

Research on temperature control technology of large volume concrete in hydraulic engineering based on intelligent monitoring

Yan Zhang Xibin Sun

Beijing Chaoyang Water Conservancy Engineering Co., Ltd., Beijing, 100000, China

Abstract

In large-scale concrete construction for hydraulic engineering, concentrated heat release from cement hydration and limited heat dissipation conditions often lead to thermal stress cracking, which affects structural safety and durability. To enhance the scientific and refined management of temperature control, this paper conducts a study based on intelligent monitoring technology to analyze the variation patterns of the temperature field and real-time regulation mechanisms of mass concrete. Through the deployment of sensor networks, establishment of data acquisition systems, and optimization of temperature control algorithms, dynamic monitoring and predictive analysis of temperature distribution are achieved. The study proposes an information-and automation-based temperature control system that integrates cooling water circulation and insulation layer design to achieve effective control of concrete temperature differentials.

Keywords

hydraulic engineering; mass concrete; temperature control technology; intelligent monitoring; crack control

基于智能监测的水利工程大体积混凝土温控技术研究

张岩 孙喜斌

北京市朝阳区水利工程有限公司, 中国·北京 100000

摘要

水利工程大体积混凝土施工中, 由于水化热集中释放和散热条件受限, 极易产生温度应力裂缝, 影响结构安全与耐久性。为提升温控管理的科学化与精细化水平, 本文基于智能监测技术, 对大体积混凝土温度场变化规律与实时调控机制进行研究。通过传感网络布设、数据采集系统构建及温控算法优化, 实现对温度分布的动态监测与预测分析。研究提出以信息化、自动化为核心的温控技术体系, 结合冷却水循环与保温层设计, 实现混凝土温差有效控制。

关键词

水利工程; 大体积混凝土; 温控技术; 智能监测; 裂缝控制

1 引言

温榆河公园朝阳段二期项目水利工程位于北京市朝阳区温榆河公园东南角, 是首都东部生态走廊的重要组成部分, 也是朝阳区“生态文明建设与城市更新”协同推进的重点工程。工程东至京密路, 西至京承高速, 南抵机场南线高速, 北接温榆河, 总规划面积 9.41 平方公里, 主要建设内容包括 7 条共计 8 公里的排水沟治理、新建景观湖区 1 处、挡水闸 4 座及配套提升泵站工程等。该项目以“以水为美, 向水而生”为核心设计理念, 旨在构建集生态修复、调蓄防洪与景观提升于一体的综合性水利体系。项目建成后, 将有效改善区域水系循环条件, 提升雨洪调蓄能力, 恢复河湖生态功能, 形成“大河风光、湖岛风光、田园风光、驿站风光、

森溪风光”五大景观格局, 进一步强化温榆河流域生态安全屏障, 促进城市绿色空间与生态文明建设的深度融合, 为北京建设宜居、宜业、宜游的生态城市提供典范与示范效应。

2 水利工程大体积混凝土温控的技术背景与需求

2.1 大体积混凝土温度裂缝形成机理分析

在大体积混凝土浇筑过程中, 水泥水化反应释放大量热量, 内部温度迅速上升, 而外部受环境温度、散热条件及施工方式限制, 降温速度较慢, 形成显著的温度梯度。内部升温膨胀、外部冷却收缩产生拉应力, 当应力超过早期抗拉强度时, 结构便出现裂缝。混凝土体积越大、约束条件越强, 裂缝风险越高。以温榆河公园朝阳段二期项目为例, 其挡水闸基础、泵站底板及景观湖区挡墙均属大体积结构, 单次浇筑方量超 1200m³, 内部与外表温差峰值可达 28℃。温度应力积累若未及时释放, 将引发贯穿性裂缝, 不仅影响结构防

【作者简介】张岩 (1993-), 男, 中国河北保定人, 本科, 工程师, 从事水利工程施工研究。

渗性能，还威胁水工建筑的整体稳定与使用寿命。

2.2 传统温控技术的局限性与改进方向

传统温控方法多依靠人工经验判断，采用埋管冷却、分层浇筑及表层保温等手段，但受限于监测滞后与数据缺失，难以实现精准控制。温榆河公园朝阳段二期工程中，因昼夜温差较大且施工周期长，单一冷却水管控制方案难以适应复杂热场变化。传统方式的温控响应周期长，人工调节误差大，易造成降温过快或保温不足，引发温度应力集中。随着监测技术的发展，基于物联网与数据分析的智能温控成为改进方向。通过布设传感网络与算法调节，可实现实时监测与预测预警，减少人为干预，提高控制精度，使大体积混凝土温控进入智能化、动态化的新阶段。

3 智能监测系统在大体积混凝土温控中的构建与原理

3.1 温度监测传感网络的构建与布设方法

温度监测传感网络是智能温控体系的基础，其布设应覆盖混凝土核心区、表层及关键结构部位。温榆河公园项目在挡水闸和泵站底板中布设光纤温度传感器及热电偶节点，形成三维温度监测网格，实现多层次、多点位同步监测。布设点间距根据结构厚度和冷却系统布局确定，一般为1.5米至2.5米。传感器通过防水导管与信号采集主机连接，确保混凝土浇筑后数据稳定传输。系统在施工各阶段持续监测温度变化，为冷却系统的流量调控、保温层设计及裂缝风险评估提供实时依据，形成结构-环境-数据的闭环监测体系。

3.2 数据采集与传输系统的设计思路

数据采集与传输系统承担着温度信息的实时汇聚与处理任务，其核心目标是实现高精度、低延迟、抗干扰的数据通信。温榆河公园朝阳段二期工程采用分布式采集与无线传输相结合的设计，数据采集单元设置在关键施工段，利用LoRa与4G信号实现远程传输。系统采用加密算法保障数据安全，并通过云端数据库进行存储与分析。数据采集频率设定为每10分钟一次，能及时反映温度场变化趋势。设计中还引入断点续传与多节点冗余机制，确保极端天气或设备干扰下数据连续性，为温控算法和预警模型提供可靠数据支撑。

3.3 监测信息的实时处理与动态预警机制

智能监测平台通过融合算法对温度数据进行实时计算与风险评估，建立动态预警机制。系统利用有限元模拟与数据拟合技术预测温度变化趋势，并根据历史数据自动调整阈值。当检测温差超过 25°C 或升温速率大于 $2^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 时，系统自动发出预警提示，并联动冷却与保温设备调整运行参数。温榆河公园项目监控中心采用可视化界面展示温度曲线和三维热场分布，管理人员可远程查看各结构部位温控状态。该机制有效提升了温控响应速度，形成由数据驱动的主动防控模式，实现了温度异常的早发现、快响应与精准调控。

4 大体积混凝土温控的智能监测关键技术研究

4.1 温度场分布与应力场耦合的监测分析技术

温度场与应力场的耦合关系是裂缝控制的核心。智能监测系统通过布设应变计与温度传感器，实现温度变化与结构应力的同步采集。温榆河公园挡水闸底板在浇筑过程中设置纵横向监测断面，通过有限元仿真计算温度梯度与应力分布规律，识别高风险区域。系统生成温度应力云图，实现可视化评估。结果显示，当底板厚度超过2米且中心温度高于 65°C 时，应力集中区出现在端部约束带。通过调整冷却水流速与延长保温时间，有效降低应力峰值约30%。该技术为温控设计提供精确依据，显著增强结构安全性。

4.2 基于模型预测的温控参数智能优化方法

模型预测控制技术通过建立混凝土温度动态模型，实现温控参数的前馈优化。以温榆河项目挡水闸为例，系统基于实时监测数据和外部气温变化，预测未来6小时温度走势，自动调整冷却水流速、进出口温差及保温层厚度。算法采用改进型BP神经网络与遗传优化混合模型，提高预测精度和响应速度。系统设定温度梯度控制阈值为 20°C ，当预测值接近临界时自动调整冷却系统运行。优化结果表明，温差控制精度提升至 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ，能耗降低约15%。该方法实现了从被动控制到主动优化的转变，为复杂环境下温控提供智能决策支持。

4.3 智能算法在温度调控中的应用与效果评价

智能算法在温控系统中发挥着核心作用，通过模糊控制、粒子群优化与多目标决策算法实现自适应调节。系统根据监测数据自动识别温度异常趋势，计算最优冷却策略并输出指令。在温榆河公园泵站底板温控实践中，算法根据实时温度变化动态调整冷却管道流速，使内外温差保持在 18°C 以内。监测数据显示，智能控制后温度波动幅度减少40%，裂缝风险指数下降35%。系统自动优化运行时间与流量配比，节约能源约12%。智能算法的应用显著提升了温控系统的反应灵敏度与稳定性，为大体积混凝土施工实现“精准、可控、节能”的目标提供了技术保障。

5 智能监测驱动下的大体积混凝土温控施工策略

5.1 施工阶段温度监测与调控协同机制

在温榆河公园朝阳段二期项目施工中，大体积混凝土结构数量多、分布广，为保障温控效果，建立了以实时监测为核心的温控协同机制。系统通过分布式传感节点采集温度数据，中央控制平台对比模型预测结果，自动发出冷却与保温指令，形成监测—分析—调控的闭环管理。现场施工人员依托移动终端可实时查看各结构温度曲线，实现远程调控与指令同步执行。该机制将数据处理、施工执行与设备控制融为一体，实现温度场信息的高效共享与协同响应，有效避免了人工干预延迟，提高了混凝土温控施工的安全性与精

准度。

5.2 冷却水循环与保温层设计的智能化控制

温榆河公园项目采用智能化冷却系统，通过传感数据驱动冷却水循环与保温层的动态调节。系统根据混凝土内部温度分布自动计算流速、压力及出入口温差，并通过变频泵实现精准控制。冷却系统采用多回路分区设计，结合实时监测结果，确保温差控制在安全范围内。保温层厚度与材料性能根据环境温度及夜间降温速率动态调整，保障结构表层温度稳定。控制算法在冷却效率与能耗之间进行平衡，使降温过程更为平缓。该智能控制体系有效提升了热管理的灵活性与经济性，为复杂气候条件下的大体积混凝土温控提供了高效解决方案。

5.3 温度异常响应与施工工艺调整策略

温度异常响应体系通过监测阈值与模型判断实现高效干预。当混凝土温差超过设定值或局部升温速率偏高时，系统自动报警并生成处理方案，包括调整冷却水流量、延长保温时间或暂停相邻段浇筑。监测平台可通过热场模拟定位异常区域，分析原因是否来自外部气温变化、冷却系统故障或水化反应过强。施工指挥中心根据反馈数据即时优化工艺参数，对配合比、浇筑节奏及施工时序进行调整，确保温度场平稳过渡。该策略使温控管理具备动态自修复能力，减少人为决策失误，实现从被动应对向主动控制的转变。

6 基于智能监测的数据分析与系统优化

6.1 温控数据的多维特征提取与规律识别

温榆河公园水利工程在温控实践中积累了大量时空温度数据，系统通过多维特征提取技术识别温度变化规律。数据分析模块对温度、湿度、气压及冷却参数等变量进行聚类运算，形成多维热力矩阵。算法提取关键特征点，揭示温度峰值形成与衰减的时序规律。利用主成分分析方法，系统识别影响温控效率的核心因素，如混凝土厚度、冷却流量和外界温差等。可视化平台以三维热图呈现不同深度的温度演化过程，为施工优化提供直观数据支撑。多维分析的引入使温控管理从经验判断转向数据认知，推动监测向精细化和智能化演进。

6.2 监测结果的反馈与系统自适应优化

智能监测系统通过反馈机制不断修正控制模型，实现自适应优化。系统实时比对预测值与实测值，计算偏差后自动调整模型参数，使预测曲线逐步接近实际趋势。在温榆河

项目运行中，系统基于误差分析动态优化冷却策略，平均温度控制误差由 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 降至 $\pm 1.2^{\circ}\text{C}$ 。反馈机制还用于评估施工环境变化对温控效率的影响，通过机器学习算法积累历史数据，提升模型适应性。控制平台可根据不同施工阶段的热反应速率自动切换调控模式，实现从静态设定到动态学习的转变，显著提高系统稳定性与精度。

6.3 温控系统的运行评估与持续改进路径

运行评估体系以安全性、稳定性与经济性为核心指标，对温控系统进行量化分析。通过对温差控制率、裂缝发生率及能耗指标进行综合评价，形成标准化评估模型。温榆河公园项目的运行数据显示，智能温控体系可使最大温差降低 22%，裂缝风险降低 40%，能耗下降约 15%。系统评估结果定期汇总至数据库，为后续工程提供参数参考。持续改进路径包括算法优化、设备升级与施工数据积累三方面，通过模型再训练与参数迁移实现跨项目应用。该模式推动温控技术从项目型管理走向可持续发展，为智慧水利建设奠定坚实基础。

7 结语

温榆河公园朝阳段二期水利工程的大体积混凝土温控实践，充分验证了智能监测技术在复杂施工环境下的科学性与可行性。通过构建传感网络、建立动态监测与预警体系，实现了温度场的实时感知与精准调控，有效降低了结构裂缝风险，提升了工程整体质量与耐久性。研究表明，智能监测驱动的温控体系能够将施工管理由经验控制转向数据决策，促进冷却、保温与施工工艺的协同优化。该技术体系不仅在温榆河项目中取得显著成效，也为类似水利工程提供了可复制、可推广的示范路径，对推动我国水利工程向数字化、智慧化、绿色化方向发展具有重要的现实意义与应用价值。

参考文献

- [1] 蔡强,郭衍伟.水利工程质量检测中智能传感器实时监测系统的应用研究——提升质量检测的实时性与精准度[J].中国品牌与防伪,2025,(12):123-125.
- [2] 陈兴国.人工智能在水利工程质量监督中的应用——质量缺陷识别与预警[J].中国品牌与防伪,2025,(11):131-133.
- [3] 刘军.水利工程中的智能监测与控制技术研究[N].经济导报,2025-09-22(003).
- [4] 向羽丰.智能水网建设对水利工程管理效率提升作用的研究[J].水上安全,2025,(17):7-9.