民航场道桥梁飞机往复荷载累积损伤监测与数值预测研究

王玲玲

中国民航工程咨询有限公司　北京　100621

摘　要：本文研究的是民航场道桥梁在飞机反复起降、来回碾压下，结构慢慢累积损伤的问题，从监测和数值预测两个方向入手。先分析了典型机型的荷载特点，搭出疲劳荷载谱，把线性和非线性累积损伤理论以及损伤表征指标理了一遍。然后设计了现场监测方案，依托实测数据揭示结构动态响应与损伤演化规律。再建三维有限元模型，模拟多循环往复荷载作用下结构损伤演化过程，结合 Miner 准则及非线性损伤修正模型开展累积损伤评估，实现剩余服役寿命预测，并提出分级损伤预警阈值与运维保障建议。

关键词：民航场道桥梁；飞机往复荷载；累积损伤监测；数值预测

引言：民航运输量一直在涨，场道桥梁承受的飞机往复荷载也越来越频繁，由此带来的疲劳累积损伤问题慢慢凸显出来。飞机动载、温度循环加上环境因素耦合在一起，桥梁结构容易出现刚度退化和裂缝扩展，运营安全会受到威胁。但目前针对民航场道桥梁疲劳损伤监测和寿命预测的研究还不够充分。本文采用现场监测与数值模拟相结合的研究手段，把飞机往复荷载下桥梁损伤演化的规律揭示出来，建立累积损伤评价和剩余寿命预测模型，为场道桥梁的全寿命周期管理提供技术支撑。

1 飞机往复荷载作用下场道桥梁累积损伤基础理论

1.1 民航飞机荷载特性与荷载谱构建

（1）典型民航机型轮轴参数、轮压与接地分布特征：以 A320、B737、B777 解析主起落架荷载，分析轮轴构型、轮压、接地面积，考虑滑行转弯制动下接地压力非均匀性；飞机轮迹存在横向离散性，造成桥梁受力随机，换算等效轴载，建立轮载接地压力模型。

（2）飞机往复通行随机荷载统计方法，雨流计数原理：飞机滑行荷载为随机变幅荷载，采用雨流计数法处理实测或仿真荷载时程，提取应力幅值、均值与频次，剔除小幅值循环，建立荷载统计样本[1]，该方法适配混凝土、钢筋疲劳分析。

（3）场道桥梁疲劳荷载谱编制方法：结合机型占比、通行架次、轮迹分布，依据等效损伤原则编制多级疲劳荷载谱，保留主控高幅值循环，为损伤计算与有限元模拟提供荷载输入。

1.2 结构疲劳累积损伤基本理论

（1）Miner线性累积损伤准则与非线性修正模型。Miner 准则假定各级应力水平下损伤独立线性叠加，形式简洁，但没考虑荷载顺序效应和损伤非线性演化。需引入 Marco-Starkey 模型、双线性模型等非线性修正模型，比如 Marco-Starkey 模型、双线性模型这些，把损伤累积路径修正一下，提高飞机往复荷载下损伤评估的精度。（2）混凝土、钢筋 S-N 疲劳曲线与损伤演化本构关系。分别建立混凝土受压、受拉和钢筋受拉的 S-N 曲线，明确应力比、加载频率对疲劳寿命的影响。在此基础上，构建混凝土与钢筋的疲劳损伤演化本构关系，描述刚度退化、残余应变累积等损伤变量随荷载循环次数的演化规律。（3）飞机动载、温度、环境耦合下损伤叠加机理。飞机动载、温度循环加上湿度、氯离子这些环境因素一起作用在场道桥梁上，需要把多因素耦合下损伤叠加的机理揭示出来，建立动载-温度-环境多场耦合损伤模型，明确各因素对疲劳损伤的贡献权重和耦合效应。

1.3 场道桥梁损伤表征指标与监测原理

（1）力学指标：应变、挠度、动力特性（自振频率、阻尼）。应变和挠度能直接反映结构局部和整体的受力状态，自振频率和阻尼比则能表征结构刚度退化和能量耗散能力。明确各力学指标的监测方法、测点布设原则及其对结构损伤的敏感程度。（2）表观损伤指标：裂缝宽度、剥落、刚度退化。裂缝宽度和剥落面积是混凝土结构损伤的直接表观特征，刚度退化则综合反映承载能力下降。建立表观损伤指标量化分级标准，揭示表观损伤与结构内部损伤之间的对应关系。（3）结构损伤识别基本原理。基于监测数据和理论模型，用模型修

正、模式识别、神经网络这些方法识别结构损伤的位置和程度，把损伤识别的基本流程和关键算法讲清楚[2]。

2 民航场道桥梁飞机往复荷载现场监测方案与实测分析

2.1 监测对象概况与测点布置

（1）选取代表性民航场道桥梁，查清结构形式、跨径布置、设计荷载、材料强度、建成年代及服役年限；现场重点普查桥面板裂缝、支座老化脱空、伸缩缝损坏、混凝土剥落露筋及钢筋锈蚀，并用裂缝观测仪、回弹仪、钢筋锈蚀仪量化建档、形成评估报告，为测点布置和损伤评估打基础。

（2）按桥梁动力响应特点和监测目标选用应变、位移、加速度传感器：电阻应变片测动态应变，振弦式应变计测长期静态应变；位移传感器/激光位移计测梁体挠度和支座位移，量程与精度满足飞机通行工况；压电式加速度传感器覆盖桥梁前几阶自振频率。传感器应高灵敏、抗电磁干扰、耐温湿变化、长期稳定，适应机场复杂环境。

（3）按结构受力特点和病害分布布点，在跨中、支点、变截面及裂缝密集区布应变和位移测点，在桥面和梁体布加速度测点，覆盖关键受力区域与损伤敏感部位；搭建集成信号调理、A/D 转换、无线传输和供电模块的多通道同步采集系统，支持触发/连续采集、多测点同步采样、实时存储和远程查看。

2.2 现场监测实施与数据预处理

（1）飞机通行工况下动态数据采集试验：挑典型航班运行时段做现场监测，记录不同机型、不同滑行速度和不同载重下的结构动态响应。同时记下飞机轮轴通过时刻、通行方向和架次，把荷载事件和结构响应对应起来。环境温度、湿度和风速这些辅助参数也得记，保证数据可追溯、工况能辨认。每种机型采集不少于 N 次有效通行数据，保证监测样本具备统计代表性（N 根据试验方案填写具体数值）。（2）原始数据降噪、剔除异常值与时程数据提取：用小波变换、经验模态分解这些方法给原始信号降噪，把电磁干扰、温度漂移和传感器故障引起的异常值剔掉。滤波加分段处理，把每次通行事件的结构响应时程数据提出来，采样频率和时基统一，形成标准化数据样本。缺失数据采用插值法补齐，对漂移信号开展基线校正，数据质量得满足后续分析要求[3]。（3）实测应力时程统计与应力幅分析：对提取的应力时程做统计分析，算应力均值、幅值、循环次数和等效等幅应力。用雨流计数法做循环分解，拿到应力幅谱和频次分布，画出应力幅直方图和累积频次曲线。分析不同机型和通行工况下应力幅的分布特点，给疲劳损伤计算提供实测荷载依据。

2.3 场道桥梁疲劳荷载谱编制方法

结合机场实际运营的机型构成比例、年通行架次、轮迹横向分布概率，再融合雨流计数得到的荷载循环统计结果，遵循疲劳等效损伤原则，将大量随机变幅荷载等效转化为分级离散的多级疲劳荷载谱。等效损伤原则保证编制后的荷载谱与原始随机荷载造成的结构疲劳损伤水平保持一致，过滤大量低损伤贡献的微小循环，保留对累积损伤起控制作用的高幅值荷载循环。编制完成的多级疲劳荷载谱，可作为场道桥梁累积损伤理论计算、有限元数值模拟的标准化荷载输入，实现飞机往复随机荷载向可计算疲劳荷载条件的转化。

2.4 实测数据下桥梁损伤特征分析

（1）不同机型通行下结构动态响应规律：对比 A320、B737、B777 这些机型通行时的应变、挠度和加速度响应，分析机型重量、轮轴布置、滑行速度对结构动力放大系数及响应幅值的影响规律。把不同机型下结构响应的差异和规律找出来，清楚重载机型和频繁通行的机型对结构损伤的贡献差多少，给荷载谱编制和损伤评估提供依据。（2）循环荷载作用下结构响应随加载次数变化特征：基于长期监测数据，分析结构应变幅值、自振频率和阻尼比随着飞机通行架次增加怎么变。识别刚度退化和损伤累积的演化过程，判断结构有没有进入损伤加速发展阶段。结合环境温度和湿度变化，把荷载效应和环境效应分开，提取真实的疲劳损伤演化规律。（3）基于实测数据初步评估当前累积损伤水平：结合实测应力谱和 Miner 准则或非线性损伤模型，算关键测点的累积损伤度。综合力学指标和表观损伤指标，初步评估场道桥梁在当前飞机往复荷载下的损伤水平和剩余疲劳寿命。按评估结果划分损伤等级，给后续维护决策和加固设计提供依据。

3 民航场道桥梁累积损伤数值建模与剩余寿命预测

3.1 场道桥梁有限元模型建立与模型验证

（1）依据设计图纸和现场检测数据，采用 ANSYS、ABAQUS 或 MIDAS 建立三维实体有限元模型，桥面板、主梁、横隔梁、支座及墩台按实际尺寸建模，钢筋和预应力筋用嵌入单元或等效弥散方式模拟。混凝土采用塑性损伤本构并输入弹性模量、抗压抗拉强度、断裂能和损伤因子；钢筋采用双线性随动强化模型并输入屈服强度、极限强度和弹性模量。单元类型与网格划分兼顾精

度与效率，受力关键区域加密[4]。

（2）按典型机型轮轴参数和接地压力，将飞机荷载简化为移动轮载或等效均布面荷载，通过用户子程序或时间-空间函数实现往复移动加载；边界条件按实际支承形式设置，支座处用弹性连接或固定约束，桥面与路基衔接段设合理约束，并考虑滑行速度、轮迹横向分布和多轮叠加效应。

（3）将数值模拟的应变、挠度和自振频率与现场实测数据对比，通过调整材料参数、边界刚度和阻尼比校准模型，并用误差分析和相关性检验评价精度，确保模型能准确反映飞机往复荷载下的静动力响应，为损伤演化模拟和寿命预测打基础。

3.2 往复荷载下桥梁损伤演化数值模拟

（1）多循环飞机荷载工况计算方案：根据疲劳荷载谱和实测通行数据，设计多循环加载计算方案，涵盖不同机型组合、通行频次和荷载幅值水平。用逐级加载或者等效加速加载的方式，模拟结构在长期往复荷载下的响应累积过程。计算时把荷载顺序效应和间歇期影响考虑进去，循环次数和计算步长设得合理，损伤演化过程才能追踪得到。（2）桥面板、主梁应力分布与损伤发展过程模拟：把各循环加载步下桥面板和主梁关键截面的应力时程提出来，分析应力幅值、均值和分布规律。基于混凝土和钢筋的疲劳损伤本构关系，算材料刚度退化、残余应变和损伤因子的演化过程，找出损伤萌生位置和扩展路径，分析桥面板开裂、主梁疲劳损伤、支座劣化的发生先后次序及其耦合作用机制。（3）不同影响参数（机型、通行频次、环境）敏感性分析：把机型组合、年通行架次、温度循环幅度和湿度环境这些参数系统地变一变，做敏感性分析。量化各因素对结构损伤累积速率和最终损伤程度的影响权重，把控制损伤发展的关键因素找出来，为运维策略和荷载限值确定提供依据。

3.3 累积损伤评价与剩余寿命预测

（1）基于 Miner 准则的桥梁累积损伤因子计算：依托数值模拟应力谱与雨流计数结果，结合混凝土、钢筋 S-N 曲线，采用 Miner 准则计算各测点损伤因子，对非线性显著区域引入修正模型，汇总构件损伤因子得到整体损伤度，评判结构损伤水平与安全裕度[5]。（2）场道桥梁剩余服役寿命预测模型：以损伤因子为控制变量，构建兼顾飞机荷载、环境及材料老化的寿命模型，结合实测损伤演化动态修正，提升预测精度。（3）结构损伤预警阈值与运维建议：依据损伤与寿命结果制定分级预警阈值，划分运营管控标准，提出运维对策，支撑桥梁全寿命周期管理。

结束语

本文系统开展民航场道桥梁受飞机往复荷载作用下的累积损伤监测与数值预测方法研究。针对飞机动载、温度与环境耦合引发的疲劳损伤问题，综合采用疲劳荷载谱构建、现场实桥监测、有限元数值模拟以及结构损伤评估等技术手段，揭示往复荷载作用下场道桥梁的损伤萌生、发展与演化规律，建立适配民航场道桥梁的剩余服役寿命预测模型以及分级损伤预警阈值体系。研究所得成果可为场道桥梁的运维决策、病害加固设计以及飞机滑行通行管控提供重要理论依据与技术参考。后续研究可进一步深化动载 - 温度 - 环境多场耦合效应和荷载随机因素的影响分析，优化结构损伤识别算法，改善寿命预测的可靠度与计算精度，为民航场道桥梁实现全寿命周期智能化运维管理提供有力支撑。

参考文献

[1] 张润峰. 滑行道桥疲劳寿命预测及影响因素分析 [J]. 公路交通科技,2026,43(4):153-162.

[2] 胡哲. 高频强冲击荷载下机场道面结构损伤演化与应力缓释机制 [J]. 交通运输工程学报,2026,26(2):210-221.

[3] 廖蜀娇, 赵媛媛. 多因素作用下机场滑行道桥健康承载力学性能分析 [J]. 北京航空航天大学学报,2026,52(7):2403-2413.

[4] 张宇辉, 高一驰. 基于结构响应参数的机场滑行道桥损伤量化分析 [J]. 铁道科学与工程学报,2025,22(8):3042-3051.

[5] 黄信. 机场滑行道桥桥面板横向有效分布宽度分析 [J]. 科学技术与工程,2022,22(26):1154-1158.