

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.10.014

基于自学习专家库的自来水厂加矾系统应用

许中元¹, 高逸伦², 周峰¹, 叶秀伟¹, 谢树福¹

(1. 温州公用事业发展集团瑞安水务有限公司, 浙江 瑞安 325200; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘要: 为保障饮用水水质、推动自来水厂向智能化智慧化转型,温州某水厂针对原水突变情况下的加药混凝环节,结合运行经验构建了启发式规则并建立了基于自学习专家库的加矾(混凝剂)系统,以快速生成更为精准的混凝剂投加方案。经实际运行环境验证及相关审查单位测评,加矾系统运行后出水浊度同比下降1.29%~13.18%,环比下降7.76%~12.20%。在面对原水突变的情况下,应用加矾系统可有效解决混凝剂精准投加这一难点问题,确保自来水厂出水水质更稳定。

关键词: 自学习; 专家经验; 启发式规则; 智能化; 自来水厂; 加矾系统

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2025)10-0086-05

Application of Alum Dosing System Based on Self-learning Expert Database in Waterworks

XU Zhong-yuan¹, GAO Yi-lun², ZHOU Feng¹, YE Xiu-wei¹, XIE Shu-fu¹

(1. Rui'an Water Co. Ltd., Wenzhou Public Utilities Development Group, Rui'an 325200, China;

2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: To ensure drinking water quality and promote the transformation of waterworks towards intelligence and smartness, a waterworks of Wenzhou has developed heuristic rules based on its operational experience and established an alum dosing system with a self-learning expert database for the coagulation process in response to sudden changes in raw water, to rapidly generates more precise dosing plans for coagulants (alum). Verified through actual operational environments and evaluated by relevant inspection authorities, the alum dosing system has resulted in a year-on-year reduction in turbidity of the effluent by 1.29%–13.18% and a month-on-month reduction by 7.76%–12.20%. In situations where raw water conditions suddenly change, the application of the alum dosing system effectively could tackle the challenge of precise dosing of coagulant (alum), ensuring more stable effluent quality from the waterworks.

Key words: self-learning; expert knowledge; heuristic rules; intelligentization; waterworks; alum dosing system

随着社会的发展,自来水的生产与供应向高效集约模式发展,同时加速向智能化智慧化转型。其中加药混凝是自来水处理流程的重要一环,混凝沉淀

的效果不仅会影响出水水质达标,还关系到后续工艺流程的正常运转^[1]。而混凝剂(矾)的高昂成本及现实中频发的原水水质突变均促使自来水厂进一步

通信作者: 许中元 E-mail: 29118611@qq.com

思考如何高效精准地投加混凝剂。加矾系统的优化改进可最大限度地降低电耗,减轻工人的劳动强度^[2]。

1 现状概况

1.1 工艺现状

温州某水厂设计规模为 $16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,分两期建设。原水为两路,取自不同江段,水质稍有不同。采用常规水处理工艺:加药混凝、平流沉淀、砂滤、消毒。水厂工艺流程见图1。

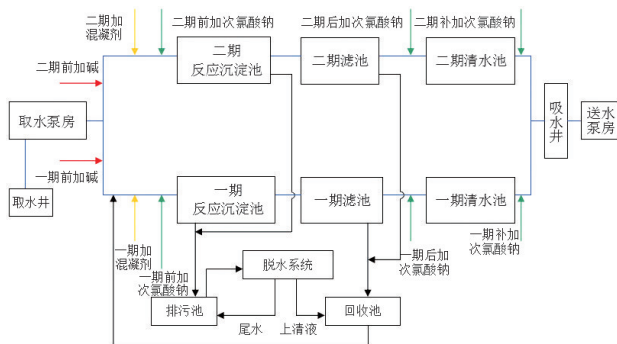


图1 水厂工艺流程

Fig.1 Process flow chart of waterworks

1.2 存在的问题

在自来水厂投药过程中,若投药量过少,水中的胶体杂质不能有效凝聚,达不到处理效果;若投药量过多,胶体发生再稳而不能凝结,造成药剂浪费,影响出水水质^[3]。

近年来极端天气频次增加,原水水质突变较为频繁,原水浊度时常急升骤降、波动幅度较大,最高可达200 NTU,这致使水厂人员劳动强度增大,药耗显著增加,水质控制效果却无明显提升,以往按比例投加混凝剂的做法不再适用。因此需采用新的投药方式来保障系统精准高效运行。

2 加矾系统建设

在保证实时性、有效性的前提下,依据专家系统推理效率高、具备自学习能力^[4]的优势,提出基于专家系统构建新的加矾系统。当前水厂具备大量生产运行数据,且有深厚的运行经验储备,设计针对性的启发式规则可更好地配合专家系统进行生产控制。最终将辅以独创启发式规则的专家系统作为该水厂面对原水突变情况下混凝剂(矾)精准投加问题的解决方案。该系统建设主要由专家系统数据库构建、启发式规则构建、影响因素相关性分析及系统平台建设组成。

2.1 专家系统数据库构建

实际运行中由于仪表故障、仪表清洗、过程调试等原因,现场上传到控制室的数据中往往存在上述非原水突变引起的干扰数据,而这些干扰数据会影响专家系统的查询推理,因此在现场数据写入后端专家系统数据库前,识别其中的“脏数据”并对其进行数据清洗及插补,保证数据的平稳性十分必要^[5]。

在数据库构建过程中,首先对现有数据库中2021年—2024年近4年的水厂运行历史数据进行数据清洗。历史数据采样为1次/min,对其采用硬阈值处理,删除空值、负值及异常零值,基于工艺逻辑进行判断等方式将干扰数据剔除,并通过SQL工具导入专家系统数据库。

专家系统数据库现有数据120万条,单条数据字段涵盖原水浊度、原水pH、原水温度、进水流量、石灰投加量、沉后水浊度、加药流量、药剂投加量等参数共16项。系统上线后,该数据库可实时进行现场数据读取及数据清洗,存入有效数据。数据读取频率可在系统中自定义,为扩展数据量,将当前专家系统数据库的数据读取频率设置为1条/5 s,确保其与现场持续同步更新。

2.2 启发式规则构建

在该系统中,分别以处理效果及药耗成本为导向,结合大量水厂运行经验,提出以下2种启发式规则:

① 处理效果优先。对于专家系统数据库中符合参考条件及前置控制变量条件的数据条目,依据其中的沉淀水浊度从低到高排序,选择沉淀水浊度最低的20组数据条目,取其混凝剂投加量平均值作为系统推荐的混凝剂投加量即需矾量。

② 降低药耗优先。对于专家系统数据库中符合参考条件及前置控制变量条件的数据条目,在满足沉后水浊度达到目标值(该目标值用以保障基本数据筛选效果,可在系统内按水厂及当地要求设置,如浊度 $\leq 1 \text{ NTU}$)的前提下,依据其中混凝剂投加量由低到高排序,选择混凝剂投加量最低的20组数据条目,取其平均值作为系统推荐的混凝剂投加量即需矾量。

正常情况下,依据专家系统数据库可得到满足上述规则的20条数据用于系统控制,但在原水突变的场景下,可能会出现符合前置条件的历史数据不

足的情况,此时需依据混凝剂投加的影响因素相关性由弱到强对数据筛选条件进行放宽。

2.3 影响因素相关性分析

为探究原水突变场景下混凝剂投加的影响因素相关性,依据专家经验、水厂运行情况及相关文献,选取原水流量、浊度、pH、水温、沉后水浊度、混凝剂投加量、石灰投加量、混凝剂投加流量作为该系统关注的影响因素进一步分析。

针对原水突变场景下的各变量数据,采用相关性热力图将相关性强度可视化。相关性热力分析如图2所示。图2中红色表示正相关,蓝色表示负相关,颜色越深相关性越强,每格中的数字表示量化后的相关性强度。

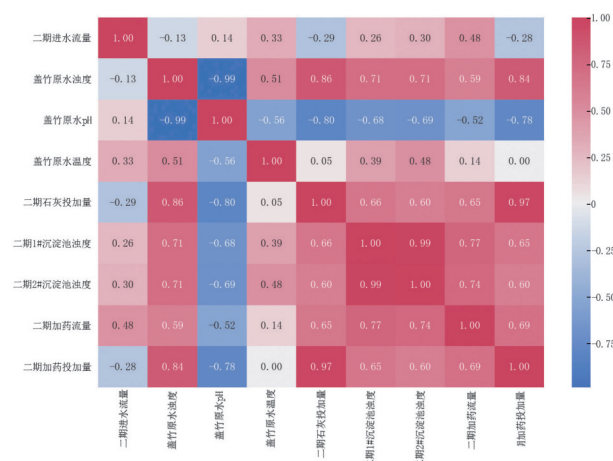


图2 相关性热力分析

Fig.2 Correlation heat analysis

因加药流量为非原生影响因素,故在原水突变场景中,当该系统以混凝剂投加量为目标时(对应降低药耗优先规则),与之最相关的影响因素按相关性由强至弱分别为石灰投加量、原水浊度、原水pH、沉后水浊度、原水流量、原水温度。当以沉淀水浊度为目标时(对应处理效果优先规则),与之最相关的影响因素按相关性由强至弱分别为原水浊度、原水pH、石灰投加量、混凝剂投加量、原水温度、原水流量。沉淀池运行工艺参数(如絮凝池流速、停留时间、混合时间等)均与流速相关,而流速与原水流量同样也具备一定的相关性,故沉淀池运行工艺参数与混凝剂投加量的相关性可由原水流量与混凝剂投加量的相关性表达。

依据上述分析,补充完善启发式规则中对数据筛选条件放宽情况的构建。

2.4 系统平台建设

系统依据面向对象的设计思想,充分考虑后续系统的模块化、高可用性、可扩展性和安全性,基于Java及MySQL进行开发,采用账号、密码、验证码等多重登录验证方式。

2.4.1 系统流程

系统将采集到的现场数据经数据清洗后,存储至专家系统数据库。在满足专家系统所设置的参考条件及允许偏差等前置变量控制条件前提下,基于所选用的启发式规则,通过人工查询或自动查询的方式给出当前工况下的历史参考数据以及系统推荐需矾量。系统通过KepServer进行实时的数据读取,若有系统推荐需矾量的数据更新(当前读取频率100 ms),KepServer则将此数据发送到下位机(PLC)已设置好的点位,控制执行器执行控制动作,完成混凝剂投加的控制。系统流程如图3所示。

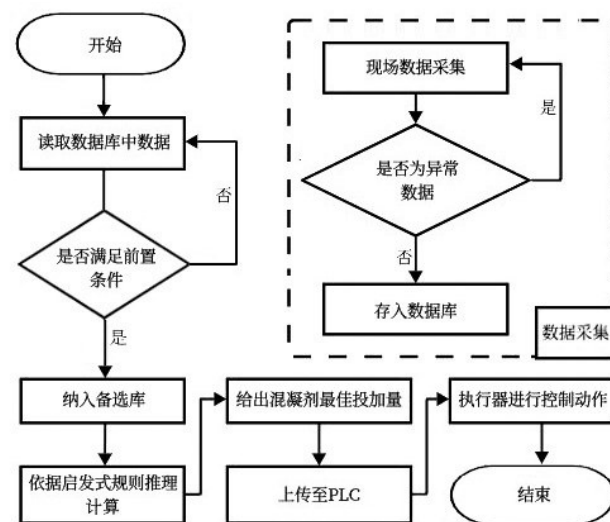


图3 系统流程

Fig.3 System flow chart

随着专家系统数据库中数据量的扩充,各影响因素间的相关性也在反复迭代中不断更新,在专家系统自学习机制作用下,系统得出的推荐需矾量也逐步接近于满足前置条件下的最佳结果。

2.4.2 系统功能

该系统主要包括系统管理、系统监控、数据展示及分析等功能模块。

① 系统管理:含用户管理、角色管理、菜单管理、部门管理、岗位管理、字典管理、参数管理、通知公告、日志管理。

② 系统监控:含在线用户展示、自动查询(可进行定时任务的搜索、搜索条件的增删改查、导出、查看定时任务调度日志、参考条件设置、前置条件设置、需矾量结果操作)、服务监控(可查看服务器CPU、内存、服务器信息、JAVA虚拟机信息、磁盘状态等占用情况)。

③ 数据展示及分析:含实时数据展示、数据趋势分析(包括但不限于曲线图、柱状图)。

系统界面如图4所示。



图4 系统界面

Fig.4 System interface

2.4.3 系统测试

为测试系统的有效性,采用2022年8月5日原水突变数据(1.5 h时段范围)进行小范围系统测试。首先设置所需的前置条件(即相较测试数据,给定数据库数据筛选的允许误差范围)对专家系统数据库中的数据进行筛选,如图5所示。

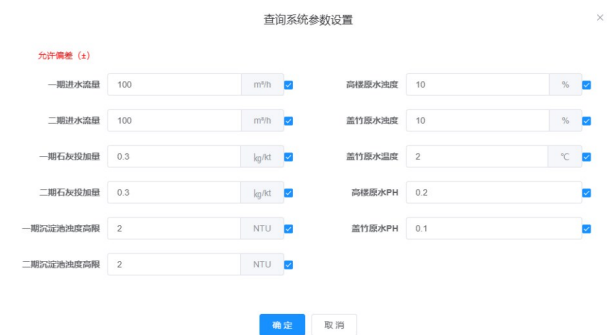


图5 前置条件设置界面

Fig.5 Precondition settings interface

对数据库所筛选出的数据,采用基于处理效果优先规则,推理计算当前测试数据场景下的需矾量及沉后水浊度。实验室需矾量的测算通过需矾量烧杯试验得到,该试验模拟反应区搅拌器设置转

速,在等量原水中加入不同量的混凝剂与助凝剂,根据混合沉淀后水的浊度挑选最佳加药区间。

最终对比上述同一时段同一反应沉淀池有关数据:实验室测算的需矾量、实际按原比例投加方法得到的需矾量及沉后水浊度、采用本系统推理计算得到的需矾量及沉后水浊度,数据对比见图6。

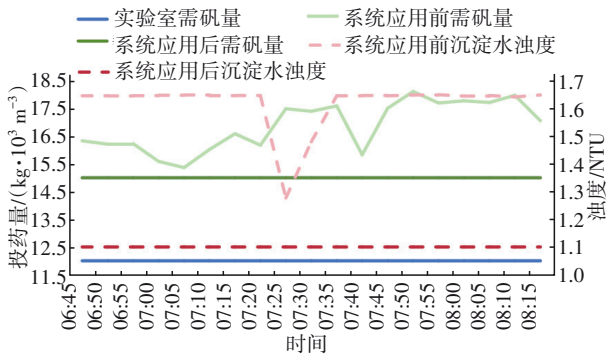


图6 测试数据对比

Fig.6 Comparison of test data

相较该系统应用前的比例投加方式,应用该系统后需矾量降低了11.14%,沉后水浊度理论上可降低32.06%,达到1.1 NTU。对近年水厂数据进行多次验证性测试,证实了本系统在面对原水突变情况下的可靠性,而平均单次计算用时600 ms,同样满足水厂实际生产运行实时性要求。

3 系统应用及分析

经过前期大量的系统可靠性验证后,该系统于2024年7月正式投入实际运行环境中使用,且设置各项指标的报警联锁,同时保留原先比例投加控制算法,用于同时期的对比验证。

2024年7月25日超强台风“格美”登陆我国沿海地区,受其影响,水厂原水浊度由8 NTU快速升至81 NTU。原水突变期间,该水厂在系统控制下,实时自动调整混凝剂的投加,保证沉后水浊度控制在1 NTU左右(内控标准为2 NTU),有效避免了原有比例投加方式的长时滞及出水不稳定的问题。

为说明实际应用的有效性,选用系统应用前后相同背景条件、相同时长的原水突变时段数据进行对比。其中应用系统后的数据选取水厂2024年7月25日早08:00—2024年7月26日早08:00这一时段内的需矾量及沉淀水浊度数据,本时段为超强台风“格美”以强台风级登陆前5 h至登陆后19 h。

应用系统前的对比数据选取水厂往年同期即2023年7月28日00:00—2023年7月29日00:00这

一时段内的需矾量及沉淀水浊度数据,本时段同样为超强台风“杜苏芮”以强台风级登陆前5 h至登陆后19 h。两者数据对比如图7所示。

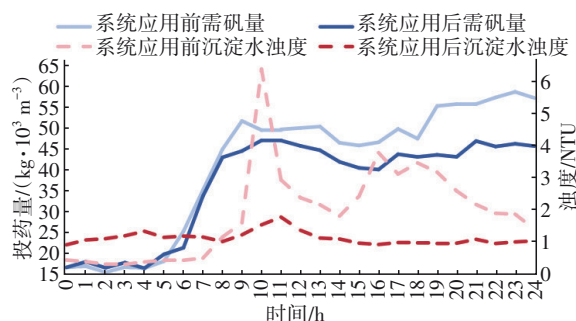


图7 实际数据对比

Fig.7 Comparison of actual data

在系统应用前,面对超强台风“杜苏芮”的影响,仅依靠比例投加方式,水厂沉后水浊度有较大突变,基本超过内控2 NTU这一限值,导致出水不稳定。而在采用系统后,面对同样为超强台风的“格美”,水厂沉后水浊度基本控制在1 NTU左右,没有剧烈突变。系统应用前需矾量及沉淀水浊度方差分别为246.87、2.086,而系统应用后需矾量及沉淀水浊度方差分别为145.24、0.041,由此可知,在面对原水突变的情况下,应用该系统可使混凝剂投加更精准、出水更稳定。同时经相关审查单位测评,该系统运行后出水浊度同比下降1.29%~13.18%,环比下降7.76%~12.20%,这也证明了该系统长期运行的可靠性及有效性。

4 系统改进方向

① 后续仍需对大量增长的数据进行更新优化,探究如何更有效地存储数据。

② 当前算法中排序操作过多,如何降低算法的时间复杂度需深入研究。

5 结语

基于此次研究成果可知,相较于比例投加及人工投加方式,所建立的基于自学习专家库的加矾系统可使水厂出水更为稳定、混凝剂的投加更为精准,尤其是在面对原水突变的情况下,可有效解决精准投加混凝剂这一难点问题。

参考文献:

- [1] 满建新. 南京市城南水厂自动加药系统改造研究[D]. 南京:南京林业大学, 2022:4-5.
MAN Jianxin. Study on Transformation of Automatic Dosing System of Chengnan Water Plant in Nanjing [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2022: 4-5 (in Chinese).
- [2] 饶小康, 贾宝良, 鲁立. 基于人工神经网络算法的水厂混凝投药控制系统研究与开发[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(5): 135-140.
RAO Xiaokang, JIA Baoliang, LU Li. Research and development of coagulation dosage control system for a waterworks based on artificial neural network [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2017, 34(5): 135-140 (in Chinese).
- [3] 王龙辉, 陈杨武, 杜世章, 等. 无机混凝剂影响因素及其混凝效果对比研究[J]. 工业用水与废水, 2016, 47(5): 47-53, 60.
WANG Longhui, CHEN Yangwu, DU Shizhang, et al. Coagulation efficiency of inorganic coagulants and influencing factors thereof [J]. Industrial Water & Wastewater, 2016, 47(5): 47-53, 60 (in Chinese).
- [4] 崔巍. 基于不确定性及模糊推理的智能制造专家系统研究与实现[D]. 天津:天津大学, 2014:3-4.
CUI Wei. Research and Realization of Expert System for Intelligent Manufacturing Based on Uncertainty and Fuzzy Reasoning [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 3-4 (in Chinese).
- [5] 刘鑫. 基于机器学习的城市用水影响机理及预测方法——以深圳为例[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2023:79-80.
LIU Xin. Impact Mechanism and Prediction Method of Urban Water Use Based on Machine Learning: A Case Study of Shenzhen [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resource and Electric Power, 2023: 79-80 (in Chinese).

作者简介:许中元(1979—),男,安徽安庆人,学士,高级工程师,副总经理,主要研究方向为自来水厂工艺处理及智能化应用。

E-mail:29118611@qq.com

收稿日期:2024-11-15

修回日期:2025-01-13

(编辑:衣春敏)