

物联网架构下智慧水务衡器仪表远程监测与自动化运维系统

□陈石

上海自仪院智能化系统有限公司

【摘要】本文提出一种基于物联网的自适应智慧水务称重衡器远程监测与自动化运维系统。系统以污水处理厂药剂投加失重秤和化学品储罐秤为主要监测对象，采用“感知—网络—边缘—云—应用”五层架构。感知层采用高精度称重传感器阵列并实现多传感器数据融合与低功耗采集，网络层结合5G/LoRa混合协议并嵌入区块链哈希保障数据安全，边缘层实现Kalman滤波平滑与孤立森林异常检测，云平台集成改进Q-learning强化学习驱动预测性维护，形成“感知—分析—决策—执行”闭环自愈机制。仿真实验结果表明，Kalman滤波使称重信号RMSE降低83%，异常检测F1分数达0.94，强化学习代理在150轮左右收敛至近优策略，系统显著提升了药剂投加精度和运维效能。

【关键词】衡器仪表；物联网；远程监测；强化学习；自动化运维

文献标识码：A

文章编号：1003-1870（2026）06-0018-07

Remote Monitoring and Automated Operation and Maintenance System for Smart Water Weighing Instruments under IoT Architecture

【Abstract】 This paper proposes an adaptive remote monitoring and automated operation and maintenance system for smart water weighing instruments based on the Internet of Things (IoT). Taking the loss-in-weight scales for chemical dosing and chemical storage tank scales in sewage treatment plants as the primary monitoring objects, the system adopts a five-layer architecture consisting of perception, network, edge, cloud, and application. At the perception layer, a high-precision weighing sensor array is adopted to enable multi-sensor data fusion and low-power data acquisition; the network layer employs a hybrid 5G/LoRa protocol and embeds blockchain hashes to ensure data security; at the edge layer, Kalman filtering is implemented for data smoothing, along with isolation forest for anomaly detection; the cloud platform integrates an improved Q-learning based reinforcement learning agent to drive predictive maintenance, thereby forming a closed-loop self-healing mechanism encompassing "perception - analysis - decision-making - execution". Simulation results show that Kalman filtering reduces the RMSE of weighing signals by 83%, the F1-score of anomaly detection reaches 0.94, and the reinforcement learning agent converges to a near-optimal strategy in approximately 150 rounds, significantly improving dosing accuracy and operation and maintenance efficiency.

【Keywords】 weighing indicator; Internet of Things (IoT); remote monitoring; reinforcement learning; automated operation and maintenance

引言

水资源短缺与城市化进程加速，促使全球供水与污水处理管理向数字化、精细化方向加速演进。

称重衡器（包括药剂投加失重秤、化学品罐秤、污泥料斗秤等）是智慧水务系统中物料计量与精准投加的核心节点，其运行状态直接影响药剂投加精度、

出水水质达标率以及运行成本^[1]。例如，在污水处理过程中，PAC、PAM等絮凝剂的投加量需通过失重秤实时精确控制，任何称重漂移或故障都可能导致投加过量/不足，进而影响处理效果并造成药剂浪费。然而，现阶段水务称重衡器运维仍高度依赖人工巡检与定期标定，存在信息孤岛、故障响应滞后等问题。随着窄带物联网（NB-IoT）与低功耗广域网（LoRa）等无线技术的成熟^[2]，远程数据采集的工程可行性已大幅提升，但现有方案多止步于被动数据汇聚，尚未形成“感知—分析—决策—执行”完整闭环。

1 文献综述

从全球范围的研究成果看，物联网（IoT）感知技术与大数据分析方法的持续发展，为城市供水系统漏损监测提供了新的技术路径。近年来，多数的研究内容都是通过在管网中布设分布式传感设备，实时采集运行数据，并利用数据驱动模型对系统状态进行分析，从而实现对管网运行状况的持续监测与调度优化。这类方法在提升供水系统运行效率以及降低水资源浪费方面显示出一定应用价值^[3]。其中，IoT技术在雨水调蓄与排水系统管理中的应用尤为广泛，通过对降雨径流过程进行动态监测，为排水调度和风险预警提供了数据支撑。

不过，现有研究成果更多集中在系统层面的平

台建设与技术集成，例如监测平台架构设计、数据管理框架以及整体调度机制等。相比之下，对具体监测单元的关注相对有限，特别是作为关键数据采集节点的衡器仪表，其运行可靠性与运维模式在研究中往往被简化处理。实际上，在复杂环境条件下，仪表设备的长期稳定性、故障识别能力以及远程维护机制等都存在诸多的问题。

从技术演进角度看，衡器仪表已经逐渐由传统机械式结构向电子化和智能化方向发展。数字化技术的引入能够在一定程度上提升计量精度并增强设备的抗干扰能力^[4]。然而，在实际应用中，如何进一步实现仪表设备的自动化运维和状态自诊断，目前仍缺乏较为完整的技术方案。此外，随着低功耗广域网络技术（如LoRa）的发展，基于该通信协议的数据传输方案已在多种监测场景中得到应用，并实现了感知层与云平台之间的数据连接^[5]。但这类研究方法在网络环境复杂或拓扑结构发生变化的情况下，在数据安全和网络稳定性方面面临一定挑战。

基于上述问题，本文通过构建一种融合人工智能算法的动态物联网架构，并在监测系统中引入智能分析与自适应机制，以弥补传统静态监测模式在异常识别和响应能力方面的不足。

2 系统架构设计

2.1 整体架构

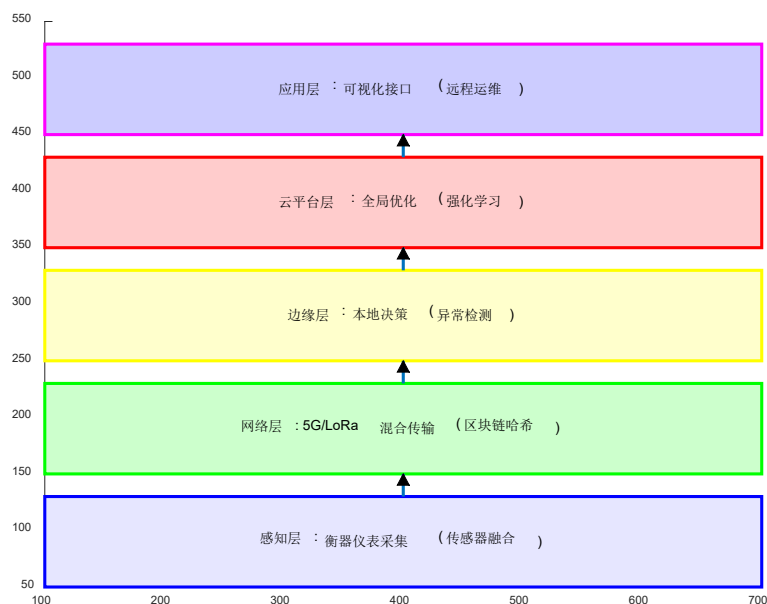


图1 五层图IoT设计架构

本文设计的系统采用如图1所示的五层架构，该系统基于分层式IoT架构设计，由感知层、网络层、边缘层、云平台层以及应用层构成。在功能划分上，五部分结构相互协同，共同完成系统任务。具体分工如下：感知层通过布置的传感器采集数据；网络层负责将收集的数据进行传输；边缘层则是对数据进行处理，处理后的结果直接传递至系统对应的层级；云平台则是进行数据的计算与分析；应用层将分析的结果进行可视化呈现。

本文的主要创新点是在该设计架构中引入了“闭环自愈”的设计方案。主要体现在对衡器仪表输出的称重信号数据进行分析后，结合系统的实时监测结果对动态参数的取值范围进行自适应调整。当系统出现异常状态或故障时，根据故障类别（例如称重漂移、投加异常或传感器故障）自动选择对应的调整策略，通过内部算法机制选择合适的动态输入参数，从而实现系统的自愈运行，保障药剂投加精度与系统稳定性如图2所示。

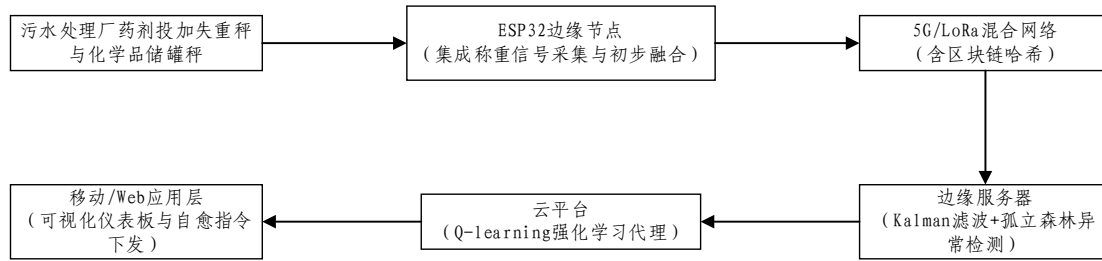


图2 智慧水务称重衡器远程监测与自动化运维系统现场运行拓扑图

2.1.1 感知层设计

感知层采用ESP32 型号的微控制器作为边缘采集与数据融合节点，其与失重秤、罐秤各自的专用称重控制仪表的关系为：原衡器自带的称重控制仪表负责完成高精度称重信号的内部处理（包括AD 转换、滤波、线性化、温度补偿及准确度等级标定），并通过标准通信接口（RS485、4-20mA 或Modbus 等）输出符合计量要求的稳定数字称重信号。ESP32 则通过这些接口接入衡器仪表输出的数字称重信号，实现多路信号的低功耗采集、多传感器数据融合以及初步噪声抑制，再将融合后的数据上传至网络层。

本系统重点监测对象为污水处理厂常用的药剂投加失重秤（属于自动衡器，以单位时间内的物料失重速率即流量指标为主）和化学品储罐秤（属于静态非自动衡器，以累计重量指标为主）。失重秤的量程典型为50~500kg（对应投加流量0.5~200 kg/h，具体依实际工艺需求而定），储罐秤量程典型为1~10t。ESP32 节点重点集成高精度称重传感器阵列的输出信号（电阻应变式或数字式智能称重传感器），同时辅以流量计和压力传感器进行投加效果验证。

各衡器仪表将处理后的稳定数字称重信号通过

通信接口传递至ESP32 控制器。控制器内部针对水务现场潮湿、振动等复杂环境，采用噪声抑制策略对接收到的数据进行初步筛选，再通过加权平均算法实现多传感器数据融合处理，降低数据冗余并进一步提升称重数据的稳定性和可靠性。

（特别说明，本文感知层接入的是衡器仪表输出的数字称重信号，而非衡器内部多个称重传感器的原始模拟量信号。一台完整的称重衡器内部已包含称重传感器阵列、信号调理电路、AD 转换模块及专用控制仪表等环节，只有经过内部处理并符合衡器准确度等级要求的称重数据，才会通过仪表输出接口提供给外部系统。本设计充分利用现有衡器仪表的成熟计量功能，仅在ESP32 层面进行进一步的IoT 适配、多传感器融合与智能处理，从而保证数据的工程可靠性和计量溯源性。）

2.1.2 网络层设计

网络层采用混合通信方案，使用5G 与LoRa 两种通信方式进行协同组网。5G 链路主要用于关键节点的数据上传；LoRa 通信则适用于远距离、低速率的数据传输场景。前者用于满足高带宽数据传输需求，后者则是在工作过程中降低系统整体能耗。在数据安全方面，系统在数据包中加入区块链哈希标

识，用于记录数据摘要信息。一方面是为了对传输数据进行完整性校验，增强系统的可追溯性。另一方面是为了降低数据在传输过程中被篡改的风险，更好地满足分布式环境下的部署需求。

2.1.3 平台层设计

平台层使用的是Kubernetes的容器化部署架构，可以实现多节点的扩展，结合实际工程的需要，对数据容量进行扩充。在数据存储中采用Cassandra分布式数据库，可以实现对时序数据的大规模管理。设置强化学习代理模型，一方面对采取的数据进行学习分析，另一方面结合历史数据对下一阶段的运行结果进行预测，根据预测结果同步生产优化策略，实时为系统调度提供决策支持。

2.1.4 应用层设计

应用层负责在移动端侧为用户提供可视化服务。从平台层输出的数据在应用层中进行WebAssembly渲染，同步构建交互式仪表板框架，展示设备的运行状态和传感器监测数据信息。应用层中还另外加入了AI故障模拟训练模块，该模块可以提前识别系统中存在的潜在风险，并基于风险的判断进行针对性的方案设计。

2.2 关键技术实现

本系统采用了两种关键技术的结合，其一是数据采集技术，针对采集到的数据进行信号转换和滤波；其二是数据监测技术，确保全过程的数据不丢失。

2.2.1 数据采集与传输

传感器采集的原始模拟信号首先在衡器专用称重控制仪表内部完成信号转换，通过其内置ADC模块将模拟信号转化为数字信号，并经过仪表内部的滤波、线性化、温度补偿及准确度等级标定处理，形成符合计量要求的稳定数字称重信号。本系统ESP32边缘采集节点通过标准通信接口（RS485、Modbus RTU或4-20mA转数字等）接入衡器仪表输出的数字称重信号，针对水务现场潮湿、振动等复杂环境，进行进一步的噪声抑制与多传感器数据融合（加权平均算法），再将融合后的数据通过Kalman滤波器进行平滑处理，有效剔除残余噪声干扰后，将处理后的数据输入通信网络。

通信协议采用MQTT协议，主要基于其低成本、

低功耗以及在物联网环境中传输高效的特点。同时，在数据传输链路中加入AES加密机制，并在数据包中嵌入区块链哈希摘要：前者（AES加密）保护数据的隐私性，后者（区块链技术）用于记录数据特征信息，以实现完整性校验。二者结合确保数据在传输过程中的安全性和不可篡改性，满足分布式水务环境下的部署需求。

2.2.2 远程监测机制

从采集数据到推送至移动终端，这一全过程的数据远程监测系统，可以实现毫秒级的数据更新频率，该过程通过WebSocket建立连接。同时为了降低系统的计算负担，部分分析指令会在边缘节点执行，在节点中进行分析的数据采用随机森林算法，使用决策树对各种类型数据的特征进行分析，分为正常状态与异常状态两类，正常数据可很好地识别出高维特征的数据，而异常状态数据则不参与后续的数据分析，确保全过程不引入异常信息。

2.3 自动化运维算法

自动化运维功能通过Q-learning强化学习模型实现，如上文所示，该功能是通过历史数据的学习进行下一阶段状态的预测，预测结果将作为智能体系统的阈值触发机制，根据机制是否启动，决定其选择运维策略的依据，实现智能体系统的自动化决策，具体过程如下：

智能体系统首先读取当前的数据信息，该信息包括系统的实际状态，智能体的运行指标以及传感器反馈数据。随后通过设定好的Q值函数，对不同的动作机制进行数据评估，得到各个运维状态下的价值参数，选取其中最高的参数进行执行。执行后的系统状态将生产对应的奖励函数并作为反馈项更新Q值函数的取值，逐步优化系统的运维策略。

具体算法如下：参数 S 表示状态空间，包括水流量 f 、压力 p 、传感器噪声水平 n 和仪表健康指数 h （ $h \in [0, 1]$ ，1表示完美状态）； A 为动作空间，如校准、隔离或无操作；定义奖励函数 $r(s, a, s')$ 为系统稳定性提升的量化值，取值公式如下式所示：

$$r = -||f - f_{target}|| + \Delta h$$

参数 f_{target} 表示目标流量， Δh 表示健康指数改善；折扣因 $\gamma = 0.95$ ；学习率 $\alpha = 0.1$ ，该参数用于控制更新步长。

Q 值更新公式如下：

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha [r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)]$$

状态 s 捕捉实时系统动态，动作 a 直接决定运维操作，奖励 r 激励高效修复，而 γ 和 α 调节算法的收敛速度和稳定性。

3 系统实施与实验

3.1 硬件原型构建

为验证上述方法的可行性，本文以污水处理厂常用的药剂投加失重秤为研究对象，以物料重量变化（模拟投加过程）为状态参数，通过随机波动和噪声干扰（模拟现场振动、温度漂移等）生成输入信

号，观察系统的输出波形来验证方法的有效性。

在实际企业应用中，使用Python 语言开发后台服务器，数据分析功能采用Flask 框架实现，强化学习模型的应用采用PyTorch 深度学习库完成。

3.2 实验效果

实验初始条件设定为平均投加重量目标值（例如对应100 L/min 药剂流量下的重量变化速率），系统噪声干扰采用高斯噪声的形式，以波动范围为10% 标称值作为外部干扰（模拟水务现场振动与环境干扰）。强化学习环节设置学习频率为1000 轮次。

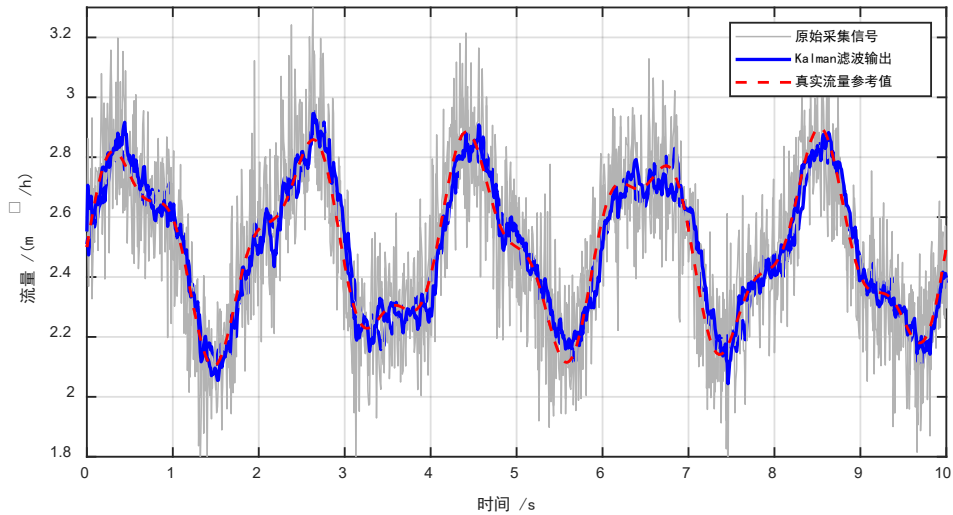


图3 失重秤仪表输出的称重信号与Kalman滤波后信号对比

如图3 所示，未使用Kalman 滤波器时，失重秤仪表输出的数字称重信号（已包含仪表内部基本处理）波动较为明显，明显超出真实参考值的范围。经过本系统ESP32 边缘节点实现的Kalman 滤波后，二者曲线基本重合，波动范围明显降低。前者的RMSE 参数为0.183 kg（或t，根据量程），后者的RMSE 参数为0.031 kg（或t）。

“本文所述Kalman 滤波的输入信号为失重秤仪表通过标准通信接口输出的数字称重信号，而非衡器内部称重传感器的原始模拟信号。失重专用称重控制仪表已完成内部ADC 转换与基本信号处理。衡器仪表内部已完成原始传感器信号的ADC 转换、初步滤波与标定处理，形成符合计量准确度要求的稳

定数字称重信号。本系统ESP32 边缘节点通过标准工业通信接口（RS485、Modbus RTU、4–20mA 转数字、以太网或现场总线等）接入失重秤仪表输出的数字称重信号，针对水务现场潮湿、振动等复杂环境进行进一步噪声抑制与多传感器数据融合，再将融合后的数据通过Kalman 滤波器进行平滑处理，有效剔除残余噪声干扰后输入通信网络。

通信协议采用MQTT 协议，主要基于其低成本、低功耗，以及在物联网环境中传输高效的特点。同时，在数据传输链路中加入AES 加密机制，并在数据包中嵌入区块链哈希摘要，确保数据安全性和完整性。

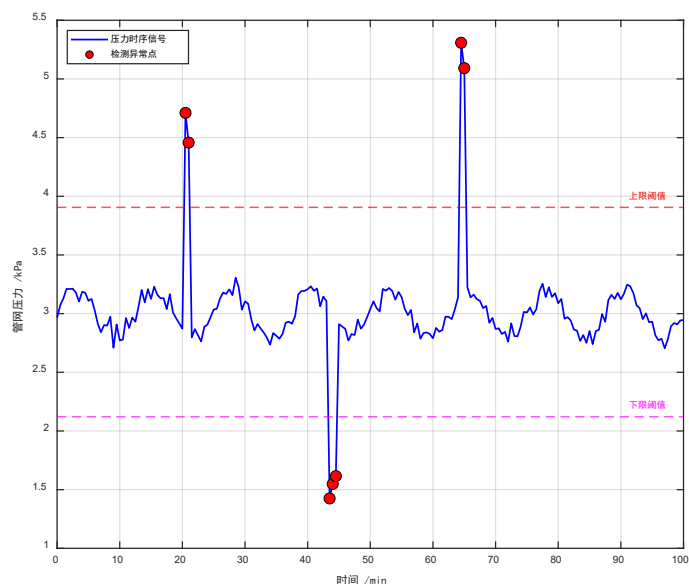


图4 称重衡器异常检测结果——时序曲线与异常点标注

我们手动标定了7处异常状态位置（如突然重量骤降表示可能的泄漏或堵塞，缓慢漂移表示传感器故障），图4显示该算法可准确识别7个异常点，且相

邻之间的点位置也可以准确识别。通过测试，F1分数达到0.94，且测试中没有出现误识别的情况，证明该设计的有效性。

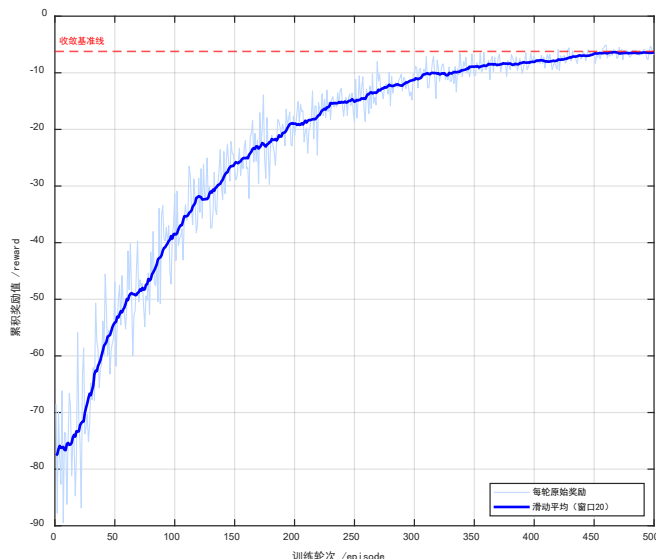


图5 Q-learning强化学习运维策略累积奖励收敛曲线

从图5所示的累积奖励变化情况可以看出，在训练约150轮后，奖励值开始趋于稳定，最终收敛至约-4.8附近。结合每轮约30 s的更新周期，此收敛速度可满足在线学习的实时性需求。结果表明，强化学习代理能够优化称重衡器的预测性维护策略，例

如提前触发自动校准或隔离故障秤，提升投加精度和系统稳定性。

4 结语

本文围绕智慧水务中称重衡器（尤其是药剂投加失重秤和罐秤）的监测与运维需求，设计并实现

了一套基于物联网架构的远程监测与自动化运维系统。通过分层架构设计,并结合强化学习算法,系统形成了从称重数据采集、状态监测到预测性维护的闭环运行模式。实验结果表明,该系统能够在复杂潮湿振动环境下实现稳定的称重数据采集与异常识别,为水务称重衡器的智能化运维提供了可行的技术方案,有效降低了对人工巡检的依赖,提升了药剂投加精度同时改善了整体运行经济性。

参考文献

- [1] 吴凤先,徐球,诸卫卫等.一体化智能泵站的设计及应用[J].黄河水利职业技术大学学报,2025,37(2):35-39.
- [2] 陆仲达,梁春旭,徐凤霞.基于远距离无线电

和窄带物联网的杆塔姿态监测系统[J].科学技术与工程,2023,23(12):5118-5128.

- [3] 胡江,李星,朱清帅等.国家水网背景下调水工程运行风险评估技术研究进展[J].水科学进展,2025,36(6):1042-105.

[4] 张朋杰,庞治国,路京选,等.GNSS-R 水位监测研究进展与其在我国水利行业应用展望[J].全球定位系统,2024,49(1):34-44.

- [5] 吴章浩,孙玉国.基于LoRa 的水质监测系统设
- 计[J].软件工程与应用,2022,11(1):109-118.

作者简介

陈石(1991—),男,汉族,湖北随州,中级工程师。研究方向:智慧水务。