

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.03.008

基于时序神经网络的絮凝剂精准投加控制系统研究

苏宇宸¹, 李鹏飞¹, 张新运², 徐晓兵², 季梦奇³

(1. 河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 2. 东台市自来水有限公司, 江苏 东台 224200; 3. 北京航空航天大学 人工智能研究院, 北京 100191)

摘要: 自来水管的混凝沉淀过程受水力条件、原水水质、絮凝剂投加量、水温、pH等多个因素影响,具有非线性、大时滞、多扰动等特点。传统的人工投加方式依赖主观经验,难以根据环境和水质变化动态准确地调整絮凝剂投加量,容易引发沉淀池出水水质不稳定或药物过量投加等问题。为此,研发了一种由分布式水下监测平台与时序神经网络预测模型结合PID控制算法构成的絮凝剂精准投加控制系统。首先,基于机器视觉的图像分割算法分析矾花颗粒面积占比和颗粒形态学特征,通过多维度综合研判絮凝反应效果,并对絮凝效果偏差的情况提供预警功能;其次,基于数据库中长期的监测数据,迭代训练时序神经网络预测模型,对出水浊度进行多步超前预测,突破了絮凝沉淀过程的大时滞响应与多因素扰动对自动控制算法带来的挑战。结果表明,采用精准投加控制系统后,出水浊度的波动幅度降低了62%,絮凝剂投加量减少了25%,在保证出水水质稳定的前提下,可以实现大幅降低药剂投加量的目标。

关键词: 时序神经网络; 絮凝监测; 精准投加; 机器视觉; 出水浊度

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)03-0056-06

Precise Dosing Control System of Flocculant Based on Time-series Neural Network

SU Yu-chen¹, LI Peng-fei¹, ZHANG Xin-yun², XU Xiao-bing², JI Meng-qi³

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Dongtai Water Supply Co. Ltd., Dongtai 224200, China; 3. Institute of Artificial Intelligence, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The coagulation and precipitation process in waterworks is affected by many factors such as hydraulic conditions, raw water quality, flocculant dosage, water temperature and pH, and has the characteristics of nonlinear, large time delay and multi-disturbance. The traditional manual dosing method relies on subjective experience, so it is difficult to adjust the dosage of flocculant dynamically and accurately according to the changes in environment and water quality, which is easy to cause problems such as unstable water quality of sedimentation tank or excessive dosing of chemicals. Therefore, a flocculant precise dosing control system composed of distributed underwater monitoring platform and time-series neural network combined with PID control algorithm was developed. Firstly, the area ratio and morphological characteristics of the flocculent particles were analyzed by the image segmentation algorithm based on machine vision, the flocculation reaction performance was comprehensively evaluated through the multidimensional characteristics, and an early warning function for the deviation of

通信作者: 季梦奇 E-mail: mengqiji@outlook.com

flocculation was provided. Secondly, based on the medium and long term monitoring data in the database, the time-series neural network prediction model was iteratively trained to conduct multi-step advance prediction of effluent turbidity. The challenge of the automatic control algorithm brought by the large time delay response and multi-factor disturbance in the flocculation and precipitation process was overcome. After adopting the precise dosing control system, the fluctuation range of effluent turbidity was reduced by 62%, and the dosage of flocculant was reduced by 25%. On the premise of ensuring the stability of effluent quality, the system achieved the goal of significantly reducing the dosage of chemicals.

Key words: time-series neural network; flocculation monitoring; precise dosing; machine vision; effluent turbidity

自来水厂在水质净化过程中,通过投加絮凝剂使胶体脱稳形成微絮凝体(矾花)^[1-3],并进一步碰撞凝聚形成具有良好沉淀性能的密实絮凝体。因此,絮凝效果是影响饮用水水质的关键因素。

目前,自来水厂通常在现场人工观察沉淀池的絮凝效果,并凭借长期经验调整絮凝剂投加量,该方法具有很大的主观性。还可以依据在线水质监测仪器^[4-5],通过分析沉淀池的出水浊度变化^[6],判断絮凝剂投加量是否合适。但由于絮凝和沉淀过程时间较长,使得该方法存在一定的滞后性。同时,该方法在絮凝效果较好的同时可能存在超量投药的问题,提高了运营成本。因此,如何根据原水水质和絮凝反应环境变化精准投加絮凝剂,实现在确保饮用水安全的基础上减少投药量,降低自来水厂的长期运营成本,成为了亟待解决的难题^[7-8]。

项目依托江苏省东台市南苑水厂现有的絮凝

反应—斜管沉淀池开展研究,设计规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,絮凝反应池为同波折板组合形式,采用不锈钢材质,长为41 m,宽为8 m。原水中悬浮物在反应池中形成的絮体矾花经过长为14 m、宽为10 m的斜管沉淀池,依靠重力作用从上层出水中分离,继而沉入集泥斗进行综合处理。蜂窝斜管选用乙丙共聚材质,管长为1 m,水平倾角为 60° 。

笔者根据水厂的实际情况,开发了基于机器视觉的实时絮凝监测技术,并利用时序神经网络预测算法,结合PID控制器^[9],研发了精准加矾控制系统,解决了因絮凝和沉淀时间较长造成的决策滞后问题,实现了絮凝剂的精准投加,对自来水厂自动化技术的更新迭代具有重要的借鉴意义。

1 絮凝剂精准投加控制系统

1.1 系统整体组成

絮凝剂精准投加控制系统的整体架构见图1。

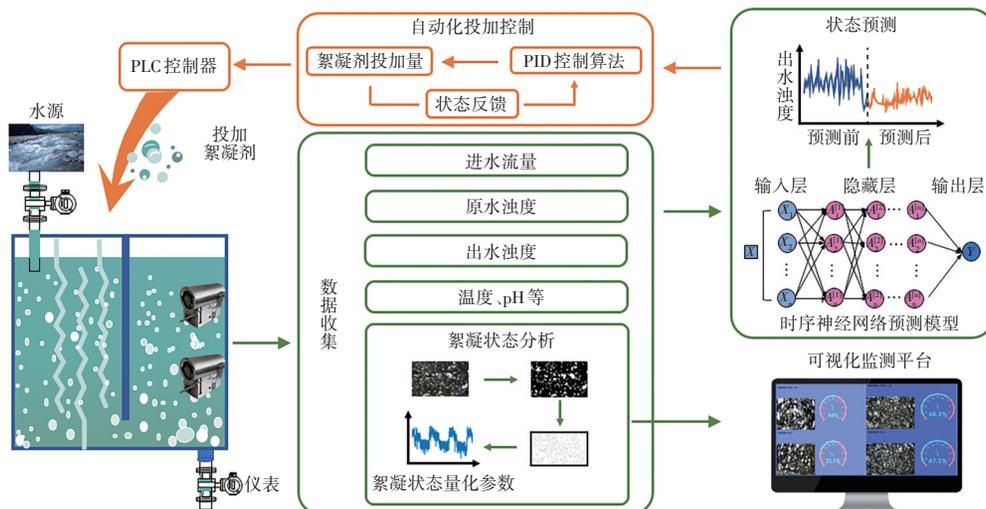


图1 絮凝剂精准投加控制系统

Fig.1 Precise dosing control system of flocculant

由图 1 可知,该系统主要由在线监测仪器、絮凝反应实时监测系统、时序神经网络预测模型结合 PID 控制算法的精准投加系统及操作控制系统组成。在絮凝反应池安装分布式水下监测设备,开发自适应的阈值分割算法,实时量化反应池的絮凝效果;通过历史监测数据(进水流量、原水浊度、出水浊度、反应条件以及絮凝状态量化参数等),对时序神经网络预测模型开展数据训练迭代和测试,提前计算出合理的絮凝剂投加量,结合 PID 控制器,对絮凝剂的投加进行精准控制。同时在线监测絮凝反应效果和沉淀池出水浊度,提供对絮凝反应效果较差和出水浊度超标的报警功能。

1.2 在线监测仪器

1.2.1 仪器选型

为了更好地监测反应池中絮凝效果,安装水下相机对矾花状态进行实时监测,设备为 Barlus 网络水下高清摄像机(UW-S2F-4DWC6X10),可以在絮凝反应池中安全稳定运行并反馈供分析模块处理的高清监测图像。该设备具有体积小、性能好、价格低、协议支持广、环境适应性强等优点。针对绿藻生长等导致镜头污染的特殊情况,相机支持镜前玻璃自清洁功能。同时,沉淀池出水浊度是絮凝剂投加系统的控制性参数,选用 HACH 低量程浊度仪(1720E)作为监测仪器,每 1 min 测量一次。

1.2.2 仪器部署

水下高清相机和矾花监测状态如图 2 所示。



图 2 水下高清相机和矾花监测状态

Fig.2 Underwater HD camera and flocs monitoring status

由图可见,在絮凝反应池和斜管沉淀池之间的过渡区域(配水区中心处),分布式安装了 3 台水下

高清相机,用以实时监测并校准絮凝状态。3 台相机距配水花墙的水平距离分别为 1.5、1.5、2.5 m;距离地面的垂直深度分别为 1.0、2.0、2.0 m。每个设备设定独立的 IP 地址,分布式监测视频可通过 RTSP 协议与系统中控实时传输。

在沉淀池出水末梢安装浊度分析仪(见图 3),实时监测出水浊度,并将采集的数据上传到数据库,为后期训练神经网络预测模型提供历史数据。



图 3 HACH 浊度分析仪

Fig.3 HACH turbidimeter

1.3 絮凝反应实时监测系统

数字图像处理技术已广泛应用于航天航空、生物医药、水厂处理^[10-12]等多个领域。因此,本研究基于机器视觉与深度学习 Open CV 框架,对水下监测器传输的视频进行处理与分析。在 QT 控制台中创建 Video Capture 实例,循环提取视频中的每一帧图像,对其进行图像分割和形态学颗粒分析,从而得出絮凝状态,其处理流程如图 4 所示。结合图像预处理(灰度转换、噪声滤波)、自适应阈值分割技术和形态学分析技术对每一帧絮凝监测图像开展分析,从矾花颗粒面积占比、颗粒圆度形态、颗粒等效粒径多维度对絮凝反应效果进行综合评判。

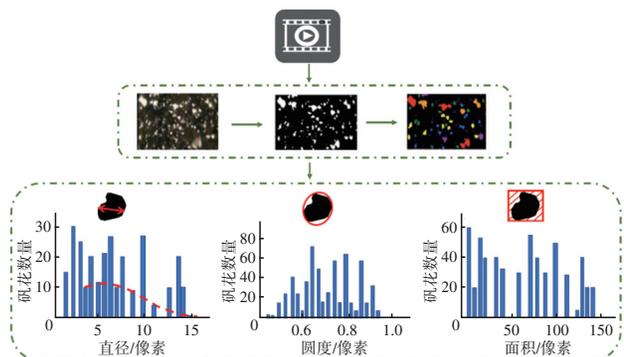


图 4 絮凝图像处理

Fig.4 Flocculation image processing

为了方便管理人员实时监测,本研究基于 Flask 轻量化开发框架搭建了可视化监测平台,便于操作人员在中控室直接观察各个絮凝反应池的情况,提高了工作效率,运行效果如图 5 所示。当某个反应池的絮凝反应综合评判值低于预警阈值,监测系统将对该沉淀池自动启动声光报警功能,方便操作人员迅速判断故障所在,降低沉淀池出水浊度异常的风险,而且具备历史数据储存查询功能。

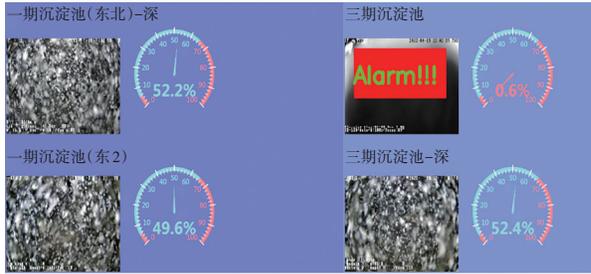


图 5 絮凝效果可视化监测平台

Fig.5 Visual monitoring platform for flocculation effect

1.4 精准投加控制系统

采用时序神经网络预测模型结合 PID 控制算法计算合理的絮凝剂投加量,通过 PLC 控制器对絮凝剂加注泵进行调整,实现絮凝剂精准投加的目标,具体控制策略如图 6 所示。

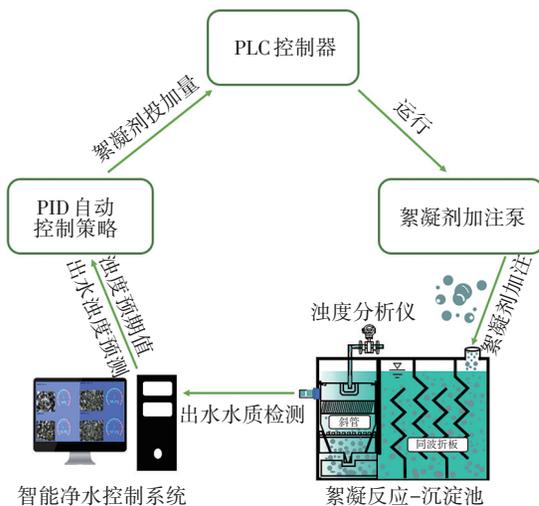


图 6 加注泵控制策略

Fig.6 Filling pump control strategy

首先,为了实现絮凝剂的自动精准投加、降低因絮凝沉淀时间较长造成的决策滞后问题,开发了时序神经网络预测模型,对数据库中采集的长期历史监测数据进行归一化处理,并输入到预测模型中进行训练迭代。将基于时序神经网络预测模型输出的沉淀池出水浊度与实测值进行比较,检验预测

精度。

其次,为了维持生产过程中的变量稳定,也就是控制系统中的出水浊度稳定,在多变量多步时间序列预测以平衡系统延时的基础上引入 PID 控制器,实现对絮凝剂投加量的动态控制,稳定出水浊度。将预测的沉淀池出水浊度负反馈接入 PID 控制器,计算得出当前采样周期内的絮凝剂投加量决策。

最终,根据时序神经网络预测模型和 PID 算法计算获得絮凝剂投加的控制量,通过 PLC 控制加注泵阀门开度的大小,降低控制系统的迟滞性,从而实现絮凝剂的精准投加。

1.5 控制系统监测界面

自来水厂在中控室安装了监控软件,其界面见图 7。可知,界面显示了精准投加控制系统中的各项监测数据,值班人员可以实时了解当前各反应池的絮凝剂投加量、控制系统开启状态、絮凝效果综合评判值、进水流量以及出水浊度。监控软件设定报警极限参数范围,当监测数据超出范围后,系统将发出声光报警提示,值班人员可以根据系统运行状态的各项参数,迅速判断故障所在,从而使系统具备由智能精准投加方式快速切换到人工投加方式的功能。

絮凝剂投加量	系统开启状态	絮凝效果综合评价值		进水流量	出水浊度
一期东投加量 16.397	使用中	一期东北	一期东北新	1期东进水流量 2418 m³/h	1期东出水浊度 0.075 NTU
一期西投加量 16.397	使用中	一期西	一期东	1期西进水流量 2418 m³/h	2期东出水浊度 0.062 NTU
二期投加量 21.000	不使用	一期西南	一期西南新	2期进水流量 0.000 m³/h	3期东出水浊度 0.083 NTU
三期投加量 17.070	使用中	三期	三期新	3期进水流量 1909 m³/h	
		57.97%	57.22%		
		52.97%	52.06%		
		56.22%	51.10%		
		55.95%	56.93%		

图 7 监控软件界面

Fig.7 Monitoring software interface

2 絮凝剂精准投加控制系统成效

本研究开发了基于 PID 控制与时序神经网络算法相结合的精准加矾控制系统,与传统的人工投加方式相比,在安全性和经济性两个方面存在明显优势。

2.1 安全性

图 8 为人工投加和精准投加两种模式下的沉淀池出水浊度波动范围对比。为了更好地比较两种投加方式对出水浊度波动范围的影响,将出水浊度进行了标准化处理,即首先将监测到的出水浊度减去

浊度波动范围内的最小值,然后再除以当前出水浊度波动范围内的最大值。可知,当采用传统人工投加方式时,标准化后的出水浊度波动范围为0~1,波动幅度为1;而采用精准投加控制系统后,沉淀池出水浊度基本稳定在0~0.38范围内,波动幅度为0.38。相较于人工投加,精准投加控制系统出水浊度的波动降低了62%,有效提高了出水浊度稳定性,大幅度减少了“跑矾花”现象的出现,确保供水安全。

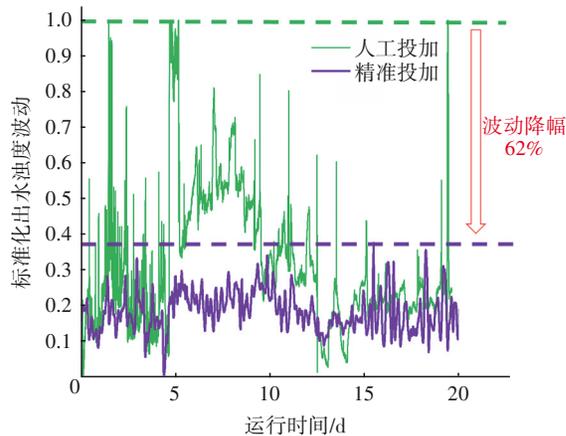


图8 沉淀池出水浊度波动范围

Fig.8 Fluctuation range of effluent turbidity from sedimentation tank

2.2 经济性

图9为人工投加和精准投加两种模式下的絮凝剂投加量对比。

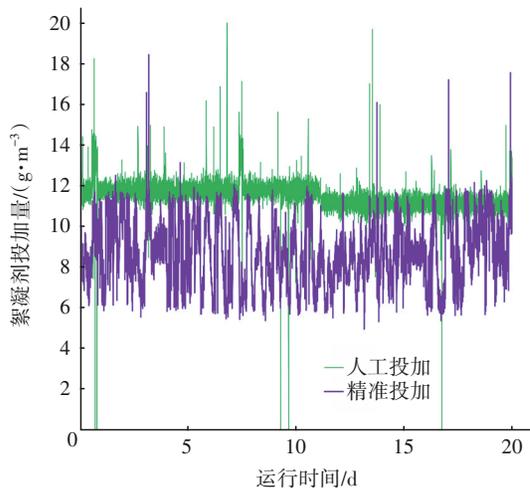


图9 絮凝剂投加量

Fig.9 Flocculant dosage

由图9可知,当采用人工经验投加方式时,反应池的絮凝剂投加量固定为 12 g/m^3 ;而采用精准投加系统后,一期絮凝池投加量平均值降至 9 g/m^3 (降幅为25%)。这意味着采用精准投加控制系统既能够

降低出水浊度波动、提高水质稳定性,又能够有效减少絮凝剂投加量,具有显著的社会和经济效益。

3 结论

① 在江苏省东台市南苑水厂的实际运营下开发了基于分布式水下监测器和机器视觉技术的絮凝反应效果监测系统,建立了可视化监测平台,并提供絮凝效果预警功能,方便自来水厂值班人员实时观测各个絮凝反应池的状态。

② 基于历史监测水质和外部环境数据,迭代训练时序神经网络预测模型,解决了混凝沉淀过程中的非线性、大时滞、多扰动等难题,能够根据实时原水水质和外部环境变化,动态准确地调整絮凝剂投加量。

③ 相较于传统人工投加方式,采用精准投加控制系统后,出水浊度波动幅度降低了62%,絮凝剂投加量减少了25%,能够在确保沉淀出水水质稳定的前提下节约药剂量,具有一定的社会和经济效益。

参考文献:

- [1] 戴宏,朱恩文,李金平,等. 大数据背景下水厂自动投矾模型研究[J]. 经济数学, 2020, 37(4): 182-189.
DAI Hong, ZHU Enwen, LI Jinping, et al. Research on dosing coagulation models in waterworks under the background of big date [J]. Mathematics in Economics, 2020, 37(4): 182-189 (in Chinese).
- [2] 王圃,池年平,李江涛,等. 基于分形维数的絮凝效果定量化试验[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, 38(6): 79-82.
WANG Pu, CHI Nianping, LI Jiangtao, et al. Experimental research on the quantitative analysis of flocculation efficiency based on fractal dimension [J]. (Journal of Sichuan University, Engineering Sciences Edition), 2006, 38(6): 79-82 (in Chinese).
- [3] 张进武. 水处理絮凝剂研究现状与前景[J]. 山西化工, 2022, 42(6): 28-29,41.
ZHANG Jinwu. Research status and prospect of flocculant in water treatment [J]. Shanxi Chemical Industry, 2022, 42(6): 28-29,41 (in Chinese).
- [4] 郭建甲,范新南. 数字图像处理技术在水处理过程中的应用[J]. 河海大学常州分校学报,2003(4):28-31.
GUO Jianjia, FAN Xinnan. Application of digital image processing technique in water processing [J]. Journal of Hohai University Changzhou, 2003 (4) : 28-31 (in

- Chinese).
- [5] 韩继阳. 水质在线监测系统在农村饮水安全中的应用研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2016.
HAN Jiyang. Application of Water Quality Monitoring System in the Rural Drinking Water Safety [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016 (in Chinese).
- [6] 李学荣, 姚晓挺, 夏炜, 等. 基于浑浊度的水厂工艺内控指标的精细化管理[J]. 净水技术, 2022, 41(8): 180-186.
LI Xuerong, YAO Xiaoting, XIA Wei, *et al.* Refined management of internal process indices in a WTP based on turbidity [J]. 2022, 41(8): 180-186 (in Chinese).
- [7] 王茜. 污水处理厂自动化系统研发与设计[D]. 西安: 长安大学, 2016.
WANG Qian. Research and Design of Wastewater Treatment Plant Automatic System[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016 (in Chinese).
- [8] 冯伟, 黄红兵, 王星星, 等. 净水厂自动化综合监控系统研究与设计[J]. 机械工程与自动化, 2019(6): 193-195.
FENG Wei, HUANG Hongbing, WANG Xingxing, *et al.* Research and design of automation comprehensive supervising system for water purification plant [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019(6): 193-195 (in Chinese).
- [9] 黄俊熙, 岑玉铭, 关宇霆, 等. 污水处理过程中除磷加药智能控制系统及应用研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(1): 104-107.
HUANG Junxi, CEN Yuming, GUAN Yuting, *et al.* Application of intelligent control system for chemical phosphorus removal in wastewater treatment process [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(1): 104-107 (in Chinese).
- [10] 宋娟娟. 水处理絮凝过程絮体分形成长特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
SONG Juanjuan. Study on Fractal Growth Characteristics of Flocs in Flocculation Process in Water Treatment [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009 (in Chinese).
- [11] 陈凯歌, 韩晓军, 张宇. 基于图像处理的混凝控制方法研究[J]. 供水技术, 2012, 6(1): 40-42.
CHEN Kaige, HAN Xiaojun, ZHANG Yu. Coagulation control method based on image processing [J]. Water Technology, 2012, 6(1): 40-42 (in Chinese).
- [12] 罗岳平, 李宁, 李建国, 等. 自来水中悬浮颗粒物的检测和控制[J]. 给水排水, 2000, 26(3): 26-31.
LUO Yueping, LI Ning, LI Jianguo, *et al.* Measurement and control of suspended substances in drinking water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2000, 26(3): 26-31 (in Chinese).

作者简介: 苏宇宸(1991-), 男, 江苏盐城人, 博士, 主要研究方向为智慧水务技术。

E-mail: 20190051@hhu.edu.cn

收稿日期: 2022-06-25

修回日期: 2022-07-12

(编辑: 沈靖怡)

大力推进水利薄弱环节建设,
提高防灾减灾能力