

智能控制在污水生物处理系统中的应用

王之晖¹ 王淑莹¹ 彭永臻¹ 李勇智²

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022; 2. 北京工商大学化学与环境工程学院, 北京 100037)

摘要 对智能控制的适用范围及污水生物处理工艺的特征进行了简单分析。对智能控制的3大主要分支模糊逻辑控制、神经网络控制及专家控制系统在污水生物处理中应用的最新动态进行了评论和分析。结果表明,在污水生物处理中引入智能控制是一种提高处理效率、降低运行成本的有效方法,国内在污水生物处理智能控制的应用研究与国外有较大的差距,国内的研究及应用还处在发展阶段,应当加强。最后对污水生物处理智能控制的发展方向作了简要分析。

关键词 污水处理 智能控制 模糊控制 神经网络 专家系统

Application of intelligent control in biological wastewater treatment systems

Wang Zhihui¹ Wang Shuying¹ Peng Yongzhen¹ Li Yongzhi²

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022;

2. College of Chemical and Environmental Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100037)

Abstract The suitable application area of intelligent control and the characteristics of biological wastewater treatment process have been analyzed. Reviews and analyses have been done aiming at the three main branches of intelligent control of fuzzy logic control, neural network control and expert control system. The results show that it's an effective way to improve the efficiency and reduce the operating cost to introduce intelligent control into biological treatment of wastewater, the application of intelligent control is broad and in-depth abroad and is at early age in China, we should strengthen the research in this field. The developing trend of using intelligent control in wastewater treatment has been discussed in the end.

Key words wastewater treatment; intelligent control; fuzzy control; neural network; expert system

1 引言

随着现代科学技术的迅速发展,工程系统变得越来越复杂,系统的复杂性不仅表现在高维性上,更多地表现在被控对象模型的不确定性、系统信息的模糊性和信息模式的复杂性、高度非线性、输入信息的多样化、控制目标的多层次、计算的复杂性和庞大的数据处理以及严格的性能指标。因此,近年来把传统控制理论与模糊逻辑、神经网络和遗传算法等人工智能技术相结合,充分利用人类的控制知识对复杂系统进行控制,逐渐形成智能控制理论的雏形^[1]。

污水生物处理工艺与智能控制系统的适用范围具有明显的一致性,主要表现在:

(1)固有的不稳定性。系统的进水流量和浓度不能保持恒定,而且有时还会进入抑制活性污泥活性的化学物质,而传统的活性污泥动力学模型是基

于“稳定状态”的假设推导的,对于动态的活性污泥系统并不能表现出恰当的模拟和预测能力;

(2)系统的非线性。当底物、营养或溶解氧浓度受到限制时,活性污泥反应系统常常达到一种伪稳定的状态,处理系统在运行状态空间是非线性的,应用其他控制方法很难达到预定的控制目标^[2,3];

(3)处理工艺的复杂性。很难准确建立描述污水生物处理系统动态特性的动力学模型。如用于描述脱氮除磷的 IAWQ ASM No.2 模型,需要确定 40 多个动力学和化学计量常数,而这些常数的准确确定本身就十分困难,并且 IAWQ ASM No.2 模型还不

基金项目: 北京市科委计划项目(H020620010120);北京市教委重点项目(Kz200310005003);北京市重点实验室项目

收稿日期: 2003-04-08

作者简介: 王之晖(1973~),女,博士研究生,主要从事污水生物处理及其智能控制的研究工作。

能用于沉淀池的固液分离的分析^[4];

(4)对处理工艺理解的不完全性。对许多工艺现象还需依赖经验知识进行解释。如对于严重影响处理效率的污泥膨胀和泡沫问题,操作人员必须依赖他们的经验来解决;

(5)对微生物动力学信息的缺乏性。以往对传统的活性污泥工艺的管理,过分强调对出水水质的评价,却很少记载关于微生物活性的动力学信息,这妨碍了对工艺系统的深入理解。

因此,国内外近年来进行了大量智能控制在污水生物处理工艺中的应用研究,并在许多项目中获得成功。

2 智能控制在污水处理中的应用现状

智能控制是控制理论发展的高级阶段,其主要目标是通过控制系统的学习和适应能力,增强系统的鲁棒性。即在复杂控制系统中能根据系统所处的环境、操作条件的变化、控制目标的变化,通过不断学习,适应新的要求。智能控制目前已广泛应用于各种工业自动化、冶金和化工过程控制、智能机器人、智能通信网络、智能化仪器仪表等领域。在欧洲、美国和日本等国家和地区的污水生物处理中也有许多成功的应用,并且受到污水处理领域人士的广泛关注。

2.1 模糊逻辑控制

模糊逻辑控制(fuzzy logic control)是以模糊数学为基础,采用模糊语言控制规律,把基于专家知识的控制策略转换为自动控制的具体策略的控制方法,其基本思想是把专家对特定的被控对象或过程控制经验总结成一系列“IF(条件)THEN(作用)”形式表示的控制规律,通过模糊推理得到控制作用集,作用于被控对象或过程。模糊逻辑控制是在对操作人员经验总结的基础上实现对系统的控制,无需建立数学模型;具有较强的鲁棒性,被控对象参数的变化对模糊控制的影响不明显,可用于非线性、时变和时滞系统的控制;控制的实时性较好;控制机理符合人们对过程控制的直观描述和思维逻辑,目前已经成为污水生物处理系统的研究热点之一。

推流式曝气池的曝气控制较为复杂, Kalker等^[5]对推流式曝气池进行间歇曝气研究,开发了2种模糊逻辑控制器(FLC),其中低级 FLC 用于 DO 的控制,高级 FLC 用于除氮的控制。研究采用 Simulink-SIMBA 模型进行控制器的设计、优化和比

较。低级 FLC 以控制区 DO 浓度为输入变量,可以将 DO 浓度保持在设定水平上,由于 FLC 对阶跃的响应时间短,且超调量比比比例积分(PI)控制小得多,因此曝气量比 PI 控制明显减少。高级 FLC 以出水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的测量值与期望值之差($e_{\text{NH}_4\text{-N}}$)和其随时间的变化量($\Delta\text{NH}_4\text{-N}$)为输入变量,以间歇曝气时间与循环步长的比为输出变量,来控制出水中氨氮的浓度。通过改变间歇曝气时间比可将出水氨氮控制在要求的水平上,但其影响仅在一定的流量范围内有效;DO 设在 0.6 mg/L 比 1.0 mg DO/L 时的出水水质好,可能是由于低 DO 曝气条件下发生同步硝化反硝化的结果;曝气循环步长增加,引起出水中无机氮的增加。并且高级 FLC 控制与传统的继电器控制和定比例控制的仿真结果比较表明,前者的能耗可以减少 10% ~ 23%,出水水质也略好于后者。

Chang 等^[6]则对连续流 A/O 生物强化除磷污水处理工艺进行了研究,提出一种污泥预回流模糊控制策略,该控制策略既可以恰当地控制厌氧区(F/M)_{AN},又可以消除水力负荷波动对二沉池的冲击。传统对 A/O 生物反应器控制的逻辑语言描述是“如果(F/M)_{AN}高,则污泥回流 Q_r 高;如(F/M)_{AN}低,则污泥回流 Q_r 低”,而对二沉池控制的描述为“如果进水流量 Q 高,则污泥回流 Q_r 低;如 Q 低,则 Q_r 高”,可见对生物反应器与二沉池的控制出现矛盾,Chang 等在进水负荷低时,加大污泥回流量,而在进水负荷高时,减少污泥回流量,避免了二沉池在高进水负荷时水力负荷($Q + Q_r$)的急剧变化, (F/M)_{AN} 却仍可维持在一定范围内。通过配水模拟实际污水厂的进水负荷变化,比较研究污泥预回流模糊控制策略与传统的(F/M)_{AN}控制策略,结果表明,污泥预回流控制可以在进水负荷高峰期间,有效降低出水的 TSS、COD 和总磷的浓度,并且仍能保持合适的(F/M)_{AN}范围去除污水中的溶解性 COD 和溶解性磷,并且可靠性水平高于传统的(F/M)_{AN};通过模糊逻辑控制折衷 2 个互相矛盾的控制规则,提高生物除磷处理系统的运行可靠性。

Ulrich Meyer 等^[7]提出了基于模糊逻辑的前置反硝化污水处理厂的控制策略,该控制策略可以根据进水条件及出水水质确定曝气区溶解氧的设定值和硝化/反硝化的容积比例,不仅可以提高出水水质,同时可以降低曝气的能量消耗。

彭永臻等^[8,9]对硝酸态氮污染水脱氮处理新方

法,即生物电极法采用模糊控制,取得较好的控制效果。在生物电极法反应器脱氮过程中,既有电化学反应,又有微生物推进的生化反应,并受多种因素影响,尤其在进水水质、水量变化时。对于这样一个典型的非线性、时变性、随机性、模糊性和非稳定性的复杂系统,很难用传统的控制理论进行有效的控制。该研究根据生物电极脱氮法的原理和模糊控制的基本思想,系统地介绍了输入变量的模糊化处理和输出变量的非模糊化处理的计算方法,控制变量变化量的换算与计算方法,模糊控制规则的建立,模糊控制器的设计及其计算等。这种在线模糊控制器具有构造简单、可靠、稳定、可行性好,对进水硝酸态氮负荷变化的适应性强,有利于避免过量投加有机物并尽可能节省运行费用。

2.2 神经网络控制

神经网络控制(neural network control)是通过模拟人脑的某些结构机理以及利用人的知识和经验对系统进行控制。神经网络能够充分逼近任意复杂的非线性关系,学习和适应不确定系统的动态稳定性,具有很强的容错性及鲁棒性,采用信息的分布式并行处理,可以进行快速大量的运算^[10,11]。因而,近年来神经网络在污水生物处理中的应用引起了人们的极大兴趣,在短期内发表了许多文章,如用神经网络模拟和预测生物处理工艺、对污水处理厂的运行进行评价及水厂的控制和优化等。

Mohamed F. Hamoda 等^[12]将污水处理厂看作一个整体,不考虑水厂单独的某个工艺和其数学模型,采用人工神经网络对污水处理厂的运行进行预测。根据水厂工程经验,选择对水厂运行预测影响较大的温度、流量和不同阶段的 BOD 和 TSS 作为神经网络的输入输出,采用数据正向传播误差反向传播的 BP 算法训练神经网络,用水厂运行 16 个月数据的 90% 训练神经网络,其中 10% 的数据用于检验训练的模型,学习速率系数取 0.7,惯性系数取 0.9,选择 Sigmoid 函数作为活化函数。由于随着神经网络隐含层数目的增加,神经网络的训练时间和训练样本数目将加大,故设计的 2 个模型的隐含层数分别为 1 和 2,其中每层的节点数通过试验确定,选择误差最小的节点数作为隐含层的节点数目。研究结果表明,在 1 到 30 之间调整隐含层的数目,25、19 和 13 个节点时误差最小,且预测输出值与实际值的相关性较高,若增加训练样本及输入节点数,会进一步提高神经网络的预测能力。

Joo-Hwa Tay 等^[13]在概念神经元模型基础上,开发了一种快速预测神经模糊模型用于预测高速厌氧系统对各种干扰的响应,该系统可以提前 1 h 对不同的系统干扰进行预测。该模型继承了概念模型的基本结构和计算算法,以 n 时刻的有机负荷、水力负荷、碱度负荷、甲烷的容积产率、出水 TOC 和挥发性脂肪酸浓度为输入,经数据预处理器、模糊系统生成器、模糊推理器和表达模糊系统的自适应神经网络系统,输出 $n+1$ 时刻甲烷的容积产率、出水 TOC 和挥发性脂肪酸浓度。Tay 并将研究模型用于厌氧流化床反应器、厌氧滤池及升流式厌氧污泥床 3 个试验系统,对有机负荷、水力负荷和碱度负荷波动进行预测,通过相关系数和均方差评价观测值和仿真结果的分布,进而评价模型的运行效果。试验结果表明,神经元模糊模型对不同系统训练模式具有很好的学习能力,能够预测有机负荷、水力负荷和碱度波动对厌氧系统的影响,并且对系统结构及运行条件变化具有很强的适应能力,在实时控制系统中具有强大的应用潜力。

Chen 等^[14]将模糊神经网络控制器应用于石化废水处理厂的控制中。石化废水先进入缓冲池经均衡池调节水量后,依次进入升流式厌氧污泥床和 SBR 反应器进行处理。其控制系统分 3 个阶段:第一阶段在遗传算法(GA)和神经网络(NN)模型共同作用下,神经网络描述状态函数的特征和行为,遗传算法优化神经网络模型的结构,以均衡池中的醋酸浓度、重碳酸盐碱度、对苯甲酸浓度、对苯二酸浓度及总有机碳作为输入变量,以控制目标 COD、SS 和运行费用作为输出变量,产生从输入到输出预测的状态函数;第二阶段为保持复杂的非线性控制目标与理想的目标轨迹一致,基于观察数据库采用神经网络模型寻找多目标控制策略,GA 以已知的状态函数作为黑箱进行快速搜索,在给定控制目标范围内寻找最优的系统预测,产生对电耗、SBR 反应器总磷、出水中总氮、出水量及 3 个不同设定点 pH 值 7 个控制变量的控制;第三阶段利用神经网络模型调试和确定模糊控制规则及其相关的参数,帮助节省模糊推理器的规则匹配时间,减少系统的不确定性。该混合模糊-神经网络控制系统不仅能稳定进水水质对处理系统的影响,保持较高的出水水质,而且表现出较好的控制稳定性。

2.3 专家控制系统

专家控制系统(expert control system)是一个智能

计算机程序系统,其内部具有大量专家水平的领域知识与经验,能够利用专家的知识 and 经验来解决该领域的问题。专家控制系统不同于离线的专家系统,它不仅是独立的决策者,而且是具有获得反馈信息并能实时在线控制的系统。设计专家控制系统的关键是知识的表达和知识的运用,专家控制系统与传统的计算机程序最本质的区别在于专家系统所要解决的问题一般没有算法解,并且往往要在不完全、不精确或不确定的信息基础上作出结论。目前国外关于专家控制系统在污水生物处理中的应用研究较多。

Ohtsuki 等^[15]将开发的基于黑板概念的智能控制系统成功地应用于高负荷人粪尿污水处理系统的控制中。处理系统采用 SBR 工艺去除污水中 BOD 和氮,经超滤分离得到出水,其中每一 SBR 反应器由进水、曝气、厌氧搅拌(加甲醇)和排水组成。控制系统由采用不同模型方法实现的不同功能专家模块和抽象数据库(即黑板)组成,每个专家模块都与黑板相连并共享黑板中的数据,通过专家模块的共同作用来完成系统控制目标。在线仪器记录 DO、温度、pH 值和 ORP 值作为趋势信息,同时记录进水流量和曝气强度,呼吸仪记录硝化和 BOD 活性、污泥内源呼吸速率、进水总需氧量和氮需氧量一起构成黑板中的共享数据。通过 C++ 程序和神经网络建立的专家模块对在线数据进行评价;C++ 程序确定进水负荷和污泥排放量;经验模型建立的模糊控制专家模块对曝气和甲醇投加量进行控制;基于 IAWQ No.1 理论模型建立的专家模块可以对系统的将来进行预测;标准 Windows 用户界面建立的专家模块可对数据进行回顾和显示判断结果。这样构成的控制框架可以像人脑一样有效利用大量数据和模型方法,不断拓展控制系统的功能。

Galluzzo 等^[16]提出一种专家控制系统结构,用于连续流硝化反硝化生物过量吸磷污水处理厂的 DO 控制。整个控制系统可以看作是一个串级控制系统,监督模糊控制器(FLC)根据硝化、反硝化、生物除磷过程中的重要特征变量来确定内部 DO 控制回路的设定值,而 DO 控制回路相当于次级控制器,采用自适应鲁棒广义模型控制器来控制 DO 控制回路。监督 FLC 由三级内部结构相同阶梯结构组成,这样可以较同结构的一级 FLC 所需的控制规则数目少,其中一级 FLC 以曝气池出水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 作为输入量,根据硝化反硝化过程给出 DO 设定值

的第一个估值,二级 FLC 以一级输出的 DO 值及曝气池出水 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度作为输入变量,考虑除磷过程来修正 DO 的设定值,三级 FLC 再根据进水流量的变化来修正 DO 设定值,这样不断自动更新控制系统 DO 的设定值。整个控制系统是针对实际污水处理厂而设计,通过基于 IAWQ No.2 模型的仿真程序对生物反应器进行测试,仿真和试验结果表明,这种专家控制系统比常规控制系统的控制稳定性好、抗干扰能力强。

Punal 等^[17]采用专家系统对厌氧污水处理厂的运行进行管理和诊断。处理水来自纤维板厂高度污染的废水,由底部为升流式厌氧污泥床(UASB),顶部为升流式厌氧滤池(UAF)构成的混合工艺进行处理。污水处理厂的管理系统采用 Visual Basic 5.0 作为通讯和图形接口工具,Access 7.0 作为数据库管理工具,Matlab 5.0 作为科学计算工具,在 PC 机上开发并实现数据获取、信号过滤、数据存储和诊断的功能。数据处理模块从 PLC 获得原始数据,过滤器检测并拒绝明显的错误信息,将过滤后的数据存入原始数据库模块,由 IF-THEN 规则库构成的诊断模块,识别操作单元和传感器的状态,通过在线数据分析确定过程的状态,基于不同变量的发展(如产气量及组成、pH 值和温度等)和诊断的问题(流量大小、控温系统和当前状态)来预测操作的趋势。该专家控制系统可以根据预先定义的 4 种状态(正常、变坏、恢复或不稳定)来确定系统当前的状态,对于厌氧污水厂运行中经常出现的水力超负荷和有机超负荷 2 种反常现象,专家系统可以根据对在线数据分析给出有价值的建议,遵循这些建议,厌氧污水处理厂可以在短时间内恢复到正常状态,而且可以快速识别变量的发展,采取预防或恢复措施,避免过程状态向严重的、不稳定的和难以恢复的状态发展。

Baeza 等^[18]利用基于知识的专家系统对提高 A^2/O 工艺污水处理厂氮的去除效率进行研究。研究中固定厌氧选择器容积,使之占生物处理的 1/10,剩余容积分为均等的 3 段,通过曝气的开/关来调整其缺氧区和好氧区的容积。通过改变进水浓度和进水流量,调整内循环比、外循环比、可变区曝气的开/关及 DO 量寻找能耗最低而出水 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除水平最优的控制策略,确定了针对不同运行条件专家系统的运行规则。构建专家系统的知识是以模块形式来组织,通过不同模块实现对生物反应器、沉淀、回流系统等的诊断和管理。研究将该专家控制

系统应用于试验水厂的运行,氮去除量较常规运行条件提高11%,出水中的总氮和氨氮量也相应降低49%和64%。这样,基于知识的专家系统能够对分布控制系统进行监督,在线实现试验系统的运行策略,根据需要实时调整过程状态,不但避免曝气和内循环的能量浪费,有效利用了能源,而且提高了污水处理厂氮的去除效率。

通过以上的分析可以看出,将智能控制应用于污水生物处理的关键是找出控制参数随时间变化的规律,确定控制系统的输入输出参数,建立控制系统的控制结构。

3 结论和展望

在污水生物处理中引入智能控制,可以减小系统干扰对运行的影响,优化系统运行,提高处理效率、降低运行成本。虽然国外智能控制在污水生物处理中的应用越来越广泛且深入,在国内也获得了广泛的认可,但国内的研究和具体应用都还处在起步和发展阶段,和国外相比还有很大的差距,因此应加强该方面的投入。

在3种类型的污水处理智能控制系统的应用中,(1)专家系统对已有经验知识的依赖性最强,学习能力较弱,在水处理智能控制专家经验积累不太丰富及专家经验不能统一的情况下不适用;(2)模糊控制通过模拟人类的逻辑推理能力,借助人类的经验知识,实现对系统的控制,由于采用的是非参数型模型,计算量小,实时性较好,且具有一定的鲁棒性,但同样不具有自学习能力;(3)神经网络主要是模拟人脑神经元的映射能力,能够通过对现有运行数据的学习,建立系统非参数型模型,实现对系统的高度非线性映射,进而可以对系统运行进行预测,提高污水处理这一大滞后系统的控制效果,基于神经网络的控制系统具有较强的学习能力,但却无法适用以往非量化的经验知识,不能不说是一种欠缺。

模糊技术与神经网络结合产生的模糊神经控制技术,既可以利用前人的经验,又具有较强的自学习能力,能够提高系统的适应性,因此,比较适用于污水处理这种高度非线性、滞后性、时变性的系统,应作为以后污水处理智能控制的主要研究方向。

参考文献

- [1] 清华大学自动控制系. 智能信息处理与智能控制. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1998. 2~15
- [2] S. Marsili Libell, L. Giunti. Fuzzy predictive control for nitrogen removal in biological wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 2002, 45(4~5):37~44
- [3] Chunsheng Fu, Manel Poch. Fuzzy model and decision of COD control for an activated sludge process. *Fuzzy Sets and Systems*, 1998, 93:281~292
- [4] 国际水协废水生物处理设计与运算数学模型课题组. 活性污泥数学模型. 上海: 同济大学出版社, 2002. 49~62
- [5] T. J. J. Kalker, C. P. van Goor, P. J. Roeleveld. Fuzzy control of aeration in an activated sludge wastewater treatment plant: Design, simulation and evaluation. *Water Science and Technology*, 1999, 39(4):71~78
- [6] W. C. Chang, C. F. Ouyang, W. L. Chiang, et al. Sludge pre-recycle control of dynamic enhanced biological phosphorus removal system: An application of on-line fuzzy controller. *Water Research*, 1998, 32:727~736
- [7] Ulrich Meyer, H. Johannes Föpel. Fuzzy-control for improved nitrogen removal and energy saving in WWT-plants with pre-denitrification. IWA 3rd World Water Congress. Melbourne Australia: 7~12 April 2002, CD-ROM, paper reference No. e20937a
- [8] 彭永臻, 等. 生物电极脱氮的在线模糊控制——I. 模糊控制系统的组成与基本思想. *中国给水排水*, 1999, 15(2):5~9
- [9] 彭永臻, 等. 生物电极脱氮的在线模糊控制——II. 模糊控制系统的组成与基本思想. *中国给水排水*, 1999, 15(4):5~10
- [10] 李少远, 席裕庚, 陈增强, 等. 智能控制的新进展(II). *控制与决策*, 2000, 15(2), 136~140
- [11] 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型PID控制及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1998. 137~146
- [12] Mohamed F. Hamoda, Ibrahim A. Al-Ghusain, Ahmed H. Hassan. Integrated wastewater treatment plant performance evaluation using artificial neural networks. *Water Science and Technology*, 1999, 40(7):55~65
- [13] Joo-Hwa Tay, Xin-Yue Zhang. A fast predicting neural fuzzy model for high-rate anaerobic wastewater treatment systems. *Water Research*, 2000, 34:2849~2860
- [14] W. C. Chen, Ni-Bin Chang, Wen K. Shieh. Advanced hybrid fuzzy-neural controller for industrial wastewater treatment. *Journal of Environmental Engineering*, 2001, 11:1048~1059
- [15] T. Ohtsuki, T. Kawazoe and T. Masui. Intelligent control system based on blackboard concept for wastewater treatment processes. *Water Science and Technology*, 1998, 37(12):77~85
- [16] M. Galluzzo, R. Ducato, V. Bartolozzi, et al. Expert control of DO in the aerobic reactor of an activated sludge process. *Computer and Chemical Engineering*, 2001, 25:619~625
- [17] A. Punal, E. Roca, J. M. Lema. An expert system for monitoring and diagnosis of anaerobic wastewater treatment plants. *Water Research*, 2002, 36:2656~2666
- [18] J. A. Baeza, D. Gabriel, J. Lafuente. Improving the nitrogen removal efficiency of an A²/O based WWTP by using an on-line knowledge based expert system. *Water Research*, 2002, 36:2109~2123