

文章编号: 1674-6139(2016)10-0099-04

SimuLink 模拟活性污泥工艺的研究

胡晓东, 范岳峰, 方荣兆

(上海昊沧系统控制技术有限责任公司, 上海 200232)

摘要: 以数学软件 matlab 内嵌的 SimuLink 工具箱为研究工具, 结合国际水协(IWA)提出的活性污泥一号模型(ASM1)对欧盟科学技术合作计划(COST)提供的 AO 标准工艺流程建立数学模型并加以模拟, 将模拟结果和 COST 提供的标准模拟结果进行比较, 在各级反应器内的两者结果基本匹配, 认为模型的建立、模拟结果合理可靠, 基于该工艺模型的拓展模型和变型可进一步为实际工艺的设计与运行提供参考。

关键词: 数学建模; 活性污泥一号模型; SimuLink 工具箱; COST 基准

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

Simulation of Activated Sludge Wastewater Treatment Process by SimuLink

Hu Xiaodong, Fan Yuefeng, Fang Rongzhao

(HC System, Ltd, Shanghai 200232, China)

Abstract: Using SimuLink to model and simulate the anoxic-toxic treatment process based on COST Standard with ASM1, this paper compares the simulation result with the COST standard. The results in every CSTRs has reached the standard. The result of simulation can be considered as reasonable and reliable, the model can be used for the reference of process design and running, or further process optimizer.

Key words: mathematical modeling; activated sludge model; SimuLink; COST Standard

前言

利用数学模型对污水处理工艺的模拟可为污水厂的工艺设计和运行提供指导, 对提高污水厂的运行管理水平具有重要的意义。对于污水处理工艺的设计来说, 使用数学模型可以在不进行试验的前提下模拟系统的处理效果, 确定各构筑物的大小及各种关键运行参数的合适范围, 并通过模拟不同工艺的运行效果来选择最佳工艺, 为后续的小试以及中试提供参考; 对于已建成的污水处理厂的运行管理来说, 则可利用模型来预测进水水质及水量变化对处理效果的影响, 并采取相应措施以优化工艺。用于描述污水处理过程的数学模型已经日趋成熟和普及, 国际水协(IWA)于上世纪末提出的活性污泥模

型系列(ASM)是其中应用最广泛、发展最成熟的模型之一。该系列模型包括活性污泥一~三号模型(ASM1、ASM2 和 ASM2d、ASM3)^[1]。国外很多科研机构和企业也已经开发出一系列基于 ASM 模型的仿真软件, 如 GPS-X、BioWin 和 WEST 等来参与污水处理厂的设计、运行和管理的模拟仿真, 得到了普及和应用^[2]。但这类软件价格高昂, 普通的研究人员很难承担。如果利用编程语言来建模, 往往又超出非程序设计人员的能力范畴。而 matlab 软件内嵌的 SimuLink 工具箱则可以把编程过程可视化、模块化, 非常适合解决为工艺流程建模的问题。

1 活性污泥一号模型简述

国际水协(IWA)在总结已有的各种污水生物处理数学模型的基础上, 于 1987 年推出了活性污泥 1 号数学模型(ASM1), 该模型是在总结了南非 Marais 和 Dold 等人研究基础上, 以矩阵形式来描述各组分

收稿日期: 2016-07-07

作者简介: 胡晓东(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事工艺建模和仿真系统开发的研究工作。

在反应过程中的变化规律和相互关系,并采用了“开关函数”的概念,用来反映环境因素改变而产生的抑制作用,避免了那些因为具有不连续特性的反应过程在模拟过程中出现的数值不稳定的现象^[1]。该模型着重于描述废水生物处理的基本原理、过程及其动态模拟,把氮的去除纳入模型,但未包括磷的去除。

ASM1模型包括了活性污泥过程的8种生物化学反应、13种模型组分和19个参数,其中5个是化学计量学参数,其余14个是动力学参数^[3]。ASM1推出后在欧美得到广泛应用,但它未包含磷的吸收和释放过程,无法模拟污水除磷过程,使用受到了一定的限制。

2 COST 基准

进行的建模和模拟工作以及对模拟结果的验证,均是基于COST基准,COST全称“The European Co-operation in the field of Science and Technical Research”,即“欧盟科学技术合作计划”,该组织主要从事基础研究和非竞争性领域的研究。本文涉及的活性污泥部分来自于COST624&682基准。该基准致力于废水收集、处理、处置全过程的性能优化和降低工程费用的研究^[4]。

欧盟COST624&682基准的工艺流程包含5个生物反应器(前2个缺氧,后3个好氧)以及一个二次沉淀池。(见图1)

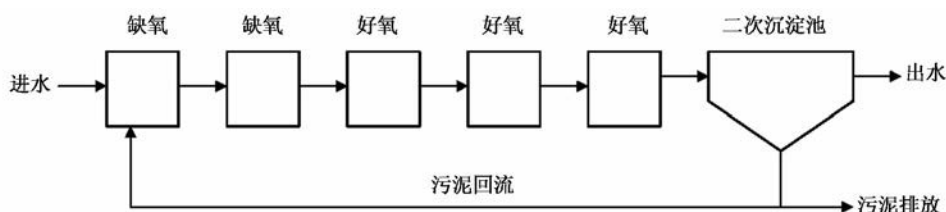


图1 COST624&682 基准模拟的工艺流程

该基准的设定如下:

(1) 5个生化反应器均完全混合,单元1和单元2处于缺氧状态,单元3~5中进行曝气,饱和溶解氧浓度为8毫克/升,空气传质系数 $K_L a$ 缺省值分别是10,10,3,5(h^{-1})。

(2) 5单元到1单元有混合液内循环,二沉池到1单元有污泥回流,废弃污泥从二沉池底部排出。

(3) 二沉池不发生生化反应。

3 建立模型

对活性污泥系统建立数学模型,方法是结合相关的动力学知识,列出各组分在各级反应器中的物料平衡方程,通常是以微分方程组的形式来表达^[5]。模拟各组分浓度的变化规律即求解该方程组。以COST624&682基准涉及到的五级完全混合反应器为例:

各级反应器中溶解性组分的物料平衡:

1#反应器

$$V \left(\frac{dS_1}{dt} \right)_{\text{净}} = Q_{in} * S_{in} + (Q_r + Q_{rin}) * S_5 - (Q_{in} + Q_r + Q_{rin}) * S_1 + V \left(\frac{dS_1}{dt} \right)$$

i#反应器($i = 2 \sim 5$)

$$V \left(\frac{dS_i}{dt} \right)_{\text{净}} = (Q_{in} + Q_r + Q_{rin}) * (S_{i-1} - S_i) + V \left(\frac{dS_i}{dt} \right)$$

各级反应器颗粒性组分的物料平衡

1#反应器

$$V \left(\frac{dX_1}{dt} \right)_{\text{净}} = Q_{in} * X_{in} + Q_r * X_r + Q_{rin} * X_5 - (Q_{in} + Q_r + Q_{rin}) * X_1 + V \left(\frac{dX_1}{dt} \right)$$

i#反应器($i = 2 \sim 5$)

$$V \left(\frac{dX_i}{dt} \right)_{\text{净}} = (Q_{in} + Q_r + Q_{rin}) * (X_{i-1} - X_i) + V \left(\frac{dX_i}{dt} \right)$$

上式中:

Q_{in} —进水流量;

Q_r —污泥回流量;

Q_{rin} —内回流量;

Q_w —废弃污泥排放量。

二沉池的物料平衡可用下式来表达:

$$Q_e * X_e + Q_w * X_w + Q_r * X_r = (Q_{in} + Q_r) * X$$

其中:

X —二沉池进水(即最后一级反应器出水)的污泥浓度;

X_r —二沉池回流污泥的浓度;

X_w —二沉池剩余污泥的浓度

X_e —二沉池排放的上清液中的污泥浓度,近似为零;

Q_e —上清液的排放量。

故而在这种情况下有:

$$X_r \approx \left(\frac{Q_{in} + Q_r}{Q_w + Q_r} \right) X.$$

由此可以把进入第一级反应器的回流污泥浓度以最后一级反应器出水中的污泥浓度来表达。

对模型进行模拟和验证的工具,是数学软件 matlab 内嵌的 SimuLink 工具箱。

SimuLink 是一个功能十分强大的动态仿真工

具,可以用来模拟各种线性和非线性,离散和连续,或者两者混合的复杂系统^[6]。

模拟活性污泥工艺模型的实质是求解多元非线性微分方程组。此类问题基本很难获得解析解,通用的求解方法是借助欧拉法,龙格-库塔法等数值解法来获得数值解^[7]。SimuLink 工具箱提供的积分器可圆满地求解此类问题。对于每一个基于物料平衡的微分方程,在 SimuLink 中都可以利用不同模块快速地建立起来,并通过封装功能,将复杂的模型压缩成一个单独的模块使用。一个复杂的 SimuLink 模型是由多个封装模块构成的,各封装模块都预留接口,可以添加和更改参数。

在建模过程中,每个反应器最终都被封装成为一个单独的模块,彼此预留接口,互相连接,代表了各级反应器的进水和流出。每一个反应器模块中同样根据各自情况,由多个模块相互连接而成。整个系统的 SimuLink 模型见图 2。

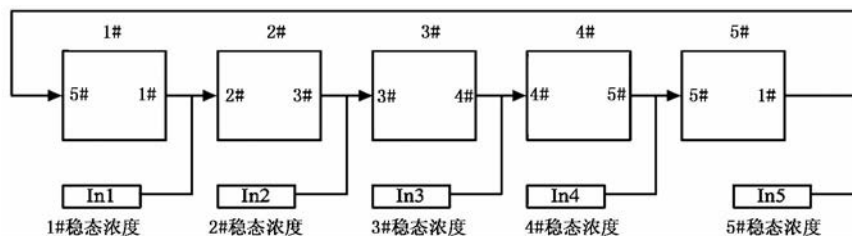


图 2 五级反应器串联运行的 SimuLink 模型

以第一级反应器中溶解性可生物降解底物 S_s 为例,简述如何构建模型中的物料平衡。

$$\left(\frac{dss_1}{dt} \right)_{\text{净}} = \frac{Q_{in} * ss_{in} + (Q_r + Q_{rin}) * ss_5 - (Q_{in} + Q_r + Q_{rin}) * ss_1 - 1/Y_H * \text{proc2} + \text{proc7}}{V}$$

$$\text{其中 } \text{proc2} = \mu_H \left(\frac{S_s}{K_s + S_s} \right) \left(\frac{S_o}{K_{OH} + S_o} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_g X_{BH}$$

$$\text{proc7} = K_H \frac{X_s/X_{BH}}{K_X + (X_s/X_{BH})} \left[\left(\frac{S_o}{K_{OH} + S_o} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_o} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] X_{BH}$$

点击 1#模块(代表第一级反应器),涉及 S_s 的模块如图 3 所示。它是一个被封装的模块,点击其中的 ss1 模块后才能得到真正反映物料平衡的模型,如图 4 所示。

图 3 中的 proc2 和 proc7 是两个被封装的子模块,分别表示 S_s 组分所涉及的两个动力学工艺过程:异氧菌的缺氧生长和颗粒状有机物的水解。点击 proc2 模块可得到如图 5 所示的参数赋值表,它是由 SimuLink 提供的函数模块封装而成的,可在其中设定和修改动力学参数。点击 proc7 亦然。

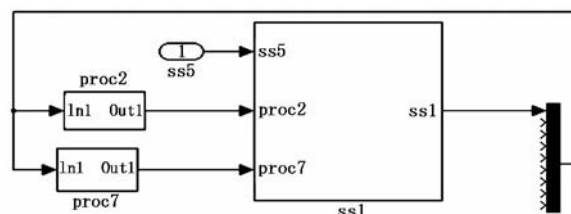


图 3 1#反应器中溶解性可生物降解底物 S_s 的封装模块

综上,图 3 至图 5 即以 SimuLink 模型的形式反映了第一级反应器中溶解性可生物降解底物 S_s 的物料平衡。同样,可以建立其他组分以及其他反应器中各组分的物料平衡,从而完成整个系统的模型。

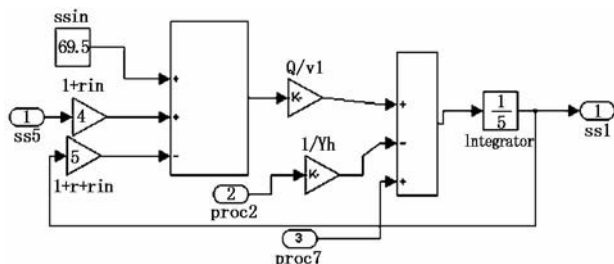


图4 1#反应器中溶解性可生物降解底物 S_s 的物料平衡模型



图5 “异养菌缺氧生长”模块参数表

点击“运行”按钮即可开始模拟。完成之后打开各级反应器模块下的“稳态浓度”模块,在 Display 模块上可读出该级反应器中各组分的稳态浓度。

4 模型验证及结果分析

COST624&682 基准给出的反应器尺寸及运行参数如下:

两个缺氧池体积均为 $1\,000\text{ m}^3$,三个好氧池体积均为 $1\,333\text{ m}^3$ 。

进水流量和污泥回流量均为 $18\,446\text{ m}^3/\text{d}$,内循环流量为 $55\,338\text{ m}^3/\text{d}$,剩余污泥排放量为 $385\text{ m}^3/\text{d}$ 。

根据 COST 基准,模拟是在晴天条件下(即一般天气条件)下进行的。在该条件下,两个星期气候没有变化,系统参数也不变化,适合进行稳态模拟。

将模拟结果同基准提供的组分数值进行比较,绘制成图表形式,比较模拟值和基准值的吻合程度,即可知道模拟的结果是否合理。(见图6~图11)

由以上模拟结果同基准值的比较可知,通过模拟得到的各级反应器中各组分的稳态值和 COST 基准值呈现高度的一致性。以各项主要指标的出水模拟结果和 COST 基准值的比较为例。

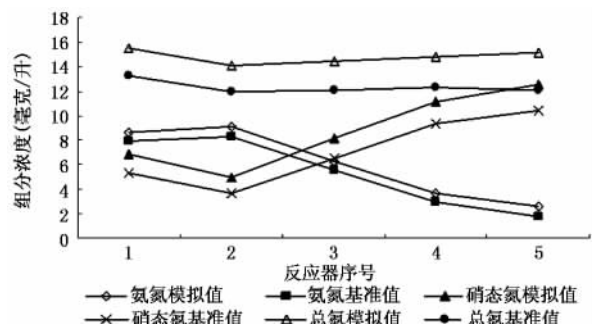


图6 氮组分的验证(总氮为氨氮与硝态氮之和)

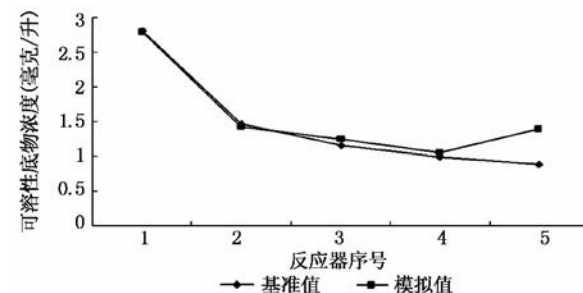


图7 溶解性底物 S_s 的验证

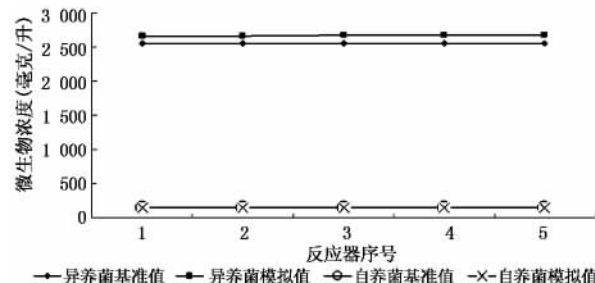


图8 异养菌和好氧菌的验证

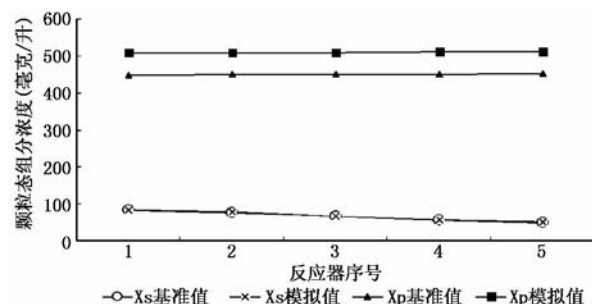


图9 可慢速生物降解底物 X_s 和微生物残渣 X_p 的验证

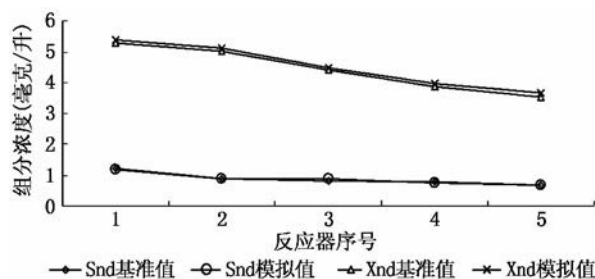


图10 溶解性和颗粒态可生物降解有机氮的验证

(下转第147页)

建议从以下几个方面着手:

(1) 控制工业建设用地规模,盘活工业用地存量。同时加快产业结构的调整,有研究表明:第二产业相对比重的降低,可以有效减少污染物的排放,降低生态环境面临的压力;第三产业相对比重的增大,可以提高森林覆盖率、城市公共人均绿地面积和人均资源占有量,有效改善生态环境状态^[6]。

(2) 抓紧编制矿山生态环境保护与综合治理方案,积极筹措生态修复资金,尽快启动矿区生态修复工作,减少因煤矸石堆放产生的水资源、空气污染,为可持续发展奠定基础。

(3) 继续贯彻环保部关于污染防治与生态保护并重的方针,按照生态学的原则,高标准、严要求,加大宏观调控力度及综合治理力度,加大生态环境资源保护的投入力度,大力发展循环经济,促进生态与经济良性循环,实现可持续发展^[7]。

参考文献:

[1]杨一鹏. 卫星遥感技术在环境保护中的应用: 进展、问题及对策[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(6): 84-89.

[2]刘建红. 基于遥感更新的省级生物丰度归一化系数研究——以湖北省为例[J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2007(12): 46-50.

[3]刘晓清. 秩相关系数法评价渭南市 1985-2003 年生态安全变化趋势[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(29): 16341-16342.

[4]张永勤. 区域水资源量的估算及预测分析: 以南京地区为例[J]. 地理科学, 2001, 21(5): 457-462.

[5]曾珍英. 基于 Landsat_TM 影像的江西省生态环境质量状况研究. 安徽农业科学, 2010, 38(5): 2531-2533.

[6]徐福英. 产业结构调整与生态环境质量的实证研究[J]. 山东工商学院学报, 2015, 29(4): 37-43.

[7]李江威. 资源型城市生态环境质量评价: 以鹤岗市为例[J]. 资源与产业, 2011, 13(4): 6-10.

(上接第 102 页)

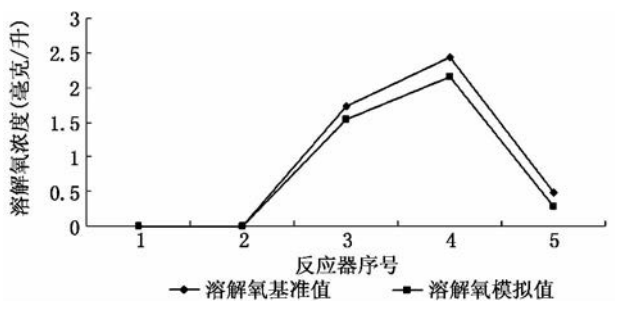


图 11 溶解氧的验证

表 1 主要水质指标的出水模拟结果和 COST 基准值的比较

指标名称	COST 基准值	模拟结果值	偏差绝对值
S_s (mg/L)	0.872	0.865	0.007
X_s (mg/L)	48.5	47.6	0.9
S_{NH} (mg/L)	1.62	1.81	0.19
S_{NO} (mg/L)	10.32	10.75	0.43

在上述指标中表 1 所示, S_s 、 X_s 是构成出水 COD 的主要组成部分,而 S_{NH} 和 S_{NO} 分别是氨氮和硝态氮,都是对水质影响至关重要的指标。

通过比较模拟结果和 COST 基准提供的参照值,主要出水水质指标的模拟值都非常接近 COST 基准值。

5 结语

通过 SimuLink 工具箱对 AO 工艺流程的建模、

模拟以及验证,证明 SimuLink 是一种非常适用于污水处理工艺建模的仿真工具,模块化的工艺模型和实际工艺中的处理单元一一对应,求解高效,建模和模拟的全程可视化,并且具有很强的通用性,只需调整工艺模块的数量、相对位置和布局以及物料走向即可代表不同种类的工艺组合,非常容易实现模型的拓展,使之适用于 AAO 及其变型、氧化沟等主流的活性污泥工艺。

参考文献:

[1]张亚雷,李咏梅,译. 活性污泥数学模型[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.

[2]高景峰,彭永臻,译. 污水处理系统的建模、诊断和控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 134-137.

[3]张锡辉,刘勇弟,译. 废水生物处理(第二版)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

[4]赵振,林卫青. 活性污泥数学模型在污水处理中的研究进展[J]. 上海环境科学, 2003.

[5]许保久,龙腾锐. 当代给水与废水处理原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

[6]王沫然. SimuLink 4 建模及动态仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.

[7]刘吉明. 基于 MATLAB 的活性污泥系统模拟. 太原理工大学硕士研究生论文[D]. 2005.