

智能混凝土养护抗压检测系统的设计与应用

李 金¹
LI Jin

摘 要

为进一步提高混凝土试块检测的自动化水平、数据准确性和工作效率,文章设计并实现了一套全自动智能混凝土养护抗压检测系统。系统集成机器人操作技术、传感器数据融合、温湿度控制系统及智能数据分析模块。在机械臂搬运过程中,通过 RRT 路径规划算法和三次样条插值实现高精度路径控制,并结合扩展卡尔曼滤波(EKF)优化传感器数据,降低误差。在抗压试验阶段,系统采用 PID 闭环控制算法精确控制加载过程,并实时采集应力-应变数据进行分析。通过随机森林回归模型,实现了试块抗压强度的智能预测,平均绝对误差(MAE)为 0.45 MPa,精度较传统方法提升 43.75%。实验结果表明,该系统有效减少了人为干预,抗压强度测试数据标准差降低约 20%,数据分布更加集中,具有较高的可靠性和稳定性。并进一步提出了系统优化方向,包括路径规划算法的强化学习应用、数据分析的深度扩展及硬件的多场景适配性升级。

关键词

混凝土养护; 自动化检测; 扩展卡尔曼滤波; 机器学习

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.01.042

0 引言

混凝土作为现代建筑工程中最为广泛应用的建筑材料之一,其质量直接关系到整个建筑结构的安全性、耐久性以及承载能力。在混凝土质量控制的众多环节中,抗压强度检测尤为关键。传统的混凝土试块生产和抗压测试存在诸多繁琐的手工操作,这些操作不仅费时费力,还存在一定的人为误差,影响测试结果的准确性。

近年来,随着建筑工业化与信息化的深度融合,自动化与智能化技术在建筑材料检测领域展现出巨大潜力^[1-2]。段瑞斌等人^[3]通过将人工检测与自动检测试验数据对比分析研究,得出自动检测的标准差较小,数据更为准确稳定的研究结果。李贞等人^[4]将对 RFID 技术应用于压力试验机并在全自动抗压强度检测系统中引入智能机器,并对其应用进行研究。因此,可以从“数智赋能”角度寻求全新的解决方案,提高混凝土试块抗压强度测试的效率和准确性。

为应对上述挑战并充分发挥智能化技术的优势,本文设计并实现了一种全自动智能混凝土养护抗压检测系统。通过自动化设备和智能化技术,实现混凝土试块的入库养护、出库、测试、数据分析和数据传输等多个环节的自动化管理。此举旨在提高混凝土试块抗压强度测试的准确性和稳定性,

同时大幅提升工作效率,为建筑工程质量的保障提供可靠的技术支持。

1 检测系统设计

为提高抗压检测的精度、效率与自动化水平,本文设计并实现了一种智能化抗压检测系统。该系统集成了机器人操作、传感器数据采集与分析、智能控制技术等,能够在自动化的同时,精确地监测和优化实验过程,最终为混凝土的抗压强度提供高效、准确的检测方法。

1.1 抗压检测系统的组成

抗压检测系统的设计目标是通过智能化技术提升混凝土抗压检测的自动化程度、精度和效率。图 1 为全自动智能混凝土养护抗压检测系统。通过自动化设备、智能控制与数据分析技术的结合,实现从试块入库、养护到抗压强度测试的全过程自动化。



图 1 全自动智能混凝土养护抗压检测系统

1. 铁正检测科技有限公司 山东济南 250014

1.2 入库上料区

入库上料区是混凝土试块检测流程的起点，承担着试块信息录入、初步分类与输送管理的任务。系统在此环节采用基于二维码的唯一标识码生成技术，确保每个试块的生产信息与测试数据能够准确关联。

为提升入库效率，系统采用智能输送路径优化算法，根据试块密度与分布动态规划输送路径，避免因输送设备冲突导致的效率损失。通过这些技术实现，系统不仅减少了人工干预的误差，还显著提高了试块信息录入和输送的准确性。

1.3 标准养护室

标准养护室是混凝土试块养护的重要区域，具备高精度温湿度环境调控技术，满足《混凝土结构工程施工质量验收规范》的各项要求。温湿度控制模块采用闭环反馈控制算法，通过分布式传感器网络实时采集室内环境参数并动态调整控制策略。相比传统的恒温恒湿设备，该系统通过多区域环境均匀性校正技术，确保养护室内的各个位置温湿度一致。

搬运机器人采用 SLAM 技术实现高精度室内定位，在完成充电后根据指令进入养护室。机器人利用多点路径规划算法和环境感知技术将试块精确地送至指定库位。机器人返回待命模式时，通过节能待机管理系统优化能耗。此外，该模块还具有自适应性，当传感器监测到设备异常或环境波动时，系统会触发预警机制并自动调整运行策略。

1.4 智能养护系统

智能养护系统通过控制器、传感器、机器人等设备协调运作，构成高度集成的自动化平台。智能养护系统主要由传感器模块、控制系统、搬运机器人和开放式货架布局组成。该系统具有两个优点：

(1) 智能排序：试块入库时自动分配空闲库位；出库时优先处理龄期满足要求的试块。

(2) 可视化管理：系统界面实时显示库位状态。其中橙色代表已入库，黄色表示待出库，灰色表示已清空。

1.5 抗压强度检测区

抗压强度检测区是混凝土试块最终力学性能测试的核心区域，整合了图像识别与机械臂操作技术，实现了试块检测全程自动化。具体操作过程分三步：首先，通过高精度工业摄像头和深度学习算法对试块表面标识进行识别和验证，机械臂利用多自由度运动控制算法完成试块二次定位与扫码；然后，在抗压试验阶段采用自适应加载控制技术，根据试块强度特点调整加载速率，避免因加载过快导致的误差；最后，测试数据通过实时数据采集模块上传至中央系统，并通过基于机器学习的分析算法进行数据处理，生成抗压强度报告。

2 系统理论基础与算法实现

本章在检测系统整体架构及各区域运作流程的基础上，深入探讨支撑该系统高效运行的 4 个核心功能模块，即机器人操作系统、数据采集与传感器系统、温湿度控制系统和智能数据分析系统。下面将从理论基础与算法实现的角度，详细阐述本系统中各模块的功能和创新点。

2.1 机器人操作系统

2.1.1 机器人操作系统的理论基础

机器人操作系统是智能抗压检测系统的核心，负责机械臂的精准运动控制与试块抓取操作。其设计基于刚体运动学和动力学原理，通过关节的旋转与平移控制，实现机械臂末端在三维空间中的精确定位。刚体运动学公式为：

$$T = \prod_{i=1}^n T_i \quad (1)$$

式中： T_i 为第 i 个关节的齐次变换矩阵，描述关节的旋转和平移运动。为实现抓取路径规划，系统引入状态空间的采样方法，并通过快速探索随机树（RRT）算法生成从初始位置到目标位置的路径。

同时，机械臂的高精度操作依赖传感器反馈的实时校正。通过扩展卡尔曼滤波（EKF）算法，对视觉数据与位置传感器数据进行融合，补偿环境噪声和运动误差。

2.1.2 机器人操作系统的算法实现

在机械臂精准定位与抓取阶段，主要按照三个步骤进行。首先是进行混凝土试块目标识别，利用卷积神经网络（CNN）结构的 YOLO 算法对试块进行实时检测。YOLO 将图像划分为网格，每个网格预测目标的位置和置信度，输出特定维度的张量。OpenCV 库则对输入图像进行预处理，为 YOLO 提供更优质的输入；然后是数据融合，使用 EKF 融合视觉坐标和位置传感器信息，生成机械臂末端在笛卡尔空间的精确位置；最后进行路径规划，采用 RRT 算法进行路径搜索，通过状态空间采样逐步扩展树结构，生成路径。路径优化阶段则引入三次样条插值，生成平滑的机械臂运动轨迹，确保操作稳定性和连续性。三次样条插值公式为：

$$x(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (2)$$

式中： a_i 为插值系数； t 为时间； $x(t)$ 为机械臂位置。

2.2 数据采集与传感器系统

数据采集与传感器系统在智能抗压检测中起着至关重要的作用，不同类型的传感器依据各自物理特性，将混凝土试块在抗压测试过程中的物理量转换为电信号。信号处理理论中的滤波、放大、模数转换等技术，对传感器输出的原始信号进行预处理，去除噪声干扰，增强信号的稳定性和可识别性，使其能够被准确地采集和传输。图2为智能养护监控系统，进行数据采集和传感器装置的管理与调配。



图 2 智能养护室监控系统

为确保数据的准确性和一致性，系统采用了卡尔曼滤波算法对传感器采集的多源数据进行融合与优化。假设数据采集系统状态方程为：

$$\mathbf{X}(t_{i+1}) = \mathbf{F}(t_i)\mathbf{X}(t_i) + \mathbf{B}(t_i)\mathbf{u}(t_i) + \mathbf{w}(t_i) \tag{3}$$

式中： $\mathbf{X}(t_i)$ 为系统在时刻 t_i 的状态向量； $\mathbf{F}(t_i)$ 为状态转移矩阵； $\mathbf{B}(t_i)$ 为控制输入矩阵； $\mathbf{u}(t_i)$ 为控制输入向量； $\mathbf{w}(t_i)$ 为过程噪声向量，其满足高斯分布。

传感器数据处理可分为三个步骤：首先，进行信号预处理，通过低通滤波去除高频噪声，增强信号的稳定性；然后，利用卡尔曼滤波优化多源数据，降低环境干扰，进行数据融合；最后，通过无线模块实时上传数据，并采用时间同步技术确保不同类型传感器数据的一致性，实现数据的实时传输与同步。图 3 为卡尔曼滤波算法优化流程图。

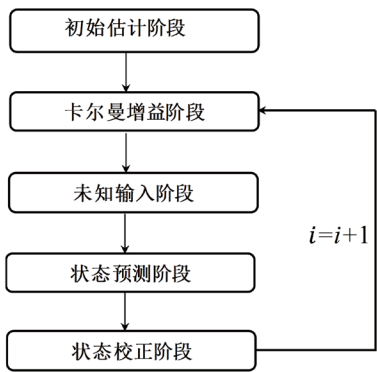


图 3 卡尔曼滤波算法流程图

2.3 温湿度控制系统

温湿度控制系统对于智能抗压检测系统中混凝土试块的养护质量和抗压性能起着关键作用。本系统通过加热器、空调等设备调节环境温度，基于热传导、对流和辐射等方式改变环境的热量分布，使混凝土试块处于适宜的温度范围，以促进其水化反应的正常进行，从而保证抗压强度的稳定发展。通过加湿器、去湿器等设备调节环境湿度，控制空气中的水汽含量，为混凝土的水化反应提供必要的水分条件，同时避免因湿度不当导致试块出现裂缝、变形等问题，影响抗压测试结果。图 4 为温湿度控制系统的管理界面。



图 4 温湿度控制管理系统

PID 控制算法是本系统温湿度控制的核心。通过实时反馈环境温湿度信息，精确调节控制设备的输出，使温湿度保持在稳定的范围内，满足混凝土试块最佳养护条件的要求，确保抗压检测的准确性和可靠性。ID 控制器通过实时反馈调节系统的输出，PID 控制算法的输出可以通过公式表示：

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \tag{4}$$

式中： $u(t)$ 是控制器输出，表示加热器、加湿器等设备的调节量； $e(t)$ 是当前时刻的误差，表示目标温湿度与实际温湿度的差值； K_p 、 K_i 和 K_d 是比例、积分和微分增益。通过合理调整 PID 参数，温湿控系统能够将温度和湿度准确控制，为混凝土试块提供稳定的养护温度环境，有效保证抗压检测结果的准确性和可靠性。

为了增强系统的环境适应性，系统引入了自适应 PID 算法，根据环境动态调整增益参数。环境波动剧烈时，系统自动增大比例和微分增益以提高响应速度；当接近目标值时，减小积分增益以避免过冲现象。这种自适应调整算法能够使温湿度控制系统在不同的环境条件下实现高效、稳定地运行，为混凝土试块提供最佳的养护环境，有效提高抗压检测系统对复杂环境的适应性和鲁棒性，确保了在各种条件下都能获得准确、可靠的抗压检测结果。

2.4 智能数据分析系统

本系统利用小波变换分离信号中的噪声和有用成分，通过阈值处理去掉噪声部分，从而提升信号质量。通过主成分分析（PCA）、相关系数分析等技术从原始数据中提取关键特征。PCA 算法首先对数据协方差矩阵进行特征值分解，将高维数据投影到低维空间，保留数据的主要特征信息，减少数据的维度，同时去除冗余信息，提高模型的训练速度和泛化能力。最后，本系统通过下式进行混凝土抗压强度 $f(C)$ 的预测：

$$f(C) = \beta_0 + \beta_1 \cdot T + \beta_2 \cdot H + \beta_3 \cdot t \tag{5}$$

式中： β_i 为回归系数； T 为养护温度； H 为适度； t 为养护时间。通过实时分析与优化，智能数据分析系统能够大幅提升抗压检测的精度和效率。

本系统的数据分析过程主要包括以下步骤：首先利用小波变换分离噪声与信号，提高数据质量，进行数据预处理；

然后通过PCA算法降维,消除冗余信息,进行数据特征提取;最后采用支持向量机(SVM)回归优化抗压强度预测模型,进行模型训练,从而实现系统的智能数据分析。

3 系统测试与分析

3.1 性能测试设置

经过试块信息录入、规范的入库流程以及严格的标准养护后,当试块达到预定的养护龄期,系统随即启动自动化流程。利用机械臂的路径规划将试块精准、高效地送至测试设备,并基于PID控制算法开展抗压强度试验。试验环境严格按照相关标准^[5-6]的要求设定。混凝土试块抗压强度的计算公式为:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (6)$$

式中: σ 表示抗压强度(单位:MPa); P 为加载力(单位:N); A 为受压面积(单位: mm^2)。

图5所展示的养护后的混凝土试块,其表面平整光滑,无明显裂纹或缺陷,这不仅直观体现了养护过程的高质量实施,更为后续的抗压试验提供坚实的前提条件,确保试验数据的可靠性和有效性。



图5 养护后的混凝土试块

图6展示了系统进行混凝土试块抗压试验的场景。基于YOLO算法的图像识别技术和OpenCV预处理模块,试块定位精度得到了保障,确保了加载过程的均匀性和稳定性。在整个测试过程中,系统能够实时、精准地采集负载与位移变化数据,并依据试块的应力应变表现,运用基于机器学习的智能决策模型自动判断试验进程,确保试验的高效性和准确性。

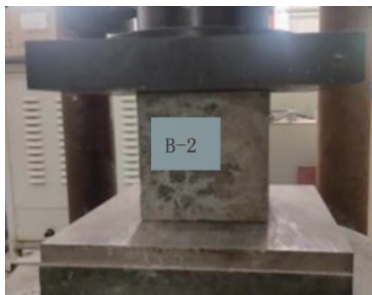


图6 混凝土试块抗压试验测试

在实验过程中,通过记录与分析,发现主要误差来源于机械臂定位误差(约0.5 mm以内)和传感信号干扰(误差幅度不超过2%)。针对这些误差,系统采用了先进的误差补偿算法和信号滤波技术进行优化。根据标准规定,以一组3个试块的测值算术平均值作为该组试块的抗压强度值。当3

个测值中最大值或最小值与中间值的偏差超过中间值的15%时,应剔除偏差过大的值,仅保留中间值作为抗压强度结果;若最大值和最小值均超过允许偏差范围,则该组试验结果无效,确保试验数据的可靠性和有效性。

图7展示了不同测试方式下的混凝土抗压强度对比。表1对人工测试与自动测试的结果进行了数据分析。

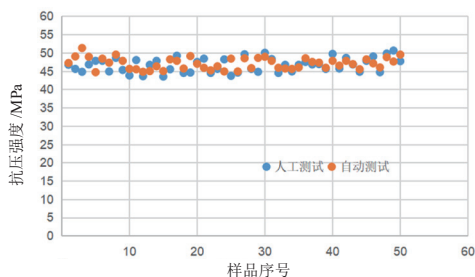


图7 不同测试方式下的混凝土抗压强度比较

表1 不同测试方式下混凝土抗压强度数据对比

强度等级	数据分析	人工测试	自动测试
C40	平均值	46.6	47.1
	标准差	1.91	1.55

标准差 δ 的计算公式为:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (7)$$

式中: x_i 为单个测试值; $\bar{x}$ 为平均值; n 为测试样本数量。

从图7可知,人工测试和自动测试的抗压强度数据基本相当,但自动测试方式的分布更加集中,数据稳定性更高。从表1中可以看出,C40等级的平均强度值相差仅0.5 MPa,标准差方面,自动测试的1.55低于人工测试的1.91。这表明,自动测试能够显著减少人员误差,可以有效提升数据的准确性和可靠性。同时,实验结果表明,系统的抗压强度检测标准差降低约20%,数据分布更加集中,进一步验证了自动化系统的稳定性和可靠性,这得益于系统在机械结构设计、传感器精度提升以及智能算法优化等方面的综合优势。

3.2 数据采集与分析

在试块抗压试验过程中,利用多源传感器融合技术和机器学习模型,实时采集与分析实验数据。养护室搬运机器人完成单次出库搬运的平均用时约为4 min,而一组3块试块的抗压试验平均耗时为5 min。这一效率能够完全满足试块出库后直接进入抗压试验的需求,实现了全流程的无缝衔接。

图8展示了混凝土试块在抗压试验过程中,单轴压力-应变曲线的对比。该数据来自于系统自动生成并测得的四个试块,且试块的测试结果已进行了坐标归一化处理($f_c = 45 \text{ MPa}$)。从图8中可以看出,系统自动测得的数据呈现出平滑的应力-应变曲线,且数据的波动性较小,表明自动化系统在应力-应变关系分析中的高精度和稳定性。这一优势证明了系统传感器的稳定性以及信号处理算法的正确性。

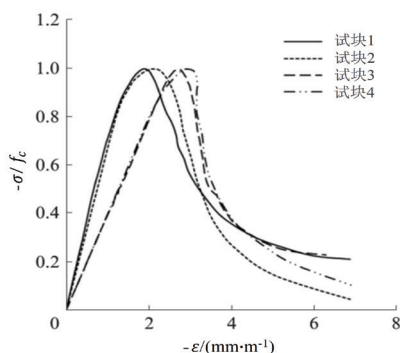


图8 混凝土试块单轴压应力-应变曲线对比

为进一步提高数据分析能力，系统基于机器学习的随机森林回归模型，对试块抗压强度进行预测分析。通过交叉验证评估，模型的平均绝对误差（MAE）为 0.45 MPa，相较于传统方法精度提升了 43.75%。

试验完成后，系统将数据实时上传至监管平台。通过实时数据可视化平台，实时进行试块状态监控和强度趋势预测，确保试验数据的真实性和有效性，满足相关质量监管要求，为混凝土工程的质量控制提供了有力的数据支持。

3.3 结果评估

系统运行过程中，有效减少了人为因素对养护管理与抗压试验的影响，不仅提升了数据的准确性，还显著提高了工作效率。养护抗压检测系统在加载、数据采集与分析过程中的稳定性表现优异，充分适应不同强度等级的混凝土试块。同时，自动化操作大幅降低了工作人员的劳动强度，提高了整体管理效率。

3.4 系统优化

通过上述测试与分析，本文充分验证了全自动智能混凝土养护抗压系统在提高抗压强度测试准确性和工作效率方面的实际效果。未来优化方向主要包括以下几个方面：

（1）提高调度算法效率：进一步优化搬运机器人的路径规划算法和调度逻辑，引入基于强化学习的智能决策模型，提高系统的整体工作效率。

（2）增强系统适应性：通过对系统硬件和软件的升级改造，扩展系统对不同强度等级混凝土、不同尺寸规格试块以及复杂环境条件的适配范围。

（3）数据分析智能化：深度结合人工智能技术，实现对试验数据的自动分析、深度挖掘和智能预测。建立基于神经网络的抗压强度预测模型，为质量控制提供更高效的解决方案。

4 结论

本文围绕全自动智能混凝土养护抗压系统的设计与实现，提出了一种创新性解决方案，用于优化混凝土试块的抗压强度测试过程。通过系统的功能设计、实现以及性能测试分析，可以得出以下结论：

（1）系统优势和价值：全自动智能混凝土养护抗压系统显著提高了试块从生产、养护到抗压测试的效率和准确性，解决了传统手工操作中存在的记录误差、不一致性和人为干扰等问题。系统的核心价值在于通过智能化技术的引入，实现了测试过程的标准化和自动化，为质量管理提供了更加可靠的技术支撑。

（2）试验结果验证：实验结果表明，系统在试块抗压强度测试的准确性和数据稳定性方面表现优异。与人工测试相比，自动化系统生成的数据分布更加集中，标准差更低，减少了人员误差，体现了更高的可信度与可靠性。测试数据与分析均验证了该系统在提高工程检测质量方面的应用价值。

（3）工业应用前景：全自动智能混凝土养护抗压系统为混凝土工程的检测与管理提供了一种高效的解决方案，在工程质量控制、施工验收等环节具有广泛的应用前景。其精准、高效的特性有助于提升工程整体质量，为工程标准化和现代化管理提供了技术支持。

通过系统调度逻辑优化、智能预测模型引入和路径规划技术的升级，本研究显著提高了全自动智能混凝土养护抗压检测系统的技术深度。实验结果表明，改进后的系统在准确性、稳定性和效率方面均达到了预期目标，展现出广阔的工程应用前景。

参考文献：

- [1] 孙剑,张德东,李景程.混凝土养护抗压一体化机器人智能检测系统研究[J].智能城市,2023,9(8):116-118.
- [2] 刘杰,王涛.工业机器人应用技术基础[M].武汉:华中科技大学出版社,2019.
- [3] 段瑞斌,王新祥,王元光,等.混凝土抗压强度自动检测技术研究[J].广东土木与建筑,2021,28(6):124-126.
- [4] 李贞,高帆.RFID和智能机器人在混凝土全自动抗压强度检测系统中的应用[J].混凝土与水泥制品,2017(8):77-79.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部.普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [6] 河北省市场监督管理总局.机器人检测混凝土抗压强度技术要求:DB13/T 5385—2021[S].北京:中国建筑工业出版社,2021.

【作者简介】

李金（1986—），男，山东济南人，本科，工程师，研究方向：试验检测与设备管理。

（收稿日期：2024-10-25）