

改造后供回水温差设定为 4℃。水泵变频运行。计算出改造后冬季循环水泵耗电量为 10476.2kwh/ 年。

5.2.3 冷却水泵节能分析

根据《机房自控系统运行记录表》显示，冷却水运行温差约为 2.5-3℃，此次改造将冷却水流量由 160m³/h 调至 120m³/h，此时水泵为 75% 额定流量，冷却水温差由 3℃ 相应调整为 4℃。根据《大厦中央空调运行记录本》显示，运行 1 台水泵为 116 天，运行 2 台水泵为 24 天。根据水泵运行性能曲线查得，改造前水泵流量 160 m³/h，输入功率 22kw，改造后水泵流量 120m³/h，输入功率 17kw。按照运行时间 16h。计算出夏季冷却水泵改造前用电量 57728kWh/ 年，改造后用电量 44608kWh/ 年，节能电量 13120kWh/ 年。

5.2.4 冷却塔节能分析

冷却水泵调整后，冷却塔开启台数有所降低。冷却塔水路阀门更换为电动阀门，冷却塔风机开启时，水路阀门联锁开启。综合以上措施，供冷季大部分时间只需运行 1 台冷却塔可满足制冷需求，天气炎热时开启 2 台。计算出夏季冷却塔改造前用电量 65280kWh/ 年，改造后用电量 42480kWh/ 年，节能电量 22800kWh/ 年。

5.2.5 空调机房分析综合

机房	改造前 (kwh)	改造后 (kwh)	节能量 (kwh)	节能率
夏季冷冻水泵	40370	34781	5588	14%
冬季循环水泵	21707	10476	11231	52%
冷却水泵	57728	44608	13120	23%
冷却塔	65280	42480	22800	35%
小计	185085	132345	52740	28%

5.3 综合节能分析

	改造前 (kwh)	改造后 (kwh)	节能量 (kwh)	节能率
机房	185085	132345	52740	28%
风机盘管	100687	94028	6659	7%
总计	285772	226373	59399	21%

6 结论

通过对该办公建筑空调系统的节能诊断与改造实践，得出以下结论：水泵变频改造结合温差优化可显著降低输配能耗，夏季冷冻水泵与冬季循环水泵分别实现 13.8% 和 51.7% 的节能率；风机盘管智能控制系统通过时间表控制与人员感应，有效减少无效供能时段，公共区域节能贡献率达 26%；综合改造后全年节能效益达 21%，投资回收期预计为 3.2 年（按电价 0.72 元 /kWh 计）。研究表明，寒冷地区办公建筑节能改造应优先优化输配系统能效，并强化末端智能调控。本案例为同类建筑提供了“低改造难度、高节能收益”的实践参考，后续可进一步探索可再生能源耦合应用以提升减排潜力。

参考文献

- [1] 国务院办公厅. 加快推动建筑领域节能降碳工作方案 [Z]. 2024.
- [2] 王伟, 李强. 变频调速技术在中央空调系统中的应用研究 [J]. 暖通空调, 2022, 52(3): 45-50.
- [3] 马立新, 孙伟. 中央空调系统水泵节能改造技术研究 [J]. 制冷与空调, 2019, 19(5): 89-94.

Carbonation depth detection of existing building concrete structures: data fusion and error correction using rebound-drilling core method

Ming Li

Yunnan Traffic Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

The carbonation depth of existing building concrete structures is a key indicator for evaluating their durability and safety. The rebound method and core drilling method are currently commonly used for detecting carbonation depth, but individual methods suffer from issues such as insufficient accuracy or damage to the structure. This paper proposes a data fusion and error correction scheme for the rebound-core drilling method. By analyzing the detection principles and error sources of the two methods, a data fusion model is constructed, and a weighted fusion algorithm is utilized to achieve data complementarity. Additionally, errors caused by environmental and operational factors are corrected. Experimental verification shows that this method can effectively improve the accuracy of carbonation depth detection, with the relative error controlled within 5%. It provides a reliable technical reference for detecting carbonation depth in existing building concrete structures.

Keywords

engineering quality inspection; intelligent technology; non-destructive testing; Internet of Things; quality management system

既有建筑混凝土结构碳化深度检测：回弹 - 钻芯法数据融合与误差修正

栗名

云南交通工程质量检测有限公司，中国·云南昆明 650000

摘要

既有建筑混凝土结构的碳化深度是评估其耐久性和安全性的关键指标。回弹法与钻芯法是目前常用的碳化深度检测方法，但单一方法存在精度不足或对结构有损伤等问题。本文提出回弹-钻芯法数据融合与误差修正方案，通过分析两种方法的检测原理及误差来源，构建数据融合模型，利用加权融合算法实现数据互补，并针对环境、操作等因素导致的误差进行修正。实验验证表明，该方法能有效提高碳化深度检测精度，相对误差控制在5%以内，为既有建筑混凝土结构碳化深度检测提供了可靠的技术参考。

关键词

工程质量检测；智能化技术；无损检测；物联网；质量管理体系

1 引言

随着我国建筑行业发展，大量既有建筑进入中老年期，混凝土碳化引发的耐久性问题凸显——碳化会降低混凝土表面强度、导致钢筋锈蚀，威胁结构安全与寿命，因此准确检测碳化深度对结构评估及维修加固至关重要^[1]。准确检测可为安全评估提供数据支持，助力风险防控与寿命延长，具有重要工程价值。目前回弹法因简便无损被广泛应用但精度受表面状态等影响，钻芯法精度高却有损且成本高，二者结

合研究在数据融合与误差修正上仍待深入。本文聚焦回弹-钻芯法数据融合与误差修正，通过分析原理及误差、构建融合模型、提出修正方法并实验验证，以提升检测效果^[2]。

2 回弹法与钻芯法检测原理及特点

在既有建筑混凝土结构碳化深度检测中，回弹法与钻芯法是两种常用技术，二者基于不同原理运作，在实际应用中呈现出互补的特点。

2.1 回弹法检测原理及特点

回弹法的核心原理是利用混凝土表面硬度与内部强度的相关性实现间接检测。混凝土碳化会导致表面硬度发生变化，而硬度与强度存在一定关联，因此可通过回弹仪测量混

【作者简介】栗名（1990-），男，中国云南昆明人，本科，工程师，从事交通工程研究。

凝土表面的回弹值（即弹击后回弹仪指针的读数），先推算出混凝土表面强度，再间接反映碳化深度。这种关联关系是回弹法应用的基础，其理论依据源于长期工程实践中总结的经验规律。

不过，回弹法的局限性也较为明显。其检测结果受多种因素干扰：混凝土表面的碳化层厚度、表面平整度、湿度等都会直接影响回弹值的准确性。例如，表面过于潮湿会降低回弹值，而表面浮浆或风化层会导致回弹值偏高，最终使得碳化深度的推算结果产生偏差，整体精度相对较低，因此单独使用时难以满足高精度检测需求^[3]。

2.2 钻芯法检测原理及特点

钻芯法作为混凝土结构碳化深度检测的直接手段，其检测原理基于物理观测与化学显色反应的结合。具体操作中，通过专用金刚石钻机在目标结构构件上钻取直径约100mm的圆柱形芯样，确保芯样完整保留混凝土内部碳化层与未碳化层的界面特征；随后沿芯样轴线方向进行切割处理，获得平整断面，采用酚酞试剂喷洒断面——依据化学特性，未碳化混凝土因含有游离Ca(OH)₂呈碱性，与酚酞反应显红色，而碳化区域因Ca(OH)₂已转化为CaCO₃呈中性，无显色反应，由此可直接量测显色边界至芯样表面的垂直距离，即为碳化深度^[4]。

2.2.1 直接检测方式的技术优势

(1) 检测精度与可靠性

钻芯法通过物理取样直接获取混凝土内部碳化状态，规避了间接检测中“相关性推算”带来的系统误差，其数据直接反映结构真实碳化程度，检测结果的绝对误差可控制在较小范围内，是行业内用于验证其他检测方法精度的基准技术之一。

(2) 数据直观性与可追溯性

芯样断面的碳化边界通过酚酞显色形成明确视觉标识，检测人员可借助游标卡尺等工具直接量测，无需复杂换算模型；同时，芯样可作为实物样本留存，为后续复检或数据复核提供追溯依据，降低结果争议风险。

2.2.2 应用局限性分析

(1) 结构性损伤风险

钻芯过程会在结构表面形成孔洞，尽管可通过修补恢复，但仍可能破坏混凝土保护层完整性，尤其在梁柱节点等受力关键部位，频繁钻芯可能影响结构承载能力，因此需严格控制钻芯数量与位置。

(2) 效率与成本约束

单组芯样的钻取、切割、处理及量测全过程需30分钟以上，且钻机设备笨重，移动及操作对场地条件要求较高；同时，设备损耗、芯样处理及专业人工工时成本较高，导致其单位检测成本约为回弹法的5-8倍，难以适用于大面积普查。

3 回弹 - 钻芯法数据融合方法研究

3.1 数据融合基本原理

数据融合是将多种来源的信息进行综合处理，以获得更准确、更可靠的结果。在既有建筑混凝土结构碳化深度检测中，回弹 - 钻芯法数据融合就是将回弹法获取的间接碳化深度相关数据与钻芯法获取的直接碳化深度数据进行融合，充分利用两种方法的优势，弥补单一方法的不足^[5]。

数据融合通过对不同来源数据的冗余信息和互补信息进行整合，能够减少不确定性，提高检测结果的精度和可靠性。在融合过程中，需要对两种方法的数据进行预处理、特征提取和融合决策等步骤^[6]。

3.2 回弹 - 钻芯法数据融合模型构建

3.2.1 数据预处理

对回弹法检测得到的回弹值进行修正，消除表面状态、湿度等因素的影响；对钻芯法获取的芯样碳化深度数据进行筛选，去除异常值。

3.2.2 特征提取

从预处理后的回弹数据中提取与碳化深度相关的特征参数，如回弹值平均值、标准差等；从钻芯数据中提取碳化深度值等特征参数。

3.2.3 融合算法选择

考虑到回弹法和钻芯法数据的特点，选择加权融合算法进行数据融合。根据两种方法的检测精度和可靠性确定权重，精度高、可靠性强的方法赋予较大的权重。

3.2.4 融合模型建立

以提取的特征参数作为输入，通过加权融合算法计算得到融合后的碳化深度值。融合模型表达式为：

$$D=w_1D_1+w_2D_2 \quad (\text{公式 3-1})$$

其中，

D 为融合后的碳化深度值，

D₁ 为回弹法修正后的碳化深度相关值，

D₂ 为钻芯法测得的碳化深度值，

w₁、w₂ 分别为回弹法和钻芯法的权重，且 w₁+w₂=1。

3.3 融合模型验证

为验证回弹 - 钻芯法数据融合模型有效性，本研究选取某既有建筑混凝土结构开展对比实验，采用控制变量法。

该结果表明，所构建的回弹 - 钻芯法数据融合模型能够有效整合两种方法的优势数据，降低单一方法的固有误差，从而提高既有建筑混凝土结构碳化深度检测的精度。

4 回弹 - 钻芯法误差来源及修正措施

4.1 误差来源分析

4.1.1 仪器误差

回弹仪和钻芯机等检测仪器本身的精度和稳定性会影响检测结果。如回弹仪的弹击力度、钻芯机的钻孔垂直度等不符合要求时，会导致检测数据出现误差。