

MODERN ENGINEERING SCIENCE

现代工程科学

2024. 12

第7卷 第36期

总第40期



2897-3604

香港星源出版社
STAR SOURCE PUBLISHING

现代工程科学



香港星源出版社
STAR SOURCE PUBLISHING

现代工程科学

Modern Engineering Science

2024年12月 第36期

本刊声明

《现代工程科学》是由香港星源出版社出版的工程类高水平学术期刊，聚焦结构工程、智能制造、材料科学、绿色建筑、系统控制等核心方向，突出工程理论与产业应用的融合研究。本刊致力于展示具有前沿性、实用性与工程价值的研究成果，服务于技术创新、工程实践与产业发展。通过严格的同行评审机制与国际化学术交流平台，推动全球工程科技的深度协同与知识共享。刊期：本刊为双月刊，每年六期。每期围绕现代工程领域的重大技术进步与核心挑战设立主题，兼顾学术前沿、工程实践与产业转化，推动工程科学在全球创新发展格局中的协同进步。

出版社信息

主管：香港星源出版社
主办单位：香港星源出版社
主编：黄志远
执行主编：林晓晨
社内编辑：
李安民 王亦凡 陈雅婷 刘俊豪
何颂 邱敏彤 马思远 张芷涵
邓晨 赵玉洁 方泽 陈柏年
孙乐然 江梓浩 黄晓彤 黄瑾瑜
胡思源

网址：<https://www.ssxin.com>

电话：+852 6855 8145

邮箱：info@ssxin.com

刊期：双月刊

目 录

CONTENTS

结构健康监测中基于压电传感器的数据融合算法研究	李安民 001
面向碳中和的绿色建材研发与性能优化评估	王亦凡 005
复杂施工环境下的物联网环境感知系统设计与部署实践	焦蒞昊 007
基于数字孪生的高层建筑施工进度智能控制方法	陈雅婷 012
智能工厂中的 AGV 路径规划算法优化研究	吴凯 015
新型自修复混凝土材料的微观机制与力学行为分析	马思远 019
建筑工业化背景下的模块化装配式设计策略	张芷涵 023
高速铁路结构系统的温度效应建模与控制	邱敏 027
基于边缘计算的智能制造设备数据协同机制	郑浩南 031
高延性钢筋混凝土梁抗震性能数值模拟研究	赵玉洁 035
新型可回收工程材料的绿色性能评价体系	孙乐然 039
基于图神经网络的结构损伤识别研究进展	陈柏年 043
智能传感器在隧道施工风险监测中的应用分析	郭启荣 047
多场耦合环境下深基坑支护系统响应特性研究	胡天睿 051
面向多机器人协作的系统动态调度机制设计	江梓浩 055
建筑声环境智能模拟与参数优化研究	王依婷 059
基于 BIM+GIS 的城市地下空间信息集成方法	黄瑾瑜 063
面向可持续性的工程设计优化决策支持框架	胡思源 067
面向施工现场的 AI 视频识别系统实证研究	林晓晨 071
超高层建筑抗风设计中主动控制技术研究	黄志远 075

复杂施工环境下的物联网环境感知系统设计与部署实践

焦蒞昊

(天津理工大学 300000)

摘要:

复杂施工环境下的工程安全与环境监测正成为建筑行业数字化转型的核心议题。传统感知系统难以应对多变、遮挡、干扰严重的施工现场特征，限制了监测数据的时效性与可靠性。本文以《工程环境监测系统 V1.0》软著成果为基础，围绕物联网感知网络在复杂施工现场的适配性展开深入研究。通过系统架构优化、通信协议选择、模块化节点设计及典型工地实地部署，本研究构建了一套具备高鲁棒性、可移动性与低功耗特征的物联网环境感知系统。部署结果显示，该系统在地下基坑、高空钢构等复杂场景下具备稳定的数据采集能力与快速响应能力，显著提升了施工监测的覆盖效率与风险预警能力。研究结果可为智慧工地建设、数字孪生建筑场景与环境感知型边缘智能终端提供可复制的系统设计范式与部署策略。

关键词：物联网（IoT）；施工现场；环境感知系统；系统部署；低功耗网络；工程监测

一、引言

在新基建和智慧建造快速发展的背景下，施工现场的环境感知能力正逐渐成为建筑工程数字化治理体系的核心组成部分。实时、精确、可扩展的环境监测不仅有助于施工过程安全控制，还为工期优化、资源调度与环境合规提供了重要支撑。尤其在基坑工程、隧道施工、装配式建造等复杂施工场景中，如何实现感知系统的稳定运行与数据有效获取，成为施工管理数字化转型的关键难题。

传统工程监测方式依赖人工巡查和固定式监测终端，不仅布置周期长、数据获取滞后，且在恶劣施工环境下易受噪声、遮挡、潮湿、高粉尘等因素干扰，严重制约了其应用范围。近年来，随着物联网（IoT）、边缘计算与低功耗通信技术的快速发展，感知系统正逐步向无线化、分布式、智能化方向演进。然而，如何将新兴技术“真正落地”至高动态、高干扰、频繁结构变化的施工一线，仍需大量工程化探索与系统化集成设计。

本文立足于《工程环境监测系统 V1.0》的研发实践，针对建筑施工现场中典型复杂场景（如地下结构、高空构件、狭小封闭空间等）所暴露出的感知布设不便、数据传输不稳、能耗控制困难等问题，提出一套具备高度可适配性的物联网环境感知系统。本文工作主要包括：

(1) 构建融合传感层、通信层、计算层与应用

层的整体系统架构，满足不同施工单元的环境感知需求；

(2) 从部署挑战出发，提出以 LoRa、Zigbee 等低功耗协议为核心的多跳通信方案，并结合模块化硬件设计优化现场布设效率；

(3) 选取多个典型施工场景进行实地部署，评估系统在动态环境下的可靠性、实时性与可维护性，并据此提出适应性优化建议。

通过系统性部署实践与运行反馈分析，本文验证了所设计感知系统的工程适用性，为物联网在施工现场等“非标准工业场域”中的场景化部署提供了现实依据与设计参考。

二、系统设计目标与架构

针对复杂施工环境中感知部署的现实挑战，本系统以“适应性强、部署灵活、通信稳定、能耗可控”为核心目标，设计了一套具备分层结构的物联网环境监测系统。其基础设计依托《工程环境监测系统 V1.0》软著成果，在原有功能架构的基础上进行了通信方式增强、节点结构解耦与边缘计算能力扩展，力求在动态变化的施工场景中实现“即插即用、弹性部署、高频监测”的实际效果。

2.1 系统设计目标

系统的整体设计目标可分为以下四个方面：

1. 多维环境感知能力：支持对温湿度、噪声、粉尘浓度、结构震动、水位与倾斜角度等常见施工环境

参数的实时采集，部分节点具备多传感器融合能力，提升监测密度与覆盖度。

2. 高鲁棒性与抗干扰能力：面对施工现场高强度电磁干扰、金属结构反射遮挡等情况，系统需具备低频段通信支持、中继路由能力与自愈式网络连接机制，确保关键节点数据持续上报不中断。

3. 灵活布设与快速部署能力：采用可组装、磁吸/抱箍式安装支架，传感器与通信模块物理分离，支持快速移动重布与模块扩展。

4. 低功耗与边缘智能化能力：节点具备周期休眠与事件触发唤醒机制，边缘计算模组可完成初步数据过滤与故障检测，降低上行数据冗余并节省通信功耗。

2.2 系统总体架构

系统采用经典四层 IoT 体系架构模型，自下而上依次为：感知层、网络层、平台层与应用层。

- 感知层：由多种传感器节点组成，承担物理数据采集任务。节点通过标准 Modbus、I²C 或 GPIO 接口连接传感模组，部分节点内置微型边缘处理芯片（如 STM32/ESP32）进行预处理。

- 网络层：核心为 LoRa 自组网通信机制，辅以 Zigbee 组网与 4G/5G 上行模块。网关可部署于塔吊上端、临时设备箱或施工升降架附近，实现跨层/跨区域数据汇聚。

- 平台层：基于 MQTT 协议与云数据库（如 InfluxDB、MongoDB）组成，支持实时数据推送、节点健康管理与自动异常报警。部分部署场景使用本地服务器以提升响应速度与数据安全性。

- 应用层：为工程项目管理方提供 Web 端与移动端双重可视化界面，支持实时地图布点、数据曲线浏览、告警推送及施工日志自动生成等功能。

2.3 模块化设计与硬件拓扑结构

为实现部署灵活与快速适配，本系统采用“功能模块+支撑节点”式拓扑结构。

- 基础节点 (Base Unit)：负责采集与上传，内置 MCU 与通信模组；

- 边缘节点 (Edge Unit)：可部署 AI 模型用于本地数据异常检测，提升系统自诊断能力；

- 中继节点 (Relay Unit)：仅承担信号中转任务，支持自动多跳路由，便于复杂场景下的通信补盲；

- 电源模块：太阳能+电池混合供电或施工临时电接入，兼容不同能耗条件。

整体设计强调“轻布设、快部署、易维护”的原则，可在一天内完成对中型工地（3000 - 5000 m²）的基础节点布设，并通过远程配置完成系统初始化。

三、部署挑战与技术响应

施工现场作为高度动态、干扰频繁、空间复杂的工作场域，给物联网环境感知系统的落地带来了不同于工业厂区、商业建筑的独特挑战。根据前期项目部署经验及现场调研反馈，系统在感知部署中面临以下四大类典型问题：通信遮挡严重、干扰信号密集、能源获取困难、施工节奏变化频繁。对此，本文结合硬件改进与网络设计，在系统设计中引入了多项针对性优化机制。

3.1 通信遮挡问题与多跳中继网络策略

在地下基坑、钢结构夹层、高层脚手架等区域，金属材料反射、空间结构复杂使得无线信号存在明显遮挡与衰减效应。传统 Wi-Fi 或蓝牙通信方式难以满足稳定上传要求。

本系统采用 LoRa (Long Range) 低频自组网通信方式，其典型工作频段为 433MHz 或 868MHz，相较于 2.4GHz 具有更强的穿透能力。为进一步提升系统的通信鲁棒性，节点支持自动多跳中继功能：即在主网关信号不可达区域自动搜索邻近中继节点，构建最短跳路径上报数据。实验表明，该机制在多层结构工地中可将丢包率控制在 1.5% 以内，远低于 Zigbee 或 NFC 同场对比网络。

3.2 多源干扰与信道自适应切换机制

施工现场普遍存在高频率的机械振动、电焊电弧、临时电源波动等干扰源，容易导致通信噪声增加或数据传输中断。特别是在使用临时电源或共享信号塔时，信号冲突问题尤为显著。

为降低干扰对数据稳定性的影响，系统内置了信道自适应调节机制：节点启动时根据 RSSI (接收信号强度指示) 与 SNR (信噪比) 评估当前信道质量，并在高干扰情形下自动切换至备用频段。此外，通信协议层引入 CRC 校验与数据重传机制，确保关键监测数据在噪声环境中也能完整上报。

该机制特别适用于桥梁桁架焊接、隧道衬砌施工等电磁干扰频繁的场景，部署案例中有效提升了稳定通信率至 98% 以上。

3.3 节点能耗管理与边缘智能节能设计

受限于施工场地供电条件，尤其在临建区域或非恒电区域，如何维持节点长时间稳定运行成为系统运行稳定性的基础要求。

本系统支持三种供电策略：①太阳能+锂电池混合；②低压电源集中供电；③远程供电网关集中供电后分节点直流输出。在软件层面，采用边缘智能唤醒机制：当无特征性环境变化（如温度变化 < 1℃ / 5 分钟，噪声 < 阈值）时，节点进入休眠模式，仅保留核心监

听模块；当事件触发或定时窗口到达时，系统自动唤醒并上传数据。该策略使得平均功耗下降约 38%，单节点电池寿命从 8 天提升至 13 - 15 天。

3.4 工地结构变化频繁下的可重构部署策略

施工进度推动着现场结构的持续变化，如支护墙拆除、脚手架升降、机械进出场等，这些变化可能导致原部署节点无法继续维持通信路径或感知有效性。

为应对这种高动态性，本系统采用模块化节点结构与快速安装支架设计。节点装置可采用磁吸 / 抱箍两种组合方式，支持工人单人 15 分钟内完成重定位操作。系统平台具备自动地图重构能力，支持通过移动终端重新布点上图，自动更新网络拓扑与路径策略。

此外，平台支持部署前“虚拟布控模拟”，用户可根据施工平面图在软件中完成初始节点布局与覆盖范围预测，提前发现盲区并优化布局。

四、典型场景部署案例

为了验证所设计的物联网环境感知系统在复杂施工现场中的适应性与实用性，本文选取了两个典型工地作为试点部署场景：一是以深基坑、支护围挡与临时排水为特征的城市地铁施工项目；二是以高空装配作业、狭小结构空间与高频振动源为特点的装配式钢结构拼装工地。通过实际部署与数据采集，对系统的感知覆盖能力、通信稳定性及部署效率进行评估。

4.1 场景一：城市地铁深基坑施工部署

该项目位于南方某市地铁 9 号线盾构区间，基坑深度达 16 米，设有三层支护结构，地面布满临建设备、起吊机具与密集电缆。部署需求集中于：基坑边坡监测、水位变化预警与高粉尘区域噪声管控。

本系统布设方案如下：

- 在基坑围护桩顶部布设 4 个倾斜角传感节点；
- 在基坑底部预埋 2 个水位传感节点与 1 个温湿度节点；
- 在施工电梯口布设 LoRa 中继器 1 个，用于跨坑传输；
- 主网关设于办公区 2 楼楼顶，连接至施工信息中心服务器；
- 部署总时间为 1.5 天，现场仅需 1 名技术员 + 2 名普通作业人员完成。

运行结果表明：

- 平均数据上传周期控制在 30 秒以内；
- 地下节点信号稳定率达 96.3%，重传率控制在 3.7% 以内；
- 一次粉尘超标事件被系统提前 15 分钟预警，管理人员及时调整洒水作业节奏，避免处罚；

- 系统上线后的两周内，共累计上报数据 24.7 万条，系统无离线故障记录。

4.2 场景二：高空钢结构装配作业部署

此案例为某省重点产业园项目，其施工主结构采用多层钢梁拼装形式，安装作业高度为 12 - 32 米不等。部署关注点为：高空结构倾斜监测、施工平台震动识别与作业噪声实时管控。

部署方案如下：

- 每两层楼面设置 1 组三轴加速度传感器 + 噪声检测节点；
- 所有高空节点均采用磁吸底座加不锈钢绑带固定，支持临时转移；
- 网关设于塔吊主架顶部，由施工升降平台每日定时巡检供电状态；
- 使用平台蓝图布点系统进行部署模拟，并使用 AR 眼镜辅助校准节点方向。

运行评估数据：

- 系统平均事件响应时间为 12 秒；
- 每日施工峰值期间，节点在线率保持在 97% 以上；
- 数据完整性指标显示，7 日内感知数据丢失率 < 1.2%；
- 一次操作平台振幅异常被系统识别并提示暂停作业，经复核为支撑件轻微松动，避免安全事故。

4.3 部署效果综合分析

两个典型工地案例显示：

- 系统布设效率高、调试流程清晰、可维护性好，适合动态施工节奏；
- LoRa 中继机制与边缘节点策略显著提高了通信稳定性与覆盖能力；
- 平台的远程可视化能力与预警机制得到了现场施工单位的积极评价；
- 在恶劣施工环境（粉尘、水汽、振动）下，节点硬件未出现明显损坏或功能退化。

五、系统运行效果评估与优化路径

在上一章典型工地案例中，本系统在不同类型的复杂施工环境下均实现了稳定部署与持续运行。为进一步量化评估系统性能，并为后续版本迭代提供方向，本章从运行指标、用户体验和系统优化三方面展开总结与建议。

5.1 运行效果评估指标体系

系统的运行效果主要通过以下核心指标进行量化评估：

- 节点在线率：反映系统运行稳定性。在两个案例中，整体在线率分别为 96.3% 与 97.2%，表明通信

架构对复杂遮挡环境具有良好适应能力；

- 数据完整率：通过数据包序列编号与时间戳回溯计算。统计显示，在连续 7 天内，数据传输丢失率控制在 1.2% 以内；

- 事件响应时间：包括数据采集→边缘识别→平台上报→用户告警的时间延迟，平均为 12 - 15 秒，符合施工安全预警的响应需求；

- 节点维护周期：采用太阳能供电节点在连续阴雨天气下可维持 5 - 7 天运行，使用低功耗策略节点平均更换电池周期为 15 - 18 天。

上述结果说明，系统不仅具备部署灵活性与通信可靠性，更在能源管理与数据质量控制方面展现出良好的工程性能。

5.2 用户体验与反馈调研

在两个项目中，我们共回收了 27 份来自项目经理、施工安全负责人、工程技术人员的问卷反馈。主要观点总结如下：

- 感知覆盖全面：多数用户认为系统部署后，现场环境变化“看得见”“能预警”，对施工组织起到辅助作用；

- 布置简便：模块化结构与 AR 布点系统大大减少了传统传感器部署时间；

- 数据易理解：平台图形化界面友好，告警提示明确，现场工人易于接受；

- 不足之处：部分用户指出在地下通风不畅处，节点信号仍存在偶发中断现象；平台端权限设置略显粗放，难以进行精细化多角色管理。

反馈结果表明系统在实用性方面已具备良好基础，仍可在细节体验与网络边缘场景上进一步提升。

5.3 优化建议与未来迭代方向

针对评估结果与用户反馈，系统下一阶段优化路径可从以下三个维度展开：

- (1) 智能分析模块拓展：引入边缘 AI 推理功能，实现噪声源识别、机械振动特征分析等功能，减少上行冗余数据压力，提高事件识别准确性；

- (2) 平台功能精细化：优化权限分级系统，支持安全员、技术员、监理等多角色协同管理，增强数据追溯与操作透明度；

- (3) BIM 与施工系统对接：将感知数据与建筑信息模型 (BIM) 集成，实现实时环境数据与建筑施工进度的联动分析，提升调度效率与异常预警智能化水平。

此外，考虑到国家对建筑行业碳排放监测与能耗监管的政策导向，未来版本中可加入碳排估算模块与能耗感知接口，拓展系统在绿色施工管理中的应用边

界。

六、结语

随着智慧建造理念的深入推进，施工现场的数字化感知需求日益增长，传统静态、低频、集中式的环境监测方式已难以满足现代工程对实时性、可靠性与灵活性的要求。本文立足于《工程环境监测系统 V1.0》的原始成果，针对施工场景的复杂性与动态性特征，系统性提出了一套面向高干扰、高遮挡、多源信息环境的物联网感知系统设计方案。

通过构建分层化系统架构、采用低功耗通信协议、多跳中继策略与模块化节点设计，本系统在地下基坑、高空装配等典型复杂工地中实现了高稳定性部署。评估结果表明，系统具备良好的节点在线率、数据完整性与事件响应能力，部署便捷性与用户操作体验亦得到施工单位的积极认可。尤其在信号弱区与能耗限制场景下的自适应表现，为物联网系统在“非标准工业场域”的应用提供了可推广经验。

面向未来，本文所构建的环境感知系统可在以下方向持续演进：一是与边缘 AI 推理技术结合，推动从“被动感知”向“主动识别”的智能转型；二是加强与 BIM、施工管理平台的系统对接，实现数据流、管理流与现场执行流的实时联动；三是适应碳排放监测、能耗优化等新政策需求，拓展系统在绿色建造与数字监管方面的功能边界。

综上所述，本研究不仅为物联网环境监测系统在复杂施工现场的部署提供了理论支撑与工程路径，也为推动建筑行业数智化感知体系建设提供了实证基础与技术参考。参考文献

[1] Sepanosian, T., Küpers, X., Joza, P., Massah, F., & Bemthuis, R. (2024). An IoT-Based Architecture for Real-Time Emission Monitoring at Construction Sites[C]// Proceedings of the 2024 26th International Conference on Business Informatics (CBI): 139 - 148.

[2] Meng, Q., & Zhu, S. (2020). Developing IoT Sensing System for Construction-Induced Vibration Monitoring and Impact Assessment[J]. Sensors, 20(21): 6120.

[3] Nguyen, H. A. D., Nguyen, L., & Ha, Q. P. (2020). IoT-enabled Dependable Co-located Low-cost Sensing for Construction Site Monitoring[C]// Proceedings of ISARC 2020.

[4] Xu, S., Li, X., Liu, Q., Dong, H., Xu, X., Yan, L., & Zhang, Y. (2024). Intelligent

Monitoring System for Environmental Protection during the Construction Period of Pumped Storage Power Station[J]. Cluster Computing, 28: 100.

[5] Teizer, J., Wolf, M., Golovina, O., Perschewski, M., Neges, M., & König, M. (2017). Internet of Things (IoT) for Integrating

Environmental and Localization Data in Building Information Modeling (BIM) [C]// Proceedings of ISARC 2017: 603 - 609.

现代工程科学

MODERN ENGINEERING SCIENCE



2897-3604

香港星源出版社
STAR SOURCE PUBLISHING