

基于工程现场快速检测的混凝土质量动态控制方法研究

李桂平

(南陵县建诚建筑工程检测咨询有限公司, 安徽 芜湖 241300)

摘要 本研究提出基于工程现场快速检测的混凝土质量动态控制方法。首先, 构建了涵盖工作性、力学性能、耐久性 & 内部缺陷的多维度快速检测技术体系, 并阐述了检测数据的标准化与融合方法。其次, 融合物理机理与数据驱动技术, 建立了能够反映混凝土质量时变特性的动态演变模型, 实现了对关键性能指标的实时预测。在此基础上, 构建了以“检测—预测—决策—反馈”为闭环的动态控制理论框架, 设计了相应的控制决策模型与实时反馈系统。结果表明, 该方法能够显著提升混凝土质量控制的时效性、精准性与预见性, 为工程质量管理智能化转型提供了一种新范式。

关键词 混凝土质量; 快速检测; 动态控制; 数据融合

中图分类号: TU755

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.012

0 引言

混凝土作为建筑工程中应用最广泛、最基础的核心材料, 其综合性能与最终质量直接决定了整体工程结构的安全性、可靠性与长期耐久性, 进而影响整个建筑物的服役年限和使用寿命^[1]。长期以来, 行业内普遍采用的传统混凝土质量控制与评价模式, 主要依赖于在施工现场取样、在实验室内进行标准条件养护的混凝土试块, 并以28天龄期的抗压强度作为核心验收指标, 同时辅以现场回弹法测定、钻芯取样检测等局部抽查手段作为补充。然而, 这种模式存在明显的滞后性与局限性, 难以全面、及时地反映混凝土在实际结构中的真实状态与发展过程。随着物联网技术的普及、智能传感器的发展、无损检测方法的进步以及大数据分析能力的提升, 在工程施工与运维阶段实时、连续、多维度地获取混凝土的温度、湿度、应变、强度发展等关键状态信息已逐渐成为可能^[2]。因此, 当前迫切需要深入研究如何有效集成与协同运用多种快速、无损、原位检测技术, 构建实时感知混凝土质量性状的监测体系, 并基于不断积累的实时监测数据, 利用数据分析与机器学习等方法对混凝土性能发展趋势进行动态预测与评估, 进而实现施工工艺的主动调整与优化。这标志着混凝土质量控制范式正从传统的“事后检验”转向“全过程控制”, 从“静态、离散的抽查”迈向“动态、连续的管理”, 对于推动土木

工程材料与施工技术的智能化发展具有显著的理论创新价值和重大的工程实践意义^[3]。本研究旨在提出一套完整的基于现场快速检测的混凝土质量动态控制方法体系。

1 混凝土质量快速检测技术体系构建

1.1 现场快速检测需求分析与指标体系

混凝土质量是一个多属性综合体。基于施工过程动态控制的需求, 需建立一套能够快速响应、全面表征的现场检测指标体系。混凝土质量现场快速检测指标体系从工作性、力学性能发展、耐久性、内部缺陷与均匀性四个关键维度构建(见表1), 实现对混凝土质量的全面动态监控。在工作性方面, 通过快速坍落度仪测定坍落度/扩展度以直观反映混凝土流动性, 便携式流变仪量化黏度以评估其抗离析能力, 插入式温度传感器监测温度以掌握混凝土的初始状态及后续水化热发展趋势, 三者共同作用确保混凝土具备良好的可施工性, 为浇筑与振捣作业提供直接指导^[4]。力学性能发展监测中, 贯入阻力仪可快速获取早期强度数据, 成熟度法则通过温度历程推算强度发展, 超声脉冲速度法不仅能反映强度增长, 还能间接体现弹性模量的变化, 这些方法协同追踪混凝土强度增长过程, 为确定脱模、张拉等关键施工节点提供科学依据^[5]。耐久性检测聚焦结构抵抗环境侵蚀的潜在能力, Autoclam

作者简介: 李桂平(1976-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建筑工程。

表 1 混凝土质量现场快速检测指标体系

类别	核心指标	快速检测方法 / 设备	控制目的
工作性	坍落度 / 扩展度、黏度、温度	快速坍落度仪、便携式流变仪、插入式温度传感器	评估可施工性，指导浇筑与振捣
力学性能发展	早期强度、弹性模量	贯入阻力仪、成熟度法、超声脉冲速度法	追踪强度增长，确定脱模、张拉等关键节点
耐久性	表层渗透性、氯离子扩散系数	Autoclam 渗水 / 吸气仪、RCM 法简化现场装置	评估结构抵抗环境侵蚀的潜在能力
内部缺陷与均匀性	内部孔洞、离析、均匀性	冲击回波法、超声断层扫描、电阻率成像法	监测浇筑密实度与材料均质性

渗水 / 吸气仪可便捷评估表层渗透性，RCM 法简化现场装置能测定氯离子扩散系数，二者从不同角度为判断混凝土的长期耐久性提供重要参考。内部缺陷与均匀性监测借助冲击回波法检测内部孔洞，超声断层扫描技术可清晰地呈现内部结构，电阻率成像法则能有效反映材料的均匀性，通过这些手段可全面监测混凝土浇筑的密实度与材料分布的均质性，及时发现并处理潜在缺陷。整个体系通过明确的核心指标、对应的快速检测方法 / 设备及清晰的控制目的，形成了一个逻辑严密、响应迅速的混凝土质量现场检测框架，满足施工过程动态控制的需求。

1.2 多模式快速检测技术集成

为实现上述指标的全覆盖，构建“传感网络 + 便携设备”的集成化快速检测系统。（1）嵌入式传感器网络：在浇筑前预埋无线温度、湿度传感器，实时、连续监测混凝土内部温湿度场，为成熟度计算和温度应力预警提供数据。（2）便携式无损检测设备集群：配备表 1 所列的各类便携设备，由质检人员在关键点位、关键时段进行移动式、定点检测。（3）移动终端（APP）集成：所有检测数据通过蓝牙、移动网络即时上传至云端数据库，并与构件位置、检测时间、施工班组等信息自动绑定，确保数据可追溯。这种多模式集成方案融合了嵌入式监测的连续性与便携检测的灵活性，既能够对混凝土内部核心参数进行长周期不间断跟踪，又可以按需对关键部位开展针对性检测，同时依托移动互联技术实现检测数据的实时归集与管理，彻底解决了传统单点检测数据零散、时效性不足、追溯性差的问题，能够为后续混凝土质量评价与动态控制提供完整、准确、及时的数据支撑。

1.3 检测数据标准化与融合方法

多源异构数据的有效利用。需建立：（1）数据标准化协议：统一时间戳、空间坐标、单位、数据格式，建立检测数据与 BIM 模型构件单元的映射关系。（2）

数据清洗与校准规则：对异常值、缺失值进行处理，并建立现场快速检测结果与实验室标准方法结果之间的相关关系模型，进行数据校准。例如：建立贯入阻力与标准抗压强度之间的回归方程： $f_{cu}=a \cdot R+b$ 。（3）多源数据融合模型：采用基于权重分配或机器学习的方法，融合多源信息。例如：采用加权平均法融合多个位置的温度数据，估算截面平均温度 $T_{avg}=\sum_{i=1}^n (w_i \cdot T_i)$ 其中 w_i 为根据传感器位置重要性确定的权重。

2 混凝土质量动态演变模型

2.1 质量演变影响因素分析

混凝土性能演变受内部因素（水化反应、配合比等）外部因素（环境温湿度等）养护及施工扰动（浇筑、振捣等）的共同驱动。动态模型需综合考虑这些输入变量。

2.2 基于物理机理的演变模型

成熟度模型：基于 Arrhenius 方程，利用实时温度数据预测强度发展。成熟度至 $M(t)$ 和预测强度 $f(t)$ 可表示为：

$$M(t)=\int_0^t e^{\frac{E}{K}\left(\frac{1}{T(\tau)}-\frac{1}{T_0}\right)} d\tau \quad (1)$$

$$f(t)=f_{\infty} \cdot \frac{k \cdot\left(M(t)-M_0\right)}{1+k \cdot\left(M(t)-M_0\right)}$$

式（1）中， E 为活化能， $T(\tau)$ 为实时绝对温度， T_0 为参考温度， f_{∞} 为极限强度， k 、 M_0 为材料常数。

水化热—温度应力耦合模型：基于热传导方程预测温度场 $T(x, y, z, t)$ ：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t}=\nabla \cdot(\lambda \nabla T)+Q(t) \quad (2)$$

式（2）中， ρ 为密度， c 为比热， λ 为导热系数， $Q(t)$ 为单位体积水化放热率。基于热弹性理论计算温度应力。

2.3 基于数据驱动的实时预测模型

物理模型在复杂边界条件下可能受限。引入数据驱动模型作为补充和增强。模型输入与结构以实时采

集的温度、湿度、快速强度、声速等时间序列数据作为特征,构建LSTM等循环神经网络模型进行训练。预测输出模型输出未来一段时间(12小时、24小时)的核心指标预测值(强度、温差)。采用在线学习策略,利用新数据滚动更新模型参数。

3 动态控制方法与反馈系统设计

3.1 动态控制理论框架

建立以“感知—分析—决策—执行”为闭环的反馈控制系统框架(见图1)。系统输入为实时检测数据与计划目标,通过动态模型进行状态预测和偏差分析,由控制决策模型生成调控指令,通过执行机构或人工干预用于施工过程,最终使混凝土质量状态向目标轨迹收敛。

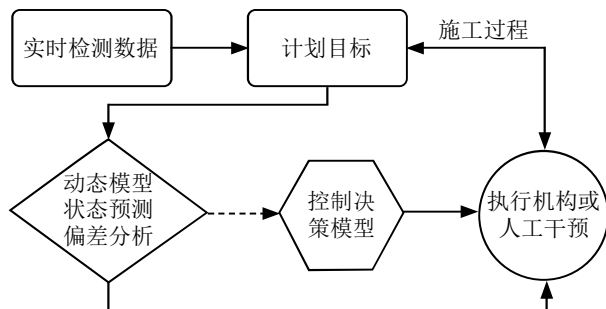


图1 混凝土质量动态控制闭环系统框架

3.2 控制决策模型

决策模型的核心是将预测的偏差转化为具体的控制动作。(1)规则库决策:基于专家知识,建立“IF-THEN”规则。例如:“IF 预测核心温度 $>70^{\circ}\text{C}$ THEN 启动循环水冷却系统”;“IF 预测24小时强度增长 $<$ 计划值的80% THEN 延长养护覆盖时间并预警”。(2)优化决策:将控制问题转化为多目标优化问题。以成本、工期、质量风险最小化为目标,以养护资源、降温措施为决策变量,在动态模型约束下,利用模型预测控制(MPC)等方法求解最优控制序列。

3.3 实时反馈控制系统

本研究设计一个软硬件深度融合的智能化管理系统,具体包括以下三个核心组成部分:

1. 软件平台架构:构建一个高度集成的中央控制平台,该平台具备四大功能模块——实时数据可视化看板,用于动态展示各类监测数据与运行状态;精准的预测分析模型,能够基于历史数据和实时输入进行趋势预测与模拟分析;多级预警提示模块,可根据预设阈值自动触发不同级别的报警机制;面向管理者的交互式决策支持界面,提供清晰的操作建议和可视化管控工具^[6]。

2. 多模态反馈控制链路:系统支持对自动喷淋设备、智能养护棚等硬件装置的闭环控制,能够依据环境参数与模型输出结果实现自动调节和响应;建立有效的人工反馈机制,在必要时通过消息推送、短信或邮件等方式,及时向相关责任人发送预警信息和详细的操作指导,确保关键情况得到迅速处理^[7]。

3. 持续优化的自适应学习机制:系统将全面记录每次控制动作及其实际执行效果,积累运行数据并形成决策日志,利用机器学习方法不断迭代和优化控制策略与决策规则,同时更新预测模型,使其具备随时间推移不断适应新条件、提升准确性的能力^[8]。

4 结束语

本研究构建了集成多模式快速检测技术的现场质量信息感知体系,通过数据标准化与融合方法,实现了对混凝土多维度质量状态的实时、全面感知,解决了信息碎片化与滞后性问题。本研究提出的“物理机理+数据驱动”混合动态演变模型,能够充分利用实时数据,实现对关键性能指标的准确预测,为前瞻性质量控制提供科学依据;“检测—预测—决策—反馈”动态控制闭环系统,将质量控制从被动检验转变为主动调控,通过规则与优化相结合的决策模型,能够生成及时、精准的控制指令,提升了施工过程的智能化水平。未来研究可进一步探索基于数字孪生的全生命周期质量控制,并推动快速检测设备的小型化、智能化与低成本化,以促进该方法的更广泛应用。

参考文献:

- [1] 刘俊. 建筑工程质量检测中混凝土强度检测技术分析[J]. 中华建设, 2024(05):118-120.
- [2] 雷海涛. 住宅建筑工程质量检测技术与监管探讨[J]. 居舍, 2025(06):159-162.
- [3] 孙跃维. 宁波市建筑工程质量检测市场监管机制改善研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2010.
- [4] 岳庆霞, 王伟娜, 张鑫. 既有建筑物混凝土强度时变规律研究[J]. 山东建筑大学学报, 2023, 38(02):9-14.
- [5] 杨帅, 应宗权, 李嘉民, 等. 基于现场检测数据的海工混凝土强度经时变化规律研究[J]. 水运工程, 2023(04):39-42, 115.
- [6] 牛付虎. 住宅建筑工程主体结构质量检测技术实践探索[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(10):19-21.
- [7] 徐超杰, 苏晓辉. 基于超声波无损检测的混凝土抗压强度试验研究[J]. 建筑机械化, 2023, 44(11):26-29.
- [8] 孙源. 混凝土结构内部缺陷的超声成像检测方法研究[J]. 砖瓦, 2025(06):124-127.