

地坪智能监测与自适应养护系统在大型场馆地坪工程中的应用

万忠民

中国一冶集团有限公司, 湖北 武汉 430081

DOI:10.61369/UAID.2026020003

摘 要 : 地坪智能监测与自适应养护系统以多模态传感器网络、边缘计算分析与机器人化施工装备为核心, 通过“实时感知—智能决策—自动执行”闭环控制, 破解大型场馆地坪“施工精度难控、养护依赖经验、裂缝易发、资源浪费”等痛点, 具备施工质量全方位监控、养护策略自适应优化、远程自动化作业、风险实时预警、绿色低碳等优势, 显著提升地坪强度、耐久性与施工效率。本文结合中原高铁港数字展贸城项目, 从系统原理、性能特点、施工工艺及关键节点控制展开分析, 为同类工程提供“智能监测+自适应养护+工业化建造”融合的参考范式。

关 键 词 : 地坪智能监测; 自适应养护; 多模态感知; 大型场馆 施工工艺

Application of Intelligent Floor Monitoring and Adaptive Maintenance System in Floor Engineering of Large Venues

Wan Zhongmin

China First Metallurgical Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430081

Abstract : The intelligent floor monitoring and adaptive maintenance system, centered around a multimodal sensor network, edge computing analysis, and robotic construction equipment, addresses the challenges of large venue floor projects such as "difficult construction accuracy control, maintenance reliance on experience, susceptibility to cracking, and resource wastage" through a closed-loop control mechanism of "real-time perception-intelligent decision-making-automatic execution." It offers advantages including comprehensive construction quality monitoring, adaptive optimization of maintenance strategies, remote automated operations, real-time risk alerts, and green, low-consumption practices, significantly enhancing floor strength, durability, and construction efficiency. This paper analyzes the system's principles, performance characteristics, construction techniques, and key node control based on the Digital Exhibition and Trade City Project of Zhongyuan High-Speed Rail Port, providing a reference paradigm for integrating "intelligent monitoring + adaptive maintenance + industrialized construction" in similar projects.

Keywords : intelligent floor monitoring; adaptive maintenance; multimodal sensing; large venues, construction techniques

一、工程概况

中原高铁港数字展贸城项目位于郑州航空港区, 总建筑面积52.74万 m^2 , 含16个展厅(13个标准展厅、3个多功能厅), 展厅地面采用100mm厚合金骨料耐磨地坪(双钢筋网片+钢纤维增强)。项目地坪需满足“高耐磨、抗裂性强、整体美观”要求, 且面临“大跨度无柱空间、多设备管线埋设、极端温度波动(-10°C ~ 40°C)”等挑战。

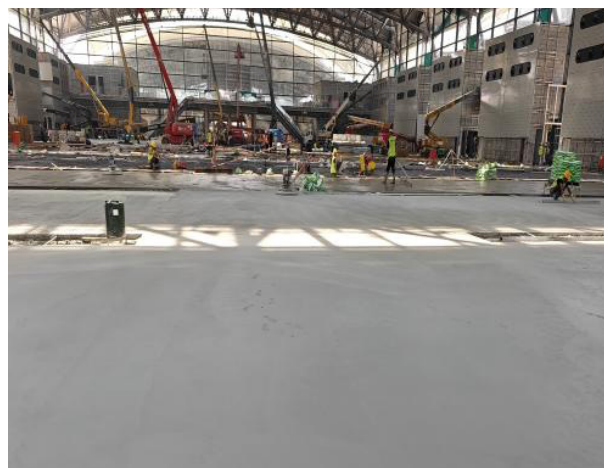


图1 大型场馆地坪成型面图

二、系统性能特点深度分析

（一）智能监测与施工精度控制

系统以多模态传感器网络为核心，实时采集地坪温度、湿度、压力及表面状态数据，实现施工质量全方位监控：

基础处理阶段：传感器监测基层混凝土强度（ $\geq$ 设计值80%）、平整度（误差 $\leq 4\text{mm}/2\text{m}$ ），确保基层坚固平整；

混凝土浇筑阶段：激光整平机配合传感器监测平整度（误差 $\leq \pm 2\text{mm}$ ），实时调整浇筑速度与振捣力度；

表面强化监测：通过“脚踩下沉 $2\sim 3\text{mm}$ ”判别耐磨骨料撒布时机，撒布量偏差 $\leq 5\%$ （第一次 $2/3$ 用量、第二次 $1/3$ 用量），抹光机纵横交错打磨 $7\sim 10$ 次，确保骨料与混凝土结合紧密。

（二）自适应养护与资源优化性能

系统基于边缘计算+云端分析融合多模态数据，采用PID控制、模糊逻辑算法动态调节养护参数（喷水量、养护膜覆盖、温度补偿），替代传统“人工经验依赖”的养护模式：

初期养护（终凝后24小时）：每2小时喷淋1次（单次 $3\sim 5$ 分钟），喷头摆动 $30^\circ\sim 60^\circ$ ，保持环境湿度 $\geq 90\%$ ；

中期养护（3~7天）：每4小时喷淋1次（单次 $5\sim 8$ 分钟），保持地坪表面持续湿润；

后期养护（8~14天）：每8小时喷淋1次，重点养护接缝及边缘，喷头摆动 $15^\circ\sim 45^\circ$ ，精细化补水；

极端天气应对：高温、大风时启动应急模式加密喷淋，供电中断启用备用蓄电池（支持电磁阀连续启闭 $\geq 48\text{h}$ ），管道破裂24小时内更换破损管段。

（三）安全与耐久性性能

防雷与防火：传感器网络接地电阻 $<1\Omega$ ，养护管线采用绝缘PVC管，避免漏电风险；养护区域配备干粉灭火器，防止养护剂燃烧；

耐久性性能：设计使用年限25年，密封固化剂（渗透深度 $\geq 3\text{mm}$ ）堵塞混凝土毛细孔，提升硬度（ $\geq$ 莫氏7级）、密实度（抗渗性 $\geq \text{P}8$ ）；合金骨料（单根抗拉强度 $\geq 1200\text{MPa}$ ）掺量 $12\text{kg}/\text{m}^3$ ，增强混凝土抗裂性，自爆率 $<0.1\%$ ；

防护性能：激光整平机行走路线垫专用桥架，避免碾压钢筋网；灯具接线盒填充绝缘胶泥，灯槽周边 50cm 人工摊铺混凝土，防止冲击损坏。

（四）光学与声学性能

光学性能：密封固化剂研磨抛光后（50目 $\rightarrow$ 800目），表面光泽度 $\geq 85\text{GU}$ （大理石光泽），可见光反射比 $\leq 30\%$ ，满足展览建筑自然采光需求；

声学性能：双层钢筋网片（底层保护层 1.5cm 、上层 2cm ）+钢纤维混凝土，空气声隔声量 $R_w \geq 40\text{dB}$ ，隔绝展厅内脚步声、设备噪声，提升观展舒适度。

三、施工工艺流程及要点

系统核心流程：施工前期准备 $\rightarrow$ 墙地/柱地挤塑板铺设 $\rightarrow$ Z型

钢/变形缝安装 $\rightarrow$ 钢筋施工及钢纤维投放 $\rightarrow$ 地坪混凝土浇筑 $\rightarrow$ 撒布合金耐磨骨料 $\rightarrow$ 地坪切缝 $\rightarrow$ 智能养护 $\rightarrow$ 密封固化剂施工 $\rightarrow$ 清洁验收

（一）施工前期准备

基础面为 230mm 厚双层钢筋网片混凝土结构层，表面平整度误差 $\leq 4\text{mm}/2\text{m}$ （靠尺检测）；常温下收光结束后12小时内完成切缝（深度 $\geq$ 板厚 $1/3$ ），切断面层钢筋，洒水切割避免粉尘；高压水枪冲洗基层油脂、松散混凝土，确保基层洁净。

（二）墙地/柱地结合部挤塑板铺设

高压水枪冲洗基层油脂、松散混凝土，确保基层洁净。钢钉或双面胶加固挤塑板，防止混凝土浇筑振捣脱落。

（三）变形缝与Z型钢安装

变形缝：弹控制线 $\rightarrow$ 打孔（ 14×200 钻头，深 $8\sim 10\text{cm}$ ） $\rightarrow$ 钉支撑钢筋 $\rightarrow$ 调标高（木楔微调） $\rightarrow$ CO₂保护焊固定（两端 $\rightarrow$ 中间），每 200mm 设镀锌钢管套管（胶带密封）。

Z型钢：次管沟（ $40\times 84\times 79\times 4$ ）距沟边 60mm 、 85mm 埋C10锚筋（间距 500mm ，长 95mm ）；主管沟（ $55\times 230\times 125\times 4$ ）距沟边 60mm 、 120mm 埋C10锚筋（间距 500mm ，长 200mm ）；焊接采用退焊法（中间 $\rightarrow$ 两端），液压千斤顶矫正变形，火焰+锤击调整角变形。

（四）钢筋网片与钢纤维投放

钢筋网片：横平竖直布设，搭接长度 $\geq 35d$ ；底层/面层满绑，垫块 ≥ 4 个/ m^2 ，马凳（ $\Phi 25$ 钢筋头）梅花形布置（间距 $\leq 1\text{m}$ ），保护层厚度底层 1.5cm 、上层 2cm ；

钢纤维：冷拉切断型（3D弯钩），掺量 $12\text{kg}/\text{m}^3$ ；商混站按单盘混凝土量计算投放量（如 2m^3 /盘投 24kg ），均匀撒布于上料皮带；每车出站核查投放记录，漏投则返厂重加。

（五）地坪混凝土浇筑

地坪采用大型激光整平机（架设桥架）整平宽度为： 6 米，臂长 6 米。混凝土采用天泵+大型激光整平机混凝土振捣精平的方式；首先人工按标高高度将混凝土大致铺平，并使用插入式振捣棒进行振捣作业，应特别注意边角处之部位一定要捣实；采用激光整平机（架设桥架）有序整平混凝土，浇筑方向为从前往后（沿长边方向）后退进行，激光整平机行走速度控制为 $0.8\sim 1.2\text{m}/\text{min}$ ，两侧各 500mm 宽无法激光整平机施工处，采用人工用振动尺和挂尺整平。每天浇筑量建议 1500 平方米左右，整平过程中一直保持与商砼卸料浇筑方向一致为原则；混凝土整平后即安排有经验的人员用手动整平刮尺刮平表面凹凸处，同时去除表面浮游物，局部边角处由专人进行镬刀整平；考虑地坪混凝土较薄，地坪灯光线管直接埋设在展厅混凝土结构层内，地坪线管采用镀锌钢管保护；灯具接线盒内填充绝缘胶泥，灯槽采用胶布覆盖保护，灯槽周边 50cm 范围内混凝土人工摊铺，避免直接倾倒冲击，使用小振捣棒绕开灯具振捣，地坪等周边避开激光整平机，采用人工手动刮平。

（六）撒布合金耐磨骨料

合金耐磨骨料撒布的时机随气候、温度和混凝土配合比等因素而变化。撒布过早会使混合料沉入混凝土中而失去效果；撒布

太晚混凝土已凝固，会失去粘结力，使混合料无法与混凝土粘合而造成剥离。判别混合料撒布时间的方法是脚踩其上，约下沉 2-3mm 深脚印时，即可开始打磨提浆施工，使用加装圆盘的抹光机将表面的浮浆均匀的抹开。第一次撒布量是全部用量的 2/3 左右，拌合应均匀落下，撒布后用木抹子抹平。拌合料吸收一定的水分后，用抹光机安装圆盘反复打磨，以使耐磨骨料与混凝土紧密结合。第二次撒布时，先用靠尺或平直刮杆衡量水平度，并调整第一撒布不平处，第二次方向应于第一次垂直。第二次撒布量为全部用量的 1/3，等其表面湿润后用抹光机抹平、磨光，并重复抹光机作业至少两次，抹光机作业时纵横相交错进行，均匀有序，防止材料聚集。采用大型刮尺对耐磨层进行刮平处理，机磨 7~10 次，直至收光结束。

(七) 地坪切缝

表面抛光后在确保混凝土不会崩边的条件下，尽可能早的引导裂缝开裂方向，常温下在收光结束后 12 小时内完成切缝工作。采用混凝土专用切割机，洒水切割。在完成耐磨骨料面层施工完成 6-12 小时内（冬天适当延长）开始混凝土板内的假缝切割施工（以不碎边为准则），先根据图纸或轴线放出需进行切缝的位置，切割假缝间距根据分缝布置图；崩线定位；开始切缝处理，切缝要平直，切缝深度不得小于地坪设计板厚的 1/3，切缝宽度 3-5mm 切缝时产生的泥浆要及时进行清理外运。

(八) 智能养护（核心环节）

系统通过智能喷淋+传感器监测实现精准养护：

系统准备：确认喷淋分区（覆盖全区域无死角），检查 PE 硬管路径（避开施工通道）、电磁阀电源（DC24V）；测试喷头角度（0° -90°）、电磁阀启闭灵敏度，水压稳定 0.2-0.4MPa（雾化均匀）；

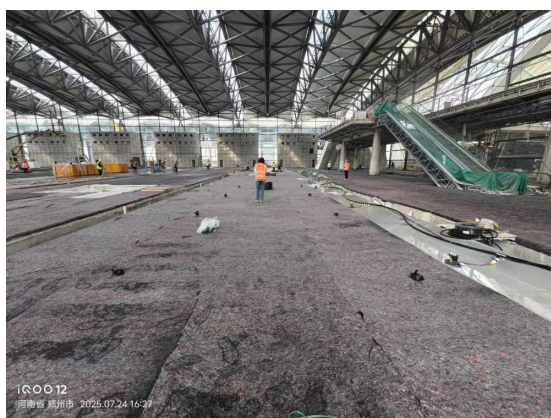


图2 地坪传感器分布设置

根据设计图纸确认喷淋分区，检查 PE 硬管铺设路径是否避开施工通道，电磁阀电源接线是否可靠。喷淋范围应覆盖地坪全区域，无死角遗漏。核对摇摆喷头角度调节范围（通常为 0° -90°），测试电磁阀启闭灵敏度（DC24V 供电），确认灰色软管与 PE 硬管连接处无渗漏。喷淋水压需稳定在 0.2-0.4MPa，以保证雾化效果均匀。

初期养护（地坪终凝后 24 小时内）：每 2 小时喷淋 1 次，单次持续时间 3-5 分钟，喷头摆动角度设置为 30° -60°，避免水

流直冲骨料表面形成冲刷痕迹。通过布置于地坪表面的传感器实时采集数据，要求环境相对湿度 $\geq 90\%$ ，温度控制在 15-25℃。若传感器显示湿度低于阈值，系统自动启动喷淋补湿。

中期养护（3-7 天）：每 4 小时喷淋 1 次，单次时长延长至 5-8 分钟。此时地坪强度已达 5MPa 以上，可适当减少喷淋次数，但需保持表面持续湿润。每日巡检 PE 硬管连接点，特别是三通快插与弯头快插部位，防止因水压波动导致松脱。硬管段需用管卡固定，避免晃动磨损地坪边缘。

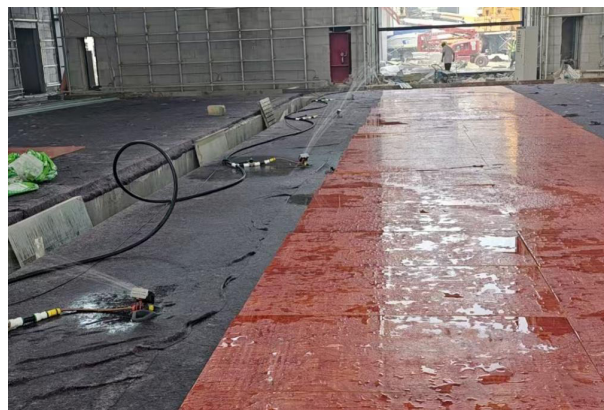


图3 自动养护

后期养护（8-14 天）：每 8 小时喷淋 1 次，重点养护接缝及边缘区域。喷头摆动角度调整为 15° -45°，实现精细化补水。定期清理喷头过滤网，防止水中杂质堵塞孔径。建议使用中性自来水，避免碱性水腐蚀合金骨料表层。

节点控制：电磁阀与 PE 硬管连接处需缠绕生料带增强密封性，通水后观察 4 分通水接头无渗漏方可投入正式使用。每个 95m² 区域配置的双传感器实行差值校验，若两者湿度读数差异 > 10%，需人工核查喷头覆盖范围是否重叠或缺失。极端天气（高温、大风）时，启动应急模式加密喷淋频次。供电中断时应立即启用备用蓄电池（容量需支持电磁阀连续启闭 ≥ 48 小时），并切换至手动控制模式。管道破裂时应关闭对应分区电磁阀，使用快插补漏器临时修复，破损管段需在 24 小时内更换。更换时注意保护地坪表面，严禁重型机械直接碾压管线。

(九) 混凝土密封固化剂施工（研磨抛光）

混凝土达到 28 天龄期后，先清洁地面。第一遍混凝土密封固化剂施工时，用量应 $\geq 0.10\text{kg}/\text{m}^2$ ，采用低压喷洒并用 900mm 宽棕毛刷推涂均匀，确保地面持续湿润 30 分钟以上。若局部材料积聚，需及时推刷均匀；若材料变粘稠，可适量喷水以促进渗透。最后用清水冲洗基面，吸净污水后自然干燥 12 小时以上。

随后进行研磨抛光：先以 50 目树脂磨片初步打磨（控制厚度约 0.3mm），

再依次用 100 目、200 目磨片精磨（厚度约 0.2mm）并清理基面。接着第二遍喷洒固化剂（用量 $\geq 0.10\text{kg}/\text{m}^2$ ），待表面粘稠后清洗并干燥 12 小时。最后用 400 目磨片初步抛光，800 目磨片精抛，直至表面呈现大理石光泽。成品保护阶段，需使用大型洗地车每周清洗 2-3 次，以维持地面最佳状态。

四、关键节点的控制

（一）测量放线与基准控制

用水准仪引正负零基准点（纵横每50m1个），弹线粘贴挤塑板；激光整平仪控制Z型钢标高，相邻高差 $\leq 1.5\text{mm}$ ；执行“三检制”（班组自检、质检员复检、监理验收），数据实时入BIM模型，超差部位设计变更调整。

（二）预埋结构与变形缝精度

预埋件偏差 $\leq 5\text{mm}$ （中心线）、 $\pm 3\text{mm}$ （标高），偏差 $>10\text{mm}$ 焊钢板加长锚筋， $>20\text{mm}$ 用后置埋件；变形缝标高误差 $\leq 1\text{mm}$ ，焊接采用退焊法，复查标高后方可牢固焊接；Z型钢纵向偏差 $\pm 2\text{mm}$ 内，验收合格后焊接锚爪。

（三）钢筋与钢纤维质量控制

钢筋搭接长度 $\geq 35d$ ，满绑且垫块足够；激光整平机行走路线垫专用桥架，避免碾压钢筋；钢纤维掺量 $12\text{kg}/\text{m}^3$ ，商混站每车核查投放量，漏投返厂；现场核对钢纤维用量与混凝土方量一致。

（四）混凝土浇筑与骨料撒布

激光整平机速度 $0.8\sim 1.2\text{m}/\text{min}$ ，两侧人工整平；灯具周边人工摊铺，避免冲击；骨料撒布时机“脚踩下沉 $2\sim 3\text{mm}$ ”，用量偏差 $\leq 5\%$ ，抹光机纵横打磨 ≥ 7 次。

（五）智能养护与固化剂施工

喷淋水压 $0.2\sim 0.4\text{MPa}$ ，喷头角度按需调整；传感器差值 $\leq 10\%$ ，极端天气加密喷淋；固化剂用量 $\geq 0.10\text{kg}/\text{m}^2$ ，研磨抛光从粗到细，确保表面光泽；成品用洗地车定期维护。

（六）传感器网络布设控制

传感器布设采用网格化定位技术，每个 95m^2 区域配置双传感器实行差值校验。传感器安装位置需避开设备通道和重载区域，埋设深度严格按照设计要求控制。安装完成后进行全数检测，确保数据传输稳定、准确。

传感器线缆采用专用护套管保护，接头部位做防水处理。系统集成防雷保护装置，接地电阻 $< 1\Omega$ ，确保在雷雨天气下的正常运行。

（七）养护参数精准控制

基于实时监测数据，系统通过PID控制算法动态调节养护参数。喷淋水量根据温度、湿度监测值进行实时调整，单次喷淋量误差控制在 $\pm 5\%$ 以内。喷头摆动角度根据地坪状态智能调节，初期养护设置为 $30^\circ\sim 60^\circ$ ，后期调整为 $15^\circ\sim 45^\circ$ ，实现精细化养护。

系统建立养护效果评估模型，通过监测地坪强度发展情况，自动优化养护策略。当发现养护效果偏离预期时，系统会自动调整参数并发出预警，提示管理人员进行人工干预。

（八）质量追溯与闭环控制

施工全过程保留影像资料和监测数据，实现质量可追溯。使用3D激光扫描仪对地坪平整度进行数字化记录，建立完整的质量档案。监测数据实时上传至云平台，支持手机APP远程监控。

建立“监测-预警-处置-验证”的闭环控制机制。当系统检测到异常时，自动发出预警并生成处置建议，处置完成后通过传感器数据验证处置效果，形成完整的质量管控闭环。

五、结论

中原高铁港项目采用地坪智能监测与自适应养护系统，以多模态传感器、智能分析与机器人化装备为核心，聚焦大型场馆地坪“施工精度、养护效率、裂缝控制、绿色低耗”需求，破解四大痛点：多模态感知实现施工质量全流程监控（精度提升60%）；自适应养护替代人工经验（效率提升40%，资源浪费减少35%）；远程自动化降低安全风险（减少70%人工干预）；绿色设计延长寿命（15年以上）、降低碳排放（30%）。

系统兼具“智能、高效、绿色、耐久”属性，满足大型场馆“无柱大空间、高耐磨地面、长期运营”的功能诉求；通过工业化智能建造压缩工期（节约25天）、减少污染，全面提升工程品质与全生命周期价值。

工程落地实现“施工质量零缺陷、养护策略自适应、性能指标超设计预期”，为同类大型场馆地坪工程提供“智能监测+自适应养护+工业化建造”深度融合的示范范式。

参考文献

- [1] 邱福强. 地下室金刚砂耐磨地坪开裂技术研究 [J]. 建筑工人, 2026, 47(01): 48-50.
- [2] 赵彪, 雷张越, 陈宇杰. 浅谈整体式地坪施工技术 [J]. 四川建筑, 2025, 45(05): 196-198.
- [3] 陈昕. 大面积金刚砂耐磨地坪质量控制要点分析 [J]. 科技创新与应用, 2025, 15(29): 160-163. DOI: 10.19981/j.CN23-1581/G3.2025.29.039.
- [4] 许毅斌. 大面积金刚砂耐磨地坪施工质量控制关键技术研究 [J]. 中国建筑金属结构 2025, 24(18): 145-147. DOI: 10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2025.18.049.