

运行与管理

采用 TUD 模型动态模拟倒置 A^2/O 工艺运行工况

郝晓地¹, 宋虹苇^{1,2}, 胡沅胜¹, 郝二成³, 周 军³, 甘一萍³, 王洪臣³

(1. 北京建筑工程学院 可持续环境生物技术研发中心, 北京 100044; 2. 内蒙古工业大学
土木工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 北京城市排水集团有限公司, 北京 100063)

摘 要: 在进行动态模拟前, 首先对3组现场检测的水质、水量数据进行物料平衡检查, 目的是校核实测数据的准确度。通过物料平衡分析发现, 只有2组数据的物料平衡准确度合格, 另外1组为无效数据。利用静态模拟建立并校正过的工艺模型对2组有效数据进行动态水质模拟, 发现预测结果与实测值的吻合度至少为80%~90%。在此基础上, 对典型水量日变化曲线(24 h)下的动态进水负荷进行模拟以预测出水水质的变化趋势, 揭示动态负荷下出水水质的变化规律以及保持良好水质所应采取的运行对策。动态模拟结果具有较高吻合度这一事实表明, 数学模拟技术完全可用于我国污水处理厂运行问题诊断以及运行优化方案的制定与实施。

关键词: 污水处理; 倒置 A^2/O 工艺; TUD 模型; 动态模拟; 物料平衡检查; 数据吻合度

中图分类号: X703.1 文献标识码: C 文章编号: 1000-4602(2007)16-0085-05

Dynamic Simulation of Reversed A^2/O Process by TUD Model

HAO Xiao-di¹, SONG Hong-wei^{1,2}, HU Yuan-sheng¹, HAO Er-cheng³,
ZHOU Jun³, GAN Yi-ping³, WANG Hong-chen³

(1. R & D Center for Sustainable Environmental Biotechnology, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 3. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100063, China)

Abstract: Before dynamic simulation, three sets of measured on-site data on both water quantity and water quality were checked for mass balance with the purpose of accuracy calibration of measured data. The mass balance indicates that only two sets of measured data are effective in accuracy. With an established process model and validated model parameters, the dynamic simulation of the effective data shows a coincidence of at least 80% to 90% between predicted and measured data. Further dynamic influent loading rate simulation under typical daily variation for the effluent quality change reveals an effluent quality trend and a corresponding operational mode. The dynamic simulation with the high coincidence implies that the simulation technique can be reliably applied into trouble-shooting and optimization of WWTPs in China.

Key words: wastewater treatment; reversed A^2/O process; TUD model; dynamic simulation; checking mass balance; data coincidence

目前国际上流行的活性污泥数学模型(ASMs系列或TUD等^[1-5])及其缺省值借助许多科研与商业软件完全可以用于对我国污水处理厂的运行工况进行模拟^[6]。用模型进行较为准确模拟的关键是对进水水质(COD)实施特征化分析,这是模型中将有有机物组分门别类加以区分的缘故^[7,8]。

为了演示国外模型及缺省值能够应用于我国的污水处理实践,先期已对北京某大型市政污水处理厂倒置A²/O工艺进行了数学模拟;仅在修正个别组分参数和动力学参数的前提下便获得了模拟预测与实测结果吻合度极高的模拟效果^[6]。事实上,采用适当的水质分析方法将COD组分加以区分后,较为准确的模拟便可以实现,这是模型应用唯一也是十分关键的步骤。有关水质特征化方法,借助于国外的经验和方法,亦探索出了一套适合我国污水处理厂采用的简单、有效的方法,为模型应用奠定了试验基础^[8]。

针对北京某大型市政污水处理厂倒置A²/O工艺进行初步模拟是以平均水量、水质为基础的,即所谓的静态模拟。而在实际运行中工程技术和运行管理人员更为关注的是在变化的水质、水量情况下能否实现动态模拟预测。在静态模拟以及水质特征化分析的基础上,对北京某大型市政污水处理厂倒置A²/O工艺进行动态模拟,以演示国外模型在动态模拟方面的有效性和准确性。

1 物料平衡分析

1.1 物料平衡方程

2005年4月11日—22日、5月25日—6月3日及8月2日—12日进行了3次现场集中监测,收集了详细的动态实测数据,目的在于进行物料平衡检查,以采用准确的数据进行模拟运算。这些现场实测数据包括工艺设计数据、运行参数及水质监测数据等。物料平衡以图1显示的水和固体物料流向为准,其中也包括因反硝化脱氮造成的氮逃逸量。

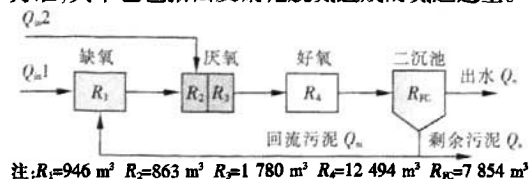


图1 倒置A²/O工艺物料平衡示意图

Fig. 1 Flow chart of mass balance of reversed A²/O process

物料平衡包括以下几部分内容^[9]。

① 水量平衡

对于整个系统,进、出水水量应该平衡(忽略水的蒸发量),即:

$$Q_i = Q_e + Q_r \quad (1)$$

式中 Q_i ——生物处理系统的进水量,即初沉池出水量, m³/d, $Q_i = Q_{in1} + Q_{in2}$

Q_e ——二沉池出水量, m³/d

Q_r ——剩余污泥量, m³/d

② 磷平衡

磷的物料平衡比较容易确定,磷在整个系统中的进口只有1个,即 Q_i 中的总磷(P_i)。出口有2个:一个是出水 Q_e 中的总磷(P_e),另一个则是排放的剩余污泥 Q_r 中所含的磷(P_r)。

磷的物料平衡方程为:

$$P_i = P_e + P_r \quad (2)$$

③ 氮平衡

氮的物料平衡方程较为复杂,在整个系统中氮的进口就是 Q_i 中的总氮(N_i);出口除包括 Q_e 中的总氮(N_e)和 Q_r 中的总氮(N_r)外,还存在因反硝化脱氮的逃逸部分(N_d)。

氮平衡方程如下:

$$N_i = N_e + N_r + N_d \quad (3)$$

由于反硝化反应产生的 N_2 逃逸量难以测定,使式(3)因数据缺乏而不能直接实现总氮平衡检查。为此,采用凯氏氮(TKN)的平衡方程来替代式(3)中的总氮。TKN在系统中的进口就是 Q_i 中的TKN(N_{ki}),出口包括 Q_e 中的TKN(N_{ke})和 Q_r 中的氮(N_{kr}),还有TKN在系统中的变化,即被硝化了的TKN(N_n),如下式所示:

$$N_{ki} = N_{ke} + N_{kr} + N_n \quad (4)$$

因实际进水中的硝酸氮含量极低,所以进水中TN与TKN通常可看作相等,即 $N_i \approx N_{ki}$ 。

④ 有机物平衡

有机物(COD)的物料平衡较为复杂,其平衡方程如下:

$$COD_i = COD_e + (OUR - 4.57 \times N_n) + (N_d \times 2.86) + (Q_s \times G_{s,org} \times 1.42) \quad (5)$$

式中 OUR——耗氧速率, kgO₂/d, 由于OUR中包括硝化需氧量,而方程中只计量碳化需氧量,故应减去硝化(N_n)需氧量

4.57——硝化需氧量计算中的转换系数, kg-

COD/kgN

2.86——COD反硝化时的还原当量(1 kg-

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 相当于 2.86 kg O_2), 因为反硝化时虽不消耗 O_2 (以 NO_3^- 为电子接受体) 但氧化 COD

1.42——VSS与COD间的转化系数, kg-

COD/kgVSS

 $G_{s,org}$ ——剩余污泥中 VSS, kgVSS/ m^3 Q_s ——剩余污泥量, m^3/d

⑤ 曝气池 SS 平衡及 SRT 校核

曝气池(不包括二沉池)中的干物质 SS [$G_s \times (Q_i + Q_n)$] 一部分来源于进水中的 SS ($Q_i \times G_i$), 另一部分来源于回流污泥 ($Q_n \times G_n$), 其物料平衡方程为:

$$G_s \times (Q_i + Q_n) = (Q_n \times G_n) + (Q_i \times G_i) \quad (6)$$

式中 G_s ——曝气池中的 MLSS, kgMLSS/ m^3 Q_n ——回流污泥量, m^3/d G_n ——回流污泥中的 MLSS, kgMLSS/ m^3 G_i ——曝气池进水中的 MLSS, kgMLSS/ m^3

另外, 可通过上式校核 Q_i 或 Q_n , 即把其中某一项作为未知量求出, 和实测值进行对比。在已知剩余污泥量的情况下, 还应该对 SRT 进行校核, 以保证模拟工况的准确性, 由下式计算:

$$Q_s = G_s \times V_s / (G_n \times \text{SRT}) - G_s \times Q_s / G_n \quad (7)$$

1.2 物料平衡检查

根据现场强化监测数据, 按上述物料平衡方程进行物料平衡检查, 在确保数据准确的基础上, 将其输入模型, 进行动态模拟。

① 4月11日—22日检测数据

a. 磷平衡

$$P_i = P_e + P_s$$

$$P_i = Q_i \times \text{TP}_{in} = 39\,255 \times 4.65 = 182\,536 \text{ g/d}$$

$$P_e + P_s = Q_e \times \text{TP}_{eff} + Q_s \times \text{TP}_s = 38\,081 \times 2.5 + 1\,174 \times 60 = 165\,643 \text{ g/d}$$

据此计算得出物料平衡率为 90.7%。

b. 氮平衡

$$N_i = N_e + N_s + N_d$$

$$N_{ki} = N_{ke} + N_{ks} + N_{kd}$$

$$N_{ki} = Q_i \times \text{TKN}_i = 39\,255 \times 48.2 = 1\,892\,091 \text{ g/d}$$

$$N_{ke} + N_{ks} + N_{kd} = Q_e \times \text{TKN}_e + Q_s \times \text{TKN}_s + Q_d \times \text{TKN}_d$$

$$\text{NO}_x = 25.5 \times 38\,081 + 250 \times$$

$$1\,174 + 11 \times 38\,081 =$$

$$1\,683\,457 \text{ g/d}$$

$$N_{ki} \approx N_i$$

$$N_d = N_{ki} - N_e - N_s = 48.2 \times 39\,255 - 250 \times 1\,174 - 38\,081 \times 33.4 = 326\,686 \text{ g/d}$$

据此计算得出物料平衡率为 89.0%。

c. 有机物平衡

$$\text{COD}_i = \text{COD}_e + (\text{OUR} - 4.57 \times N_n) + (N_d \times 2.86) + (Q_s \times G_{s,org} \times 1.42)$$

$$\text{COD}_i = Q_i \times \text{COD}_{in} = 210 \times 39\,255 = 8\,243\,550 \text{ g/d}$$

$$\text{COD}_e + \text{OUR} - 4.57 \times N_n + N_d \times 2.86 + Q_s \times G_{s,org} \times 1.42 = 39.7 \times 38\,081 + 3\,998\,938 - 4.57 \times 38\,081 \times 11 + 2.86 \times 326\,686 + 1\,174 \times 1\,541 \times 1.42 = 7\,099\,714 \text{ g/d}$$

其中, OUR 通过鼓风曝气量 ($9.5 \text{ m}^3/\text{s}$) 及曝气效率 (8%) 计算得出:

$$\text{OUR} = 9.5 \times 3\,600 \times 24 \times 0.29 \times 1\,000 \times 0.21 \times 8\% = 3\,998\,938 \text{ kg/d}$$

据此计算得出物料平衡率为 86.1%。

d. SS 平衡

$$G_s \times (Q_i + Q_n) = (Q_n \times G_n) + (Q_i \times G_i)$$

$$G_s \times (Q_i + Q_n) = 1\,234 \times (39\,255 + 40\,496) = 98\,412\,734 \text{ g/d}$$

$$Q_n \times G_n + Q_i \times G_i = 40\,496 \times 2\,090 + 39\,255 \times 85 = 87\,973\,315 \text{ g/d}$$

据此计算得出物料平衡率为 89.4%。

e. SRT 校核 (应保证 95% 左右的准确度)

$$Q_s = G_s \times V_s / (G_n \times \text{SRT}) - G_s \times Q_s / G_n$$

$$Q_s = 1\,174 \text{ m}^3/\text{d}, V_s = 16\,083 \text{ m}^3,$$

$$G_s = 1\,234 \text{ g/m}^3, G_n = 2\,090 \text{ g/m}^3$$

$$Q_e = 38\,081 \text{ m}^3, G_e = 10.5 \text{ g/m}^3$$

$$1\,174 = 1\,234 \times 16\,083 / (2\,090 \times \text{SRT}) - 10.5 \times 38\,081 / 2\,090$$

计算得 $\text{SRT} = 6.96 \text{ d}$, 准确度为 98%。

② 8月2日—12日检测数据

同理, 对 8月2日—12日检测数据进行物料平衡检查后得出 P、N、COD、SS 的物料平衡率分别为 99%、94.5%、81.4% 和 87.8% ($\text{SRT} = 6.35 \text{ d}$, 准确度为 94.5%)。

由于 5月25日—6月3日检测数据的物料平衡率太低, SRT 准确率 < 90%, 所以视为无效数据。

2 动态模拟

经过以上数据物料平衡分析,采用4月11日—22日与8月2日—12日两组数据对倒置A²/O工艺进行动态模拟。图2、3分别显示了利用静态模拟中建立并校正的工艺模型对4月11日—22日和8月2日—12日两组运行数据所做的动态模拟结果。

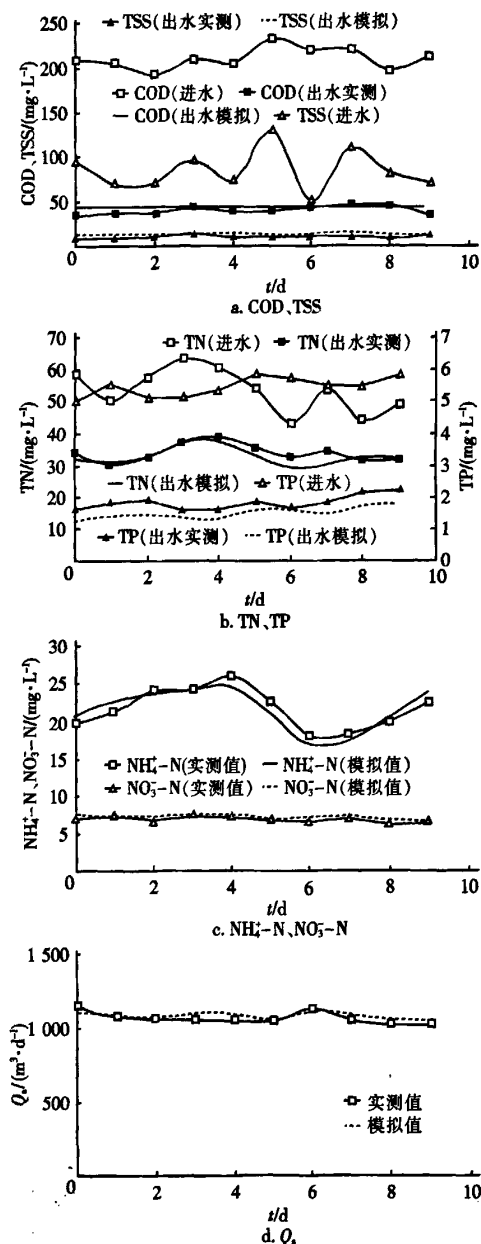


图2 4月11日—22日动态模拟结果

Fig. 2 Dynamically simulated results for data on April 11-22, 2005

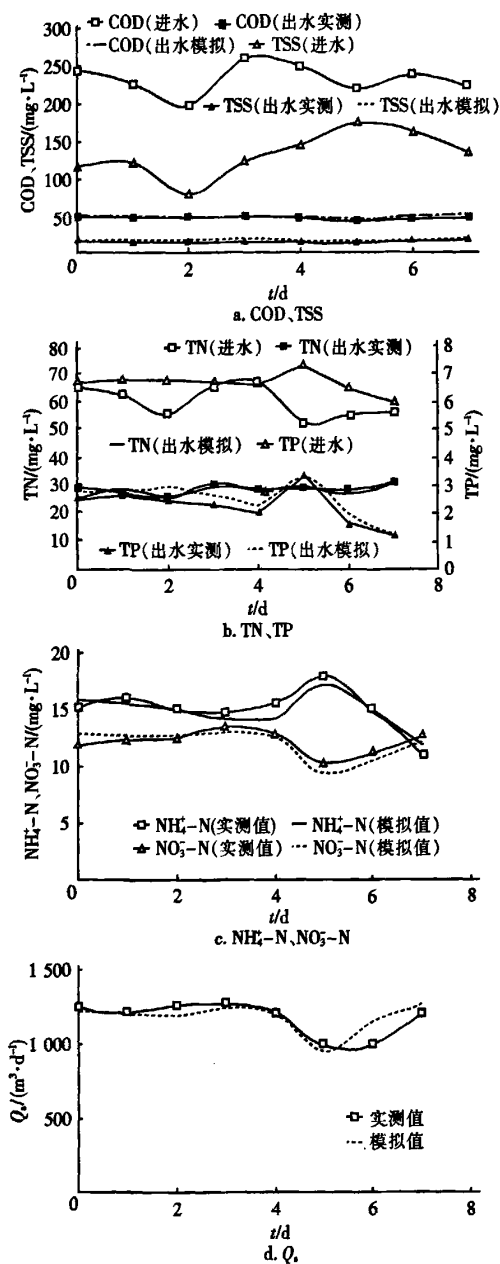


图3 8月2日—12日动态模拟结果

Fig. 3 Dynamically simulated results for data on August 2-12, 2005

图2、3显示,两次动态模拟结果与实测数据均具有较好的吻合性,无论是出水COD、TSS、TN、TP还是剩余污泥量 Q_r 、出水 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 等都与实际运行结果几近一致,因此不需要再对静态模拟中校正的工艺模型参数作调整。另外,有了上述动态模拟准确性的基础,可以对变化水量情况下的

工况进行模拟预测。

3 24 h水量、水质监测试验

现场进行了24 h水量、水质强化监测(周期为10 d),并将10 d内对应时刻的数据平均后得到的典型日的水量、水质变化数据输入AQUASIM工艺模型,对24 h内出水水质进行模拟预测,结果如图4所示。

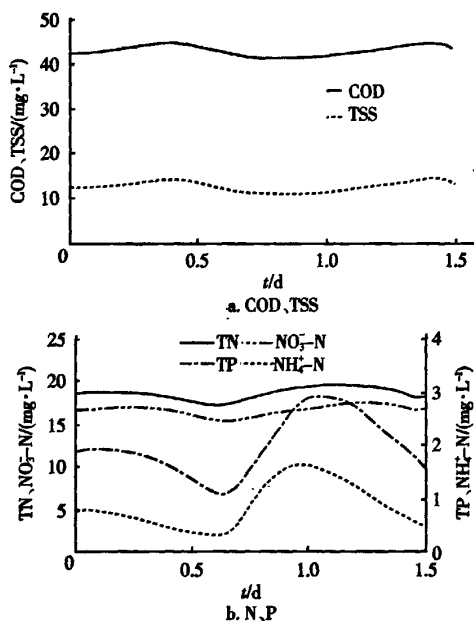


图4 24 h动态进水情况下的出水水质模拟预测

Fig. 4 Dynamically simulated effluent for 24 h influent variation

图4a显示,24 h内出水COD与TSS变化相对平稳,出水COD保持在40~45 mg/L,出水TSS为11~15 mg/L。图4b显示,出水TN与NO₃⁻-N的变化也较为平缓,出水TN在17~20 mg/L内波动,出水NO₃⁻-N在15~17 mg/L内变化。但是,出水NH₄⁺-N与TP变化幅度较大,出水NH₄⁺-N在0~10 mg/L之间波动,出水TP介于1~3 mg/L。此外,从出水TN、NH₄⁺-N、TP及NO₃⁻-N的谷值出现在0.64 d看,基本上与实测进水谷值出现时刻相对应。出水水质的峰值基本都出现在凌晨左右,也与实测进水峰值出现时刻较为相符。这些模拟结果说明,在24 h内出水水质变化主要受进水量变化影响,所以在运行控制中应根据对进水量的在线监测及时采取相应的技术措施。

4 结语

通过对现场监测数据进行物料平衡分析,在物料平衡率缺失10%左右的情况下,动态模拟结果与实际监测结果仍具有良好的吻合性。这一方面说明静态模拟中对个别组分参数及动力学参数校正后可以满足动态模拟的需要,而且所建立的水质特征化方法与确定的COD组分参数是正确和准确的;另一方面,动态模拟与实际检测结果的吻合度可达80%~90%这一事实,足以说明数学模拟技术完全可以用于我国污水处理厂运行问题诊断以及运行优化方案的制定与实施。

参考文献:

- [1] Henze M, Grady C P L Jr, Gujer W, *et al.* Activated Sludge Model No. 1 [A]. IAWPRC Scientific and Technical Report No. 1 [C]. London: IAWPRC, 1987.
- [2] Henze M, Gujer W, Mino T, *et al.* Activated Sludge Model No. 2 [A]. IAWPRC Scientific and Technical Report No. 3 [C]. London: IAWQ, 1995.
- [3] Henze M, Gujer W, Mino T, *et al.* Activated Sludge Model No. 2d, ASM2d [J]. Water Sci Technol, 1999, 39(1): 165-182.
- [4] Gujer W, Henze M, Mino T, *et al.* Activated sludge model No. 3 [J]. Water Sci Technol, 1999, 39(1): 183-193.
- [5] Murnleitner E, Kuba T, van Loosdrecht M C M, *et al.* An integrated metabolic model for the aerobic and denitrifying biological phosphorous removal [J]. Biotechnol Bioeng, 1997, 54(5): 434-450.
- [6] 郝晓地,宋虹苇,胡沅胜,等. 采用TUD联合模型模拟倒置A²/O工艺的运行工况[J]. 中国给水排水, 2007, 23(5): 1-4.
- [7] Roelleveld P J, van Loosdrecht M C M. Experiences with guidelines for wastewater characterization in the Netherlands [J]. Water Sci Technol, 2002, 45(6): 77-87.
- [8] 郝晓地,宋虹苇,胡沅胜,等. 数学模型应用中的关键步骤——污水水质(COD)特征化方法[J]. 中国给水排水, 2007, 23(13): 7-10.
- [9] Meijer S C F. Theoretical and practical aspects of modeling activated sludge processes [M]. Delft, the Netherlands: Delft University of Technology, 2004.

电话: (010)68322128

E-mail: haoxiaodi@bicea.edu.cn

收稿日期: 2007-03-21