人工智能与RPA技术融合提升电力工程混凝土验收效率研究

陈良炯[1] 马佳[1] 戎玲增[2] 韩程瑞[1]
1. 舟山启明电力设计院有限公司监理分公司 浙江 舟山 316000；
2. 浙江启明电力集团有限公司 浙江 舟山 316000

摘 要 本文针对目前电力工程建设中混凝土验收工作中的传统纯人工作业工作效率低、数据易篡改，无法追溯等问题，提出“人工智能（AI）+机器人流程自动化（RPA）”组合策略，该策略由AI模块和RPA模块两部分组成，AI模块通过电脑视觉、机器学习实现智能化判断；RPA模块实现诸如数据录入、报表生成、异系统传输等重复烦琐的工作，从而使两模块间联动组成闭合环路，显著提升验收效率。以某地220 kV城东变电站扩建工程具体开展情况为例，应用该系统后，每组试块实验耗时由原来30 min/组缩减到5 min/组，错误率下降到0.3%以内，人工成本降低42%，有效避免了3例试块作假发生。通过本次调查分析可以得出，AI结合RPA可以实现电力工程混凝土验收工作的高效管理，上述结论也可为电力工程质量管理信息化的技术推进提供一定的技术支持。

关键词 人工智能；RPA技术；电力工程；混凝土验收；效率提升；RPA自动化；AI模块；RPA融合

Research on the Integration of Artificial Intelligence and RPA Technology to Enhance the Efficiency of Concrete Acceptance in Power Engineering

Chen Liang-jiong[1], Ma Jia[1], Rong Ling-zeng[2], Han Cheng-rui[1]
1. Supervision Branch, Zhoushan Qiming Electric Power Design Institute Co., Ltd., Zhoushan 316000, Zhejiang Province, China
2. Zhejiang Qiming Electric Power Group Co., Ltd., Zhoushan 316000, Zhejiang Province, China

Abstract This paper addresses the issues of low efficiency, data tampering susceptibility, and lack of traceability in traditional manual concrete inspection processes during power engineering construction. It proposes a combined strategy integrating Artificial Intelligence (AI) and Robotic Process Automation (RPA). This strategy consists of two components: the AI module, which leverages computer vision and machine learning to enable intelligent judgment; and the RPA module, which automates repetitive and tedious tasks such as data entry, report generation, and cross-system transmission. The synergy between the two modules forms a closed loop, significantly enhancing inspection efficiency. Taking the specific construction scenario of a 220 kV Chengdong Substation expansion project as an example, the application of this system reduced the testing time per group of specimens from the original 30 minutes to 5 minutes, decreased the error rate to below 0.3%, lowered labor costs by 42%, and effectively prevented three instances of specimen tampering. This investigation and analysis demonstrate that the combination of AI and RPA enables efficient management of concrete inspection in power engineering. These findings can also provide technical support for advancing the informatization of quality management in power engineering.

Key words Artificial Intelligence; RPA Technology; Power Engineering; Concrete Acceptance; Efficiency Improvement; RPA Automation; AI Module; RPA Integration

近年来，AI在混凝土质量检测方面已经展现出很大的应用潜力，比如，肖祁南等[1]用逆传递神经网络建立了混凝土抗压强度预测模型，并对测试集进行预测，最终实现了相应的R为0.953 1、RMSE为4.256 8。陈雅[2]提出了基于特征金字塔注意力的模型，解决了小裂纹被遗漏的问题。另外，RPA流程自动化的应用也取得了一定成效。但是，现有研究均侧重于单项技术的应用，没有形成一种以“智能化检测—流程回流”为一体的科技融合技术路径。因此，本文主要探讨了电力工程中混凝土的质量检测全过程，并将AI和RPA引入质量检测系统中，使两者通过统一数据实现协同工作。

1 人工智能与RPA融合的技术原理

1.1 混凝土验收中的AI核心技术

AI针对试块防伪、缺陷检测、强度预判构建模型，符合GB50164-2011标准。计算机视觉试块防伪采用“物脸识别”，

在试块上压入红、黄、蓝三色标识二维码，验收时由移动端采集图像，AI提128维特征向量，经尺度不变特征变换（SIFT）算法与云端档案比对，偏移＞2 mm或匹配度＜95%则复检，误判率＜0.1%；缺陷检测用频域引导的位置注意力网络（FPA-Net）模型，经灰度化、高斯去噪后，提取多尺度特征，对0.1～0.2 mm的裂缝准确率达89.7%，曾检出变电站6处人工漏检裂缝。机器学习用反向传播神经网络（BPNN）模型，输入7项配合比参数，通过粒子群优化法（PSO）调参，验证集R=0.953 1，变电站C30试块预测偏差3.2 MPa。

1.2 RPA的流程自动化能力

RPA基于UiPath适配电力系统，数据录入用“API+图像识别”，140组试块录入仅0.4 h；验收报告自动填充模板，140份耗时2.8 h；跨系统同步每日18点触发，10 min完成，成功率99.8%。

1.3 融合逻辑

AI与RPA通过“数据双向交互+流程闭环控制”实现深度融合，具体逻辑如表1所示。

表1 AI与RPA融合逻辑图

环节	AI模块功能	RPA模块功能	数据交互内容
试块送检		采集试块图像、读取配合比数据	RPA→AI：试块图像、配合比参数
智能检测	防伪核验、缺陷识别、强度预测		AI→RPA：检测结论、置信度、缺陷数据
结果执行		生成报告、同步数据、异常预警	
复检触发	复检图像二次检测	发送复检通知、更新复检状态	RPA→AI：复检图像；AI→RPA：复检结论

2 电力工程混凝土验收系统设计

2.1 系统需求分析

以电力建设质量统一验收标准为依据，依据某电网2024年（1.2万组试块、人员费用达360万元以上）的实际情况，总结系统主要有以下需求：①功能需求，覆盖试块z身份核验、外观缺陷检测、强度预测、报告生成、数据追溯5大模块，支持PC端（Windows10/11）与移动端（Android11+、iOS14+）操作；②性能需求，单试块验收总耗时≤5 min，AI检测响应时间≤3 s，RPA任务成功率≥99.5%；③安全需求，采用高级加密标准（256位）（AES-256）加密存储验收数据，操作日志保留1年（含操作人员、时间、内容），符合《电力行业数据安全管理办法》第12条要求；④兼容性需求，适配现有电力信息系统，包括设备（资产）运维精益管理系统2.0（PMS2.0）、实验室信息管理系统（LIMS）、电力工程监管平台，无须改造原有系统架构。

2.2 系统架构设计

系统采用“感知层—分析层—执行层—数据层”4层架构，各层功能与技术选型严格参考现有研究成果与工程实践：

1.感知层。负责数据采集，包括移动端（华为Mate60Pro）与固定端（海康威视工业相机）图像采集设备，并通过超文本传输安全协议（HTTPS）对接LIMS、PMS2.0及监管平台，接口超时30秒并支持失败自动重试3次。

2.分析层。实现验收关键环节智能判断，包含三大模块：①试块防伪核验模块，基于“双重验证机制”（GPS电子围栏+人脸识别），通过SIFT特征匹配算法验证试块二维码与彩色标识的一致性——提取图像500+特征点，快速近似最近邻搜索库（FLANN）匹配器匹配距离阈值设为0.6，匹配准确率≥99%；②外观缺陷检测模块，部署FPA-Net模型，输入预处理后的试块图像，输出缺陷类型、位置坐标与尺寸，模型权重文件基于Crack Tree260、CRKWH100、CrackLS315三个数据集训练生成；③强度预测模块，采用BPNN模型，输入混凝土配合比（CC、CFLA等7项参数）与养护环境参数（温度20±2℃、湿度≥95%），输出28 d抗压强度预测值，模型训练采用PSO算法优化超参数。

3.执行层。基于UiPath Studio 2023.4开发，包含数据录入、报告生成、异常预警、数据同步四大自动化脚本：①数据录入脚本，支持单次最大100条数据批量处理，自动将AI检测结果录入PMS2.0、LIMS、监管平台，字段映射通过Excel配置表维护；②报告生成脚本，按DL/T5241-2010规范生成验收报告，自动插入缺陷图像与强度预测曲线；③异常预警脚本，当AI检测结果为“不合格”时，自动调用短信接口发送预警信息至施工负责人、监理负责人，同时发送邮件至监管单位，预警响应时间≤1 min；④数据同步脚本，每日18：00触发，同步当日验收数据至监管平台，同步前进行数据校验（字段完整性、格式正确性），校验失败则生成错误日志并通知运维人员。

4.数据层。采用MySQL 8.0主从数据库保障高可用查询，并结合超级账本Fabric（Hyperledger Fabric）联盟链对关键数据存证，区块间隔10 min，支持≥5年追溯，满足电力工程档案管理要求。

2.3 核心功能模块实现

1.试块身份核验模块。①流程设计。ⓐ取样阶段，见证人

员通过移动端App激活GPS电子围栏，采用百度AI人脸识别接口完成人脸识别后，植入二维码标签并压入彩色标识物，App拍摄试块图像上传至云端；⑥验收阶段，RPA自动从云端调取取样图像，AI算法提取标签编码、标识物分布特征，与现场采集图像比对，匹配度≥98%则判定“身份合格”，否则标记“异常”。②关键技术。SIFT特征提取——采用高斯差分金字塔生成尺度空间，关键点检测阈值设为0.04，边缘响应阈值设为10，确保特征点稳定性；FLANN匹配——采用K维树（KD树）索引，搜索参数设置为“checks=50”，平衡匹配速度与准确率[2]。

2.强度达标分析模块。①数据输入。RPA从LIMS系统自动提取混凝土配合比数据，以220 kV城东变电站C30试块为例，水泥用量（CC）=188.74 kg/m³、粉煤灰用量（CFLA）=108.11 kg/m³、矿粉用量（CMP）=77.58 kg/m³、细骨料用量（CFA）=763.65 kg/m³、粗骨料用量（CCA）=1 005.54 kg/m³、用水量（CW）=178.82 kg/m³、高效减水剂用量（CSP）=7.19 kg/m³，与养护温度20 ℃。②模型计算。BPNN模型通过前向传播计算——输入层7个神经元，隐含层17个神经元，输出层1个神经元，若预测强度≥30 MPa，判定“强度达标”；否则触发RPA异常预警。③结果输出。AI将预测结果推送至RPA，RPA自动在验收报告“强度分析”章节插入强度预测曲线，标注预测值与设计值对比。

3 系统应用效果验证

以该地区内某变电站新建工程城东220 kV变电站扩建工程为例，该工程的主变基础、GIS设备基础、电缆沟等28座混凝土构筑物需要检测的检验批数共计28个，共计140组试样（分别为80组强度等级为C30混凝土、40组强度等级为C40混凝土以及20组C60混凝土），对比传统的人工检测手段以及“AI+RPA”系统的检测结果，验证该系统技术有效性与可行性。

3.1 验收效率提升

对比传统模式与系统应用后的关键指标，系统应用后，单组试块验收耗时从30 min缩短至5 min，140组试块验收周期从72 h压缩至24 h，效率提升70%以上；RPA自动完成140组试块数据录入，节省人工操作时间18.7 h；报告生成耗时从210 h降至2.8 h，同步耗时从24 h降至10 min[3]。

3.2 验收准确性提升

①试块防伪，系统通过二维码与彩色标识物比对，成功拦截3起试块调包行为，防伪准确率100%，较传统人工核验提升显著；②缺陷检测，对项目中12处存在细小裂缝（0.1～0.2 mm）的试块，FPA-Net模型全部检出，漏检率0，传统人工漏检率18%；对8处蜂窝缺陷，模型识别准确率98%，无虚假标注；③强度预测，BPNN模型对140组试块强度预测的RMSE=3.86 MPa，与实验室28 d检测值的相关性R=0.948，其中C30试块预测偏差最大4.2 MPa，满足验收精度要求。

3.3 管理效益提升

①全流程追溯，区块链存证实现验收数据“全程可查”[4]，监管单位通过平台输入试块编号“DL-CD-2025-0321”，10 s内可追溯取样位置、检测过程、验收结论，解决传统纸质记录追溯难问题；②跨部门协同，RPA自动同步数据，施工方、检测机构、监管单位数据不一致率从传统的12%降至0%，协同效率提升90%；如监理方通过监管平台实时查看验收进度，无须等待施工方邮件[5]；③成本节约，项目140组试块验收人工成本从2.8万元（200元/组）降至1.6万元，减少42%；若推广至该地区全年1.2万组试块验收，年节约人工成本超168万元。

4 结束语

4.1 多维效益分析

经济上，AI+RPA可降低人工核验成本40%+，某省年节省800万，变电站减少返工3.2万，部署成本降低50%；质量上，误差控制在0.3%，年拦截安全隐患500起，数据可信度达100%；行业上，数字化转型融入电网导则，数据一致性达95%，80%的人员会AI解读。

4.2 技术局限与展望

当前存在局限：一是AI缺陷检测弱光及低气温时的检测精度≤85%，BPNN对特殊混凝土预测偏差达6.2 MPa；二是已使用的LIMS系统要修订RPA脚本。后期拟将电力专有视觉大模型升级，以低代码RPA结合数字孪生构建全生命周期模型，协同制定行业技术标准。

参考文献

[1]肖祁南.基于人工智能的混凝土配合比多目标优化研究[D].广州:广州大学,2022.

[2]陈雅.基于深度学习的裂缝图像检测方法研究[D].南京:南京信息工程大学,2023.

[3]张明,李华.RPA+AI融合技术在电力运行系统中的应用[J].电力自动化设备,2024,44(3):156-162.

[4]邱帧文.人工智能技术在混凝土行业的研究进展[J].上海建材,2024(4):1-3.

[5]董庆杰.RPA+AI融合技术在电力运行系统中的应用[J].集成电路应用,2025,42(6):32-37.

（本文编辑 曹 阳）