

大尺度混凝土构件振捣过程多源信息融合的智能传感机理与模式研究

郭泰 芦白茹 朱晶 陈语宸 王瑞宁

西安欧亚学院 陕西 西安 710065

【摘要】：大尺度混凝土构件振捣过程存在内部致密度不可视、质量控制滞后的工程难题，文章构建了以振动、声波与图像信号为基础的多源感知体系，研究了不同信号参数与混凝土密实状态之间的响应关系，分析了异构数据的同步机制与融合建模方法，提出了面向构件尺度的智能传感布设策略与振捣状态识别模型，并开展了现场系统验证。研究成果可提升混凝土振捣质量监测的实时性与精度，为复杂结构施工过程的数字化管控提供技术支撑。

【关键词】：大尺度混凝土；振捣监测；多源融合；智能传感

DOI:10.12417/2811-0536.25.11.039

引言

大体积混凝土构件在振捣过程中存在信息获取维度有限、致密性状态难以量化识别的问题，传统人工经验法和单一传感技术在复杂结构中易出现监测滞后与判定误差，难以满足高质量施工管控需求。振动信号可反映混凝土响应强度，声波参数与内部缺陷状态关联紧密，图像信息可揭示表面振捣成效，多源信息具备互补性与协同潜力。

为提升大尺度构件施工状态识别的智能化水平，构建融合振动、声波与图像等信号的多源传感机理，建立统一的数据融合路径与状态判别模型，开展针对振捣全过程的感知布设优化与实体验证分析，有助于实现混凝土致密性在线识别和工艺反馈调控，引出多源融合传感体系的结构构建与应用模式研究。

1 振捣过程中的关键信息参数识别

1.1 振动信号对混凝土密实度的响应特性

振动信号的频率、加速度和持续时间直接表征颗粒重排与气泡逸出，高频高幅振动可提升浆体流动性并加速填充，密实度曲线呈阶段性递增。加速度幅值用于分析能量在不同深度的衰减规律，频率波动区间与浆体黏滞特性存在耦合。振动信号的包络均值与能量谱密度可作为密实度在线判定的输入变量，支持反推建模^[1]。下图1展示了混凝土振捣过程中振动棒与浆体的直接接触状态，是获取振动信号响应特性的关键物理场景。



图1 混凝土振捣作业现场及振动信号来源环境

图1中振捣棒插入新浇筑混凝土层，浆体发生显著流动，表面出现骨料翻滚与局部泌水现象，振动源位置稳定输出高频冲击信号，混凝土密实状态受振动频率与浸入深度控制，振动信号幅值与浆体响应呈同步变化趋势。

1.2 声波信号反映的内部结构变化

声波在混凝土中的传播路径受内部密实程度、含气率与材料均质性影响，结构内部若存在孔隙、夹渣或离析区域，将引发声速降低与波幅衰减。超声传感器布设于构件两端可形成穿透路径，记录各监测截面的波速、频带衰减率与时延分布，进而识别内部致密性变化区域。声波频谱的高频成分对细观结构极为敏感，在振捣中后期若声波能量集中衰减，表明浆体间尚存未压实空腔。

作者简介：郭泰，男（2002.12-），汉族，甘肃省白银市，西安欧亚学院，本科生，智能传感系统在大尺度混凝土构件振捣中的研究与应用。

2024年大学生创新创业项目：智能传感系统在大尺度混凝土构件振捣中的研究与应用（202412712003）。

1.3 图像数据反映的表面振捣成效

混凝土振捣成型后的表面状态在图像数据中表现为骨料裸露程度、浆体分布均匀性与泌水范围等特征，拍摄图像经灰度归一化与边缘增强处理后，可提取空洞、堆积与不均纹理区域用于识别振捣覆盖效果。高频图像序列分析可揭示不同时间点表面物料再分布轨迹，反映振捣器位移路径与作用面积。图像中亮度均值与构件横断面形变存在映射关系，振捣不足区域的表面往往呈现塌陷或过度泌水现象。

2 多源信息融合的智能传感机理

2.1 异构信号的时空同步机制

混凝土振捣过程中因多源信号采集频率不一致、触发延迟不同，需构建统一时空基准消除采样偏移。时间同步以本地主控时钟为核心，结合 GPS/NTP 校准，设定同步容差小于 1 毫秒，保证振动峰值、声波包络与图像帧在同一时间轴对应振捣阶段。所有信号记录绝对时间戳，并兼容微秒级压缩以保留动态细节。空间上采用局部坐标标定系统，将振动探头、声波阵列和图像端口映射至三维构件模型，结合激光测距与视觉标定获取节点矢量，利用 ICP 算法完成点云与几何配准，实现多源采集位点在物理空间的统一^[2]。

2.2 数据融合过程中的特征提取方法

振动与声波为时序波动型数据，采用三层 Daubechies 小波分解获取低频能量包络与高频局部扰动，提取峰值频带、能量密度和包络面积等特征表征构件致密性。图像信号通过卷积提取纹理梯度，结合 SIFT 算法获取关键点与方向角，并利用帧间差分灰度场构建表面变化矢量图，用于识别泌水、堆积与空洞边界。所有特征参数归一化后组成特征矩阵：

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

其中 x_{ij} 表示第 i 个信号通道在第 j 个特征维度的数值，用于构建融合模型输入层。输入矩阵接入多通道卷积神经网络结构，卷积操作表达为：

$$f_{ij}^{(l)} = \sigma \left(\sum_{m,n} w_{mn}^{(l)} \cdot x_{(i+m)(j+n)}^{(l-1)} + b^{(l)} \right)$$

其中 $f_{ij}^{(l)}$ 为第 l 层输出特征图， $w_{mn}^{(l)}$ 为卷积核权重， $x^{(l-1)}$ 为前层输入数据， $b^{(l)}$ 是偏置项， σ 为激活函数。

2.3 异常数据修正机制的传感逻辑

多源信号受传感器波动、施工扰动和环境干扰影响易出现缺失或失真。异常识别采用滑动时窗与残差

匹配，对比新数据段与参考模型在幅值、变化率和波形拟合度上的偏差，超限值片段标记处理。冗余信号用于修复主通道中断，优先匹配邻近通道趋势段，若多通道同时异常，则通过时域插值与频域拟合完成重建^[4]。异常数据识别与修正效果可通过多源信号在不同修正方式下的偏差对比进行量化统计，见表 1。

表 1 多源信号异常段识别与修正偏差统计表

数据类型	振动信号	声波信号	图像信号
异常段数量	6	4	3
修正前均值偏差(单位)	1.74	2.32	3.12
修正后均值偏差(单位)	0.28	0.35	0.47
修正方式	时窗重构+滤波	区段插值	特征回填+插帧

振动信号异常多为幅值突降或采样错位，修正后可恢复有效特征。声波异常表现为波包断裂或频谱漂移，经包络插值保持连续。图像异常多为模糊或帧序错乱，利用相似性匹配与插值恢复纹理，提高特征聚类与模板重叠率，保障输入完整性

3 智能传感模式的构建与验证

3.1 传感节点的空间布置方案

传感节点布设依据构件体积尺度、浇筑顺序与薄弱区域，采用分层分区策略，在重心、边角及预埋件周边加密布点，形成覆盖均匀、响应灵敏、冗余可控的结构。布点设计兼顾数据传输与同步机制，节点保持逻辑对称以支持融合建模。布设结果映射为拓扑矩阵，节点含空间向量与索引，供调度管理。在常规 3×3×2 米构件中布设 12 个核心节点，可满足空间分辨建模需求并避免数据冗余。各类传感节点在典型混凝土构件中的布设位置如图 2 所示，体现了基于结构区域功能划分的分布式监测策略。



图 2 混凝土构件振捣过程传感节点空间布置示意图

图2展示了振动、声波与图像采集装置在底板、边角、横隔板、顶板及管道过渡区的布置方式,覆盖重心、边界与复杂节点。振动节点靠近模板面,声波节点形成穿透通道,图像装置固定于俯视角度。

3.2 状态识别模型的结构设计方法

振捣状态识别模型基于多源数据构建混合神经网络, CNN提取图像与信号的空间特征, GRU建模时间序列与状态转移。输入层接收归一化后的振动特征、声波包络和图像灰度梯度场, 拼接为多维张量, 经并行多尺度卷积提取局部变化特征, 在提升空间敏感性的同时控制参数规模。卷积操作表达为局部加权卷积求和:

$$y_c = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M w_{ki} \cdot x_{ki} + b_c$$

其中 y_c 表示第 c 个输出通道的特征响应, w_{ki} 为第 k 通道第 i 卷积核权重, x_{ki} 为输入数据在该位置的值, b_c 为偏置项。GRU结构对多源特征随时间变化的演化关系进行建模, 计算当前状态与上一时刻的残差权重, 以此实现状态识别的时间依赖更新。核心公式如下:

$$h_t = (1 - z_t) \odot h_{t-1} + z_t \odot \tilde{h}_t$$

$$\tilde{h}_t = \tanh(W_h \cdot [r_t \odot h_{t-1}, x_t])$$

其中 h_t 为当前时刻的隐藏状态输出, \tilde{h}_t 为候选状态, z_t 为更新门控制信息保留比例, r_t 为重置门控制历史状态遗忘比率, x_t 为当前输入特征向量, W_h 为权重矩阵。

3.3 监测系统的现场应用与性能评估

系统在某预制场3.6×2.8×1.0米箱梁单元上部署进行全过程振捣监测, 构件钢筋密布、底模回弹频繁, 属典型大体积复杂结构。监测节点含4个振动探头、6

组超声单元及4台视觉设备, 布设于底板、边梁、横隔板和管道区, 采样频率为振动800 Hz、声波1500 Hz、图像20 fps。边缘模块完成数据同步与状态计算, 监测中记录设备重启、模板侧压变化和振捣器更换等扰动, 评估阶段对比系统输出与人工标记, 考察响应延迟、干扰段数量和状态一致性。以下为典型场景下的识别性能统计结果, 见表2。

表2 振捣监测系统识别性能对比表

振捣区域	系统识别状态	人工判定状态	一致判定次数	平均响应延迟(秒)	干扰段数量
底板厚段	适振	适振	8	0.84	1
横隔板密筋区	欠振	欠振	7	1.01	2
边梁内角区	过振	过振	9	0.76	0
管道节点过渡层	欠振	适振	5	1.23	2
顶板端模相邻区	适振	适振	8	0.88	1

4 结论

文章构建了面向大尺度混凝土构件振捣过程的多源智能传感体系, 明确振动、声波、图像等信号对密实状态的响应规律, 提出异构信号的时空对齐机制与特征融合方法, 建立融合卷积与时序结构的状态识别模型, 并完成了在典型构件场景下的系统布设与性能验证。识别结果具备较高一致性与响应稳定性, 可支撑振捣质量在线判别与工艺过程闭环控制。研究结果为构件成型过程的数字化、智能化管控提供系统化基础, 具备在复杂构造体与高性能混凝土场景中推广的技术潜力。

参考文献:

- [1] 高远, 吴琦炜, 宋阳, 等. 基于多源传感信息融合的智能刀柄及系统设计[J/OL]. 中国机械工程, 1-12[2025-07-18].
- [2] 蔡坤阳. 面向智能网联车辆运动目标估计的多源传感信息融合方法研究[D]. 吉林大学, 2024.
- [3] 蒋明杰. 大尺度钢护筒-钢筋混凝土桩柱组合构件横向工作性状研究[D]. 重庆交通大学, 2024.
- [4] 陈杰. 大尺度钢管混凝土排架结构横向承载性能研究[D]. 重庆交通大学, 2024.
- [5] 姚潇南, 张孟喜, 刘冰. 穿湖隧道超大尺度混凝土施工期的温度效应[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2024, 30(02):308-317.