

Doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.141

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



城镇污水处理自动控制策略研究进展

郑怀礼¹, 李俊¹, 孙强¹, 赵瑞¹, 李关侠², 黄文璇¹, 丁魏¹, 肖伟龙¹

(1. 重庆大学 环境与生态学院; 重庆市水处理混凝剂工程技术研究中心, 重庆 400045;

2. 深圳市长隆科技有限公司, 广东 深圳 518117)

摘要: 全过程自动化控制是未来城镇污水处理厂的发展方向, 但由于污水处理过程具有非线性、多变量、时变性等特点, 自控系统中关键运行参数的测量以及控制决策的制定都存在困难, 目前实际应用的系统大多停留在实现单一参数或单一反应器控制的层面上。自动控制策略是整个自动控制系统的头脑, 是充分发挥系统软硬件效能、保证系统鲁棒性的关键。总结了城镇污水处理厂自动控制方案依据的数学模型, 描述了活性污泥模型(ASM)和仿真基准模型(BSM)的基本特征, 综述了自动控制策略在城镇污水处理曝气、化学除磷以及多目标优化控制方面的研究进展, 分析了目前研究中存在的挑战和机遇, 发现理论研究科学与工程实践相结合是加快城镇污水处理厂自动化进程的必要途径。

关键词: 自动控制; 活性污泥数学模型; 曝气; 化学除磷; 多目标优化

中图分类号: X703.1 **文献标志码:** R **文章编号:** 2096-6717(2020)01-0126-09

Automatic control strategies of urban wastewater treatment: A review

Zheng Huaili¹, Li Jun¹, Sun Qiang¹, Zhao Rui¹, Li Guanxia², Huang Wenxuan¹,
Ding Wei¹, Xiao Weilong¹

(1. College of Environment and Ecology; Chongqing Engineering Research Center of
Water Treatment Coagulant, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Shenzhen Changlong Technology Co., Ltd, Shenzhen 518117, Guangdong, P. R. China)

Abstract: Urban wastewater treatment plants are oriented to the entire process control, while automatic control systems encounter many problems in parameter measurement and decision making because the wastewater treatment process is nonlinear, multivariable and time-varying. Thus most of control systems in practice are merely aimed at single parameter control or single reactor control by now. Automatic control strategies are the brain of control systems, which could fulfill the potential of the hardware and software in the system and ensure the robustness of the system. Thus the mathematical models applied in the automatic control strategies of the urban wastewater treatment are introduced, and the characteristics of Activated Sludge Models (ASMs) and Benchmark Simulation Models (BSMs) are summarized. The automatic control strategies in terms of aeration, chemical phosphorus removal and multi-objective

收稿日期: 2019-07-02

基金项目: 重庆市重点产业共性关键技术创新专项重点研发项目(cstc2017zdcy-zdyf0203); 重庆市研究生科研创新项目(CYB18041)

作者简介: 郑怀礼(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水处理及水处理剂研究, E-mail: zhl@cqu.edu.cn.

Received: 2019-07-02

Foundation items: Chongqing Key Industry Common Key Technological Innovation Projects (No. cstc2017zdcy-zdyf0203); Graduate Research and Innovation Foundation of Chongqing (No. CYB18041)

Author brief: Zheng Huaili (1957-), professor, doctoral supervisor, main research interests: water treatment and water treatment material, E-mail: zhl@cqu.edu.cn.

optimization control are described respectively, and the challenges and opportunities in the recent research are presented. Combining the theoretical research and the engineering practice is necessary for the automation process of the urban wastewater treatment plants.

Keywords: automatic control; activated sludge models; aeration; chemical phosphorus removal; multi-objective optimization

水污染控制是生态文明建设的重要一环,良好的水环境是美好生活的必要需求。随着中国经济的发展和人民生活水平的提高,污水排放量与日俱增,污水处理行业面临巨大挑战。污水处理行业作为能源密集型产业,运行成本高昂,如何在生产运行中兼顾环境效益与经济效益成为城镇污水处理厂面临的难题^[1-2]。自动控制技术的引入有助于解决这个问题。一方面,可靠的自动控制系统可以在保证处理效果的前提下降低能耗和药耗,节约能源和资源;另一方面,自动化的实现可以把人从重复劳动中解放出来,节省人力劳动以降低人力成本。对污水处理自动控制技术的研究始于 20 世纪七八十年代,中国在 20 世纪 90 年代以后开始引入自动控制系统,但当时大多是引进成套设备^[3]。近年来,随着电子技术的发展,自动化技术在污水处理领域取得了一系列进展,自动控制策略的制定不再只满足于过去单变量单输出的控制目标,而是逐步渗透至污水处理的各个环节。目前,中国的城镇污水处理厂大多采用自动控制和现场调控相结合的方式,自动化、信息化程度相对较低,自动控制策略的研究和实践对于提高污水处理可靠性、降低污水处理厂运行成本有着重要的意义。

1 活性污泥系统的模型

活性污泥法是城镇污水处理领域应用最广泛的方法,数学模型的建立对于活性污泥系统的运行分析和参数优化有着重要的意义^[4]。学者们针对活性污泥系统提出了一系列静态和动态的模型,其中最为知名且应用最广泛的是国际水协(IWA)推出的 ASM 系列模型^[5]。该系列主要包括 ASM1、ASM2、ASM2d 及 ASM3 模型,它们包含的组分和涉及的反应过程有所不同,主要特征如表 1 所示^[6]。ASM 系列模型将各种微生物反应过程有机结合起来,细致地描述了污水中有机物和氮磷的降解过程。在 ASM 模型的实际应用过程中,学者们从实际问题出发,简化运行中影响不显著的模型组分或为模型增添新组分,通过呼吸计量法、专家法、灵敏度分析法、过程工程法等方法对模型进行参数校正,从而提高模型的精确度^[7]。

学者们应用 ASM 模型设计了各种控制策略,但由于不同研究中活性污泥系统的内部结构和外部环境各异,所采用评价指数的计算方式也不尽相同,

难以对这些控制策略进行对比评价^[8]。为此,IWA 同欧盟科学技术合作组织一起开发了仿真基准模型(BSM),其中 BSM1 模型定义了污水处理的设备布局、相应参数、污水负荷、仿真步骤以及对仿真结果的评价^[9],为控制策略的设计和评价提供了依据和准则。BSM1 模型的仿真时间仅为 28 d,且只依据最后 7 d 的数据来计算评价指标,Rosen 等^[10]改进的长期模型将仿真时间扩展至 1 a,同时,丰富了模型中的干扰因素和评价指标。针对 BSM1 模型仅包含了污水处理系统生化池和二沉池的缺陷,Jeppsson 等^[11]改进的 BSM2 模型将污水处理厂的其他工作单元(初沉池、厌氧消化反应器等)也包括在其中。这些模型的建立为活性污泥处理系统自动控制方案的研究奠定了基础,研究者们可以从不同的角度出发设计自动控制系统,基于这些模型对处理系统进行动态分析,再按照拟定的标准评价试验结果,用更好的方案来完成对控制系统的优化。

表 1 ASM 系列模型的特征

Table 1 The characteristics of ASMs

模型	特征
ASM1	包含去除有机物和脱氮的过程,不包含除磷过程
ASM2	增加了生物除磷、化学除磷、厌氧水解和醇解的过程
ASM2d	增加反硝化除磷来丰富 ASM2 模型的除磷过程
ASM3	引入了有机物的贮藏过程,以内部呼吸取代 ASM1 模型中微生物的死亡分解衰减过程

2 污水处理自动控制策略的研究

传统的污水处理自动控制模式多为线性控制,即把系统的整体运行效果看作系统各个部分单独运行效果之和。时序控制是最简单的自动控制模式,该模式通过建立适用于特定处理工艺的模型,制定出工艺流程的各个关键节点,然后按照精确的时间流程实现对整个系统的自动控制。比例积分微分(PID)控制是污水处理厂最常用的控制模式,该模式应用 PID 模块对系统误差进行校正,使其达到系统设定值。PID 反馈模式被广泛地应用于活性污泥系统的溶解氧(DO)、氨氮、磷酸盐等关键水质指标的控制^[12]。反馈控制模式在系统误差产生之后才开始响应动作,具有一定的滞后性,如果事先对系统误差的来源及其影响范围有所估计,则可以采用前馈方式将干扰因素的测量信息也融入进控制法则

中,从而提高系统的响应速度。

实际的污水处理过程具有非线性、多变量、时变等特点^[13],传统的控制模式抗干扰能力较差,已不能满足污水处理厂日益复杂的控制需求。缺乏控制变量实时测量信息是自控系统运行中需解决的难题,自适应控制模式通过建立模型来估算系统中的关键参数^[14],模型预测控制模式则是基于模型对系统输出量进行预测^[15],这两种模式的控制原理都是线性化处理轻微非线性的系统。系统的非线性程度很强时,为了提高控制效率,只能应用非线性控制理论来设计系统。非线性控制模式包括几何控制^[16]、增益调度控制^[17]、非线性模型预测控制^[18]等,这些控制系统结构复杂,计算量庞大,对现场设备的计算能力和操作者的专业水平都提出了较高的要求。

智能控制算法是高级的自动控制策略,主要包括神经网络、模糊算法、进化算法等。神经网络算法模拟人脑神经系统,采用人工神经元网络来处理信息^[19];模糊算法的逻辑值在 0 和 1 间变化,这种边界平滑过渡反映了系统的内在不确定性,非常适用于估计系统中不精确的参数^[20];进化算法由生物进化理论发展而来,遗传算法是其中一个较为成熟的分支,具有强大的检索和全局优化能力^[21]。智能控制算法作为统计分析工具在污水处理系统中有着广阔的应用前景,与上述的线性和非线性控制模式相结合,有助于在复杂的污水处理系统中建立系统行为模型,从而赋予系统较强的学习和适应能力,增强系统鲁棒性。

2.1 精确曝气控制策略的研究

活性污泥法的曝气系统完成了氧从气相到液相的转换过程,为污水中有机物的氧化过程提供电子受体^[22]。曝气量的控制对系统的正常运行至关重要,曝气量不足容易引起丝状菌的过量繁殖,进而导致污泥膨胀,过高的曝气量则又会破坏污泥絮体,降低生化处理效率^[23]。鼓风机曝气设备在运行中能耗量巨大,这部分费用占污水处理厂总运行成本的 20%~40%^[24]。利用数学模型对曝气系统进行优化,实现对曝气系统精确的自动控制,不仅可以降低能耗,还有助于提高系统的处理效果及稳定性。

一些国家和地区的污水排放标准定义为长期平均值,Amand 等^[25]提出的控制策略以一定范围的水质波动为妥协,通过降低系统反馈速度来减少曝气量,从而达到降低能耗的目的。系统采用离散控制器响应进水负荷,以出水氨氮平均浓度为控制指标,BSM1 模型的模拟结果显示,这种控制方案比维持曝气池内溶解氧浓度恒定的方案节约了 1%~4%的能量,比基于出水氨氮浓度快速反馈的方案节约了 14%的能量。

传统的控制模式有着结构简单、调控便捷、经验

成熟等优势,在各种污水处理工艺的精确曝气系统中依然应用广泛。Sun 等^[26]采用两级串联比例积分(PID)算法,设计了一个基于氨氮反馈的生物膜法自动曝气系统,在生化池末端设置 DO 和氨氮浓度探针,进水泵房设置电磁流量计来监测流量,运用 ASM2d 模型对系统进行模拟和参数优化,在污水厂中的运行实践表明,系统曝气量较优化前减少了 20%。

曝气系统中存在着测量和反馈滞后性的问题,学者们通过将传统控制模式与模糊控制或模型预测控制相结合来增强系统的灵活性。Chiavola 等^[27]运用模糊控制策略对两个分别采用 PID 控制和氧化还原电位(ORP)控制的污水厂进行改造,控制系统根据出水氨氮浓度来调节反应器中溶解氧浓度,ORP 控制较 PID 控制每年可降低 2%的能耗,模糊控制的能耗降幅则达到了 13%。Kim 等^[28]对采用 ABA² 工艺的中试规模污水处理厂进行模型预测控制优化,简化了 ASM2 模型用于预测污水中氮、磷等污染物的转化过程,模型的氨氮预测值与实测值之间的标准差仅为 0.1 mg/L,曝气系统在由季节引起的水质、温度变化下依然运行良好,与改造前相比降低了约 19%的能耗。Qiu 等^[29]建立了一个包括能量、曝气量、射流影响等参数的表曝机能量模型,并依据前馈-反馈控制系统的实时监测数据(氧传递速率、耗氧率、射流速度等)来优化模型参数。将该模型应用至采用氧化沟工艺的污水厂中,系统能耗较改造前降低了约 10%。王世平等^[30]对一个采用 A²/O 工艺,日处理量 20 万 t 的污水处理厂进行精确曝气控制改造。控制系统采取“前馈-反馈-模型”多参数控制的方式,根据水量、水质指标等实时监控数据进行模拟计算,通过控制鼓风机和阀门的启闭按需曝气。稳定运行一年后,系统 DO 浓度精确到了 1.9~2.2 mg/L(设定值为 2 mg/L),与改造前相比能耗降低了 17%,出水总氮浓度也大幅度降低。

分析以上研究可以发现,精确曝气系统的控制策略是主要以 DO、ORP、氨氮等水质参数为控制变量,在保证出水水质达标的前提下通过控制曝气时间来降低能耗。这些控制策略很多是以出水氨氮为控制指标,因为在活性污泥系统中好氧异养菌的种群密度远远大于硝化细菌,正常运行的系统出水氨氮浓度较低时,也可以判断 COD 处于较低水平^[24]。当控制变量较少时,传统控制模式基本上已可满足精确曝气系统的控制需求,模型预测控制和模糊控制策略的应用则可以解决系统中存在的滞后性问题。自动曝气系统在推广上存在的困难主要包括:试运行校验时间长、硬件设备质量要求高、管理维护技术水平要求高等^[31]。因此,设计自动曝气系统时既要考虑污水处理工艺特征和控制要求,也要充分

照顾污水处理厂本身的生产配置条件。

2.2 化学除磷自动加药控制策略的研究

污水处理是一个复杂的、众多因素相互作用的过程,仅仅依靠生化系统有时无法达到控制目标。在脱氮除磷工艺中,反硝化菌和聚磷菌会在厌氧条件下竞争碳源,处于竞争劣势的聚磷菌便不能将厌氧释磷过程进行彻底,进而影响好氧条件下过量吸磷的过程,从而导致无法通过排泥的措施达到理想的除磷效果。为满足总磷排放标准,城镇污水处理厂常常需要投加药剂进行化学除磷^[32]。化学除磷的效果受到水体 pH、温度、氧化还原环境、加药点、反应器结构、微生物代谢作用等多种因素的影响^[33],相应地,除磷药剂也会影响生化池的处理效果,过多的投药量会使环境中的磷含量不足以支持微生物的细胞合成作用^[34]。人工加药往往只能依据工作人员的经验,处理效果并不稳定。因此,实现加药的优化控制对化学除磷过程十分重要。

早期的化学除磷自动加药系统根据进水流量进行恒比例加药^[35],由于进水水质的波动,这种策略必然会造成药剂的浪费或出水总磷排放不达标。近年来,随着在线磷酸盐仪表的普及,中国的学者设计了多种化学除磷自控方案,并将其应用至工程实践。

马伟芳等^[36]通过实验建立了适用于某示范污水处理厂的化学除磷加药量预测模型,采用对出水总磷反馈的控制策略,通过加药泵的变频调节来实现化学除磷的优化控制。改造后该厂出水总磷浓度稳定达到一级 A 排放标准,较改造前节省了约 20% 的投药量。庞洪涛等^[37]将前馈与反馈模式相结合来控制变频加药泵的运作,实行在曝气池末端和反硝化滤池加药的两点加药策略,对日处理量 10 万 t 的污水处理厂进行改造。系统稳定运行了 3 个月后,投药量减少了 30% 以上,出水总磷浓度稳定在 0.2~0.3 mg/L。贾玉柱等^[38]在对污水处理厂二期改造时,为生化池配置了实时时钟除磷(P-RTC)动态控制系统。系统对进水流量和正磷酸盐实时测量值进行反馈,利用内置数学模型计算出加药量并控制计量泵运作。稳定运行 1 a 之后,新系统的除磷吨水药耗降低约 17%,期间的药剂成本减少约 20 万元。邱勇等^[39]对一个采用 A²/O 工艺的污水处理厂进行化学除磷优化改造,他们分别探究了时序控制、流量前馈、出水反馈 3 种自控策略对除磷效果的影响。时序控制有着运行方式简单、平均加药量小的优势,但该系统耐冲击负荷能力差,处理效果不稳定;由于系统中存在着模型不精确、配水不均等问题,流量前馈方案的可靠性也较差;出水反馈系统虽然存在滞后性并且需要大量监测仪器支持,但在加药量相近的情况下,在这几种模式之中控制效果最好。

Garikiparthi 等^[40]的研究基于实验模拟,以 ASM2d 模型模拟 A²/O 工艺的除磷过程,探究了氯化铁强化化学除磷的优化控制策略。恒剂量控制、反馈控制、前馈控制、进给比控制 4 种控制方案都较改造前提高了 50% 左右的总磷去除率,其中反馈控制模式分别在好氧池和缺氧池设置针对总磷和硝酸盐浓度的 PI 控制器,形成多环控制网络,这种模式总磷去除率最高并且药耗量最小。

不同于上述多数研究中基于磷酸盐反馈的控制策略, Kim 等^[41]建立了一个采用自动滴定方式的化学除磷加药系统,根据实时电荷量确定活性污泥系统中除磷所需的药剂剂量。在 3 个月的小试试验中系统平均投药量减少了 14%,总磷去除率提高了 5%。

化学除磷过程并不能概括为简单的化学方程式,关于其深层反应机理和污水厂规模的建模近年来有一系列的研究进展,对化学除磷自动加药方案的设计和优化意义重大。Hauduc 等^[42]提出了一个化学除磷的动态模型,描述了污水处理系统中磷酸盐和铁盐混凝剂的吸附和沉淀机理。Mbamba 等^[43]提出了一个以物化机理改进的 BSM 子模型,并将该模型的模拟结果与污水处理厂的的实际数据作对比,磷的预测值与测量值的相对偏差只有 4~15%。随后,同一课题组^[44]利用该模型和 MBR 中试反应装置,深入探讨了化学除磷过程中铁盐的投加策略。通过将模拟数据和中试反应装置运行数据作对比发现,稳定运行后模型的磷、氨氮、固体悬浮物预测值都达到了较高的精度。基于模型的分析发现,铁盐的最佳投药点为好氧池,当闭环控制系统将装置内的磷控制在设定值后,出水总磷浓度下降到了更低的水平,显示出了自动控制的优越性。

化学除磷法在帮助城镇污水处理厂达到总磷排放标准的同时,也增加了污水处理厂的污泥产量和运行成本,优化的自动加药系统有助于抑制这些弊端。以上研究可以发现,化学除磷自动加药系统在中国的应用已经相对成熟,但是这些系统所依据的模型大多比较简单,没有考虑除磷药剂在活性污泥系统中复杂的转化过程,因此,在提高除磷效率上存在着相当大的优化空间。关于化学除磷机理和模型的研究成果显著,但为了提高模型预测精准度,系统中需要增加铁盐这种非常规指标的监测装置,这也为其应用带来了相当大的限制。以上这些研究并未涉及可用于回收磷的吸附法和结晶法^[45],可以作为学者们今后设计化学除磷自动加药方案时的考虑方向。

2.3 多目标优化控制策略的研究

污水处理厂运行的首要目标是使各项水质指标达到排放标准,维持运行工况的安全稳定,其次则是降低成本、减少能耗、提高环境效益^[46-47]。污水处理

过程机理复杂,难以建立精确的模型描述各种参数间的关系。同时,这个过程又容易受到外界因素影响,天气、温度等条件都会引起入水水质和处理环境的改变。如何在复杂的处理过程中平衡各项控制目标,实现控制系统的最优化是近年来学者们探索的主

要方向。智能控制算法不仅可以满足这些研究中多变量多输出的控制需求,也赋予了控制系统强大的学习、适应能力。BSM 系列模型及其相关模拟软件为学者们检验和评价新系统提供了重要的工具。多目标优化控制系统近年来研究成果的总结如表 2 所示。

表 2 多目标优化控制系统的应用

Table 2 The application of multi-objective control system

主要控制策略	活性污泥系统	优化目标	参考文献
自适应模糊神经网络+差分进化算法	BSM1	水质,能耗	[48]
自适应模糊神经网络+粒子群算法	BSM1	水质,能耗	[49]
递归神经网络+动态矩阵算法	BSM1	水质,能耗	[50]
模型预测+模糊控制	BSM1	水质,成本	[51]
遗传算法	BSM2	水质,成本,温室气体	[52]
模糊控制	BSM2	水质, N ₂ O 排放量	[53]
模糊控制	某小型污水厂	成本, CO ₂ 排放量	[54]
遗传算法	BSM2	水质,成本,沼气产量	[56]
遗传算法	BSM2	环境影响,成本,能量回收	[57]

污水处理厂的出水水质和运行成本是学者们最关注的问题。Qiao 等^[48]利用差分进化算法来计算好氧池 DO 浓度和缺氧池硝态氮浓度的最佳设定值,并通过自适应模糊神经网络控制器追踪这些设定值以达到预期效果。与已报道的其他控制策略相比,系统的模拟评价指标(包括曝气能量、抽运能量及出水水质)都有所改善。Han^[49]等构建了自适应核函数模型来描述系统中出水水质、能耗的复杂动力学,通过多目标粒子群优化算法确定系统溶解氧和硝酸盐的最佳设定值,然后借助模糊神经网络控制器来追踪控制这些参数。模拟结果表明,系统在干燥、雨天及暴雨 3 种天气下的控制误差比其他同类研究小,抗干扰能力强,同时也做到了水质和能耗的平衡,在降低能耗方面作用突出。Foscoliano 等^[50]将递归神经网络系统用于处理数据和改善模型,借助动态矩阵算法来获得生化系统 DO 值和内回流比的最佳控制。模拟结果表明,该控制系统在气候和测量误差的干扰下具有鲁棒性,有助于在减少运行成本的同时降低出水氨氮浓度峰值和硝酸盐浓度。Santin 等^[51]构建了一个采用分级控制结构的自动控制系统,系统低层采用带有前馈补偿的模型预测控制器,高层采用模糊控制器,通过权衡分析来确定一个可以同时改善出水水质和减少运行费用的优化控制区域。

全球变暖是国际社会中的热点问题,应对气候变化的系列举措也为污水处理厂提出了减少温室气体排放的新要求。Sweetapple 等^[52]选择非劣排序遗传算法作为最优化处理算法,探究了污水处理厂减少温室气体(CO₂ 和 N₂O)排放的控制策略。模

拟结果表明,在不改变污水处理厂设施布局的情况下,可采取调整曝气量和减少碳源投加量等措施来减少温室气体排放。在保证出水水质达标而又不增加运行费用的前提下,该控制策略有助于最大限度地减少温室气体排放量。Boiocchi 等^[53]提出了一个用于减少污水处理厂 N₂O 排放量的自控策略。由于设计和运行参数的差异,不同污水处理厂的最低 N₂O 排放量变化很大,因此,控制目标便设定为遵守氨氮排放标准的同时,在特定污水厂达到最少的 N₂O 排放量。系统采用模糊控制策略,依据好氧区出入口氨氮和硝态氮的测量数据,通过控制曝气维持系统中氨氧化菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NO₂)活性的平衡,提高 NO₂对 AOB 产出的亚硝酸盐的吸收量,从而减少 N₂O 产量。Diaz 等^[54]对西班牙的一个带有回用水系统的小型污水处理厂进行改造,采用模糊多目标规划技术建立模型,用于控制污水处理厂中水稀释污水的处理过程,借此对污水处理厂的二级和三级处理工艺进行优化。此方案与污水处理厂原有方案相比降低了约 50% 的成本,理论上每年可减少 CO₂ 排放量 586.2 t。

传统的污水处理工艺忽视了污水本身作为能源载体的特点^[55],单纯地采取“以能耗能”的方式去除污染物。在目前能源短缺的背景下,污水中所蕴藏资源的回收利用成为了一个重要的课题。Kim 等^[56]致力于研究污水处理厂出水水质、沼气产量及运行费用的综合优化问题,采用多环多目标控制器控制运行中的各项参数,使其达到遗传算法根据入水水质确定的设定值。模拟和评价结果显示,系统的沼气产量提高了约 4%,出水水质也有相应改善。

Lee 等^[57]为了提高污水处理厂运行的可持续性,在活性污泥系统中设计了一个热能联产子系统。在这个子系统中,压缩空气同厌氧消化产生的沼气一起在燃烧室中反应生成高温高压气体,随后被输送到微型燃气轮机中用于发电。剩余的高温高压气体一部分用于预热炉加热压缩气体,另一部分则经过热回收蒸汽机生成蒸汽用于维持厌氧消化所需的温度。作者采用非劣排序遗传算法作为多目标优化算法,运用热-环境-经济建模的方法进行评价分析。模拟结果显示,系统的运行成本和环境影响分别降低了约 17% 和 5%,热能联产系统提供的能量可满足污水处理厂 47% 的电能需求和全部的热能需求。

智能控制是污水处理厂自动控制的发展方向,自动控制策略也将致力于污水处理全过程的有效控制。目前,大部分的相关研究还是集中于实验模拟,这主要是由于以下原因:活性污泥系统的模型还不完善,对大规模城镇污水处理厂的适用性不强;污水处理厂的安全稳定运行始终是首要考虑因素,大规模水厂的改造试验要承担很大的风险;自动控制系统的配套设备价格昂贵,试点工程需要大量资金支持。因此,这些研究还需要在工程实践中开展进一步的可靠性分析和成本效益分析,才能得到推广和应用。

3 结语与展望

城镇污水处理厂自动控制的实现使技术人员无须亲临现场就可以监测系统 and 现场设备的运行状态,并利用本地软硬件资源对远程对象进行控制。依托于自控系统的发展,污水处理厂在满足日益严格的环保要求的同时,有望最终实现全自动化无人值守或远端少人值守。

未来的城镇污水处理厂自动控制系统将向着智能化、集成化方向发展,安全稳定、运行维护便捷、绿色可持续将成为其基本特征。针对目前研究中存在的问题,有以下几点建议:

1) 建立适用于大规模污水厂的数学模型。云计算操作系统为自动控制系统的发展提供了新的机遇,可以通过计算机进行大数据的收集和记录,建立基于大数据的数学模型以增强控制系统的鲁棒性。同时,云平台也可以为相似污水处理系统的控制和参数调节提供技术支持和示范。

2) 综合考虑实际运行中的控制目标,建立完备的评价体系。不同国家和地区的排放标准和污水厂运行目标有所差异,为了使设计的系统更好地适应当地的发展要求,完备的评价体系不可或缺。

3) 积极开展试点工程实践。在风险防范措施可靠的情况下,应当积极应用自动控制系统进行试点改造,在工程实践中发现问题,并通过优化模型和算

法或增加监测控制设备来解决问题。成功的工程实践可以大幅度推进污水处理自动化的进程。

参考文献:

- [1] ZHANG Q H, YANG W N, NGO H H, et al. Current status of urban wastewater treatment plants in China [J]. *Environment International*, 2016, 92/93: 11-22.
- [2] LONGO S, HOSPIDO A, LEMA J M, et al. A systematic methodology for the robust quantification of energy efficiency at wastewater treatment plants featuring data envelopment analysis [J]. *Water Research*, 2018, 141: 317-328.
- [3] 高大文, 彭永臻, 王淑莹, 等. 污水处理智能控制的研究、应用与发展 [J]. *中国给水排水*, 2002, 18(6): 35-39.
GAO D W, PENG Y Z, WANG S Y, et al. Research, application and development on intelligent control of wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2002, 18(6): 35-39. (in Chinese)
- [4] 郭彦雪, 李伟, 赵凯. ASM2d 模型改良及在 DE 型氧化沟中的应用 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2017, 39(1): 125-131.
GUO Y X, LI W, ZHAO K. Modified ASM2d model and application in the DE-oxidation ditch [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2017, 39(1): 125-131. (in Chinese)
- [5] 卢培利, 张代钧, 刘颖, 等. 活性污泥法动力学模型研究进展和展望 [J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2002, 25(3): 109-114.
LU P L, ZHANG D J, LIU Y, et al. Development and prospects of activated sludge dynamic model [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2002, 25(3): 109-114. (in Chinese)
- [6] HENZE M, GUJER W, MINO T, et al. *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3* [M]. London: IWA Publishing, 2000.
- [7] 池春榕, 董姗姗, 李齐佳, 等. 活性污泥数学模型研究进展 [J]. *有色金属科学与工程*, 2017, 8(4): 111-117, 124.
CHI C R, DONG S Y, LI Q J, et al. Research progress on activated sludge mathematical model [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2017, 8(4): 111-117, 124. (in Chinese)
- [8] DAI H L, CHEN W L, LU X W. The application of multi-objective optimization method for activated sludge process: A review [J]. *Water Science and Technology*, 2016, 73(2): 223-235.
- [9] 刘大伟, 沈文浩. 活性污泥法污水处理基准仿真模型的开发及进展 [J]. *中国给水排水*, 2007, 23(20): 20-24.
LIU D W, SHEN W H. Development of benchmark simulation model for activated sludge wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(20): 20-24. (in Chinese)

- [10] ROSEN C, JEPSSON U, VANROLLEGHEM P A. Towards a common benchmark for long-term process control and monitoring performance evaluation [J]. *Water Science and Technology*, 2004, 50(11): 41-49.
- [11] JEPSSON U, PONS M N, NOPENS I, et al. Benchmark simulation model No 2: general protocol and exploratory case studies [J]. *Water Science and Technology*, 2007, 56(8): 67-78.
- [12] IRATNI A, CHANG N B. Advances in control technologies for wastewater treatment processes: Status, challenges, and perspectives [J]. *CAA Journal of Automatica Sinica*, 2019, 6(2): 337-363.
- [13] YANG T, QIU W, MA Y, et al. Fuzzy model-based predictive control of dissolved oxygen in activated sludge processes [J]. *Neurocomputing*, 2014, 136: 88-95.
- [14] LIN M J, LUO F. An adaptive control method for the dissolved oxygen concentration in wastewater treatment plants [J]. *Neural Computing and Applications*, 2015, 26(8): 2027-2037.
- [15] WANG X D, RATNAWEERA H, HOLM J A, et al. Statistical monitoring and dynamic simulation of a wastewater treatment plant: A combined approach to achieve model predictive control [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 193: 1-7.
- [16] GHOSH P, ROY T K, MAJUMDER C. Optimization of industrial wastewater treatment using intuitionistic fuzzy goal geometric programming problem [J]. *Fuzzy Information and Engineering*, 2016, 8(3): 329-343.
- [17] VLAD C, SBARCIOG M, BARBU M, et al. Indirect control of substrate concentration for a wastewater treatment process by dissolved oxygen tracking [J]. *Control Engineering and Applied Informatics*, 2012, 14(1): 37-47.
- [18] HAN H G, QIAN H H, QIAO J F. Nonlinear multiobjective model-predictive control scheme for wastewater treatment process [J]. *Journal of Process Control*, 2014, 24(3): 47-59.
- [19] HAMED M M, KHALAFALLAH M G, HASSANIEN E A. Prediction of wastewater treatment plant performance using artificial neural networks [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2004, 19(10): 919-928.
- [20] NADIRI A A, SHOKRI S, TSAI F T C, et al. Prediction of effluent quality parameters of a wastewater treatment plant using a supervised committee fuzzy logic model [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 180: 539-549.
- [21] 丛露露. 基于遗传算法优化的 RBF 神经网络在污水处理中的应用 [D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
CONG L L. Research and application on optimized RBF neural network based on GA for sewage treatment [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [22] ÅMÅND L, OLSSON G, CARLSSON B. Aeration control - A review [J]. *Water Science and Technology*, 2013, 67(11): 2374-2398.
- [23] 任争光, 张景炳, 王浩宇, 等. 污水处理中曝气控制研究进展 [J]. *环境卫生工程*, 2018, 26(2): 67-72.
REN Z G, ZHANG J B, WANG H Y, et al. Research progress of aeration control in wastewater treatment [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2018, 26(2): 67-72. (in Chinese)
- [24] 魏彬, 杨慧敏, 张晓正, 等. 污水处理厂曝气总量精确控制方法的研究与应用 [J]. *中国给水排水*, 2016, 32(6): 94-98.
WEI B, YANG H M, ZHANG X Z, et al. Research and application of precise control method of total aeration rate in sewage treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(6): 94-98. (in Chinese)
- [25] ÅMÅND L, CARLSSON B. Optimal aeration control in a nitrifying activated sludge process [J]. *Water Research*, 2012, 46(7): 2101-2110.
- [26] SUN J Y, LIANG P, YAN X X, et al. Reducing aeration energy consumption in a large-scale membrane bioreactor: Process simulation and engineering application [J]. *Water Research*, 2016, 93: 205-213.
- [27] CHIAVOLA A, ROMANO R, BONGIROLAMI S, et al. Optimization of energy consumption in the biological reactor of a wastewater treatment plant by means of oxy fuzzy and ORP control [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, 228(8): 277.
- [28] KIM H, LIM H, WIE J, et al. Optimization of modified ABA2 process using linearized ASM2 for saving aeration energy [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 251: 337-342.
- [29] QIU Y, ZHANG C, LI B, et al. Optimal surface aeration control in full-scale oxidation ditches through energy consumption analysis [J]. *Water*, 2018, 10(7): 945.
- [30] 王世平, 王艺霖. A²/O 中精确曝气控制的节能分析与评估 [J]. *水处理技术*, 2016, 42(11): 113-117.
WANG S P, WANG Y L. Analysis and evaluation of energy saving about accurate aeration control technology in A²/O process [J]. *Technology of Water Treatment*, 2016, 42(11): 113-117. (in Chinese)
- [31] 谢小明. 精确曝气控制在污水处理厂中的应用和探索 [J]. *中国给水排水*, 2016, 32(6): 24-27.
XIE X M. Application and exploration of accurate aeration control in sewage treatment plants [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(6): 24-27. (in Chinese)
- [32] 蔡娜, 郑怀礼, 张正安, 等. 厌氧-接触氧化工艺二级出水混凝除磷 [J]. *环境工程学报*, 2016, 10(8): 4087-4091.
CAI N, ZHENG H L, ZHANG Z G, et al. Phosphorus

- removal from anaerobic-contact oxidation effluent by coagulation [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2016, 10(8): 4087-4091.(in Chinese)
- [33] WANG Y, TNG K H, WU H, et al. Removal of phosphorus from wastewaters using ferrous salts-A pilot scale membrane bioreactor study [J]. *Water Research*, 2014, 57: 140-150.
- [34] 张亚勤. 污水处理厂达到一级 A 排放标准中的化学除磷 [J]. *中国市政工程*, 2009(5): 40-41, 55.
ZHANG Y Q. Chemical phosphorus removal for achieving 1A standard in waste water treatment plant [J]. *China Municipal Engineering*, 2009 (5): 40-41, 55. (in Chinese)
- [35] 李文华, 王岩. 重庆市巫山县污水处理厂工程自动控制系統 [J]. *控制工程*, 2004(Sup2): 26-29.
LI W H, WANG Y. The automatic control system of Wushan wastewater treatment plant in Chongqing [J]. *Control Engineering of China*, 2004(Sup2): 26-29.(in Chinese)
- [36] 马伟芳, 郭浩, 姜杰, 等. 城市污水厂化学除磷精确控制技术研究与应用 [J]. *中国给水排水*, 2014, 30(5): 92-95.
MA W F, GUO H, JIANG J, et al. Research and demonstration on precise control technology for chemical phosphorus removal in urban sewage treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(5): 92-95.(in Chinese)
- [37] 庞洪涛, 薛晓飞, 邱勇, 等. 城市污水化学除磷优化控制技术及工程应用 [J]. *中国给水排水*, 2014(23): 16-18.
PANG H T, XUE X F, QIU Y, et al. Optimal control technology of chemical phosphorus removal from municipal wastewater and its engineering application [J]. *China Water & Wastewater*, 2014(23): 16-18.(in Chinese)
- [38] 贾玉柱, 赵月来, 刘成钰, 等. P-RTC 化学除磷智能实时控制系统在污水厂的应用 [J]. *中国给水排水*, 2019, 35(8): 87-90.
JIA Y Z, ZHAO Y L, LIU C Y, et al. Study on operation effect of P-RTC automatic dosing device [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(8): 87-90.(in Chinese)
- [39] 邱勇, 李冰, 刘垚, 等. 污水处理厂化学除磷自动控制系统优化研究 [J]. *给水排水*, 2016, 52(7): 126-129.
QIU Y, LI B, LIU Y, et al. Optimal control of chemical precipitation of phosphorous in wastewater treatment plants [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 52(7): 126-129.(in Chinese)
- [40] GARIKIPARTHY P S N, LEE S C, LIU H B, et al. Evaluation of multiloop chemical dosage control strategies for total phosphorus removal of enhanced biological nutrient removal process [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2016, 33(1): 14-24.
- [41] KIM W K, SUNG Y K, YOO H S, et al. Optimization of coagulation/flocculation for phosphorus removal from activated sludge effluent discharge using an online charge analyzing system titrator (CAST) [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, 21: 269-277.
- [42] HAUDUC H, TAKÁCS I, SMITH S, et al. A dynamic physicochemical model for chemical phosphorus removal [J]. *Water Research*, 2015, 73: 157-170.
- [43] KAZADI M C, FLORES-A X, JOHN B D, et al. Validation of a plant-wide phosphorus modelling approach with minerals precipitation in a full-scale WWTP [J]. *Water Research*, 2016, 100: 169-183.
- [44] KAZADI M C, LINDBLOM E, FLORES-A X, et al. Plant-wide model-based analysis of iron dosage strategies for chemical phosphorus removal in wastewater treatment systems [J]. *Water Research*, 2019, 155: 12-25.
- [45] 刘宁, 陈小光, 崔彦召, 等. 化学除磷工艺研究进展 [J]. *化工进展*, 2012, 31(7): 1597-1603.
LIU N, CHEN X G, CUI Y Z, et al. Research progress of chemical dephosphorization process [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2012, 31(7): 1597-1603.(in Chinese)
- [46] LI W J, LI L J, QIU G Y. Energy consumption and economic cost of typical wastewater treatment systems in Shenzhen, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: S374-S378.
- [47] DONG X, DU X M, LI K, et al. Benchmarking sustainability of urban water infrastructure systems in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170: 330-338.
- [48] QIAO J F, HOU Y, ZHANG L, et al. Adaptive fuzzy neural network control of wastewater treatment process with multiobjective operation [J]. *Neurocomputing*, 2018, 275: 383-393.
- [49] HAN H G, ZHANG L, LIU H X, et al. Multiobjective design of fuzzy neural network controller for wastewater treatment process [J]. *Applied Soft Computing*, 2018, 67: 467-478.
- [50] FOSCOLIANO C, DEL VIGO S, MULAS M, et al. Predictive control of an activated sludge process for long term operation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 304: 1031-1044.
- [51] SANTÍN I, PEDRET C, VILANOVA R. Fuzzy control and model predictive control configurations for effluent violations removal in wastewater treatment plants [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(10): 2763-2775.
- [52] SWEETAPPLE C, FU G T, BUTLER D. Multi-objective optimisation of wastewater treatment plant control to reduce green house gas emissions [J]. *Water*

- Research, 2014, 55: 52-62.
- [53] BOIOCCHI R, GERNAEY K V, SIN G. A novel fuzzy-logic control strategy minimizing N_2O emissions [J]. Water Research, 2017, 123: 479-494.
- [54] DÍAZ-MADROÑERO M, PÉREZ-SÁNCHEZ M, SATORRE-AZNAR J R, et al. Analysis of a wastewater treatment plant using fuzzy goal programming as a management tool: A case study [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 180: 20-33.
- [55] 郭昉, 吴毅晖, 李波, 等. 我国城镇污水处理厂节能降耗研究现状及发展趋势 [J]. 水处理技术, 2017, 43 (6): 1-4, 10.
- GUO F, WU Y H, LI B, et al. Research status and development trend for energy saving in municipal wastewater treatment plants in China [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43 (6): 1-4, 10. (in Chinese)
- [56] KIM M, YOO C. Multi-objective controller for enhancing nutrient removal and biogas production in wastewater treatment plants [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2014, 45 (5): 2537-2548.
- [57] LEE S, ESFAHANI I J, IFAEI P, et al. Thermo-environment-economic modeling and optimization of an integrated wastewater treatment plant with a combined heat and power generation system [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 142: 385-401.

(编辑 胡玲)