

数学模拟在污水处理厂节能减排中的应用和发展

宁艳春¹ 何洪波² 邱延波² 王英楠¹ 蒲文晶¹ 史耀波² 邵巍² 谢丹²

(1. 中国石油吉林石化公司研究院; 2. 中国石油吉林石化公司污水处理厂)

摘 要 在国内外节能减排的大背景下,污水处理厂面临着巨大的提标改造和节能减排压力。基于活性污泥数学模型的数学模拟技术在国内外许多污水处理厂的模拟仿真、运行诊断与工艺优化、升级评估、节能减排等方面得到广泛的应用,文章主要介绍了数学模拟技术在污水处理厂节能减排方面的发展和应用情况,并提出今后国内的主要研究方向。

关键词 污水处理; 数学模拟; 节能减排; 发展; 应用

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3158(2012)03-0001-03

0 引 言

为实现可持续发展的战略目标,国家将不断加大对重点工业企业污染的治理力度。“十二五”期间,节能减排工作更是一项重要而艰巨的任务。在国内外倡导节能减排的形势下,国家对污水排放要求不断提高,节能减排将成为污水处理厂运营管理的一项重要目标,这使得污水处理厂面临着巨大的提标改造和节能减排压力。

数学模拟技术作为一种模拟仿真技术,可方便、快捷、有效地指导污水处理的运行工艺优化,提高出水水质,降低曝气能耗,综合考虑污泥量等相关问题。可以在保证出水水质达标的前提下,优化与能耗有关的相应参数,选取最佳的工艺参数。实现污水处理行业由经验式管理向精细化、信息化管理的跨越,具有广泛的应用前景。

1 污水处理系统的数学模型简介

污水处理系统的数学模型是基于国际水协会的活性污泥模型发展起来的。活性污泥工艺模型自推出以来,随着计算机技术的飞速发展已逐渐成为一种成熟的工程工具,在欧美国家的实际工程和科学研究中得到广泛应用。我国已建及在建的废水处理厂中约有 80% 以上采用活性污泥法,应用数学模型进行污水处理厂的升级改造和工艺优化是节能减排的必然需要。在我国此领域的研究尚处于起步阶段,国内目前大多是借助国外的商业化模拟软件进行污水处理系统数学模拟方面的研究。利用活性污泥模型

可以对现有工艺进行优化,还可以对升级改造的多种污水处理工艺方案进行比选,从而达到减少污染物排放、降低运行能耗的目标。

2 数学模拟在污水处理厂节能减排方面的应用

2.1 生物工艺智能优化控制系统

生物工艺智能优化控制系统 BIOS (Bioprocess Intelligent Optimization System) 的核心是活性污泥模型,配备专有的在线仪表与污水处理厂中央控制系统 SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition 系统,即数据采集与监视控制系统) 接口,能将污水处理厂进、出水的实时水质指标输入该实时模型进行模拟,然后输出处理工艺的各个控制目标参数,包括溶解氧(DO)、内回流比、外回流比及排泥量等。以污水处理厂工艺优化诊断的结果为基础建立开发的 BIOS 系统,能很好地对设计工艺的处理效果进行模拟,反馈给中央控制系统,提供最佳的控制参数,从而达到既满足出水的排放目标,又能达到节省能耗、降低运行费用的目的。

美国 South Bermuda 污水处理厂^[1]经过工艺升级改造,将原有的调节池改造成生化反应池后,新增配套的沉淀池及滤池,污水处理量从原来的 $3.19 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 增至 $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,且新建处理设施占地面积较小。South Bermuda 污水处理厂不但拥有运行良好的自控系统及报警系统,且在升级改造中采用了以在线活性污泥模型 2D 号(ASM2D)为基础的生物工艺智能优化控制系统,实现了出水达标排放和曝气节能的双

重目的,更成为污水处理厂自动化控制的发展方向。

GeorgeLee等^[2]对上海市曲阳、松江污水处理厂现有处理工艺做了优化诊断,建立水质模型。主要采用系统分析方法通过现场考察、大规模数据收集、利用国际水协ASM2D等工具,全面评价了两厂目前的工艺状况和瓶颈所在,并提出能确保达标的改造设计工艺和优化方案。对于曲阳污水处理厂,分别对A/A/O(厌氧/缺氧/好氧,Anaerobic-Anoxic-Oxic)工艺;五段Bardenpho同步脱氮除磷工艺,以及硝化滤池工艺这三种设计处理工艺进行预测,模拟结果表明,硝化滤池工艺的处理效果最佳,并且污水处理厂处理能力可增加20%,出水可达到GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》二级标准,对松江污水处理厂则选择了A/A/O工艺、五段Bardenpho工艺和五段Bardenpho加甲醇工艺进行模拟预测。从模拟结果看,由于冬季水温低造成硝化速率及反硝化速率下降,为达到GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级A标准,松江污水处理厂处理能力应减少 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。另外,在松江污水处理厂的模拟过程中发现,工业废水对处理效果影响很大。该项目为老厂工艺改造提供了一套完整的技术方案和工作流程,使老厂改造工艺具有脱氮除磷功能,可以实现出水水质提高,并预计工艺诊断优化成果的具体实施可为污水处理厂节省一次性基建费用10%~30%和运行费用15%~40%。

朱石清^[3]等对上海某大型污水处理厂(原设计处理量为 $120 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,原处理工艺为高效沉淀池),进行了工艺优化及模拟改造。通过优化模拟改造系统的分析步骤,建立污水处理厂达标改造和扩建工艺模型。达标改造模型预测方案共针对3种水温、2种进水量和数种高效沉淀池出水回流量进行模拟,污水处理厂达标改造工艺模型模拟结果表明:高效沉淀池的处理出水应根据具体情况,部分进入二级生物处理,以达到GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》的二级排放标准;扩建工艺模拟预测方案共针对2种进水量、3种温度和4种DO运行情况进行模拟,扩建工艺模拟结果表明:应根据实际进水量和水温情况合理控制DO,在水温为12℃时需要维持较高的DO,以满足硝化需要;在水温为20℃和28℃时,则需要降低DO以防止硝化过量,预防回流污泥中的硝酸盐氮浓度过高,影响磷的去除效果。

扬州六圩污水处理厂^[4]处理的污水中工业废水占60%。二期工程的出水指标要由原来的一级B升级到一级A标准,以满足水环境污染减排的要求。

在二期设计中,从进水在线监测、水解酸化池、A/A/O工艺、生物智能工艺优化控制系统和深度处理等方面提出改进措施和优化方案。由于该污水处理厂含有高比例的工业污水和有生物毒性的化工废水,导致污水处理厂工艺参数的波动比较大,而将生物智能优化系统应用于A/A/O工艺,可以实现将污水处理厂在线仪表监测的实时输入活性污泥模型进行模拟,然后输出溶解氧、内外回流比及排泥量等工艺控制目标参数,并反馈给中央控制系统,提供最佳的控制参数。该工艺改进设计不仅提高了出水水质,更达到了节能的目标。与传统工艺相比,水解酸化和A/A/O工艺组合工艺能够实现污泥减量约56.5%,可节省投资38.4%、节电34%、节省运转费36.7%。而应用生物智能优化系统,可避免低负荷情况下过量曝气的能耗损失,可使鼓风机节电20%~30%。

2.2 BioWin 软件

BioWin^[5]是一款污水处理工艺数学模拟软件,其特点是将全污水处理厂的模型融合在一块。BioWin模型包含了国际水协推出的ASM1号模型、ASM2D模型、ASM3号模型以及污泥消化模型、pH模型、化学沉淀模型和污泥上清液的处理工艺等一系列活性污泥数学模型。它包含两个模块,一个是稳态分析器,假定进水流量和组分恒定;另一个是使用时变输入的动态仿真器。

智利圣地亚哥污水处理厂运行合同的水费谈判,采取BioWin动态的工艺模型,通过模拟污水处理厂的运行以估计运行费用、污泥产量和能耗要求(氧需求)。BioWin污水处理工艺还在纽约市环保局管辖污水处理厂生物脱氮除磷升级改造中得到了应用。以BioWin软件为平台,建立了F. Wayne Hill污水处理工艺优化的全厂模型;通过对不同的运行工况和生物反应池的季节优化等,降低运行和维护费用,保证高质量的出水。

包头市北郊污水处理厂^[6]采用传统活性污泥工艺,拟实施二期扩建,使出水水质标准从GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》二级提升到一级A,从而提高处理等级和加大处理能力。针对该厂目前出水氨氮不能达标排放和需要进行二期扩建工程,对水质现状和污水处理厂工艺进行诊断分析,通过收集大量历史数据,借助活性污泥测定仪Advanced Biological Activity Meter(ABAM)和便携式仪器测定工艺参数,并运用活性污泥BioWin模型模拟优化污水处理厂运行工艺,从稳定达标和节能降耗两方面为扩建工程提供最佳设计和运行方案。通过分析各断面的氨

氮浓度、沿程溶解氧和污泥活性,认为是过低的溶解氧浓度、较短的泥龄、硝化细菌所占比例低等因素的共同作用导致出水氨氮超标。在二期扩建工程中,建议好氧区的溶解氧浓度呈递减分布,通过模型模拟得到好氧区的实际需氧量为 40.42 t/d ,总需气量为 $4.09 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。污水处理厂稳定达标(尤其是氨氮)和节能减排是最迫切需要解决的技术难题,采用生物工艺优化控制系统可以实时调整工艺运行参数,满足达标排放要求,并可节省曝气费用 $43.2 \sim 129.6 \text{ 万元/a}$,节电 $(153.3 \sim 459.9) \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h/a}$ 。

2.3 TUD 模型软件

荷兰代尔夫特理工大学(TUD)开发的模型—TUD 模型是经典活性污泥 2 号模型(ASM2)与代尔夫特除磷代谢模型的有机结合。

针对北京某大型市政污水处理厂的升级改造方案—改良 A/A/O 工艺,郝晓地^[7]等人应用 TUD 模型进行了模拟评价。模拟评价结果显示:出水 TP 已经接近排放标准限值,存在超标排放的风险;设置预缺氧池会消耗进水中有限的挥发性脂肪酸(VFA),并不能促进生物除磷;当设置脱氧池对生物脱氮的促进作用十分有限;当水解酸化作用保持进水总 COD 中的 VFA 含量大于 10% 时,可以获得较好的生物除磷效果。在模拟评价的基础上,提出的 A/A/O 优化设计方案是将初沉池全部改造为厌氧池并施以侧流化学除磷。通过对优化工艺方案进行的模拟预测,结果显示出水水质良好而稳定。

以荷兰某污水处理厂为例,郝晓地等人^[8]以同步脱氮除磷机理为核心,通过数学模拟方式着重说明实现反硝化脱氮除磷对污水处理厂节能减排所起的积极作用。模拟分析采用 TUD 模型,模型参数源于校准值。模拟分析中使用 AQUASIM 2.0 计算机软件进行模拟计算,结果表明:反硝化脱氮除磷在同步脱氮除磷过程中能够节约 53%~59% 的 COD。从而使多余的 COD 转化 CH_4 的产量增加了 154%~274%,能耗相应减少 104%~119%。 CH_4 燃烧产生了部分能量以及曝气量的减少,使 CO_2 排放量减少 16%~21%。根据设置初沉池后能量平衡分析可知,实例中的污水处理厂所产生的 CH_4 燃烧后产生的能量足够满足污水处理厂运行中曝气、污泥脱水及污泥焚烧所需要的能量。

针对太原市杨家堡市政污水处理厂^[9],应用 TUD 模型对其二级处理工艺升级至南非开普敦大学 UCT(University of Cape Town)工艺进行了模拟设计。应用嵌入 TUD 模型的 AQUASIM 2.0 软件,对

选定的 UCT 工艺建立工艺模型。在应用 TUD 模型及缺省参数对现状二级处理工艺出水进行准确模拟验证的基础上,以 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准为出水目标值,分别对 12°C 、 14°C 和 20°C 三种工况进行了模拟预测,从而确定厌氧池、选择池、缺氧池和好氧池的体积;并通过污泥回流量、耗氧量、剩余污泥量等技术参数的模拟预测结果,确定曝气设备、污泥回流设备、水下推进器、碱投加设备等其他主要工艺设计内容。

针对某大型市政污水处理厂^[10]倒置 A/A/O 工艺的运行问题,采用 TUD 模型与 AQUASIM 模拟软件进行诊断。通过对运行状况的初步模拟评价发现,导致脱氮除磷效果不佳的主要原因在于进水中的碳源,特别是 VFA 不足和厌氧水力停留时间(HRT)太短。提出曝气池分区重组、外加碳源、总进水超越初沉池、UCT 改造以及结合磷回收等优化运行和工艺改造方案,并对各种改造方案可能出现的较好运行效果进行了模拟预测。

3 数学模拟在污水处理厂节能减排中的发展

随着城市污水处理厂出水排放标准的日趋严格,传统基于经验的活性污泥工艺设计方法已不能满足工程要求。为更好地进行活性污泥工艺的优化设计和运行,在过去的 30 年中,活性污泥工艺模型已从简单的去除 COD 和硝化发展为同时生物脱氮除磷模型,从稳态模型发展到动态模型,从单一的生物反应器模型发展到能同时模拟污水和污泥处理的全污水处理厂模型。这些工艺模型包括了许多描述不同单元工艺的状态变量以及这些变量在多种生物化学反应过程中的化学计量关系和动力学特征。

活性污泥工艺模型自推出以来,在国外已得到了广泛应用,而我国此领域的研究与国际先进水平存在很大差距。由于自行开发模型软件不但需要活性污泥模型的专业知识,而且需要计算机编程的专业知识,另外适用范围较小,有一定的局限性,因此国内目前的现状大多是借助于国外的商业化模拟软件进行污水处理系统数学模拟方面的研究。目前在国内同济大学、天津大学、北京排水集团科技研发中心、华北市政工程设计研究院均使用 BioWin 软件,天津创业环保研发中心使用 GPS-X 软件。

通过数学模拟技术在国内外污水处理厂的应用可以确定,通过数学模拟和优化可以进一步优化污泥浓度、混合液回流量、碱度、溶解氧等运行指标,优化

(下转第 56 页)

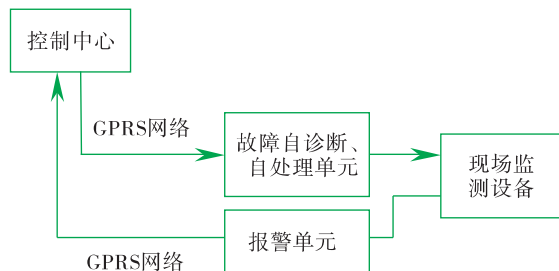


图3 故障报警、自诊断、自处理系统结构设计

现故障。此时控制中心发送诊断处理命令,故障自诊断、自处理单元将对现场机进行故障诊断,并对其进行现场故障处理,最终使其恢复工作。

4 设计难点

- ◆ 故障自诊断处理的程序编写
 - ◆ 监测设备与故障诊断模块通讯协议的选定
 - ◆ 数据采集传输仪控制单元中控制算法的选择
- 不同的控制算法会影响控制效果,传统的增量式 PID (比例积分微分) 控制算法难以得到理想的控制效果,因为 PID 控制的难点在于如何对控制参数进行整定,以求得到最佳效果^[5]。如果参数选取不合适,会导致测量值与设定值存在一定的误差,不能稳定在设定值

上。若选取先进控制算法,则控制效果会更好。

5 结束语

基于反馈控制的污染源在线监测系统实现了实时调整、故障自诊断处理和反控功能,如果将其应用到油田污染源在线监测系统中,会在一定程度上提高油田污染源在线监测自动化程度,从而促进油田污染源在线监测系统的建设与发展,为油田乃至我国的环保事业作出贡献。

参考文献

- [1] 于爱敏,于洋,范卉.谈我国污染源在线监控与预警系统建设的问题[J].北方环境,2010,22(4):91-94.
- [2] 倪燕.污染源在线监测系统运营管理中存在的问题及建议[J].环境科学导刊,2010,29(2):20.
- [3] 徐赛华.污染源在线监测监控系统的设计与实现[J].绵阳师范学院学报,2009,28(2):114-115.
- [4] 祁亨年,蒋梁中.基于 Web 的广域污染源水质自动监控系统研究[J].仪器仪表学报,2008,29(1):122-123.
- [5] 王向阳,申则雄,邱瑞萍.油田污水处理前馈-反馈控制系统[J].油气田地面工程,2010,29(3):64-65.

(收稿日期 2012-02-06)

(编辑 王薇)

(上接第3页)

系统的生物总量;确定适宜的污泥浓度、泥龄、剩余污泥排放量等指标,提高污泥活性和出水水质;减少剩余污泥量;优化曝气量、确定精确科学的气量供应;可有效降低鼓风机能耗和污泥处理费用,达到节能减排的目标。

4 结束语

节能减排是我国的“十二五”规划中重要的目标,数学模拟技术可以方便快捷地指导污水处理厂进行工艺优化和升级改造,具有普遍的推广意义。目前国内应用数学模拟技术进行优化的污水处理厂大多是城市污水处理厂,只有扬州六圩污水处理厂(工业污水占60%)有类似的研究。在国内,将数学模拟技术应用于处理混合化工废水的污水处理厂,面临着一定的技术挑战,一方面需要进一步的探索,另一方面也具有重要的意义。

参考文献

- [1] 朱石清,唐建国,周骅,等.美国 South Bermuda 污水厂的升级改造[J].中国给水排水,2006,22(4):31-33.

- [2] GeorgeLee, JimGoodley, 尚爱安,等.工艺优化诊断技术用于污水厂的改造[J].中国给水排水,2006,22(2):26-30.
- [3] 朱石清,GeorgeLee,尚爱安,等.大型污水处理厂工艺优化及改造案例分析[J].中国给水排水,2007,23(14):29-32.
- [4] 李金国,焦建文,刘杰,等.扬州六圩污水厂的工艺改进及优化控制设计[J].中国给水排水,2009,25(22):25-30.
- [5] 胡志荣,周军,甘一萍,等.基于 BioWin 的污水处理工艺数学模拟与工程应用[J].中国给水排水,2008,24(4):19-23.
- [6] 段连钧,谷兆全,乔蕴虹,等.包头市北郊污水厂二期扩建工程的工艺优化研究[J].中国给水排水,2010,26(9):37-40.
- [7] 郝晓地,朱向东,马文瑾,等.模拟评价、优化北京某大型污水处理厂升级改造方案[J].中国给水排水,2009,25(17):14-19.
- [8] 郝晓地,赵义,仇付国,等.从微观机理认识污水处理厂的节能减排[J].中国给水排水,2008,24(4):89-94.
- [9] 郝晓地,仇付国,张璐平,等.应用数学模拟技术升级改造二级污水处理工艺[J].中国给水排水,2007,23(16):25-29.
- [10] 郝晓地,宋虹苇,胡沅胜,等.数学模拟技术用于污水处理工艺的的运行诊断与优化[J].中国给水排水,2007,23(14):94-99.

(收稿日期 2011-08-15)

(编辑 王薇)