监测飞机结构的健康状况。

虽然光纤传感器具备较高的灵敏度、精度和可靠性,但是在直升机健康监测中同样面临挑战。由于直升机结构的复杂性和多样性,如何选择合适的光纤传感器并将其应用于不同的部位和系统仍然存在困难;其次,光纤传感器获得的数据量较大,需要相应的数据处理和分析手段,随之带来的是较高的成本和维护难度。

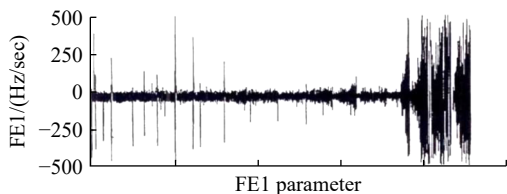


图 12 光纤传感器及加速度传感器布置及结果对比^[48]Fig. 12 Arrangement of fiber optic sensors and acceleration sensors and comparison of results^[48]

2.3.2 滑油磨粒监测

滑油磨粒监测(oil debris monitoring, ODM)已经是大多数飞机/直升机平台的辅助诊断工具。直升机滑油在线屑末监测器一般安装在直升机减速器回油路上,能够实时监测减速器回油路中金属颗粒物的种类和数量。美国联邦航空管理局(federal aviation administration, FAA)在 2022 年为旋翼飞机制定了适航要求^[50],即使用铁磁材料的旋翼驱动系统变速箱必须配备磨粒检测器,用于监测变速箱内损坏或过度磨损导致的铁磁颗粒。

NASA Lewis 研究中心^[51]早在 1992 年就在 OH-58A 直升机传动系统试验台上开展了滑油磨粒监测试验,作为美国海军/NASA/陆军先进润滑油计划的一部分,并进行了 5 次耐久性测试。结果表明滑油磨粒监测结果与油谱分析结果吻合,对油温和流量极为敏感。进一步地, NASA Glenn 研究中心^[52]对比了基于振动信号监测及滑油磨粒监测,表明两者在齿轮点蚀损伤方面的效果是相当的,其监测结果如图 13 所示。

图 13 直升机传动试验台滑油磨粒监测结果^[52]Fig. 13 500HP helicopter transmission test bench lubricating ODM results^[52]

NASA Glenn 研究中心的 Paula^[53]通过在线电感式油屑传感器监测并记录直升机圆锥滚子轴承点蚀损伤的发生情况,发现磨粒状态可用于评估轴承剩余寿命。中国航发湖南动力机械研究所^[54]开发了一款直升机滑油在线屑末监测器,并引入工况参数作为状态识别因子,实现综合故障判断。

与其他领域相比,滑油磨粒监测仍处于发展阶段^[55],主要面临以下挑战:①磨粒监测精度受限。为了更早地预测和报警异常磨损,需要着重关注 10~50 μm 颗粒,但现有滑油磨粒传感器的检测精度仍难以满足要求。②磨粒特征提取不足。当前监测技术难以全面捕获磨损颗粒的颜色、表面纹理、形状、质量等关键特征,亟需开发更加精细化的传感器。③硬件系统复杂度高。目前大多数磨粒传感器仍依赖将磨粒特征转换为电信号,导致系统成本增加,并对监测设备的集成与维护带来额外挑战。

2.3.3 声学传感器及声发射技术

由于直升机主减速器结构复杂,振动信号在传递过程中受结构耦合、阻尼效应等影响,使测得信号叠加了载荷传递路径的动态效应。针对这一问题,声学传感器和声发射技术(acoustic emission, AE)提供了有效补充。

声学传感器通过监测齿轮箱外部噪声辐射评估整体健康状态,而声发射技术可捕捉齿轮点蚀、裂纹扩展等损伤引发的高频弹性波,实现早期故障检测。波兰空军技术研究所^[56]采用振动声学方法监测部分组件,并建立直升机齿轮传动系统健康评估的诊断标准。Lu 等^[57]基于空气传播声波开发多级斜齿轮箱的状态检测指标,提取齿轮动力学相关的非线性调制特征,并证明相比振动监测,声学方法可感知更广范围的振动响应。

近年来,声发射技术已成功识别轴承和齿轮的早期微小缺陷^[58],并可利用齿轮退化过程知识优化声发射与振动监测融合策略,从而提高故障检测的稳健性,减少误报率。克兰菲尔德大学^[59]评估了宽带传感器的监测能力,发现其可同时覆盖低频振动与超声波事件,实现多频段信号融合。进一步地, Ruiz-Carcel 等^[60]结合声发射与振动信

号, 提出基于知识规则的健康指标, 成功监测试验齿轮的加速退化过程。Elasha 等^[61]结合自适应滤波、谱峭度和包络谱分析, 实现了复杂工况下直升机变速箱轴承的故障检测, 其声发射传输方案如图 14 所示。可以看出, 声发射传感器黏合到行星架的上表面, 并通过单匝黄铜线圈实现无线传输。Leaman^[62]深入研究行星齿轮箱齿轮啮合产生的声发射现象, 定量分析了包络谱不同谐波随调制水平与类型的变化规律。

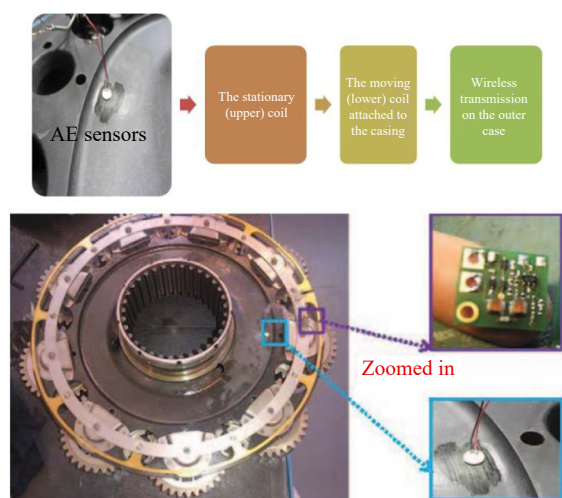


图 14 声发射无线传输方案^[62]

Fig. 14 AE Wireless Transmission Solution^[62]

总体来看, 声发射技术在直升机健康监测中的应用前景广阔, 其优势在于能够检测更早期的损伤。然而, 该技术仍面临信号衰减与传播路径复杂、传感器耦合对信号采集影响显著、数据量庞大等挑战, 亟需高效的信号处理方法来提升监测精度和可靠性。

2.4 机器学习

随着人工智能的发展, 机器学习(machine learning, ML)在直升机健康监测领域受到了越来越多的关注。传统的智能诊断方法主要包括特征提取和模式识别, 通常根据收集到的数据计算时域特征、频域特征和时频域特征, 然后将其输入到支持向量机、人工神经网络、k 近邻和决策树等浅层机器学习分类器中。为了避免故障无关特征的干扰, 通常需要降维处理。由于浅层学习的特征提取挖掘隐藏故障信息的能力有限, 诸如自动编码器, 深度玻尔兹曼机, 卷积神经网络等深度学习方法近几年得到了广泛的研究。

已有研究表明^[63], 使用机器学习技术进行直升机预测性维护的方法很有前景, 尽管具有挑战

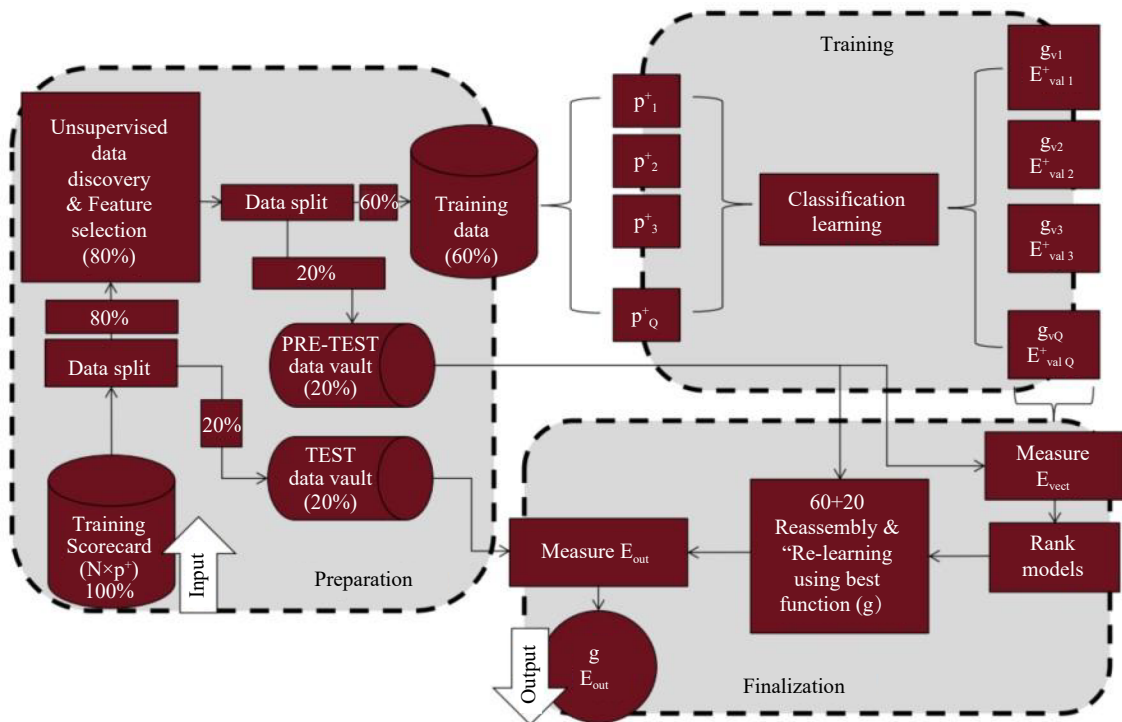
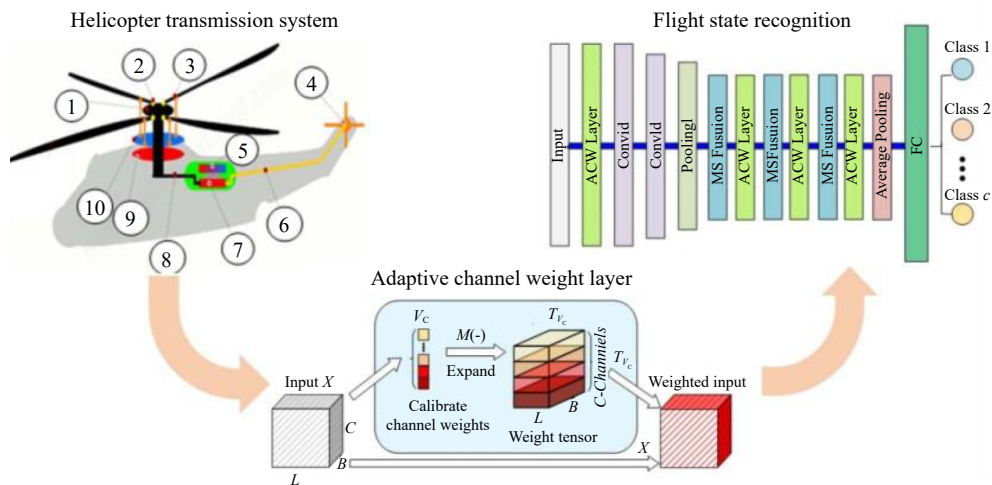
性。美国陆军航空工程师于 2015 年基于旋翼机状态维护(rotorcraft condition-based maintenance, CBM)计划, 开展了通过使用机器学习算法提高 HUMS 性能的研究^[64]。研究旨在充分利用 HUMS 储存了数十年的数据, 通过先进的数据驱动方法优化旋翼飞行器健康监测系统, 提升故障检测和维护策略的智能化水平。如图 15 所示, 研究人员创建了一种允许将数百个维度的飞机数据进行系统化整理和学习算法流程, 允许多学科工程团队在无监督和有监督学习模型之间传递 HUMS 数据。

近年来, 多种基于机器学习的智能健康监测方法相继提出。如 Cody 等^[65]提出了递归神经网络来模拟主减速器齿轮的长期损伤状态关系, 并将其用于直升机健康监测。Wilson 等^[66]应用卷积神经网络分析直升机振动信号。Gildish 等^[67]开发了一种基于机器学习的无监督异常检测技术来识别减速器螺栓松动问题, 并在以色列空军 AH-64“阿帕奇”直升机的 HUMS 振动数据上进行了测试。Li 等^[68]提出了一种自适应信道加权卷积神经网络, 用于研究不同传感器在数据融合过程中的重要性。所设计的深度神经网络可根据传感器的重要性调整权重, 如图 16 所示。此外, 基于深度学习的行星齿轮箱故障诊断方法近年来也被大量学者的研究^[69]。

尽管机器学习在直升机主减速器健康监测中展现出巨大潜力, 但仍有许多问题亟待解决: ①模型可解释性不足。深度学习方法可从齿轮箱的原始振动信号中自动提取特征, 但由于其内部机制复杂, 难以直观理解, 存在“黑箱效应”, 这影响直升机主减速器的可靠性评估和维护决策。②故障信号衰减。主减速器中的故障组件与传感器之间的多条时变传输路径受能量耗散和环境干扰影响, 导致故障信号在传输过程中衰减, 影响诊断精度。③数据获取困难。机器学习模型的训练依赖大量高质量数据, 而在实际应用中, 获取充分的直升机主减速器故障数据仍是一大难题, 限制了模型的泛化能力和鲁棒性。

2.5 数字孪生技术

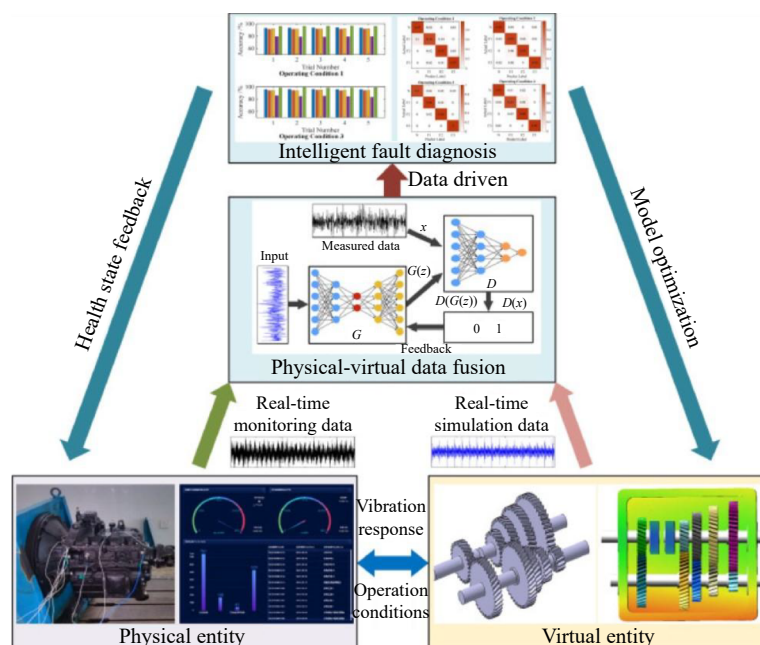
数字孪生技术(digital twin, DT)可基于物理建模与数据驱动, 实现目标结构的实时监测、故障预测及优化维护。该技术能够在虚拟空间构建与物理系统一致的数字模型, 并通过实时数据更新与动态仿真, 提升健康监测的准确性与预测性维护能力。2011 年, 美国空军研究实验室(air

图 15 用于传递 HUMS 数据的机器学习算法流程^[64]Fig. 15 ML algorithm flow for delivering HUMS data^[64]图 16 基于传感器融合的自适应加权卷积神经网络^[69]Fig. 16 Adaptive channel weighted convolutional neural network based on sensor fusion^[69]

force research laboratory, AFRL)提出了一种重新设计飞机结构寿命预测流程,以充分利用高性能数字计算的优势^[70]。美国空军指出,2025年将同时交付第一架新型飞机和飞机的数字模型,并认为数字孪生是对结构寿命预测和管理的重新设计。

近年来,基于数字孪生的结构健康监测受到了广泛关注,但目前研究仍主要集中在固定翼飞机机翼结构^[71]。针对直升机减速器及部件的数字孪生研究还处于发展阶段。如 Matania 等^[72]使用信号处理和模型拟合来连续监测根裂纹的状况,

并成功估算出齿轮系统需要维护的剩余时间。Zhu 等^[73]针对不同工况下的太阳轮缺齿和行星轮缺齿或点蚀组合故障,建立了行星齿轮箱数字孪生多体动力学模型。重庆大学^[74]提出一种基于数字孪生和迁移学习的直升机尾传动系统故障诊断方法,解决数据不平衡导致的深度学习故障诊断模型训练效果变差的问题。华南理工大学^[75]提出了一种基于物理-虚拟数据融合的新型数字孪生驱动传动系统故障诊断方法,如图 17 所示,以在故障数据采集不足的情况下提升诊断性能。

图 17 基于数字孪生的传动系统故障诊断^[75]Fig. 17 Transmission system fault diagnosis based on digital twin^[75]

目前,基于数字孪生的健康监测技术仍处于发展初期,面临多重技术挑战:①高精度建模难度大。数字孪生模型需要准确复现直升机主减速器的动力学特性和故障演化过程,但受限于系统复杂性和不确定因素,构建高精度模型仍较为困难;②传感器数据融合复杂。健康监测依赖多源异构数据,包括振动、声发射、油液监测等信息,不同数据类型在时空对齐、特征提取和融合策略方面存在较大挑战;③计算资源受限。实时仿真与数据驱动分析需高效计算,然而受制于硬件性能和存储能力,难以在飞行器运行过程中实现高效实时处理;④维护优化挑战。数字孪生需结合健康评估与预测性维护,但缺乏成熟的决策模型和标准化流程,影响其在工程实践中的应用。未来,随着计算能力的提升和数据融合技术的发展,数字孪生将在直升机健康监测领域发挥更大作用。

3 结论与展望

随着国内外直升机的应用范围不断拓展,在低空经济的推动下,直升机飞行安全保障受到了前所未有的重视。其传动系统主减速器的健康监测技术已成为保障飞行安全、降低运维成本的核心支撑。本文围绕主减速器健康监测的关键技术进行总结,内容涵盖振动信号处理、状态监测指标、传感器技术、机器学习、数字孪生等领域。面向未来直升机集群化、智能化发展趋势,作者

认为未来的研究应该着重关注以下几方面:

1) 建立系统化的全域研究体系。振动信号仍是主减速器健康监测的主要数据来源,因此建立“故障机理-动态响应-信号表征”的映射关系,形成完善的研究体系,实现故障机理与信号特征的“端到端对应”。建议发展多体动力学与有限元耦合的联合建模方法,重点突破行星轮系建模及多故障耦合建模的难题,以及提高模型对复合故障模式的适应性。

2) 直升机主减速器健康监测技术正从单一传感器监测向多传感器融合方向发展,涵盖振动、光纤传感、声学传感、滑油磨粒监测等多模态检测手段。未来,应重点发展多传感器信息融合技术、智能传感器网络等,探索引入自适应加权融合算法和基于注意力机制的传感网络布局策略,提高不同传感器数据的互补性与一致性,提高健康监测系统在不同飞行工况下的精度与实时响应能力

3) 增强状态监测指标的可解释性,提高监测可信度。现有的状态指标主要基于数理统计,难以直观反映故障机理。建议开发融合物理建模机制的“物理引导型”特征参数,构建可直观反映物理机制的先进状态指标,以增强状态指标与实际故障机理的对应关系,提升健康评估的可信度与稳定性。

4) 推进机器学习、数字孪生等新技术发展。

由于直升机主减速器的故障样本数据稀缺, 传统数据驱动方法在模型泛化能力方面仍然受限, 可构建结合迁移学习与数据增强机制的小样本故障识别模型。探索迁移学习、数据增强等方法, 提高机器学习模型在小样本条件下的适应能力。同时建立高精度数据-物理融合的数字孪生模型, 实现实时状态评估与远程维护支持。

参考文献:

- [1] 孙灿飞, 王友仁. 直升机行星传动轮系故障诊断研究进展[J]. *航空学报*, 2017, 38(7): 020892.
Sun Canfei, Wang Youren. Advance in study of fault diagnosis of helicopter planetary gears[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(7): 020892. (in Chinese)
- [2] LaGrone S. UPDATED: Navy, Marine V-22 Ospreys Under 'operational pause' after AFSOC incident[EB/OL]. (2024-12-09)[2025-02-10]. <https://news.usni.org/2024/12/09/navy-marine-v-22-ospreys-under-operational-pause-after-afsoc-incident>.
- [3] Johnson O. Norway H225 crash report recommends changes to super puma type design[EB/OL]. (2018-07-05)[2025-02-10]. <https://verticalmag.com/news/norway-h225-crash-report-recommends-changes-to-super-puma-type-design/>.
- [4] 左丽华. 国外直升机 HUMS 系统的应用[J]. *直升机技术*, 2000(3): 48-53.
Zuo Lihua. Application of HUMS system in foreign helicopters[J]. *Helicopter Technique*, 2000(3): 48-53. (in Chinese)
- [5] 王卫刚. 直升机传动系统设计方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
Wang Weigang. Research on design method of helicopter transmission system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [6] 车明. 直九武装直升机主减速器改进设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
Che Ming. Designing research of the improvement design for the Z9 military helicopter main gearbox[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006. (in Chinese)
- [7] Jacobson F M. Acoustic and dynamic models of a NASA helicopter gearbox housing[D]. Columbus: The Ohio State University, 1994.
- [8] Build A Helicopter. Helicopter Transmissions And Gearboxes[EB/OL]. [2025-02-10]. <https://www.buildahelicopter.com/homebuilt-helicopter-transmissions.php>.
- [9] 王锐, 徐忠岩, 徐云山, 等. 直升机传动系统健康管理需求分析及应用研究[C]//第六届中国航空科学技术大会论文集. 北京: 中国航空学会, 2023: 7.
Wang Rui, Xu Zhongyan, Xu Yunshan, et al. Demand Analysis and Application Research on Health Management of Helicopter Transmission System[C]//Proceedings of the 6th China Aeronautical Science and Technology Conference. Beijing: Chinese Society of Aeronautics, 2023: 7. (in Chinese)
- [10] Zhou Linghao. Helicopter main gearbox planetary bearing fault diagnosis using vibration signal processing techniques[D]. London: London South Bank University, 2020.
- [11] Matania O, Bachar L, Bechhoefer E, et al. Signal processing for the condition-based maintenance of rotating machines via vibration analysis: a tutorial[J]. *Sensors*, 2024, 24(2): 454.
- [12] Braun S. Discover Signal Processing: An Interactive Guide for Engineers[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Inc. 2008.
- [13] Huff E M, Mosher M, Barszcz E, et al. An exploration of discontinuous time synchronous averaging for helicopter HUMS using cruise and terminal area vibration data: ASH-2003[R]. Fairfax: American Helicopter Society, 2003.
- [14] Elasha F, Mba D. Improving condition indicators for helicopter health and usage monitoring systems[J]. *International Journal of Structural Integrity*, 2016, 7(4): 584-595.
- [15] Hood A A. Fault Detection on a Full-Scale OH-58 a/C Helicopter Transmission[M]. College Park: University of Maryland, College Park, 2010.
- [16] Sparis P, Vachtsevanos G. A helicopter planetary gear plate crack analysis and feature extraction based on ground and aircraft data[C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation Intelligent Control. New York: Mediterranean Control Association, 2005.
- [17] Mironov A, Mironovs D. Condition monitoring of helicopter main gearbox planetary stage[C]//Reliability and Statistics in Transportation and Communication. Cham: Springer International Publishing, 2019: 421-430.
- [18] Paula J, Islam A, Feldman J. Investigation of Gearbox Vibration Transmission Paths on Gear Condition Indicator Performance[R]. Washington, D. C: NASA, 2013.
- [19] Dempsey P J, Keller J A, Wade D R, et al. Signal detection theory applied to helicopter transmission diagnostic thresholds: NASA/TM-2008-215262[R]. Washington DC: NASA, 2008.
- [20] Liu Wenzheng, Zhu Rupeng, Yu Hu, et al. Differential extraction and experimental validation of essential characteristics in gear faults[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(10): 16419-16428.
- [21] 刘立生, 杨宇航. 基于小波神经网络的直升机主减速器故障诊断系统[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(6): 1255-1260.
Liu Lisheng, Yang Yuhang. Fault diagnostics system for helicopter main gearbox using wavelet neural network[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(6): 1255-1260. (in Chinese)
- [22] Gouda K M, Tarbutton J A, Hassan M A, et al. A wavelet-based index for fault detection and its application in condition monitoring of helicopter drive-train components[J]. *International Journal of Manufacturing Research*, 2015, 10(1): 87.
- [23] Niu Penghui, Shen Qiuyuan, Zhang Lei, et al. Research on noise reduction for helicopter vibration signals based on wavelet analysis[C]//2020 International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation. Piscataway, US: IEEE, 2020: 490-494.
- [24] Hassan M A, Habib M R, Abul Seoud R A, et al. Wavelet-based multiresolution bispectral analysis for detection and classification of helicopter drive-shaft problems[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2018, 140(6): 061009.
- [25] Elasha F, Li Xiaochuan, Mba D, et al. A novel condition indicator for bearing fault detection within helicopter transmission[J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2021, 9(2): 215-224.
- [26] Nacib L, Sakhara S, Bouchama Z. Wavelet neural network application in helicopter gearbox gear fault diagnosis[J]. *South Florida Journal of Development*, 2024, 5(12): e4780.
- [27] Samuel P D, Pines D J. Vibration separation methodology for planetary gear health monitoring[R]. Bellingham, US: SPIE Proceedings, 2000, 3985: 250.
- [28] Blunt D M, Keller J A. Detection of a fatigue crack in a UH-60A planet gear carrier using vibration analysis[J]. *Mechanical Systems*

- and Signal Processing, 2006, 20(8): 2095-2111.
- [29] Hood A, LaBerge K, Lewicki D, et al. Vibration based Sun gear damage detection[R]. Portland, US: ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2014.
- [30] Elasha F, Greaves M, Mba D. Bearing signal separation of commercial helicopter main gearbox[J]. *Procedia CIRP*, 2017, 59: 111-115.
- [31] Elasha F, Mba D, Greaves M. Bearing signal separation enhancement with application to a helicopter transmission system[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2017, 30(5): 04017059.
- [32] Brary S. Vibration Health monitoring (VHM)[EB/OL]. (2021-04-06)[2025-02-10]. <https://skybrary.aero/articles/vibration-health-monitoring-vhm>.
- [33] Helicopter B, Tucker B, Center N G R, et al. Health monitoring survey of bell 412EP transmissions[C]//Proceedings of the Vertical Flight Society 72nd Annual Forum. West Palm Beach, US: The Vertical Flight Society, 2016: 1-12.
- [34] Stewart R M. Some useful analysis techniques for gearbox diagnostics: MHM/R/10/77[R]. Hampshire, UK: Machine Health Monitoring Group, Institute of Sound and Vibration Research, 1977.
- [35] Antolick L J, Branning J S, Wade D R, et al. Evaluation of gear condition indicator performance on rotorcraft fleet[C]//AHS 66th Annual Forum and Technology Display: Rising to New Heights in Vertical Lift Technology. Washington DC: NASA, 2010.
- [36] Zakrajsek J J, Townsend D P, Decker H J. An analysis of gear fault detection methods as applied to pitting fatigue failure data[R]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 1993.
- [37] Samuel P D, Pines D J. Constrained adaptive lifting and the CAL4 metric for helicopter transmission diagnostics[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 319(1/2): 698-718.
- [38] Dempsey P J, Lewicki D G, Le D D. Investigation of current methods to identify helicopter gear health[C]//2007 IEEE Aerospace Conference. Piscataway, US: IEEE, 2007: 1-13.
- [39] Hochmann D, Bechhoefer E. Gear tooth crack signals and their detection via the FM4 measure in application for a helicopter HUMS (health usage and management system) [C]//2003 IEEE Aerospace Conference Proceedings. Piscataway, US: IEEE, 2003: 3313-3326.
- [40] 金小强, 袁志文, 熊天吻, 等. 基于状态指标的直升机减速器行星轮故障诊断[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(35): 15598-15603.
- Jin Xiaoqiang, Yuan Zhiwen, Xiong Tianyang, et al. Planetary gear fault diagnosis of helicopter main gearbox based on condition indicators[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(35): 15598-15603. (in Chinese)
- [41] Dempsey P J. Investigation of spiral bevel gear condition indicator validation via AC-29-2C combining test rig damage progression data with fielded rotorcraft data: GRC-E-DAA-TN20164[R]. Washington DC: NASA, 2015.
- [42] Yuan Zhilong, Jin Xiaoqiang. Rolling bearing fault diagnosis of helicopter reducer based on condition indicators[C]//2024 10th International Symposium on System Security, Safety, and Reliability. Piscataway, US: IEEE, 2024: 512-517.
- [43] Camerini V, Coppotelli G, Bendisch S. Fault detection in operating helicopter drivetrain components based on support vector data description[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 73: 48-60.
- [44] Bechhoefer E, Janke C. Hunting tooth gear condition indicator: for epicycle gear fault detection[C]//2024 International Conference on Control, Automation and Diagnosis. Piscataway, US: IEEE, 2024: 1-6.
- [45] Leoni J, Tanelli M, Palman A. A new comprehensive monitoring and diagnostic approach for early detection of mechanical degradation in helicopter transmission systems[J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 210: 118412.
- [46] Adams C. HUMS technology[EB/OL]. (2012-05-01)[2025-02-10]. <https://www.aviationtoday.com/2012/05/01/hums-technology/>.
- [47] 严治强. 光纤传感器技术在直升机试飞测试中的应用[J]. *中国科技信息*, 2023(19): 72-74.
- Yan Zhiqiang. Application of optical fiber sensor technology in helicopter flight test[J]. *China Science and Technology Information*, 2023(19): 72-74. (in Chinese)
- [48] Kiddy J S, Lewicki D G, LaBerge K E, et al. Fiber optic strain sensor for planetary gear diagnostics: AHS 2011-000154[R]. Virginia Beach: 67th Annual Forum and Technology Display, 2011.
- [49] Lvov N, Khabarov S, Todorov A, et al. Versions of fiber-optic sensors for monitoring the technical condition of aircraft structures [J]. *Civil Engineering Journal*, 2018, 4(12): 2895-2902.
- [50] National Archives. Code of federal regulations[EB/OL]. [2025-02-10]. <https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-1/subchapter-C/part-29/subpart-F/subject-group-ECFR12da8eabf96ea03/section-29.1337>.
- [51] Lewicki D G, Blanchette D M, Biron G. Evaluation of an oil-debris monitoring device for use in helicopter transmissions: 92-C-007[R]. Washington DC: NASA, 1992.
- [52] Dempsey P J. A comparison of vibration and oil debris gear damage detection methods applied to pitting damage: NASA/TM-2000-210371[R]. Washington DC: NASA, 2000.
- [53] Dempsey P J, Bolander N, Haynes C, et al. Investigation of bearing fatigue damage life prediction using oil debris monitoring: NASA/TM-2011-217117[R]. Washington DC: NASA, 2011.
- [54] 龙舟, 黄炎, 陈兴明, 等. 直升机滑油在线屑末监测器研发及应用[J]. *测控技术*, 2025, 44(1): 57-62.
- Long Zhou, Huang Yan, Chen Xingming, et al. Development and application of lubricant oil on-line debris monitor for helicopter[J]. *Measurement & Control Technology*, 2025, 44(1): 57-62. (in Chinese)
- [55] Sun Jiayi, Wang Liming, Li Jianfeng, et al. Online oil debris monitoring of rotating machinery: a detailed review of more than three decades[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 149: 107341.
- [56] Zieja M, Golda P, Zokowski M, et al. Vibroacoustic technique for the fault diagnosis in a gear transmission of a military helicopter[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2017, 19(2): 1039-1049.
- [57] Lu Kaibo, Gu J X, Fan Hongwei, et al. Acoustics based monitoring and diagnostics for the progressive deterioration of helical gearboxes[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 34: 82.
- [58] Duan Fang, Elasha F, Greaves M, et al. Helicopter main gearbox bearing defect identification with acoustic emission techniques[C]//2016 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management. Piscataway, US: IEEE, 2016: 1-4.
- [59] Ruiz-carcel C, Starr A, Francese A. Experimental assessment of a broadband vibration and acoustic emission sensor for rotorcraft transmission monitoring[J]. *PHM Society European Conference*, 2022, 7(1): 440-448.
- [60] Ruiz-Carcel C, Starr A. Accelerated gearbox degradation monitoring using a combination of vibration and acoustic emission fea-

- tures[C]//20th Australian International Aerospace Congress. Virginia Beach: Vertical Flight Society, 2023.
- [61] Elasha F, Greaves M, Mba D. Planetary bearing defect detection in a commercial helicopter main gearbox with vibration and acoustic emission[J]. *Structural Health Monitoring*, 2018, 17(5): 1192-1212.
- [62] Leaman F. Phenomenological study of acoustic emissions generated by gear meshing in planetary gearboxes[J]. *Measurement Science and Technology*, 2025, 36(1): 015136.
- [63] Adryan F A, Sastra K W. Predictive maintenance for aircraft engine using machine learning: trends and challenges[J]. *AVIA*, 2021, 3(1): 1-14.
- [64] Wade D, Lugos R, Szelistowski M. Using machine learning algorithms to improve HUMS performance[C]//71st Annual Forum & Technology Display. Virginia Beach: Vertical Flight Society, 2015.
- [65] Cody T, Dempsey P J. Application of machine learning to rotorcraft health monitoring: E-19307[R]. Washington DC: NASA, 2017.
- [66] Wilson A, Wade D, Ling J, et al. Convolutional neural networks for frequency response predictions: SNL-NM [R]. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Lab, 2017.
- [67] Gildish E, Grebshtein M, Aperstein Y, et al. Helicopter bolt loosening monitoring using vibrations and machine learning[J]. *PHM Society European Conference*, 2022, 7(1): 146-155.
- [68] Li Tianfu, Zhao Zhibin, Sun Chuang, et al. Adaptive channel weighted CNN with multisensor fusion for condition monitoring of helicopter transmission system[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(15): 8364-8373.
- [69] Liu Dongdong, Cui Lingli, Cheng Weidong. A review on deep learning in planetary gearbox health state recognition: methods, applications, and dataset publication[J]. *Measurement Science and Technology*, 2024, 35(1): 012002.
- [70] Tuegel E J, Ingrassia A R, Eason T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011, 2011: 154798.
- [71] Lai Xiaonan, Yang Liangliang, He Xiwang, et al. Digital twin-based structural health monitoring by combining measurement and computational data: an aircraft wing example[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, 69: 76-90.
- [72] Matania O, Bechhoefer E, Bortman J. Digital twin of a gear root crack prognosis[J]. *Sensors*, 2023, 23(24): 9883.
- [73] Zhu Daoyong, Li Zhinong, Hu Niaoqing. Multi-body dynamics modeling and analysis of planetary gearbox combination failure based on digital twin[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(23): 12290.
- [74] 李恒, 唐倩, 陈国旺, 等. 数字孪生辅助的直升机尾传动系统轴承与传动轴故障诊断[J]. *航空动力学报*, 2025, 40(6): 20230818.
- Li Heng, Tang Qian, Chen Guowang, et al. Diagnosis of bearing and drive shaft faults in helicopter tail drive systems assisted by digital twin[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2025, 40(6): 20230818. (in Chinese)
- [75] Xia Jingyan, Huang Ruyi, Chen Zhuyun, et al. A novel digital twin-driven approach based on physical-virtual data fusion for gearbox fault diagnosis[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 240: 109542.

(编辑: 张 雪)