

# 基于实时控制的智能控制在 废水处理中的应用

阚灵佳, 崔燕平, 王素兰, 邢传宏

(郑州大学 水利与环境学院, 河南郑州 450001)

**摘要:**针对废水处理系统具有时变性、非线性、复杂性和不确定性等特点,提出采用智能控制对其进行实时有效控制从而提高处理效率、降低能耗,对智能控制的主要分支模糊控制、神经网络控制和专家系统进行讨论,介绍总结了国内外专家学者应用智能控制技术实现水处理中实时控制的最新动态。结果表明,废水处理系统采用智能控制可以有效地实现实时控制,提高处理效率、降低能耗和成本。

**关键词:**废水处理;实时控制;智能控制;模糊控制;神经网络控制;专家系统

中图分类号:X703

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2010)01-0006-06

## APPLICATION OF REAL-TIME BASED INTELLIGENT CONTROL TECHNOLOGY IN WASTEWATER TREATMENT SYSTEM: A MINI-REVIEW

KAN Ling-jia, CUI Yan-ping, WANG Shu-lai, XING Chuang-hong

(School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhengzhou University,  
Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Waste water treatment system is featured as time-dependence, nonlinearity, complexity and uncertainty, it is presented that intelligent control was an effective method that can be used to maximize efficiency and minimize energy consumption. The three main branches of intelligent control (fuzzy control, neural networks control and expert system) and their current situations are discussed. Results indicate intelligent control can realize real-time control, and it is an efficient, energy-saving and cost-effective tool in wastewater treatment system.

**Keywords:** wastewater treatment; real-time control; intelligent control; fuzzy control; neural networks control; expert system

废水处理系统具有时变性、非线性、复杂性和不确定性等特点,很难建立精确的数学模型,故在控制当中难达到处理水质达标排放和节约能源的目的。近年来,国内外许多学者为了提高废水处理厂的处理效率和降低能耗开展了许多实时控制的研究<sup>[1-5]</sup>,但仍存在一些问题,使得实际上仍采用按

时间控制整个处理过程<sup>[6]</sup>,而采用智能控制实现废水处理的实时控制,能够保证系统稳定、高效、低能耗运行。

### 1 智能控制

“智能控制”这一概念是美国普渡大学电气工程系的美籍华人傅京孙教授于20世纪70年代初最先提出,是人工智能和自动控制交叉的产物<sup>[7]</sup>,主要分支<sup>[8]</sup>包括模糊控制、神经网络控制、专家系

统等。智能控制具有自学习、自适应和自组织功能,可以解决用传统方法难以解决的复杂系统的控制问题,它在处理非线性系统<sup>[9]</sup>、大滞后工业过程控制<sup>[10]</sup>、非稳定的动态工程系统<sup>[11]</sup>中应用日益广泛,特别适用于复杂的废水处理动态过程控制。它能够在线控制<sup>[12]</sup>和跟踪实际情况的变化<sup>[13]</sup>,因而采用智能控制方法实现废水处理的实时控制,是发挥其优势的关键所在。

### 1.1 模糊控制

模糊控制(fuzzy control)能将操作者或专家的控制经验和知识表示成语言变量描述的控制规则,然后用这些规则去控制<sup>[6]</sup>。它最大的优点是模仿人的控制经验而不是依赖于控制对象的模型,具有较强的鲁棒性<sup>[14]</sup>,可用于非线性<sup>[15]</sup>、时变和时滞系统的控制<sup>[16]</sup>,控制的实时性较好<sup>[17]</sup>,控制机理符合人们对过程控制的直观描述和思维逻辑。模糊控制方法几乎可以应用于各种水处理过程,目前,模糊控制在提高废水营养物(氮、磷)去除率及节能方面的应用较多,且效果显著。可作为模糊控制的控制参数较多,但以溶解氧(DO)、pH和氧化还原电位(ORP)为主要参数的研究最为广泛<sup>[18-23]</sup>。

Traore等<sup>[18]</sup>用DO作为模糊控制参数在线控制序批式活性污泥法(SBR)系统的硝化-反硝化过程,并与传统方法(开/关控制,PID控制)比较,模糊控制表现出更强的有效性和优越性,同时发现采用模糊控制方法,根据pH的变化特点可检测硝化过程的氨谷情况。Marsili-Libelli<sup>[19]</sup>,Spagnini等<sup>[20]</sup>针对SBR脱氮除磷工艺提出并应用开/关策略进行实时控制,利用模糊簇聚算法通过参数pH、ORP及DO来判断SBR运行状态,通过模糊推理引擎确定每一阶段的最佳时间,采用微波过滤降噪,最后使SBR达到较好的脱氮除磷效果,提高了处理能力,减少了曝气量和反硝化所需的外加碳源量。

高景峰等<sup>[21]</sup>在大量试验的基础上构建了SBR法反硝化过程的模糊控制器,以pH和ORP作为SBR法反硝化时间和碳源投加的在线模糊控制参数,进行了3种碳源投加方式的实时控制试验。结果表明,按较小的速率连续投加碳源是最佳投加方式,它不仅可以满足反硝化速率上的要求,还可以尽量地减少再曝气时间,同时证明了该模糊控制的可行性和可靠性。曾薇等<sup>[22]</sup>结合模糊控制理论,通过在线测得的DO、ORP的特征变化用模糊

语言变量描述,选择DO误差的大小(EDO)和误差变化的快慢(CEDO)、ORP随时间的变化率CEORP作为模糊控制器的三个输入变量,给出SBR曝气时间的模糊控制规则,从而实现SBR反应时间的实时控制,在保证出水水质的前提下节约能耗,提高处理效率。

目前在连续流工艺中采用DO、pH和ORP为参数的模糊方法应用较少,Peng等<sup>[23]</sup>用模糊方法进行连续流A/O系统处理合成淀粉废水的小试研究。A/O反应器由7个格室组成,其中前2个格室缺氧运行,后5个格室好氧运行,每个格室都应用DO、pH和ORP传感器在线控制。设计了一个模糊控制器,用高斯隶属函数方法进行模糊化,模糊输入变量为好氧区第一个格室内的氧浓度(DOfirst)、pH和ORP,采用Mix-Max法进行模糊推理,加权平均法去模糊化,输出变量为曝气量、硝酸盐回流量和外加碳源量。在一定的设置条件下进行试验,结果表明,好氧区第1格室的DOfirst可以指示进水氨浓度的高低;好氧区pH曲线和DO曲线可以指示系统硝化进行的程度;好氧区末端的ORP值与出水中的氨氮、硝态氮浓度相关性较好,缺氧区末端的ORP与硝酸盐浓度同样具有很好的相关性,基于上述在线信息建立的A/O工艺硝化过程控制策略,不但能提高出水水质,而且降低了运行能耗。

DO、pH和ORP之所以能够成为模糊控制的控制参数是因为:(1)DO浓度变化与进水量、进水水质和污泥浓度等多种因素有关,(2)pH值可以指示系统中微生物生长的碱度条件,一般在6.5~7.5之间最适宜,在生物脱氮系统中废水中的pH值随着硝化与反硝化进程的变化而变化,(3)ORP值与活性污泥法中的生物化学反应释放的能量有关,随电子受体(氧、硝酸盐和硫酸盐等)及反应物和产物的浓度而增减。综上所述根据参数DO、pH和ORP的变化可以判断出废水处理硝化反硝化进程及运行的异常状况,好氧过程可采用DO、pH和ORP作为的控制参数,缺氧和厌氧阶段的DO较低,无法发挥指示作用,ORP可代替DO为过程控制和状态评估提供有用的信息,故在缺氧和厌氧阶段多采用pH和ORP作为控制参数。

### 1.2 神经网络

神经网络控制(Neural Networks 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,由大量人工神经元广泛联结而成的网络<sup>[6]</sup>。它最大优点是可以充分逼近任意复杂的非线性关系<sup>[24]</sup>,有较强的学习能力<sup>[25]</sup>和容错性<sup>[26,27]</sup>,同时能够处理定量、定性数据,可以进行快速大量的计算<sup>[28]</sup>。神经网络控制近年来越来越受到国内外废水处理专家的重视,在废水处理中的作用主要体现在以下几点:对废水处理过程进行模拟<sup>[29]</sup>、预测<sup>[30]</sup>和实现控制<sup>[31]</sup>;与其他控制方法相结合<sup>[32]</sup>;用于废水处理过程的“软测量”<sup>[33]</sup>。目前,通过神经网络的软测量实现在线控制的研究较多<sup>[34-38]</sup>。

Sung等<sup>[34]</sup>提出用神经网络软测量法对营养物质的浓度进行实时预测、解决时滞问题,将在线测得的pH、ORP和DO作为输入变量。为了提高神经网络的性能,将外源输入自回归表达(ARX)结构与神经网络进行整合,用分散的网络结构分别用于厌氧与好氧过程进行动态模拟,将此方法用于SBR进行营养物去除的小试研究,结果令人满意,并且将SBR运行各阶段的时间得到了最佳控制。Min等<sup>[35]</sup>同样利用整合后的神经网络作为软传感器实现对小规模废水处理厂的远程监控,以达到最佳的运行效果,进行实时有效的操作。将来自多传感器系统的运行数据与实测值通过无线电通信系统在线传输,然后用多元统计过程控制和软传感器管理当地废水处理厂,此远程监控系统可以监测到废水处理厂最新的动态并且有助于当地废水系统的有效运行。Aguadoa等<sup>[36]</sup>根据人工神经网络在SBR上的应用,提出一种系统方法,它能够充分利用训练阶段的现有数据达到较高的泛化能力,将此方法在不同的试验条件下进行研究,最后成功开发成软传感器来监测试验SBR的运行,能够确定SBR各阶段运行的最佳时间,加强磷的去除能力,达到了提高处理效率、降低了能耗的目的。

刘载文等<sup>[37]</sup>提出了基于径向基函数(RBF)人工神经网络的SBR出水BOD值的软测量方法,通过大量实测数据对RBF神经网络进行训练,仿真结果显示利用其可实现对SBR出水BOD值的软测量,弥补了现在检测和基于机理过程数学模型软测量的不足,为废水处理过程的在线实时控制创造了条件。杨马英等<sup>[38]</sup>针对城市废水处理工艺反应过程所具有的多变量、非线性和动态复杂反应的特点,利用水质参数与多个过程可测参数间的关联关系,提出了基于Elman递归人工神经

网络的水质参数软测量模型。以ORP、DO和pH值作为输入参数,可实现对COD、NH<sub>3</sub>及TP水质参数的软测量。基于废水处理实验数据建立软测量模型,结果表明,上述软测量模型对废水处理水质指标COD、NH<sub>3</sub>及TP具有理想的预测效果。

软测量技术可以利用现有的价廉、稳定的在线传感器测量当前易测量的参数,通过神经网络模型预测那些难以实时测量的参数,能够满足实时控制的需要<sup>[39]</sup>。尽管在废水处理当中已有在线监测营养物质(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)浓度的装置,但维修费用昂贵,可靠性较差,所以应用软测量方法研究营养物质的去除更廉价,更可靠,具有一定的实际意义。

### 1.3 专家系统

专家系统(expert system)是智能控制系统的一个重要分支,可将专家系统的理论和技术同控制理论、方法与技术相结合,并模仿专家的智能,分析和解决系统在运行中遇到的复杂问题,可大大提高废水处理系统的可控性及自控水平<sup>[40,41]</sup>。它具有获得反馈信息的能力并能实时在线控制<sup>[42]</sup>。废水处理诊断是一个复杂的大系统,不确定性、非线性和时变性并存,而且建立故障树需要大量相关数据,包括温度、周围环境、水量变化等,没有一个确定的数学模型来诊断故障的发生<sup>[43]</sup>,而专家系统最大的优点是不需要建立数学模型,仅依靠从专家和有经验工人那里获得的知识就可以对生产过程进行控制,控制效果比较理想<sup>[8]</sup>,因此对水处理当中异常状态的预测和诊断的研究较为广泛<sup>[44-46]</sup>。

Punal<sup>[44]</sup>应用专家系统对厌氧废水处理进行监测和诊断,试验采用UASB+UAF厌氧处理工艺处理纤维板工业废水,处理量1.1m<sup>3</sup>/d,试验完成了在不同废水浓度(COD:5~25g/L)、有机负荷率(1.67~15kgCOD/m<sup>3</sup>·d)和水力停留时间(1~3d)条件下对控制系统的测试。试验结果表明控制系统能够预测最新的运行状态,迅速地做出诊断,并能给出相应的解决措施,从而使废水处理系统在较短时间内恢复到正常状态,制止了恶化的趋势。

李浩等<sup>[45]</sup>将活性污泥废水处理系统的预测知识、异常诊断知识以及分析和控制知识进行整合,并利用基于Rough集的数据挖掘方法疏理、约简知识库,建立专家系统,实现对废水生物处理异常预测及专家诊断和在废水处理厂运行管理中的多方面功能。用VC.NET将CLIPS专家系统嵌入到

基于网络的废水处理实时控制和数据采集实验平台系统中。通过多传感器的数据融合技术,经过对在线实时采集实验数据的分析,综合判断活性污泥的状态参数及其对系统的影响。李振宇等<sup>[46]</sup>针对废水处理工艺过程所建造的故障诊断专家系统,讨论了适用于废水厂日常生产运行的在线故障诊断专家系统,实现了实时性要求不高的在线、离线的智能故障诊断,研究了基于规则的产生式系统中知识库的构建和维护的方法。

专家系统是解决废水处理厂异常状态的有效方法,可对其异常现象提前预测,及时进行故障诊断并迅速给出相应的解决措施,制止恶化的发生,因此废水处理厂应用专家系统对提升工艺系统运行的稳定性具有指导意义。

## 2 集成式智能控制

集成式智能控制是指上述三种典型的智能控制方法相互之间耦合构成的智能控制系统,每一种控制方法都具有各自的优缺点<sup>[47]</sup>:模糊控制计算量小,具有处理不确定性的能力,有一定的鲁棒性,但不具有自学习能力;神经网络具有较强的学习能力,非线性映射能力,但却无法适用以往非量化的经验知识;专家系统对已有经验知识的依赖性最强,学习能力较弱,在水处理智能控制中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。因此,将两种或两种以上智能控制方法相耦合,取长补短,建立集成智能控制系统应作为以后废水处理智能控制的主要研究方向。

### 2.1 模糊控制与神经网络耦合

模糊神经网络是结合模糊控制与神经网络的优点,避免二者缺点控制方法,既可以具有模糊逻辑的不确定信息处理能力,又可以有神经网络的自学习能力,能够提高系统的适应性。它是一种本质非线性模型,易于表达非线性系统的动态特性,而且从理论上已经证明了模糊神经网络可以作为万能逼近器,可以以任意精度逼近非线性系统<sup>[48]</sup>这使得它在控制领域有很广泛应用,因此模糊神经网络被认为是解决复杂系统建模的一种有效的方法。

Altunay 等<sup>[49]</sup>用自适应模糊推论系统(ANFIS)的神经模糊模型对实际非稳态运行的厌氧废水处理出水进行预测,输入变量为在线测得的  $\text{CH}_4\%$  (甲烷含量)、 $Q_{\text{gas}}$  (气体流速)、 $Q_{\text{anacycle}}$  (污泥回流速

度)、 $Q_{\text{inf-bypass}}$  (厌氧池进水流量)和  $Q_{\text{inf}}$  (总进水量),输出变量为  $\text{COD}_{\text{eff}}$  (出水 COD)。结果令人满意,出水 COD 的预测值与实测值之间的关系系数为 0.8354,均方根误差为 0.1247。此研究在变量的数目和类型、处理的规模以及数据的波动情况上都与以往研究不同,提供了新的研究思路。Huang 等<sup>[50]</sup>用模糊神经过程控制器对内置生物膜处理废水中的氧浓度进行实时控制,结果证明模糊神经网络比神经网络具有较好的模拟氧的动态变化,与没有模糊神经网络相比节省了 33% 的运行费用,模糊神经网络是强大的有效的 DO 控制工具。胡玉玲等<sup>[51]</sup>针对废水处理过程控制存在的问题,以活性污泥法废水处理系统为研究对象,建立了变参数活性污泥系统的控制模型,并且提出了一种应用于变参数活性污泥系统的模糊神经网络控制方法,仿真研究表明,模糊神经网络具有较强的鲁棒性与容错性,并与基于规则的传统模糊控制进行比较,结果表明模糊神经网络控制可以获得更优的动态性能。

与单一方法相比,模糊控制与神经网络的有机结合能够获得更优的性能,较好地解决非线性和不确定性问题,因此模糊控制与神经网络耦合的研究与应用值得重视。

### 2.2 模糊控制与专家系统耦合

采用专家系统对活性污泥法废水处理工艺流程进行故障诊断的过程中,模糊性是普遍存在的。领域专家的经验 and 知识的表述通常是模糊的,如“二次沉淀池中少部分污泥上浮”、“曝气池中产生大量泡沫”等。运行人员对运行参数的描述也是模糊的或不精确的,没有给出具体的高低大小的精确数值,如“曝气池内的 DO 浓度过低,可能发生污泥膨胀”、“营养物质缺乏时,易发生污泥膨胀”等<sup>[52]</sup>。为了能够诊断出故障产生的真正原因和得到具体运行参数调整量的值,系统必须能够处理不精确数据和不完美的信息。故将模糊控制与专家系统的有机结合将提高工艺流程进行故障诊断的能力。

Carrasco 等<sup>[53]</sup>用模糊专家系统诊断和监视中式厌氧废水处理过程,此系统能够将最佳指令送到最终控制元件部位,恢复稳定的运行状态,制止恶化趋势,通过在线测得的变量  $\text{CH}_4\%$  (甲烷含量)、FF(进水量)和 GF(气体流量)作为模糊专家系统的输入,为每一个输入和输出变量建立模

糊隶属函数,并且构建了一个基于规则结构的知识库。Carrasco等<sup>[54]</sup>用模糊逻辑诊断系统运用专家知识预测厌氧废水处理的酸化过程。将在线测得的参数表示成语言变量,借助于模糊规则结构运用专家知识,用给定输入变量模糊推理系统来判断厌氧反应器的酸化过程,结果显示此系统能够判断反应器运行的异常现象。孟德韬<sup>[52]</sup>开发了一个模糊故障诊断专家系统,将专家系统技术引入到活性污泥法废水处理工艺流程的故障诊断中,完成了专家系统的总体结构设计,并对系统的各个组成部分进行了实现,针对活性污泥法废水处理工艺流程的诊断知识和规则难以精确表示的特点,采用模糊技术对不确定性知识进行了模糊化处理。但是目前本系统属于一种离线的故障诊断专家系统,没有获取实时水质参数的途径,如何实现活性污泥法废水处理工艺流程模糊故障诊断专家系统的在线化,也是今后研究的一个重点。

在解决水处理工艺流程的故障诊断问题上,模糊控制与专家系统的有机结合发挥着比单一专家系统更大的优势,为其提供了更有力的工具。

### 3 结论与展望

智能控制主要包括模糊控制、神经网络控制、专家系统,将其引入废水处理系统,可以进行实时有效的控制,保证系统稳定、高效、低能耗运行。但由于它们各有优缺点,两种或两种以上智能控制方法相耦合,能够取长补短,发挥各自的优势,获得单一方法所难以达到的效果。

截止目前,智能控制研究与应用多在SBR工艺中进行,而采用其他工艺(如A/O工艺)研究的较少,且大多处于试验研究阶段或应用初级阶段,亟需结合工艺运行当中的实际问题,将其应用到实际工艺中,达到高效、低能的目的。

在废水处理系统中,对集成智能控制的研究主要集中在模糊控制与神经网络的耦合、以及模糊控制与专家系统的融合,而神经网络与专家系统耦合的研究尚少,如何利用神经网络具有的自学习能力,构造出基于神经网络的故障诊断专家系统,克服传统专家系统对经验知识依赖性强、学习能力弱的特点,将是今后研究的重点。

将模糊控制和神经网络技术有机地融合到专家系统中,一方面可以用语言描述的规则构造网络,将一些专家知识预先分布到神经网络中去;另

一方面可以引入学习机制,利用神经网络的学习能力来优化模糊控制规则和相应的隶属函数,提高知识表示的精度,故以此构成的专家系统或是研究故障诊断专家系统的有效途径。

智能控制三大分支的有机结合以及智能控制与其他控制方法如PLC控制、PID控制及优化控制等有机结合将是智能控制在废水处理中发展的方向。

### 参考文献

- [1]曾薇,彭永臻,王淑莹.以DO、ORP、pH作为两段SBR工艺的实时控制参数[J].环境科学学报,2003,23(2):252~256.
- [2]Kim H T, Kim G S, Shin S W, et al. Application of ORP and pH as controlling factors in sequencing batch reactor. KSCE Journal of Civil Engineering, 2005, 9(2): 73~79.
- [3]吴昌永,陈志强.SBR法短程硝化反硝化实时控制的基础研究[D].哈尔滨工业大学,2006.
- [4]Pius M, Ndegwa, Wang L, et al. Potential strategies for process control and monitoring of stabilization of dairy wastewaters in batch aerobic treatment systems. Process Biochemistry, 2007, 42: 1272~1278.
- [5]LI J, NI Y J, PENG Y Z, et al. On-line controlling system for nitrogen and phosphorus removal of municipal wastewater in a sequencing batch reactor (SBR). Front. Environ. Sci. Engin, 2008, 2(1): 99~102.
- [6]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.
- [7]周其鉴,李祖枢,陈民铎.智能控制及其展望[J].信息与控制,1987,(2):38~45.
- [8]李浚泉.智能控制发展过程综述[J].工业控制计算机,1999,(3):30~34.
- [9]李士勇.复杂系统、非线性科学与智能控制理论[J].计算机自动测量与控制,2000,8(4):1~4.
- [10]蒋健.一种大滞后过程的智能控制[J].工业控制计算机,1995,(4):16~18.
- [11]顾冰,赵学工,郑刚等.稻谷干燥智能控制系统的研究[J].电气控制,2007,(3):31~35.
- [12]何海涛,刘宏民.宽带钢冷轧机板形在线控制智能模型的研究与应用[D].燕山大学工学,2005.
- [13]梁明,王国荣,石永华等.焊缝自动跟踪系统中的智能控制[J].电焊机,2000,30(8):17~20.
- [14]李士勇.模糊控制和智能控制理论与应用[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1990.
- [15]Wang L X. Stable Adaptive Fuzzy Control of Nonlinear Systems. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 1993, 1(2): 146~155.
- [16]暴健.一类时变时滞系统的模糊控制及鲁棒性研究[J].天津纺织工学院学报,1997,16(4):44~47.
- [17]陈淑燕,陈森发,吴明赞.单路口交通的多相位实时模糊控制[J].系统工程理论与实践,2003,(1):110~115.
- [18]Traore A, Grieu S, Puig S, et al. Fuzzy control of dissolved oxygen

- in a sequencing batch reactor pilot plant. *Chemical Engineering Journal*, 2005, 111: 13~19.
- [19] Marsili-Libelli S. Control of SBR switching by fuzzy pattern recognition. *WATER RESEARCH*, 2006, 40: 1095~1107.
- [20] Spagni A, Marsili-Libelli S. Nitrogen removal via nitrite in a sequencing batch reactor treating sanitary landfill leachate. *Bioresource Technology*, 2009, 100: 609~614.
- [21] 高景峰, 彭永臻, 王淑莹. SBR 法反硝化过程模糊控制器的设计和碳源投加方式的选择[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(6): 733~737.
- [22] 曾薇, 王淑莹, 彭永臻. SBR 法好氧曝气时间的模糊控制[J]. *水处理技术*, 2005, 31(1): 65~68.
- [23] Peng Y.Z, Ma Y, Wang S.Y. Improving nitrogen removal using on-line sensors in the A/O process. *Biochemical Engineering Journal*, 2006, 31: 48~55.
- [24] Narendra K S, Parthasarathy K. Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks. *IEEE Trans on Neural Networks*, 1990, 1(1): 4~27.
- [25] 许飞云, 钟秉林, 黄仁. 模糊基函数神经网络在线跟踪自学习算法研究[J]. *中国工程科学*, 2007, 9(11): 48~53.
- [26] 杨晓帆, 陈廷槐, 汪雪琴. 多层神经网络的内在容错性[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 1995, 18(3): 69~75.
- [27] 张铃. 前向神经网络的容错性问题[J]. *软件学报*, 2001, 12(11): 1693~1598.
- [28] 朱伟利. 实现人工智能的新途径-神经网络型计算[J]. *大学物理*, 1992, 11(8): 32~34.
- [29] 张文艺, 钟梅英, 蔡建安. 活性污泥法系统人工神经网络模型. *给水排水*, 2002, 28(6): 12~15.
- [30] Glenda M, Pigram. Use of neural network models to predict industrial bioreactor effluent quality. *Environ Sci Technol*, 2001, 35(1): 157~162.
- [31] Wilcox S J, Hawkes D L, Hawkes F R, et al. A neural network based on bicarbonate monitoring to control anaerobic digestion. *Wat Res*, 1995, 29(6): 1465~1470.
- [32] 刘超彬, 乔俊飞. 污水处理过程中对泥龄的模糊神经网络控制[J]. *信息与控制*, 2006, 35(1): 16~20.
- [33] Luccatini L, Porra E, Spagni A. Soft sensors for control of nitrogen and phosphorus removal from wastewaters by neural networks. *Wat Sic & Tech*, 2002, 45(4-5): 101~107.
- [34] Sung H H, Min W L, Dae S L, et al. Monitoring of sequencing batch reactor for nitrogen and phosphorus removal using neural networks. *Biochemical Engineering Journal*, 2007, 35: 365~370.
- [35] Min W L, Sung H H, Hyeoksun C, et al. Real-time remote monitoring of small-scaled biological wastewater treatment plants by a multivariate statistical process Control and neural network-based software sensors. *Process Biochemistry*, 2008, 43: 1107~1113.
- [36] Aguadoa J D, Ribes T, Montoyaa J, et al. A methodology for sequencing batch reactor identification with artificial neural networks: A case study. *Computers and Chemical Engineering*, 2009, 33: 465~472.
- [37] 刘载文, 崔莉凤, 祁国强. SBR 出水 BOD 值的 RBF 软测量法[J]. *中国给水排水*, 2004, 20(5): 17~20.
- [38] 杨马英, 周芳芹, 李军. 基于 Elman 神经网络的城市污水处理水质参数软测量[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2006, 36(增刊): 119~123.
- [39] 刘太杰, 崔莉凤, 刘载文. 污水处理智能控制进展[J]. *北京工商大学学报(自然科学版)*, 2005, 23(3): 9~12.
- [40] Baeza J A, Gabriel D, Lafuente J. Improving the nitrogen removal efficiency of an A2/O based WWTP by using an on line knowledge based expert system. *Water Research*, 2002, 36(8): 2109~2123.
- [41] Ma Y, Peng Y Z, Wang S Y, et al. Nitrogen removal influence factors in A/O process and decision trees for nitrification/denitrification system. *Journal of Environmental Science*, 2004, 16(6): 901~907.
- [42] 曾明如, 陈祥, 孙达志. 基于实时专家系统的自来水混凝投药自动控制系统[J]. *南昌大学学报·工科版*, 2005, 27(3): 76~82.
- [43] 濮文虹, 陈斯, 杨昌柱等. 基于确定性理论的污水处理专家系统研究[J]. *工业用水与废水*, 2006, 37(6): 1~3.
- [44] Punal A, Rocca E, Lema J M. An expert system for monitoring and diagnosis of anaerobic wastewater treatment plants. *Water Research*, 2002, 16: 2656~2666.
- [45] 李浩, 刘湛红, 王健等. 活性污泥系统的知识提取及专家系统的建立[J]. *广东化工*, 2006, 33(11): 90~92.
- [46] 李振宇, 杨昌柱, 章北平等. 污水生物处理故障诊断专家咨询系统[J]. *化学与生物工程*, 2005, (3): 39~41.
- [47] 刘建勇, 周雪飞, 薛罡等. 智能控制在污水处理中的应用现状及展望[J]. *中国给水排水*, 2002, 18(11): 22~25.
- [48] 马秀会, 郑文瑞. 模糊神经网络研究综述[D]. 吉林: 吉林大学, 2008.
- [49] Altunay P, Sever A, Serdar S.C, et al. Prediction of effluent quality of an anaerobic treatment plant under unsteady state through ANFIS modeling with on-line input variables. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 145: 78~85.
- [50] Huang M Z, Wan J Q, Ma Y W, et al. Control rules of aeration in a submerged biofilm wastewater treatment process using fuzzy neural networks. *Expert Systems with Applications*, 2009, 1~10.
- [51] 胡玉玲, 乔俊飞. 活性污泥污水处理系统模糊神经网络控制研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2004.
- [52] 孟德韬, 卿晓霞. 活性污泥法污水处理工艺流程模糊故障诊断专家系统的研究[D]. 重庆大学, 2007.
- [53] Carrasco E F, Rodriguez J, Punal A, et al. Rule-based diagnosis and supervision of a pilot-scale wastewater treatment plant using fuzzy logic techniques. *Expert Systems with Applications*, 2002, 22: 11~20.
- [54] Carrasco E F, Rodriguez J, Punal A, et al. Diagnosis of acidification states in an anaerobic wastewater treatment plant using a fuzzy-based expert system. *Control Engineering Practice*, 2004, 12: 59~64.