

给水处理投药控制的非线性数学模型及仿真

郭钰锋¹, 马 军², 于达仁³, 范 轶³, 翟学东²

(1 哈尔滨工业大学 电气工程及自动学院, 哈尔滨 150001, guoyufeng@hit.edu.cn; 2 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 3 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 为了更好地控制给水处理系统中的投药量, 本文用机理建模及分布参数系统建模的方法, 建立了可用于给水处理投药过程控制的数学仿真模型, 该仿真模型包括了给水处理过程中混凝、絮凝、沉淀 3 步最基本过程, 反映了水厂各设计参数对水处理投药控制效果的影响以及混凝药剂与絮凝池、沉淀池出水浊度之间的动态响应关系。仿真模拟了水厂原水浊度发生突变对絮凝池及沉淀池的出水浊度的动态影响, 仿真结果与实际水厂数据相近。研究结果可以用来进一步研究水处理过程控制, 为更深入研究适用于给水处理的非线性控制方法提供良好的模拟仿真分析平台。

关键词: 给水处理; 投药控制; 非线性数学模型; 分布参数系统

中图分类号: TU991.2

文献标识码: A

文章编号: 0367-6234(2009)05-0064-05

Nonlinear mathematic model and simulation on automatic control of dosage in water treatment system

GUO Yu-feng¹, MA Jun², YU Da-ren³, FAN Yi³, ZHA I Xue-dong²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, guoyufeng@hit.edu.cn; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. School of Energy Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to control the coagulant dosage better in water treatment systems, a mathematic model used for coagulant dosage control in water treatment process is established by the method of mechanism and distributed parameter system modeling. It includes the basic processes of a water treatment system, i.e. coagulation, flocculation and sedimentation. The dynamic response relations between the coagulant dosage and the water turbidity after flocculation and sedimentation can be obtained through this model, and the influence of water plant design parameters on water treatment effect can be analyzed by dint of simulation results of the model. The example results simulated by the model show the dynamic influence of the disturbance of incoming water on the water turbidity after flocculation and sedimentation, and it is close to the real experimental data in a water plant. This model can be used for water treatment control system and offers a good simulation and analysis platform for nonlinear control methods of water treatment.

Key words: water treatment; automatic control of dosage; nonlinear mathematic model; distributed parameter system

天然水中,除存在各种大颗粒悬浮物外,还有

大量的胶体微粒。为了净化原水,通常要在水中加入一定剂量的混凝剂,使原水中胶体脱稳,形成絮体,通过絮凝和澄清,以达到去除浊度、色度和各种有毒有害污染物,净化水质的目的。

在混凝剂品种选定、混凝设施水力条件一定的情况下,混凝剂投加量的多少直接影响混凝效

收稿日期: 2007-11-23

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (20060390233);
黑龙江省青年科学技术专项基金资助项目 (QC06C037)。

作者简介: 郭钰锋 (1977—),女,博士,讲师;
马 军 (1962—),男,教授,博士生导师;
于达仁 (1966—),男,教授,博士生导师。

果,也直接影响后续工艺的工作情况,更是水厂制水成本的直接影响因素^[1]. 建立于经典控制、现代控制和智能控制理论上的各种控制策略应用于混凝过程的控制个案十分丰富^[2~7],但由于絮凝过程和沉淀过程历时以小时计算,均为典型大滞后系统,给控制信号的采集及采取及时控制带来困难^[8,9]. 建立给水处理过程数学模型一方面可以使控制人员更好的设计控制算法以实现混凝药剂投放的最优化,另一方面还可以通过模型仿真代替昂贵的化学实验,能够更容易进行水厂改造及药剂改造.

水处理过程的数学模拟,是以大量的生产运行数据为基础,尤其是对各单元处理过程做大量而详尽的参数测试、动态分析,而且要求建立的模型既反映处理过程内在规律、各因素之间相互关系、又在数学上易于处理,并达到一定的模拟精度,因此具有一定难度. 文献[10]用实验数据分析的方式获得了混凝投药系统的传递函数,近似为纯滞后二阶惯性环节. 文献[11]结合一些较成功的应用范例探讨数学建模技术在混凝控制中的作用. 文献[12]通过对水厂水处理系统的简化和抽象,抓住影响其运行费用和处理效果的一些主要可控因素,从降低能耗、节省资金的角度,根据最优化的理论和方法,建立水处理系统优化运行数学模型,力求在保证产水质量的前提下,达到水处理费用最低和提高清水池水位两个目标.

本文用机理建模的方法,以普通水处理为例,

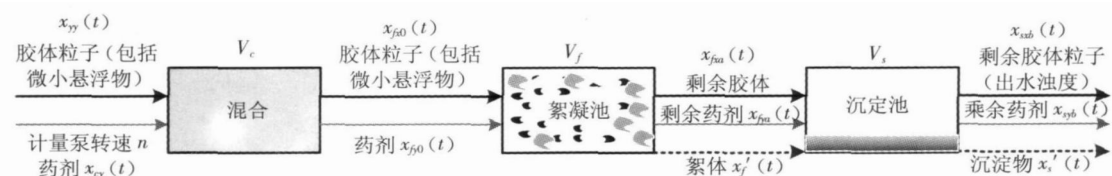


图 1 给水处理典型变量分布图

由于投药流量远远小于水厂的源水流量,所以水流量可以近似不变,只考虑投药浓度;假设每个池体的有效体积不变,则各池体的入口及出口水流量保持恒定,均为 q

1.1 混合过程模型

假设混合过程是水泵混合式的,混合时间为 t_c ($2 \sim 3$ s),取水泵房距水厂处理构筑物为 l_c (通常小于 150 m),管中流速为 v_c (通常为 $1.0 \sim 1.5$ m/s).

由上面的假设可知混合池体积为 V_c ,入水的胶体粒子浓度为 x_{cx} ,出水的胶体粒子浓度为 x_{cx1} ,水泵式混合池属于完全混合连续式反应器(CSTR),因为当反应物投入反应器后,经搅拌立

尝试建立可以用于控制的给水处理投药控制过程数学模型,使所得模型能够反映混凝药剂与沉淀池出水浊度之间动态响应关系,并能够通过该模型分析水厂各设计参数对水处理效果的影响,希望本文研究结果能够对水厂控制人员有所帮助.

1 给水处理过程非线性数学模型的建立

在确定混凝剂投量时,原水水质是主要的影响因素,不同的水源、水质成分,对投药量的影响程度可通过相关分析予以确定. 在系统优化运行中,沉淀池出水浊度是主要的调控变量,因此需要确定它与投药量的相关关系.

经典给水处理过程如图 1 所示,即原水需要经过混合、絮凝、沉淀 3 个过程,出水浊度的多少取决于整个过程的工艺数据及药剂浓度.

根据该物理过程可以得到系统的典型变量:

操作变量:投药计量泵的转速(控制投药量) n

干扰变量:水源水量 q

状态变量:混合前后的出水胶体粒子浓度及药剂浓度,表示为 $x_{cx}(t)$ 、 $x_{cy}(t)$ 、 $x_{fj0}(t)$ 、 $x_{fj0}(t)$;絮凝池的出水胶体粒子浓度及药剂浓度,表示为 $x_{fj0}(t)$ 、 $x_{fj0}(t)$;沉淀池的出水胶体粒子浓度及药剂浓度,表示为 $x_{sx_b}(t)$ 、 $x_{sy_b}(t)$.

输出变量:沉淀池出水浊度 $x_{sx_b}(t)$.

参数:混合池、絮凝池、沉淀池的体积,分别表示为 V_c 、 V_f 、 V_s ;絮凝池的最大反应速率 r_m .

即与反应器内的料液达到完全均匀混合,新的反应物连续输入,反应产物也连续输出,输出的产物其浓度和成分与反应器内的物料基本相同,所以池体内的胶体粒子浓度以混合池出口的浓度值来近似,即将混合池的快速混合阶段作为集中参数系统处理.

根据胶体粒子的流量平衡可得

$$V_c \frac{dx_{cx1}(t)}{dt} = qx_{cx}(t) - qx_{cx1}(t) \tag{1}$$

对式 (1)作拉氏变换可得:

$$\frac{X_{cx1}(s)}{X_{cx}(s)} = \frac{1}{(V_c/q)s + 1} \tag{2}$$

由式 (2)可知,混合过程是个惯性环节,其放大倍数为 1,时间常数为 V_c/q 当混合池有效体积

增大时,时间常数增大;当入水流量变大时,时间常数减小,即达到稳态值所需时间变小。

在取水泵及絮凝池之间的过程,是一纯延迟环节,延迟时间 $\tau_c = \frac{l}{v_c}$ (< 150 m/s),假设在絮凝池前的胶体粒子浓度计为 x_{cx} ,则满足公式:

$$x_{fx_0}(t) = x_{cx}(t - \tau_c),$$

对其进行拉氏变换可得

$$X_{fx_0}(s) = X_{cx}(s) e^{-\tau_c s}.$$

则混合池的胶体粒子变化的传递函数:

$$\frac{X_{fx_0}(s)}{X_{cx}(s)} = \frac{1}{(V_c/q)s + 1} \cdot e^{-\tau_c s}.$$

同上可得混合池入口及出口的药剂浓度的传函表达式为

$$\frac{X_{fy_0}(s)}{X_{cy}(s)} = \frac{1}{(V_c/q)s + 1} e^{-\tau_c s}.$$

1.2 胶体粒子及絮凝药剂絮凝过程模型

由上面假设知絮凝池体积为 V_f ,絮凝池进水的胶体粒子浓度为 x_{fx} ,出水的胶体粒子浓度为 x_{fx_i} .在我国大中型水厂中絮凝池通常采用水力搅拌式,即隔板式或折板式絮凝,这种反应器属于推流型反应器(PF型),对于隔板式絮凝池,可以假设有 a 个廊道串联,每一个廊道都可以作为完全混合连续式反应器处理,每个小单元的体积为 V_{fi} , $i \in [1: a]$,其分布参数模型:

$$A \Delta l_f \frac{dx_{fx_i}}{dt} = A v_f x_{fx_i} - A v_f (x_{fx_i} + dx_{fx_i}) + A r(x_{fx_i}) \Delta l_f.$$

式中: A 为液流横截面积, l_f 为絮凝池长度,水平流速为 v_f .

根据质量守恒方程,可以用集中参数建模方法获得第 i 个廊道的模型:

$$V_{fi} \frac{dx_{fx_i}(t)}{dt} = q x_{fx_{i-1}}(t) - q x_{fx_i}(t) + r_i(t) V_{fi}. \quad (3)$$

式中: $r_i(t)$ 为絮凝池内的絮凝反应速率,与粒子碰撞速率有关,考虑以同向絮凝为主,则 [絮凝速率] = -0.5 [碰撞速率],假设水中颗粒为均匀球体,则絮凝速率为 $-\frac{2}{3} m_x n_{fi}^2 d_{fi}^3 G_{fi}^{[13]}$, 其中: G_{fi} 为第 i 个絮凝池水的速度梯度, s^{-1} ; n_{fi} 为第 i 个絮凝池中单位体积水中脱稳的颗粒数量浓度; d_{fi} 为第 i 个絮凝池水的平均颗粒直径; m_x 是每个胶体粒子的平均质量。

所以式 (3) 可以进一步化简为

$$V_{fi} \frac{dx_{fx_i}(t)}{dt} = q x_{fx_{i-1}}(t) - q x_{fx_i}(t) - \frac{2}{3} m_x G_{fi}^2 n_{fi}^2 d_{fi}^3 V_{fi}. \quad (4)$$

水处理中混凝剂对水中胶体粒子的混凝作用有 3 种:电性中和、吸附架桥和卷扫作用。这 3 种作用究竟何者为主,取决于混凝剂种类和投加量、水中胶体粒子性质、含量以及水的 pH 值等。这 3 种作用有时会同时发生,有时仅其中 1~2 种机理起作用。考虑天然水中的胶体杂质通常是负电荷胶体,如粘土、细菌、病菌、藻类、腐殖质等,投入的混凝药剂多为铝盐与铁盐,所以其主要作用是压缩胶体双电层,即电中和作用。不管是哪种反应,胶体粒子的聚集稳定性均主要取决于投加混凝药剂的多少,若药剂投入不足,则部分胶体仍然会由于 ζ 电位过高而不能够聚集,所以式 (4) 中的 n_{fi} 取脱稳的颗粒数量浓度,如果混凝药剂投入足够,则 $n_{fi} = x_{fx_{i-1}}/m_x$,如果混凝药剂投入量不足,则 $n_{fi} = K_{xy} x_{fy_{i-1}}/m_x$,其中 K_{xy} 是药剂与胶体粒子发生反应的浓度比,取决于混凝剂的种类,例如对于负电荷胶体而言,为使胶体失去稳定性,“脱稳”所需不同价数的正离子浓度值比为: $[M^+] : [M^{2+}] : [M^{3+}] = 1 : (1/2)^6 : (1/3)^6$,所以对于 1 价正离子, $K_{xy} = 1$,对于 2 价正离子, $K_{xy} = 26$

在对絮凝过程仿真时,可以将 n_{fi} 取为

$$n_{fi} = \min(x_{fx_{i-1}}, K_{xy} \cdot x_{fy_{i-1}}) / m_x.$$

对式 (4) 进行拉氏变换可得:

$$X_{fx_i}(s) = \frac{1}{V_{fi}s + q} \left[q X_{fx_{i-1}}(s) - \frac{2}{3} m_x G_{fi}^2 n_{fi}(s)^2 d_{fi}^3 V_{fi} \right]. \quad (5)$$

同上可得混合池入口及出口的药剂浓度的传函表达式

$$X_{fy_i}(s) = \frac{1}{V_{fi}s + q} \left[q X_{fy_{i-1}}(s) - \frac{2}{3} m_y G_{fi}^2 n_{fy_i}(s)^2 d_{fi}^3 V_{fi} \right].$$

式中: m_y 是每个药剂颗粒的平均质量,

$$n_{fy_i} = \min(x_{fx_{i-1}}, K_{xy} \cdot x_{fy_{i-1}}) / m_y.$$

1.3 沉淀过程的胶体粒子絮凝反应模型

对于混凝投药控制过程,控制目标是通过控制投药量使出水浊度满足要求。因此在沉淀过程中,对于用于这种目的的数学模型需要考虑的仅是在沉淀池中继续发生的絮凝反应,因此可以认为沉淀的效果足够好,即可以假设沉淀过程足够长,即完全沉淀。所以若有胶体粒子在絮凝过程中没有絮凝完全,将会在沉淀过程中继续发生絮凝反应。

假设沉淀池体积为 V_s ,入水的胶体粒子浓度为 $x_{fx_a}(t)$,出水的胶体粒子浓度为 $x_{sx_b}(t)$,整个沉淀过程分为 j 个小单元, $j \in [1: b]$,每个沉淀单元中水速度梯度为 G_{sj} ,每个沉淀单元的有效体积为 V_{sj} , n_{sj} 为第 j 个絮凝池中单位体积水中脱稳的颗

粒数量浓度; d_{sj} 为第 j 个絮凝池水的平均颗粒直径, m_{sj} 为每个胶体粒子的平均质量. 则该过程数学模型如下:

$$X_{sxj}(s) = \frac{1}{V_{sj}s + q} \left[qX_{sxj-1}(s) - \frac{2}{3}m_{sj}G_{sj}n_{sj}(s)^2d_{sj}^3V_{sj} \right].$$

通过沉淀过程后, 若仍有胶体粒子不能够絮凝, 则会随着流水流出, 影响出口水的浊度.

由药剂与胶体粒子的反映当量关系可得沉淀

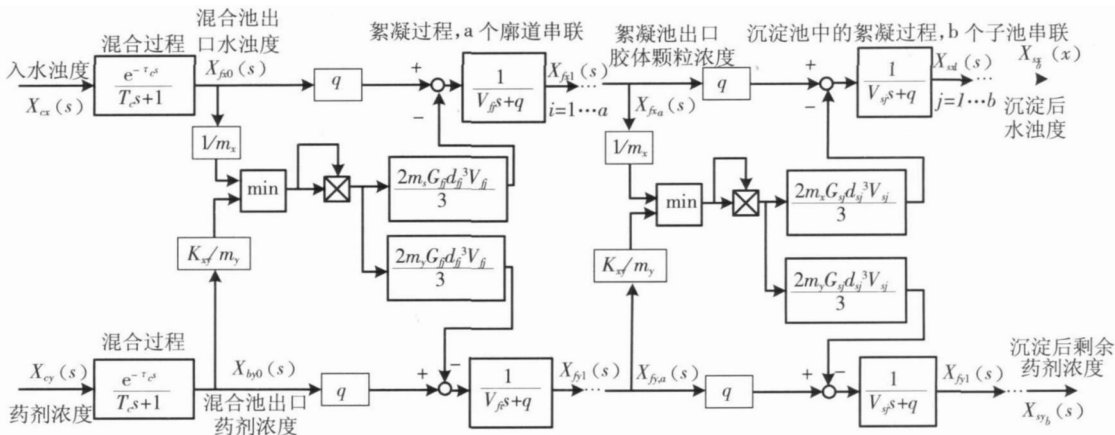


图 2 用于经典给水处理过程控制的非线性数学模型

2 模型仿真结果及非线性特性分析

以某水厂实际数据为例, 取各参数如下:

设日常水量 $75\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 混合池有效体积为 10 m^3 , 水泵房距水厂处理构筑物距离 3 m . 絮凝池为往复式折板絮凝池, 絮凝池宽度 22 m , 平均水深 2.8 m , 廊道宽度分成 4 段, 速度梯度为 50 s^{-1} , 絮凝池总长度为 19.7 m , 发生絮凝反应的胶体粒子直径 d_x 和 d_y 近似为 100 nm , 絮凝池的速度梯度为 50 s^{-1} , 能发生絮凝反应的胶体颗粒与药剂颗粒的平均质量取 $1.25 \times 10^{-20}\text{ g}$ 个. 在絮凝池的分布参数模型中, a 取 30 , 即按水流方向将絮凝池分为 30 个大小相等且相互串联的池子.

沉淀池为平流式沉淀池, 长 76 m , 宽 13.3 m , 有效水深 3.22 m , 速度梯度为 5 s^{-1} . 在沉淀池的分布参数模型中, b 取 30 , 即按水流方向将沉淀池也分为 30 个大小相等且相互串联的池子.

利用图 2 所示的仿真模型进行仿真, 投药量一直保持 5 mg/L , 初始水浊度分两种情况, 即如图 3 所示的曲线 1 和 2 天然水的 $\text{pH} = 7$ 左右, 在这种条件下絮凝药剂在水中起主要作用的为一价正离子, 则 $K_{xy} = 1$

在 3 h 内, 水浊度发生了如图 4、5 所示的变化, 图 4 为相应的随时间变化的絮凝池出口及沉淀池出口的浊度变化情况, 图 5 为原水浊度初值

池入口及出口的药剂浓度的传函表达式为

$$X_{syj}(s) = \frac{1}{V_{sj}s + q} \left[qX_{syj-1}(s) - \frac{2}{3}m_{fyi}G_{sj}n_{syj}(s)^2d_{sj}^3V_{sj} \right].$$

1.4 给水系统经典过程仿真模型

通过以上对各部分分别建模, 可以得到用于经典给水处理过程控制的非线性数学模型传函框图如图 2 所示.

不同的时候絮凝池出水浊度过渡时间对比曲线图. 对应图 4、5 所示的曲线表明当原水浊度发生突变时, 絮凝池的稳定时间大概为半小时左右, 这与实际情况相符. 而且对于仿真所给的药剂剂量与水厂浊度数值, 该水厂实测的稳态值与仿真值也相符, 由于絮凝池出水浊度不易测量, 因此在图 4 中仅给出沉淀池的出水浊度试验数据对比曲线. 由仿真曲线表明当原水浊度发生突变时, 初值增大时, 会影响絮凝池及沉淀池的出水浊度开始值, 但不影响最终稳态值, 最终稳态值取决于最后的药剂浓度与原水浊度. 同时, 若投药量过大, 则会使沉淀池出水中未反应药剂剂量增加, 从而影响水质.

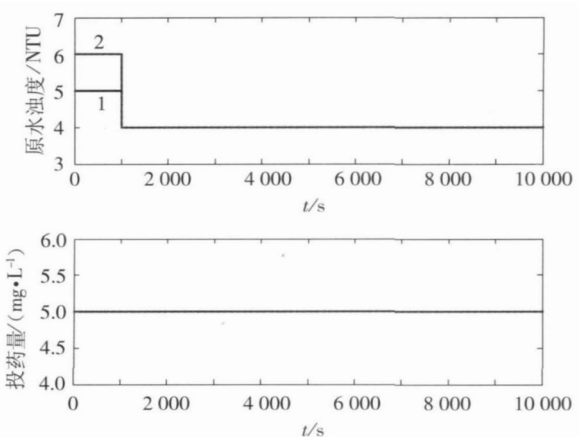


图 3 混合前水浊度及投药量

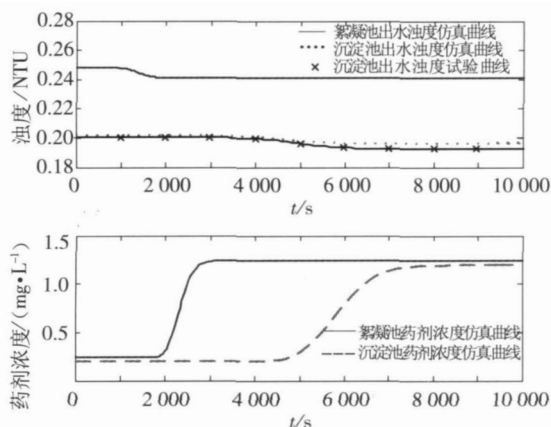


图 4 对应曲线 1 的絮凝池及沉淀池出水浊度和投药量随时间变化曲线

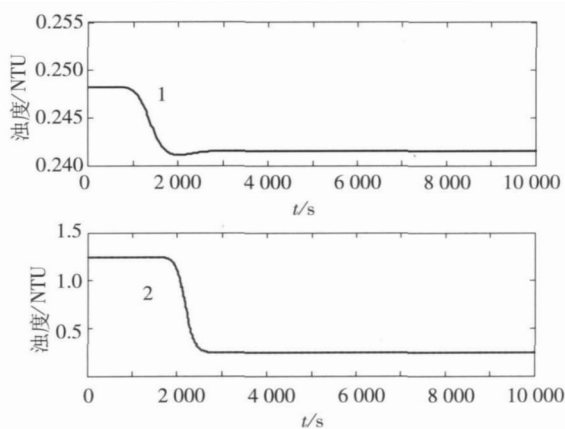


图 5 原水浊度初值不同时絮凝池出水浊度过渡时间对比曲线

从图 5 中还可以看出,当投药量恒为 5 mg/L 时,当原水浊度初值较高时,过渡时间比较短,反之,则过渡时间长.由此看出,原水浊度初值与絮凝过程响应时间成反比,此为图 2 所示模型的非线性特性之体现.

3 结 语

用机理建模的方法,建立了可用于普通水处理控制的经典过程数学模型,得到了能够反映混凝药剂与沉淀池出水浊度之间的动态响应关系,并能通过该模型分析水厂各设计参数对水处理效果的影响.研究结果可用来进一步研究水处理过程控制,针对不同的使用目的可以对该模型进行适当的线性化处理,从而可以用来分析一些线性化控制手段在水处理过程中的应用效果.同时,针

对该数学模型的一些非线性因素也可以更深入研究适用于给水处理的非线性控制方法,从而为水厂自动控制发展提供良好的模拟仿真分析平台.

参考文献:

- [1] 杨开明,张建强,杨小林. 混凝沉淀过程中最佳混凝剂投量的研究 [J]. 工业水处理, 2005, 25 (9): 49 - 51.
- [2] 王瑞红,高美凤. 模糊控制在水厂混凝投药过程中的应用 [J]. 控制系统, 2006, 22 (2 - 1): 29 - 31.
- [3] 李孟,南军,熊云,等. 透光率脉动絮凝检测混凝投药自动控制技术的研究 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32 (2): 43 - 46.
- [4] 南军,李圭白. 新型混凝投药智能复合环控系统 [J]. 中国给水排水, 2001, 17 (9): 49 - 51.
- [5] COX C S, DAN IEL P, ADGAR A. Chemical dosing philosophies for a water treatment plant: results of some pilot plant experimentation [J]. IEE UKACC International Conference on Control 96, 1996, 427: 1052 - 1057.
- [6] 杨万东,石颖,吕宏德. 水厂自动控制中串级调节的应用研究 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1998, 31 (5): 13 - 15.
- [7] 白桦,李圭白. 混凝投药的神经网络控制方法 [J]. 中国给水排水, 2001, 27 (11): 21 - 23.
- [8] 冯骞,汪岁羽,於浩. 水量对流动电流混凝投药控制系统的影响 [J]. 河海大学学报, 2003, 31 (5): 505 - 508.
- [9] 南军,李圭白. 透光率脉动混凝投药自控系统设定值影响因素研究 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32 (6): 19 - 23.
- [10] 南军,杨艳玲,李圭白. 透光率脉动絮凝投药自控系统动态模型 [J]. 中国给水排水, 2003, 19 (13): 88 - 90.
- [11] 黄兴德,于萍,罗运柏. 混凝控制中的数学模型及其工业应用 [J]. 工业用水与废水, 2001, 32 (4): 4 - 7.
- [12] 张宏伟,傅玉芬,牛志广. 水处理系统优化运行数学模型及其求解方法的研究 [J]. 天津大学学报, 2004, 23 (3): 1 - 5.
- [13] 严煦世,范瑾初. 给水工程 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006.

(编辑 赵丽莹)