

A/O脱氮工艺中内循环控制策略的建立与研究

彭永臻¹, 马 勇², 王洪臣³, 甘一萍³, 杨向平³

(1.北京工业大学 北京市水环境恢复重点实验室, 北京 100022;

2.哈尔滨工业大学 市政与环境工程学院, 哈尔滨 150090; 3.北京市城市排水集团公司, 北京 100061)

摘 要: 为了在 A/O(anoxic/oxic)脱氮工艺中对内循环进行有效的控制, 将好氧区生成的硝酸氮回流到缺氧区, 实现氮的有效去除, 在分析了反硝化反应对进水 COD 利用效率及反硝化速率影响因素的基础上, 得出内循环控制策略就是控制内循环回流量以维持缺氧区末端硝酸氮质量浓度处于最优设定值 2.5 mg/L, 研究表明该设定值具有很强的鲁棒性, 不随进水负荷变化而变化, 出水硝酸氮和总氮质量浓度可以实现最低值, 同时可大大降低内循环能耗。在上述分析的基础上建立了内循环模糊控制器以期实现污水厂的智能控制。

关键词: A/O 脱氮工艺; 内循环控制策略; 模糊控制器

中国分类号: X 703.1

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2004)02-0201-06

生物脱氮需要 2 个步骤: ①硝化反应, 即在好氧条件下将氨氮转化为亚硝酸氮或硝酸氮的过程; ②反硝化反应, 即在缺氧环境下以有机碳源为电子供体将硝化过程中产生的亚硝酸氮或硝酸氮转化为氮气的过程, 所以在 A/O 脱氮工艺中需把好氧区生成的硝态氮混合液回流到缺氧区, 反硝化反应才会顺利进行, 因而, 如何有效控制硝化液回流量(简称内循环)是 A/O 脱氮工艺的重要研究方向。研究表明在线控制内循环可以提高硝酸氮和总氮去除效率, 降低它们的出水质量浓度, 并提出了不同控制策略^[1]: 如控制缺氧区末端硝酸氮质量浓度维持在较低水平, 并通过 ORP 来指示硝酸氮质量浓度的高低; 控制进水 $\rho(\text{COD})/\rho(\text{TN})$ 保持在合适的水平以满足反硝化所需碳源, 进而控制硝酸氮的去除, 很明显这些控制策略无法实现精确的在线控制, 不适合工业控制。作者通过对 A/O 工艺内循环控制的目的和反硝化反应对进水 COD 利用效率的详细分析, 获得内循环控制策略, 并对其进行了模拟和研究, 最后建立了内循环模糊控制器。

1 内循环控制策略的提出

内循环控制目标主要有 2 个, 一是降低出水硝酸氮和总氮质量浓度, 二是降低内循环所需能耗。在当前水体富营养化问题日益加剧以及公众环保意识日益加强的现状下, 城市污水厂的排放标准日益严格, 鉴于此, 内循环控制应在满足第 1 个目标的前提下, 再考虑第 2 个目标。另外在生物脱氮污水厂, 反硝化反应经常受进水可生物降解有机物的限制, 为有效降低出水硝酸氮质量浓度, 提高对进水 COD 的利用效率尤其显得重要, 具有重大的经济意义和环境效益。

下面通过对 A/O 脱氮工艺反硝化反应对进水 COD 利用效率的分析来获得内循环控制策略^[2]。进水中可生物降解 COD(以 bCOD 表示)由 2 部分组成: 溶解性 bCOD_R 和颗粒性 bCOD_X, 所占比例分别以 β 和 $1-\beta$ 表示。当 bCOD 进入反应器后 bCOD_X 迅速被污泥絮体吸附, 而 bCOD_X 只有水解后才可利用, 但其水解速度很慢, 会随水流进入好氧区, 所以好氧区和缺氧区都可以利用一部分 bCOD_X, bCOD_X 的利用量与缺氧区和好氧区体积大小成比例关系。对于 bCOD_R 大部分会在缺氧区作为反硝化反应电子受体去除, 但仍有一小部分不可避免进入好氧区, 假设比例为 $1-\eta$ 的 bCOD_R 进入好氧区, 因而进水中比例为 $\eta\beta +$

收稿日期: 2004-03-03。

基金项目: 国家“八六三”计划资助项目(2003AA601010); 国家“十五”攻关课题(2002BA860B04)。

作者简介: 彭永臻(1949-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士, 博士生导师。

$\alpha(1-\beta)$ 的 bCOD 会在缺氧区去除(α 表示缺氧区和好氧区的体积比), 比例为 $(1-\eta)\beta + (1-\alpha)(1-\beta)$ 的 bCOD 会在好氧区去除.

然而由于反硝化菌的生长, 一部分 bCOD 被微生物同化或者成为微生物胞内储存物(其比例为 Y_H , Y_H 代表细胞产率系数), 所以在缺氧区去除的 bCOD 只有比例为 $1 - Y_H$ 的被反硝化反应利用. 另外微生物内源呼吸会有一部分细胞性 bCOD 被反硝化利用, 其比率为 $Y_H - Y_{H,obs}$, $Y_{H,obs}$ 为表观产率系数, 可由下式获得

$$Y_{H,obs} = \frac{1 + f_p b_H \theta_x}{b_H \theta_x + 1} Y_H$$

式中: b_H , θ_x , f_p 分别代表异养菌衰减速率、污泥停留时间和微生物细胞内所含惰性 COD 的比例.

根据以上分析, 可以得到 A/O 脱氮工艺进水中 bCOD 可被反硝化反应利用的比例为

$$\gamma = (1 - Y_H) [\beta \eta + \alpha (1 - \beta)] + \alpha (Y_H - Y_{H,obs}) = (1 - Y_H) \eta \beta + \alpha [1 - \beta (1 - Y_H) - Y_{H,obs}] \quad (1)$$

式中: $(1 - Y_H) \eta \beta$ 指在缺氧区去除的 bCOD_R; $(1 - Y_H) \alpha (1 - \beta)$ 指在缺氧区去除的 bCOD_K; $\alpha (Y_H - Y_{H,obs})$ 指在缺氧区内去除的细胞性 COD.

因此在 A/O 脱氮工艺中通过控制内循环最大程度地去除硝酸氮, 就是使值足够大, 在上式中 Y_H , $Y_{H,obs}$ 和 β 均与内循环无关, 因此加大 γ 就是加大 η 和 α , 也就是按如下 2 个规则控制内循环, 规则 1: 保证缺氧区硝酸氮充分, 充分利用缺氧区反硝化潜力(即加大 α 的值), 如 Londong 采取的控制措施是控制内循环保证反硝化区出水硝酸氮质量浓度处于一个非 0 但较低的值^[1]. 如果缺氧区硝酸氮质量浓度为 0, 此时缺氧区处于厌氧状态, 使得缺氧区反硝化潜力没有充分被利用, 另外如果硝酸氮质量浓度太低, 基本以内源反硝化为主, 而内源反硝化速率很低, 这些都会导致出水总氮质量浓度过高, 所以缺氧区出水硝酸氮质量浓度不能低于 1 mg/L. 规则 2: 降低溢流到好氧区 bCOD_R 的量(即加大 η 值). 如果采用 ASM1 模型设定值, $Y_H = 0.8$, $b_H = 0.2$, $f_p = 0.2$, $\theta_x = 7.8$, $\beta = 0.24$ 则式(1)变为: $\gamma = 0.048 \eta + 0.542 \alpha$, 这表明规则 1 相对于规则 2 对参数影响更大, 所以内循环控制策略的关键就是满足规则 1 的条件.

由于内循环控制的主要目的是为了降低出水总氮质量浓度, 也即在缺氧区最大程度地去除硝酸氮, 提高反硝化速率, 而反硝化速率可以表示为: $r_d(\tau) = r_{d,end}(\tau) + r_{d,ex}(\tau)$, $r_{d,end}(\tau)$ 代表内源反硝化, 以 bCOD_K、胞内储存物和细胞性 COD 为有机碳源, 可以看出它和内循环无关; $r_{d,ex}(\tau)$ 代表外源反硝化, 以 bCOD_R 为有机碳源, 因而加大进水中 bCOD_R 的利用效率, 可以提高 $r_{d,ex}(\tau)$, 这也和加大 γ 值相符合, $r_{d,ex}(\tau)$ 可表示为:

$$r_{den} = \mu_{H,max} \frac{S_{S,AN}}{K_S + S_{S,AN}} \frac{S_{NO,AN}}{K_{NO} + S_{NO,AN}} X_{BH} \quad (2)$$

式中: r_{den} 代表反硝化速率; S_{NO} 代表硝酸氮质量浓度; S_S 代表有机物质量浓度; 下标 AN 代表缺氧区; K_S 和 K_{NO} 分别代表 S_S 和 S_{NO} 的半饱和常数; $\mu_{H,max}$ 代表最大比增长速率; X_{BH} 代表异养菌污泥质量浓度. 由该式明显看出 r_{den} 受内循环的影响: 当内循环流量增加时, 大量的硝化液回流到缺氧区, S_{NO} 值将会提高, 而 S_{bCOD} 将会降低. 因此需要控制内循环提高 r_{den} 值. 从规则 1 可知缺氧区出水硝酸氮质量浓度 S_{NO} 控制很重要, 本文通过分析获得最优硝酸氮质量浓度设定值 $S_{NO,ref}$ 为 2.5 mg/L, 而 ASM1 中 K_{NO} 的值为 0.5, 所以 r_{den} 值基本上不受 S_{NO} 的限制, 此时 S_{bCOD} 成为限制反硝化速率的因素, 而采用规则 1 控制内循环可以充分利用进水中 bCOD, 这和提高反硝化速率是一致的. 综上所述, 内循环控制策略的实质就是控制内循环回流量以维持缺氧区末端硝酸氮质量浓度处于最优设定值 $S_{NO,ref}$, 它可充分利用进水中 bCOD, 提高缺氧区反硝化潜力, 降低溢流到好氧区 bCOD_R 的量.

2 实验方法

实验模型采用 COST 682 工作组提供的污水厂控制策略模拟标准 (WWTP Benchmark)^[3]. 它由 5 部分组成, 模型装置 (plant layout)、工艺仿真模型 (process model)、进水负荷 (influent load)、测试步骤 (test procedure) 和评价标准 (evaluation criteria). 该标准开发的初衷是因为不同国家都有各自的污水排放标

准,另外在控制策略研究过程中所采用的进水水质、工艺等条件都不同,为了比较研究者们提出的大量控制策略,开发了该国际标准,它的提出可以对污水处理系统控制策略进行公平的评价和分析. 其实验装置如图1所示,由5个格室组成的A/O工艺,前2个格室缺氧运行,后3个格室好氧运行,其中缺氧区体积为2 000 m³,好氧区体积为4 000 m³,二沉池体积为6 000 m³,采用国际水协协会ASM1活性污泥模型^[4]及Takacs提出的二沉池模型^[5]. 在本研究过程中,控制好氧区DO为2 mg/L,污泥排放量为300 m³/d,污泥回流量为18 446 m³/d,其他条件采用标准提供值.

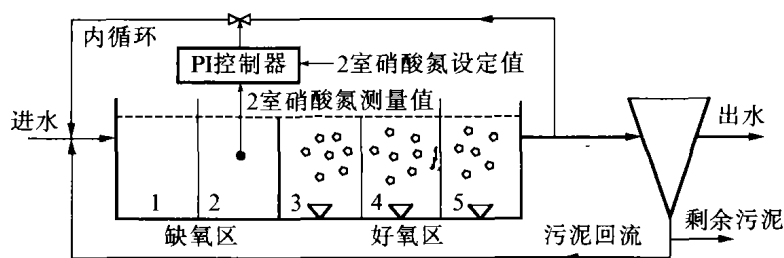


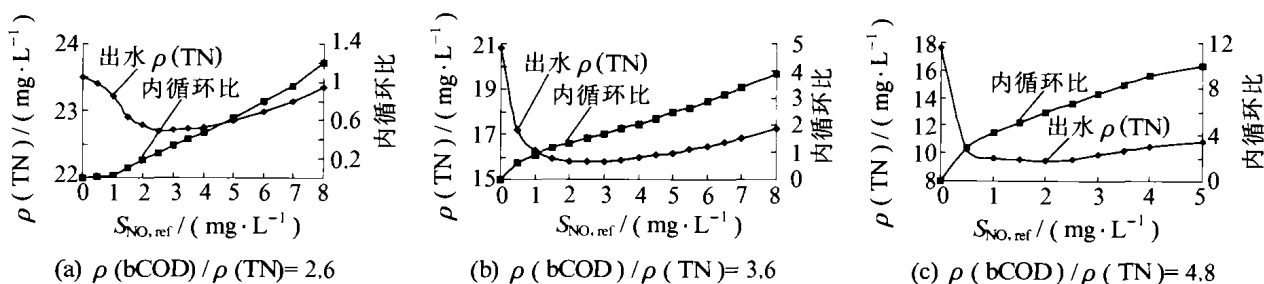
图1 内循环控制策略示意图

Fig.1 Schematic diagram of internal recirculation control strategy system

3 实验研究

3.1 最优设定值的确定

Yuan等人通过实验研究获得缺氧区末端硝酸盐质量浓度的最优 $S_{NO,ref}$ 值为2 mg/L^[2]. 为了获得缺氧区末端硝酸盐质量浓度的最优设定值以及最优设定值的稳定性,应用了3种进水负荷,分别是(a) $\rho(COD) = 300$ mg/L,进水 $\rho(bCOD)/\rho(TN) = 2.6$; (b) $\rho(COD) = 380$ mg/L,进水 $\rho(bCOD)/\rho(TN) = 3.6$; (c) $\rho(COD) = 480$ mg/L,进水 $\rho(bCOD)/\rho(TN) = 4.8$. 如图2所示,无论进水有机碳源如何变化,是否充足,当 $S_{NO,ref}$ 为2.5 mg/L时出水总氮质量浓度最低,同时出水硝酸盐质量浓度也最低. 另外随着 $S_{NO,ref}$ 设定值的增加,内循环回流量逐渐增大,但并不是内循环回流量越大,出水硝酸盐和总氮质量浓度越低,而是不同进水负荷对应一个最佳内循环回流量,所以恒定内循环回流量或内循环回流比的策略是不可取的,这也证明了内循环控制策略的必要性和重要性.

图2 不同 $S_{NO,ref}$ 对应的出水总氮质量浓度和内循环比Fig.2 Effluent total nitrogen concentration and internal recycle rate of different $S_{NO,ref}$

当进水有机碳源相对不足时出水总氮质量浓度很高(如图2(a)),尽管控制内循环维持缺氧区硝酸盐质量浓度为2.5 mg/L时,出水总氮质量浓度最低,但出水总氮质量浓度依然很高,为了进一步降低出水总氮质量浓度,需要外投碳源;当进水碳源相对过量时,硝酸盐质量浓度设定值为1 mg/L(如图2(c)),出水总氮质量浓度已经很低,并且硝酸盐质量浓度设定值在1~3 mg/L之间选定时出水总氮质量浓度都很低,如果不限内循环回流比,获得的最优硝酸盐质量浓度设定值依然是2.5 mg/L,但此时对应的内循环回流比为7,而大的内循环对应着大的能耗,这时需要考虑内循环第2个控制目标内循环能耗的大小,因此需从出水总氮和能耗两方面确定最优硝酸盐质量浓度设定值. 综上所述,获得最优硝酸盐质量浓度设定

值为 2.5 mg/L 。但需注意当进水有机碳源不足和正常时选用硝酸氮质量浓度设定值为 2.5 mg/L ，当进水有机碳源过量时最优硝酸氮质量浓度设定值，一般确定为 1 mg/L 。

3.2 控制策略的稳定性

为了考察内循环控制策略的稳定性和鲁棒性，应用标准 Constinfluent 进水负荷， $S_{\text{NO},\text{ref}}$ 设定值取最优值 2.5 mg/L ，以工业中广泛应用的 PI 控制器，分别改变进水有机物质量浓度 S_s 、进水氨氮质量浓度来考察该策略对外界干扰因素的响应能力。从图 3 和 4 可见，尽管进水有机物和氨氮质量浓度有巨大的波动，通过调节内循环回流量，缺氧区末端硝酸氮质量浓度 $S_{\text{NO},2}$ 都可以维持在最优设定值 2.5 mg/L ，这说明该控制策略具有良好的动态品质、抗冲击负荷能力强，很适合城市污水厂实时在线控制。

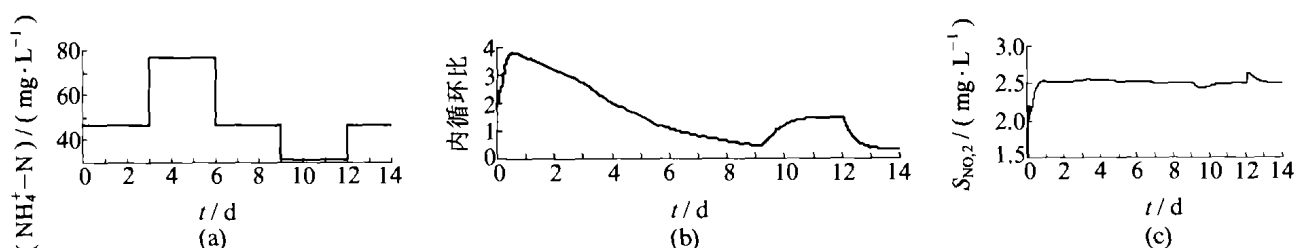


图3 改变进水氨氮质量浓度，内循环控制策略的响应能力
Fig.3 Response capacity of internal recirculation control strategy
with the change of influent ammonia concentration

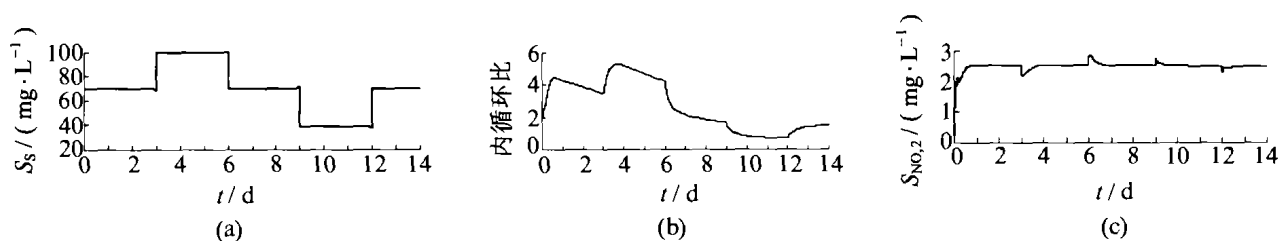


图4 改变进水有机物质量浓度，内循环控制策略的响应能力
Fig.4 Response capacity of internal recirculation control strategy
with the change of influent organic substance concentration

3.3 采用控制策略的效果

最后应用标准 Dryinfluent 进水负荷，研究了未采用（指维持内循环回流比 3 不变）和采用内循环控制策略时系统对硝酸氮和总氮的去除情况以及第 2 格室硝酸氮质量浓度的变化（见图 5）。图 5 (a) 为采用和未采用控制策略时出水硝酸氮的变化情况，由图可知采用控制策略后出水硝酸氮质量浓度大大降低，未采用控制策略时出水硝酸氮质量浓度为 11.88 mg/L ，而采用控制策略后出水硝酸氮质量浓度为 10.73 mg/L ，因而系统出水硝酸氮去除效率提高了 9.7% 。图 5 (b) 为采用和未采用控制策略时出水总氮的变化情况，由图可知采用控制策略后出水总氮质量浓度大大降低，未采用控制策略时出水总氮质量浓度为 17.08 mg/L ，而采用控制策略后出水总氮质量浓度为 16.00 mg/L ，去除效率提高了 6.3% 。图 5 (c) 为采用和未采用控制策略时第 2 格室硝酸氮质量浓度的变化情况，由图可知采用控制策略后，缺氧区第 2 格室硝酸氮质量浓度总能维持在 2.5 mg/L ，而未采用控制策略时缺氧区最后格室硝酸氮质量浓度很高，达到 7.6 mg/L ，由式 (2) 可得，导致出水硝酸氮质量浓度提高。图 5 (d) 为采用和未采用控制策略后内循环比的变化情况，由图可得采用控制策略后内循环回流比平均值为 1.80 ，相对于恒内循环回流比为 3 ，节约了 40% 的能耗。所以无论从内循环能耗方面和出水硝酸质量浓度方面，采用控制策略都具有巨大的优势，可明显提高系统脱氮效率，大大节省内循环所需能耗。实验室研究表明该内循环控制策略可以大大提高 A/O 脱氮工艺的脱氮效率，降低内循环能耗以及出水总氮质量浓度。

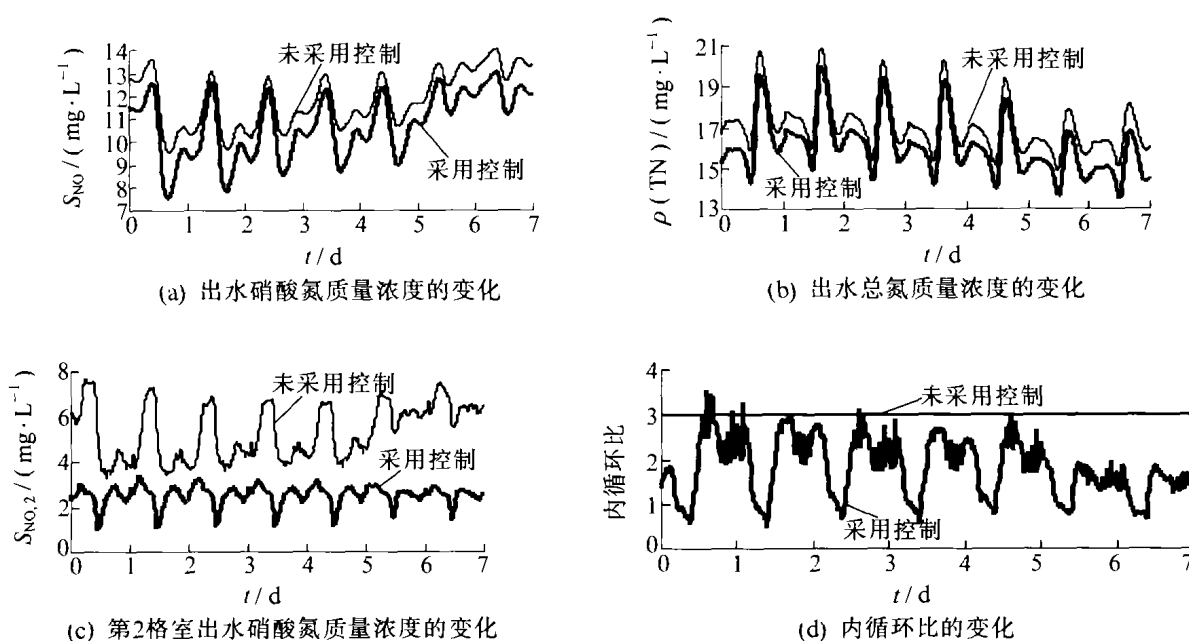


图5 采用内循环控制策略的效果

Fig.5 Effect of using internal recirculation control strategy system

3.4 内循环模糊控制器的建立

作者获得的内循环控制策略是控制内循环回流量以维持缺氧区末端硝酸氮质量浓度处于最优设定值 2.5 mg/L, 虽然应用传统 PI 控制器可以获得很好的效果, 但污水生物处理系统是复杂的多输入多输出动态系统, 具有非线性、时变性、随机性和模糊性, 难以建立准确的数学模型, 而模糊控制理论是解决这类复杂系统的有效工具。

为了使处理水中硝酸氮和总氮质量浓度满足给定的水质标准, 尽可能减少运行费用, 使控制系统实现尽可能简单易行, 作者以第 2 格室硝酸氮质量浓度 S_{NO_2} 作为被控制量, 以内循环回流量作为控制变量。以在线测定的 S_{NO_2} 与给定的最优设定值 $S_{\text{NO}_2, \text{ref}}$ (2.5 mg/L) 的偏差 E_i 和一个采样周期后该偏差 E_i 的变化量 CE_i 这两者的综合信息作为模糊控制器的输入变量 (即被控制量)。根据这个输入变量, 经过模糊控制器的计算、判断与决策, 作为模糊输出变量的是内循环流量的变化量 ΔU_i , 将 ΔU_i 进行非模糊化处理, 得到实际控制量, 以上就是内循环模糊控制器, 另外还需要反复修正原有的模糊控制器, 使其控制品质越来越好, 逐渐趋于最优控制。实验研究表明应用内循环模糊控制器的效果优于 PI 控制器。

4 结 论

A/O 脱氮工艺中需要通过内循环将好氧区生成的硝酸氮回流到缺氧区才能实现氮的有效去除, 因而内循环回流量的控制尤为重要。作者通过 A/O 脱氮工艺对进水有机碳源的利用效率分析, 获得内循环控制策略就是控制内循环硝化液回流量维持缺氧区末端硝酸氮质量浓度处于最优设定值, 以达到高效利用缺氧区反硝化潜力。通过对 3 种进水负荷的研究, 从内循环能耗和出水总氮质量浓度两方面分析获得最优设定值是 2.5 mg/L, 并由 PI 控制器, 通过 MATLAB/Simulink 模拟表明, 该控制策略可以迅速响应进水负荷的变化, 具有良好的动态品质, 易于工业应用, 仅需 1 个硝酸氮在线传感器即可在污水厂中建立内循环控制系统, 显著提高污水厂脱氮效率。内循环控制策略的建立为当前污水厂的良好运行及在线控制提供了一条有效的方法。最后建立了内循环策略模糊控制器, 它具有结构简单、可控性好的优点, 相信模糊控制是实现污水厂未来控制最有效手段。

参考文献:

- [1] LONDONG J. Strategies for optimized nitrate reduction with primary denitrification[J]. Wat Sci Tech, 1992, 26(5-6): 1087-1096.
- [2] YUAN Zhi-guo, OEHMEN A, INGLDSEN P. Control of nitrate recirculation flow in predenitrification systems[J]. Wat Sci Tech, 2002, 45(4-5): 29-36.
- [3] ALEX J, BETEAU J F, COPP J B, et al. Benchmark for Evaluating Control Strategies in Wastewater Treatment Plants[R]. Karlsruhe, Germany: European Control Conference, 1999. 1-8.
- [4] HENZE M, GRADY C P L, GUJER W, et al. IAWQ Activated Sludge Model No.1[R]. London: IAWQ, 1996. 1-15.
- [5] TAKACS I, PATRY G G, NOLASCO D. A dynamic model of the clarification thickening process [J]. Wat Res, 1991, 25(10): 1263-1271.

Development and Study of Internal Recirculation Flow Control Strategy in A/O Nitrogen Removal Process

PENG Yong-zhen¹, MA Yong², WANG Hong-chen³, GAN Yi-ping³, YANG Xiang-ping³

(1. Beijing Key Laboratory of Water Environment Recovery, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

2. Faculty of Municipal and Environmental Engineering, Harbin institute of Technology, Harbin 150090, China;

3. Beijing Urban Sewage Group, Beijing 100061, China)

Abstract: In order to effectively control internal recirculation flow in A/O (anoxic/oxic) nitrogen removal process, i.e., to make nitrate produced in aerobic zone flow to anoxic zone so as to achieve the effective removal of oxygen, according to the analysis about utilization efficiency of the influent biodegradable COD for nitrate removal and denitrification rate influence factors, the internal recirculation flow control strategy is built, that is, maintaining nitrate concentration at the end of anoxic zone at the best setpoint 2.5 mg/L by controlling nitrate recirculation flow. Studies show that the setpoint appears to be robust towards variation in the influent characteristics; effluent nitrate and total nitrogen concentration can be remained the lowest value, and markedly reduce energy consumption of internal recirculation. In order to achieve intelligent control of wastewater treatment plants, the internal recirculation flow fuzzy controller is developed.

Key words: A/O nitrogen removal process; internal recirculation flow control strategy; fuzzy controller