



模糊控制强化生物除磷 SBR 系统的除磷过程^①

崔有为^② 王淑莹 朱 岩* 李桂星* 彭永臻^③

(北京市水质工程与水质恢复重点实验室 北京 100022)

(*中国市政工程东北设计研究院大连分院 大连 116600)

摘 要 采用在线 ORP 和 pH 仪对两个平行的强化生物除磷(EBPR)SBR 反应系统的厌氧放磷、缺氧吸磷和好氧吸磷过程进行监测。针对聚糖菌(GAO)和聚磷菌(PAO)的竞争和影响 PAO 和反硝化聚磷菌(DPAO)的各种因素,验证了以氧化还原电位(ORP)和 pH 作为除磷过程模糊控制参数的可行性和有效性。在此基础上,确立了厌氧/好氧(A/O)SBR 系统和厌氧/缺氧(A²) SBR 系统除磷过程的模糊控制策略。对 ORP 和 pH 的在线检测不仅可以模糊控制厌氧放磷、缺氧吸磷和好氧吸磷过程所需时间,节约能源优化处理效果,而且可以指示系统运行效果和功能微生物种群的竞争行为。

关键词 模糊控制, 强化生物除磷, SBR, 缺氧吸磷, GAO, DPAO

0 引 言

随着排水水质要求的不断提高,以防止受纳水体富营养化为目的的增强生物除磷工艺已经在越来越多的污水处理厂得到应用。生物除磷主要依靠一类聚磷微生物(PAO)对磷生理代谢来完成。早期研究认为 PAO 只有在好氧条件下才能生长和吸磷^[1]。但是,最近的研究已经证明聚磷菌中有部分反硝化聚磷菌(DPAO)可以利用硝酸盐作为电子受体在缺氧条件下进行吸磷^[2,3]。相比传统的利用专性好氧吸磷细菌除磷工艺,反硝化除磷菌能分别节省约 50%和 30%的生化需氧量(COD)与氧的消耗量,相应减少了 50%的剩余污泥量^[4]。利用两种微生物的生物除磷工艺很多,间歇式活性污泥法(SBR)已经被证明是可以稳定替代连续流的除磷工艺^[5],更重要的是可以利用 SBR 工艺操作灵活的特点实现 PAO 和 DPAO 的积聚^[6]。

SBR 日益增长的应用刺激了以优化过程和节约能耗为目的自动控制研究。研究发现,模糊控制作为一种高级的控制方法具有控制规则透明化和控制过程简单化的优点,迎合操作者的使用要求,具有强劲的应用潜力^[7]。尤其从发现在线 pH、氧化还原电位(ORP)和溶解氧(DO)浓度值与 SBR 系统内污染

物浓度存在动力相关性^[8]以来,解决了实时过程控制缺少稳定控制参数的困难。以 pH、ORP 和 DO 值作为脱氮过程的控制参数得到了广泛的研究和确认^[9,10],但是由于除磷过程和除磷机理复杂,过程控制研究极其有限。

基于这一研究现状,本研究的主要目标是监测厌氧/好氧(A/O)和厌氧/缺氧(A²)SBR 系统除磷过程的 pH 和 ORP 值,确认以 pH 和 ORP 值作为除磷过程控制参数的可行性和有效性。并相应给出除磷过程的模糊控制策略。

1 材料与 方法

1.1 工艺与设备

两个平行的 SBR 处理系统工艺(图 1)由反应器系统和监测控制系统组成。生活污水引至水箱(1),经过提升泵(2)的提升,经进水管(3)进入反应器(4),反应器有效体积为 10 升。缺氧和厌氧的混合由搅拌器(5)完成。而好氧的充氧是由曝气泵(6)在转子流量计(7)控制流速下由微孔曝气头布气完成。控制系统主要由输入/输出信号系统和中心控制器组成。输入系统的作用是利用在线数据采集装置(8)采集 pH(9)、ORP(10)和 DO(11)的探头监测的数据通过数据总线(13)输入到中心控制器(12)中进行

处理。控制器发出的输出指令通过输出总线(14)控制执行设备(如进水泵、搅拌器和曝气泵)完成控制要求。具体驯化期间运行周期模式见图 2。在实验期间,只有厌氧、好氧和缺氧时间随在线 pH 和 ORP 反馈的信息变化灵活地控制反应时间,其余步骤均和驯化期间相同。

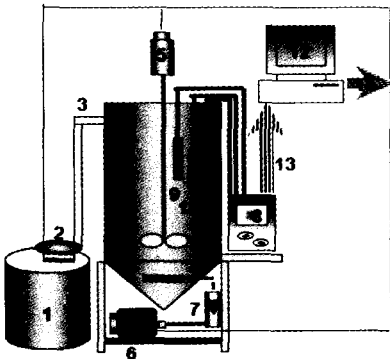


图 1 SBR 系统图

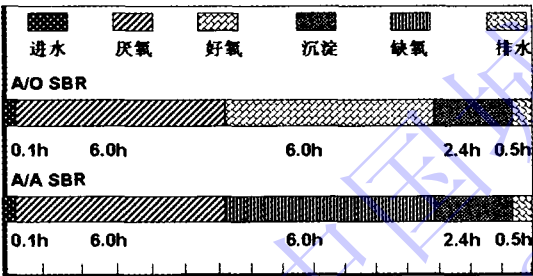


图 2 SBR 系统运行周期模式

1.2 原水水质与接种物

实验原水来自北京工业大学生活小区,具体水质见表 1。A/O SBR 接种污泥来自高碑店污水处理厂,驯化稳定后试验。A² SBR 接种污泥取自实验室规模 MUCT 系统内,该系统具有良好的反硝化除磷效果。

表 1 原水水质

项目	均值(mg/L)	项目	均值(mg/L)
COD	324	TN	82
BOD ₅	164	NH ₄ ⁺ -N	62.5
PO ₄ ³⁻ -P	9.8	碱度	370
TP	14.6	VFA _s	106.8

1.3 分析项目和方法

PO₄³⁻-P、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TN、COD、NH₄⁺-N、MLSS 等各种常规污染物指标规律的取样,采用国标

方法测定。pH、ORP 和 DO 使用在线监测装置(德国 WTW, level2)连续采集。

2 结果与分析

生物除磷过程是利用 PAO 或者 DPAO 在厌氧条件下储存有机酸同时释放正磷酸盐,而在后继的好氧或者缺氧条件下过量吸收磷酸盐而实现对磷的去除。在这一过程中,PAO 的代谢过程直接和正磷酸盐以及氧化还原物质(如 NO₃⁻-N)相关。因此,其动力过程很可能和 pH 和 ORP 存在相关性。正是基于这一假设,试验研究 pH 和 ORP 等电化学参数在各个过程中的变化规律和特点,确立除磷动力过程的电化学参数表征模型。

2.1 A/O SBR 除磷过程

A/O SBR 除磷过程中主要利用传统的 PAO 实现对磷的代谢。在厌氧过程中,PAO 胞内聚合磷酸盐水解释放,而水中的有机酸被消耗。在这一过程内,ORP 随着磷的释放逐渐下降(图 3—图 5),其下降速率和磷的释放速率基本吻合,可以将 ORP 曲线这一特点作为控制厌氧周期长度的控制参数之一。研究同时发现,当磷不再释放时,对应的 ORP 曲线会出现微小的跳跃(图 3a—图 5a 中 a 点)。ORP 短时微小的跃升,可以作为厌氧放磷的指示性信号。在 ORP 的突跃后,ORP 仍然继续下降,但是下降速率很是缓慢。厌氧放磷结束 ORP 短时微小的跃升具有很高的稳定性和重复性。而且,放磷 ORP 短时微小的跃升不仅在 A/O SBR 过程出现,在 A² SBR 除磷过程(图 6a—图 7a)的厌氧段同时出现。说明这一控制点的普遍意义。

在厌氧放磷过程中,磷的释放量决定了相继好氧的吸磷量,但是对磷的去除效率不具有决定意义。在厌氧过程中,不仅只有 PAO 争夺有机酸,还存在着聚糖菌(GAO)。除了 GAO 不参与磷的释放外,GAO 的代谢过程和 PAO 和 DPAO 完全一致^[11]。因此,在厌氧段 PAO 的放磷能力在一定程度上是 PAO 和 GAO 对有机酸竞争状态的表现。而厌氧段更具有重要意义的是发现具有提供这些过程信息的一些在线参数。研究发现,在线 pH 的监测可以给出很好的关于 PAO 和 GAO 竞争的信息,从而提供除磷过程的厌氧放磷行为和系统生物特点。依照葡萄糖对 GAO 竞争的生长刺激^[12],试验向正常除磷系统投加葡萄糖刺激 GAO 数量和竞争能力。模拟出 PAO 呈竞争优势、GAO 呈竞争优势以及 GAO 和 PAO 呈均



势三种状态,分别考察除磷动力过程的 pH 变化。在未投加葡萄糖之前的 A/O SBR 系统内,PAO 呈优势状态,磷的释放伴随着 pH 的下降(图 4)。而当 GAO 为优势菌属时,厌氧放磷过程中 pH 上升(图 3)。而在停止投加葡萄糖后运行一段时间后,GAO 和 PAO 均处优势。此时 pH 值在厌氧放磷过程中基本不变(图 5)。由这三种状态可以推断,厌氧过程中 pH 的变化趋势和特点主要受 PAO 和 GAO 的竞争状态决定。影响厌氧 pH 趋势的因素主要有两个:一是 PAO 放磷造成的 pH 下降,另外一个 PAO 和 GAO 吸收有机酸造成的 pH 上升。当放磷引起的

pH 降低量远远高于吸收有机酸造成的 pH 上升量时,pH 厌氧趋势表现为下降。反之,则表现为上升趋势。而在正常 PAO 呈优势状态的系统内,吸收有机酸造成的 pH 升高量远比放磷造成的 pH 下降量小得多,因此 pH 厌氧趋势表现为下降。但是在 GAO 存在的系统内,吸收有机酸造成的 pH 升高量就成为 GAO 数量和生理活动能力的函数。因此,在线 pH 的监测可以给出很好的关于 PAO 和 GAO 竞争的信息,从而提供除磷过程厌氧放磷行为和功能性微生物的活动特点。

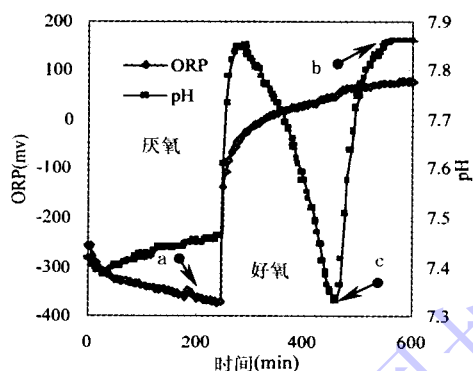


图 3a GAO 强势下的 ORP 和 pH 除磷过程曲线

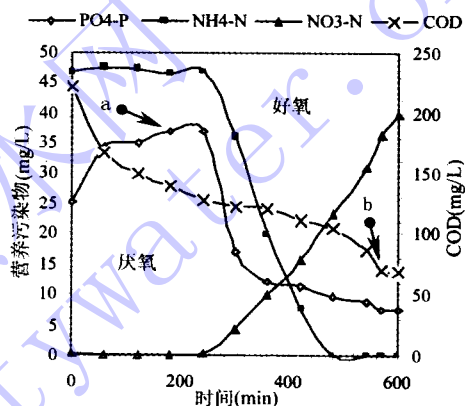


图 3b GAO 强势下的除磷动力过程

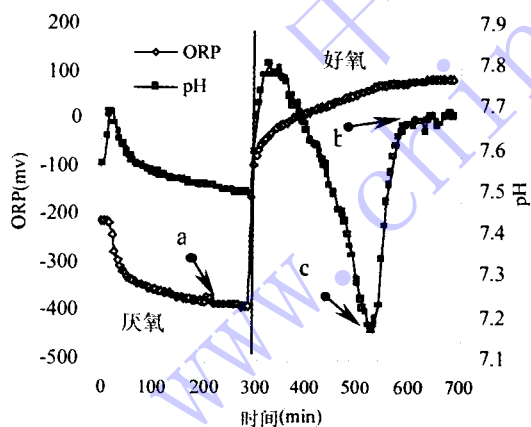


图 4a PAO 强势下的 ORP 和 pH 除磷过程曲线

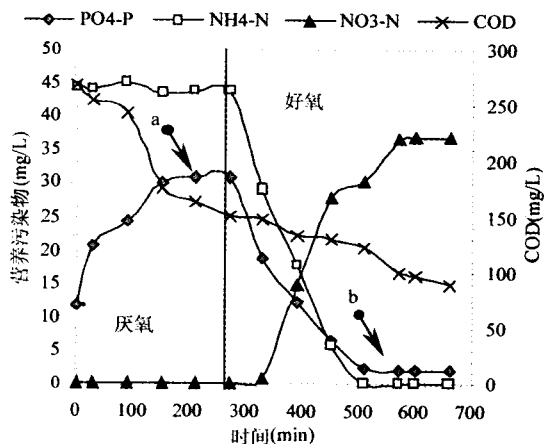


图 4b PAO 强势下的除磷动力过程

在相继的好氧过程中,ORP 随着磷的吸收一直保持上升状态,其上升速率逐渐下降。ORP 曲线和除磷动力过程没有明显的相关性。而 pH 曲线上却具有明显的特征点。在好氧段的初期,pH 大幅快速跃升直至出现最大值。这可能是由于有机物被氧化

后产生的 CO_2 被吹脱造成的。之后 pH 随着氨氮的降解和硝酸盐的生成而逐渐下降。但是在这一过程中,生物吸磷也在快速进行。氨氮的降解和硝酸盐的生成造成 pH 的大幅下降,而磷的吸收造成 pH 的上升。但是由于生成的硝酸为强酸,因此尽管磷大量吸收,pH 仍然呈下降状态。好氧段 pH 曲线作为



硝化和吸磷综合表现产生了一个脱氮控制的问题。一直以来,脱氮过程的控制点常以 pH 曲线上“氨谷”作为硝化结束的控制点^[10]。但是在同时氮磷去除系统中,好氧过程中 pH 曲线尽管也出现谷点(图 3a—图 5a 中 c 点),但和氨氮的完全去除时刻不完全对应,往往滞后或者超前氨氮的零点。而“氨谷”

滞后还是超前是由硝化过程和吸磷过程的 pH 平衡决定的。在 pH 曲线谷点出现后,由于硝化基本完成而吸磷继续进行, pH 大幅快速上升,直至吸磷结束后(图 3b—图 5b 中 b 点) pH 到达平台段(图 3a—图 5a 中 b 点)。因此,在 A/O SBR 除磷过程中可以此“膝点”作为好氧吸磷结束点,停止曝气。

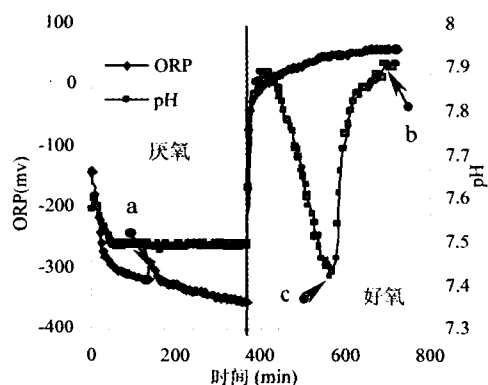


图 5a PAO 和 GAO 等势下的 ORP 和 pH 除磷过程曲线

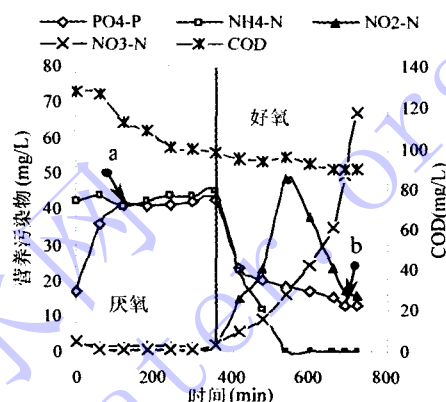


图 5b PAO 和 GAO 等势下除磷动力过程

2.2 A² SBR 除磷过程

DPAO 和 PAO 厌氧放磷的原理基本相同, A² SBR 厌氧放磷过程中 pH 和 ORP 曲线(图 6a—图 7a)和 A/O SBR 厌氧过程也相似(图 3a—图 5a)。而在缺氧过程, DPAO 利用硝酸盐作为电子受体吸磷。缺氧吸磷过程的 pH 和 ORP 都表现出特异性。在厌氧结束后,向 A² SBR 反应器一次投加硝酸钾模拟不同浓度的硝酸盐。实验结果表明, 缺氧吸磷 pH 和 ORP 曲线变化基本分硝酸盐足量和不足量两种情况。在硝酸盐足量的情况下(图 6b), DPAO 吸收磷同时将硝酸盐还原, 这一过程中表现为 TN、PO₄³⁻-P 和 NO₃⁻-N 的下降。而对应污染物降解的动力过程, ORP 缓慢升高直至硝酸盐耗尽反硝化结束出现“膝点”(图 6a)。而正常脱氮过程的 ORP 缓慢下降, 最后到反硝化结束出现“膝点”, 是值得在利用 DPAO 反硝化脱氮过程控制中注意的现象。而 pH 也和正常反硝化脱氮过程 pH 一直缓慢升高直到反硝化结束后的迅速下降的趋势不同。在开始呈现迅速上升趋势, 而后下降出现谷点, 然后又逐渐上升。当硝酸盐耗尽, 反硝化结束后 pH 出现迅速下降形成“肘点”。pH 开始的大幅上升对应着磷的快速吸收过程(图 6)。之后吸磷速率和吸磷急剧减慢, pH

开始缓慢下降, 直到吸磷过程结束(图 6b 中 b 点) pH (图 6a 中 b 点) 达到谷点。因此, pH 谷点可以作为缺氧吸磷结束点。从缺氧段 COD 的逐渐降解过程(图 6b)可以证明此系统内同时存在反硝化菌群, 其利用水中剩余的碳源继续反硝化硝酸盐释放碱度使 pH 上升。因此, 缺氧吸磷 pH 上升就成为两类细菌反硝化作用的综合结果。当硝酸盐全部被利用后, 反硝化过程结束。由于没有硝酸盐和溶解氧, 此时 DPAO 利用剩余有机酸水解体内的聚磷酸盐释放正磷酸盐(图 6b)。pH 也因此快速下降, 形成反硝化结束时的“肘点”(图 6a)。对应硝酸盐充足的反硝化吸磷过程, 在硝酸盐不足情况下, 硝酸盐成为缺氧吸磷的限制条件。在缺氧吸磷过程中 pH 和 ORP 曲线表现也很简单(图 7a)。ORP 仍然因为硝酸盐的加入而升高, 然后在持续一段平稳状态后, 当硝酸盐耗尽后迅速下降, 形成反硝化结束的“肘点”。在这一过程中, 缺氧吸磷迅速进行, 磷几乎呈直线降低。当硝酸盐耗尽后(图 7b 中 b 点), 由于缺少电子受体吸磷结束, 放磷开始。pH 曲线因磷的吸收大幅升高, 当硝酸盐耗尽开始放磷时又大幅下降, 形成一个明显的拐点(图 7a 中 b 点)。因此, 在硝酸盐不足情况下 pH 和 ORP 曲线上都可以找到缺氧吸磷结束控制点。

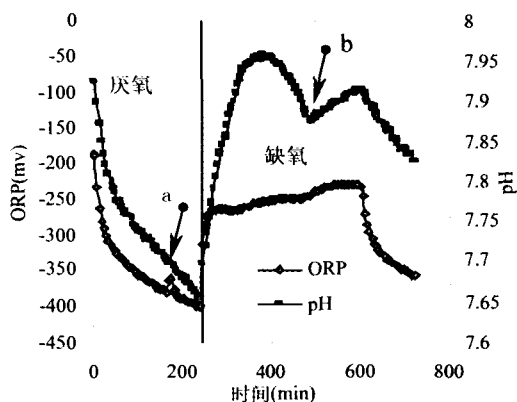


图 6a 硝酸盐足量下 ORP 和 pH 除磷过程曲线

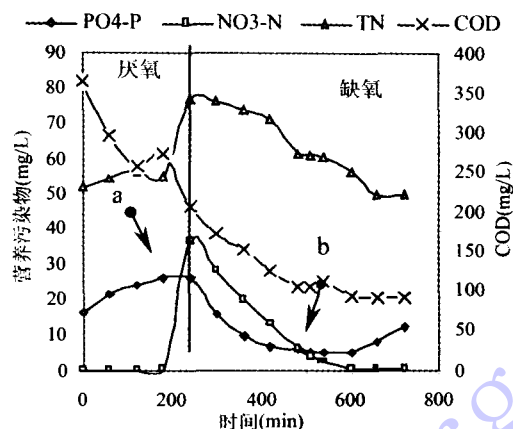


图 6b 硝酸盐足量下除磷动力过程

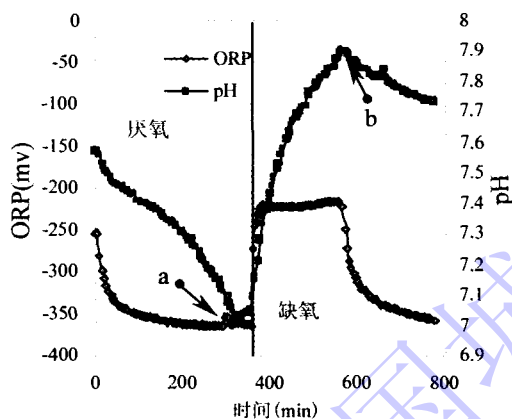


图 7a 硝酸盐不足量下 ORP 和 pH 除磷过程曲线

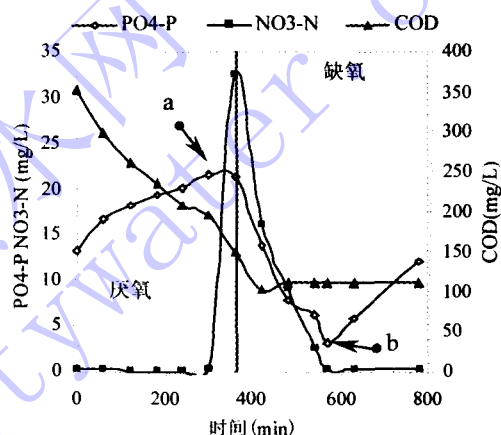


图 7b 硝酸盐不足量下除磷动力过程

2.3 EBPR SBR 模糊控制策略

模糊控制作为一种高级控制方法不是因为控制器本身的先进性,更多在于其控制策略的设计。在强调控制安全的条件下,针对 EBPR SBR 除磷过程非线性、时变性、模型复杂提出的模糊自校正控制法。控制程序如图 8 所示,主要控制思想包括三部分。

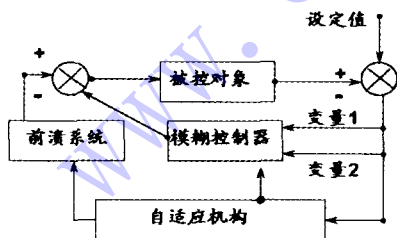


图 8 除磷过程控制策略

(1)一级前馈专家控制。一级控制采用专家控制法。一级控制的主要目的是为系统提供大致精确的控制量。实验发现原水水质和污泥特性对磷去除过程的影响都是非线性的,而且有很大的控制区别。因此有必要根据大量的试验与运行数据,建立规则数据库。针对不同的原水水质和污泥特性提出不同

的控制值。用专家控制法建立这样的控制更加简便,而且便于自校正。

(2)二级模糊控制器。二级模糊控制器为二阶输入变量,单输出变量的模糊逻辑推理系统。模糊输入变量为 pH 二阶导数 ZD_1 和 ORP 一阶的导数偏差 ZD_2 ;取一段时间内反应过程中的平均值与设定值之间的偏差,采用五级模糊隶属度函数正大、正小、零、负小、负大模糊化。另一个模糊输入变量为反应过程中 pH 二阶导数变化趋势度 δZD_1 和 ORP 一阶导数变化趋势度 δZD_2 。取同一段时间内 pH 二阶导数和 ORP 一阶导数变化偏差的积分值,采用三级模糊隶属度函数正大、零、负大。输入隶属度函数均采用三角形隶属度函数。模糊控制的输出变量采用 2 个单峰值(1 和 0)。分别表示曝气装置和搅拌装置的起停。模糊控制器包括被控变量的模糊化处理、建立模糊控制规则,作出模糊决策,控制变量的非模糊化处理,以及相应的计算机算法与软件。EBPR SBR 模糊除磷系统的具体控制流程见图 9。

(3)预测自适应控制。预测自适应机构用于对一级前馈专家控制和二级模糊控制规则进行校正。建立通用性预测与故障分析系统。根据使用 EBPR

SBR 工艺的污水处理厂已积累的运行管理经验和实验结果,利用神经网络和专家系统等智能方法建立通用性预测与故障分析系统,在故障出现之前做到准确预测分析以避免或减少故障给正常生产带来的不便和经济损耗。

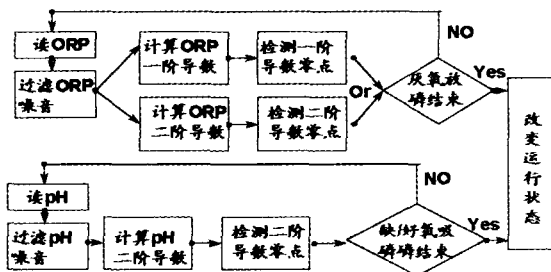


图9 除磷过程控制程序流程图

3 结论

(1) 在线 pH 和 ORP 可以作为 EBPR SBR 模糊控制系统除磷过程的控制参数。厌氧放磷结束时对应 ORP 曲线在下降过程中会出现短时小幅跃升。好氧吸磷结束时, pH 曲线出现“膝点”。而无论是否硝酸盐充足,当缺氧吸磷完成时, pH 曲线上都会出现拐点。这些特征点的出现具有很高的重现性,证明 pH 和 ORP 可以作为 EBPR SBR 模糊控制系统除磷过程的控制参数的可行性和有效性。

(2) 在厌氧放磷过程中, pH 曲线受 GAO 和 PAO 的竞争状态呈现三种不同的变化趋势。当刺激 GAO 竞争能力,厌氧放磷过程中 pH 曲线逐渐上升。反之则下降。当 GAO 和 PAO 的竞争呈均势状态时, pH 曲线逐渐基本持平。厌氧放磷过程中 pH 曲线趋势是 PAO 放磷造成的 pH 下降与 PAO 和 GAO 吸收有机酸造成的 pH 上升这两者的综合表现。

(3) 好氧段 pH 曲线作为硝化和吸磷二者综合作用的结果。好氧过程中 pH 曲线尽管也出现谷点,但和氨氮的完全去除时刻不完全对应,往往滞后

或者超前氨氮的零点。而“氨谷”滞后还是超前是由硝化过程和吸磷过程的 pH 平衡决定的。

(4) 缺氧吸磷 pH 上升是普通反硝化菌和反硝化聚磷菌两类细菌群反硝化作用的综合结果。而反硝化结束后的 pH 急剧下降,是由于厌氧放磷造成的。

(5) 采用模糊自校正控制法控制 EBPR SBR 模糊控制系统除磷过程,可以根据在线信息准确对过程进行控制,有效地节约能耗。

参考文献

- [1] Kuba T, Smolders G, Loosdrecht M, et al. Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor. *Wat Sci Tech*, 1993, 27(5/6): 241
- [2] Barker P S, Dold P L. Denitrification behavior in biological excess phosphorus removal activated sludge systems. *Wat Res*, 1996, 30: 769
- [3] Jorgensen K S, Pauli A. S-L. Polyphosphate accumulation among denitrifying bacteria in activated sludge. *Anaer Env Microb*, 1995, 1: 161
- [4] Kuba T, et al. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphatation and nitrification in a two sludge system. *Wat Res*, 1996, 30(7): 1702
- [5] Wilderer P A, Invine R L, Doellerer. Sequencing batch reactor technology-batch application of periodic processes. *Wat Sci Tech*, 1997, 35(1): 278
- [6] Vlekke G J F, Comeau Y, Oldham W K. Biological phosphate removal from wastewater with oxygen or nitrate in sequencing batch reactors. *Environ Technol Lett*, 1988, 9: 791
- [7] Kalker T J J, et al. Fuzzy control of aeration in an activated sludge wastewater treatment plant: design, simulation and evaluation. *Wat Sci Tech*, 1999, 39(4): 71
- [8] Yu R F, et al. Monitoring and control using on-line ORP on the continuous-flow activated sludge batch reactor system. *Wat Sci Tech*, 1997, 35(1): 57
- [9] Plisson-Saune S, et al Real-time control of nitrogen removal using three ORP bending points: signification, control strategy and results. *Wat Sci Tech*, 1996, 33(1): 275
- [10] Andreottola G, Foladori P, Ragazzi M. On-line control a SBR system for nitrogen removal from industrial wastewater. *Wat Sci Tech*, 2001, 43(3): 93
- [11] Filipe C D M, Daigger G T, Grady C P L Jr. pH as a key factor in the competition between glycogen-accumulating organisms and phosphorus accumulating organism. *Water Environment Research*, 2001, 73(2): 223
- [12] Cech J S, Hartman P. Glucose induced breakdown of enhanced biological phosphate removal. *Environ Technol*, 1990, 11: 651

Fuzzy control of EBPR SBR for phosphorus removal

Cui Youwei, Wang Shuying, Zhu Yan*, Li Guixing*, Peng Yongzhen

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing 100022)

(* China Municipal Engineering Northeast Design and Research Institution Dalian Branch, Dalian 116600)

Abstracts

To establish an fuzzy control system of phosphorus removal, two laboratory-scale enhanced biological phosphorus removal (EBPR) SBRs with on-line monitors of pH and ORP were applied to treatment of domestic wastewater. Continuous measurements of these parameters were related with the dynamic behaviors of anaerobic phosphorus release, anoxic phosphorus uptake and aerobic phosphorus uptake in the EBPR SBR, allowing detecting the end of cycles. To further establish the feasibility and validity of using pH and ORP as fuzzy control parameters, process conditions of stimulating competition between phosphorus and glycogen accumulating organisms (PAO and GAO) and of effecting behaviors of PAO and denitrifying phosphorus removal organism (DPAO) were investigated. On basis of it, fuzzy control strategy was specified in accordance with different conditions. Fuzzy control by monitoring pH and ORP not only results in reduced energy consumption and performance optimum but also provides some valuable information about the behavior of functional microorganism.

Key words: fuzzy control, EBPR SBR, anoxic phosphorus uptake, GAO, DPAO