

# 基于 VC++ 的工业废水中和过程建模与仿真

李昌斌 马 昕 高立东

(北京化工大学信息科学与技术学院 北京 100029)

**摘 要** 针对常见的中和过程建模仅限于单一反应池的问题,提出中和池、调节池和事故池相结合处理的建模方法。根据中和反应过程机理建立数学模型,设定初始条件后,运用数值计算方法中的龙格库塔法求解。编写算法程序,并通过友好的界面显示动态效果、实时数据和历史曲线,试验表明,该软件能够准确地模拟中和过程,可用于教学实验,帮助学生熟悉污水处理工艺流程,完成控制实验。

**关键词** 中和过程,数学模型,仿真软件

中图分类号 TP319 文献标识码 A

## Modeling and Simulation of Neutral Process in Industry Wastewater Based on VC++

LI Chang-bin MA Xin GAO Li-dong

(College of Information Science & Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract** Aiming at the problem of common neutral treatment process of wastewater, which was limited to a single reactor, this paper proposed a new model method, which contained neutralization pool, regulating pool and accidental pool. It was modeled by the neutral reaction mechanism, and used numerical methods Runge-Kutta method to solve the model after setting initial condition. This software was developed by algorithm and displayed by dynamic effects, real-time data and historical curve through a friendly interface. Simulation test showed that it could truly simulate the neutral process of sewage treatment plants, which used for teaching and experiments, and helped students to familiar with the sewage treatment process and finish control experiments.

**Keywords** Neutral process, Mathematical model, Simulation software

## 1 引言

工业废水处理范围广,处理效果的好坏对自然环境及人类生存环境的影响也相当大<sup>[1]</sup>。其中很多需要对水的 pH 值进行监测与控制,且有不少是通过加中和剂来达到控制的目的。特别是对于生物处理过程,为保证生物体的最佳活性,系统中的 pH 值应保持在 6.5~8.5 之间<sup>[2]</sup>。因此中和反应是废水处理过程控制的关键环节。而 pH 中和过程是一类典型具有强非线性、时变、大滞后特点的复杂过程。

前人对于 pH 中和过程的建模主要有 3 类方法:一是根据化学反应机理及物料平衡关系,建立 pH 过程的机理模型<sup>[3,4]</sup>;二是按维纳模型结构辨识的黑箱建模方法<sup>[5]</sup>;三是利用神经网络自学习功能建立神经网络模型的方法<sup>[6]</sup>。本文针对污水处理中的中和流程,采用机理建模方法,以反应池的出口 pH 值和液位高度为主要研究对象,模型的物理意义明了、准确度高、适应性强<sup>[7]</sup>。

Visual C++ 自诞生以来,一直是 Windows 环境下最主要的应用开发系统之一<sup>[8]</sup>。利用 VC++ 编写程序实现此过程,开发用于教学实验的污水处理仿真软件,设计人机交互界面,使学生深入了解过程操作原理,提高开车、停车运行能力。

## 2 中和过程建模

### 2.1 工艺流程

以往的中和过程建模一般只用一个反应池,本文增加调节池和事故池,更接近实际,工艺流程如图 1 所示。V1-V8 分别表示各管道的控制阀门。

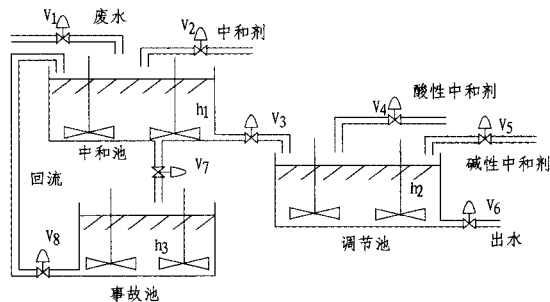


图 1 酸碱中和过程工艺流程图

首先在中和池中使用浓度较大的中和剂对废水进行初步调节(粗调),出水进入调节池,此处中和剂浓度较小,并有酸性和碱性两种,可进一步调节 pH 值(细调)。事故池用于处理突发事件。

此外,还有一些阀门开度变量,Valve 代表阀门开度,可

李昌斌(1985-),男,硕士生,主要研究方向为化工过程系统建模与仿真,E-mail:lichangbin008@163.com;马 昕(1975-),女,博士,讲师,主要研究方向为生产过程优化调度与故障诊断;高立东(1969-),男,博士,讲师,主要研究方向为化工建模与仿真。

在 0~100 之间调整,  $nV$  代表阀门开启状态, 初始状态都为零, 即都处于关闭状态。

假定反应池为 CSTR 系统, 物料完全混合, 忽略反应热。系统模型由静态模型和动态模型两部分组成。静态的非线性模型描述化学成分化学平衡, 动态模型描述 CSTR 中化学成分浓度的动态变化<sup>[9]</sup>。

## 2.2 化学机理模型

因为强电解质在水中完全电离, 所以选取盐酸 (HCl) 与氢氧化钠 (NaOH) 反应, 浓度分别为  $a, b$ , 由电中和条件:

$$[Na^+] + [H^+] = [Cl^-] + [OH^-] \quad (1)$$

因强酸强碱完全电离, 所以式(1)可以为:

$$b + [H^+] = a + [OH^-] \quad (2)$$

又 20°C 时, 水的电离常数为:

$$[H^+][OH^-] = 10^{-14} \quad (3)$$

$$pH = -\lg[H^+] \quad (4)$$

至此得到模型的静态方程<sup>[10,11]</sup>:

$$a - b = [H^+] - 10^{-14} / [H^+] = 10^{-pH} - 10^{pH-14} \quad (5)$$

## 2.3 动态数学模型的建立

在仿真过程中, 逐一开启相关阀门, 使中和池和调节池相继开始运行, 形成 CSTR 系统。两个池子的反应原理相似, 这里着重介绍中和池建模过程。列写原则如下: 累积量 = 输入量 - 输出量。

### 2.3.1 中和池处理阶段

假设处理酸性废水, 管道流量  $F$  与阀门系数  $C_v$ 。阀门开度  $Valve$  相关, 有计算公式:

$$F = C_v * Valve \quad (6)$$

开启阀门 1, 注入废水, 液位高度在变化, 达到一定高度后, 开启阀门 2, 加入中和剂反应。当中和池内 pH 值达到一定要求时, 打开排水阀门 3, 将废水排入调节池, 下面对此状态进行建模。

对于中和池液体体积与液位关系有  $V_1 = A_1 * h_1$ , 得到液位高度  $h_1$  与时间  $t$  的关系式:

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{F_1 + F_2 - F_3}{A_1} \quad (7)$$

$X_{A2}$  和  $X_{B2}$  分别表示中和池出口的酸、碱浓度, 则有酸碱浓度与时间  $t$  的关系式:

$$\begin{cases} \frac{d(V_1 X_{A2})}{dt} = F_1 X_{A1} - F_3 X_{A2} \\ \frac{d(V_1 X_{B2})}{dt} = F_2 X_{B1} - F_3 X_{B2} \end{cases} \quad (8)$$

两式相减得:

$$\frac{dV_1 (X_{A2} - X_{B2})}{dt} = F_1 X_{A1} - F_2 X_{B1} - F_3 * (X_{A2} - X_{B2}) \quad (9)$$

令  $y_1 = X_{A2} - X_{B2}$ , 代表酸碱浓度变化, 代入式(9)得

$$\frac{d(V_1 y_1)}{dt} = F_1 X_{A1} - F_2 X_{B1} - F_3 y_1 \quad (10)$$

将式(5)和  $V_1 = A_1 * h_1$  代入式(10)中, 整理得到出口  $pH_1$  关于时间  $t$  的微分方程:

$$\frac{dpH_1}{dt} = \frac{F_1 X_{A1} - F_2 X_{B1} - (F_3 + A_1 * \frac{dh_1}{dt})(10^{-pH_1} - 10^{pH_1-14})}{A_1 * h_1 * (-10^{pH_1} * \ln 10 - 10^{pH_1-14} * \ln 10)} \quad (11)$$

针对建模过程建立信号流程图, 如图 2 所示<sup>[12]</sup>。

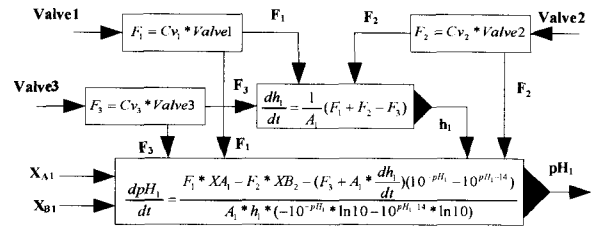


图 2 中和池模型信号流程图

### 2.3.2 调节池处理阶段

调节池对废水 pH 值做进一步调节处理, 当上游 pH 值发生变化而中和池无法迅速处理时, 调节池起到了缓冲作用并进一步精确调节 pH 值。当 pH 值偏低时, 打开阀门 5, 加碱性中和剂; 当 pH 值偏高时, 打开阀门 4, 加酸性中和剂。建模方法与中和池相似, 此处不再赘述。

### 2.3.3 事故池处理阶段

当中和池入口废水波动较大导致 pH 值暂时无法控制或液位高度超过警戒线时, 将废水暂时存放在事故池中, 之后可打开回流阀 V8 注入中和池中处理。处理事故时, 打开阀门 7, 将废水排入事故池, 如果原来是空池子, 则有液位高度  $h_3$  与时间  $t$  的关系式:

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{F_7}{A_3} \quad (12)$$

如果池中原来有废水,  $X_{A5}$  和  $X_{B5}$  分别表示事故池中的酸、碱浓度, 则酸碱浓度与时间  $t$  的关系式:

$$\begin{cases} \frac{d(V_3 X_{A5})}{dt} = F_7 X_{A2} \\ \frac{d(V_3 X_{B5})}{dt} = F_7 X_{B2} \end{cases} \quad (13)$$

求解过程与前面类似, 得到出口  $pH_3$  值关于时间  $t$  的微分方程:

$$\frac{dpH_3}{dt} = \frac{F_7 * (10^{-pH_1} - 10^{pH_1-14}) - A_3 * \frac{dh_3}{dt} * (10^{-pH_3} - 10^{pH_3-14})}{A_3 * h_3 * (-10^{pH_3} * \ln 10 - 10^{pH_3-14} * \ln 10)} \quad (14)$$

信号流程图如图 3 所示。

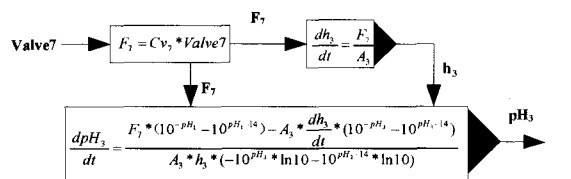


图 3 事故池模型信号流程图

## 2.4 模型计算

连续系统仿真数值解法应用最广的是数值积分法。它将仿真时间离散为一系列时间间隔, 已知前一时刻的状态向量值, 估算下一时刻的状态向量值。此处采用应用较广且高精度的四阶龙格-库塔法求解<sup>[13,14]</sup>。

## 3 仿真实现

### 3.1 仿真软件开发环境简介

本研究选择可视化计算机语言 Microsoft Visual Studio

2005(简称 VS2005)来编写程序开发仿真软件。它是一个集成开发工具,提供了软件代码自动生成和可视化的资源编辑功能。其开发出来的软件具有很优越的人机交互性<sup>[15,16]</sup>。

### 3.2 程序功能及运行过程

程序主要包括算法和界面显示两大部分。算法前面已经简单介绍过了,计算模型输出结果。界面部分有主界面工艺流程的动态显示、处理参数设置、实时数据和历史曲线的显示。

启动程序后进入主界面,从菜单项中选择废水类型,设置相应参数的初始值,并开始运行,观察仿真结果。如果想继续进行仿真实验,可返回主界面重新选择,否则退出程序。程序流程结构如图 4 所示。

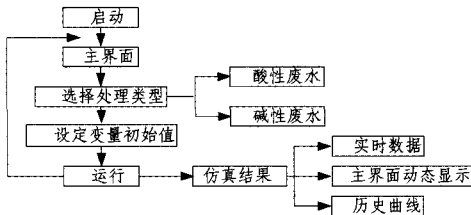


图 4 程序流程结构图

### 3.3 实例运行

对反应池规格和溶液初始浓度进行设定,如表 1 所列。

表 1 参数变量说明列表

参数设置	符号	初值	单位
中和池底面积	A <sub>1</sub>	200	m <sup>2</sup>
调节池底面积	A <sub>2</sub>	200	m <sup>2</sup>
事故池底面积	A <sub>3</sub>	200	m <sup>2</sup>
中和池最大深度	H <sub>1</sub>	5	m
调节池最大深度	H <sub>2</sub>	5	m
事故池最大深度	H <sub>3</sub>	5	m
中和池入口浓度	XA <sub>1</sub>	0.001	mol/L
中和剂入口浓度	XB <sub>1</sub>	0.01	mol/L
酸性调节剂入口浓度	XA <sub>3</sub>	0.001	mol/L
碱性调节剂入口浓度	XB <sub>3</sub>	0.001	mol/L

启动程序进入主界面,此时,各反应池为空,阀门关闭。从菜单中选择酸性废水,设定初始值后运行。点击阀门对其开度进行设置并运行。在主界面上的列表框中会动态显示每 1 秒钟的液位高度值、pH 值变化情况。反应池中液位高度会不断变化,pH 值通过液体颜色变化直观体现,规律与 pH 试纸相似。点击历史曲线菜单项可以查看每个池子的变量随时间的变化趋势,如图 5—图 7 所示。

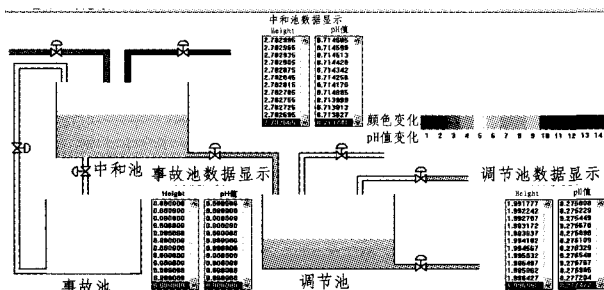


图 5 程序主界面

从曲线中可以看出 pH 值变化趋势与酸碱滴定曲线相似,在 pH=7 附近对象的静态增益很大,此时添加的碱性中

和剂略有变化就能引起 pH 值较大幅度地变化;而远离 pH=7 对象的静态增益很小,只有加入大量的碱性中和剂才能造成 pH 值的少量变化,即其非线性突出表现为:在中和点附近灵敏度过高,而在远离中和点处灵敏度又很低<sup>[17]</sup>。

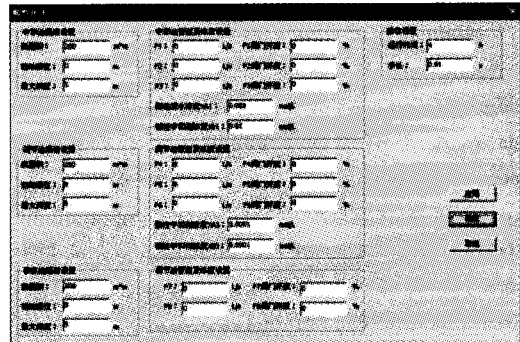


图 6 设定变量初始值

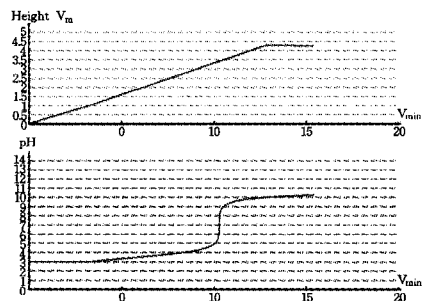


图 7 中和池出口变量仿真结果显示

当液位达到一定高度时,打开中和池出水阀,处理后的废水进入调节池。现在增加输入扰动,观察其变化情况,如图 8 所示。稳态时,中和池出水注入调节池,两个池子出口 pH 值相近,现增大中和池入口阀门开度,其他阀门开度不变,则酸性废水流量增大,中和池出口 pH 值减小,曲线(实线)下降趋势较大,而调节池出口 pH 值(虚线)变化缓慢,证明了模型的正确性,进而说明了调节池的重要作用。

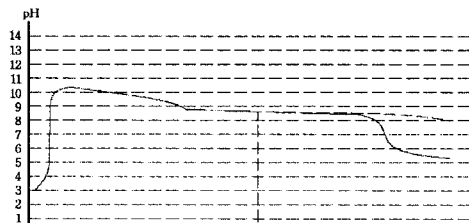


图 8 增加输入扰动后仿真结果

通过调节阀门开度或修改初始设定值,用户可以改变输入、输出值,实时观察运行效果,其全面、形象直观、操作方便。

**结束语** 本文通过机理建模方法建立工业废水中和过程数学模型,用 Visual C++ 完成仿真软件开发。软件交互性强,易于操作。可真实还原污水处理厂处理过程。

作为污水处理中的重要环节之一,中和处理过程建模与仿真对于教学研究意义重大,对学生了解工艺和控制系统的动态特性,提高对工艺过程的运行和调整控制能力具有特殊的作用。

### 参考文献

[1] 沈文浩. 工业污水处理自动监控技术的发展现状研究[J]. 造纸

科学与技术,2011,5:83-84

- [2] W. 韦斯利. 艾肯菲尔德(小). 工业水污染控制[M]. 北京:化学工业出版社,2003:33-34
- [3] Pishvaie M R, Shahrokhi M. Control of pH processes using fuzzy modeling of titration curve[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2006, 157:2983-3006
- [4] Gustantafasson T K. Dynamic Modeling and Reaction Invariant Control pH[J]. Chen Eng Sci, 1983, 38:389-398
- [5] Kalafatis A D, Wang Liu-ping, Cluett W R. Identification of time-varying pH processes using sinusoidal signals[J]. Automatica, 2005, 41:685-691
- [6] Capel-Cuevas S, Cuellar M P, de Orbe-Paya I, et al. Full-range optical pH sensor array based on neural networks[J]. Microchemical Journal. 2011, 97:225-233
- [7] 赵科, 王铁生, 张计科. 三容水箱的机理建模[J]. 控制工程, 2006, 6:521-524
- [8] 卢佳琪. 基于 VC++ 平台的工程曲线绘图软件开发[J]. 电脑编程技术与维护, 2011, 8:15-16
- [9] 梅林. 基于模糊自适应 PID 的污水处理 pH 值控制系统研究

[D]. 北京:北京化工大学,2008

- [10] Mwembeshi M M, Kent C A, Salhi S. A genetic algorithm based approach to intelligent modeling and control of pH in reactors [J]. Computers and Chemical Engineering, 2004, 28:1743-1757
- [11] 王随平, 徐宏宇, 杜顺起. 钛黄粉生产污水处理中和过程模型的建立 [J]. 冶金行业应用, 2011, 4:108-109
- [12] Roger G, Franks E. Modeling and Simulation in Chemical Engineering [M]. America, 1972:85-90
- [13] 王建强, 沈愉乐. 多种微分方程数值计算方法分析[J]. 城市勘测, 2010, 8:117-118
- [14] 吴重光. 系统建模与仿真技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2008:33-34
- [15] 夏静文. 污水处理设备系统模型研究与仿真[D]. 太原:太原科技大学, 2008:29-30
- [16] 徐江峰, 张战辉, 杨有. 基于 VC++ 的进程通信技术研究[J]. 计算机科学, 2007, 9:29-30
- [17] 姚莉. pH 过程自动控制系统研究与仿真[D]. 长沙:中南大学, 2007:4-5

(上接第 535 页)

合理的设计框架和实现方式,语义内容相对完整,支持多层次、多模态及个性化检索,且效率更高,具有独特的优越性。由于自身知识积累、时间、经费等条件限制,图像库有待于进一步充实和完善。但瑕不掩瑜,相关对比及实验表明,该库的构建可能会有助于图像情感等研究的发展,具有重要的研究和实践意义。

### 参 考 文 献

- [1] Porter J, Lin C-C, Smith D E, et al. Ecological image databases: From the webcam to the researcher[J]. Ecological Informatics, 2010, 5:51-58
- [2] 王伟凝, 贺前华. 基于色彩描述的图像情感语义查询[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2008, 36(1):60-65
- [3] 石立桩, 余萍. 基于 Mpeg-7 的语义图像检索系统的研究[J]. 电力系统通信, 2005, 26(156):10-13
- [4] 王伟凝, 余英林, 张建超. 基于线条方向直方图的图像情语义分类[J]. 计算机工程, 2005, 31(11):7-9
- [5] 向红, 刘嘉敏, 谢海军, 等. 中国人人耳图像数据库的设计与建立 [J]. 计算机工程, 2009, 35(18):275-277
- [6] 中国植物图像库[OL]. <http://www.plantphoto.cn/>, 2011-07-20
- [7] Lang P J, Bradley M M, Cuthbert B N. International Affective Picture System(IAPS): Affective ratings of pictures and instruction manual[R]. 2008:1-61
- [8] 黄宇霞, 罗跃嘉. 国际情绪图片系统在中国的试用研究[J]. 中国心理卫生杂志, 2004, 18(9):631-634
- [9] Muller H, Marchand-Maillet S, Pun T. The Truth about Corel-Evaluation in Image Retrieval [J]. Computer Science, 2002, 2383:38-39
- [10] 服装情感图像库[OL]. <http://www.clothingaffect.com/>, 2011-07

- [11] 李海芳, 贺静, 焦丽鹏. 基于颜色特征的图像情感分类[J]. 计算机应用, 2007, 27(2):453-455
- [12] 高彦宇, 王新平, 尹怡欣. 自然风景图像情感标识方法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2011, 4:767-771
- [13] Mpeg-7 verview (version 10)[OL]. <http://mpeg.chiariglione.org/standards/mpeg-7/mpeg-7.htm>, 2004-10
- [14] 黄崑, 赖茂生. 图像情感特征的分类与提取[J]. 计算机应用, 2008, 28(3):659-661
- [15] 刘烨, 陶霖密, 傅小兰. 基于情绪图片的 PAD 情感状态模型分析 [J]. 中国图像图形学报, 2009, 14(5):753-758
- [16] 方予, 陈增强, 袁著祉. 基于人工智能的情感模型建立[J]. 信息与控制, 2006, 35(6):673-678
- [17] 张李义, 李歆. 基于 Mpeg-7 的图像内容描述方案研究[J]. 情报学报, 2004, 23(3):313-319
- [18] 邓涛, 郭雷, 杨卫莉. 基于本体的图像语义标注与检索模型[J]. 计算机工程, 2008, 34(17):188-190
- [19] Federation Cynologique Internationale for Dogs Worldwide (Standards and Nomenclature)[OL]. <http://www.fci.be/nomenclature.aspx>, 2011-03
- [20] 王超, 王志良. 基于个性和 OCC 的机器人情感建模研究[J]. 微计算机信息(测控自动化), 2005, 21(3):181-182
- [21] 赫尔雷格尔 D, 斯洛克福姆 J W, 伍德曼 R W. 组织行为学(第九版)[M]. 俞文钊, 丁彪, 等译. 上海:华东师范大学出版社, 2001:62-96
- [22] 李明, 叶晓俊. 对象关系数据库管理系统体系结构的研究[J]. 计算机科学, 2003, 30(8):73-75
- [23] 湛震. 图像数据库技术研究现状及展望[J]. 黑龙江科技信息, 2008
- [24] Pardede E, Rahayu J W, Taniar D. Object-relational complex structures for XML storage[J]. Information and Software technology, 2006, 49:370-384