数字化检测技术在水利与建工质量管控中的应用

章　戈

浙江华东测绘与工程安全技术有限公司　浙江　杭州　310014

摘　要：水利与建筑工程质量管控面临隐蔽工程多、检测环境复杂、数据采集离散、质量追溯困难等突出挑战。数字化检测技术通过集成物联网、智能传感、三维激光扫描、无人机航测、建筑信息模型及大数据分析等手段，实现检测数据的自动采集、实时传输、智能分析与可视化管理，为工程质量管控提供了全新范式。本文系统阐述数字化检测技术的内涵、类型与特点，深入分析其在水利工程（大坝、堤防、水闸、隧洞）及建筑工程（地基基础、主体结构、装饰装修）质量管控中的典型应用场景，并展望了技术融合化、检测智能化、管控全周期化的发展趋势，以期为行业数字化转型提供参考。

关键词：数字化检测技术；水利工程；建筑工程；质量管控

引言：水利与建筑工程是国家基础设施建设的核心领域，其质量直接关系到公共安全、运行效能与投资效益。随着数字中国战略的深入推进，以物联网、人工智能、数字孪生为代表的数字化检测技术正加速与工程建设深度融合，推动质量检测从“抽样取证”向“全面感知”、从“事后验收”向“过程控制”、从“经验判断”向“数据驱动”的根本性转变。本文旨在梳理数字化检测技术体系，聚焦水利与建工两大领域的关键应用场景，系统探讨其在提升工程品质、保障结构安全中的实践路径与发展方向。

1 数字化检测技术概述

1.1 数字化检测技术的定义

数字化检测技术是指综合运用传感器技术、信息通信技术、数据处理技术、三维建模技术与智能分析算法，对工程实体、施工过程及结构性能进行自动感知、精准测量、实时传输、智能分析与可视化呈现的一系列技术体系的总称。其核心在于将物理世界的工程对象转化为可量化、可计算、可追溯的数字信息，通过构建“感知—传输—分析—反馈”的闭环，实现质量检测的数字化、网络化与智能化。与传统的依赖人工记录、纸质存档的检测方式相比，数字化检测技术强调检测过程的自动化、检测结果的定量化以及数据管理的系统化，为工程质量管理提供了全新的技术支撑手段。

1.2 常见数字化检测技术类型

当前应用于水利与建筑工程质量管控的数字化检测技术主要涵盖以下几类。第一类为智能传感与物联网监测技术，包括埋入式应变计、钢筋计、温度传感器、渗压计、光纤光栅传感器等，通过无线传输网络实现结构响应与环境参数的连续在线监测。第二类为三维空间数据采集技术，主要有三维激光扫描、无人机倾斜摄影、近景摄影测量等，能够快速获取工程实体的高精度点云数据与实景模型，用于几何尺寸检测、变形分析与隐蔽工程复测[1]。第三类为无损检测数字化技术，如地质雷达、超声波断层扫描、冲击回波、红外热成像等，通过数字信号处理实现对混凝土内部缺陷、钢筋保护层厚度、衬砌空洞等隐蔽质量问题的精确识别。第四类为建筑信息模型（BIM）与数字孪生技术，将检测数据与设计模型深度融合，实现质量状态的实时映射、偏差预警与闭环管理。第五类为检测大数据分析与人工智能技术，通过对海量检测数据的挖掘与学习，建立质量预测模型，辅助质量风险识别与决策。

1.3 数字化检测技术的特点

数字化检测技术在工程质量管控中展现出显著区别于传统检测的突出特点。其一，高精度与高分辨率，传感器与三维扫描设备能够实现毫米级甚至亚毫米级的测量精度，大幅提升对微小缺陷与变形的识别能力。其二，实时性与连续性，在线监测系统可 7×24 小时不间断采集数据，实现对工程状态的时间维度全覆盖，弥补了传统检测周期性、离散性带来的信息盲区。其三，可视化与可追溯性，检测数据通过 BIM 模型、GIS 平台、数据驾驶舱等形式直观呈现，形成完整的质量数字化档案，为过程追溯与责任界定提供客观依据。其四，智能化与预测性，借助数据分析和人工智能算法，能够从海量数据中识别质量劣化规律，实现从被动“事后处理”向主动“事前预警”的转变。其五，远程化与安全化，

无人机、机器人等无人化检测装备可代替人工进入高危区域作业，有效降低检测人员安全风险。

2 数字化检测技术在水利工程质量管控中的应用

2.1 水利工程质量检测的特点与难点

水利工程质量检测具有鲜明的行业特殊性。首先是隐蔽工程量大，大坝基础处理、堤防防渗墙、隧洞衬砌背后等关键部位均为隐蔽工程，传统检测手段难以全面覆盖，质量隐患不易发现。其次是检测环境复杂，水利工程多位于河谷、库区、地下等复杂环境中，交通不便、气候多变，传统人工检测效率低下且安全风险高。再次是结构尺寸巨大，大坝、堤防等工程体量庞大，传统抽样检测的点位覆盖率极为有限，难以反映整体质量分布。此外，水利工程长期承受水压力、渗透压力及环境侵蚀作用，质量劣化具有缓变性与累积性特征，对检测的连续性和长期性提出了更高要求。数字化检测技术的引入，正是针对上述难点，通过广域感知、连续监测、智能分析等手段，破解水利工程质量管控中的“看不见、测不全、判不准”难题[2]。

2.2 大坝与堤防工程检测应用

在大坝工程中，数字化检测技术主要应用于坝体变形监测、渗流监测、温度监测及混凝土质量检测。通过在大坝内部及表面布设高精度 GNSS、多点位移计、静力水准仪等，实现对坝体水平位移、沉降及挠曲的自动化连续监测，精度可达毫米级。分布式光纤传感技术沿坝体埋设，可实时感知坝体内部温度场、应变场分布，及时发现局部异常。渗压计阵列与量水堰配合，构建坝基与绕坝渗流的数字化监测网络，实现渗流量与渗透压力的精确量化。在堤防工程中，无人机搭载热红外与激光雷达开展常态化巡检，通过热成像识别堤身渗漏点，通过点云对比分析堤身变形与沉降。探地雷达与高密度电法相结合，用于堤防隐患探测，可有效识别洞穴、松散带、裂缝等隐蔽缺陷，为堤防加固提供精准定位。

2.3 水闸与泵站工程检测应用

水闸与泵站工程涉及金属结构、机电设备与混凝土结构的复合系统，质量检测要求较高。在金属结构检测方面，超声波测厚仪与磁粉探伤、相控阵超声等技术相结合，实现对闸门、启闭机钢结构焊缝质量与腐蚀程度的数字化定量检测，检测结果可自动生成图谱与报告。在机电设备检测方面，振动传感器、温度传感器与油液分析传感器集成应用，对泵组、电机等关键设备进行状态监测与故障诊断，通过特征频谱分析预判轴承磨损、转子不平衡等早期故障。在混凝土结构检测方面，三维激光扫描技术用于水闸闸墩、底板等大体积混凝土的几何尺寸复核与变形监测，与 BIM 模型比对后自动生成偏差色谱图。另外，水闸启闭过程在线监测系统实时采集启闭力、行程、电流等参数，判定运行状态是否正常，为运维管理提供数据支撑。

2.4 输水隧洞与管道工程检测应用

输水隧洞与管道工程具有线性延伸、作业空间受限、隐蔽性强等特点，是数字化检测技术应用的重要领域。在隧洞衬砌检测中，地质雷达与超声波断层扫描技术沿洞线连续扫描，可快速识别衬砌厚度不足、背后空洞、钢筋分布等质量问题，检测效率较传统钻孔取芯大幅提升。三维激光扫描技术搭载于轨道式移动平台或无人机（大断面隧洞），获取全断面高精度点云，通过与设计轴线比对，精确计算超欠挖、轴线偏移、收敛变形等指标[3]。在长距离输水管道检测中，管道内检测机器人搭载高清摄像、激光测距、漏磁传感等模块，在管道内部自主行走，实现对管道内壁腐蚀、焊缝缺陷、变形等问题的精准定位与量化评估。分布式光纤传感技术沿管道轴线敷设，实时监测管道应变、温度及振动，可及时发现第三方施工破坏、地基沉降引发的管道变形等异常事件。

3 数字化检测技术在建筑工程各阶段的应用

3.1 地基基础工程检测

地基基础工程是建筑结构安全的根本，其质量检测具有高度隐蔽性。数字化检测技术在这一阶段的应用主要体现在桩基检测、地基处理检测与基坑监测三个方面。在桩基检测方面，高应变动测仪与数字信号处理技术结合，通过实时采集锤击应力波信号，自动分析单桩承载力与桩身完整性，检测结果可现场生成数字化报告。声波透射法采用多通道超声波检测仪，对预埋声测管内的桩身混凝土进行全断面扫描，精确判定桩身缺陷位置与程度。在地基处理检测方面，静力触探设备配备数字数据采集系统，连续记录锥尖阻力、侧摩阻力等参数，实时绘制土层力学参数剖面图。在基坑监测方面，自动化全站仪、固定式测斜仪、轴力计等组成在线监测网络，对基坑支护结构位移、深层土体水平位移、支撑轴力等关键指标进行实时监测，数据超限时自动报警，有效保障基坑及周边环境安全。

3.2 主体结构工程检测

主体结构工程检测是建筑工程质量验收的核心环节，数字化检测技术的应用覆盖混凝土结构、钢结构及砌体结构等类型。在混凝土结构检测中，三维激光扫描

技术用于构件几何尺寸、垂直度、平整度的快速复核，与传统靠尺、吊线相比效率提升数倍，且能够生成全断面检测色谱图。回弹仪与超声波检测仪通过蓝牙连接智能终端，检测数据自动上传云端，依据规范自动完成强度推定与评定。钢筋扫描仪配合 BIM 模型，实现钢筋数量、间距、保护层厚度的现场复核与模型比对，偏差部位自动标注。在钢结构检测中，数字化超声波探伤仪与相控阵超声成像系统广泛应用于焊缝质量检测，检测图谱可永久存储、多人复判。高强螺栓扭矩检测采用数字化扭矩扳手，检测数据自动记录并生成扭矩系数统计报表。激光跟踪仪用于大跨度钢结构安装过程中的空间坐标精确控制，确保构件就位精度满足设计要求。

3.3 装饰装修工程检测

装饰装修工程涉及面广、细部节点多，传统检测主要依赖人工目测与靠尺测量，主观性强且难以全面覆盖。数字化检测技术的应用显著提升了装饰装修工程质量管控的精细化水平。红外热成像技术用于外墙饰面层粘结质量检测，通过热像图识别空鼓区域，较传统敲击法更加直观、全面，且可准确定位空鼓范围与面积。三维激光扫描与 BIM 模型对比，用于室内精装修的平整度、垂直度、阴阳角方正度等几何指标的批量复核，偏差分析结果以色谱图呈现，为整改提供精确指导[4]。在瓷砖铺贴检测中，机器人搭载激光测距与图像识别模块，自动完成大面积铺贴面的平整度、缝隙宽度检测，检测效率较人工提升 80%以上。在室内空气质量检测方面，分布式空气质量传感器网络实时采集甲醛、TVOC、PM2.5 等指标，数据上传至管理平台，实现装饰装修环境质量的动态监测与闭环管理。

4 数字化检测技术应用趋势与展望

随着数字技术与工程建设融合的不断深化，数字化检测技术正呈现出多维度的演进趋势。其一，检测与设计的深度融合，BIM 模型正从设计阶段的虚拟载体演变为贯穿施工、检测、运维全生命周期的数字主线，检测数据实时反向校准模型，形成“设计—施工—检测—运维”的数字闭环。其二，无人化与自主化检测装备加速普及，无人机、机器人、爬行器等自主检测装备将在高危、狭小、水下等复杂环境中承担更多检测任务，检测作业的安全性、可达性与效率同步提升。其三，检测数据与人工智能的深度结合，基于深度学习算法的图像识别、缺陷智能判定、质量风险预测模型将逐步取代人工经验判断，检测结果的主观性将大幅降低。其四，从单点检测向全生命周期健康监测延伸，数字化检测技术与结构健康监测系统融合，实现工程从建设期到运营期的质量状态连续追踪，为结构安全评估与维护决策提供长期数据支撑。其五，检测标准与数据接口的规范化，随着数字化检测技术的规模化应用，相关技术标准、数据格式、质量评价体系将逐步统一，为跨项目、跨区域的检测数据对比与行业监管提供基础。

结束语

数字化检测技术正在重塑水利与建筑工程质量管控的模式与能力。传统检测手段在覆盖面、时效性、精准度及可追溯性等方面的固有局限，正被智能传感、三维扫描、BIM 集成、无人化检测及大数据分析等数字化技术系统性突破。展望未来，随着数字孪生、人工智能、5G 等前沿技术的持续赋能，数字化检测将向更深层次的智能化、全周期化、协同化方向演进，为构建更高品质、更可持续的工程基础设施提供坚实技术支撑。

参考文献

[1] 张玉萍. 数字化技术在水利工程监理中的作用与前景 [J]. 工程技术研究，2023,8(22):174-176.

[2] 郎启庄, 郎啟香, 高宽. 数字孪生技术赋能水利工程建设管理路径探索 [J]. 水利建设与管理,2025,45(1):68-73.

[3] 彭小明, 陈瑛, 管帝. 数字化技术在新集水电站建设管理中的应用 [J]. 水利水电快报,2024,45(z1):76-78,87.

[4] 张兴礼, 杨再富, 石从黎, 等. 预拌混凝土企业质量管控数字化实践 [J]. 重庆建筑,2022,21(11):17-20.