

The background of the cover features a blue gradient with stylized water droplets at the top and bubbles at the bottom. A series of upward-pointing arrows is faintly visible in the middle section.

水环境系统 智能化软测量与控制方法

刘载文◎著

Shuihuanjing Xitong

Zhinenghua Ruanceliang Yu Kongzhi Fangfa



中国轻工业出版社

全国百佳图书出版单位

• 013035835

X143
27

北京市自然科学基金重点项目(8101

水环境系统智能化软测量与 控制方法

刘载文 著



北航

C1643472



中国轻工业出版社

X143
27

图书在版编目(CIP)数据

水环境系统智能化软测量与控制方法/刘载文著. —北京:中国轻工业出版社,2013.3

ISBN 978-7-5019-9159-4

I. ①水… II. ①刘… III. ①人工智能—应用—水环境—环境系统—测量方法 IV. ①X143-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 022944 号

针对在废水处理等流程工业的生产过程中普遍存在着过程参数时变、难以在线实时检测,而且数学建模困难,因而不能实现实时闭环控制、不易保证产品质量的难题,研究水环境系统智能化的软测量方法,基于人工神经网络的污水处理过程参数的软测量模型,采用神经网络建模与遗传算法结合的优化控制方法,以及基于神经网络的水华短期预测方法,较系统地提出了一套基于人工智能的水环境系统软测量与控制的方案。可供从事废水处理系统测量控制和水华预测预警的研究人员参考,可作为环境工程、自动控制、信息工程等专业本科生与研究生的参考书。

责任编辑:王 淳

策划编辑:王 淳 责任终审:孟寿萱 封面设计:锋尚设计

版式设计:宋振全 责任校对:晋 洁 责任监印:张 可

出版发行:中国轻工业出版社(北京东长安街6号,邮编:100740)

印 刷:北京君升印刷有限公司

经 销:各地新华书店

版 次:2013年3月第1版第1次印刷

开 本:720×1000 1/16 印张:12

字 数:183千字

书 号:ISBN 978-7-5019-9159-4 定价:26.00元

邮购电话:010-65241695 传真:65128352

发行电话:010-85119835 85119793 传真:85113293

网 址:<http://www.chlip.com.cn>

Email:club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

130025K4X101ZBW

前 言

针对在废水处理等流程工业的生产过程中普遍存在着过程参数时变、难以在线实时检测或检测时间严重滞后,而且数学建模困难,不能实现实时闭环控制、不易保证产品质量的难题,研究水环境系统智能化的软测量方法,基于 PNN 的污水处理过程参数的软测量模型,采用神经网络建模与遗传算法结合的优化控制方法,以及基于神经网络的水华短期预测方法,较系统地提出了一套基于人工智能的水环境系统软测量与控制的方案。

首先分析水环境系统在线测量与控制存在的问题,指出软测量是解决这些问题的有效途径和进行工业过程监测、控制、优化的重要方法。论述软测量的基本思想、软测量建模理论与方法的发展,详细分析水环境系统数学建模、软测量与控制的研究现状。在此基础上,论述水环境系统软测量的原理和内容、二次变量(辅助变量)的选择、测量数据的预处理、主要的建模方法,以及软测量的实现方法,并给出了水环境系统软测量的基本方法和设计方案。

重点研究输入/输出都是时间过程或函数的过程神经网络(PNN)的软测量理论,探求 PNN 在基于正交基展开算法的基函数种类、阈值调整的方法,提出具有动量项和自适应学习率权值的改进算法。采用动量项和学习速率自适应调整两种策略的算法,加速了网络的收敛速度。动量项降低了误差曲面局部细节的敏感性,有效抑制了网络陷于局部最小,自适应学习率有效地加速网络收敛速度,增加稳定性,提高训练精度。进而提出一种基于 PNN 的污水处理过程参数的软测量方法,建立了以进水 TOC、DO、MLSS 作为二次变量,出水 BOD 为主导变量的 PNN 软测量模型。将过程神经网络引入到污水处理过程软测量中还是初次尝试,从算法的仿真和实验结果看,达到了预期的效果。

为了实现优化控制,研究污水处理过程的神经网络建模方法,寻求性能指标与控制变量的关系。构建以曝气池中溶解氧浓度 DO 为控制变量,排放有机物量 Z 、污泥排放量 Q_w 和电费 J_e 等为输出量的 RBF 神经网络模型,分析径向基函数的中心和聚类的数目(隐含层节点)对网络性能的影响,所建立的神经网络具有很好的泛化能力。

针对污水处理的特点,研究遗传算法中遗传算子的选择,DO 采用二进制编码、初始种群的生成方法。提出以每日允许排放的有机物总量为约束条件,以运行费用(耗电量)为适应度函数,基于遗传算法的污水处理过程优化控制方法,求出溶解氧 DO 的优化曲线。通过模糊控制实时地改变风机的频率实现对 DO 不同曲线的控制,明显地节省了电能,降低了污水处理的成本。

最后,研究基于 RBF 网络的水华短期预测方法,RBF 基函数中心、宽度和权值的监督学习方法。对 RBF 网络隐层节点数、径向基函数宽度与网络拟合能力,以及与网络泛化性能的作用和影响进行了分析。从网络的训练和预测结果来看,基于 RBF 网络的水华软测量模型泛化能力强,网络预测精度高,拟合性能好,为城市湖泊水华的预测研究打下了基础,为水华的短期预警提供了一种有效的新方法。

本研究工作得到北京市自然科学基金重点项目(8101003)“水环境建模、水华预测与应急处理决策方法研究”北京市人才强教深化计划(PHR201007123)、科技创新平台项目的资助。

本书的选题、研究内容得到侯朝桢教授、崔莉凤教授,以及王小艺、许继平、王正祥等实验室的老师和其他同学帮助,在此表示感谢。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 水环境系统在线测量与控制存在的问题	1
1.1.1 流程工业生产过程在线测量存在的问题	1
1.1.2 污水处理过程在线测量与控制存在的问题	2
1.2 水环境系统软测量与控制的研究现状	6
1.2.1 软测量的基本思想	6
1.2.2 软测量建模理论与方法的研究	7
1.2.3 污水处理过程数学模型与软测量的研究	13
1.2.4 污水处理过程控制方法的研究	17
1.2.5 水华预测方法的研究	21
1.3 研究目的和意义	23
1.3.1 理论研究与学术价值	23
1.3.2 研究的实际意义与应用前景	25
1.4 本书研究的主要内容	27
1.4.1 研究的主要内容	27
1.4.2 本书结构	29
第 2 章 水环境系统软测量原理	31
2.1 软测量的基本内容	31

2.2	软测量的原理及模型	32
2.2.1	软测量的基本原理	32
2.2.2	二次变量的选择	34
2.2.3	测量数据的预处理	35
2.2.4	软测量模型的建立	36
2.3	软测量的实现	39
2.4	本章小结	41
第3章	基于 PNN 的污水处理软测量方法研究	42
3.1	过程神经网络(PNN)	42
3.1.1	过程神经元	43
3.1.2	过程神经网络模型	44
3.2	基于 PNN 的软测量方法及改进算法	45
3.2.1	基于函数正交基的 PNN 学习算法	45
3.2.2	基于函数正交基展开的 PNN 改进算法	47
3.3	基于 PNN 的污水处理过程软测量	52
3.3.1	软测量模型变量的选取	52
3.3.2	软测量结构模型	56
3.3.3	实验数据及软测量结果	57
3.4	本章小结	62
第4章	基于 RBF 神经网络的水处理过程建模方法	64
4.1	RBF 神经网络	64
4.1.1	RBF 函数及 RBF 神经元	64
4.1.2	RBF 网络的特点、映射机理	67

4.1.3 RBF 神经网络的学习算法	69
4.2 水处理优化控制数学模型的 RBF 神经网络建模方法	73
4.2.1 污水处理优化控制的目标	73
4.2.2 RBF 神经网络数学建模	74
4.3 RBF 神经网络模型的训练和测试	75
4.3.1 神经网络样本数据的采集及处理	75
4.3.2 神经网络模型仿真及测试	76
4.4 本章小结	81
 第 5 章 基于遗传算法的优化控制方法及实现	83
5.1 遗传算法理论及发展	83
5.1.1 遗传算法的发展	83
5.1.2 遗传算法研究的几个问题	84
5.1.3 遗传算法的基本特点	88
5.1.4 遗传算法在控制领域中的应用	90
5.2 基于遗传算法的污水处理过程优化设计方法	92
5.2.1 参数的编码	93
5.2.2 初始种群的生成	95
5.2.3 适应度函数(fitness function)的设计	95
5.2.4 算法控制参数设定	96
5.2.5 遗传操作的设计	97
5.2.6 算法的终止条件	102
5.3 污水处理过程优化控制的遗传算法实现	103
5.3.1 遗传算法求 DO 优化曲线	103
5.3.2 优化结果分析	108

5.4 优化控制的实现	113
5.4.1 污水处理计算机控制系统	113
5.4.2 神经网络建模与优化计算实现	116
5.4.3 DO 模糊控制及优化效果	117
5.5 本章小结	122
第 6 章 基于神经网络的水华预测方法	123
6.1 水华及其预测方法	123
6.1.1 水华发生的机理	123
6.1.2 水华的评价指标	124
6.1.3 水华预测方法及其现状	127
6.2 基于 BP 神经网络的软测量及水华短期预测方法	128
6.2.1 软测量模型的参数确定及数据预处理	129
6.2.2 软测量模型的建立与仿真分析	134
6.3 基于 RBF 神经网络的软测量及水华短期预测方法	139
6.3.1 RBF 软测量模型的建立	140
6.3.2 径向基函数宽度与网络拟合能力分析	141
6.3.3 径向基函数宽度与网络泛化性能分析	144
6.4 RBF 与 BP 网络水华预测软测量模型的比较	148
6.5 基于 Elman 神经网络的水华短期预测方法	149
6.5.1 Elman 神经元模型和网络结构	149
6.5.2 Elman 与 BP、RBF 网络预测模型对比	151
6.5.3 基于 Elman 神经网络的水华短期预测模型建立与仿真	154
6.6 本章小结	158

第7章 工作总结与展望	160
7.1 本书工作总结	160
7.1.1 本书完成的主要研究内容	160
7.1.2 研究工作的主要特点	163
7.2 今后工作展望	164
参考文献	166

第 1 章 绪 论

在流程工业的生产过程中普遍存在着过程参数时变、难以在线实时检测或检测时间严重滞后,而且数学建模困难,不能实现实时闭环控制、不易保证产品质量的难题。软测量理论和方法从 20 世纪 90 年代起得到了普遍关注和迅速发展,是解决上述问题和进行工业过程监测、控制、优化的重要方法。

本章首先分析水环境系统在线测量与控制存在的问题,论述软测量的基本思想、软测量建模理论与方法的发展,详细分析水环境系统数学建模、软测量与控制的研究现状,最后介绍课题的来源、研究的目的意义与应用前景。

1.1 水环境系统在线测量与控制存在的问题

1.1.1 流程工业生产过程在线测量存在的问题

科学和技术的发展,特别是人工智能、计算机及其网络技术的快速发展,正引发着控制理论的发展与控制技术的深刻变革。控制方式智能化、管理和控制一体化与最优化是当前控制技术发展与研究主要方向之一。软测量(Soft - measurement, or Soft sensing)随着控制理论、智能科学发展和计算机技术的推广应用,从 20 世纪 90 年代起得到了普遍关注和迅速发展,是进行工业过程监测、优化、控制的重要方法。

在流程工业的生产过程中普遍存在着过程参数时变、数学建模困难、产品质量指标难以在线实时检测或检测时间严重滞后,不能实现实时闭环控制、不易保证产品质量的难题。特别是在一些工业控制场合,存在着这样一类变量:它们由于技术或经济的原因,目前还难以

或无法通过传感器直接检测，但同时又需要加以严格控制，并与产品质量密切相关的重要过程参数。例如衡量污水处理过程出水质量的主要指标 COD（Chemical Oxygen Demand 化学需氧量）的测量仪器价格贵、操作复杂、检测时间长；而 BOD（Biochemical Oxygen Demand 生物化学需氧量）目前还无在线检测仪器，有些参数人工化验检测时间约为 4~5h，甚至更长，难以得到实时测量值，不能用于对污水处理过程的实时闭环控制。

目前对这些质量变量的检测所采用的方法是进行人工取样化验，通过离线分析方式获得测取参数。由于人工化验时间滞后大，使得取样的周期都比较大，从几分钟到数小时不等，甚至几天的时间，难以直接用于过程控制。

为了对这类变量进行实时检测和控制，解决问题的途径和研究的思路主要有以下两种：

(1) 沿袭传统的检测技术发展思路，通过研制新型的过程测量传感器或仪表，采取以硬件为主的方式实现过程参数的直接在线测量。但这种方法存在技术、成本等诸多问题，有较大的局限性。例如国外已研制出 COD 检测仪，但仍存在滞后时间长、误差较大、价格较贵、使用不便等问题。测出结果的时间严重滞后，无法用于实时控制。

(2) 采用间接测量的方法，利用易于获取的其他测量信息，通过数学建模实现对被检测量的估计。为解决这类变量的估计和控制问题，在过程控制和检测领域开始研究一种新的测量理论和方法——软测量，就正是这一思想的集中体现，并在近年取得了较大进展。

软测量涵盖了数学理论、控制理论、人工智能、计算机软件开发等学科知识，其理论体系正在逐渐形成，是目前检测和过程控制研究发展的重要方向。

1.1.2 污水处理过程在线测量与控制存在的问题

活性污泥法（Activated Sludge Process）是一种工艺比较成熟的废水好氧生物处理技术，它具有污水处理效果好、效率高等优点。该方

法自从在英国曼彻斯特市建成污水实验厂以来，随着工程应用的日益拓展，在技术上得到不断的改进和完善，在城市污水处理中得到广泛的应用^[1]。据不完全统计，我国已建成以及在建的二级污水处理厂有80%以上采用活性污泥法。随着对环境质量的日益重视，对废水处理出水水质的要求也日渐提高，保证废水生物处理活性污泥过程在各种条件下的处理效果，成为人们普遍关注的问题。

目前污水处理广泛使用的活性污泥法实质是以存在于污水中的有机物作为培养基（底物），在有氧的条件下，对各种微生物群体进行混合连续培养，通过凝聚、吸附、氧化分解、沉淀等过程去除有机物的一种方法。污水处理的一般流程包括沉沙池、沉淀池、曝气池、污泥回流和沉淀排放等几个环节^[2]，污水处理实景如图1-1所示。



图1-1 污水处理实景图

污水处理基本流程如图1-2所示，它的运行过程包括注水、初沉、反应、沉淀、排水（排泥）等五个阶段。首先向反应器内充水，通过搅拌使池内形成混合液，然后进入曝气阶段；在曝气作用下，活性污泥和污水充分接触并能得到足够的溶解氧。污水中的可溶性有机污染物被活性污泥所吸附，并被存活在活性污泥上的微生物分解，使污水得到净化。沉淀之后即可汲取净化水并排除剩余污泥，一部分活性污泥留在池内进入下一个循环。

从控制的角度看，活性污泥法污水处理过程有以下特点和问题：

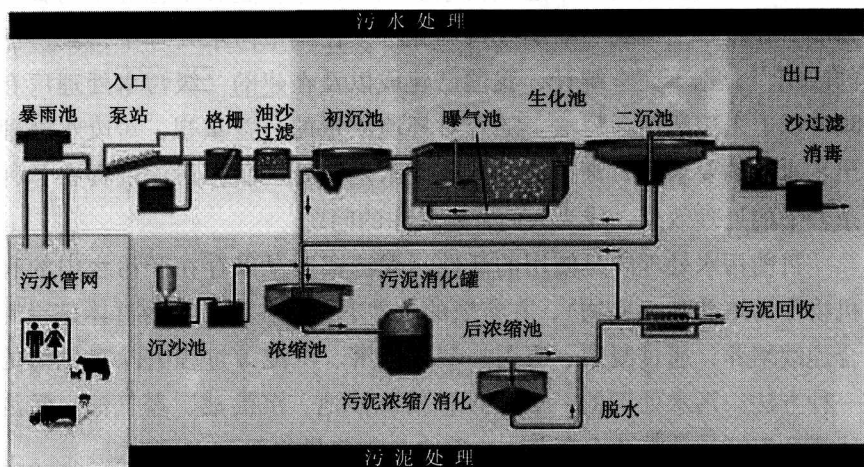


图 1-2 污水处理基本流程

(1) 污水处理系统是一个复杂的生化反应过程，由于存在非线性、时变性、复杂性、不确定性等因素，一般无法获得精确的数学模型^[3]。现在污水处理系统建立的数学模型，必须遵循一些比较苛刻的线性化假设，因此难以在实际的自动控制系统中使用。

(2) 污水处理自动控制系统中所采用的一些自动化检测专用仪表实时性差、精度低、价格昂贵，并且技术尚不完善、误差较大，检测中达不到预期效果，因而不能用于在线检测。如出水水质 BOD、COD、T_N (Total_ Nitrogen, 总氮量)、T_P (Total_ Phosphor 总磷量) 等浓度参数需靠人工化验取得。

(3) 由于上述两个原因，目前污水处理过程各环节控制均是独立的，一般采用定时或恒值的开环控制。例如初沉池排泥系统的定时控制、回流污泥量设定值控制、曝气池溶解氧—鼓风机风量调节、剩余污泥量条件控制等。由于没有实现出水水质的在线检测，通常一天定时对进水水质和出水水质取样一次检测或培养化验。因而在每天取样时间外的其他时间没有对水质的变化进行检测，不能根据废水实际水质和水量变化情况对反应过程和反应时间实现计算机实时控制，由此

引发了不能保证出水水质的稳定、出水不达标及污泥膨胀问题。

(4) 改善废水处理系统的性能以满足环境、技术和经济的要求, 可以通过多种途径来实现。国内较为重视新工艺的移植和推广, 已有一些新技术投入应用。与发达国家相比, 目前我国在污水处理的基本理论、工艺流程和工程设计等方面并不明显落后, 但是在运行管理与自动控制方面却存在着较大的差距。目前我国城市污水处理厂的吨水耗电量是发达国家的近两倍, 而运行管理人员数又是其若干倍, 污水处理设施基本上不会给企业带来直接的经济效益, 运行费用成为企业的沉重负担, 征收污水处理费不断提高。污水处理要求高, 会导致成本提高; 要求降低, 又达不到国家环保标准。因此, 加强污水处理系统运行控制策略的研究, 有效发挥和充分利用系统的潜力, 已成为重要的问题。

(5) 科学技术的发展和环境保护意识的提高, 对废水处理工艺提出了更高的要求, 概括地说, 就是高效、稳定、经济、节能和资源化。目前, 无论是城市污水还是工业废水处理厂, 由于废水的流量、组成和浓度都不断地变化, 其出水水质和其他运行参数也必然处于非稳定状态, 如何在确保出水水质的条件下, 达到可能的最低费用和最小能耗, 实现最优控制, 也是污水处理过程控制面临的问题。

SBR (Sequential Batch Reactive Mud Method, 序批式活性污泥法) 是目前常用的活性污泥法污水处理方法中的一种, 其过程是一个复杂的、动态的生化反应过程^[4]。在污水处理过程中, 进水水质和水量时刻在变化, 随着污染物质的去除, 系统中微生物的种类、数量以及污泥的组成均在不断改变, 这必然引起出水质量等表征其反应过程的动力学参数的变化。国际上目前主要采用的是机理分析的建模方法, 模型的动力学参数由十几个至四十几个, 难以用于实际控制。而衡量出水质量的主要指标 COD 的测量时间长; BOD 无在线检测仪器, 人工化验检测时间较长, 难以得到实时测量值, 不能用于对污水处理过程的实时闭环控制。

对于污水处理过程的控制方式和自动化水平, 我们先后对北京市

若若干个技术先进的污水处理厂进行了调研,普遍存在上述问题。污水处理过程,以及流程工业存在的过程参数时变、数学建模困难、产品质量指标难以在线实时检测或检测时间严重滞后,因而不能实现实时闭环控制等问题,这是目前国内、外需解决的重要课题,也是污水处理过程控制领域研究的热点。因而研究污水处理过程的建模方法、出水水质的检测方法和实时控制策略,是污水处理过程控制亟待解决的问题。

1.2 水环境系统软测量与控制的研究现状

1.2.1 软测量的基本思想

为解决在流程工业的生产过程中存在的产品质量指标无法在线实时检测,因而难以进行实时控制、不易保证产品质量的难题,软测量作为一种新的测量理论和方法,近年得到了快速发展。软测量是通过机理分析或实验数据,建立易测过程变量(辅助变量)与难以直接测量的待测过程变量(主导变量)之间的数学关系,即软测量模型,从而通过数学计算和估计方法,实现对待测过程变量的预测。软测量可以完成一些仪器仪表或硬件检测所不能完成的在线实时测量问题,被认为是进行工业过程监测、大滞后系统预测、优化与控制的最佳解决方案之一。

软测量的基本思想可以追溯到较早的时期,工程技术人员采用体积式流量计结合温度、压力等补偿信号,通过计算来实现气体质量流量的在线测量;而20世纪70年代提出的推断控制策略至今仍视为软测量方法在过程控制中应用的一个范例^[5]。然而软测量方法作为一个概括性的科学术语被提出是始于20世纪80年代中后期,1992年国际过程控制专家T. J. McAvoy^[6],在著名学术刊物Automation上发表了一篇名为“Contemplative Stance for Chemical Process Control”的IPAC报告,明确指出了软测量方法将是今后过程控制的主要发展方向之一,

对软测量方法研究起了重要的推动作用，在世界范围内掀起软测量方法研究的热潮^[7]。

软测量的基本思想是把自动控制理论与生产工艺过程知识有机结合起来，应用计算机技术，对于一些难于测量或暂时不能测量的重要变量（主导变量），选择另外一些容易测量且与其有关的变量（辅助变量或二次变量），通过构造某种以辅助变量为输入、主导变量为输出的数学模型，用计算机软件实现主导变量的估计。这类数学模型及相应的计算机软件即被称为软测量器或“软仪表”，其估计值可作为控制系统的被控变量或反映过程特征的工艺参数，为优化控制和决策提供重要信息。

对图1-3所示的过程对象输入输出关系，软测量的目的就是利用所有可获得的信息求得主导变量的“最佳”估计值，即构造从可测信息集（辅助变量）到主导变量的映射。

在这样的框架结构下，软仪表（软测量）的性能主要取决于过程的描述、噪声和扰动的特性，辅助变量的选取以及最优准则。

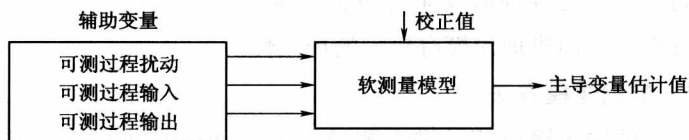


图1-3 软测量基本原理示意图

对软测量的研究主要包括：软测量建模方法、软测量工程化实施技术、软测量模型校正。

1.2.2 软测量建模理论与方法的研究

软测量建模方法是软测量研究的核心问题，实现软测量的基本方法就是构造一个数学模型，但软测量模型不同于一般意义下的数学模型，它强调的是通过辅助变量获得对主导变量的最佳估计，而一般的数学模型主要反映输入与输出之间的动态或稳态关系。