

## 供排水企业运行及管理成果专栏

胡玲, 乔庆, 章旻, 等. Jetson 边缘计算在泵房智能监测与预警系统中的应用[J]. 净水技术, 2025, 44(6): 188-195.

HU L, QIAO Q, ZHANG M, et al. Application of Jetson edge computing in intelligent monitoring and early warning system of pumping station[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(6): 188-195.

## Jetson 边缘计算在泵房智能监测与预警系统中的应用

胡玲<sup>1</sup>, 乔庆<sup>2,\*</sup>, 章旻<sup>1</sup>, 邓慧萍<sup>2</sup>, 宁梦佳<sup>1</sup>, 史俊<sup>2</sup>

(1. 上海城投水务<集团>有限公司供水分公司, 上海 200002; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要** 【目的】 文章针对城市化进程中高层建筑二次供水系统面临的泵房环境复杂、维护成本高、智能化不足等挑战, 开发了一套基于边缘计算平台的智能监测系统。【方法】 该系统通过高性能计算平台搭载先进的目标检测算法, 实现对泵房环境的全方位实时监控, 能够高效识别异常闯入、漏水和堆物等多种风险事件。硬件设计采用工业级防护结构, 具备良好的环境适应性和通信稳定性; 软件采用模块化架构, 各功能模块协同工作, 并配备自动恢复机制确保系统可靠运行。【结果】 测试结果表明, 系统在恶劣工况下仍能保持稳定性能, 检测响应迅速, 在实际应用场景中展现出优异的异常事件识别能力。相较于传统监测方案, 该系统显著提升了监控覆盖范围和运维效率, 同时大幅降低了实施成本。【结论】 研究证实, 该方案通过边缘计算与人工智能技术的有机结合, 有效解决了泵房无人值守监测的关键技术难题, 具有实时性好、适应性强、性价比高等突出优势, 不仅为智慧水务建设提供了创新解决方案, 其技术架构和实施经验也为相关领域的智能化升级提供了有益参考, 对推动城市基础设施数字化转型具有重要实践价值。

**关键词** 二次供水泵房 目标检测 无人值守 监测系统 物联网

**中图分类号:** TU991 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)06-0188-08

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.06.023

## Application of Jetson Edge Computing in Intelligent Monitoring and Early Warning System of Pumping Station

HU Ling<sup>1</sup>, QIAO Qing<sup>2,\*</sup>, ZHANG Min<sup>1</sup>, DENG Huiping<sup>2</sup>, NING Mengjia<sup>1</sup>, SHI Jun<sup>2</sup>

(1. Water Supply Branch Company, Shanghai Chengtong Water Group Co., Ltd., Shanghai 200002, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** [Objective] This paper addresses the challenges of complex environmental conditions, high maintenance costs, and insufficient intelligence in secondary water supply pump rooms for high-rise buildings during urbanization by developing an intelligent monitoring system based on an edge computing platform. [Methods] The system integrated advanced object detection algorithms on a high-performance computing platform to achieve comprehensive real-time monitoring of pump room environments, enabling efficient identification of multiple risk events, including unauthorized intrusion, water leakage, and material stacking. The hardware adopted an industrial-grade ruggedized enclosure design, ensuring robust environmental adaptability and communication stability, while the software employed a modular architecture with coordinated functional modules and an automatic recovery mechanism to maintain system reliability. [Results] Test result demonstrated that the system maintains stable performance under harsh operating conditions, exhibited rapid detection response times, and achieved superior accuracy in anomaly recognition during practical deployments. Compared to conventional monitoring solutions, the system significantly enhanced monitoring coverage and operational efficiency while

[收稿日期] 2024-03-25

[基金项目] 上海城投科研项目: 基于声像识别的二次供水泵房智能运维研究(KY.GS.23.005)

[作者简介] 胡玲(1982—), 女, 正高级工程师, 主要从事城镇供水管网运行维护管理及数字化建设等工作。

[通信作者] 乔庆(1984—), 男, 高级工程师, 研究方向为城镇供水系统运行维护管理技术, E-mail: 139185615202163.com。

reducing implementation costs, without requiring structural modifications to existing infrastructure. [ **Conclusion** ] The integration of edge computing and artificial intelligence technologies effectively resolves critical technical challenges in unmanned pump room monitoring, offering distinct advantages in real-time responsiveness, environmental adaptability, and cost-effectiveness. This solution not only provides an innovative framework for smart water management but also serves as a valuable reference for intelligent upgrades in related industrial domains, driving the digital transformation of urban infrastructure with substantial practical implications.

**Keywords** secondary water supply pumping station target detection unattended operation monitoring system internet of things

随着我国城镇化率的稳步提升,城市高层建筑数量的增加以及人口密度的上升,市政供水系统面临着前所未有的挑战。二次供水系统作为保障居民用水安全的关键环节,其高效和安全的运行显得尤为重要<sup>[1-3]</sup>。然而,供水泵房在建设和管理上面临着多头管理、技术人员短缺、责任落实不到位以及监管条件有限等多重挑战,导致安全隐患和维护成本的增加<sup>[4-5]</sup>。

在这样的背景下,国家政策的推动和“新基建”战略的实施,为供水系统的数字化转型和智能化升级提供了新的机遇。新技术如大数据、5G/4G、云计算和物联网的应用,正在逐步改变传统的供水系统运维模式<sup>[6-7]</sup>。例如,边缘计算技术的应用在智能视频水位在线测量方面取得了显著进展,通过人工智能(AI)图像识别技术优化了水位的自动定位和识别<sup>[8-9]</sup>。此外,智慧水务平台的建设也在社会得到了有效应用,通过节水节能措施的实施,提高了水资源的利用效率和用水安全<sup>[10]</sup>。

在工业领域,边缘计算与机器视觉的结合正在推动自动化向智能化转型,提高了工业视觉识别系统的精确程度和效率<sup>[11]</sup>。这种技术的应用不仅局限于图像的摄取,还包括对信息的处理和判断,从而实现人眼视觉的延伸。在供水系统中,这种技术的应用可以提高对泵房设备状态的监测精度,降低运维成本,提升系统的响应速度和安全性。

同时,智慧水务在高校建筑二次供水的应用研究<sup>[2]</sup>也表明,通过构建智慧水务平台,可以有效实现节水节能目标,节约日常运营成本,确保后勤服务管理到位。此外,对于老旧小区二次供水改造工程方案的优选研究<sup>[3]</sup>,也显示出了建立评价模型的可行性和有效性,为二次供水改造工程提供了科学管理和决策支持。

综上所述,当前的研究和实践表明,智慧水务和智能化技术的应用对于提升二次供水系统的管理水

平、降低运营成本、确保供水安全具有重要意义。本研究旨在进一步探索和优化二次供水系统的智能化运维策略,以期在城市供水系统的可持续发展提供切实可行的解决方案。通过整合现有的研究成果和技术应用,该系统可以更好地应对城市化进程中供水系统的挑战,确保居民的用水安全,同时促进智慧城市的建设。

## 1 边缘智能检测设备

随着计算机处理能力的显著提升,目标检测已成为计算机视觉领域的核心任务,并在工业自动化和日常生活的方方面面发挥着重要作用。得益于芯片技术的突破性发展,现在出现了能够在占用传统单片机同等空间和体积的同时,具备以往只有大型服务器才能达到的计算性能的嵌入式边缘计算平台<sup>[12]</sup>。例如,英特尔的神经计算棒(NCS)和谷歌的Coral平台,作为神经网络加速器和推理加速器,显著提升了AI算法在边缘设备上的运行效率。此外,树莓派、NXP的i.MX系列以及英伟达的Jetson系统等硬件平台,为边缘计算提供了可靠的支持。这些硬件通常体积小、功耗低、计算能力强,非常适合在各种边缘计算环境中部署。

在软件层面,研究人员开发了一系列先进的深度学习和机器学习算法,以提高目标检测的准确性和实时性。这些算法能够有效识别图像和视频中的物体,为多种应用提供关键信息。例如,HOP+SVM、YOLO和SSD等算法在实时目标检测任务中表现出色。为了适应边缘计算设备的性能限制,研究人员还在不断优化这些算法,减少计算复杂度和内存需求,以实现更高效的目标检测。

边缘智能技术已经在智能家居、智慧城市建设、工业互联网等多个领域得到了广泛应用,它通过在数据产生地进行智能处理,提高了数据处理的效率和响应速度,同时降低了对网络带宽的需求,为智能设备的广泛应用奠定了基础。

## 2 无人值守泵房监测系统的设计

### 2.1 系统概述

系统可以有效地代替维护人员对泵房环境进行 24 h 不间断的监测, 确保生产生活用水环境的安全, 减少维护工作的人工成本。在泵房内部会部署一套设备, 设备会代替人工对泵房内部环境进行巡查, 实现信息自动分析与决策, 通过移动物联网信号往上层发送数据, 管理和维护人员会接收到这些信息并及时对泵房做出维修和保养。同时日常数据会保存在网盘或者自建服务器中, 确保数据的安全并实现自动建档。总体框架结构如图 1 所示。

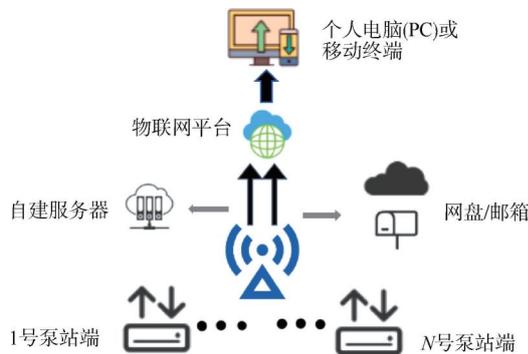


图 1 系统架构

Fig. 1 System Framework

相较于调研范围内现有的泵房监测系统, 本系统在多个方面展现出更优的表现。

(1) 实时性显著提升: 系统能够通过物联网平台实时上传报警信息, 并通过邮件发送给远程监控人员, 同时日常数据记录存储在网盘或自建服务器上, 实现了数据的快速收集和规范化处理。

(2) 智能化水平更高: 系统内部集成了先进的 AI 算法, 能够实时采集泵房现场数据并识别异常闯入目标、漏水、明火以及不合理堆物等威胁泵房运行安全的信息, 实现了对泵房运行状况的自动分析和决策。与以往的监测系统相比, 本系统在采集现场数据后立即进行分析, 然后传输, 从而提高了传输效率和报警的灵敏性。

(3) 扩展性更强: 无需对泵房进行大规模硬件改造, 设备安装简便, 只需使用几个螺丝钉固定并接入普通市电供电。在配置现场, 普通人员只需进行简单的现场参数设置, 系统即可立即投入运行。这使得本系统易于在各种泵房场景中部署和应用, 具有广泛的适用性。

(4) 抗干扰能力更强: 设备具备防尘、防潮等功

能, 软件系统在断网时能够自动重联、开机自启动、异常自动重启, 以及记录重要事件日志, 确保了系统的稳定运行。

### 2.2 系统硬件设计

针对泵房监测的特殊需求以及内部环境的挑战, 如灰尘、潮湿和电磁干扰, 开发了一款垂直边缘计算设备, 如图 2 所示。

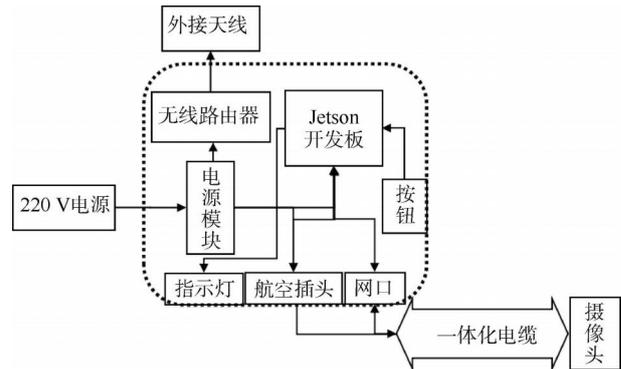


图 2 硬件架构

Fig. 2 Hardware Framework

该设备能够在真实的泵房环境中稳定运行, 安装简便, 易于扩展。主要设计特点如下。

(1) 核心板选用 NVIDIA Jetson 系列嵌入式计算平台, 内置高性能图形处理器 (GPU), 并支持上电自启动, 以部署性能更好的 AI 算法。

(2) 设备体积小巧, 主体置于金属保护壳内, 具有卓越的抗电磁干扰能力和散热性能。接口设计防误插和防脱落, 接口处采用橡胶套保护, 提供一定程度的防尘防水功能。

(3) 简化安装, 采用物联网移动信号通信, 避免长距离管线连接。考虑到地下室信号问题, 选择无线移动 4G 信号路由器, 并配备看门狗功能, 确保通信稳定。

(4) 摄像头支持 onvif 协议, 可配置多个巡航点, 采用一体化电缆连接。对于地下无信号增强器的泵房, 可连接最长为 50 m 的外接信号延长天线。

(5) 内置宽电压电源模块, 220 V 交流市电输入口设有防脱钩和保险丝, 确保供电稳定和用电安全。输出 12 V 恒压直流, 为系统包括摄像头和路由器供电。

### 2.3 系统软件设计

核心板搭载了基于 Linux 的乌班图操作系统, 可以直接配置项目中的 Python 语言环境, 相较于

其他嵌入式设备,可以通过 python 库搭建许多功能所需要的运行环境例如:1)使用 byty 库可以连接网盘;2)使用 paho-mqtt 库可以通过 mqtt 协议连接各大物联网平台;3)通过 SCP 库连接自建服务器等。

软件系统依托于先进的人工智能控制系统,构建了一个由多个独立节点组成的模块化架构。每个节点负责执行特定任务,且各模块之间相互独立、解耦,各自运行在独立的线程中以高效处理任务。系统启动时,首先执行硬件系统和软件参数的初始化,包括模型加载等步骤。随后,各模块开始执行其指定任务,并通过消息队列将输出推送至系统。软件

调度器则在后台持续监控这些消息,负责执行如上传数据、存储信息和发送邮件等操作,确保中央处理器(CPU)资源得以充分利用以快速处理各项任务。

尽管各模块独立运行,但它们之间通过消息传递机制实现了信息的交互。在系统初始化阶段,各模块会订阅特定消息,从而在接收到相关信息时能够做出响应。这种设计不仅提高了系统的灵活性和可扩展性,还确保了各模块之间的协同工作。软件系统的总体架构如图 3 所示,清晰地展示了模块间的交互和信息流。这种架构设计使得系统能够高效、稳定地运行,同时便于未来的维护和升级。

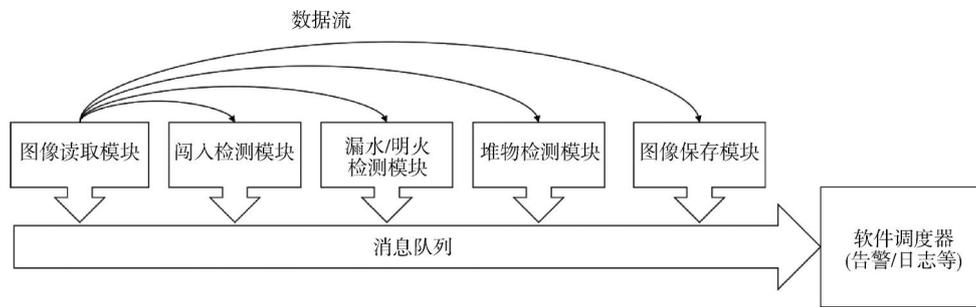


图 3 软件系统架构

Fig. 3 Framework of Software System

在运行时系统会受到一个哨兵程序的监控,它会在系统进程不正常时重新启动系统程序,确保系统能够在无人值守的情况下能够稳定地监测泵房环境,如图 4 所示。

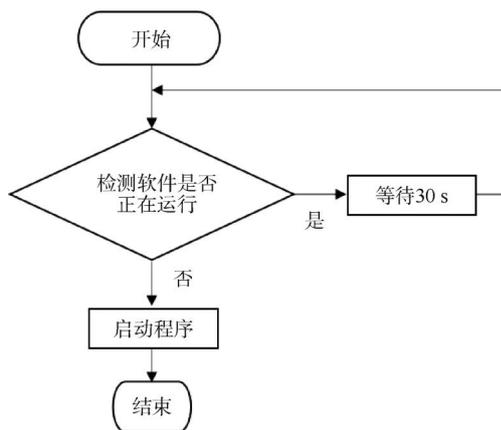


图 4 哨兵程序流程

Fig. 4 Flow of Sentinel Program

为了确保泵房运行安全,系统会调用专门的检测模型或算法来分析现场图像,以识别潜在威胁。这些模型主要包括 2 部分:一部分是直接利用软件

环境中集成的跨平台计算机视觉库(OpenCV)中的模型,或是采用传统图像分析方法编写的算法;另一部分则是在性能更好的硬件平台上训练好的目标检测模型。

针对第二类模型,首先在 Windows 系统平台上进行模型训练,然后将其部署到边缘端设备上。考虑到 Jetson 系列设备的计算能力和现有的数据量,最初选择了对硬件性能和数据量要求不高的传统机器学习算法,特别是结合了方向梯度直方图(HOG)特征和支持向量机(SVM)的传统机器学习算法,并引入了图像金字塔技术来解决多尺度问题。为了提高检测速度,会先检测图像中运动的部分,然后在这些区域上运行模型进行推理。这种方法在实践中取得了良好的效果,但也存在数据集整理困难、检测速度较慢和过拟合等问题。

随着核心芯片性能的升级和数据量的不断增加和数据合成技术的应用,逐步转向训练性能更优的深度学习算法。目前,主要采用了 YOLOv5-0.7 目标检测模型。为了提升在边缘设备上算法的性能,对模型进行了轻量化改进。将 GhostNet 替换为骨

干网络,并对模型进行剪枝和量化(剪枝通过移除冗余权重和神经元来减少模型大小,而量化通过减少权重和激活值的精度来减少内存占用和计算量)。在 Jetson 计算平台上能够达到 32.7 fps 的检测速度。

### 3 系统测试与效果

#### 3.1 内部测试

##### 3.1.1 系统功能和稳定性测试

在实验室内正常室内条件下,进行了为期 5 d 的测试。在此期间,系统运行稳定,网络和相机工作正常。测试结果表明,二次供水泵房远程监测系统的相关功能,包括检测到异常闯入、堆物、漏水和烟雾等目标,以及通过网盘或服务器上传日常数据,和通过物联网平台和邮件报警等功能,已经完备且符合设计要求。

在泵房环境中可能会遇到一些不可控的意外情况,这些情况可能对系统运行产生较大影响。针对这些问题,系统制定相应的解决方案,具体如表 1 所示。

表 1 系统问题及表现

Tab. 1 System Issues and Performance

异常问题	系统应对方案	实际表现
程序非正常关闭	哨兵程序监控	程序在 30 s 内重启
停电导致关机	设备上电启动,软件开机自启	实现自启动
通讯信号不稳定	储存等待信号恢复正常	信号稳定后通信正常

表 2 压力测试结果总结

Tab. 2 Summary of Pressure Test Results

阶段	测试条件	主机内核温度/℃	系统表现	备注
一	拆除散热装置,设备满载运行	70~80	运行正常,无卡顿、过流提示和非正常关机	达到 70 ℃ 时出现过热提醒
二	制造保温环境,设备满载运行	80~85	运行正常,无过流提示和关机现象	维持 8 h
三	第二阶段基础上运行实际软件系统	85~90	无过流提示和关机现象	维持 10 h

现任何故障。综合这 3 个阶段的测试结果,得出结论:设备在恶劣环境下表现出较高的稳定性。

#### 3.2 现场测试

在我国东部某城市,团队成员选择了 35 个不同类型二次供水泵房,进行了为期 2 个月的实地运行测试。在测试期间,安装并评估了 35 台设备及其配套摄像机的实际工作表现。通过远程监控系统,能够及时通过邮件、物联网(IOT)平台、网盘和自建服务器接收到泵房内部环境图像的每日监测数据以及

针对这些实际运行可能出现的问题,进行 1 周模拟运行测试,期间针对运行中系统程序非正常关闭、泵房异常停电导致关机以及通信信号不稳定的问题,采用人为关闭系统程序、关闭电源和断开天线导致信号不稳定等方法模拟真实意外。记录结果显示,系统在这期间能够克服这些问题并稳定运行;需要指出的是在网络测试中,由于信号延长线会对信号有衰减作用,针对一些地下无信号的泵房测试使用 5~40 m 每隔 5 m 规格的通用信号延长线分别进行网络测试,测试显示信号延长线最好在 30 m 以内,超过 30 m 后信号衰减程度太大会使网络通信极其不稳定。

##### 3.1.2 压力测试

为了验证在恶劣环境下系统的工作能力,对设备进行了模拟高温潮湿泵房内部环境的压力测试,以评估其在环境较为恶劣的泵房中稳定运行的能力,主要进行了 3 个阶段的评估。如表 2 所示。

第一阶段,移除主动散热装置,使 CPU 和 GPU 处于满载状态。经过 8 h 的测试,设备在达到 70 ℃ 时发出过热警告,但温度为 70~80 ℃ 时,运行稳定,未出现卡顿、过流提示或非正常关机。第二阶段,模拟实际环境,设备被覆盖 1 层潮湿泡沫棉,并添加塑料膜和保护垫。在这种条件下,设备在 8 h 内正常运行,未出现任何异常。第三阶段,连接外部设备,保持内部主机核心温度为 80~90 ℃,满载运行实际软件系统。8 h 运行过程中,设备稳定性良好,未出

异常情况的报告,测试情况如图 5 所示。

系统展现出卓越的性能,其实际表现与实验室测试结果相一致,能够有效地识别泵房环境中的异常入侵、堆物和漏水事件,并迅速上传相关信息,抓拍到的现场泵房图片如图 6 所示。

#### 3.3 效果分析

与传统的传感器分析系统相比,本监测系统主要通过视频来进行分析。使用视频不仅提供了更广泛的视觉覆盖范围,而且能够捕捉到丰富的情境信



图 5 信息接收平台

Fig. 5 Platform of Information Reception

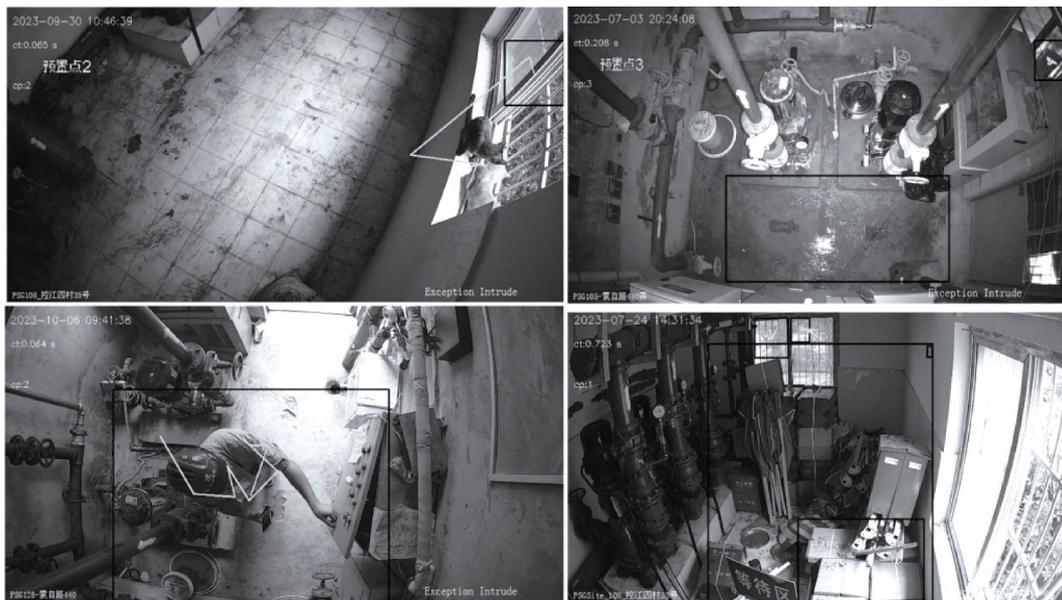


图 6 系统抓拍到的异常现象

Fig. 6 Abnormal Phenomena by the System Snapshot

息,从而为安全监控和事件响应提供了更全面的视角。例如,单个高清摄像头就能够覆盖一个较大的区域,而多个摄像头的组合则能够形成一个无缝的监控网络,确保泵房没有监测盲点。视频分析技术的另一个显著优势在于其对异常行为的检测能力。通过应用高级的计算机视觉算法,系统能够自动识别和报告潜在的安全威胁,如非法入侵、人群聚集或其他可疑活动。这种能力在传感器分析中往往难以实现,因为传感器通常只能检测到特定的物理或化

学变化,而无法提供行为模式的上下文信息。为了更直观地展示视频监测系统的优势,表 3 总结了摄像头监控相对于传感器分析的主要优点。

在经济性方面,本视频监测系统展现出了显著的成本效益。尽管初期投资可能相对较高,但一旦部署完成,视频监控系统的运营和维护成本相对较低。此外,视频监控系统的灵活性和可扩展性意味着它可以轻松适应未来技术的发展和新的监测需求,从而保护了长期的投资。而相关泵房内部所需

表3 摄像头监控相对于传感器分析的主要优点  
Tab. 3 The Main Advantages of Camera Monitoring over Sensor Analysis

优势类别	视频监控(摄像头)	传感器分析
覆盖范围	单摄像头覆盖广泛区域,多摄像头实现无缝监控	受限于安装位置,可能存在监测盲点
情境感知	提供丰富的情境信息,有助于全面理解事件背景	基于特定数据,缺乏情境上下文
异常行为检测	能够识别复杂行为模式和异常活动,如非法入侵、人员违规	只能检测特定物理或化学变化
成本效益	初期投资较高,但长期运营和维护成本低	投资高,需要频繁更换或维护,长期成本较高
灵活性和可扩展性	易于调整和扩展,适应未来技术发展和新监测需求	改造和升级可能需要复杂的管线和电路调整
周围环境影响	不需要大规模改造,对原始泵房运行状态影响小	需要大规模改造,对建筑环境有较大影响
记录和回溯功能	视频记录提供详实数据,可用于事后分析和法律诉讼证据	记录数据不直观,回溯能力有限
用户界面和交互	用户界面友好,便于非专业人员管理和分析数据	需要专业培训才能有效操作和分析

的环境传感器,例如:漏水、烟雾和液位等感知设备需要在泵房进行大规模的管线、电路改造,易造成对原始泵房水泵运行状态的破坏,以及对建筑环境的占用和破坏。系统提供的记录和回溯功能对于安全事件的调查和分析至关重要。视频记录不仅为事后分析提供了详实的数据,而且在法律诉讼中也可以作为有力的证据。同时,本系统通常配备有用户友好的界面,使得非专业人员也能够轻松管理和分析监控数据。

综上所述,本系统在提供全面监控、情境感知、异常检测、成本效益以及用户交互方面展现出了显著的优势。

#### 4 结论

鉴于泵房内部环境的复杂和多样,无人值守的无线通信设备易受干扰,且在低端边缘计算平台上运行人工智能软件系统并集成目标检测模型颇具挑战。本研究通过一系列创新设计,成功克服了物理环境对系统运行的影响,并优化了软件系统与模型,以适应 Jetson 边缘计算平台的资源限制。系统测试表明,其稳定性和可靠性显著,模型检测速度可以达到 32.7 fps 有较好的实时性。系统能够有效识别并及时报告泵房环境中的异常入侵、堆物和漏水事件,为泵房维护提供了关键信息。此外,该系统以较低成本实现了国内大部分二次供水泵房的信息化技术升级,有助于降低运维成本并实现全天候有效监测。鉴于其性能、成本效益和广泛的适用性,本系统具备广泛的推广价值。

展望未来,将持续整合实测数据和合成数据以训练模型,以提升其准确性和泛化能力。同时,将继续对检测模型进行轻量化优化,以提高系统运行效

率和整体性能。这些努力将使本系统在未来实现更高的效率和更优的性能表现,为泵房智能化管理和维护提供更有力的支持。

#### 参考文献

- [1] 刘幼琼. 校园智慧水务建设中宿舍楼节水节能措施的应用研究 [J]. 清洗世界, 2023, 39 (10): 154-156.  
LIU Y Q. Application study of water-saving and energy-saving measures in the construction of campus smart water affairs in dormitory buildings [J]. Cleaning World, 2023, 39(10): 154-156.
- [2] 刘幼琼, 王延涛. 智慧水务在高校建筑二次供水的应用研究 [J]. 智能城市, 2022, 8 (10): 41-43.  
LIU Y Q, WANG Y T. Research on the application of smart water in secondary water supply in university buildings [J]. Smart City, 2022, 8(10): 41-43.
- [3] 陈建勋. 基于价值工程的老旧小区二次供水改造工程方案优选研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022.  
CHEN J X. Study on the preferential selection of secondary water supply renovation project in old district based on value engineering [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [4] 滕立勇. 二次供水运维策略分析探讨 [J]. 城镇供水, 2022 (1): 8-13, 38.  
TENG L Y. Analysis and discussion on operation and maintenance strategy of secondary water supply facilities [J]. City and Town Water Supply, 2022(1): 8-13, 38.
- [5] 张放明, 郑全兴. 基于水厂运行管理经验反馈送水泵房设计注意细节的探讨 [J]. 城镇供水, 2021(4): 37-40.  
ZHANG F M, ZHENG Q X. Discussion on details in design of water supply pump house based on feedback experience of water plant operation management [J]. City and Town Water Supply, 2021(4): 37-40.
- [6] 王博, 王力平, 沈秀娟. 二次供水改造: 让百姓喝上放心水 [N]. 宁波日报, 2022-03-22 (A04).  
WANG B, WANG L P, SHEN X J. Secondary water supply

- reconstruction: Ensuring safe drinking water for the public [N]. Ningbo Daily, 2022-03-22 (A04).
- [ 7 ] 吴婷, 褚泽帆, 孙勇, 等. 基于嵌入式边缘计算的智能视频水位在线测量 [J]. 江苏水利, 2023(8): 55-60.  
WU T, CHU Z F, SUN Y, et al. Research on intelligent video water level online measurement based on embedded edge computing [J]. Jiangsu Water Resources, 2023(8): 55-60.
- [ 8 ] 阚永庚, 邵莉, 孙明权, 等. 基于边缘计算的大中型泵站电气设备故障红外图像识别 [J]. 水利技术监督, 2023(1): 28-31.  
KAN Y G, SHAO L, SUN M Q, et al. Infrared image recognition of electrical equipment faults in large and medium-sized pumping stations based on edge computing [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2023(1): 28-31.
- [ 9 ] 霍伟亮. 数据监控系统整合及运用 [J]. 中国科技信息, 2021(24): 28-29.  
HUO W L. Integration and application of data monitoring system [J]. China Science and Technology Information, 2021(24): 28-29.
- [ 10 ] 方婷婷. “智慧水务”理念在二次供水系统中的实践 [J]. 建筑技术开发, 2021, 48(9): 89-90.  
FANG T T. Practice of "smart water affairs" concept in secondary water supply system [J]. Building Technology Development, 2021, 48(9): 89-90.
- [ 11 ] 周富林, 黄靖. AI边缘计算在工业视觉识别系统中的应用 [J]. 现代传输, 2022(6): 54-56.  
ZHOU F L, HUANG J. Application of AI edge computing in industrial vision identification system [J]. Modern Transmission, 2022(6): 54-56.
- [ 12 ] 朱亚东洋, 李心超, 魏文豪, 等. 基于边缘计算的实时目标检测系统的研究与实现 [J]. 北京石油化工学院学报, 2022, 30(2): 40-45.  
ZHU Y D Y, LI X C, WEI W H, et al. Research and implementation of a real-time object detection system based on edge computing [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2022, 30(2): 40-45.

## (上接第 187 页)

- [ 2 ] 张翔宇, 范业弘, 朱晗彬, 等. 城镇中小规模污水处理厂碳排放分析及碳削减对策 [J]. 环境科学, 2025, 46(1): 107-117.  
ZHANG X, FAN Y H, ZHU H B, et al. Carbon emission analysis and carbon reduction strategy of small and medium-scale municipal wastewater treatment plants in cities and towns [J]. Environmental Science, 2025, 46(1): 107-117.
- [ 3 ] 吴珊, 李浩, 杜至力, 等. AAO工艺氧化亚氮排放及生成机理分析 [J/OL]. 工业水处理, 2024: 1-18 [2025-05-09]. <https://doi.org/10.19965/j.cnki.iwt.2024-0312>.  
WU S, LI H, DU Z L, et al. Analysis of the emission and generation mechanism of oxidized ammonia in AAO process [J/OL]. Industrial water treatment, 2024: 1-18 [2025-05-09]. <https://doi.org/10.19965/j.cnki.iwt.2024-0312>.
- [ 4 ] 王拓, 严冰. 多级 A/O 工艺协同精确控制系统用于低 C/N 进水污水厂 [J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 65-69.  
WANG T, YAN B. Application of multi-stage A/O process collaborative precise control system in wastewater treatment plant with low C/N influent [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 65-69.
- [ 5 ] 王舜和, 李朦, 郭淑琴. 张贵庄污水处理厂分段进水多级 AO 工艺的设计与运行 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(12): 53-56.  
WANG S H, LI M, GUO S Q. Design and operation for the step-feed multi-stage AO process in Tianjin Zhangguizhuang wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(12): 53-56.
- [ 6 ] 赵红, 张建强, 杨自强, 等. 潜水推流器在矩形生物池节能降耗中的应用 [J]. 化学工程与装备, 2023(2): 265-267.  
ZHAO H, ZHANG J Q, YANG Z Q. The application of submersible thrusters in energy conservation and consumption reduction of rectangular biological ponds [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2023(2): 265-267.