

人工智能技术在公路工程混凝土强度试验检测中的应用研究

严飞浩

绍兴东盛交通工程检测有限公司

摘要：人工智能技术为公路工程混凝土强度试验检测带来了范式变革，本研究系统探讨了人工智能在检测数据智能处理、强度预测模型构建及过程质量控制中的创新应用路径，通过实现试验数据的自动化采集与多源融合、构建高精度强度预测模型并推动检测过程智能化决策，研究旨在提升检测效率与可靠性，减少资源消耗，为公路工程混凝土质量的精准控制与科学管理提供理论与技术支持，推动行业向数字化、智能化方向转型升级。

关键词：人工智能；公路工程；混凝土强度

引言

公路工程混凝土的强度性能是保障结构耐久性与服役安全的核心指标，其试验检测工作的科学性、准确性和效率对工程建设质量与成本控制具有决定性影响，传统检测方法在数据处理、缺陷识别与过程优化等方面存在依赖经验、效率偏低且难以实现全面感知等局限。本研究旨在系统梳理人工智能技术在相关环节的应用原理与实践路径，深入分析其对提升检测智能化水平、实现质量精准预控的赋能机制，以期为推动公路工程检测技术的高质量发展提供切实可行的理论框架与技术参考。

1 工智能在混凝土强度检测数据智能处理中的应用

1.1 试验数据的自动化采集与预处理

试验数据的自动化采集与预处理是构建智能化检测体系的物理与数据基石，其核心在于通过传感网络与物联网技术将强度检测相关的各类物理、化学及过程参数从传统的人工读数与记录模式中解放出来，转变为连续、在线且格式统一的标准数据流，这不仅仅是采集方式的革新，更是数据维度与质量的飞跃，使得后续的分析模型能够获得更为丰富和客观的输入信息。具体而言，自动化采集系统通过集成嵌入在搅拌设备、试模、养护环境及压力试验机中的高精度传感器，对混凝土从原材料配比、搅拌成型、养护条件到最终破坏荷载的全周期参数进行无间断捕获，这些参数包括但不限于拌合物温度与流变性能、环境温湿度时序变化以及荷载-位移曲线等，进而构成了一个多源异构且具有强时序关联性的原始数据集。然而，直接采集的原始数据通常包含设备噪声、异常值以及因传感器故障或通信中断导致的信息缺失，必须经过严谨的预处理流程才能转化为可供人工智能模型挖掘的优质特征，预处理流程主要涵盖两个关键层面，其一在于

对数据进行清洗与修复，即利用统计方法或基于上下文的插值算法识别并剔除明显偏离物理意义的异常点，同时通过时间序列分析或机器学习方法对缺失段进行合理重构以保持数据连续性；其二则更为深入地涉及数据的标准化与结构化转换，由于不同来源的数据具有迥异的量纲与数值范围，必须通过归一化或标准化处理消除其尺度差异对模型训练的负面影响^[1]。

1.2 基于图像识别的表观缺陷与损伤智能判定

基于图像识别的表观缺陷与损伤智能判定技术，代表了视觉感知能力在混凝土质量评价领域的深刻延伸，它通过赋予计算机系统以理解并量化混凝土表面及内部图像信息的能力，以实现对裂缝、孔洞、蜂窝麻面等表观缺陷以及损伤区域的自动识别、分类与严重性评估，传统的人工目视检测方法不仅效率低下、主观性强，且难以对缺陷进行精确的定量描述，而深度学习尤其是卷积神经网络模型通过端到端的学习方式，能够从海量已标注的缺陷图像样本中自动习得从像素到语义的复杂映射关系，进而实现对各类缺陷特征的高鲁棒性提取与判别，该技术的应用首先体现在对二维表面图像的精细化分析上，系统能够从施工现场或试件表面采集的高清图像中，精准定位裂缝网络并自动计算其长度、宽度、分布密度以及演化趋势，同时区分收缩裂缝、荷载裂缝等不同类型，或对露石、孔洞等面积型缺陷进行轮廓勾勒与面积占比计算，进而提供远超人工测量精度与一致性的定量化缺陷报告。进一步地，该技术的价值延伸至对内部损伤与三维形态的智能解析层面，这通常需要结合如超声断层成像、X射线计算机断层扫描或三维激光扫描等更为先进的成像手段，人工智能模型，特别是适用于三维体数据处理的网络架构，能够对这些成像数据进行分割与重构，进而非破坏性地“透视”混凝土试件或结构内部

的孔隙分布、骨料排列均匀性乃至微裂纹的萌生与扩展路径,例如:通过对CT扫描得到的一系列断层图像进行智能融合与分析,可以重建出混凝土内部三维孔隙结构模型,并精确统计其孔隙率、平均孔径及连通性等关键微观结构参数,这些参数与宏观力学性能具有深刻的内在联系,因此,基于图像识别的智能判定打通了从表观形貌到微观结构、再到宏观性能关联分析的桥梁,使得无损检测所能获取的信息深度与广度得到了革命性的拓展,为全面评估混凝土质量状况与损伤演化提供了前所未有的强大工具。

2 人工智能在检测过程优化与质量控制中的应用

2.1 智能试验设计与方案优化

2.1.1 基于历史数据的试验参数智能推荐

基于历史数据的试验参数智能推荐,其核心在于将过往积累的、包含原材料属性、配合比设计、成型工艺、养护环境以及最终强度测试结果在内的海量数据集,转化为能够指导未来试验设计的宝贵知识库,传统试验设计很大程度上依赖工程师的个人经验与既有的规范条文,在面对新材料、新工艺或复杂环境条件时往往需要进行大量试错性试验,导致资源消耗与时间成本的显著增加,人工智能技术的引入,特别是机器学习中的回归分析、聚类算法与关联规则挖掘,能够从这些多维度的历史数据中自动发现人类难以直观总结的复杂非线性关系与潜在规律,例如:通过训练一个合适的预测模型,系统可以识别出在特定水泥品种与外加剂组合下,水胶比的微小变动对混凝土不同龄期强度发展的敏感性阈值,进而为新配比设计提供关键参数的优化区间,这种基于数据驱动的参数推荐,其本质是从“经验依赖”向“模型预测”的范式转变,它并非替代工程师的判断,而是通过提供量化、可视化的决策支持,使得试验方案的制定更具前瞻性与科学性,进而在项目初期即能有效规避明显的性能短板,提升试验工作的整体效率与成功率。实现这一智能推荐功能,除了需要高质量的历史数据作为基石,同时依赖于一个能够持续学习和更新的算法框架,初始模型在历史数据集上训练完成后,其在工程实际中的应用会不断产生新的反馈数据,这些新数据包含了模型预测结果与真实试验结果的对比信息,通过引入在线学习或增量学习机制,推荐系统可以动态地吸收这些新信息,实时调整其内部模型参数与推荐逻辑,进而使其推荐策略能够适应材料市场变化、施工工艺演进等外部条件,这种动态优化能力使得系统能够逐步逼近特定工程环境下的最优解,其推荐参数从最初的广泛适用性向项目定制化方向深

化,因此,基于历史数据的智能推荐是一个兼具静态知识继承与动态知识演化的过程,其基于循环迭代的方式将离散的试验经验沉淀为可计算、可传承的组织资产,最终形成对混凝土配合比设计与性能试验的智能化赋能^[2]。

2.1.2 减少试验样本量的可行性分析

利用人工智能技术减少混凝土强度试验中的必要样本数量,其可行性根植于算法模型卓越的数据挖掘与信息提取能力,它能够在有限样本所蕴含的信息基础上,构建出对总体强度分布更为精准的估计,传统统计学方法确定样本量主要基于对总体方差的前提假设以及期望的置信水平与误差范围,在混凝土这种变异性较大的材料中,为达到足够的估计精度往往需要数量可观的试件,导致制作、养护、测试成本居高不下,以机器学习中的主动学习、贝叶斯优化等策略为例,其核心思想是让算法智能地选择那些能够最大程度减少模型不确定性或提供最多信息的样本进行试验,用最少的试验次数达到对强度-变量关系空间的最优探索,这种方法改变了传统随机或等间距取样的模式,转而进行一种有目的、有导向的序贯取样,每一次新试验的设计都建立在之前所有试验结果的分析之上,故而能极大提升单位样本的信息贡献度,使得在总样本量显著减少的情况下,依然能获得满足工程决策需求的预测可靠性。然而,减少样本量的可行性并非无条件成立,其成功实施强烈依赖于初期建立的模型架构对问题本质的捕捉能力以及先验知识的有效融入,如果初始模型因算法选择不当或特征工程不充分而存在显著偏差,那么基于此模型引导的样本缩减策略很可能将抽样引入歧途,反而错过关键特征区域的数据,导致最终模型性能的下降,因此在实际应用中,一种稳妥的做法是采用分阶段策略,在项目初期或面对全新材料体系时,仍按传统或稍简化的方案进行一定数量的基础试验,以获取构建初始可靠模型所需的“种子数据”,在此基础上再启动智能样本优化算法,指导后续补充试验的进行。

2.2 混凝土生产与养护过程的实时质量监控与预警

2.2.1 基于实时数据的强度发展异常诊断

基于实时数据的强度发展异常诊断,其目标在于通过持续监测混凝土在生产、浇筑、养护过程中的关键参数,并运用人工智能模型进行实时分析,以期在强度缺陷真正形成或显化之前就及时识别出异常苗头,混凝土的强度发展是一个受多重因素交织影响的时变过程,传统质量控制通常在养护结束后通过破坏性试件测试来获得“事后”结论,即便发现强度不足也往

往为时已晚，实时诊断系统则通过嵌入在搅拌站、运输车、模板内或养护室中的传感器网络，持续采集诸如拌合物温度、坍落度、环境温湿度、早期电阻率或超声波速等间接反映水化进程与微观结构形成的指标数据，这些高频率、多来源的实时数据流被输入至预先训练好的异常检测模型中，此类模型通常采用时间序列分析算法（如长短时记忆网络 LSTM）或单分类支持向量机等，它们能够学习在正常工况下强度发展所对应的多参数协同变化模式，并对偏离该正常模式的微小异动保持高度敏感。当实时监测数据流与模型内嵌的正常模式发生持续或显著的偏离时，系统便会触发异常诊断警报。这种诊断的价值不仅在于报警本身，更在于进一步的归因分析。先进的诊断模型能够结合异常数据的具体特征模式，例如是温度序列异常还是波速增长速率异常，并与历史案例库或知识图谱进行比对，初步判断异常的可能根源，例如：是因原材料批次波动导致的用水量估算失准，还是因养护保温措施不当引起的早期热损伤风险，这使得质量控制人员能够从传统的“被动等待结果”转向“主动干预过程”，在问题发生的早期阶段即采取针对性的纠正措施^[3]。

2.2.2 早期强度预测与拆模、张拉等工序的智能决策支持

早期强度预测是人工智能技术在混凝土施工流程优化中极具价值的一环，其核心目标在于精准预测混凝土在浇筑后数小时至数天内的强度发展，以此为拆模、预应力张拉、加载等关键工序的时机选择提供科学、动态的决策依据，传统施工中，这些工序的启动时间主要依赖规范规定的固定龄期或基于同条件养护试件的破坏性试验结果，前者缺乏对具体环境条件的考量而可能过于保守或冒险，后者则存在时间滞后性，影

响施工效率，早期预测模型通过融合混凝土配合比信息、实时采集的温度历史数据以及可能的早期非破坏性测试指标（如贯入阻力、超声波速等），构建从早期特征到后期强度的映射关系，特别是考虑到温度对水化速率的决定性影响，能够有效捕捉并处理温度时间历史的成熟度法或基于物理信息神经网络的混合模型，在此方面展现出显著优势。它们能够量化评估当前实际养护条件相较于标准条件的差异，以推算出更为真实的强度发展轨迹。基于高精度的早期强度预测，智能决策支持系统便能够为施工工序安排提供超越固定模板的灵活性，系统可以实时计算当前结构各部位混凝土已达到的强度百分比，并与拆模或张拉所需的最低强度阈值进行比对，当预测强度接近或满足要求时，系统可向管理人员发出预警或建议，进而实现工序的精准衔接^[4]。

3 结语

本研究系统性地探讨了人工智能技术在公路工程混凝土强度试验检测中从数据处理到智能决策的全链条应用框架，研究表明，通过深度融合数据采集、图像识别与多源信息融合技术，能够构建更为精准和高效的强度预测与质量评估模型并显著优化检测流程与施工决策。

参考文献：

- [1] 何毅 . 公路工程施工机械设备的组织与管理 [J]. 汽车周刊 ,2025,(10):153–155.
- [2] 唐现峰 . 农村公路工程质量数字化管控策略 [J]. 城市建设 ,2025,(19):54–56.
- [3] 李国平 . 公路工程建设项目风险管理对策与实践 [J]. 城市建设理论研究 (电子版),2025,(22):40–42.
- [4] 韩滨 . 公路工程项目的施工管理优化策略 [J]. 汽车周刊 ,2025,(08):206–208.