

# 基于大数据的沥青路面裂缝预测模型研究

文 | 陈玉敏

随着智能交通基础设施建设不断加速，沥青路面裂缝预测成道路安全运营关键环节，传统检测方法存在效率低精度不足问题，难以满足路网智能化管理方面的需求，数字孪生技术为路面状态实时映射提供新途径，深度学习算法在裂缝识别当中展现出优势，联邦学习可解决数据隐私保护方面的难题，区块链技术为养护决策提供可信溯源基础。

## 数字孪生驱动的多源数据融合体系

### 路面裂缝数字孪生感知与采集架构

数字孪生感知系统会构建物理路面和虚拟空间实时映射通道，通过激光扫描仪采集路面三维点云数据来获取裂缝深度信息，利用高分辨率工业相机捕获表面纹理特征形成二维影像序列，借助振动传感器监测路基沉降产生的动态响应信号。在多传感器协同工作模式当中各类设备按照预设时序触发数据采集任务，边缘网关会对原始信息流执行时间戳标注与空间坐标配准操作。采集架构采用分布式部署方案，把感知节点沿着路段均匀进行布设，以此实现全网无缝覆盖。

### 边缘计算支持的多源异构数据融合

边缘计算节点被部署在数据采集前端来承担实时预处理任务，对激光点云执行降噪滤波与特征点提取以减少冗余信息传输负荷，将高维图像通过卷积编码器压缩成低维特征向量，从而保留关键纹理模式，振动信号经过快速傅里叶变换转换到频域空间来提取主频分量。异构数据融合采用加权贝叶斯估计方法整合不同源的置信度评分，通过卡尔曼滤波算法对时序观测值进行递推更新以修正预测误差。融合后的特征矩阵输入深度神经网络完成语义标注任务，区分横向裂缝、纵向裂缝以及龟裂等损伤模式，为后续预测建模提供高质量训练样本。

### 时空数据质量控制与异常检测机制

在多源数据采集的过程当中，传感器故障、环境干扰和通信中断这类因素，会造成数据质量下降，进而影响后续预测模型的准确性。研究构建起基于统计分析机器学习相结合的数据质量控制体系，通过设定阈值范围对采集到的数据进行有效性校验，剔除超出物理意义的那些异常观测值，异常检测模块采用孤立森林算法来识别时序数据中的突变点，利用局部离群因子方法检测空间分布上的孤立样本。数据修复策略依据相邻时空节点的观测值进行插值补全，对于长时间缺失的数据段采用生成对抗网络合成符合统计特性的替代序列，质量评估指标包含数据完整率、一致性系数和时

效性得分，为融合算法提供可信度权重分配依据，确保进入预测模型的训练样本满足质量标准要求。

## 联邦学习框架下的智能预测模型

### 时空注意力卷积神经网络构建

时空注意力卷积神经网络把历史裂缝演化序列和空间分布模式进行融合，借助长短期记忆单元捕捉裂缝发展的时序依赖关系来建立动态预测模型。卷积层在空间维度上提取局部邻域特征，循环层在时间维度累积历史状态信息，注意力机制对不同时刻的观测值赋予自适应权重（见图1）。网络损失函数采用均方误差与结构相似度的加权组合形式：

$$L = \alpha \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 + \beta [1 - \text{SSIM}(y - \hat{y})]$$

式中 $\alpha$ 为总损失值（无量纲），为均方误差权重系数[无量纲， $N$ 为样本数量（个）]， $y_i$ 为第 $i$ 个样本的真实裂缝扩展长度（mm）， $\hat{y}_i$ 为对应预测值（mm）， $\beta$ 为结构相似权重系数（无量纲），SSIM为结构相似度函数（取值范围0到1）。该损失函数同时对预测精度与空间结构一致性进行约束。

### 分布式联邦学习模型训练策略

联邦学习架构能让多个路段管理单位在不共享原始数据的情况下协同训练全局预测模型，各参与节点会利用本地数据集独立完成前向传播与反向梯度计算。中心服务器会定期收集各节点上传的加密梯度参数并执行联邦平均聚合操作，根据各节点数据规模分配差异化的权重系数，差分隐私机制会在梯度上传前注入高斯噪声扰动，以满足隐私保护强度参数设定并维持模型收敛性能。该训练框架利用异步通信协议来降低节点之间的等待时延，并且能够支持大规模路网开展并行化的模型优化工作。多方安全计算协议采用同态加密技术对梯度值进行加密处理，来实现数据不出域的分布式协作训练模式。

### 数字孪生体反馈的模型动态优化

数字孪生虚拟环境会持续接收实际路面传感器回传的监测数据,通过对比预测结果和真实演化轨迹来计算偏差值,以此驱动模型参数的在线校正过程。增量学习机制在保留历史训练权重的基础上仅更新误差较大区域的网络参数,以避免灾难性遗忘现象致使模型性能退化。迁移学习策略能够把通用路面知识迁移到特定区域场景当中,以此来缩短新路段的训练周期。自适应学习率调度器根据验证集损失函数的变化趋势动态调整参数更新步长,在模型收敛初期采用较大学习率加速训练进程,接近最优解时逐步衰减步长实现精细调优,数字孪生平台记录每次参数更新的时间戳、触发条件以及性能指标变化量。

#### 模型泛化能力提升与迁移学习机制

针对不同区域路面材料存在差异以及气候环境变化所导致的模型适应性问题,研究引入基于元学习的快速适应框架来提升预测模型泛化能力。元学习模块在多个源域路段数据集上进行预训练,学习到跨区域通用的裂缝演化规律和特征表示方法,迁移学习策略采用双层优化结构,外层优化器负责更新元参数以获得良好的初始化权重,内层优化器在具体任务上执行梯度下降来适应局部特征分布,领域自适应模块通过对抗训练机制对齐源域和目标域的特征空间分布。

### 仿真实验与智慧养护系统验证

#### 数字孪生环境下的多场景仿真实验

数字孪生仿真平台搭建出多种气候条件交互组合的虚拟测试场景,模拟高温暴晒加速沥青老化进程、低温冻融循环引发路基开裂、持续降雨导致水损害等典型工况。交通荷载模块依据实际车流量统计数据生成随机车辆序列,设定不同轴重、车速以及通行频率参数来评估动荷载累积效应。仿真实验设置对照组且采用相同初始裂缝分布状态,改变单一环境变量以观察预测模型响应特性,虚拟传感器按照真实采样频率输出路面状态数据,验证模型在极端条件下的鲁棒性表现。

#### 预测模型性能对比与结果可视化

对比实验把传统时间序列模型、支持向量回归还有单机深度学习模型选作基准方法,从预测准确率、均方根误差和平均绝对误差等维度开展定量评估(见表 1)。消融实验通过逐步移除时空注意力机制、联邦学习框架以及数字孪生反馈模块,来分析各技术组件对整体性能的贡献程度。可视化界面采用热力图形式呈现路网裂缝风险分布的态势,以颜色深度映射裂缝发展速率的预测数值,时序曲线图展示历史观测数据与未来预测轨迹的连续变化趋势,用置信区间带标注预测结果的不确定性范围。

表 1 预测模型性能对比

模型方法	预测准确率 (%)	均方根误差 (mm)	平均绝对误差 (mm)	训练时间 (min)
传统时间序列模型	73.2	4.58	3.76	12
支持向量回归	78.5	3.92	3.21	28
单机深度学习模型	84.7	2.85	2.34	156
联邦学习预测模型	89.3	2.13	1.87	189
时空注意力 + 联邦学习	92.6	1.76	1.52	203
数字孪生反馈优化模型	94.8	1.42	1.18	217

来源: 山东省成武县公路事业发展中心

### 区块链赋能的智慧养护系统原型仿真

区块链智能合约会记录预测结果生成的时间戳、模型版本号以及置信度评分等元数据信息,以此构建不可篡改的预测历史档案来实现责任追溯机制。养护方案执行流程能够通过智能合约自动触发,当预测风险等级超过阈值时就会向相关部门推送预警通知并锁定应急预算额度,施工单位会上传养护作业的影像资料与检测报告到区块链平台,第三方监理机构验证施工质量后签署数字签名确认工程合格。系统原型仿真验证了区块链技术在多主体协作场景下的可行性,分布式账本机制打破信息孤岛,从而实现养护全生命周期数据共享。

#### 结束语

该项研究搭建起数字孪生驱动的路面裂缝智能预测体系,把边缘计算、深度学习、联邦学习、区块链等前沿技术相融合形成协同创新方案。仿真实验对模型在复杂场景下的预测性能进行了验证,为道路养护决策的科学化提供了技术方面的支撑。研究成果对于推动交通基础设施数字化转型有着重要实践价值,能帮助降低养护成本,进而提升管理效率。未来研究方向包含引入强化学习来优化养护策略生成算法,拓展模型在桥梁、隧道等其他交通基础设施的应用场景,推动智慧交通数字经济生态体系持续不断地完善。

作者简介: 陈玉敏 山东省成武县公路事业发展中心