

智能制造背景下工业污水自动化监测体系构建及经济效益研究

薛红梅 (中国石化集团中原石油勘探局有限公司水务分公司, 河南 濮阳 457001)

摘要: 当前, 我国智能制造事业正在持续深化。工业污水监测作为工业发展的基础环节之一, 也必须向自动化、智能化方向进行转型与升级。为此, 本文依托智能制造的相关理论和技术, 深入探讨了新型工业污水自动化监测体系的构建过程和一些关键技术。重点介绍了此体系的整体架构设计。对关键技术的集成方案, 也进行了相应说明。并且系统评估了该体系实施后, 可能带来的巨大经济效益。研究表明, 该体系能够显著提升地方对工业污水监管的实际效能。

关键词: 智能制造; 工业污水; 自动化监测; 体系构建; 经济效益

中图分类号: X703; TP278 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 010-0019-03

Research on the Construction and Economic Benefits of an Automated Industrial Wastewater Monitoring System in the Context of Intelligent Manufacturing

XUE Hongmei (Water Affairs Branch, Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau Co., Ltd., Sinopec Group, Puyang Henan 457001, China)

Abstract: Currently, intelligent manufacturing in China is continuously deepening. As a fundamental aspect of industrial development, industrial wastewater monitoring must also undergo transformation and upgrading toward automation and intelligence. Therefore, based on the theories and technologies related to intelligent manufacturing, this paper explores the construction process and key technologies of a novel automated industrial wastewater monitoring system. It emphasizes the overall architectural design of the system and provides an explanation of the integration solutions for key technologies. Additionally, the potential significant economic benefits after the implementation of the system are systematically evaluated. The research indicates that this system can significantly enhance the practical effectiveness of local industrial wastewater supervision.

Keywords: Intelligent manufacturing; Industrial wastewater; Automated monitoring; System construction; Economic benefits

全球制造业正加速向智能化、绿色化方向全力转型。在此背景下, 传统工业污水监测模式, 日益凸显出严峻的现实挑战。人工采样效率低、数据孤立难整合、异常预警滞后等问题, 频频爆发。实是难以满足精准管控与高效治理的现实需求。与此同时, 智能制造领域带来了巨大的快速发展, 这又为破解上述难题, 提供了一种全新的可能。工业互联网、信息物理系统、大数据分析等先进技术, 正在不断成熟, 也慢慢成了可以推动监测模式革新的重要力量^[1]。因此, 构建一套可以与智能制造深度融合的工业污水自动化监测体系, 这不仅可以满足环保监管的刚性要求, 更可以让相关企业在节能降耗、提升运营效率上, 有关键助益, 具有重要的现实意义。

1 智能制造的内涵与特征

智能制造, 所代表的, 其实是一种跨越式的全新生生产方式。其核心, 是先进制造技术、信息物理系统、人工智能算法等各种高新科技, 全面的融会贯通, 是把自动化、智能化, 发挥到极致的一种集成表现^[2]。这一模

式, 在数据采集、分析能力、决策特点上, 有非常鲜明的时代特征。现在, 很多智能制造工厂都会部署全面的传感器网络, 这些传感器, 可以对设备、工艺及生产环境进行不间断的数据采集, 再借助工业互联网平台, 彻底打破信息孤岛, 跨系统、跨层级的进行无缝集成与数据共享, 再结合大数据与人工智能技术, 便可对汇聚的海量信息, 进行深度挖掘, 找到问题和解决方法, 从而更好更快的进行科学预测与过程优化, 最后, 才会到系统的闭环自主控制, 也就是说, 其实自动生产只是一个可以看到的结果动作, 但前期大量的智能分析过程, 才能智能制造系统能够自动执行调控指令, 实现生产参数动态优化调整的根本基础之所在。

2 工业互联网与信息物理系统 (CPS) 理论

工业污水自动化监测体系的智能化构建, 离不开工业互联网与信息物理系统两大关键理论的支撑。其中, 工业互联网的基础, 是网络、平台、安全三大功能体系。它的核心构造, 是将人、机、物全面连接, 形成一个泛在的数据流通网络。而信息物理系统 (CPS)

的核心，是处理好虚拟空间与物理实体二者之间的融合交互关系。信息物理系统会集成计算、通信与控制能力。对物理过程会进行实时感知、动态建模与精准调控，在污水监测场景中，物理实体一般包括水泵、阀门、传感器、处理设施等，虚拟空间则是这些实体的数字化模型与监测算法。而 CPS 理论的作用，就是把“感知污水状态”“预测水质变化”“调节处理流程”等重要环节，闭环智能控制起来。最终，形成“数据驱动、智能联动”的底层逻辑框架。

3 工业污水自动化监测体系的开发难点

面向智能制造，要构建一个可以进行工业污水自动化监测的技术体系，会面临诸多的现实挑战。

第一是数据采集的复杂性问题。工业污水本身成分多变，传感器的可靠性、稳定性与测量精度，都要有更高的要求，要在如此环境下持续稳定采集数据，设备的技术要求非常高^[3]。

第二是系统集成的异构性问题。监测体系需要接入的采集系统，一般都来自不同厂商、不同时期、不同协议的设备。这些设备一定会存在异构系统问题，不可能所有厂商的数据都是一个标准的，这种情况下，如何把数据归集并转换成可通识的数据，难度会很大。

第三是智能分析的技术难题。单纯的实时数据对于整个监测体系而言，意义不大，更为重要的，实际上是从数据中可以发现的问题，并形成对应的解决策略，但这个过程需要有准确的污水水质模型、设备故障模型、高效的分析算法等等。然而，模型构建与算法训练并不是一个简单的任务，技术难度同样非常巨大。

第四是安全与可靠性压力。监测体系一旦投入了运行，就要保证体系可以 7x24h 连续提供监测服务。这其中所产生的数据量会非常庞大，如何妥善的管理好这些数据，同时避免数据篡改等问题的发生，也是整个监测体系开发过程中需要解决的一大难题。

4 智能制造背景下工业污水自动化监测体系的构建

在智能制造背景下，构建工业污水自动化监测体系，其内涵已远超传统的数据采集，它的本质，是一个融合了感知、互联、分析与决策的完整信息物理系统，而其核心的建设目标，则是要实现从被动监控向主动优化、从数据孤岛向闭环智能方向，进行根本性跨越。

4.1 基于工业互联网平台的多层架构设计

该体系普遍采用基于工业互联网平台的分层架构。这种设计确保了系统的灵活性、可扩展性与健壮性。其架构通常可以清晰划分为边缘层、平台层与应用层。

①边缘层：这是部署于现场的关键节点，是体系的感知末梢与前端智能单元，通常需要布置在排污口、

调节池、反应器等工艺关键点。这一层的主要设备，包括高精度在线水质分析仪、多功能智能传感器、工业网关及边缘服务器等。边缘层的核心任务，是要对 pH 值、COD、氨氮、重金属、流量等核心参数，进行实时采集。同时，完成边缘智能计算任务。目前的做法，是在网关或服务器部署轻量算法，对数据进行本地清洗，还有异常瞬时辨识，以及基于规则的超标预警，还要对设备进行初步诊断等。这种设计，可将高实时性计算任务前移，有效减轻网络传输压力，在网络中断时也能维持住基础监控功能，从而，显著提升系统响应速度与整体可靠性。

②平台层：这是体系的数据中枢，一般构建在云端或私有化的工业互联网平台之上，负责对海量监测数据，进行统一接入、汇聚、存储与管理。其所集成的大数据处理引擎，可以对时序数据，进行复杂的批处理与流式计算。平台层还会构建并维护整个污水处理流程的数字孪生体。这是融合了物理机理、历史数据与实时数据的动态虚拟模型。它能同步映射物理实体状态。可以用于水质变化的模拟预测，也能对工艺参数进行优化寻优，对故障场景也能进行仿真推演。此外，平台层还会将各类数据处理工具、分析算法与业务模型^[4-5]，整体封装成各种标准的微服务，如“水质预测服务”“能效评估服务”等等，再经由 API 接口，开放给上层应用，从而实现核心能力的沉淀与共享。

③应用层：这里一般是指以 SaaS 化模式，为用户提供的定制化应用。对于环保监管人员，应用层可以提供全域污染源实时总览、智能超标报警、自动分析报告等等，而对于工厂运营人员，它则可提供工艺流程图深度监控、设备健康度评估、药剂投加智能推荐系统等等，对于管理决策层的话，则可提供综合环保成本分析功能、排放绩效对标功能等等。

以上各层之间，可以通过 OPC UA、MQTT 等标准工业协议，进行数据交互，最终形成一个数据自由流动、超级智能自动服务的工业污水自动化监测体系。

4.2 工业污水自动化监测体系关键构建技术

体系的智能化水平与可靠运行，需要有一系列关键技术的深度融合与应用创新。

①高可靠智能传感与边缘融合计算技术：这是整个体系感知能力的基础，其难点，在于如何更好的应对污水中恶劣的测量环境。目前，可行的解决路径上，可以采用紫外-可见全光谱扫描等非接触或自清洁式测量技术，同时，可以开发一些基于新型敏感材料的传感器，这对于一些特定污染物，如痕量重金属等，可以起到更好的稳定精准监测效果。在边缘侧，边缘计算能力也非常重要，而目前的做法，可以引入 AI

芯片与轻量级容器技术,运行一些经过剪枝优化的深度学习模型,这样对于设备早期故障也能更好的进行本地化识别,对水质异常模式也能更好的进行即时分类,真正将智能化自动化延伸至生产一线。

②基于数字孪生的预测与优化技术:这是实现“预测性”与“优化性”监控的核心。构建有效的数字孪生体,需要基于质量平衡与反应动力学,融合第一性原理模型,确保整个模拟变化过程是符合基本物理化学规律的;同时,还要结合海量历史运行数据,利用机器学习方法,如LSTM等,建立对应的数据驱动模型,从而,捕捉复杂的非线性关系,最终,才能形成的“机理-数据”混合模型,实时同步实际运行状态,在虚拟空间中,超前模拟出未来数小时的水质变化,并以此预测超标风险。实践中,数字孪生技术也能以出水达标为约束、以成本最低为目标,自动寻优整个污水监测过程中的工艺参数组合,为现场操作提供动态、精准的设定值参考建议。

③多源数据融合与智能分析技术:体系的数据价值,更多的体现在数据之间的深度关联关系,以及人们对于这种关系的挖掘结果之上。也即是说,整个体系数据要充分利用,就要打破数据壁垒,将水质监测数据与生产线的物料、产量、设备状态等生产数据,以及能源消耗数据,统统进行时空关联与融合分析。利用图计算技术,构建污染物在厂区管网中的传播路径模型,对污染源进行快速精准溯源,应用聚类、异常检测等无监督学习算法,从正常工况数据中学习模式,如此,才能更好更快的自动发现那些隐匿的异常工况问题。

5 工业污水自动化监测体系构建的经济效益分析

构建智能化的污水监测体系需要有一定投入,但其所能带来的经济效益,亦是多层次且无比显著的,这其中,便可分为直接经济效益与间接经济效益两大类。

5.1 直接经济效益

直接经济效益方面,主要体现在运营成本的节约与监测效率的提升之上。第一方面,是人工成本可以大幅降低,因为自动化监测可以取代频繁的人工采样、化验与报表编制等环节,这就可以大量减少相关岗位的人力需求,人力成本会明显降低。第二方面,是药剂与能源消耗上可以得到优化,因为有实时水质数据与智能算法的支持,系统就能更为精准的控制好絮凝剂、酸碱中和剂等药剂的投加量,同时,可以对曝气、泵送等耗能环节,进行优化控制,从而,便可实现显著的节能效果。第三方面,是设备维护费用可以明显下降,因为对泵、风机等关键设备可以进行在线状态监测与预测性维护,所以,工厂可以在污水处理设备

故障发生前,就进行预警和计划性维修,这样也可避免各种非计划停机所造成的生产损失,延长设备使用寿命,降低大修和设备的更换成本。

5.2 间接经济效益

间接经济效益方面,虽比较难以直接量化分析,但其战略价值往往会更为深远。首先,工业污水自动化监测体系可以提供更为全景化、可视化的数据看板,管理者也能更清晰的掌握企业的排污状况与环保成本,这样的话,一些存在污染问题的企业,便可更好的进行生产调度、工艺改进和投资决策,提升投资回报率。其次,工业污水自动化监测体系可以增强企业的风险抵御能力,体系能快速定位污染源头,给出应急响应方案,防止环境事故进一步扩大,这也可以保护企业的声誉,避免重大环保事故持续发酵,最后导致的巨额赔偿与市场损失。最后,工业污水自动化监测体系还可以强化企业的绿色品牌形象,提升企业的社会责任履行定位,现今天,先进的环保治理能力,已经是一个企业核心竞争力的重要组成部分之一,客户、投资者和公众会更信任一些绿色环保的企业,而企业也能因此获取更广阔的市场机会。综合来看,自动化监测体系的构建,绝对是一项具有高回报率的战略性投资选择。

6 结语

智能制造浪潮的兴起,为工业污水监测技术的革新,注入了强大动力,结合各种先进的智能化监测技术,可以对工业污水进行全过程智能管控,不仅可以有效解决传统监测模式中的诸多痛点,更可以在提升环境现状、优化工厂运营、驱动节能减排等方面,提供巨大的经济效益。未来,随着技术的持续演进,以及各种自动智能监测设备成本的进一步降低,这种智能化监测模式,必将成为工业绿色发展的标准配置,从而,为实现环境保护与经济效益的双赢,贡献更为关键之力量。

参考文献:

- [1] 赵珺,林鹏,张楠,李媛.水环境监测与污水处理技术研究及展望[J].造纸装备及材料,2023,52(08):157-159.
- [2] 邓丽娜.基于节能减排的工业污水处理技术研究[J].化纤与纺织技术,2024,53(11):64-66.
- [3] 叶志清.工业污水排放监测与水质预警策略思考[J].皮革制作与环保科技,2023,4(19):9-11.
- [4] 刘文博,李静,王鹏.基于工业互联网平台的智慧水务系统构建与应用[J].自动化博览,2022,39(5):74-78.
- [5] 陈晓明,孙伟,周涛.数字孪生技术在污水处理过程智能监控中的应用研究[J].环境工程,2023,41(4):128-133.