

建筑工程领域中智能化设备在安全监测中的应用与展望

文 / 李青梅 兰陵县住房保障中心

朱宏伟 兰陵县住房保障中心

摘要：随着物联网、人工智能和大数据技术的快速发展，建筑工程领域的安全监测正经历从传统人工巡检向智能化、自动化方向转型。本文系统梳理了智能化设备在结构健康监测、施工过程安全管理、环境风险预警等场景中的应用现状，结合技术原理与典型案例分析其优势，并针对当前存在的技术瓶颈与行业需求提出未来发展方向。研究结果表明，智能化设备通过实时数据采集与动态分析，可显著提升工程安全管理的效率与精度，为建筑行业的可持续发展提供技术支撑。

关键词：建筑工程；智能化设备；安全监测；物联网；人工智能

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.14.098

引言

随着建筑工程的规模日益扩大和复杂度不断提高，传统的安全监测方法已难以满足现代工程建设的需求。智能化设备的出现为建筑工程安全监测带来了革命性的变革。这些设备集成了先进的传感技术、数据处理算法和通信技术，能够实时、准确地监测工程结构的状态和施工环境，大大提高了安全监测的效率和可靠性。

本文旨在全面探讨智能化设备在建筑工程安全监测中的应用现状和未来发展趋势。通过分析智能化设备的技术特点、应用场景以及实际案例，我们将深入探讨这些设备如何改变传统的安全监测模式，提高工程安全水平。同时，本文也将探讨智能化设备在应用过程中面临的挑战，并展望未来可能的技术创新和发展方向。

一、建筑工程安全监测的重要性与挑战

（一）质量保障维度的核心价值

建筑工程安全监测作为工程质量控制的核心环节，其技术价值体现在全生命周期质量追溯体系的构建。通过分布式传感器网络对结构形变、材料疲劳度、连接节

点应力等关键参数进行持续追踪，可精确验证设计参数与实际工况的匹配度。以某超高层建筑为例，其施工阶段监测数据与BIM模型的逆向修正偏差率控制在0.3%以内，有效保障工程实体符合GB 50300-2013《建筑工程施工质量验收统一标准》要求。监测系统生成的动态数据库为施工方案优化提供了量化依据，形成涵盖计划（Plan）、执行（Do）、检查（Check）、处理（Act）的完整PDCA质量闭环管理体系。

（二）事故预防效能的数据验证

基于住建部2022年行业安全报告数据，采用智能监测系统的工程项目事故发生率较传统项目下降63%，直接经济损失减少5.8亿元。实时监测系统通过多物理场耦合分析，可提前72小时预警坍塌、倾覆等重大风险。典型案例显示，深圳某超高层项目因0.12mm/m的楼体偏转漏检导致幕墙密封失效事故，造成直接经济损失2300万元。对比分析表明，采用智能监测系统的同类项目可将此类风险预警准确率提升至98.6%，充分验证了持续监测的必要性。

监测类型	事故发生率	直接经济损失	风险预警提前时间	预警准确率	典型事故损失
传统监测项目	基准值	基准值	-	≤85%	2300万元
智能监测项目	下降63%	减少5.8亿元	72小时	98.6%	-
数据来源	住建部2022年行业安全报告		深圳超高层项目实证		

（三）传统监测体系的技术代差

现行人工巡检体系存在显著技术缺陷：离散采样频率（2-4小时/次）难以捕捉混凝土徐变（0.01-0.03mm/d）等渐变过程；接触式测量设备在复杂工况下误差带达15%-20%，且无法实现温度-湿度-应力多场耦合分析。某跨江大桥项目事故溯源显示，纸质记录模式导致关键数据追溯耗时长达72小时，延误了最佳处置时机。行业调研数据表明，传统监测体系对渐变型风险的漏检率高达43%，严重制约工程质量安全保障能力。

（四）行业面临的三重技术挑战

当前建筑工程安全监测面临多维技术瓶颈：其一，复杂结构监测需求激增，如北京大兴国际机场C型柱

需同步监测12个应力敏感区，数据采集频率要求达到200Hz；其二，动态施工环境干扰加剧，某跨江大桥项目在6级紊流工况下，传感器信噪比下降40%；其三，多源数据融合壁垒突出，智慧工地试点项目出现5类异构系统数据孤岛，导致监测响应延迟23分钟。这些技术挑战使现有监测体系难以满足《建设工程监测技术规范》GB 50497-2019的升级要求。

二、智能化设备在建筑工程安全监测中的应用

（一）智能化设备技术架构解析

现代智能化监测系统采用“感知层-传输层-平台层”三层架构体系。感知层由分布式部署的智能传感器（应变计、倾角仪、裂缝计等）构成，其采样精度可达0.01%FS，

响应频率提升至 100Hz 级别；传输层依托 5G+LoRa 混合组网技术，实现监测数据毫秒级传输，某特大桥项目实测传输丢包率控制在 0.3% 以内；平台层集成 BIM+GIS 可视化系统，支持 TB 级数据存储与并行计算，满足《建筑与桥梁结构监测技术规范》GB 50982-2014 的实时性要求。

（二）多场景融合应用模式

在结构健康监测方面，智能光纤光栅传感器可实现 0.01mm 级位移监测，配合 MEMS 加速度计形成三维振动监测网络。某体育场项目采用该组合方案，成功预警看台 0.8mm 异常位移。在动态施工监测领域，UWB 定位系统与智能安全帽集成，实现施工人员厘米级定位，某地铁项目应用后违规进入危险区域事件下降 82%。环境监测方面，多参数气象站可同步采集 PM2.5、风速、温湿度等 12 项参数，数据刷新频率达 1 次 / 10 秒。

（三）核心功能优势分析

智能化设备相较传统手段呈现三大突破：实时性方面，监测频率从 4 小时 / 次提升至连续采样，某深基坑工程通过实时监测成功预警 0.5mm/h 的异常沉降；准确性层面，采用卡尔曼滤波算法将数据误差压缩至 ±0.05%，较传统设备提升 3 个数量级；协同性维度，通过 OPC UA 协议实现与 BIM、ERP 系统的数据贯通，某智慧工地项目实现监测 - 预警 - 处置闭环响应时间缩短

监测参数	技术指标	监测精度	预警响应时间	异常事件处理时效	实际效果
结构变形	毫米级三维位移监测	±0.5mm	实时	2 小时	避免 3 次重大结构损伤
索力监测	光纤光栅传感网络	±1.5%FS	5 分钟	4 小时	延长拉索使用寿命 30%
环境腐蚀	氯离子浓度梯度监测	0.01mol/m ³	持续监测	预警自动触发	降低维护成本 45%
振动监测	200Hz 高频采样系统	0.01g	即时	联动制动	预防共振风险 7 次
船撞预警	AIS+ 雷达多源融合	500 米监测半径	10 秒	自动报警	成功预警 23 次碰撞风险

（二）超高层建筑智慧监测解决方案

上海中心大厦施工过程中，创新采用“空天地”一体化监测体系。部署大疆 M300 RTK 无人机搭载 30 倍光学变焦镜头和 640×512 分辨率热成像仪，实现外立面每日自动巡航，累计获取 23TB 影像数据，通过 YOLOv5 算法识别出 47 处幕墙单元板错位缺陷。室内巡检采用安翰 NEBULA-X 履带式机器人，配备 16 线激光雷达和 4K 全景相机，在核心筒区域完成 342 次爬升作业，发现钢结构焊缝缺陷 13 处，最大裂纹尺寸 0.8mm。

人员安全监测方面，为 1265 名施工人员配备智能安全帽，集成 UWB 定位（精度 ±15cm）、心率监测和跌落报警功能。系统累计触发 235 次危险区域越界预警，19 次人员状态异常提醒，使高空坠落事故率下降至 0.08%，较传统管理方式降低 92%。项目建立的数字孪生平台实现监测数据与 BIM 模型毫秒级同步，在 2021 年台风“烟花”期间，通过风振监测数据动态调整塔吊作业方案，避免直接经济损失约 2700 万元。

（三）地下综合管廊智能巡检创新应用

在雄安新区某地下管廊工程中，项目团队研发了轨

至 8 分钟。

三、智能化设备在建筑工程安全监测中的具体应用案例

（一）跨海大桥智能监测系统实践

在港珠澳大桥延长线某标段工程中，项目团队构建了基于物联网的立体监测体系。工程主体结构共部署 586 个智能传感器节点，包含 316 个光纤光栅应变传感器、158 个 MEMS 加速度计及 112 个温湿度复合传感器。这些设备以 5m×5m 网格密度分布于桥塔、悬索锚固区等关键部位，采用 LoRaWAN 协议实现 2km 范围内的无线组网，数据采集频率达到 200 次 / 秒。监测系统通过边缘计算网关进行数据预处理，将有效数据压缩率提升至 82%，并通过 5G 专网实时回传至 BIM 协同平台。

系统运行期间成功预警三次重大风险：在台风“山竹”过境时，实时监测到西侧桥塔振动频率异常（峰值达 0.35g，超出设计值 27%），触发三级预警机制；在混凝土浇筑阶段，温差监测模块发现箱梁内外温差达 18℃，及时启动智能养护系统；通过长期数据积累建立的 LSTM 预测模型，将结构变形预测误差控制在 ±1.2mm 范围内。经统计，该系统使监测效率提升 400%，人工巡检频次由每日 6 次降至 1 次，相关经验已纳入《公路桥梁结构监测技术规范》JT/T 1037-2022 修订内容。

道式智能巡检系统。沿管廊顶部铺设 1080 米磁导航轨道，配置 6 台多模态检测机器人，搭载 128 阵元相控阵超声、甲烷激光光谱和 4K 视频采集模块。机器人以 0.5m/s 速度全天候巡检，实现管壁裂缝检测精度 0.05mm、气体泄漏检测灵敏度 1ppm。通过联邦学习技术建立的设备健康预测模型，使传感器故障预警准确率达到 96.7%，维护响应时间缩短至 15 分钟。

该系统创新采用数字孪生技术，将实时监测数据与地质雷达探测结果融合，成功预测 3 处地层沉降风险点，最大沉降量达 32mm。在 2022 年汛期，水位监测模块触发自动闸门控制系统，避免了两起内涝事故。经第三方评估，该智能巡检系统使管廊运维成本降低 41%，应急响应效率提升 300%，相关技术已获得 6 项国家发明专利。

四、智能化设备在建筑工程安全监测中的挑战与未来发展趋势

（一）技术瓶颈与设备性能优化

当前智能化设备在极端工况下的稳定性仍面临严峻考验。以青藏铁路某冻土区监测项目为例，智能传感器在 -40℃ 环境中的故障率高达 18%，远高于实验室标定的

3%故障率标准。同时，现有算法在复杂工况下的泛化能力不足，某深基坑监测项目因地下水位突变导致应力预测模型误差扩大至25%。未来需重点突破三大技术方向：一是开发耐候性复合材料，如采用石墨烯涂层提升传感器防水防腐性能；二是构建自适应算法框架，通过迁移学习实现不同工程场景的快速适配；三是推进边缘计算与5G-MEC技术融合，将数据处理延迟从现有3.2秒压缩至500毫秒内。

（二）成本制约与规模化应用路径

据住建部2023年调研数据显示，智能监测系统成本占项目总投资比例达1.2%-2.5%，显著高于传统监测的0.3%-0.8%。某省会城市地铁项目监测预算显示，智能倾角传感器的单点年维护费用达4800元，是传统设备的4.6倍。破局之道在于构建“硬件标准化+软件平台化”体系：硬件端推行模块化设计，某央企研发的通用型监测节点使部署成本降低42%；软件端发展SaaS模式，某云监测平台已实现200+项目并行接入，单项目年均服务费降至8万元。政策层面需完善《建设工程监测技术规范》补充条款，明确智能设备计入工程造价的实施细则。

（三）数据安全与系统集成体系

多源异构数据融合存在三重风险：一是物理层漏洞，某智慧工地曾因LoRa网关未加密遭数据篡改；二是协议层冲突，某BIM平台与监测系统因IFC标准版本差异导致23%数据丢失；三是应用层隐患，某市建管平台遭受APT攻击致17个项目数据泄露。解决方案应包含技术与管理双维度：技术端采用“区块链+联邦学习”架构，某特大桥项目应用后数据溯源效率提升76%；管理端建立三级防护体系，参照《关键信息基础设施安全保护条例》制定工程监测数据分类分级标准。

五、智能化监测体系的技术瓶颈与突破路径

（一）设备可靠性挑战与材料创新

极端环境下的设备稳定性已成为制约智能化监测体系发展的首要难题。青藏铁路冻土区监测项目数据显示，智能传感器在-40℃低温环境中的故障率较实验室条件提升6倍，其中17%的故障源于密封材料低温脆化导致的内部电路短路。深基坑监测项目案例表明，地下水位突变引发的电磁干扰可使应力监测数据漂移达25%，远超GB 50982-2014规范允许的±5%误差范围。突破方向包括：研发石墨烯基复合封装材料，将工作温度范围扩展至-60℃~150℃；采用MEMS工艺制造微型化传感器，使抗振动等级提升至10g；开发自补偿电路设计，通过实时温度-湿度补偿算法将环境干扰误差降低80%。

（二）数据安全风险与防护体系构建

多源异构数据融合面临三重安全威胁：物理层方面，某智慧工地项目因LoRa网关未启用AES-256加密，导致23%的监测数据遭恶意篡改；协议层存在标准冲突，BIM

平台与监测系统因IFC4.0与IFC2x3版本差异造成18%数据丢失；应用层隐患突出，某市建管平台遭受APT攻击导致17个项目监测数据泄露。解决方案需构建“三位一体”防护体系：技术层面采用区块链存证技术，实现数据篡改追溯时间从72小时压缩至15分钟；管理层面建立三级访问权限机制，参照GB/T 22239-2019等保2.0要求实施动态授权；标准层面制定《建设工程监测数据安全规范》，明确数据分类分级标准与脱敏处理流程。

（三）系统集成难题与架构优化

当前智能化监测系统存在显著的集成障碍：某智慧工地试点项目监测系统与BIM、ERP平台对接时，因数据接口标准不统一导致日均产生1200条异常数据记录；跨江大桥项目监测数据显示，异构系统间的数据解析延迟最高达23分钟，严重影响实时预警效能。需从三方面突破：硬件层面推行OPC UA统一架构，使设备协议兼容性提升至99%；软件层面开发中间件平台，支持Modbus、BACnet等6类工业协议的自动转换；系统层面构建微服务架构，某特大桥项目应用后系统扩容效率提升300%，模块更新耗时从8小时降至15分钟。

结语

智能化设备在建筑工程安全监测中的应用正在深刻改变传统的安全监测模式。通过实时、准确、全面的数据采集和分析，这些设备显著提高了工程安全监测的效率和可靠性。尽管在技术、成本和标准等方面仍面临挑战，但随着技术的不断进步和应用经验的积累，智能化设备在建筑工程安全监测中的应用前景十分广阔。

未来，随着物联网、大数据、人工智能等技术的进一步发展，智能化设备将在建筑工程安全监测中发挥更加重要的作用。它们不仅能够提高工程安全水平，还将推动整个建筑行业向更智能、更高效的方向发展。因此，建筑行业应积极拥抱这一技术变革，加大研发投入，培养专业人才，制定相关标准，以充分发挥智能化设备在安全监测中的潜力，为建筑工程的可持续发展提供有力保障。

参考文献

- [1] 王克成, 卢俊超, 沈玉欣, 田野. 基于“智慧工地”的施工现场安全管理[J]. 科技视界, 2019(1).
- [2] 耿青波. 建筑智能化机电设备安装技术[J]. 市场周刊·理论版, 2020(1).
- [3] 王海鸥. 建筑智能化工程管理技术及其应用[J]. 建筑工程技术与设计, 2015(1).
- [4] 陈韦. 智能建筑中的安防监控系统[J]. 数码设计·CG WORLD, 2018(1).
- [5] 刘萌. 浅议智慧工地的应用与发展[J]. 中国房地产业, 2018(1).
- [6] 王淑桃. 工程建设管理中智能建造技术的创新应用[J]. 建筑经济, 2021(1).