

化学强化除磷自控系统优化试验研究

李振华^{1,2}, 黄金阳^{1,2}, 马 婧^{1,2}

(1. 厦门大学嘉庚学院河口生态安全与环境健康福建省高校重点实验室, 福建漳州 363105;

2. 厦门大学嘉庚学院环境科学与工程学院, 福建漳州 363105)

[摘要] 针对当前化学强化除磷自控系统的短板, 并结合疫情防控常态化背景下污水厂消毒设施的改造升级, 从 3 个方面开展了对化学强化除磷自控系统的优化试验研究: 一是将投药点后移至深度处理滤池与接触消毒池之间; 二是用当前可快速在线测定的正磷酸盐(OP)替代总磷(TP)作为自控参数, 建立总磷与正磷酸盐的相关关系; 三是基于化学除磷效率与投药量之间的半经验关系, 建立 CEPRM 模型算法, 以取代 PLC 控制器传统的 PID 算法。结果表明, 优化后污水厂出水总磷稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18919—2002)一级 A 标准, 化学除磷投药量明显降低, 隔膜计量泵可适时稳定调频变速, 整个除磷自控系统鲁棒性好。

[关键词] 化学除磷; 自动控制; 优化; 算法; 鲁棒性

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1005-829X(2021)10-0154-05

Optimization of auto-control system for chemical enhanced phosphorus removal

LI Zhenhua^{1,2}, HUANG Jinyang^{1,2}, MA Qiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Estuarine Ecological Security and Environmental Health of Fujian Province University, Tan Kah Kee College, Xiamen University, Zhangzhou 363105, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Tan Kah Kee College, Xiamen University, Zhangzhou 363105, China)

Abstract: In view of the disadvantages of the current auto-control system for chemical enhanced phosphorus removal and the disinfection facilities upgrading of the sewage plant in regularized epidemic prevention and control, the optimization study of the auto-control system for chemical enhanced phosphorus removal was carried out from three aspects. Firstly, the dosing point was moved back to the point between the advanced treatment filter and the contact disinfection tank. Secondly, orthophosphate was replaced total phosphorus as the key parameter of auto-control system, which can be determined quickly, and the relationship between total phosphorus and orthophosphate was established. Thirdly, the traditional PID algorithm of PLC controller was replaced by the CEPRM model algorithm, which based on the semi empirical relationship between efficiency and dosage of chemical phosphorus removal. The test results showed that the effluent total phosphorus could reach standard A of first-level of Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant (GB 18919—2002) by optimization of sewage treatment plant. The reagents dosage of chemical phosphorus removal decreased significantly. Diaphragm metering pump could adjust speed stably through frequency control technique in time, and the optimized auto-control system for chemical enhanced phosphorus removal had good robustness and the feasibility.

Key words: chemical phosphorus removal; auto-control; optimization; algorithm; robustness

近年来, 伴随着给排水在线检测仪表和自控技术的快速发展, 我国污水厂的运营管理也由传统的

[基金项目] 厦门大学嘉庚学院校级科研孵化项目 (YY2019L05)

人工控制向自动控制转型。例如,为解决污水处理中仅仅依靠生物除磷法污水厂出水磷含量难以稳定达标的问题时,污水厂大多会引入化学强化除磷自控系统,期望通过自动控制投加适量除磷化学药剂,使得污水厂出水磷浓度能稳定达标^[1]。

然而,在实际自控运行中,遇到了两方面的难题,一方面是污水化学除磷并不是一个严格的等比例反应过程,处理效果与加药量呈现较强的非线性关系^[2],而且加药量还受到悬浮物(SS)、pH、温度等多种因素影响,同时污水的化学除磷是一个复杂的物理、化学过程,目前还很难通过对其化学反应机理的研究,准确地建立起反应过程的数学模型和控制算法^[3];另一方面是目前检测污水中总磷(TP)的在线仪表,按其检测方法至少需用 10 min 才能给出 TP 值,有很大的滞后性^[4]。这些导致了当前的化学强化除磷自控系统很难对污水中磷浓度的变化做出快速响应,极大地影响了自控效果,致使污水厂出水磷浓度时常不稳定,甚至不达标。对此,借助疫情防控常态化背景下我国污水厂消毒设施的升级改造,对化学除磷自控系统进行了优化研究。该项研究对于充分发挥化学除磷自控系统的效能,使污水厂出水磷含量稳定达标具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 污水厂污水处理工艺概况

试验以设计规模为 10 万 m^3/d 的某市政污水处理厂为研究对象。该厂污水二级生化处理采用 A^2O 工艺,其出水经过二沉池泥水分离后,进入深度处理滤池,完成进一步脱氮除磷深度处理后作为出水排放。其工艺流程如图 1 所示。

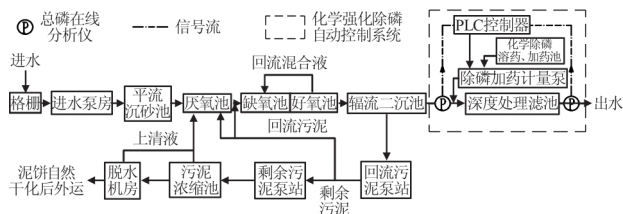


图 1 优化改造前污水厂污水处理工艺流程

Fig. 1 Process flow of sewage plant (Before optimization)

1.2 污水厂除磷现状

该污水厂以生物除磷为主,以化学除磷予之强化。具体而言,原污水中的磷首先通过 A^2O 工艺中

厌氧和好氧的交替环境,通过聚磷菌对磷进行释放和过量吸收,完成生物除磷^[5];接着进行后沉析的化学强化自动除磷,自控形式采用反馈闭环控制系统^[6],PLC 控制器根据控制点输入的信号(总磷分析仪对滤池出水的在线监测值的信号)与给定值比较,从而调控除磷药剂的投加。当滤池出水 $\text{TP} <$ 给定值时,说明出水 TP 已经达标,无需再投加化学除磷剂,加药计量泵保持待机状态;当滤池出水 $\text{TP} >$ 给定值时,启动投药程序,PLC 依据比例-积分-微分(PID)控制算法^[7]得出投加量,开动除磷加药计量泵向二次沉淀池出水中精准投加。除磷剂经过管式静态混合器混合,与水中残余的磷发生反应,形成难溶性磷酸盐,然后通过深度处理滤池过滤,完成固液分离后出水。该厂的除磷自控系统如图 2 所示。

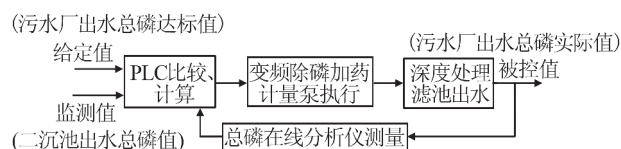


图 2 优化前除磷自控系统示意

Fig. 2 Block diagram of auto-control system for chemical enhanced phosphorus removal (Before optimization)

2 除磷自控系统运行中存在的短板与优化策略

2.1 系统监测数据与运行中存在的短板

在污水厂进水 TP 和流量相对稳定的情况下,连续监测了 72 h 的在线运行数据,结果如图 3 所示。

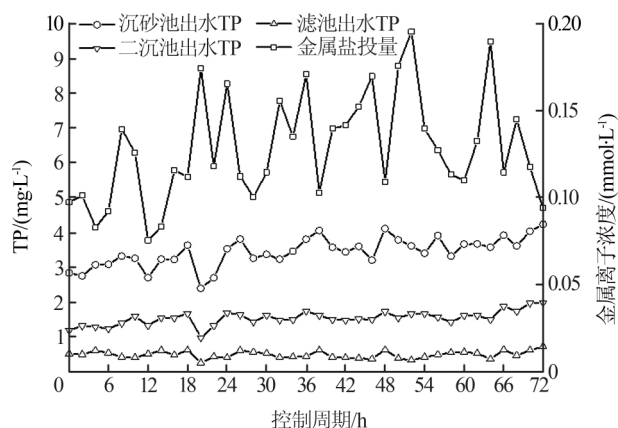


图 3 优化前除磷自控系统运行情况

Fig. 3 Operation curve of auto-control system for chemical enhanced phosphorus removal (Before optimization)

结果显示,滤池出水 TP 不能稳定达到《城镇污

水处理厂污染物排放标准》(GB 18919—2002)中的一级 A 标准($TP < 0.5 \text{ mg/L}$), 部分时段污水厂出水 TP 仍是超标排放。另外, 除磷剂金属盐(聚合双酸铝铁 PAFCS, 液态)投加量波动较大, 并存在一定的滞后性和不稳定性, 导致除磷加药计量泵调速频繁, 设备磨损较大, 维护保养的工作量也随之很大。这些都使得目前整个除磷自控系统表现的比较脆弱, 难以适应污水厂工业化大规模运行的需求, 亟需优化, 以保证出水磷含量稳定达标。

2.2 系统优化策略

针对目前化学强化除磷自控系统监测数据反馈出来的短板, 需寻找现有除磷自控系统运行效果欠佳的原因, 再基于此提出优化措施。另外, 当前全球疫情防控进入常态化阶段, 我国污水厂要对消毒设施进行升级改造, 需新建或扩建接触消毒池, 以确保加氯消毒接触时间控制在 30 min 以上, 并在污水厂出水中存有一定的余氯量, 以保持出水具有一定的持续消毒杀菌能力^[8-10]。因而, 除磷自控系统优化可与消毒设施优化运行改造相结合。优化策略见表 1、图 4 和图 5。

表 1 自控系统优化改造策略

Table 1 Optimization strategy of auto-control system

序号	现有系统运行效果欠佳原因分析	优化思路	优化措施
1	化学强化除磷加药量受到 SS、pH、温度等多种因素影响	① 化学强化除磷投药点处水的 SS 要尽量小; ② 尽可能使化学除磷剂与水中的磷反应后形成沉淀, 减少 SS 对除磷剂的消耗	① 将除磷投药点后移至深度处理滤池出水后, 接触消毒池进水前, 除磷药剂与水在管式静态混合器内混合(见图 4); ② 新建接触消毒池, 难溶性磷酸盐在消毒池内沉淀, 化学污泥通过污泥泵排入剩余污泥泵站
2	水样 TP 的在线检测耗时较长, 难以实时反馈, 自控系统滞后性大	① 寻找适于自动化监控, 能实时快速反馈水中磷含量的新指标和新方法; ② 根据监测点处水中磷浓度多次在线检测结果, 分析各监测仪得出的磷含量指标值间是否存在相关性	① 增设正磷酸盐在线分析仪(见图 5); ② 对总磷和正磷酸盐进行相关性分析, 建立回归方程; ③ 以当前可快速在线测定的正磷酸盐值替代总磷值作为自控基本参数相关性
3	自控系统 PLC 控制器中的 PID 算法过于传统, 对化学强化除磷的针对性不强, 难以保证投药量实时精准	① 为建立加药量与化学除磷效率之间的准确模型算法, 在进行化学强化除磷前, 需做好污水的深度处理, 尽量避免水中磷以外的物质对除磷剂的消耗; ② 投药点处 pH、温度等指标保持基本稳定, 从而减少算法模型构建时的影响因素个数	① 滤池用于反硝化和去除 SS, 不再用于化学除磷的固液分离, 以提高滤池 SS 去除率, 并延长滤池过滤周期(见图 4); ② 构建化学强化除磷投药量半经验模型数学方程式 ^[11]

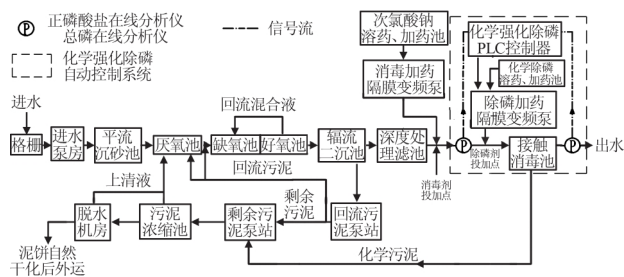


图 4 优化改造后污水厂污水处理工艺流程

Fig. 4 Process flow of sewage plant (After optimization)

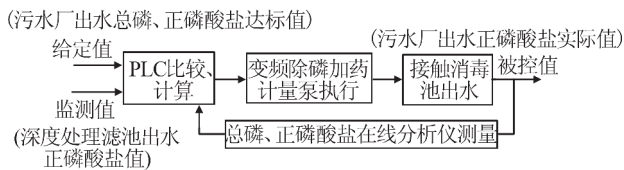


图 5 优化后除磷自控系统示意

Fig. 5 Block diagram of auto-control system for chemical enhanced phosphorus removal (After optimization)

2.3 自控监测点处总磷和正磷酸盐相关性分析

目前, 水中磷含量的在线监测仪表主要有总磷在线分析仪和正磷酸盐在线分析仪。然而, 总磷在线分析仪需要对水样进行高温高压消解, 先把磷转化为正磷酸盐后再比色测定, 故耗时较长, 所测水样的 TP 值至少需 10 min 后才能得出, 导致以 TP 作为被控值的自控系统滞后性较大。而正磷酸盐在线分析仪无需对水样进行消解, 在线监测出结果的速度较快(2 min 内), 适合作为自控系统的实时被控量^[12]。但是, 目前我国《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18919—2002)中是以 TP 作为出水磷浓度指标值。考虑到上述两方面因素, 在自控监测点处, 对利用总磷/正磷酸盐在线分析仪(HACH Phosphax Sigma)监测所得出的大量 TP 与正磷酸盐在线监测值进行线性拟合分析^[13-14], 以建立自控监测点处水样总磷与正磷酸盐的线性拟合数学方程式。自控监测点处总磷和正磷酸盐相关性分析结果如图 6 所示。

图 6 拟合结果显示, 自控监测点处水样总磷与正磷酸盐线性相关性较好, 拟合相关系数 R 达到 0.9 以上; 同时, 拟合线性方程的斜率也在 0.9 以上, 说明经过滤池深度处理后的出水中, SS 已较低, 磷主要以正磷酸盐的形式存在于投加点处, 其他形式的磷含量极低。这说明在自控系统优化方案中, 用易于快速在线监测的正磷酸盐替代滞后性较大的总磷

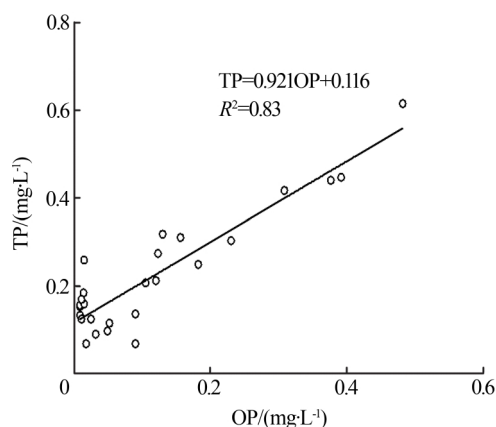


图6 自控监测点处总磷(TP)与正磷酸盐(OP)相关性分析(优化改造后)

Fig. 6 Correlation analysis of total phosphorus and orthophosphate (After optimization)

是可行的。

2.4 自控系统 PLC 控制器投加量的算法构建

自控系统投药点经过优化后设置在污水厂滤池深度处理后的出水处,结合自控监测点处总磷和正磷酸盐的拟合分析结果可知,经改造后所投加的 PAFCS 主要和投加点处水中的正磷酸盐反应,水中其他物质对 PAFCS 的消耗极少,这就为构建除磷投药量半经验模型数学方程式奠定了基础。

根据已有研究结果^[11],并结合自控系统投加点处水样特征,突出影响化学除磷的主要因子投药量,规避繁多的次要影响因子,构建 PLC 控制器可编程的反比例函数方程式,即 CEPRM 模型算法。方程形式如公式(1)所示。

$$Y = \frac{a}{1+bX} + C \quad (1)$$

式中:Y——投药后水中的余磷浓度(总磷值)与投药前原水中磷浓度(总磷值)之比;

X——金属离子浓度,mmol/L;

b——经验常数,L/mmol;

a、c——无量纲经验常数。

3 除磷自控系统优化后的运行情况

3.1 系统优化后监测数据

污水厂除磷自控系统优化后的监测数据如图7所示。

由图7可知,与优化前相比,系统有3个很明显的改观,一是污水厂出水TP能稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18919—2002)中的一

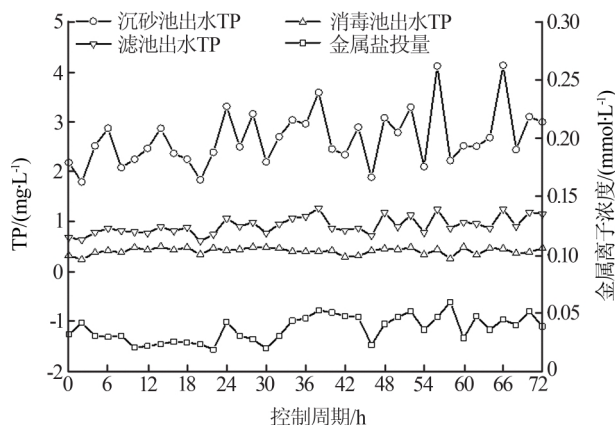


图7 优化后除磷自控系统运行情况

Fig. 7 Operation curve of auto-control system for chemical enhanced phosphorus removal (After optimization)

级A标准($TP < 0.5 \text{ mg/L}$),且化学除磷率平均提高了18.6%。二是投药点后移至滤池出水处后,投药量迅速降低(投药量平均节省了57.3%),说明改造前在二次沉淀池出水处投药,部分除磷药剂没能和水中磷反应,而是被水中的其他物质,尤其被SS消耗较多。如此大幅降低了化学除磷的药剂费(药剂费平均降低了55.4%),并有助于延长深度处理滤池的过滤周期。而滤池过滤周期的延长,更加有利于发挥其反硝化脱氮的作用,进一步提高污水厂的脱氮率。三是自控系统采用滞后性小的正磷酸盐作为实时被控量后,除磷剂金属盐的投加量相对稳定,波动较小,隔膜变频泵可适时稳定调频变速,在线监测药剂费和设备维护费也同步降低。优化后的除磷自控系统鲁棒性好,能满足污水厂大规模运行的除磷需求。

3.2 系统优化后 CEPRM 模型算法拟合

优化后的自控系统 PLC 控制器采用 CEPRM 模型算法取代传统的 PID 算法。系统运行之初,CEPRM 模型基于已有研究的相关参数^[11]。调试运行一段时间系统稳定后,结合图7中的监测数据,采用正交距离回归法进行非线性拟合,结果如图8所示。

图8拟合结果表明,自建 CEPRM 模型算法能较好地反映自控系统的化学除磷效果,模型拟合相关系数达到0.95,残差平方和在 10^{-2} 以下。相比之前控制器自带的PID算法,CEPRM 模型算法更具有针对性,且投药量降低,节省了药剂费,也同步减少了金属盐对出水二次污染的风险。

3.3 化学污泥的去除

投加 PAFCS 后,其与深度处理滤池出水中剩余

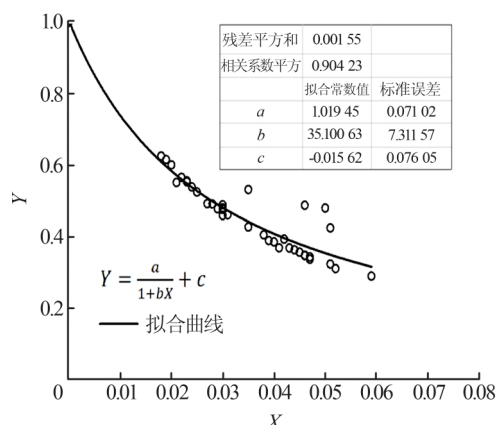


图8 CEPRM 模型算法拟合

Fig. 8 CEPRM model nonlinear fitting

的磷反应,形成的难溶性磷酸金属盐在新建的接触消毒池内沉淀,按要求沉淀时间控制在 15~20 min,而在疫情防控常态化背景下,接触消毒池停留时间要求设计为 30 min,故完全能满足难溶性磷酸金属盐的沉淀要求。系统运行一段时间后(一般 3 个月),由沉淀物聚集所形成的除磷化学污泥,通过在接触消毒池上加装浮船式移动污泥泵,采用泵吸式排泥,使集泥与排泥同时完成,之后再排入剩余污泥泵站吸泥井,浓缩脱水后外运。

4 结论

本研究提出了化学强化除磷自控系统优化策略与措施,并通过生产性试验进行了验证。结果表明,采用将投药点后移至深度处理滤池与接触消毒池之间,并用正磷酸盐替代总磷作为自控参数,同时建立 CEPRM 模型算法($Y = \frac{a}{1+bX} + C$)取代传统 PID 算法

后,污水厂出水 TP 稳定达到 GB 18919—2002 的一级 A 标准($TP < 0.5 \text{ mg/L}$),化学除磷率提高了 18.6%,除磷投药量节省了 57.3%,药剂费降低了 55.4%,且

整个除磷自控系统鲁棒性更好。

参考文献

- [1] 贾玉柱,赵月来,刘成钰,等. P-RTC 化学除磷智能实时控制系统在污水厂的应用[J]. 中国给水排水, 2019, 35(8): 87-90.
- [2] 邱勇,李冰,刘垚,等. 污水处理厂化学除磷自动控制系统优化研究[J]. 给水排水, 2016, 52(7): 126-129.
- [3] 李子富,云玉攀,曾灏,等. 城市污水处理厂化学强化生物除磷的试验研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(12): 3070-3077.
- [4] MBAMBA C K, LINDBLOM E, FLORES-ALSINA X, et al. Plant-wide model-based analysis of iron dosage strategies for chemical phosphorus removal in wastewater treatment systems [J]. Water Research, 2019, 155: 12-25.
- [5] 吴昌永. A²O 工艺脱氮除磷及其优化控制的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [6] 乔兴宏. 污水生化处理系统的智能预测及鲁棒优化控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [7] 金涛. 基于 PLC 的污水处理控制系统设计[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
- [8] 李激,王燕,熊红松,等. 城镇污水处理厂消毒设施运行调研与优化策略[J]. 中国给水排水, 2020, 36(8): 7-19.
- [9] 冯志,程伟,李敏,等. 新冠肺炎疫情期间武汉涉疫废水应急处置工作及思考[J]. 中国给水排水, 2020, 36(10): 7-12.
- [10] 熊兆锟,刘文,曹剑钊,等. 新冠肺炎疫情对医院污水防控体系建设的影响及启示[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(6): 134-142.
- [11] 李振华,蔡丽云,王鸿辉,等. 污水厂化学强化除磷投药量精准自动控制[J]. 工业水处理, 2020, 40(10): 55-59.
- [12] 韩卫俭. 水质总磷总氮在线自动监测技术[J]. 环境与发展, 2020, 32(10): 129-130.
- [13] 程立. PHOSPHAX Σ Sigma 总磷分析仪在循环冷却水中的应用[J]. 石油化工环境保护, 2006, 29(4): 63-64.
- [14] 章臻. 循环冷却水中水处理剂在线监测方法的建立及相应仪器的研发[D]. 厦门: 厦门大学, 2009.

[作者简介] 李振华(1984—), 博士, 副教授. E-mail: 1438164@qq.com.

[收稿日期] 2021-07-21(修改稿)

·简讯·

《工业水处理》入选《世界期刊影响力指数(WJCI)报告(2020 科技版)》

在最新发布的《世界期刊影响力指数(WJCI)报告(2020 科技版)》(以下简称: WJCI 报告)中,《工业水处理》光荣入选。

WJCI 报告是由中国科学技术信息研究所、《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、清华大学图书馆、万方数据有限公司、中国高校科技期刊研究会联合研制的期刊评价报告。该报告旨在建立新的期刊评价系统,探索面向全球化的更为科学、全面、合理的期刊影响力评价方法,遴选各国最

具地区代表性、学科代表性、行业代表性的优秀期刊。

WJCI 报告更加全面、客观、综合地评价科技期刊在当今社会对全球科技创新活动提供的出版传播服务及其学术影响力,客观反映了以中国为代表的新兴科技大国的真实贡献,为世界学术期刊的学术影响力提供更为客观的统计方法和综合排序,推动世界科技期刊公平评价、同质等效使用。