

一维分层弥散模型在二沉池模拟中的应用

周 振¹ 吴志超¹ 马 民² 顾国维¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092;
2. 武汉市水务集团有限公司, 武汉 430034)

摘 要 通过在二沉池一维分层模型中加入弥散作用建立了二沉池一维分层弥散模型, 并采用数值求解的方法开发了二沉池模拟程序。利用竖流式沉淀池中试验实测数据验证了模型的可靠性, 以 COST(欧洲科技领域研究合作组织) 624/682 文件中基准污水处理厂二沉池晴天时的稳态和动态进水数据为模型输入值, 分析比较了一维分层弥散模型模拟程序与国外成熟软件的模拟结果。结果表明, 纳入了弥散作用的一维分层模型能较好地描述实际二沉池中的悬浮固体浓度分布, 模拟结果具有较好的精度, 有待于在二沉池模拟和控制领域进一步深入研究。

关键词 二沉池 数学模型 活性污泥 弥散作用

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2008)03-0309-05

Study on 1D layered and dispersive model for secondary settling tank simulation

Zhou Zhen¹ Wu Zhichao¹ Ma Min² Gu Guowei¹

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Technology, Tongji University, Shanghai 200092;
2. Wuhan Urban Drainage Development Co., Ltd., Wuhan 430034)

Abstract By incorporating dispersive effect in the ideal 1D layered model of secondary settling tank, a 1D layered and dispersive model of secondary settling tank was established and numerically solved to develop a corresponding simulation program for secondary settling tank. The reliability of the model was validated by practical data collected from pilot-scale vertical-flow settling tank test, and by simulation results comparison with recommended foreign programs and softwares in the COST 624/682 simulation benchmark based on data collected from secondary settling tank in benchmark wastewater treatment plant under dry weather. Stable and dynamic simulation results showed that this model can correctly simulate suspended solids concentration profiles in practical secondary settling tank, and the model can reach the same simulation precision as recommended foreign programs or softwares in COST simulation benchmark. The 1D layered and dispersive model might be provided as a new tool for further studies on simulation and control of secondary settling tank.

Key words secondary settling tank; mathematical model; activated sludge; dispersive effect

二沉池是污水生物处理系统中的重要构筑物, 其正常运行是活性污泥系统正常运行的基础, 也是系统出水达标的关键^[1]。因此, 二沉池模型开发是整个活性污泥系统模拟的重要组成部分。目前, 二沉池模型的研究主要集中于一维分层模型、二维或三维计算流体力学模型以及经验模型^[2]。与一维分层模型相比, 计算流体力学模型在精度上有明显优势, 但模型本身比较复杂, 很难与活性污泥数学模型(ASM)s耦合, 模型在某些方面尚不如一维分层模型^[3], 经验模型则需要大量数据的积累, 而且多用于二沉池设计^[4]。就活性污泥系统的实际模拟而言, 最常用的二沉池模型仍然是一维分层模型^[5]。

目前国外成熟模拟软件中的二沉池模拟大多采

用不包括水力学作用的理想一维分层模型^[6], 而国内这一领域的研究主要集中于采用理想分层模型模拟二沉池出水和底流悬浮固体(SS)浓度^[7,8]或者与ASM)s耦合^[9]。然而, 理想一维分层模型的基础仅仅是质量平衡方程和通量理论, 模型过于简化, 缺乏对各种非理想流态和生化反应的模拟。国外对包括水力学作用的一维分层模型有一些报道^[3,10], 但模型应用需要大量实测数据的验证, 特别是在更广泛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50138010)

收稿日期: 2007-09-02; 修订日期: 2008-01-11

作者简介: 周振(1981~), 男, 博士研究生, 主要从事废水处理原理与技术研究工作。E-mail: zhouzhen_1981@yahoo.com.cn

的范围内将其模拟结果与理想分层模型进行对比以验证模型的可靠性。为此,本文作者在理想模型中纳入弥散作用建立二沉池一维分层弥散模型,利用中试试验数据和 COST 624/682 控制模拟平台的基准污水处理厂二沉池对模型可靠性进行验证,并对模型应用及发展前景进行探讨。

1 二沉池一维分层弥散模型

1.1 模型描述

沿竖直方向对二沉池进行分层(图 1),对二沉池分层微元进行质量平衡计算如下

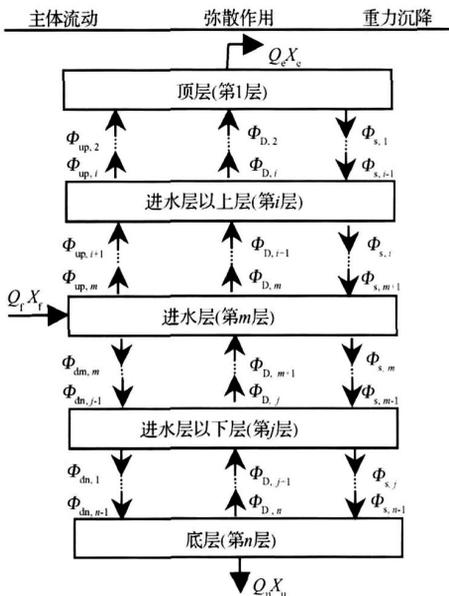
$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} - D \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} + K \tag{1}$$

式中: X 为二沉池中的固体通量 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$); D 为弥散系数 (m^2/d); K 则是 SS 的反应速率 ($\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$)。

对脱氮除磷污水处理厂而言,二沉池中比较容易发生反硝化和释磷反应^[11],但碳源和传质条件限制了反应程度,而且模型中考虑生化反应会成倍增加计算量,进而限制准确模拟所需的分层数^[10],因此在模拟过程中通常忽略生化反应^[6]。将固体通量分为重力沉降和主体流动两部分,设 SS 沉降速率和主体流动速率分别为 v_s 和 v_u ,则式(1)可转化为

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial(v_s X)}{\partial z} + \frac{\partial(v_u X)}{\partial z} - D \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \tag{2}$$

利用数值差分对方程(2)离散求解,即可得到数值求解的方程组。具体的数值求解方案如图 1 所示。



($\phi_{up,i}$, $\phi_{down,i}$, $\phi_{D,i}$ 和 $\phi_{s,i}$ 分别为二沉池第 i 层中因水流上升、水流下降、弥散作用和颗粒沉降产生的固体通量)

图 1 二沉池一维分层弥散模型的离散化
Fig 1 Discretisation of the 1D layered and dispersive model for secondary settling tank

式(2)中的主体流动速率可根据出水和底流流量确定。SS 沉降速率采用双指数模型^[12]计算,对二沉池中任意一层(第 i 层),有

$$\begin{cases} v_{s,i} = v_0 e^{-h(X_i - f_{ns} X_f)} - v_0' e^{-p(X_i - f_{ns} X_f)} \\ 0 < v_{s,i} < v_0' \end{cases} \tag{3}$$

式中: p 和 h 分别为低浓度区和成层沉降区的沉降特性参数 (L/g); v_0 和 v_0' 分别为理论最大沉降速率和实际最大沉降速率 (m/d); f_{ns} 为进水 SS (X_f) 中的不可沉降分数。

1.2 模拟效果的评价指标

在模拟过程中,除了比较出水 SS (X_e) 和底流 SS (X_u) 外,对于模拟值的整体准确程度,还可采用加权平均相对偏差函数 J 计算

$$J = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{X_{sm,i}}{X_{exp,i}} \right) \tag{4}$$

式中: $X_{exp,i}$ 和 $X_{sm,i}$ 分别为第 i 层 SS 实测值和模拟值 (g/L); i 为第 i 层权重系数,考虑到二沉池(分层数为 n)中 X_e 和 X_u 的重要性,对 i 定义如下

$$i = \begin{cases} 0.2/(n-2), & i=2, 3, \dots, n-1 \\ 0.4, & i=1 \\ 0.4, & i=n \end{cases} \tag{5}$$

2 模型应用及讨论

2.1 中试试验的模拟

实测数据来源于上海曹阳污水处理厂连续流沉淀池中试实验^[13],沉淀池进水为按一定比例稀释的二沉池回流污泥。沉淀池内径为 0.229 m,高度为 3.02 m。在沉淀池不同高度处设 10 个出水口,待运行稳定后取样测定不同高度处的 SS 浓度。试验数据可利用公式(6)进行质量平衡检查

$$= \left[1 - \frac{Q_e X_e + Q_u X_u}{Q_f X_f} \right] \times 100\% \tag{6}$$

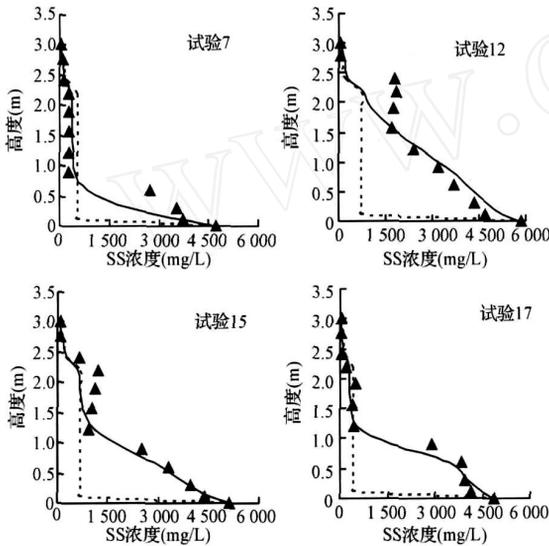
选用较小的 4 次试验数据进行数值模拟,具体运行参数如表 1 所示。

表 1 沉淀池中试试验的运行参数
Table 1 Operational parameters for settling tank tests

试验 #	Q_f (m^3/d)	X_f (g/L)	Q_e (m^3/d)	Q_u (m^3/d)	进水口高度 (m)	(%)
7	0.66	1830	0.40	0.26	0.4	2.92
12	2.87	1.86	1.96	0.91	1.0	1.07
15	2.92	1.56	2.06	0.86	1.0	0.02
17	1.68	1.43	1.20	0.49	1.0	1.24

沉降速率参数可根据文献[13]的批式沉降试验并结合文献推荐值^[6,12]校核后确定。分别考虑和不考虑弥散作用,并假定各层弥散系数 D 相等^[10],利用二沉池一维分层模型对 4 次中试试验进

行稳态模拟,SS浓度随高度变化的实测值与模拟曲线如图 2 所示。由图 2 可知,如果模型中不考虑弥散作用,则模拟的 SS 浓度曲线会明显偏离实测值,特别是在进水口以下的高浓度区,SS 模拟值会稳定在较低的浓度水平,显著低于实测值。考虑弥散作用后各次试验的 D 值如表 2 所示,在考虑弥散作用后,模拟的 SS 曲线则与实测值较为接近。



(实测值; ··· 不考虑弥散作用; —— 考虑弥散作用)

图 2 弥散作用对 SS 浓度曲线模拟结果的影响

Fig 2 Effect of dispersive effect on SS profiles of four pilot-scale tests by 1D layered settling tank model

表 2 二沉池一维分层模型对中试试验的模拟结果

Table 2 Simulation results of 1D layered settling tank model

模型参数	X_c (mg/L)	X_u (mg/L)	J
实测值	55.0	4 180	-
试验 7 $D=0$	51.7	4 176	0.1443
$D=3.1 \text{ m}^2/\text{d}$	55.2	4 169	0.0387
实测值	50.0	5 830	-
试验 12 $D=0$	46.4	5 775	0.1304
$D=9.8 \text{ m}^2/\text{d}$	49.6	5 768	0.0188
实测值	70.0	5 110	-
试验 15 $D=0$	70.4	5 110	0.0940
$D=14.0 \text{ m}^2/\text{d}$	69.2	5 114	0.0238
实测值	45.0	4 860	-
试验 17 $D=0$	42.7	4 817	0.0989
$D=12.5 \text{ m}^2/\text{d}$	45.2	4 811	0.0306

在表 2 中,考虑弥散作用后 J 值均有明显降低,整体模拟结果精度大为提升,这也表明考虑弥散作用后模拟得到的 SS 浓度曲线更接近于实测值。另一方面,考虑弥散作用后,4 次试验模拟值和实测值

的相对偏差平均值由 4.7% 降低至 0.7%; 对于 X_u 的模拟,考虑弥散作用后 4 次试验模拟值和实测值的相对偏差分别为 0.3%、1.1%、0.1% 和 1.0%。表 2 中 4 次试验模拟采用的 D 值不同,这可能是由于沉淀池中不同的主体流动速率产生的湍流扩散程度不同以及污泥特性等造成的^[11]。总体而言,与理想一维分层模型相比,弥散模型在准确模拟关键指标 X_c 和 X_u 的前提下,能够更好地模拟实际二沉池中的 SS 浓度分布。

2.2 COST 624/682 基准污水处理厂二沉池的模拟

2.2.1 模拟实例概述

模拟实例为 COST 624/682 文件^[6]中控制模拟平台的基准污水处理厂二沉池。该处理厂采用缺氧好氧工艺,由 2 个缺氧池和 3 个好氧池组成,进水流量为 $18\ 446 \text{ m}^3/\text{d}$ 。生化反应池后接二沉池,体积为 $6\ 000 \text{ m}^3$,面积为 $1\ 500 \text{ m}^2$,深度为 4 m,进水口高度为 2.2 m。剩余活性污泥用泵从二沉池底部连续抽出,流量为 $385 \text{ m}^3/\text{d}$,回流污泥流量为 $18\ 446 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

2.2.2 二沉池的稳态及动态模拟

在 COST 基准中,各程序或软件均采用了二沉池一维分层模型,只是二沉池模型边界条件的设定和沉降速率模型有所不同。在基准推荐的各种模拟程序或软件中,只有 EFOR 软件考虑了水力学因素的影响。为了与 COST 基准中的模拟结果对比,本文模拟时同样将二沉池分为 10 层, Tak á s 沉降速率模型参数采用 COST 基准默认值: $v_0 = 474 \text{ m/d}$; $v'_0 = 250 \text{ m/d}$; $p = 2.86 \text{ L/g}$; $h = 0.576 \text{ L/g}$; $f_{ns} = 0.00228$ 。

在稳态模拟中,分别采用不考虑 ($D=0$) 和考虑弥散作用 2 种方式,以污水处理厂晴天进水数据作为模拟输入值,输出二沉池各层 SS 浓度与 COST 基准的模拟值进行对比。弥散系数 D 的取值采用 Hamilton 等^[11]推荐的方法,将二沉池各层中的 D 作为常数处理,并以模拟值与 EFOR 软件模拟值之差的方差之和最小时的 D 值为准。

二沉池动态模拟采用 COST 基准中连续 14 d 的晴天进水数据进行,该天气下的水量变化如图 3 所示。考虑到晴天条件下进水情况较为稳定,且生物反应池具有一定的缓冲作用,模型假定二沉池进水 SS 浓度不变,以系统稳态模拟值作为模型输入值。在二沉池运行过程中,保持回流比恒定 ($R=1$),利用上文确定的参数和算法对二沉池进行动态模拟。

2.2.3 模拟结果与讨论

稳态模拟结果与国外成熟模拟软件 EFOR、GPS-X、SMBa 和 WEST^[6] 的对比如表 3 所示。晴天条件下 14 d 的动态模拟数据如图 4 所示。

表 3 一维分层模型对二沉池中 SS 浓度分布的模拟结果比较

Table 3 Comparison of simulation results of SS concentration in layers of secondary settling tank (mg/L)

分层数	模拟软件				本文	
	EFOR ^[6]	GPS-X ^[6]	SMBA ^[6]	WEST ^[6]	$D=0$	$D=2.5 \text{ m}^2/\text{d}$
1	12.50	12.50	12.50	12.50	12.59	12.63
2	18.12	18.11	18.11	18.11	18.31	18.35
3	29.54	29.54	29.54	29.54	29.90	30.74
4	68.99	68.98	68.98	68.98	69.64	70.43
5	356.16	356.07	356.07	356.07	355.88	355.77
6	356.16	356.07	356.07	356.07	355.88	355.78
7	356.16	356.07	356.07	356.07	355.88	356.32
8	948.57	356.07	356.07	356.07	355.88	784.58
9	3 275.91	356.07	356.07	356.07	355.88	2 881.97
10	6 396.11	6 393.90	6 393.98	6 393.98	6 389.89	6 387.00

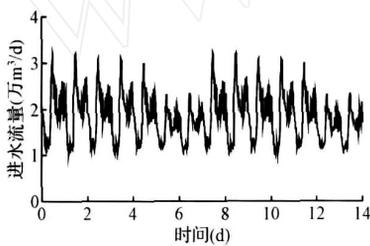


图 3 晴天进水水量变化曲线

Fig 3 Influent flow under dry weather

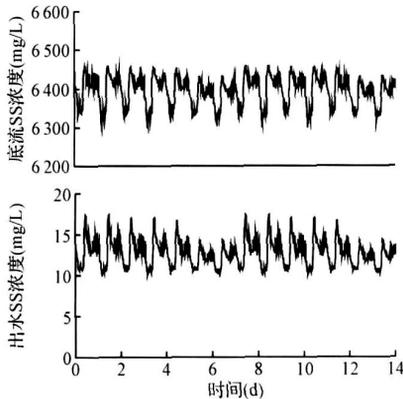


图 4 晴天条件下二沉池运行情况的动态模拟

Fig 4 Dynamic simulation results of secondary settling tank under dry weather

由表 3 可知,当 $D=0$ 时,一维分层弥散模型对 各层 SS 浓度的模拟值与软件 GPS-X、SMBA 和 WEST 的模拟值均十分接近,10 层模拟值的平均标准偏差为 0.45%。当弥散系数 $D=2.5 \text{ m}^2/\text{d}$ 时,弥散模型与 EFOR 软件的模拟结果最为接近,各层 SS 模拟值的平均标准偏差为 4.4%。弥散模型与 EFOR 软件的模拟结果偏差相对较高,特别是在中浓度区,这是因为两者对水力学因素的模拟方式不同造成的。EFOR 软件中采用了动态进水层、短路

流和弥散作用等多种水力学因素^[6],其编程思路与一维分层弥散模型有所不同。比较而言,EFOR 模型对二沉池中水力学因素的考虑更为全面,但需要校核的参数要多于一维分层弥散模型。在本文模型中,弥散作用可理解是对水力学因素的综合和简化,它概括了除了重力沉降、流体传递外一切影响污泥浓度分布的作用,例如湍流扩散、二维或三维的空间扩散、污泥回流过程等^[11]。因此,一维分层弥散模型的校核更为方便,模型也更为实用。

晴天条件下动态模拟结果中的二沉池 X_c 和 X_u 平均值分别为 12.78 mg/L 和 6395.3 mg/L, X_c 平均值与 COST 基准中模拟程序 (Matlab/simulink、FORTRAN) 和软件 (SMBA、GPS-X 和 WEST) 的模拟 X_c 平均值 13 mg/L 相比,两者相差不大 (相对偏差为 1.7%)。因此,无论是稳态模拟还是动态模拟,一维分层弥散模型的模拟结果与目前国际主流模拟软件相差不大。

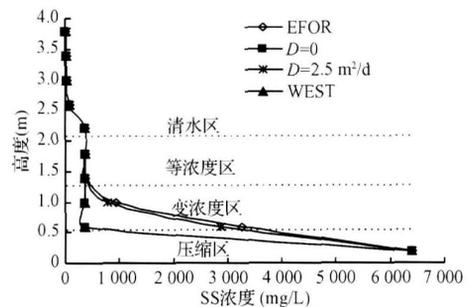


图 5 不同模型对二沉池中 SS 浓度曲线的模拟

Fig 5 Simulation results of SS profiles in secondary settling tank by different models

与理想一维分层模型相比,弥散项的加入更能准确反映二沉池中 SS 浓度的分布规律。众所周知,在二沉池的连续沉降过程中,通常会出现清水区、等浓度区、变浓度区和压缩区 4 个区^[1, 13, 14]。而由表

3和图 5可见,对比不考虑($D=0$, WEST)和考虑水力学因素的模拟结果,虽然 2种情况下模型对 X_c 和 X_u 模拟结果相差不大,但前者的 SS浓度模拟曲线压缩区完全集中于最后一层,在等浓度区和压缩区之间缺乏合理的连续性过渡,模拟结果无法正确反映二沉池的运行状态。在图 2对中试试验实测数据的模拟也存在类似的情况,理想分层模型对二沉池压缩区高度和污泥总量的估计明显偏低。

二沉池一维分层弥散模型将在以下几个方面推动二沉池运行状况模拟的深入研究:

(1) 对于二沉池运行中的重要参数污泥层高度或者压缩层高度^[1,15]而言,压缩区始终处于最后一层显然无法正确反映污泥层高度随进水流量或固体通量变化而变化的现象^[16],而弥散项的加入则能很好地模拟污泥层高度的变化^[17];

(2) 对反硝化或者释磷明显的二沉池^[10],如果在模型中加入生化反应项且希望保持较低的计算量,合理简化模型的一个方法就是使反应只发生在浓度较高的变浓度区和压缩区,此时理想分层模型的模拟结果可能会由于低估反应区体积而产生偏差;

(3) 在活性污泥系统中,二沉池通过污泥储存能够有效缓冲过高的水力负荷或 SVI对系统的冲击^[18],因此二沉池中的污泥总量也是衡量系统抗干扰能力的一个重要指标,基于理想分层模型的计算会明显低估整个活性污泥系统的抗冲击负荷能力。

3 结 论

(1) 基于二沉池一维分层模型思想和分层微元的质量平衡方程,导出了二沉池一维分层弥散模型,并通过离散化数值求解开发了二沉池模拟程序。

(2) 利用中试试验数据验证了模型的实用性和可靠性。结果表明,与理想一维分层模型相比,弥散模型在准确模拟关键指标 X_c 和 X_u 的前提下,能够更好地模拟实际二沉池中的 SS浓度分布。

(3) 利用 COST 624/682控制模拟平台中的基准污水处理厂二沉池晴天数据对开发模拟程序与国外成熟模拟软件的模拟结果的对比表明,该模型能够达到国外成熟模拟软件的模拟精度,将有助于推动对二沉池模型在污泥层高度控制、生化反应模拟和活性污泥系统抗干扰能力评估等方面的应用研究。

参 考 文 献

[1] Ekama G A., Bamard J. L., Gunthert F W., *et al* Secondary settling tanks: Theory, modeling, design and opera-

tion London: AWQ Scientific and Technical Report, No 6, AWQ, 1997

- [2] 李振亮,张代钧,卢培利,等.二沉池一维动态模型的研究进展.水资源保护,2005,21(6): 27~30, 48
- [3] Ekama G A., Marais P. Assessing the applicability of the 1D flux theory to full-scale secondary settling tank design with a 2D hydrodynamic model Water Res, 2004, 38(3): 495~506
- [4] Giokas D. L., Kim Y., Paraskevas P. A., *et al* A simple empirical model for activated sludge thickening in secondary clarifiers Water Res, 2002, 36(12): 3245~3252
- [5] Jeppsson U., Diehl S. An evaluation of a dynamic model of the secondary clarifier Water Sci Technol, 1996, 34(5~6): 19~26
- [6] Copp J. B. The COST simulation benchmark: Description and simulator manual Luxembourg: Office for Official Publication of the European Community, 2002
- [7] 张代钧,李振亮,张天,等.基于质量守恒的二沉池一维通量模型.中国环境科学,2006,26(Suppl): 40~44
- [8] 蒋卫刚,顾国维,俞国平.二沉池动态仿真模型研究.环境工程学报,2007,1(3): 21~24
- [9] 张代钧,李振亮,卢培利,等.活性污泥过程反应池与二沉池耦合模型与模拟.中国环境科学,2007,27(2): 155~159
- [10] Chavan P. V. The influence of denitrification in clarifiers on biological phosphorus removal at CCST plant Master Dissertation, University of Nevada, Las Vegas, the USA, 2003
- [11] Hamilton J., Jain R., Antoniou P., *et al* Modeling and pilot-scale experimental verification for predenitrification process J. Environ Engng, 1992, 118(1): 38~55
- [12] Takács I., Patry G G., Nolasco D. A dynamic model of the clarification-thickening process Water Res, 1991, 25(10): 1263~1271
- [13] 冯鲁铭.二次沉淀池设计理论与运行工况的研究.上海:同济大学博士毕业论文,1986
- [14] 许保玖,龙腾锐.当代给水与废水处理原理.北京:高等教育出版社,2000
- [15] Ma Y., Peng Y. Z., Wang S. Y. New automatic control strategies for sludge recycling and wastage for the optimum operation of predenitrification processes J. Chem. Tech Biotech, 2006, 81(1): 41~47
- [16] Liu Y. C., Fan L., Shi H. C., *et al* Simulation and control strategy for the variational influent of WWTP. J. Environ Sci, 2006, 18(1): 62~68
- [17] Joannis C., Aumond M., Dauphin S., *et al* Modeling activated sludge mass transfer in a treatment plant Water Sci Tech, 1999, 39(4): 29~36
- [18] Kim Y., Pipes W. O. Factors influencing suspended solids concentrations in activated sludge settling tanks J. Haz Mater, 1999, 67(1): 95~109