

· 计算机技术 ·

基于指标体系的污水处理单元自动控制策略性能评价研究

郑超蕙¹ 谢继荣² 葛勇涛² 曾思育¹ 陈吉宁¹ 何 苗¹

(1 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044)

摘要 在现有研究成果的基础上, 考虑我国的污水处理特点, 强调监管部门提出的节能降耗要求, 给出了一套新的控制策略性能综合评价指标体系。该指标体系由目标层、变量层和指标层构成, 指标层为最底层, 含有 9 个可量化的指标, 分别为达标因子、超标因子、能耗因子、物耗因子、受控变量追踪失败因子、操作频繁因子、操作幅度因子、出水峰值因子、出水波动因子。给出了单个指标计算方法以及性能评价综合指数计算方法。以曝气单元的 DO 末端控制和沿程控制策略评价比较为例, 对该指标体系进行了案例应用, 证明了该指标体系的实用性和可操作性。

关键词 污水处理 自动控制策略 指标体系 节能降耗 评价

Indicator-system-based performance evaluation of wastewater treatment unit control strategies

Zheng Chaohui¹, Xie Jirong², Ge Yongtao², Zeng Siyu¹, Chen Jining¹, He Miao¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: In the paper, taking account of the Chinese characteristics of wastewater treatment and the requirements of energy saving and consumption reduction from Chinese government, a new indicator system has been established for performance evaluation of wastewater treatment unit control strategies. The evaluation indicator system consists of three levels: aim, variable and indicator level. The indicator level is the bottom level, which includes 9 quantitative indicators, such as standard compliance index, standard incompliance index, energy cost index, chemical consumption index, controlled variable track failure index, manipulation frequency index, manipulation range index, effluent peak index, and effluent flocculation index. The calculation method of each index and the integration method of the performance index have been brought forward. The indicator system has been applied to evaluate aeration end control and along control strategies, and the results have shown the feasibility and practicability of the indicator system.

Keywords: Wastewater treatment; Automatic control strategies; Indicator system; Energy saving and consumption reduction; Evaluation

0 引言

大量的国际工程实践经验证明^[1], 随着污水处理行业的发展, 自动控制系统正在逐步替代传统的

经验、手动控制, 在污水处理厂日常运行管理中发挥着越来越重要的作用。在自动控制系统的应用中, 选择科学合理的控制策略是系统成功运行的关键环节。

国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAC19B06)。

近年来, 诸多学者致力于污水处理过程自动控

制策略的研究,取得了丰富成果^[1,2]。以曝气控制为例,有基于曝气段末端 DO 和氨氮浓度的控制策略^[3],基于 DO 沿程变化的前反馈联合控制策略^[4],基于快速生物活性测定的反馈控制策略^[5]和基于线性模型预测氨氮的前馈控制策略^[6]等。控制策略的多样性除了所利用的过程信息类型不同之外,还体现在采用了不同复杂程度的控制算法^[7],既有过程

控制中常用的 PID 方式,也有人工神经网络、模糊控制、专家系统等复杂算法^[8]。

为确定合适的控制策略,定量评价其性能是必要的。与开展大规模现场测试相比,数值模拟由于具有时间短、成本低等特点而成为控制策略评价的必要手段。

为了能够实现公平客观的策略比较,国际水协

表1 性能评价指标及其计算方法

目标	变量	指标	指标计算方法
达标运行 指数 I_1	出水达标 EQ	达标因子 eq_1	$\begin{cases} \text{若 } \exists x_i, Z, f(x_i) > a, \text{ 则 } eq_1 = 1 \\ \text{若 } \forall x_i, Z, f(x_i) \leq a, \text{ 则 } eq_1 = 0 \end{cases}$ x_i 为评价时段中的时间采样点; Z 为评价时段; $f(x_i)$ 为 x_i 时的出水当量浓度 ^[10~12] , 根据 x_i 时的出水浓度计算获得, $f(x_i) = 0.25TSS + COD + 2BOD_5 + 20 \text{ 氨氮} + 20 \text{ 硝酸氮} + 100TP$; a 为排放标准当量浓度, 即出水当量限值, 计算方法同上, 只是用排放标准代替出水浓度
		超标因子 eq_2	$eq_2 = \sum_{i=0}^N t_i / N, \text{ 其中, } t_i = \begin{cases} 1, & f(x_i) > a \\ 0, & f(x_i) \leq a \end{cases}, N \text{ 为采样点总数}$
	节能降耗 CS	能耗因子 ENE	$ENE = \gamma_1 AE + \gamma_2 ME + \gamma_3 RE + \gamma_4 PE$ 其中, AE 、 ME 、 RE 、 PE 分别为曝气能耗、搅拌混合能耗、内外循环能耗和污泥处置能耗评价因子, γ_i 是各部分能耗评价因子的权重, 参照实际污水处理厂中能耗组成比例确定 $AE = \begin{cases} ae/ae_0, & 0 < ae < ae_0 \\ 1, & ae \geq ae_0 \\ 0, & ae_0 = ae = 0 \end{cases}$ 其中, ae 、 ae_0 分别为有、无控制策略时的曝气能耗值; 其他能耗评价因子计算方法同 AE
		物耗因子 CON	$CON = \lambda_1 EC + \lambda_2 PC + \lambda_3 SC$ 其中, EC 、 PC 和 SC 分别为外加碳源、化学除磷和污泥处理的物耗评价因子, 算法同 AE 。 λ_i 是各部分物耗评价因子的权重, 可采用等权重方式确定
	受控变量 CV	追踪失败 因子 TF	$TF = \sum_{i=0}^N t_i' / N, \text{ 其中 } t_i' = \begin{cases} 1, & tf(x_i)/sp(x_i) \geq 1.1 \text{ 或 } tf(x_i)/sp(x_i) \leq 0.9 \\ 0, & 0.9 < tf(x_i)/sp(x_i) < 1.1 \end{cases}$ $tf(x_i)$ 表示采样点 x_i 的受控变量值, $sp(x_i)$ 表示该时刻的受控变量设定值
稳定运行 指数 I_2	操作变量 MV	操作频繁 因子 CF	$CF = \sum_{i=0}^N n(x_i) / N, \text{ 其中 } n(x_i) = \begin{cases} 1, & mv(x_{i+1}) - mv(x_i) > 1\% \overline{mv(x_i)} \\ 0, & mv(x_{i+1}) - mv(x_i) \leq 1\% \overline{mv(x_i)} \end{cases}$ $mv(x_i)$ 表示采样点 x_i 的受控变量值
		操作幅度 因子 CR	$CR = \begin{cases} 1, & b \geq 5 \\ 0.8, & 3 \leq b < 5 \\ 0.5, & 1 \leq b < 3 \\ 0, & b < 1 \end{cases} \quad b = \max \left[\frac{mv(x_{i+1})}{mv(x_i)} \right]$
	出水变化 EV	出水峰值 因子 PV	$PV = \begin{cases} 0, & \max[f(x_i)] \leq a \\ 1 - a/\max[f(x_i)], & \max[f(x_i)] > a \end{cases}$
		出水波动 因子 VC	$VC = \begin{cases} 1, & vc \geq 3 \\ 0.8, & 2 \leq vc < 3 \\ 0.5, & 1 \leq vc < 2 \\ 0, & vc < 1 \end{cases} \quad vc = \frac{\sqrt{\sum_{i=0}^N f(x_i) - \overline{f(x_i)} ^2}}{\overline{f(x_i)}} \cdot \frac{N-1}{N}$

IWA 推出了标准化模拟平台 Benchmark 以用于控制策略的模拟和评价研究^[9]。该平台除了提供具有标准化的工艺流程、进水文件、输出模式的模拟工具外,还推荐了一套性能评价指标。与此同时,国内外学者在建立性能评价指标方面还进行了其他研究^[5,7,9]。这些评价过程各有特色,但也存在不足,例如有的研究只关注出水水质,考察运行成本时不够全面,忽视对控制回路性能的评估,等等。

不仅如此,由于评价体系不能充分体现我国的实际状况,尤其是新时期提出的节能降耗要求,因此在借鉴这些研究成果的时候仍需要做进一步的探讨。

本文在现有研究成果基础上,结合我国的污水处理特点,强调控制策略在保证水质达标前提下对节能降耗的贡献,提出了一套新的控制策略性能综合评价指标体系,并进行了案例应用。

1 评价指标及其计算方法

以 IWA 提出的污水处理自动控制系统应完成的各项任务^[1,7]为基础,本研究提出了制定指标体系时应遵循的基本原则:在性能评价中应当突出既要稳定运行又要经济运行的要求,即以出水达标为首要目标,再额外强调节能降耗目标和系统的稳定性;对能耗物耗的计算应尽可能完整全面;保证所选取的变量在数值模拟和实际工程中具有可获得性;指标体系应该能够层层分解,便于用户了解单个属性的性能表现。

基于以上原则,构建了如表 1 所示的评价指标体系。该体系由目标层、变量层和指标层构成。

根据指标计算方法可知,指标层的所有指标均在 0~1 之间取值,且越接近于 0,控制策略的性能越好。通过对指标层的等权重加和可以得到变量层和目标层的结果,最终可以得到性能评价综合指数 IPI 的值,计算方法如下所示。

$$EQ = (eq_1 + eq_2) / 2 \quad (1)$$

$$CS = (ENE + CON) / 2 \quad (2)$$

$$CV = TF \quad (3)$$

$$MV = (CF + CR) / 2 \quad (4)$$

$$EV = (PV + VC) / 2 \quad (5)$$

$$I_l = (EQ + CS + CV) / 3 \quad (6)$$

$$I_l = (MV + EV) / 2 \quad (7)$$

$$IPI = (I_l + I_2) / 2 \quad (8)$$

2 案例研究

以两条曝气控制策略为例,对指标体系进行案例研究。

2.1 控制策略描述

案例将对比末端 DO 反馈控制策略(简称末端控制策略)和沿程 DO 反馈控制策略(简称沿程控制策略)的性能表现。两条策略均采用简单的闭合回路控制,每个闭合回路都具有相同的控制结构,见图 1,以 DO 测量值和设定值的差作为指示阀门开度或鼓风机转速变化的变量。它们之间的不同在于回路的数量,末端控制策略仅在曝气区末端设一个控制回路(见图 2),保证出水 DO 浓度不过高。而沿程控制策略则沿曝气区平行设置了 3 个回路(见图 3),分别控制每一段的 DO 浓度,保证曝气容积被充分地利用,污染物在曝气池中沿程均匀地被降解。

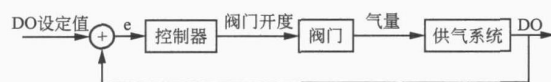


图 1 简单闭合回路控制策略示意

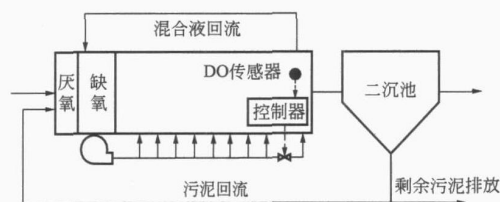


图 2 末端 DO 控制策略的空间示意

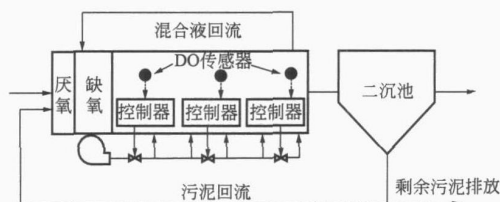


图 3 沿程 DO 控制策略的空间示意

2.2 评价结果

采用 Benchmark 平台对两条控制策略进行效果模拟,生化过程用 ASM1 模型,生化和沉淀模型参数及控制回路的 PID 参数均采用 Benchmark 默认值。进水条件选用标准的旱季进水文件,进水

水质呈周期性变化,以 COD 和氨氮为例,如图 4 和图 5 所示。

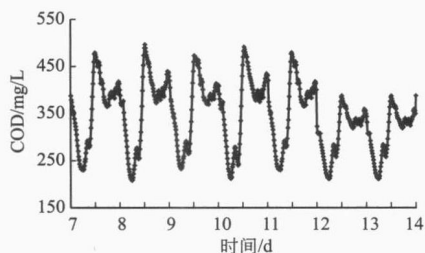


图 4 进水 COD 变化

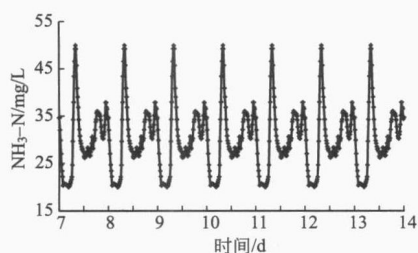


图 5 进水氨氮变化

出水标准采用《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 标准,由此可以得到排放标准当量浓度 a 为 372.5 mg/L。需要说明的是模拟中未考虑生物除磷过程,因此也不考察除磷效果。模拟结果如图 6~11 所示。

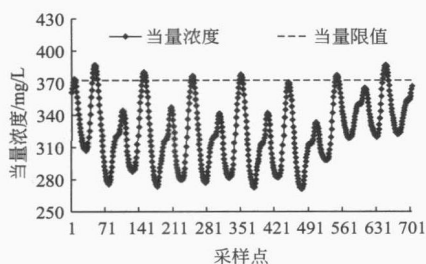


图 6 末端控制策略下的出水水质

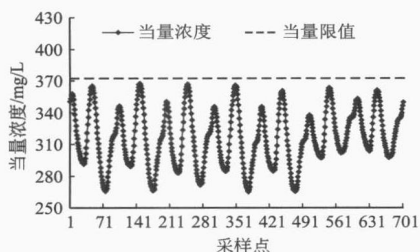


图 7 沿程控制策略下的出水水质

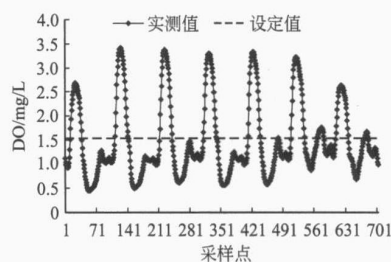


图 8 末端控制策略下受控变量的变化

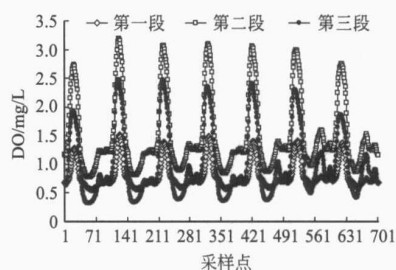


图 9 沿程控制策略下受控变量的变化

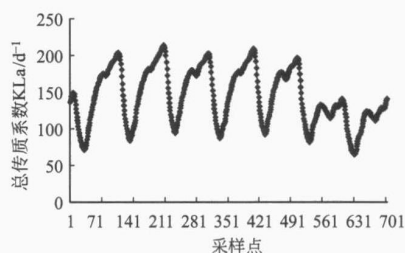


图 10 末端控制策略下操作变量的变化

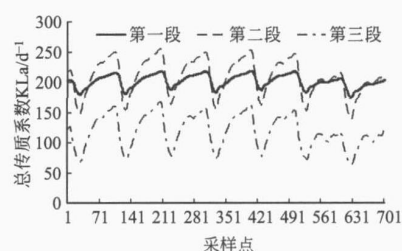


图 11 沿程控制策略下操作变量的变化

将策略模拟的结果带入表 1 中的指标计算公式进行计算,结果如表 2 所示。表 2 显示沿程控制策略下的各项性能均优于末端控制策略,尤其在出水水质方面实现了稳定达标排放,而末端控制策略则有个别时段超标排放。其次在操作变量的稳定运行方面,沿程控制 DO 也有利于整体供气量的平稳化。在节能降耗方面,沿程控制策略优于末端控制,这与受控变量的评价结果相一致。在

出水的稳定方面,两者的表现基本相同,显然进水波动造成的影响要大于控制策略的作用。总的来看,采用沿程控制策略要比末端控制策略达到更好的处理效果,节约更多的能量,更利于设备的平稳运行。

表 2 曝气单元不同 DO 控制策略性能比较

策略名称	EQ	CS	CV	MV	EV	IPI
末端控制	0.538	0.924	0.899	0.544	0.419	0.634
沿程控制	0.000	0.900	0.869	0.398	0.400	0.494

3 结论

(1) 本文建立了一套用于综合评估污水处理过程自动控制策略的指标体系。体系由目标层、变量层和指标层构成,包含了对达标运行和优化运行两大目标的评估。

(2) 该体系可以自底层逐层集成,最终得到综合性能评价指数 IPI 作为性能评价结果。各层指标的计算结果均为 0~1 间的无量纲数,且越接近于 0,性能越佳。

(3) 以两条曝气控制策略为例,应用了综合评估指标体系。结果显示了两条策略在出水水质、节能降耗、控制回路性能等各个方面的差异,得到了合理的评估结果。

参考文献

- Olsson G, Nielsen M K, Yuan Z G. Instrumentation, control and automation in wastewater systems. IWA Scientific and Technical Report NO. 15, London, UK: IWA Publishing, 2005
- Henze M, van Loosdrecht M, Brdjanovic D. Biological wastewater treatment: the Textbook. London, UK: IWA Publishing, 2008
- Suescun J, Ostolaza X, Garcia-Sanz M, et al. Real-time control strategies for predenitrification-nitrification activated sludge plants biodegradation control. Water Science and Technology, 2000, 43 (1): 209~216
- Ekman M, Bjoerlenius B, Andersson M. Control of the aeration volume in an activated sludge process using supervisory control strategies. Water Research, 2006, 40 (8): 1668~1676
- 邱勇. 快速生物活性测定方法的仪器化与控制策略研究:[学位论文]. 北京:清华大学环境科学与工程系, 2003
- Darko Vrčko, Nadja Hvala, Aljāz Stare, et al. Improvement of ammonia removal in activated sludge process with feedforward-feedback aeration controllers. Water Science and Technology, 2006, 53 (4-5): 125~132

- Stare A, Vrecko D, Hvala N, et al. Comparison of control strategies for nitrogen removal in an activated sludge process in terms of operating costs: A simulation study. Water Research, 2007, 41: 2004~2014
- 杨志, 梅小艳. 污水处理中基于仿人智能的 DO 参数控制系统. 智能控制技术, 2006, 2: 100~104
- Copp J B, Spanjers H, Vanrolleghem P A. Respirometry in control of the activated sludge process: benchmarking control strategies. IWA Scientific and Technical Report No. 11, London, UK: IWA Publishing, 2002
- <http://www.ensic.inpl-nancy.fr/benchmarkWWTP/Bsm1/Benchmark1.htm>. 2008~3~25
- Vanrolleghem P A, Jeppsson U, Carstensen J, et al. Integration of WWT plant design and operation: A systematic approach using cost functions. Water Science and Technology, 1996, 34 (3~4): 159~172
- Benedetti L, Dirckx G, Bixio D, et al. Environmental and economic performance assessment of the integrated urban wastewater system. Journal of Environmental Management, In Press, Corrected Proof, 2007. 1~11

□ E-mail: szeng@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2008-09-10

修回日期: 2009-01-14

亚洲最大污泥处理设施全面开建

目前亚洲规模最大的污泥处理设施——白龙港污泥处理工程,已进入全面建设阶段。建成后,上海中心城区污水处理厂 50% 的污泥将得到循环利用。

作为上海争创“国家环保模范城市”的重要配套工程,总投资约 6.8 亿元的白龙港污泥处理工程,将对白龙港污水处理厂每天处理 200 万 m³ 污水中产生的污泥进行浓缩、消化、脱水 and 干化。其中,污泥消化产生的沼气还将循环用于脱水、干化等阶段,大大节约了处理成本。按照设计,工程建成后污泥处理量可达 204 t/d。

整个工程预计今年年底完成主体建设,2010 年 3 月底前进行设备安装和调试,确保工程在世博会前发挥效应,优化上海城市环境。

另据了解,目前竹园污泥处理工程也在做开工的前期准备,到 2012 年建成后,上海中心城区污水处理厂的污泥都将得到有效处理。

(杨琦)