

# 土木工程常用原材力学性能检测方法的优化与精度验证

孔 欣

(山东鲁勘集团有限公司, 山东 济南 250118)

**摘 要** 土木工程原材力学性能检测是保障工程质量、安全的重要环节,检测精度和效率决定着工程建设的可靠性以及经济性。本文根据当前土木工程常用的原材力学性能检测技术状况,对检测方法的主要类型及其存在的主要问题进行了系统的梳理;从智能化设备集成、无损检测参数优化、机器学习数据融合、极端环境适应四个方面出发,结合实际技术应用场景来论述检测方法的改进,建立涵盖核心指标和验证工具的精度验证体系;最后探讨优化后检测方法在该行业中的应用拓展、质量安全提高的作用以及未来的发展趋势,旨在为土木工程原材料检测技术升级迭代提供技术参考,推动检测领域规范化、高效化的发展。

**关键词** 土木工程;原材力学性能;精度验证;无损检测;机器学习

**中图分类号:** TU4

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.06.040

## 0 引言

随着基础设施建设规模的扩大以及新型建筑材料的广泛应用,对土木工程中原材力学性能检测的准确度、高效性及适应性的要求也越来越高。混凝土、钢筋、钢材等主要原材料的抗压强度、抗拉强度、耐久性等力学指标决定了工程结构的承载能力和使用寿命。传统的检测方法在复杂的工程环境和新型材料的检测需求下,已经暴露出精度不够、效率低、环境适应性差等缺点。因此,需要对检测方法进行优化升级,建立科学完善的精度验证体系,提高工程质量控制水平、降低安全风险。

## 1 土木工程常用原材力学性能检测方法分类

当前土木工程常用的原材力学性能检测方法主要是破坏性检测和无损检测两种。破坏性检测是破坏试样的结构来测定力学性能指标的一种传统方法,主要有抗压、抗拉、抗剪强度试验等。其中混凝土立方体抗压强度试验按照 GB/T 50081 标准进行,用压力试验机加载到试件破坏得到极限抗压强度;钢筋抗拉强度的测定使用万能试验机做拉伸试验,测得屈服点和抗拉强度等指标<sup>[1]</sup>。无损检测技术由于其非破坏性和可以连续检测的特点而成为行业热点,包括超声回弹法、雷达探测法、计算机断层扫描技术、光纤传感技术等。超声回弹法结合超声波速度和回弹值来评定混凝土的

强度,用雷达探测法测定钢筋的位置及混凝土的缺陷,使用计算机断层扫描技术可以实现对原材内部三维成像。两种检测方式互相配合,形成当前原材力学性能检测的基础体系。

## 2 土木工程常用原材力学性能检测方法的优化

### 2.1 智能化检测设备集成优化

智能化检测设备集成优化以提高检测的自动化和数据的准确性为目标,利用多传感器技术、数字信号处理技术、智能控制技术等融合在一起来创建一个一体化的检测系统。本优化方向主要针对的是传统检测设备分散、数据割裂、人工依赖度高这三大问题,以设备集成的方式来达到自动闭环检测的目的,把检测过程中的数据采集、传输、分析和结果输出都进行自动化、智能化的控制,并且依靠多传感器的数据互补来提高检测精度。集成系统一般由核心检测模块、环境感知模块、数据处理模块和无线传输模块组成,环境感知模块可以实时监测温度、湿度、振动等环境参数,为检测数据的环境补偿打下基础,数据处理模块用嵌入式芯片来完成检测数据的实时分析和误差校正<sup>[2]</sup>。

以数字回弹仪系统智能化集成为例,传统的回弹仪依靠人工读数 and 记录来实现,容易出现读数误差和数据遗漏的情况,经过优化的数字回弹仪集成为高精度位移传感器、温湿度传感器和蓝牙传输模块,利用

**作者简介:** 孔欣(1998-),女,专科,助理工程师,研究方向:土木工程。

三维姿态修正算法自动补偿敲击角度偏差,温湿度补偿模型用来修正环境因素对回弹值的影响,使回弹值误差由原来的 12.5 HS 降到现在的 1.8 HS 以内。同时该系统可以利用蓝牙把检测数据实时地传送到移动终端上,使用激光—视觉融合检测技术来对碳化深度进行自动测量,精确度可达  $\pm 0.1$  mm,多源数据融合之后混凝土强度预测平均绝对误差下降到 1.8 MPa,数据采集效率提高 3.8 倍,人力成本降低 65%,有效地解决传统回弹检测精度不够和效率不高的问题。

## 2.2 无损检测参数优化

无损检测参数优化在于对核心检测参数进行精确匹配,通过对检测参数和原始材料力学性能指标相关性的分析来找到最佳的参数组合,从而减小检测误差。不同的无损检测技术核心参数不一样,超声检测的探头频率、耦合剂种类,CT 扫描的阈值、侵蚀系数,雷达检测的发射频率等都会影响检测信号的强弱和分辨率,从而决定出检测结果的准确与否。参数优化要根据原材料特性以及检测目的,用系统的试验来分析参数的变化对检测结果的影响规律,建立参数和力学性能指标之间的量化关系模型,达到检测参数的自适应匹配<sup>[3]</sup>。例如:在混凝土内部缺陷检测的 CT 扫描技术上,传统的扫描参数设定是一成不变的,不能满足不同强度等级、不同骨料分布的混凝土检测需要,造成裂缝宽度和钢筋体积测量误差较大。通过优化 CT 扫描参数,根据不同的钢筋直径和混凝土保护层厚度来分析阈值和侵蚀系数对测量精度的影响,得出最优参数组合为检测钢筋体积时用 2950 的最低阈值和 6 的侵蚀系数,可以将测量误差控制在 1% 以内;检测裂缝宽度时,根据裂缝宽度、钢筋直径和保护层厚度动态调整阈值,利用最优阈值计算公式,明显提高裂缝宽度检测精度。该参数优化方案有效地解决传统 CT 扫描参数固定造成适应性不足的问题,使 CT 检测技术更适合于复杂混凝土构件内部缺陷的检测。

## 2.3 机器学习数据融合优化

利用机器学习算法把多种无损检测数据融合在一起,建立力学性能预测模型,提高检测结果的准确度和可靠性。传统的无损检测数据解读依靠的是人工的经验,多源数据融合的程度比较低,不能充分利用数据中所包含的有效信息,而机器学习算法比如支持向量机、高斯过程回归、集成学习等,具有很强的非线性拟合和多变量分析的能力,可以对多个来源的检测数据进行深度地融合并智能化地解读。该优化方向的核心在于创建包含多个维度检测特征的数据集,用算法训练来建立检测特征和力学性能指标之间的预测模

型,用模型进行检测数据的自动分析和性能评价,减少人工解读的误差。

以混合混凝土力学性能无损评价为例,传统的检测方法不能准确地反映加入粉煤灰、硅灰等掺合料的混合混凝土强度,采用图像处理和机器学习技术相结合的方法,可以达到对混合混凝土力学性能精确预测的目的。该优化方案利用采集的混凝土切片图像,提取出灰度均值、标准差、偏度、熵等统计特征以及局部二值模式纹理特征,得到 1536 维的特征向量,用支持向量机、高斯过程回归、集成学习三种算法来训练并建立预测模型。高斯过程回归模型最佳,混凝土抗压强度预测的决定系数  $R^2$  为 0.939,平均绝对误差为 0.0 071;支持向量机模型对于 tensile strength 的决定系数  $R^2$  为 0.947,比传统的单个检测法要好很多。采用多源数据融合和机器学习算法,完成混合混凝土力学性能无损、准确评价,降低成本 70%,给新型混凝土材料检测提供一条有效的途径。

## 2.4 极端环境监测适配优化

极端环境监测适配优化针对高温、高湿、高海拔等极端工程环境下检测精度问题给出解决办法,用材料改进法、结构设计改良法以及环境补偿算法来提高检测设备和技术的适应性。极端的环境会使得检测设备性能下降、检测信号失真,高温环境下会造成传感器灵敏度降低,在高湿度条件下会造成超声检测耦合不良,在高海拔地区会影响雷达波传播速度。适配优化要从设备硬件和检测软件两个方面入手,硬件上选用耐高温、抗潮湿、抗干扰的元器件及材料,在软件上建立环境参数补偿模型,达到检测数据实时修正的目的。

以高温环境下混凝土强度检测为例,传统的超声回弹法在高温下 ( $\geq 60$  °C) 的测试误差明显增大,通过适配和优化来提高精度。硬件上用耐高温的压电超声探头和回弹锤体,探头表面涂覆高温-resistant 耦合剂,保证高温下信号耦合的稳定;软件上建立温度补偿模型,在实时监测环境温度及构件表面温度的基础上,修正超声波传播速度和回弹值,补偿温度对混凝土弹性模量的影响。经过优化之后,该检测方法在 60 ~ 120 °C 的高温环境下,混凝土强度检测误差控制在  $\pm 6.2\%$  以内,比传统的检测方法误差降低 40% 以上,可以满足工业窑炉基础、高温地区桥梁等高温工程对混凝土强度检测的需求。

## 3 检测方法精度验证体系构建

### 3.1 精度验证的核心指标

检测方法精度验证体系的核心指标有误差类、重复性、再现性和不确定度指标,从不同的角度来体现

精确性和可靠性。误差类指标有绝对误差、相对误差和平均绝对误差,绝对误差为检测值与真实值之差,相对误差为绝对误差与真实值的比值,平均绝对误差为多次检测的绝对误差的平均值,用来衡量检测结果与真实值之间的偏离程度;重复性指标是指在相同的条件下,同一人使用同一台设备对同一试样进行多次检测的结果是否一致,用相对标准偏差来表示;再现性指标指的是不同的条件、不同的人员、不同的设备所测得的试样的结果是否一致,用相对标准偏差来表示;不确定度指标是用来描述检测结果分散性的量,通过对系统性和随机误差来源的分析,用统计的方法得到该指标。这些指标互相配合,形成一个完整的精度验证体系<sup>[4]</sup>。

### 3.2 验证方法与工具选择

精度验证方法及工具的选取要根据检测技术种类、验证指标来定。核心验证方法为仪器校准、比对试验、标准物质验证三种。仪器校准为精度验证打下基础,使用检测仪器和标准器具进行对比修正误差,保证精度合格。压力试验机定期用标准测力仪校准,误差不大于 $\pm 1\%$ ,超声检测仪校准探头的频率和声速测量精度,频率偏差 $\leq \pm 1$  kHz。比对试验在于采用不同的机构、设备来测定同一个试样的结果,并比较它们的测定结果,以检验检测方法的重现性,用 $Z$ 比分数法或者 $En$ 值法量化偏差, $Z$ 比分数绝对值 $\leq 2$ 或者 $En$ 值 $\leq 1$ 为合格的结果,可以有效地发现误差的来源。标准物质验证用有明确的力学性能指标的标准物质进行检测,比较结果与标准值偏差,检验检测方法的准确性。采用标准混凝土试块、钢筋试样的方法进行检验,保证误差在合格范围内。

验证工具的选择要符合不同的检测方法,力学性能检测使用标准测力仪、量块、温度计、高精度数据采集仪等;无损检测用标准缺陷试块、厚度试块、雷达波标准反射体等。比如利用超声检测带标准裂缝的混凝土试块来检验裂缝宽度精度,利用CT扫描已知体积钢筋埋置试块来检验钢筋体积精度。另外MATLAB、SPSS等数据处理软件可用于统计学上的检验,可以对误差大小进行估计并作出不确定性评价,提高验证的效率和精度。

## 4 优化后检测方法的推广与应用前景

### 4.1 行业应用场景拓展

经过优化之后的检测方法具有明显的优势,可以扩大行业的应用范围,由传统的建筑工程质量验收扩展到基础设施全生命周期监测、新型建筑结构检测和

特殊环境工程检测。在基础设施全生命周期监测中,智能化无损检测系统可以对大气结构进行实时监测,并且给出相应的数据支持,在装配式建筑检测方面,采用超声波回弹法和CT扫描法相结合的方法来准确地检测出存在的问题,符合高效检测的要求,在特殊环境工程检测中,适应于极端环境的检测方法能够解决传统方法不能适应环境的特点。另外,该方法也可以用来检测绿色建筑材料,促进绿色建筑行业的发展<sup>[5]</sup>。

### 4.2 未来发展趋势展望

未来土木工程原材力学性能检测方法会向着数字化、智能化、集成化、绿色化的方向发展。数字化上,检测数据要全程进行数字化的管理,并用区块链技术创建起工程质量数字档案;智能化上,深度学习算法会得到改进,借助无人机巡检技术来完成全方位的检测;集成化上,多种技术融合将更加深入,达到多个维度同时检测的目的;绿色化上,无损检测技术也会发展起来,从而减小损耗和环境影响。此外,检测标准体系会更加完善,产学研融合也会更加紧密,从而促进检测行业的规范化发展,助推土木工程行业高质量发展。

## 5 结束语

随着土木工程不断发展,对原材力学性能检测技术进行革新具有重要意义。需从各个角度对检测方法做全方位的改进,包括智能化设备集成、无损检测参数精准匹配、机器学习数据深度融合以及在极端环境下保持稳定等工作,在此基础上建立一套科学完善的精度检验体系,可大大提高检测的准确性及可靠性。未来,在数字化、智能化背景下,检测技术将不断地创新,为土木工程的质量和安全的提供更好的保障,从而促使行业向着高质量、可持续发展的方向发展。

## 参考文献:

- [1] 张玉洁. 土木工程施工中绿色建筑材料质量检测分析[J]. 砖瓦,2024(06):44-47.
- [2] 王小颖. 新型绿色建筑材料在土木工程施工中的应用分析[J]. 广州建筑,2024,52(02):80-83.
- [3] 黎恒杆,林晓甜,陈德宏,等.“1+X”证书制度下“土木工程材料”课程改革研究[J]. 福建建材,2024(02):108-111.
- [4] 肖珍,郭红铄,肖灿. 以工程项目为载体的土木工程材料教学改革探讨[J]. 中阿科技论坛(中英文),2021(01):161-163.
- [5] 郭晓璐,杨君,奕吴凯. 土木工程材料方向专业课程思政建设的探索与实践[J]. 绿色环保建材,2020(12):168-170.