

# 智能传感与物联网技术 在地震监测中的应用研究

邱淑

(成武县防震减灾中心, 山东 菏泽 274200)

**摘要** 针对地震突发性、强非平稳的显著特征, 本文提出面向校园建筑群、水库大坝及城市轨道区段的智能传感与物联网协同监测方案, 构建高灵敏感知、异构回传、在线分析的完整监测闭环。该系统以高动态 MEMS 和 24 位模数转换为核心模块, 融合 GNSS 与 PTP 毫秒级授时、节点侧信号处理技术, 依托 LTE 等多网络组网实现灵活部署与拓展。实验测试表明, 系统时间同步误差仅 0.8 ms, PGA 幅值中位误差为 1.8%; 试点应用中, 监测误报率从 3.9% 降至 1.2%, 事件召回率提升至 97%, 监测性能显著优化。

**关键词** 智能传感; 物联网; 地震监测; 边缘计算; 早期预警

中图分类号: TP2; P315.6

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.12.008

## 0 引言

传统强震仪加有线回传模式在站点建设周期、网络韧性与跨场景适配方面存在不足, 尤其难以兼顾低功耗长距覆盖与高频数据上行。基于此, 本文面向校园建筑群、水库大坝与城市轨道交通等差异化场景, 构建智能传感与物联网协同方案, 围绕高动态三向加速度感知、毫秒级时钟对齐、节点侧稳健预处理与消息队列化回传等关键环节展开系统设计, 并以流式引擎与多站关联支撑早期预警与结构响应分析。通过实验评估与多场景连续运行对照, 量化验证方案在误触发控制、响应时延、到时稳定性、数据连续性与运维成本上的综合效益, 为地震监测的工程化部署与规模化应用提供可参考的技术路线与实证依据。

## 1 智能传感与物联网地震监测的技术原理

地震动具有突发且非平稳特征, 监测系统一般依托智能传感和物联网结构组织感知、传输与分析链路。节点以力平衡或高动态 MEMS 加速度计采集三向加速度信号, 根据 24 bit 模数转换与温度补偿削弱低频漂移, 让量程覆盖微震至强震区间, 同时引入高采样 GNSS 或光纤光栅记录结构位移<sup>[1]</sup>。

采集端由微控制器或嵌入式 Linux 节点承担时间同步与触发识别任务, 借助 GNSS 授时或 PTP 精密时钟保持毫秒级时间一致, 并在本地开展去趋势、带通滤波与 STA/LTA 触发计算, 提取 PGA、PGV 等特征以减少

回传数据量。传输环节结合部署环境组织异构网络, 平台侧再对震相到时进行初步判读。

## 2 智能传感与物联网地震监测系统的构建

### 2.1 地震监测智能传感节点的硬件设计

地震监测节点设计通常根据低功耗与工程可靠展开, 整体结构见图 1。对于校园建筑群与坝体等固定站点, 控制单元一般用具备 DSP 指令和多级休眠能力的 32 位微控制器承担时序管理和边缘特征计算, 并配置硬件看门狗与掉电数据保持功能<sup>[2]</sup>。

感知层用三向高动态 MEMS 加速度计采集地震动信号, 依据 24 bit 增量型模数转换与低噪声前端电路削弱低频漂移, 让量程覆盖弱震至强震区间; 部分关键站点预留力平衡传感器差分接口, 在成本与精度之间保持灵活配置。时间同步环节借助 GNSS 模块输出秒脉冲校准本地晶振, 在信号受阻情形下仍能维持小时级稳定度。通信部分结合 LTE Cat1、NB-IoT 与 LoRaWAN 构建异构链路, 并在主控端组织 MQTT 消息回传。电源系统接入太阳能与市电双通道, 外壳用 IP66 防护结构适应户外环境。

### 2.2 物联网地震数据传输网络的搭建

由于校园建筑群、峡谷水库与城市轨道区段的差异化通信环境, 传输网络搭建采取分层异构架构, 将低功耗广域与蜂窝回传进行耦合。LoRaWAN 作为低功耗长距组网方案, 运用星状接入和网关汇聚, 由节点在

作者简介: 邱淑 (1995-), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 电子信息。

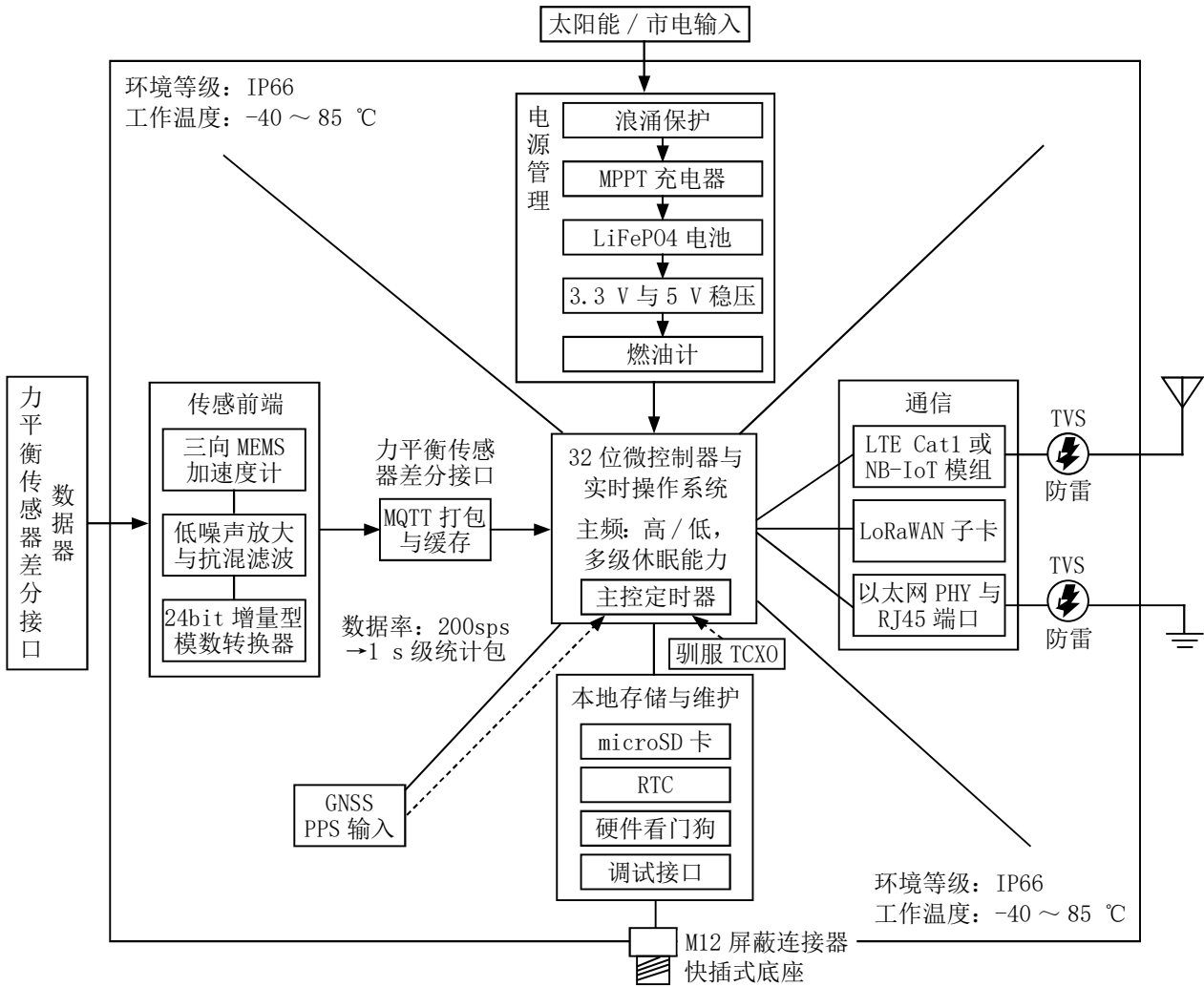


图 1 智能传感节点硬件架构图

本地完成去趋势与触发后，将带有 UTC 时间戳的特征包与事件窗以低占空比上行至楼顶或山脊网关，网关再以以太网或 LTE 将流量汇入平台消息队列。NB-IoT 作为运营商承载的蜂窝物联网通道，由节点直连核心网并接入 MQTT 队列，适用于坝体、山谷与地面覆盖稳定的城区稀疏站<sup>[3]</sup>。

传输流程运用心跳、特征、事件三层负载策略，常态发送秒级健康与噪声指标，触发期提升采样并打包短时窗，空闲期仅保留心跳，以将链路占用压低到可控水平。从部署角度来看，在某地 3 所校园屋顶配置 2 台多通道 LoRa 网关叠加覆盖，将教学楼与体育馆下方节点纳入单跳上行；在某水库坝肩设置 NB-IoT 节点群，并且加装 5 dBi 天线以穿越峡谷遮挡，必要时在山脊增设一体化 LoRa-LTE 中继。需重点关注的是，节点侧维护序列号与窗口重传并启用断点续传，平台

侧进行时序校核与去重合并，借此将链路波动对连续波形和到时判读的影响控制在工程可接受范围，同时开放远程参数下发与分片 OTA，使网络在不中断监测的条件下进行配置与固件更新，链路加密与访问控制在网关与平台侧同步启用。

### 2.3 地震监测数据的预处理算法设计

立足于校园楼宇、峡谷水库与轨道区段噪声机理差异，将预处理链路构建为时间对齐—去趋势—滤波—异常抑制—稳健特征估计的阶段流程。节点侧在 GNSS 或 PTP 校时后，将不规则到达的样本对齐到统一采样频率，对插值长度小于 2 点的间隙进行线性补齐，对超阈值断裂直接打标缺测以避免伪波形外推。从设备误差抑制角度来看，为削弱 24 bit 模数转换的零点漂移与温度缓变影响，在 3 ~ 10 s 滑动窗内进行中位数去直流并施加一阶线性去趋势，让低频缓变项被压低

到触发判据以下,同时把时域统计特性保持在与后续特征估计一致的尺度上。

$$y[n]=\alpha(y[n-1]+x[n]-x[n-1]) \quad (1)$$

式(1)中, $x[n]$ 表示去趋势后的输入序列, $y[n]$ 表示高通后的输出序列, $\alpha$ 为一阶高通系数, $f_c$ 为高通截止频率, $f_s$ 为采样频率; $\alpha$ 取值按 $\exp(-2\pi f_c/f_s)$ 计算以获得稳定的单极点实现。

从场景适配性出发,上式作为一阶高通环节被部署在边缘节点中,用来抑制微重力偏置与传感器低频漂移;在结构响应关注带宽位于 $0.1 \sim 40$  Hz的校园建筑群,设置为 $0.1$  Hz,在坝体缓滑监测中,下调至 $0.05$  Hz以保留超低频慢变信息<sup>[4]</sup>。要重点关注电磁环境复杂的配电间与区间隧道更易出现的短脉冲毛刺,在高通输出后叠加3点中值滤波以压制孤立尖峰,并将Hampel判别嵌入31样本滑动窗内,采用中位-MAD的稳健统计阈值对离群样本进行替换,同时记录质量标识位,保证后续谱与能量估计不受污染。

异常识别还覆盖饱和与卡死两类故障:一方面运用幅值导数的固定阈值监测来识别突变跃迁;另一方面以恒值时长判别来发现长时间无变化的通道。二者均采用区段掩蔽而非全段丢弃,从而保留震相到时信息。计数值与物理量之间的换算按标定灵敏度执行,并在强震段采用分段不漂移积分法来获取PGV的稳健估计,避免低频误差累积。预处理产物、短窗能量以及PGA/PGV计算结果保持同一时间轴输出,为平台侧的多站触发关联与烈度场推断提供一致、低复杂度且工程可部署的数据基础。

### 3 智能传感与物联网地震监测系统的应用效果分析

#### 3.1 实验性能测试

面向校园建筑群、水库坝体与轨道区段的部署条件,实验在振动台环境中对监测节点的时延、幅值精度和运行稳定性开展评估。测试平台由六自由度振动台、GNSS与PTP授时源、温控箱及网络仿真设备构成,节点采样、触发识别和MQTT上行保持连续运行;硬件时标记录激励注入时刻,并和平台入库时间进行对齐计算,以获得端到端延迟结果。测试显示,在LTE、NB-IoT以及LoRaWAN叠加LTE回传条件下,端到端延迟维持在百毫秒量级;振动台扫频覆盖 $0.2 \sim 25$  Hz与 $0.01 \sim 0.4$  g区间时,节点输出与标准加速度计对比后,PGA与PGV幅值误差保持在较低水平。温控箱在 $-10 \sim 45$  °C连续运行72 h,节点时钟漂移与丢包率保持稳定。

#### 3.2 试点场景的监测效果验证

以成都高新南区3所校园楼宇群、贵州黔北水库坝肩以及成都市区轨道交通区段的连续运行作为试点,

研究将智能传感与物联网协同方案与既有强震仪加有线以太网回传方案进行对照评估,围绕误触发控制、响应时延以及定位可靠性展开。

对照设计将相同节点密度与相同阈值配置作为前提,采用台阵内共模地震与近场施工扰动两类事件作为比较对象,并将平台入库时间与毫秒级授时时标对齐到一条时间轴上。观察发现,在校园屋顶到教学楼层的传播路径中,边缘去趋势与一阶高通加稳健异常抑制使环境电磁扰动触发概率维持在低水平,轨道区段的电机电流耦合干扰被有效抑制,坝肩场景在阴影覆盖导致的链路摆动条件下仍然维持事件窗完整回传<sup>[5]</sup>。

此外,多站触发关联在三类场景下均将单站误判削弱为台阵一致性判定,配合断点续传与序列窗口重传将数据缺口压缩到分钟量级以下,使早期预警的起报时刻和结构响应的峰值参数提取同步稳定下来。误报率与平均响应时间的下降与到时误差的收敛在三类试点中保持一致性,事件召回与数据连续性的增益表明该系统在复杂传播与异构链路条件下具备更强的工程适配能力,同时维保指标的收敛体现了远程参数下发与模块化电源管理对日常运维负担的缓解。

### 4 结束语

根据地震监测协同需求,研究依托智能传感和物联网架构组织感知、传输与分析链路。节点侧结合高动态MEMS采集、24位数据转换与温度补偿,并引入GNSS与PTP授时保持毫秒级时间一致,同时嵌入去趋势处理、一阶高通与Hampel抑制算法;通信环节结合蜂窝网络与低功耗广域网完成MQTT流式回传,让采集、传输与预警在统一时基下连续衔接。实验与试点运行表明,系统在时间同步、端到端延迟与幅值误差控制方面保持稳定,误报率与数据缺失明显减少,后续将结合多源传感与协同组网,对复杂环境中的监测稳定性开展进一步优化。

### 参考文献:

- [1] 张健.大坝强震监测技术与预警方法研究[D].林芝:西藏农牧学院,2025.
- [2] 文天宇.地下综合管廊性态智能监测与评估研究[D].南京:东南大学,2024.
- [3] 杨士科.物联网框架下的建筑结构健康监测系统设计[D].郑州:华北水利水电大学,2023.
- [4] 张芙蓉.分布式结构地震响应监测系统设计[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2023.
- [5] 倪泰山,张惠菊,张增旺,等.基于态势感知及物联网技术的地震台站运维管理系统设计[J].地震地磁观测与研究,2022,43(05):213-219.