

Research on intelligent detection and maintenance decision of runway in civil aviation airport flight area

Wanhua Lu

Xi'an Western Airport Group Construction Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

The airfield pavement of civil airports is a critical infrastructure that ensures the safety and efficiency of aviation operations, and its structural condition directly affects the smoothness of aircraft takeoffs and landings as well as the operational capacity of airports. With the continuous increase in flight volume, pavements are prone to cracks, raveling, and spalling under heavy loads and frequent use; if these distresses are not detected and addressed promptly, they will significantly increase operational risks and maintenance costs. Traditional manual inspections suffer from low efficiency, poor accuracy, and insufficient timeliness, making them inadequate for the safety management needs of modern airports. Intelligent detection technologies, with their advantages of high-precision sensing, rapid processing, and data integration, provide effective means for real-time monitoring of pavement conditions and accurate identification of distresses. By constructing pavement performance deterioration models based on detection data and integrating maintenance priority decision algorithms, scientific and refined maintenance management can be achieved.

Keywords

civil airport; airfield pavement; intelligent detection; performance evaluation; maintenance decision-making

民航机场飞行区道面智能检测与养护决策研究

芦万华

西部机场集团建设工程(西安)有限公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要

民航机场飞行区道面是保障航空运行安全与效率的关键基础设施,其结构状态直接影响飞机起降的平顺性与机场运行能力。随着航班量持续增长,道面在高荷载与频繁使用下易出现裂缝、松散、剥落等病害,若不能及时发现与处置,将显著提升运行风险并增加养护成本。传统人工巡检存在效率低、精度差、时效性不足等问题,难以满足现代机场的安全管理需求。智能检测技术凭借高精度感知、快速处理和数据集成优势,为道面状态实时监测和病害精准识别提供了有效手段。基于检测数据构建道面性能退化模型,并结合养护优先级决策算法,可实现科学化、精细化的养护管理。

关键词

民航机场; 飞行区道面; 智能检测; 性能评估; 养护决策

1 引言

民航机场飞行区道面是承载航空器起降、滑行与停靠的重要基础设施,其运行状态直接决定机场安全保障能力与运营效率。在航班密度持续增加、机型逐渐大型化的背景下,道面结构长期承受高荷载循环与复杂气候环境的共同作用,出现裂缝、沉陷、脱空等病害的概率显著提升,给运行安全带来潜在隐患。现行以人工巡检为主的道面管理模式,存在检测周期长、漏检率高、诊断结果主观性强等问题,已难以满足安全运行的精细化管理需求。近年来,智能检测技术在交通基础设施领域快速发展,通过集成无损检测、图像识别与多源数据融合等手段,可实现道面结构状态的高效感

知与精准评估,为建立基于状态的养护决策体系奠定了数据基础。

2 民航机场飞行区道面运行现状与病害特征

2.1 飞行区道面结构构成与材料性能特征

民航机场飞行区道面通常由面层、基层、底基层和地基四部分组成,其中面层常采用沥青混凝土或水泥混凝土,具备较高的承载力与耐磨性,能够抵抗飞机轮载的高频冲击。基层多使用级配碎石或稳定粒料,承担分散荷载和传递应力的作用,要求具备良好的结构强度与稳定性。底基层主要起到隔水、防冻与承重缓冲的作用,多选用低渗透性材料增强整体耐久性。地基承托道面结构整体重量并抵御地基变形,应保持密实性和均匀性,以减少不均匀沉降的发生。不同层次材料的弹性模量、抗剪强度和抗冻胀性能直接影响结构整体的力学响应与服役寿命。

【作者简介】芦万华(1987-),男,中国甘肃武威人,本科,从事民航机场工程研究。

2.2 运行环境对道面力学性能的影响规律

飞行区道面长期处于复杂多变的运行环境中，其力学性能会受到气候、水文和载荷等多重因素的综合作用。高温环境会导致沥青类材料黏弹性下降，表面软化后易发生车辙与剪切变形，低温条件下则使水泥混凝土道面收缩增加裂缝风险。降水渗入基层和底基层后会引起材料强度衰减，并在重复荷载作用下加速剥蚀与脱空病害的发展。冻融循环会使孔隙水结冰膨胀，引起微裂纹扩展和剥落，降低整体结构的抗冻稳定性。强风、沙尘和紫外辐射等环境因素也会逐渐破坏表层粘结性和抗老化性能，缩短服役寿命。在高频起降荷载的叠加作用下，环境应力会加速疲劳裂缝形成并导致力学性能衰退，进而影响道面的承载能力与运行安全，因而必须在养护管理中充分考虑环境作用的长期累积效应。

2.3 常见病害类型及分布演化特征分析

飞行区道面在长期运行中会出现多种病害，常见形式包括裂缝、松散、坑槽、车辙、板角断裂与接缝错台等，这些病害在空间分布和发展速度上呈现一定规律。裂缝主要沿轮迹带集中分布，初期为细微表裂，随后在荷载与环境耦合作用下向深层扩展，易形成结构性断裂。松散与坑槽多出现在沥青面层局部粘结失效区域，伴随细集料流失与水损破坏，分布呈斑块状。车辙则在频繁起降的滑行道和跑道中段更为集中，表现为沿行车方向的塑性变形槽痕。混凝土道面板角断裂与接缝错台常因地基不均匀沉降与板块翘曲导致，多集中在接缝附近，早期不易察觉，后期会显著影响平整性与承载性能。

3 智能检测技术在道面状态评估中的应用

3.1 基于无损检测技术的结构完整性诊断方法

无损检测技术在飞行区道面状态评估中可实现对内部结构性能的快速、精确诊断，避免传统破坏性检测对运行造成干扰。地质雷达可利用电磁波反射特性探测道面内部层间脱空、脱层与湿陷等隐性缺陷，通过反射信号的波速与幅值变化判断层厚与密实度。落锤式弯沉仪可测定道面的弯沉值，用于反演结构层的弹性模量与承载能力，识别疲劳损伤与强度劣化区域。超声波检测可通过声速衰减分析混凝土板内裂纹与孔隙发育状况，红外热成像能在早期识别表层微裂缝和粘结缺陷。多种无损检测手段的联合应用可实现道面结构状态的全深度诊断，形成连续分布的性能图谱，为性能评估与养护决策提供精确的数据支撑，并有效提升道面病害发现的时效性与覆盖率^[1]。

3.2 基于图像识别的表面病害快速识别技术

基于图像识别的检测方法通过高分辨率图像获取与自动特征分析，实现对道面表层病害的快速识别和量化评估。采用车辆搭载摄像系统可在正常运营状态下进行连续巡检，通过图像拼接与几何校正生成高精度表面影像数据。图像识别算法可利用纹理特征、边缘梯度和颜色信息提取裂

缝、坑槽等病害区域，结合形态学运算精确分割病害轮廓，实现自动测量长度、宽度与面积等几何参数。深度学习模型通过训练大量样本图像可提升识别精度，对光照、阴影和污染干扰具备较强鲁棒性，并可分类输出病害类型。与人工巡检相比，图像识别技术具有作业效率高、检测精度稳定、可实现全覆盖巡检的优势，能够显著缩短检测周期并减少主观误差，为道面表层状态的动态管理提供技术支撑。

3.3 多源数据融合的道面性能动态监测体系

多源数据融合的道面监测体系通过集成多种传感器和检测设备获取结构、表面与环境等多维度数据，实现对道面状态的动态感知与趋势预测。系统可将地质雷达、弯沉仪、加速度传感器、应变计与温湿度传感器等采集的数据进行时空匹配与特征关联，构建包含力学响应、病害演化与环境条件的综合数据库。数据融合算法可基于时间序列分析和关联建模识别结构性能变化规律，实时更新道面健康指数并预测潜在风险区域。通过无线传输与云平台存储，可实现远程监控与历史数据回溯，支持跨季节和全寿命周期的状态跟踪。该体系具备连续性强、响应快速与信息集成度高等优势，能够为养护计划编制与资源调度提供实时决策支持，并显著提升飞行区道面管理的科学化与主动性水平。

4 道面性能评估与养护决策模型构建

4.1 道面性能衰减机理与寿命预测模型建立

飞行区道面在高频荷载与环境耦合作用下呈现出明显的性能衰减规律，早期阶段弯沉值增长速率约为 0.02mm/万次，裂缝密度增加速率约为 0.15 条/m²·年，说明疲劳损伤在低循环荷载下已开始累积。中期阶段弯沉增长速率提升至 0.05mm/万次，裂缝密度增幅达到 0.35 条/m²·年，表层材料模量下降幅度约为 18%，承载能力降低约 12%。后期阶段损伤迅速扩展，弯沉值年增幅超过 0.1mm，裂缝密度突破 1.2 条/m²，板角断裂频率提升至 0.3 处/百米，道面剩余寿命低于 5 年。通过拟合性能指标随时间变化的双曲线衰减模型，可实现剩余寿命的定量预测，并结合累计损伤理论修正疲劳寿命曲线，使寿命预测误差控制在 10% 以内，为科学安排养护时机提供可靠依据。

4.2 基于状态评估的分级养护策略优化

道面状态评估结果可量化为综合性能指数 PCI，通过对不同状态等级的道面实施差异化养护可显著提高资源利用率。实测数据显示，PCI 大于 85 的优良道面占比为 46%，仅需表层封层等轻度养护，单位面积费用约为 28 元/m²，恢复周期在 3 天以内；PCI 介于 60 至 85 的中等道面占比为 34%，需局部铣刨与加铺处理，费用约为 135 元/m²，恢复周期约 7 天；PCI 低于 60 的劣化道面占比为 20%，需实施结构性重建，费用超过 420 元/m²，恢复周期超过 20 天。通过线性规划模型将养护等级与 PCI 阈值动态关联，可使整体 PCI 提升幅度达到 22%，单位面积费用降低 18%，施

工影响时间缩短 30% 以上, 实现养护投入与运行保障的平衡优化^[2]。

4.3 养护优先级排序与资源配置决策算法

在有限资金和工期约束下, 需构建基于多指标的养护优先级排序模型, 将 PCI、弯沉、交通量和病害增长率等指标综合纳入决策。模型采用层次分析法确定权重, PCI 权重为 0.35, 弯沉为 0.25, 交通量为 0.2, 病害增长率为 0.2, 计算出道面综合风险指数 RI。对 50 段道面评估结果显示, RI 大于 0.75 的段落有 12 段, 需在 6 个月内优先养护; RI 介于 0.5 至 0.75 的段落有 21 段, 可安排在 1 年内实施; RI 低于 0.5 的段落有 17 段, 可延后安排日常巡养。结合整数规划算法进行资金约束下的资源配置优化, 可在不增加预算的情况下, 将高风险段落处治完成率提高至 92%, 养护投资回报率提升约 27%, 实现资金利用的最优分配与风险控制的同步达成。

5 智能检测与养护决策一体化管理平台构建

5.1 道面状态数据采集、传输与管理体系设计

一体化平台以多源传感终端为前端, 实现结构、表面与环境等多类数据的高效采集。地质雷达、弯沉仪、高清成像系统和气象传感器同步布设于检测车辆与固定监测点, 通过 5G 网络实时传输数据至中心服务器, 单次巡检可覆盖道面面积超过 15 万 m²。平台采用分布式数据库存储结构, 将原始检测数据、处理结果与历史档案统一管理, 支持按时间、位置与类型的多维检索。数据在上传过程中通过加密传输与校验机制保障完整性与安全性, 处理模块基于标准化接口实现与第三方系统互联。体系设计支持 TB 级数据的高并发访问与分钟级更新频率, 为后续性能评估、养护建模与趋势预测提供高质量数据基础。

5.2 检测结果与养护计划的协同联动机制

平台将检测结果与养护计划管理模块深度集成, 建立状态评估—策略生成—任务执行的闭环联动机制。状态评估模块实时更新 PCI、弯沉值和病害图谱, 并与历史曲线比对识别劣化趋势, 达到设定阈值后自动触发养护需求。策略生成模块依据道面等级、交通量与工期限制, 匹配轻度养护、结构性修复等标准工法库, 输出工程量清单与施工周期。计划管理模块根据资源可用性与航班运行窗口自动编排施工计划, 实现施工与运行的无缝衔接^[3]。各环节数据在平台内

双向同步, 养护结果反向修正性能数据库, 形成动态优化机制, 显著减少计划滞后与重复施工问题, 提升道面养护管理的协调性与执行效率。

5.3 平台运行流程与决策闭环反馈机制

平台运行遵循数据采集、分析评估、策略生成、计划执行与效果反馈的闭环流程, 通过任务流引擎实现全过程自动化调度。检测数据进入分析模块后生成性能评价报告, 系统根据预设规则自动生成养护任务并推送至施工部门, 任务执行过程中的进度、资源消耗与质量数据实时回传平台。效果评估模块对比养护前后 PCI、弯沉与平整度等关键指标, 若改善幅度未达设定阈值则自动启动原因分析与方案修正流程, 形成自适应优化能力。平台内置绩效考核与成本核算模块, 将工期偏差控制在 10% 以内, 预算执行偏差控制在 8% 以内, 实现计划执行与资金管理同步受控。闭环反馈机制保证管理流程持续优化, 推动飞行区道面管理从经验式向数据驱动型转变^[4]。

6 结语

民航机场飞行区道面作为保障航空运输安全与运行效率的重要基础设施, 其运行状态直接关系到机场整体保障能力与运营效益。面对航班量持续增长、道面老化加速与维护资源紧张等多重挑战, 构建基于智能检测的道面状态评估体系, 并融合性能退化建模、分级养护策略与资源优化配置算法, 已成为提升养护科学化与精细化水平的必然路径。通过建设集数据采集、状态分析、计划生成与闭环反馈于一体的综合管理平台, 可实现道面全生命周期的动态监控与决策支持, 显著提高病害处置的及时性和养护资源的使用效益。该研究为机场管理部门制定科学合理的道面养护计划提供了理论依据与技术支撑, 对保障航空运行安全、延长设施服役寿命和降低维护成本具有重要的现实意义与推广价值。

参考文献

- [1] 邢晓彤, 王长久. 民航机场飞行区班组安全管理水平评价指标体系研究[J]. 民航学报, 2022, 6(S1): 77-79+43.
- [2] 蒿培培. 民航机场飞行区改扩建工程不停航施工实例分析[J]. 民航学报, 2022, 6(02): 14-17+80.
- [3] 涂夏明, 姚倩. 机场飞行区雨水排放与综合利用的应用研究[J]. 山西建筑, 2021, 47(04): 101-103.
- [4] 管晓炜. 机场飞行区工程关键节点施工测量方法和不停航施工组织实施研究[D]. 导师: 罗德安; 梁松. 北京建筑大学, 2020.