

自来水厂药剂投加的前馈-反馈复合控制

王冬生¹, 侯秀丽², 蒋福春³, 张雪³, 尤志磊³

(1. 南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京 210023; 2. 安徽商贸职业技术学院 电子信息工程系, 安徽 芜湖 241002; 3. 苏州市自来水有限公司, 江苏 苏州 215002)

摘要: 自来水厂药剂(矾、臭氧、氯)投加量直接关系到对应工艺(絮凝、臭氧氧化、氯化)单元的处理效果,以及水厂出水水质是否达标和优质。当进水水质和进水流量变化时,如何实时调整药剂投加量以保证对应工艺的处理效果是自来水厂制水工艺运行优化的难点。在进水流量比例控制的基础上,提出一种基于原水水质在线综合评价和内模控制(IMC)的前馈-反馈复合控制方法。原水水质在线综合评价用于实时评估原水水质状况,并将评价结果用于药剂投加的前馈控制中,使药剂投加量能根据原水水质变化进行实时调整。IMC 则用于药剂投加的反馈控制。实际水厂应用表明,与单纯 IMC 反馈控制相比,所提出的基于原水水质在线综合评价和 IMC 的前馈-反馈复合控制能更好地适应原水水质变化,有效提高了制水工艺的运行效率和出水水质的稳定性。

关键词: 自来水厂; 药剂投加; 原水水质在线综合评价; 内模控制; 前馈-反馈复合控制

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)17-0062-07

Feedforward-feedback Hybrid Control of Chemical Dosing in Waterworks

WANG Dong-sheng¹, HOU Xiu-li², JIANG Fu-chun³, ZHANG Xue³,
YOU Zhi-lei³

(1. School of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;
2. Department of Electronic Information Engineering, Anhui Vocational and Technical College of Commerce and Trade, Wuhu 241002, China; 3. Suzhou Tap Water Co. Ltd., Suzhou 215002, China)

Abstract: The chemical (alum, ozone and chlorine) dosage is directly related to the treatment effect of corresponding process units (flocculation, ozonation and chlorination) and the treated water quality at the waterworks. When the influent quality and flow changes, timely adjustment of the chemical dosage to ensure treatment efficiency is a challenge in operational optimization of the water treatment. A feedforward-feedback hybrid control method consisting of on-line comprehensive evaluation of raw water quality and internal model control (IMC) was proposed, based on the proportional control of water flow. On-line comprehensive evaluation of raw water quality provided the evaluation of the real-time condition of raw water quality, and were applied in the feedforward control of chemical dosing. The chemical dosage was adjusted in real-time in accordance with the raw water quality variation. IMC was adopted for the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51708299); 安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2018A0723); 苏州市科技计划项目(SS201803); 苏州市水利水务科技项目(2018007)

feedback control of chemical dosing. Experimental results showed that, in comparison with IMC feedback control, the proposed feedforward-feedback hybrid control of chemical dosing was better adapted to the variation of raw water quality, which effectively improved the operation efficiency of water treatment and the stability of treated water quality.

Key words: waterworks; chemical dosing; on-line comprehensive evaluation of raw water quality; internal model control; feedforward-feedback hybrid control

药剂(矾、臭氧、氯)投加控制直接关系到整个水厂制水工艺的处理效果。目前药剂投加控制主要采用流量比例前馈控制和PID反馈控制相结合,流量比例前馈控制通过设定与进水流量成一定比例的药剂投加量,迅速调整由于进水流量变化而产生的药剂投加量需求变化,PID反馈控制则根据出水指标(浊度、余臭氧、余氯)偏差进行药剂投加量的修正^[1-2]。但是这种控制方式仍然不能有效解决水质突变所带来的问题。

当上游来水水质、气候及气象条件发生变化以及突发污染事故时,水厂原水水质突变现象十分明显^[3-4],制水过程中药剂投加应随着原水水质的变化及时地进行调整,这样才能有效保证制水工艺的安全运行和出水水质的稳定。

反馈控制不能针对原水水质变化做出直接处理,而是根据出水指标测定值和设定值的偏差调整药剂投加量。而前馈控制能够根据原水水质变化及时调整药剂投加量,对原水水质变化进行直接主动的补偿^[5]。因此,设计基于原水水质综合评价的前馈控制环节,提高药剂投加过程针对原水水质变化的控制响应速度,对稳定水厂出水水质具有十分重要的现实意义。

自来水厂药剂投加过程具有非线性和大滞后的特点,常规的PID控制难以取得满意的控制效果,Smith预估控制作为控制大滞后过程的一种手段,由于在实际应用过程中存在鲁棒性和抗扰动性差的缺点,有学者提出增加低通滤波器来改善控制系统的鲁棒性,这在本质上可视为Smith预估控制的一种扩展,也是内模控制(IMC)的雏形。IMC是一种基于过程模型的控制方法,由于其设计简单、鲁棒性和抗扰动性能好而成为一种实用的先进反馈控制方法^[6]。笔者在流量比例控制的基础上,提出了一种基于原水水质在线综合评价和IMC的前馈-反馈复合控制方法。其中原水水质在线综合评价用于实时估计原水水质状况,并将评价结果用于药剂投加

的前馈控制中,提高自来水生产对原水水质变化的适应能力;IMC则用于药剂投加的反馈控制。

1 药剂投加过程

某水厂采用常规+臭氧/生物活性炭深度处理工艺,具体流程如图1所示。其中预臭氧阶段可以显著提高混凝沉淀效果,降低混凝剂用量,同时还增强了砂滤池对锰、铁和氨氮的去除作用。混凝阶段通过向水中投加混凝剂(矾)来使水中的杂质微粒形成较大的絮体,然后经过沉淀和过滤过程得到进一步去除^[7]。后臭氧阶段是深度处理工艺消毒和去除有机污染物的关键阶段,对于不能直接氧化去除的有机物,后臭氧阶段可将其氧化为易于生物降解的有机物,再通过后面的活性炭吸附和生物活性炭上微生物降解作用进一步去除。臭氧/生物活性炭联用技术将臭氧氧化、活性炭吸附和微生物降解作用融为一体,是处理有机物含量较高微污染原水的有效方法^[8]。最后,在清水池前端投加氯气来保证出厂水中含有一定浓度的余氯,对供水管网中滋生的细菌和微生物等二次污染物进行杀灭,保证居民用水安全^[9]。

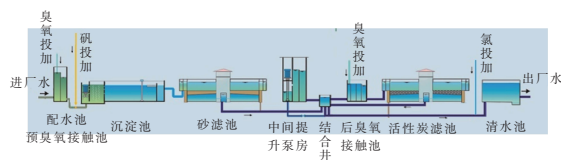


图1 常规+臭氧/生物活性炭深度处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of conventional process and ozone/biological activated carbon advanced treatment process

预臭氧阶段处理水中各种耗氧物质含量较高,所投加的臭氧很快消耗殆尽。矾投加、后臭氧投加(简称臭氧投加)、氯投加过程中,药剂在水中的衰减过程可近似为一阶动力学过程:

$$\frac{d[\cdot]}{dt} = k_c [\cdot] \quad (1)$$

式中:[·]为水中药剂浓度,mg/L; k_c 为衰减速度, min^{-1} 。

大量试验研究表明,衰减速度 k_c 与水温、pH 值和接触时间等因素有关^[10]。

2 原水水质在线综合评价

该水厂取水处位于太湖水源地的浅水水域,易因大风和暴雨天气而引起湖底泥沙泛起使得进水浊度升高。由于不同季节水生生物生长规律不同,水体中悬浮物含量不断变化。因而,水厂原水水质的季节性变化十分明显,其在 2016 年—2017 年水质状况如下:pH 值为 6.8~9.1,平均为 8.1;水温为 1.9~32.6℃,平均为 15.8℃;浊度为 9~191 NTU,平均为 26 NTU;DO 为 3.9~7.1 mg/L,平均为 4.9 mg/L;COD_{Mn} 为 1.9~5.2 mg/L,平均为 2.9 mg/L;

氨氮为 0.002~2.355 mg/L,平均为 0.222 mg/L;总磷为 0.002~0.546 mg/L,平均为 0.060 mg/L;总氮为 0.072~4.755 mg/L,平均为 1.211 mg/L;溴离子为 0.172~0.336 mg/L,平均为 0.237 mg/L。

根据对原水水质变化规律的研究,结合自来水厂生产运行数据分析,选取对自来水生产过程影响明显的 pH 值、水温、浊度、DO、COD_{Mn}、氨氮作为原水水质评价因子,制定了如表 1 所示的进厂原水水质综合评价标准。其中,综合评价结果是根据满足经济衡量和出水水质要求的经验药剂(矾、臭氧、氯)投加量确定的,I~IX 水质级别对应模型期望输出值为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9。

表 1 原水水质综合评价标准

Tab. 1 Comprehensive evaluation criteria for raw water quality

水质级别	pH 值	水温/℃	浊度/NTU	DO/(mg·L ⁻¹)	COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	矾优化投加量/(mg·L ⁻¹)	O ₃ 优化投加量/(mg·L ⁻¹)	氯优化投加量/(mg·L ⁻¹)
I	7.0	10	30	7	1.0	0.5	9	0.7	0.7
II	7.0	10	50	6	1.0	1.0	11	0.8	0.8
III	7.0	15	90	6	1.5	1.5	14	0.8	0.8
IV	7.5	20	40	6	2.0	0.5	8	0.8	0.8
V	7.5	25	60	5	2.0	1.0	10	0.9	0.9
VI	8.0	20	90	5	3.0	1.0	13	1.0	1.0
VII	8.5	25	80	5	3.5	1.5	7	0.9	0.9
VIII	8.0	30	90	4	3.5	1.0	9	1.0	1.0
IX	9.0	30	100	4	4.0	1.5	12	1.2	1.2

2.1 原水水质综合评价建模

原水水质综合评价方法的设计,关键是原水水质各参数同水质级别的非线性关系的建立,即原水水质综合评价模型的建立。本研究采用 SVM 方法建立原水水质综合评价模型。SVM 回归基于结构风险最小化原则,通过非线性映射将给定的输入数据集映射到一个高维特征空间,并在这个高维特征空间中进行线性回归^[11],SVM 模型结构见图 2。

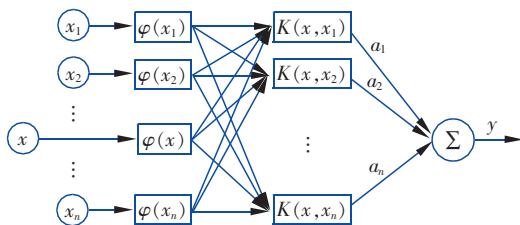


图 2 SVM 模型结构

Fig. 2 Structure of SVM model

给定训练样本集 $(x_1, y_1), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_l, y_l) \in R^n \times R$, 其中 x_i 为输入向量, y_i 为对应的输出

值, l 为样本集的大小。非线性映射函数 $\varphi(\cdot)$ 将初始输入空间 R^n 映射到高维特征空间 R^k : $\varphi(x) = [\varphi(x_1), \dots, \varphi(x_i), \dots, \varphi(x_l)]$, 其中 $k(k \gg n)$ 为高维特征空间的维数。SVM 回归函数可以描述为:

$$f(x) = \omega \cdot \varphi(x) + b \quad (2)$$

式中: $\omega = (\omega_1, \dots, \omega_i, \dots, \omega_k)$, 为权重向量; b 为偏置项。权重向量 ω 和偏置项 b 可通过最小正则化风险函数获得。

根据结构风险最小化原理,可知优化问题为:

$$\min \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^k \xi_i \quad (3)$$

式中: $\|\omega\|^2$ 为正则化项; $\sum_{i=1}^k \xi_i$ 为误差项; C 为正则化参数。

可以采用拉格朗日方法求解优化问题,则式(2)转化为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^k \alpha_i \varphi(x) \varphi(x_i) + b \quad (4)$$

式中: α_i 为拉格朗日乘子。

定义 $K(x, x_i) = \sum_{i=1}^k \varphi(x) \varphi(x_i)$ 为核函数,不

同的核函数可以构造出不同的 SVM 类型。常用的核函数有多项式核函数、Sigmoid 核函数、径向基 (RBF) 核函数,由于前两种核函数有 2 个待确定参数,而 RBF 核函数仅有 1 个待确定参数[见式(5)],并且由 3 种核函数构造的 SVM 总体性能相似,因此 RBF 核函数较为常用^[12],本研究即采用基于 RBF 核函数的 SVM 模型。

$$K(x, x_i) = \exp\left(-\frac{|x - x_i|}{\delta^2}\right) \quad (5)$$

SVM 参数(正则化参数 C 和核参数 δ)对模型性能有重要影响。若正则化参数 C 太大或太小, SVM 模型精度都会很低^[13];核参数 δ 与训练数据集的输入范围有关, δ 太大会导致过拟合, δ 太小会导致欠拟合。

PSO 算法是一种基于群体行为的智能搜索算法,算法模拟鸟群觅食行为,通过个体之间的集体协作和竞争来实现全局搜索。在 PSO 算法中,每个优化问题的解都是 n 维搜索空间中的一只鸟,称之为“粒子”,所有粒子都有一个由被优化函数决定的适应度,还有一个速度决定它们飞翔的方向和距离。PSO 具有记忆功能,所有粒子都保留了其最优解,并且追随当前的最优粒子在解空间中反复迭代搜索。在每一次迭代搜索过程中,粒子通过跟踪两个极值——个体最优值 p_i 和全局最优值 p_g 来更新自己的速度和位置,其速度和位置的更新方程为:

$$v_i^{(k+1)} = h^{(k)} v_i^{(k)} + c_1 r_1 [p_i^{(k)} - x_i^{(k)}] + c_2 r_2 [p_g^{(k)} - x_i^{(k)}] \quad (6)$$

$$x_i^{(k+1)} = x_i^{(k)} + v_i^{(k)} \quad (7)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$ (粒子总数); $v_i^{(k)}$ 为第 i 个粒子的当前速度; $h^{(k)}$ 为迭代权重; c_1 、 c_2 为加速常数; k 为迭代次数; r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的两个随机数; $x_i^{(k)}$ 为第 i 个粒子的当前位置。

迭代权重为:

$$h^{(k)} = (h_1 - h_2) (k_{\max} - k) / (k_{\max} + h_2) \quad (8)$$

式中: k_{\max} 为最大迭代次数; h_1 和 h_2 分别为初始迭代权重和最终迭代权重,分别取值 0.95 和 0.35,这样可使粒子群在初始阶段具有较好的全局搜索能力,而在后期具有较好的局部搜索能力。

粒子的适应度函数定义为:

$$\text{Fitness} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y_i)^2 \quad (9)$$

式中: N 为样本数; y_i 为参考输出值; y_i 为实际

输出值。

2.2 原水水质综合评价测试

将该水厂 2017 年度的原水水质参数数据以及满足经济衡量和出水水质要求的药剂投加量数据分成两部分:训练样本和测试样本。由于在不同季节和天气条件下原水水质不同,因此每部分样本的挑选都要有代表性,得到训练样本 200 组、测试样本 100 组。模型输出和期望输出的拟合优度通过 Theil 不等系数 (TIC) 来表示:

$$\text{TIC} = \frac{\sqrt{\sum_i (\hat{y}_i - y_i)^2}}{\sqrt{\sum_i \hat{y}_i^2} + \sqrt{\sum_i y_i^2}} \quad (10)$$

式中: \hat{y}_i 为模型输出值; y_i 为样本真实值。

训练好的 SVM 模型测试结果如图 3 所示。可以看出,原水水质综合评价模型能够较好地预测期望输出,其 TIC 值为 0.09,远低于 0.3,说明具有很好的模型性能^[14]。

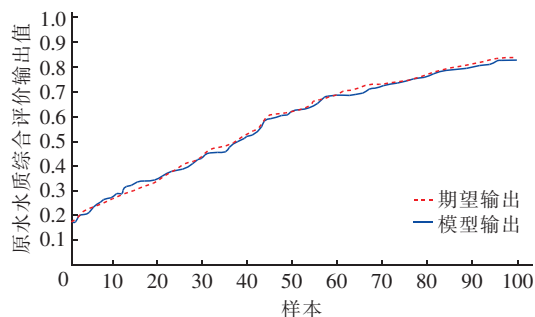


图3 SVM 模型测试结果

Fig.3 Testing results of SVM model

3 前馈-反馈复合控制方法

药剂投加后,其在水中的缓慢衰减可近似描述为一阶动力学过程。因此,以出水指标为被控变量、药剂投加量为控制变量,可以用一阶加时滞 (FOPTD) 的形式表示药剂投加过程模型 $G(s)$,其传递函数为:

$$G(s) = g(s) e^{-\tau s} \quad (11)$$

$$g(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (12)$$

式中: $g(s)$ 为最小相位部分; $e^{-\tau s}$ 为时滞部分; 放大系数 K 和时间系数 T 与水质和流量相关,可采用多元线性回归方法进行辨识;时滞时间常数 τ 与流量相关^[15]。

3.1 IMC 模型

IMC 的基本思想是将过程模型与实际过程并联,设计控制器逼近过程模型的逆,并通过增加滤波

器来增强控制系统的鲁棒性。IMC的基本结构如图4所示。其中, $U(s)$ 为控制变量, $Y(s)$ 为被控变量, $R(s)$ 为被控变量的设定值, $D(s)$ 为实际扰动, $B(s)$ 为包含模型匹配误差和扰动的反馈信号, $P(s)$ 为实际过程, $G(s)$ 为过程模型,虚线框内为内模控制器 $G_{\text{IMC}}(s)$, $G^{-1}(s)$ 为过程模型的逆, $F(s)$ 为滤波器。

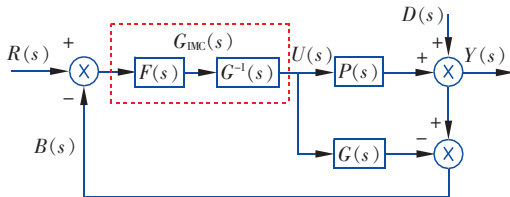


图4 IMC模型的基本结构

Fig. 4 Basic structure of IMC model

基本的内模控制器是在假定过程模型的逆可物理实现情况下的反馈控制器。但是在实际控制过程中,过程模型的逆有时候是不可物理实现的,比如本研究的药剂投加过程包含的滞后环节,其逆为超前环节,这在物理上是无法实现的,在设计这类过程的内模控制器时,需要先将过程模型分解为可逆部分和不可逆部分,对于式(11)所示的FOPTD模型而言, $g(s)$ 为可逆部分, $e^{-\tau s}$ 为不可逆部分。内模控制器可表示为:

$$G_{\text{IMC}}(s) = \frac{Ts + 1}{(\lambda s + 1)K} \quad (13)$$

滤波器参数 λ 的取值决定了闭环系统的响应速度和鲁棒性。 λ 越小,系统的跟踪响应速度就越快,但系统鲁棒性越差; λ 越大,系统的跟踪响应速度就越慢,但系统的鲁棒性就会越强。所以在设计内模控制器时, λ 的取值应兼顾系统的动态性能和鲁棒性。另外,由于药剂投加过程为一阶动力学过程,所以本研究中内模控制器的滤波器阶数选为1。

3.2 前馈-反馈复合控制模型

原水水质在线综合评价能够实时评价自来水厂

当前的原水水质状况,将评价结果作为前馈可以有效补偿原水水质变化对药剂投加过程的影响,从而达到适应原水水质变化的目的。将基于原水水质在线综合评价的前馈控制与基于IMC的反馈控制相结合,得到如图5所示的复合控制方案。

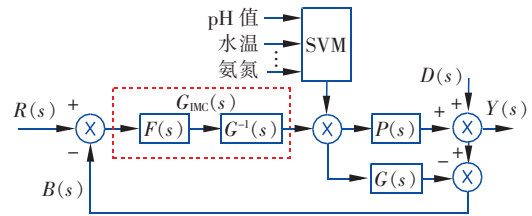


图5 前馈-反馈复合控制模型结构

Fig. 5 Structure of feedforward-feedback hybrid control model

3.3 验证结果及分析

药剂投加过程可近似为参数随进水水质和流量变化的FOPTD过程,本研究在水厂实际运行条件下通过试验测得1组矾投加、臭氧投加、氯投加过程模型,如式(14)~(16)所示。

$$P_1(s) = \frac{-1.78}{12.575s + 1} e^{-516s} \quad (14)$$

$$P_2(s) = \frac{0.38}{2.3s + 1} e^{-86s} \quad (15)$$

$$P_3(s) = \frac{0.27}{721s + 1} e^{-211s} \quad (16)$$

将式(14)~(16)代入式(11)可得相应的内模控制器表达式。

由于自来水生产过程的复杂性,尤其是水泵启停以及滤池反冲洗会对预臭氧接触池、沉淀池和后臭氧接触池的进水流量产生冲击,为了体现在线综合评价结果作为药剂投加前馈量的实施效果,选取流量较为稳定而水质变化较为明显的一段时间进行控制试验,结果如表2所示,其对应的控制响应性能指标见表3。

表2 原水水质在线综合评价结果

Tab. 2 On-line comprehensive evaluation results of raw water quality

项 目	时间/h	pH 值	水温/℃	浊度/NTU	溶解氧/ (mg · L ⁻¹)	COD _{Mn} / (mg · L ⁻¹)	氨氮/ (mg · L ⁻¹)	评价结果
IMC 反馈控制	0	7.9	15.2	72	4.5	2.7	0.355	0.47
	1	7.8	16.0	66	5.1	2.9	0.395	0.42
	2	8.0	16.1	60	5.3	3.2	0.350	0.45
	3	8.1	16.5	51	5.1	3.3	0.352	0.51
	4	8.1	16.5	65	5.5	3.3	0.411	0.59
	5	8.2	16.3	89	5.6	3.6	0.415	0.63

续表 2(Continued)

项 目	时间/h	pH 值	水温/℃	浊度/NTU	溶解氧/ (mg · L ⁻¹)	COD _{Mn} / (mg · L ⁻¹)	氨氮/ (mg · L ⁻¹)	评价结果
前馈 - 反馈 复合控制	0	8.1	16.3	87	5.7	3.5	0.505	0.61
	1	8.1	16.2	97	5.9	3.3	0.475	0.65
	2	8.2	16.0	105	6.0	3.2	0.676	0.68
	3	8.2	15.9	109	5.9	3.1	0.715	0.71
	4	8.0	15.9	95	5.8	3.3	0.803	0.66
	5	7.9	15.6	86	5.8	3.5	0.859	0.60

表 3 试验结果中的控制响应性能指标

Tab.3 Performance indices of control response for the experimental results

项 目	控制方案	超调量/%	IAE
沉淀池出水浊度	IMC 反馈控制	8.2	0.077 NTU
	前馈 - 反馈复合控制	6.2	0.062 NTU
臭氧接触池出水余臭氧浓度	IMC 反馈控制	4.1	0.055 mg/L
	前馈 - 反馈复合控制	2.5	0.042 mg/L
清水池出水余氯	IMC 反馈控制	2.3	0.040 mg/L
	前馈 - 反馈复合控制	1.3	0.029 mg/L

为了定量分析两种控制方案的控制性能,选取超调量和如式(17)所示的绝对误差积分(IAE)作为评价控制响应的性能指标。

$$IAE(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |r(k) - y(k)| \quad (17)$$

式中: $r(k)$ 为输出设定值; $y(k)$ 为实际过程输出值。

由表 3 可以看出,基于前馈 - 反馈复合控制的药剂投加过程的出水水质更加平稳。将原水水质在线综合评价结果作为药剂投加过程的前馈量,使得药剂投加量能够根据原水水质的变化及时做出调整,从而提高了出水水质的稳定性。

4 结论

提出了一种面向自来水生产过程的原水水质在线综合评价方法,并将其用于药剂投加的前馈控制中,使药剂投加量能够根据原水水质变化及时做出调整,从而稳定了水厂出水水质。由于提高了自来水生产过程对原水水质变化的适应能力,大大提升了自来水厂的生产运行和管理效率。

参考文献:

[1] 夏季春,陈冠益. 基于浊度回溯法探讨水厂药剂投加量优化区间[J]. 中国给水排水,2015,31(23):48 - 50.
Xia Jichun, Chen Guanyi. Discussion on optimization range of chemicals dosage in waterworks based on

turbidity backtracking method [J]. China Water & Wastewater,2015,31(23):48 - 50(in Chinese).

[2] 汪东,彭勇. 芜湖某水厂加氯设施自动化改造[J]. 中国给水排水,2018,34(1):135 - 138.

Wang Dong, Peng Yong. Retrofit of chlorination system in Wuhu water treatment plant [J]. China Water & Wastewater,2018,34(1):135 - 138(in Chinese).

[3] 史斌,姜继平,王鹏. 基于高频在线水质数据异常的突发污染预警[J]. 中国环境科学,2017,37(11):4394 - 4400.

Shi Bin, Jiang Jiping, Wang Peng. Early warning of water pollution incidents based on abnormal change of water quality data from high frequency online monitoring [J]. China Environmental Science, 2017, 37 (11) : 4394 - 4400(in Chinese).

[4] Deere D, Leusch F D L, Humpage A, et al. Hypothetical scenario exercises to improve planning and readiness for drinking water quality management during extreme weather events [J]. Water Res, 2017, 111 : 100 - 108.

[5] Kadri M B. Disturbance rejection in nonlinear uncertain systems using feedforward control [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2013, 38 (9) : 2439 - 2450.

[6] Sun X D, Shi Z, Chen L, et al. Internal model control for a bearingless permanent magnet synchronous motor based on inverse system method [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31 (4) : 1539 - 1548.

[7] Ahmad T, Ahmad K, Ahad A, et al. Characterization of water treatment sludge and its reuse as coagulant [J].

- Journal of Environmental Management, 2016, 182: 606 – 611.
- [8] 王占生, 刘文君, 董丽华. 饮用水深度处理的必要性与发展趋势[J]. 给水排水, 2014, 40(2): 1 – 5.
Wang Zhansheng, Liu Wenjun, Dong Lihua. Necessity and development of drinking water advanced treatment [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(2): 1 – 5 (in Chinese).
- [9] Ma X, Bibby K. Free chlorine and monochloramine inactivation kinetics of *Aspergillus* and *Penicillium* in drinking water[J]. Water Res, 2017, 120: 265 – 271.
- [10] Zamyadi A, Macleod S L, Fan Y, *et al.* Toxic cyanobacterial breakthrough and accumulation in a drinking water plant: A monitoring and treatment challenge[J]. Water Res, 2012, 46(5): 1511 – 1523.
- [11] Erfani S M, Rajasegarar S, Karunasekera S, *et al.* High-dimensional and large-scale anomaly detection using a linear one-class SVM with deep learning [J]. Pattern Recognition, 2016, 58: 121 – 134.
- [12] Cho G S, Gantulga N, Choi Y W. A comparative study on multi-class SVM & kernel function for land cover classification in a KOMPSAT-2 image [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(5): 1894 – 1904.
- [13] Ding S, Chen L. Intelligent optimization methods for high-dimensional data classification for support vector machines[J]. Intelligent Information Management, 2010, 2(6): 354 – 364.
- [14] Zhou X M. A new method with high confidence for validation of computer simulation models of flight systems [J]. Journal of Systems Engineering & Electronics, 1993, 4(4): 43 – 52.
- [15] Wang D S, Li S H, Zhou X P. Control-oriented modeling and real-time control for the ozone dosing process of drinking water treatment [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(5): 2197 – 2203.



作者简介: 王冬生(1983 –), 男, 山东武城人, 博士, 讲师, 研究方向为水处理工艺运行优化控制与智慧水务。

E – mail: wangdongsheng@njupt.edu.cn

收稿日期: 2019 – 02 – 12

