

# 路基施工智能化管理与应用研究

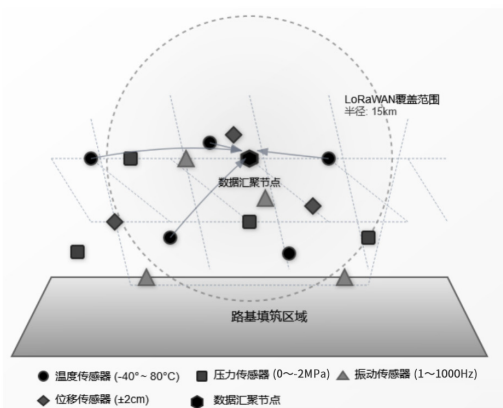
文 | 翟永行

路基施工智能化管理技术通过融合物联网传感、大数据挖掘、人工智能决策、元宇宙虚拟仿真等前沿技术，构建智能感知、精准决策、协同控制的一体化管理体系。该技术有效突破了传统路基施工管理中协调困难、响应滞后、精度不足等技术瓶颈，为实现路基施工过程的自动化监控、智能化调度、数字化管控奠定了坚实基础。

## 智能感知与数据融合技术在路基施工中的应用

### 多维传感器网络构建与部署策略

传感器节点按照三角网格拓扑方式进行部署，节点之间的间距依靠信号传输衰减模型计算得出最优部署密度。如图 1 所示，温度、压力、振动及位移传感器等进行空间分布式安装，它们共同构成了针对路基填筑区域的立体监测网络，其中温度传感器承担着监测  $-40 \sim 80^\circ\text{C}$  土体温度波动的任务，压力传感器以  $0 \sim 2\text{MPa}$  量程来评估压实质量，振动传感器在  $1 \sim 1000\text{Hz}$  频带内采集机械作业动态。网络选用 LoRaWAN 协议实现长距离低功耗的数据传输，单节点覆盖半径能够达到  $15\text{km}$ ，成功应对复杂地形下的信号覆盖挑战。



来源：中铁十六局集团有限公司

图 1 多维传感器网络空间部署示意

### 施工现场实时数据采集与预处理

实时数据采集系统基于边缘计算框架，在工地现场部署传感节点，以每秒千次高频采样率精准捕捉振动信息。预处理环节采用小波分解方法对原始信号进行频域分析，结合自适应阈值处理有效滤除施工电磁干扰与机械杂波。数据传输环节采用霍夫曼编码实现  $8:1$  高效压缩，大幅减少网络带宽占用。异常检测模块综合应用三倍标准差法则与滑动窗口统计方法，当监测值超出正常波动区间  $3\sigma$  范围时自动标记异常。系统通过信噪比计算及完整性校验等质量评估手段，确保采集数据的可靠性维持在  $95\%$  以上。

### 多源异构数据融合算法优化

多源异构数据融合采用改进的卡尔曼滤波算法，以融

合来自不同传感器的测量数据，提高状态估计精度。融合算法的状态方程为：

$$X_k = A_{k-1}X_{k-1} + B_{k-1}U_{k-1} + W_{k-1}$$

式中， $X_k$  表示  $k$  时刻的系统状态向量（包含位移、速度、加速度）， $A_{k-1}$  为状态转移矩阵， $B_{k-1}$  为控制输入矩阵， $U_{k-1}$  为控制向量， $W_{k-1}$  为过程噪声。测量方程为：

$$Z_k = H_kX_k + V_k$$

式中， $Z_k$  为  $k$  时刻的观测向量， $H_k$  为观测矩阵， $V_k$  为测量噪声。数据融合精度通过协方差矩阵  $P_k$  量化，融合后的状态估计误差标准差降低至单一传感器的  $35\%$ 。算法引入时间窗口滑动平均和加权融合机制，对于压实度数据融合权重分配为振动传感器  $0.6$ 、压力传感器  $0.4$ ，实现多维度数据的协同感知与精确融合。

## 路基施工全过程智能决策支持系统

### 基于深度学习的施工参数智能预测模型

运用长短期记忆网络（LSTM）架构来构建预测模型，此模型用于路基压实度、含水率及承载力等关键施工参数的预测；输入层整合了土质类型、施工机械参数、环境温湿度等  $15$  维特征数据，隐藏层配置了  $128$  个神经元单元，输出层能够预报未来  $6$  小时内施工参数的变化趋势，训练集包含  $8000$  组不同土质条件下的施工工况样本。采用 Adam 优化算法进行模型参数的更新，学习率设定为  $0.001$ ，预测性能通过均方根误差（RMSE）来进行评估，结果显示压实度预测误差不超过  $3\%$ ，含水率预测精度可达  $\pm 0.8\%$ 。该模型集成了贝叶斯优化超参数调节机制，通过融合网格搜索与随机搜索策略，自动实现网络结构和学习参数的最优配置。

### 施工工艺智能优化与动态调控机制

施工工艺智能优化运用遗传算法和粒子群优化结合的混合策略，构建起包含压实遍数、行驶速度及振动频率等关键工艺参数的多目标优化模型。此模型把压实质量、施工效率与能耗要求当作优化目标，借助加权求和方式形成综合评价函数。压实遍数被设定在  $4 \sim 12$  次的范围，行驶速度限

制在 2 ~ 8km/h 的区间, 振动频率能够在 25 ~ 35Hz 的范围内进行调节。动态调控机制依靠模糊控制理论, 建立起施工参数与土体响应特性之间的非线性映射关系, 模糊规则库涵盖 81 条控制规则, 采用重心法来完成模糊推理与解模糊化的处理。系统响应时间控制在 200ms 以内, 实现施工工艺参数的实时自适应调整, 在保证路基压实质量达标的同时提升施工效率。

#### 风险评估与预警的智能化算法设计

构建出基于集成学习的路基施工安全风险评估方法, 此体系融合支持向量机分类器和随机森林回归器的优势, 风险评价指标包含结构稳定性、施工安全性及环境影响性 3 个主要方面, 总共选取 18 项评估因子, 并运用层次分析法确定各因子权重。在模型参数设置方面支持向量机选用径向基核函数, 正则化参数 C 设定为 100 且核函数参数  $\gamma$  为 0.01, 随机森林模型包含 200 棵决策树并设定最大深度为 10、叶节点最小样本数要求为 5。依据风险指数范围把风险等级划分为低风险 (0 ~ 0.3)、中风险 (0.3 ~ 0.7) 和高风险 (0.7 ~ 1.0) 3 个级别。预警机制通过时间序列分析建立风险趋势预测模型, 当监测到风险指数连续 3 个时间点持续上升且增幅超过 15% 时, 系统自动发出预警。该预警机制准确率能达到 92% 以上。

#### 元宇宙驱动的路基施工虚实融合管理平台

##### 数字孪生路基施工场景构建技术

数字孪生路基施工场景通过高精度三维建模技术构建虚拟施工环境, 实现物理世界与数字世界的精准映射。某城际铁路路基工程项目采用激光雷达点云扫描技术获取施工现场地形数据, 点云密度达到每平方米 1 万点, 精度控制在  $\pm 2\text{cm}$  以内。三维模型采用多层次细节 (LOD) 技术进行优化, 远景区域采用 LOD 3 级精度降低渲染负载, 近景施工区域采用 LOD 0 级最高精度, 确保操作准确性。虚拟场景渲染引擎基于 Unreal Engine 5.0 开发, 支持实时光线追踪和全局光照效果, 帧率稳定在 60fps 以上。数字孪生系统建立与物理施工现场的实时数据同步机制, 数据更新频率为 100Hz, 延迟控制在 50ms 以内, 确保虚拟场景能够准确反映该项目复杂地质条件下真实施工状态的动态变化过程。

##### 沉浸式虚拟现实施工培训与指导系统

沉浸式虚拟现实培训系统基于 Unity 3D 引擎构建三维交互式培训环境, 集成 HTC Vive Pro 头显设备实现 360° 视觉沉浸体验。该项目构建了包含路基填筑、软土地基处理、高边坡防护施工等 12 个核心施工工艺模块, 每个模块设置不同难度等级的培训场景。虚拟现实环境中的物理碰撞检测精度达到毫米级, haptic force feedback 力反馈系统提供

触觉交互体验, 力反馈强度范围 0.1 ~ 40N 可以满足不同操作需求。培训评估体系基于动作捕捉技术记录操作轨迹, 通过与标准操作流程的偏差分析计算培训成绩, 评分精度达到  $\pm 2$  分。如表 1 所示, 该项目虚拟现实培训模式相比传统培训模式在多个维度显著提升了培训效果, 知识掌握程度提升 35%, 操作熟练度提升 42%。

表 1 某城际铁路项目虚拟现实培训与传统培训效果对比

评估指标	传统培训模式	虚拟现实培训模式	提升幅度
知识掌握程度 / %	72	97	+35%
操作熟练度 / %	65	92	+42%
安全意识评分 / 分	7.2	9.4	+31%
培训时间 / 小时	48	32	-33%

来源: 中铁十六局集团有限公司

#### 增强现实技术在现场施工中的交互应用

利用 Microsoft HoloLens 2 混合现实设备, 增强现实技术在城际铁路路基施工现场实现了数字信息和物理环境的高效融合, 为施工团队提供直观实时指导。系统通过运用 SLAM (同步定位与地图构建) 算法完成空间定位, 定位精度保持在  $\pm 5\text{cm}$  的范围内, 60Hz 追踪刷新率保证虚拟内容在复杂工况与实际场景精准同步, 增强现实界面整合施工进度、质量检测数据、安全警示等多元化信息, 信息传输延迟控制在不超过 100ms。基于深度学习算法开发的手势识别系统可识别 15 种标准化施工手势指令, 识别准确率超过了 96%; 语音交互模块凭借自然语言处理技术实现中文语音指令智能解析, 响应时间控制在 300ms 以内。该增强现实系统与 BIM 模型进行深度对接, 施工人员可借助 AR 设备直接调取三维设计图纸等技术文件, 有效提升项目在特殊工况下的施工精度和团队协作效率。

#### 结束语

路基施工智能化管理技术的深度应用实现了施工过程从被动响应向主动预控的根本转变。智能感知系统提升了数据采集的全面性和实时性, 智能决策算法增强了施工管控的精准性和适应性, 元宇宙融合平台拓展了管理模式的沉浸性和交互性。智能化管理技术将持续推动路基施工向数字孪生化、决策自主化、操作无人化方向演进, 为构建新一代智慧交通基础设施提供核心技术驱动力, 同时为相关工程领域的智能化改造提供可复制推广的技术范式和实践经验。

作者简介: 翟永行 中铁十六局集团有限公司

责任编辑: 杨佳宇 投稿邮箱: zhouhl@staff.ccidnet.com