

基于在线营养盐控制的污水处理曝气优化及应用

刘智晓^{1,2}

(1. 北京首创股份有限公司, 北京 100028; 2. 首创爱华<天津>市政环境工程有限公司, 天津 300060)

摘要: 曝气过程占污水处理过程总能耗的 50% ~ 75%, 优化曝气过程控制、探索新的运行控制模式是节能降耗及改善出水水质的关键。传统的污水处理生化曝气过程是以 DO 为基础的 PID 控制, 实践证明这种控制模式存在诸多缺点。欧美等发达国家近些年开始采用基于营养盐信号的后馈或前馈/后馈闭环控制, 在改善出水水质的同时, 运行能耗可以降低 15% ~ 30%。介绍了以在线 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 控制信号为基础的曝气过程高级控制系统(AOC)的类型、技术优势及实现方式, 并结合实际案例介绍了 AOC 系统实施的方法及效果。

关键词: 曝气控制; 节能; 在线营养盐仪表; 氨氮反馈控制; 仪表、控制及自动化; 污水处理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2017)12-0024-06

Application and Aeration Optimization in Wastewater Treatment Process on the Basis of On-line Nutrient Control

LIU Zhi-xiao^{1,2}

(1. Beijing Capital Co. Ltd., Beijing 100028, China; 2. Capital Aihua <Tianjin> Municipal and Environmental Engineering Co. Ltd., Tianjin 300060, China)

Abstract: 50% - 75% of total energy consumption was contributed by aeration process in a wastewater treatment plant. The optimization and innovation of aeration process were the most vital points to improve the effluent quality. It was proven that the PID control based on DO had a lot of disadvantage in traditional wastewater treatment process. Recently, the ammonia-based aeration feed forward and feedback loop control has been used in European countries and the United States. This kind of control is more and more popular due to the improvement of the effluent quality and reduction of aeration energy by 15% - 30%. With regard to the advanced aeration on-line control system which is based on $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ on-line sensors signal, the various types, technical advantages and operation modes were introduced in this paper. Furthermore, the implementation methods and results of AOC control system were described according to application case in some plants.

Key words: aeration control; energy reduction; on-line nutrient sensors; ammonia-feedback control; instruments, control and automation(ICA); wastewater treatment

活性污泥法诞生百年来,伴随着对工艺过程及机理过程认识的加深,对活性污泥系统运行优化及自动化控制系统的探索、改进和优化也在逐步深入。水系统电能的消耗量占全社会电能消耗总量的 3%

左右^[1],根据国内外的运营实践,活性污泥曝气过程的能耗占污水处理过程总能耗的 50% ~ 75%^[2],因此,提高污水处理过程的仪表、控制及自动化控制(ICA)水平^[3],尤其是针对曝气生化过程优化控制,

是未来污水处理全过程可持续管理的重点环节。改善和提高污水厂出水水质,实现处理过程的优化控制及节能降耗、降低处理过程温室气体(GHG)排放甚至实现污水厂的“碳中和”运行,是未来可持续污水处理技术路线开发的基本方向,这也是污水处理企业的社会及环境责任。为了克服传统控制模式的弊端,近些年来,一些高级控制系统逐渐被开发与应用,欧美等国家开始采用基于在线营养盐仪表($\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 等)参与的生化过程的优化控制^[4],实现能耗控制与提高出水水质的耦合^[3],这些做法值得国内同行研究与借鉴。

笔者近几年与国外公司合作,在若干污水处理厂提标改造工程案例中,率先在国内引进并采用基于在线营养盐传感器参与曝气过程优化控制(AOC),取得了很好的效果。这种AOC系统也可以称之为实时控制系统(RTC),AOC高级控制系统的应用结合了对传统污水处理工艺的改造基础,是“工艺”与“控制”的融合,采用侧流生物强化(ARP/SSH)技术耦合AOC系统,在利用原有设施且不增加生物池池容的情况下,可以大幅提高污水厂的水力负荷或有机负荷,同时有效改善出水水质,实现出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{TN}$ 的高标准排放及稳定达标。在综述国外近几年基于在线营养盐曝气控制系统的研究及应用进展基础上,结合实践,探讨了AOC控制系统基本特性及实现方法,以期国内同行在未来污水厂提标改造及节能曝气优化控制环节的提效改造提供借鉴。

1 传统 DO 反馈控制模式的弊端

世界上首次实现对污水中DO的检测始于1954年在英国Stevenage的水研究中心,采用半连续流装置;1970年开始有污水厂陆续采用在线DO传感器用于混合液溶解氧的测定,后逐步用于曝气过程的监测与控制^[5],DO作为反馈参数参与的过程控制直至今天仍是曝气过程控制的主要模式。

随着可持续理念及全生命周期成本控制理念的深入,近些年来,国内同行开始注重污水厂运行优化,尤其是曝气的节能及过程控制,并开发出精确曝气控制系统。分析曝气过程环节控制,目前国内主要还是以好氧区溶解氧DO为控制基准的PID控制。生产实践表明,对于推流式生物池,单纯采用生物池末端DO作为反馈信号进行曝气量控制,由于末端DO较长时间的滞后性,容易导致控制系统运

行的振荡;同时,DO控制并不能直接体现出生化系统的硝化性能,这种控制模式下工艺运行很难实现稳定,导致出水水质出现波动。运行中的主要困扰是如何实现出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 指标的稳定达标排放(尤其是高排放标准条件下)。在实际运行中,出水的稳定性往往受进水水质或水量峰值波动影响;为了应对进水波动,生产中往往采用固定风量/转速的连续曝气模式,这又会导致能量的浪费, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 完全硝化但反硝化不足导致出水TN超标等难题。影响污水厂出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的主要因素除了池容、SRT、曝气量、DO、水温外,进水污染物负荷波动及峰值流量也是导致系统出水不稳定的重要原因,基于扰动因素的复杂性,因此迫切需要对传统DO控制模式进行改进,探索新的在线监测及控制模式,采用在线营养盐传感器的实时在线控制,无疑是解决和克服传统控制模式弊端的有效解决办法。

现行的曝气控制系统,在实践层面上多数后续运行是不成功的,除了上述工艺过程影响因素外,当然也有系统设计缺欠、硬件设施(传感器、控制器、执行器等)性能及选型问题,也有维护不规范不到位的问题^[6],实际上并没有起到曝气节能及运行优化的效果,很多污水厂由最初的自控状态逐渐递变到手动控制模式,一些污水处理厂的自控系统甚至“形同虚设”,这种现象也影响了国内同行对自控系统及在线仪表效能的认知,甚至形成恶性循环,进一步阻碍了国内污水处理自控系统的发展和应用。

2 在线监测仪表设置点位

目前国内污水处理过程主要在线仪表通常设置在进水端和出水端,用于环保部门对水质的实时监管,虽然也设置了监测进出水的营养盐指标的仪表,但一般不直接参与工艺过程的在线优化控制,是“监而不控”。传统生化过程控制仪表以pH/ORP、MLSS、DO为主,根据生物池不同功能分区而分别设置上述仪表,这些仪表通过间接的混合液微环境指标来控制生物系统的运行并间接控制出水水质,这是传统控制模式特点。改进后的高级控制系统引入在线 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 水质参数作为生化系统的前馈/后馈控制信号,用于过程优化控制,节能降耗及改善出水水质,实现过程控制与出水水质的联锁耦合。以五段式Bardenpho工艺为例,在线仪表设置点位见图1。

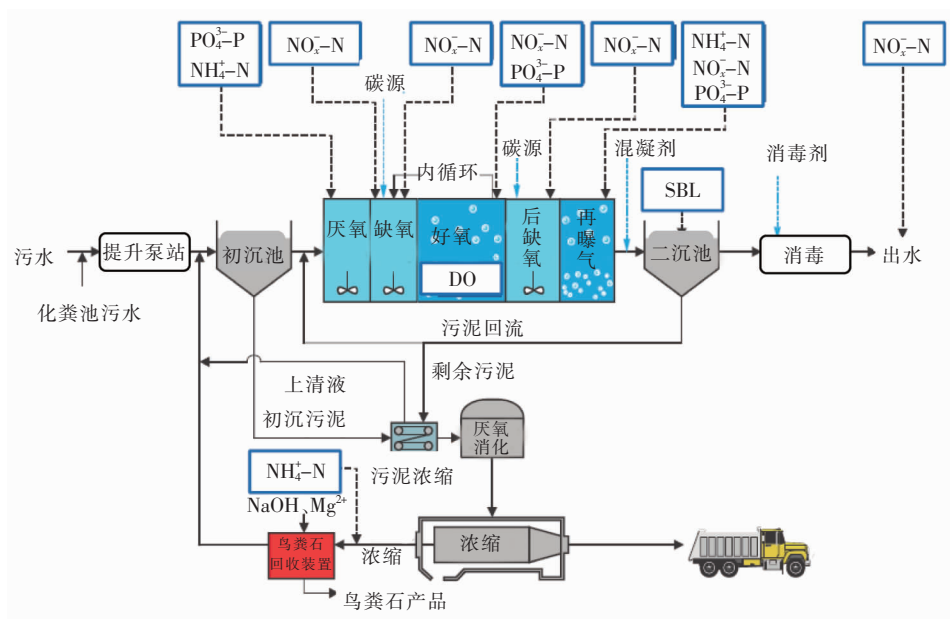


图1 基于在线营养盐控制的污水处理过程仪表设置点位

Fig. 1 Sensors and meters locations in sewage treatment control based on nutrient control

由图1可以看出,改进后的控制系统除了监测上述常规微环境表征指标外,主要改进之处是引入了营养盐监测仪表,这些仪表参与生化过程的实时控制。通常在生物反应池不同区段设置特征性水质监测传感器,如在前置反硝化区域设置 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 监测仪表、在硝化区或生物池出水端设置 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ / $\text{NO}_3^- - \text{N}$ / $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 监测仪表,通过水质参数传感器实时的监测,采用不同的控制逻辑和模式,可通过直接控制生物处理段而获得理想的出水水质。如在好氧区末端设置在线 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ / $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 传感器作为后馈信号,生物池末端 DO 控制水平可根据出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ / $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 目标值的高低进行相应的设定值调整。在线传感器一般包括在线 (on-line) 和离线 (off-line) 两种类型,在线类型又包括原位 (In-situ) 和异位 (Ex-situ) 分析两种,In-situ 主要包括常规的 DO/ORP、pH、MLSS 等,传感器直接设置在曝气池混合液中;营养盐仪表多为 Ex-situ 分析模式,这些仪表的选择需要考虑采样及反应时间,根据取样、预处理及样品分析方法的差异,离线分析仪表一般有 5 ~ 25 min 的滞后^[7],在线控制需要考虑到 Ex-situ 仪表信号的滞后性。国际上主流水质仪表供货商目前也对在线营养盐传感器的开发投入了极大的努力,开发了基于离子选择电极 (ISE) 或“UV - 可见光”法的 In-situ 型传感器,用于实时在线监测 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ / $\text{NO}_3^- - \text{N}$,这些仪表在欧美一些污水处理厂已得到

成功应用。

3 基于在线营养盐控制的曝气优化控制

3.1 技术优势

基于对传统控制模式弊端的认识,近些年来欧美等国开始采用高级在线控制 (AOC) 系统^[8],AOC 系统可以有效应对控制过程中的干扰因素 (峰值流量、污染物浓度波动、水温等),进而降低曝气能耗,获得较为稳定的出水目标值。基于在线 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ / $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 曝气过程高级控制的主要目的在于:

① 可以有效控制出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ / $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TN 指标达到出水目标设定值,而不至于完全硝化,同时利用缺氧时间的控制强化反硝化并显著提高对 TN 的去除效率,进而也有利于出水 TP 的改善^[9]。实践已经证明,这种 AOC 控制模式对于国内进水碳源不足情况下的曝气控制极具现实意义。

② 水质参数与工艺参数耦合参与生化系统在线控制,可以实现能耗的有效控制,国外的实践表明,通过基于在线 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的控制,可以将曝气能耗降低 15% ~ 25%^[10]。

国内同行比较担忧的是在线仪表的维护和运行稳定性及对在线仪表的过度依赖,实际上这种控制有三种模式可以选择,分别是高级控制模式、基本控制模式及故障控制模式,可以有效应对水质仪表的维护及水质参数的漂移导致的过程控制误差,故障模式可以应对在线仪表出现故障的情况下保证基本

的控制过程及其稳定性。当然,国内对在线水质及工艺过程仪表的维护确实需要科学化、制度化、标准化,这方面与国外确实尚存差距,亟待改进。

3.2 实现方式

在水处理工艺中,采用的控制方式一般有三种:前馈(FF)、后馈(FB)和前馈/后馈结合(FF + FB)的闭环控制^[10]。FF 控制系统对于具有快速响应特性的单元过程较为有效,如对流量的响应、进水污染物浓度的监测与预警、药剂投加反应单元等,但是前馈控制需要较为可靠的算法模型作为支撑,FF 模式的不足在于其并不能实现对出水的直接控制。FB 控制系统则直接与出水指标关联,直接以出水端水质或工艺参数指标的监测数值作为控制信号,但由于水处理过程的滞后性、取样及信号的滞后容易引发 FB 控制系统的振荡。因此,通常情况下,两种控制模式的结合——前馈/后馈闭环控制系统则可以发挥各自优势,有效缓解或者避免上述问题,两者结合可以获得相对稳定的系统输出。

污水厂曝气过程控制一般有以下两种实现方式^[5,8]:①基于曝气池好氧区 DO 为反馈信号的传统 PID 控制系统(见图 2);②基于在线 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的控制模式,包括后馈控制(见图 3)、前馈/后馈闭环控制两种模式(见图 4)。

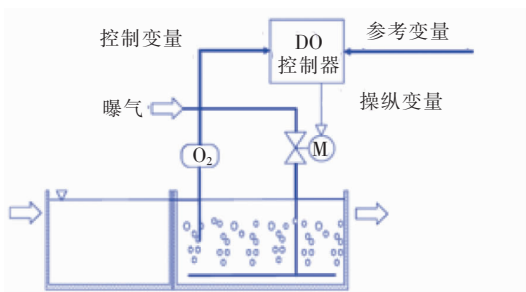


图 2 DO 控制模式

Fig. 2 DO control mode

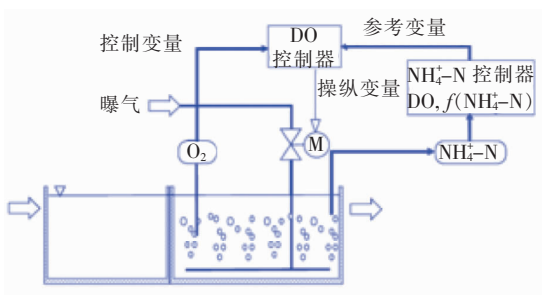


图 3 “DO + $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ”控制模式

Fig. 3 DO + ammonia control mode

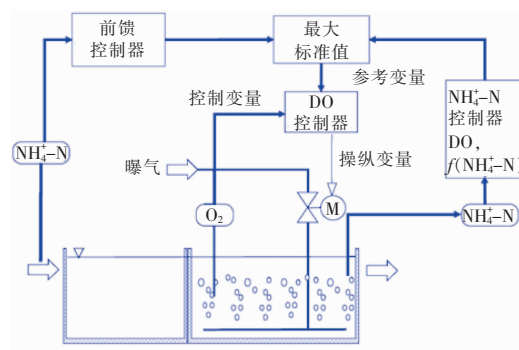


图 4 “DO + $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ”前馈/后馈控制模式

Fig. 4 DO + ammonia feed-forward/feed-back control mode

采用以在线 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为基础的前馈控制,通常考虑两种情况,一是在进水量及污染物浓度波动较大的情况下,受生物池固有池容及硝化/反硝化能力的限制,不采取前馈控制措施容易导致出水指标的波动;其次,生化系统滞后响应时间过长,且对出水瞬时实时达标有严格要求的情况^[10]。但是, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 前馈控制模式一般很少单独采用,采用 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 作为后馈信号对 DO 设定点进行调节的“串级控制”(见图 3)和前馈/后馈闭环模式(见图 4)对稳定出水及能耗控制较为可靠^[11]。

对于前馈控制模式,也有研究者提出,这种控制并不是所有条件下都具有显性优势,实际上,对于前馈控制模式,主要特性在于可以充分应对峰值冲击,但是由于前馈控制算法中考虑并设置了一定程度的安全系数,因此,前馈控制模式对于考虑曝气节能并不是最好的选择。根据 Rieger 等^[10]的研究结果,前馈控制优势体现在低水温季节对进水浓度峰值的控制,在反馈控制措施完善的情况下,前馈控制对出水水质并没有显著的提升。这种情况下,结合后馈控制(FB)模式可以有效控制出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 指标在设定值附近^[12];同时也可以看出,相对传统的 DO 控制,基于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的 FB 及 FF + FB 两种控制模式都可以有效控制出水指标数值^[10],这种基于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的后馈控制模式,对于目前国内严格的出水控制标准,是极具应用和推广前景。

前馈/后馈闭环控制模式下,在生物池进水端和出水端分别设置在线 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 仪表,采用基于“DO + $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ”的前馈/后馈闭环控制模式则会大大提高生物系统的运行稳定性。这种模式下,对于前馈控制,进水端 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 传感器如果检测到浓度峰值,控制器则会依据下式进行生化系统硝化

能力与进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 负荷的匹配性评估计算^[13]:

$$\text{NIT}_{\text{state}} = \frac{L_{\text{NH}_4^+ - \text{N}, \text{inf}}}{r_{\text{nit}} \cdot V_{\text{好氧池}}} \quad (1)$$

式中 $\text{NIT}_{\text{state}}$ ——生物池进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 负荷与生物池硝化能力的比值

$L_{\text{NH}_4^+ - \text{N}, \text{inf}}$ ——进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 总量, g/d

r_{nit} ——硝化速率, g/(m³ · d)

$V_{\text{好氧池}}$ ——好氧池硝化池容

如果 $\text{NIT}_{\text{state}} > 1$, 则前馈控制模式启动增加曝气量直至生物池控制区段达到 DO 设定值, 或者增加曝气容积; 如果 $\text{NIT}_{\text{state}} < 0.8$, 也就是生化池硝化能力充分, 则选择控制器不会启动前馈增加风量, 而转向后馈控制来实现 $\text{NH}_4^+ - \text{N} \rightarrow \text{DO}$ 的串级控制。

基于出水端 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 作为反馈控制信号的后馈控制系统, 在获得理想的出水指标前提下, 可以有效降低曝气能耗、充分完成反硝化^[7,8]。主要控制逻辑包括“曝气强度控制”和“曝气池容控制”两种实现方式。具体实现方式上, 可根据生物池池型及不同生化功能分区, 通过“曝气强度控制”和“曝气池容控制”实现曝气/非曝气 (ON/OFF) 开关及硝化/反硝化 (N/DN) 时序的控制^[10], 最大程度上实现反硝化, 进而降低出水 TN 浓度。对于完全混合式特性的氧化沟工艺, 曝气设备的控制根据出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 信号, 采用 N/DN 间歇曝气模式运行, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 可以稳定控制在设定值, 同时, 强化了生物池反硝化, 改善出水水质 (见图 5), 并节约了能耗^[14]。

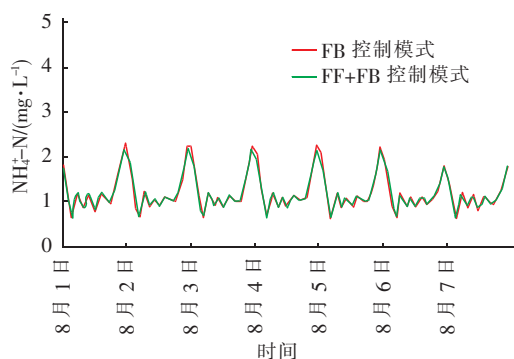


图5 FB 和 FF + FB 控制模式下的出水氨氮

Fig. 5 Effluent concentrations of ammonia under different control strategies (FB and FF + FB)

4 案例介绍

2011 年—2012 年, 首创股份联合丹麦 EnviDan

公司、瑞典 Lund 大学进行国际技术合作, 并得到丹麦政府 B2B 环境支持项目及丹麦环境保护部资助, 在国内首次开展了采用侧流活性污泥生物强化脱氮除磷技术 (ARP/SSH) 进行污水厂提标改造, 引入高级在线控制 (EnviStyr) 系统, 将营养盐传感器用于曝气优化控制, 实现无需新增生物池容或只新增 10%~20% 池容的情况下, 可大幅提高污水厂处理能力 (水力负荷或污染负荷), 改善出水水质并同步实现强化脱氮除磷。研究和实践表明: 当 ARP 池容占生物池总池容的比例为 20% 时, 在水力负荷不变的情况下有机负荷可以提高 66%; 而在有机负荷不变的情况下, 水力负荷可以提高 100%, 这就意味着处理水量可以增加一倍。目前该技术已经在安徽马鞍山、淮南、甘肃武威、白银等地得到应用, 进行了多个污水厂的提标改造。

以马鞍山王家山污水厂为例 (规模为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$), 改造方案考虑在不增加土建投资的情况下, 充分利用原来一期的三沟式氧化沟闲置池容, 将三沟式氧化沟部分池容改造为侧流污泥生物强化工艺 (ARP/SSH), 改造后的工艺流程如图 6 所示^[15]。改造后的氧化沟及侧流池设置了在线 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 用于转盘曝气机的 ON/OFF 控制。改造后的污水厂出水 TN 及 TP 显著改善。

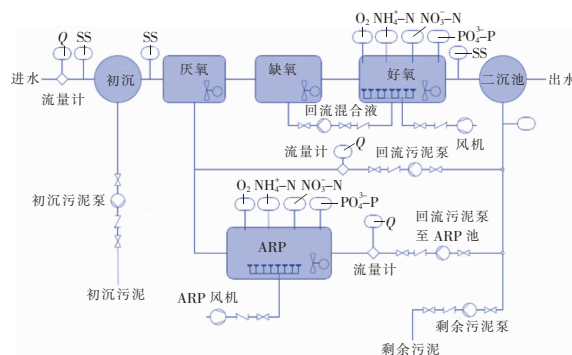


图6 采用 ARP/SSH 技术改造工艺流程及 AOC 在线控制仪表位置示意

Fig. 6 ARP/SSH process and on-line sensors layout of AOC in Maanshan WWTP

5 结语

沿袭多年的基于生物池混合液 DO 的曝气过程控制逻辑存在诸多技术缺欠, 在面向未来可持续的污水处理系统开发及应用过程中逐渐失去生命力, 目前曝气系统的运行优化和精确控制正在向基于在线营养盐控制系统演化。已有的国内外实施案例运

行实践表明,采用新型基于在线 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 传感器的曝气过程控制系统,通过前馈、后馈或者前馈/后馈闭环控制等模式,可实现改善出水水质与降低曝气能耗的耦合,尤其是通过对曝气混合液 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的实时在线检测联锁控制曝气量或者曝气设备 ON/OFF 的控制,有效强化了内源反硝化,降低了外加碳源量,提高了对 TN、TP 的去除效果,因而,基于在线 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$ 高级实时曝气控制系统,是极具发展前景的面向未来的可持续的污水处理曝气过程优化控制技术。

参考文献:

- [1] Carlson S, Walburger A. Energy Index Development for Benchmarking Water Utilities and Wastewater Utilities [R]. Denver, CO: AWWA Research Foundation, 2007.
- [2] Rosso D, Stenstrom M K, Larson L E. Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants; State of the art [J]. Water Sci Technol, 2008, 57(7): 973 - 978.
- [3] Jeppsson U, Alex J, Pons M N, *et al.* Status and future trends of ICA in wastewater treatment—A European perspective [J]. Water Sci Technol, 2002, 45(4/5): 485 - 494.
- [4] Vrecko D, Zupancic U, Babic R. Improving aeration control at the Ljubljana wastewater treatment plant [J]. Water Sci Technol, 2014, 69(7): 1395 - 1402.
- [5] Amand L, Olsson G, Carlsson B. Aeration control—A review [J]. Water Sci Technol, 2013, 67(11): 2374 - 2398.
- [6] Rieger L, Olsson G. Why many control system fail? [J]. J Water Environ Technol, 2012, 38(6): 42 - 25.
- [7] Kaelin D, Rieger L, Eugster J, *et al.* Potential of in-situ sensors with ion-selective electrodes for aeration control at wastewater treatment plants [J]. Water Sci Technol, 2008, 58(3): 629 - 637.
- [8] Brockmann D, Steyer J P, De Keyser W, *et al.* ADD CONTROL: Advanced control solutions for wastewater treatment [J]. Rev Environ Sci Biotechnol, 2011, 10(1): 3 - 7.
- [9] Rieger L, Richard M J, Dold P L, *et al.* Myths about ammonia feedforward aeration control [A]. Proceedings of the Water Environment Federation [C]. US: WEFTEC, 2012.
- [10] Rieger L, Richard M J, Dold P L, *et al.* Ammonia-based feedforward and feedback aeration control in activated sludge processes [J]. Water Environ Res, 2014, 86(1): 63 - 73.
- [11] 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 [J]. Water Res, 2007, 41(9): 2004 - 2014.
- [12] Ingildsen P, Jeppsson U, Olsson G. Dissolved oxygen controller based on on-line measurements of ammonium combining feedforward and feedback [J]. Water Sci Technol, 2002, 45(4/5): 453 - 460.
- [13] Rieger L, Takács I, Siegrist H. Improving nutrient removal while reducing carbon footprint at three Swiss WWTPs thanks to advanced control [J]. Water Environ Feder, 2012, 84(2): 171 - 189.
- [14] Amand L, Laurell C, Stark-Fujii K, *et al.* Lessons learnt from evaluating full-scale ammonium feedback control in three large wastewater treatment plants [J]. Water Sci Technol, 2014, 69(7): 1573 - 1580.
- [15] 刘智晓, Petersen G. 低碳源条件下利用侧流活性污泥水解技术强化生物脱氮除磷 [J]. 给水排水, 2013, 39(1): 53 - 57.



作者简介:刘智晓(1972 -), 男, 山东莒县人, 工学博士, 高级工程师, 主要从事集团化环境及水务项目设计管理, 水务项目方案设计、审核与把关、工艺与设备优化, 水处理过程优化控制、污水生物处理新工艺研究与开发, 高效低耗水厂/污水厂提标改造技术等相关领域的工程化应用研究与实践。

E-mail: liuzhixiao@163.com

收稿日期: 2016 - 12 - 26