

飞机结构关键部位多轴疲劳损伤在线监测技术：原理、应用与展望

一、引言

1.1 研究背景与意义

在现代航空领域，飞机作为重要的交通工具和军事装备，其安全性与可靠性至关重要。飞机在服役过程中，结构关键部位承受着复杂的多轴交变载荷，如机身机翼连接部位、起落架支撑结构以及发动机吊架等，这些部位长期受到飞行过程中的空气动力、重力、惯性力以及发动机振动等多种载荷的综合作用，极易引发疲劳损伤。疲劳损伤是飞机结构失效的主要原因之一，其发展过程往往较为隐蔽，在初期不易被察觉，但随着飞行时间和起落次数的增加，疲劳裂纹会逐渐萌生并扩展，一旦达到临界尺寸，就可能导致结构突然断裂，引发严重的飞行事故，对人员生命和财产安全构成巨大威胁。例如，1988 年阿洛哈航空 243 号航班在飞行过程中，机身顶部因疲劳损伤发生大面积撕裂，险些造成机毁人亡的惨剧；又如 2001 年美国航空公司 587 号航班坠毁事件，调查结果显示飞机垂直尾翼因疲劳失效而脱落是导致事故的重要因素。

飞机结构关键部位的疲劳损伤不仅关乎飞行安全，还与飞机的维护成本密切相关。传统的飞机维护方式主要基于定期检修制度，按照固定的飞行小时或起落次数对飞机进行全面检查和维护。然而，由于不同飞机的实际使用情况和载荷环境存在差异，这种一刀切的维护方式往往存在过度维护或维护不足的问题。过度维护会导致不必要的停机时间和高昂的维护成本，增加航空公司的运营负担；而维护不足则可能使潜在的疲劳损伤未被及时发现和处理，埋下安全隐患。据统计，航空公司每年在飞机维护上的支出占运营成本的相当大比例，其中很大一部分用于应对结构疲劳相关的检查和维修工作。因此，准确监测飞机结构关键部位的疲劳损伤状态，实现基于实际损伤情况的精准维护，对于降低维护成本、提高飞机的运营效率具有重要意义。

为了满足飞机结构安全与维护的需求，在线监测技术应运而生。在线监测技术能够实时获取飞机结构关键部位的应力、应变、振动等物理参数，并通过数据分析和处理及时发现疲劳损伤的迹象，评估损伤程度和剩余寿命。与传统的定期检测方法相比，在线监测技术具有实时性、连续性和高精度的优势，可以及时捕捉到疲劳损伤的早期信号，为采取有效的维护措施提供充足的时间，从而显著提高飞机的安全性和可靠性。同时，基于在线监测数据的维护决策能够更加科学合理，避免不必要的维护工作，降低维护成本。然而，目前飞机结构关键部位多轴疲劳损伤在线监测技术仍面临诸多挑战，如复杂载荷环境下的信号准确采集与处理、多轴疲劳损伤的精确评估模型以及监测系统的可靠性与稳定性等问题，这些都限制了在线监测技术的广泛应用和监测效果的进一步提升。因此，开展飞机结构关键部位多轴疲劳损伤在线监测技术研究具有重要的理论意义和实际应用价值，它不仅有助于推动航空结构健康监测技术的发展，还能为飞机的安全运营和高效维护提供强有力的技术支持。

1.2 国内外研究现状

在飞机结构多轴疲劳损伤监测领域，国内外学者和科研机构开展了大量研究工作，取得了一系列成果。国外在该领域起步较早，技术相对成熟。美国在航空结构健康监测技术研究方面处于世界领先地位，**NASA** 等机构长期致力于飞机结构疲劳损伤监测技术的研究与开发，研发了多种先进的监测系统和方法。例如，基于应变片测量技术，通过在飞机结构关键部位粘贴高精度应变片，实时获取应变数据，进而分析多轴应力状态下的疲劳损伤情况。美国空军研究实验室（**AFRL**）开展的“智能飞机结构”项目，综合运用传感器技术、数据处理算法和人工智能技术，实现了对飞机结构多轴疲劳损伤的实时监测与评估，显著提高了飞机结构的安全性和可靠性。

欧洲各国在飞机结构多轴疲劳损伤监测方面也有深入研究。英国的罗尔斯·罗伊斯公司在航空发动机结构健康监测领域成果显著，采用先进的振动监测技术和油液分析技术，结合多物理场耦合分析方法，实现了对发动机关键部件多轴疲劳损伤的有效监测。法国的空中客车公司通过对飞机结构进行详细的有限元分析，确定关键部位的应力分布，在此基础上建立多轴疲劳损伤预测模型，为飞机的维护和检修提供科学依据。

国内对飞机结构多轴疲劳损伤监测技术的研究近年来发展迅速。北京航空航天大学、西北工业大学、南京航空航天大学等高校以及中国飞机强度研究所等科研机构在该领域开展了广泛研究。在传感器技术方面，研发了多种新型传感器，如光纤布拉格光栅传感器、声发射传感器等。光纤布拉格光栅传感器具有抗电磁干扰、灵敏度高、可分布式测量等优点，能够有效监测飞机结构在复杂环境下的应变变化；声发射传感器则可捕捉疲劳裂纹萌生和扩展过程中产生的声发射信号，实现对疲劳损伤的早期预警。

在多轴疲劳损伤评估模型方面，国内学者结合飞机结构的实际工况和材料特性，提出了一系列改进的评估模型。例如，基于临界面法的多轴疲劳损伤评估模型，考虑了材料的各向异性和多轴应力状态下的疲劳损伤机制，提高了评估的准确性；还有学者将神经网络、遗传算法等智能算法引入多轴疲劳损伤评估中，通过对大量试验数据的学习和训练，建立了智能化的评估模型，能够更准确地预测疲劳寿命。

然而，现有技术仍存在一些不足之处。在信号采集方面，复杂的飞行环境和多轴载荷的相互作用容易导致信号干扰和噪声，影响数据的准确性和可靠性；在多轴疲劳损伤评估模型方面，虽然已经取得了一定进展，但由于飞机结构的复杂性和材料性能的分散性，模型的通用性和精度仍有待提高；此外，监测系统的可靠性和稳定性也是需要进一步解决的问题，确保监测系统在长期的飞行过程中能够持续、准确地工作，是实现多轴疲劳损伤在线监测的关键。

1.3 研究目标与内容

本研究旨在开发一种高效、准确的飞机结构关键部位多轴疲劳损伤在线监测技术，实现对飞机结构关键部位多轴疲劳损伤的实时监测、精确评估以及剩余寿命预测，为飞机的安全运营和维护提供可靠依据。具体研究内容如下：

- 1. 多轴疲劳损伤监测原理与信号采集：**深入研究飞机结构在多轴载荷作用下的疲劳损伤机理，明确疲劳裂纹萌生与扩展的物理过程和力学特征。基于此，选择合适的监测物理量，如应变、应力、振动等，并分析这些物理量与多轴疲劳损伤之间的内在联系，为监测方法的建立奠定理论基础。针对飞机复杂的飞行环境和多轴载荷工况，研发高精度、高可靠性的传感器系统，实现对关键部位监测物理量的准确采集。考虑传感器的选型、布局以及安装方式，确保传感器能够稳定地获取信号，同时减少信号干扰和噪声影响。例如，采用先进的光纤传感器技术，利用其抗电磁干扰、灵敏度高、可分布式测量等优点，实现对飞机结

构多轴应变的精确测量；结合无线传输技术，将传感器采集到的数据实时传输至数据处理单元，提高数据传输的效率和可靠性。

2. 多轴疲劳损伤评估方法与模型

：综合考虑材料特性、载荷历程、应力集中等因素，建立适用于飞机结构关键部位的多轴疲劳损伤评估模型。例如，基于临界面法，考虑材料的各向异性和多轴应力状态下的疲劳损伤机制，构建多轴疲劳损伤评估模型；引入概率统计方法，考虑材料性能的分散性和载荷的不确定性，对模型进行修正和完善，提高评估的准确性和可靠性。针对在线监测的实时性要求，研究快速、高效的多轴疲劳损伤评估算法。采用数据降维、特征提取等技术，对采集到的大量监测数据进行预处理，减少数据处理量；结合人工智能算法，如神经网络、支持向量机等，实现对多轴疲劳损伤的快速评估和预测。

3. **在线监测系统设计与实现**：根据监测原理和评估方法，设计一套完整的飞机结构关键部位多轴疲劳损伤在线监测系统。该系统包括传感器模块、数据采集与传输模块、数据处理与分析模块以及监测结果显示与报警模块等。各模块之间相互协作，实现对多轴疲劳损伤的实时监测和评估。对在线监测系统进行集成与优化，提高系统的可靠性、稳定性和易用性。进行系统的可靠性分析和测试，确保系统在长期的飞行过程中能够持续、准确地工作；优化系统的软件算法和硬件结构，提高系统的响应速度和处理能力；设计友好的人机交互界面，方便操作人员实时了解监测结果和进行系统设置。
4. **实验验证与案例分析**：开展实验室模拟实验，利用疲劳试验设备对飞机结构关键部位的典型试件进行多轴疲劳加载试验，模拟飞机实际飞行中的载荷工况。通过在线监测系统获取试件的监测数据，并与传统的离线检测方法进行对比验证，评估监测系统的准确性和可靠性。结合实际飞机型号，选取飞机结构关键部位进行现场测试和案例分析。将在线监测系统安装在飞机上，实时监测飞机在实际飞行过程中的多轴疲劳损伤情况。根据监测结果，对飞机结构的安全性和剩余寿命进行评估，并与飞机的实际维护记录进行对比分析，进一步验证监测技术的有效性和实用性。

二、飞机结构关键部位分析

2.1 机翼

机翼作为飞机产生升力的关键部件，是飞机结构中至关重要的部分。它的主要功用是提供升力，与尾翼一起保证飞机具有良好的稳定性。在机翼上一般配有副翼和襟翼，操纵副翼可使飞机滚转，放下襟翼可使升力增大。同时，机翼还需要承受飞机在飞行过程中的多种复杂载荷，这些载荷的作用使得机翼极易引发疲劳损伤，对飞机的安全飞行构成潜在威胁。

在飞行过程中，机翼承受的载荷类型复杂多样。气动载荷是机翼承受的主要载荷之一，它是由于气流对机翼表面施加的压力和力矩引起的。这些载荷主要受飞行速度、攻角、俯仰角、滚转角、偏航角等因素的影响。当飞机飞行速度增加时，机翼表面受到的气动力会显著增大；攻角的变化会改变机翼上下表面的压力分布，从而影响升力和阻力的大小，进而产生不同程度的气动载荷。地面起降载荷也是机翼在飞行过程中需要承受的重要载荷。飞机在地面滑行、起飞和降落过程中，会受到颠簸、震动和动力输入等因素的影响，这些都会对机翼产生地面起降载荷。在起飞阶段，机翼需要承受飞机加速产生的惯性力；降落时，机翼则要承受飞机与跑道接触瞬间的冲击力以及滑行过程中的震动载荷。操作载荷同样不可忽视，它是由于飞机的操纵手柄操作、操纵面运动和操纵面失速等因素引起的。当飞行员操纵飞机进行转弯、拉升、俯冲等动作时，机翼会受到不同方向和大小的操作载荷。

在这些复杂载荷的长期作用下，机翼各部位极易出现疲劳损伤。机翼的上下蒙皮是承受气动载荷的主要部位，在交变的气动力作用下，蒙皮表面容易产生微小裂纹。随着飞行次数的增加和载荷的不断作用，这些裂纹会逐渐扩展，降低蒙皮的承载能力。当裂纹扩展到一定程度时，可能会导致蒙皮撕裂，严重影响机翼的结构完整性。机翼的桁条和翼梁作为机翼的主要承力构件，承受着较大的弯曲和剪切载荷。在飞行过程中，桁条和翼梁受到的载荷会不断变化，容易在应力集中部位产生疲劳裂纹。例如，在桁条与翼梁的连接部位、铆钉孔周围等位置，由于结构的不连续性，应力集中现象较为严重，是疲劳裂纹的高发区域。一旦桁条或翼梁出现疲劳裂纹，其承载能力将大幅下降，可能导致机翼结构的局部失稳，进而引发严重的飞行事故。

以某型飞机为例，在实际飞行过程中，通过对机翼关键部位的监测发现，机翼下蒙皮在经过一定飞行小时后，出现了多处微小裂纹。经分析，这些裂纹是由于长期受到气动载荷和地面起降载荷的共同作用，在应力集中区域逐渐萌生并扩展形成的。如果不及时对这些裂纹进行处理，随着裂纹的进一步扩展，可能会导致机翼下蒙皮破裂，影响飞机的飞行安全。又如另一型号飞机，在进行机翼疲劳试验时，发现机翼的翼梁在模拟飞行载荷作用下，出现了疲劳裂纹。经过对试验数据的分析和研究，确定是由于翼梁在承受复杂的弯曲和剪切载荷时，材料内部的微观结构发生变化，导致疲劳裂纹的产生。这一案例充分说明了机翼在飞行过程中承受的复杂载荷对其疲劳损伤的影响。

2.2 机身

机身是飞机的核心部件之一，它承担着众多重要功能。机身的主要作用是装载人员、货物以及各种设备，为飞机的飞行任务提供必要的搭载空间。同时，机身还是连接机翼、尾翼、起落架等其他部件的关键结构，确保飞机各部分能够协同工作，共同完成飞行使命。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/078067043130007045>