

技术总结

ODSS软件对城市污水处理厂运行的模拟优化

沈 勇¹, 汪诚文¹, 施汉昌¹, 张发鹏²

(1. 清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 清华同方水务工程公司, 北京 100083)

摘 要: 利用基于污水处理模型的智能软件——城市污水处理厂运行决策支持系统(ODSS),对哈尔滨太平污水处理厂冬季运行情况进行了定量模拟优化,确定了好氧段水力停留时间和剩余污泥排放量,并对不同进水水质情况下的内回流比、污泥回流比和溶解氧浓度进行了模拟。结果显示,过渡段曝气长度宜控制在过渡段全长的 80%左右,剩余污泥排放量宜控制在 2 000 m³/d 左右;对污泥回流比、内回流比和溶解氧浓度的控制可根据进水污染物浓度选取能源利用率最高的方案。

关键词: 运行决策支持系统; 城市污水处理厂; 模拟优化

中图分类号: X703 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000 - 4602(2007)23 - 0046 - 05

Simulation and Optimization of WWTP Based on Operation Decision Support System

SHEN Yong¹, WANG Chengwen¹, SHI Han-chang¹, ZHANG Fa-peng²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Tsinghua Tongfang Water Work Engineering Corporation, Beijing 100083, China)

Abstract: The quantitative simulation and optimization of operation of the Harbin Taiping WWTP in winter were carried out by using the intelligent software based on the wastewater treatment model, namely operation decision support system (ODSS) for municipal WWTP. The optimal aerobic HRT and discharge rate of excess sludge are determined, and the internal reflux ratio, sludge reflux ratio and DO concentration under different influent qualities were simulated. The results show that the aeration length of the transition stage should be limited to 80% of the total transition length. The discharge rate of excess sludge should be controlled at around 2 000 m³/d. As for the control of sludge reflux ratio, internal reflux ratio and DO concentration, a scheme achieving maximum energy utilization rate should be selected according to the influent pollutant concentration.

Key words: operation decision support system; municipal WWTP; simulation and optimization

在城市污水处理厂的运行过程中,往往会出现处理效果欠佳、运行费用较高等问题,这主要是由污水处理过程的复杂性和管理环节的薄弱造成的。目前,国内污水处理厂的操作管理相当粗放,造成了很大的浪费,而污水处理模型软件的出现,使得对污水处理厂更为精细的操作管理成为可能,通过软件的

模拟计算,可得到操作管理与出水水质之间的定量关系。笔者利用城市污水处理厂运行决策支持系统对哈尔滨太平污水处理厂的操作管理进行了优化。

1 研究背景

城市污水处理厂运行决策支持系统(Operation Decision Support System, ODSS)是清华大学环境科

学与工程系的研究人员开发、编制的一种废水生物处理汉化模拟软件。自 1993年开始编制以来,已经对该软件进行了多次改进(现已是第三版),目前该软件已具备成熟的理论和应用基础。ODSS的模拟系统以国际水协会(WA)活性污泥模型(ASM1、ASM2、ASM2D和ASM3)及二沉池模型为基础模型,可以对不同工艺的污水处理过程进行静态或动态模拟。

太平污水处理厂是哈尔滨市沿江生活污水截流及处理工程中的重要部分,该厂于 2005年 10月开始运行,实际处理水量约为 $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用倒置AO工艺,考虑脱氮但不考虑除磷要求;剩余污泥经浓缩、脱水处理后外运处置。该厂的污水处理工艺流程如图 1所示。

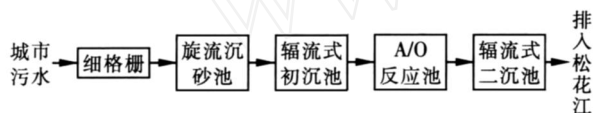


图 1 太平污水处理厂工艺流程

Fig 1 Process flow in Harbin Taiping WWT

笔者拟采用 ODSS系统指导哈尔滨太平污水处理厂的冬季运行管理,以期达到优化运行参数、保证出水水质、降低处理成本的目的。

2 过程与方法

为了使模型能够正确反映生物处理装置中微生物的状态及各装置的动力学状态,首先需要对模型参数进行调整校正^[1],使软件模拟的出水水质与实际出水水质相符,随后才能对各种操作进行优化。对水力停留时间和排泥量的优化采用控制单个操作变量的方法,对污泥回流比、内回流比和 DO 浓度的控制则是考察这几个变量共同作用时对污水处理效果的影响。优化顺序依次为好氧段水力停留时间优化和剩余污泥排放量优化,以前面步骤的优化结果作为后面优化操作的前提;然后,于不同进水条件下,采用不同的内回流比、污泥回流比和曝气段溶解氧浓度分别进行模拟,得出随进水条件变化而变动的控制策略。优化过程如图 2所示。

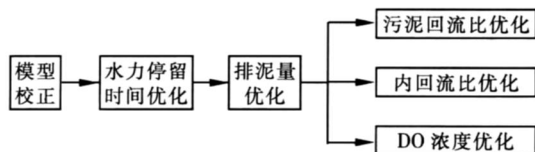


图 2 优化过程

Fig 2 Optimization process

3 结果与分析

3.1 模型校正

ODSS系统中可选的活性污泥模型有 ASM1、ASM2、ASM2D和ASM3,笔者以ASM2D为基础模型对污水处理厂的运行情况进行模拟。通过对污水处理厂进水水质的短期跟踪测试,以及对部分模型组分的测试,调试模型参数,使模型模拟出水水质与实际出水水质相吻合。模拟结果如图 3所示。

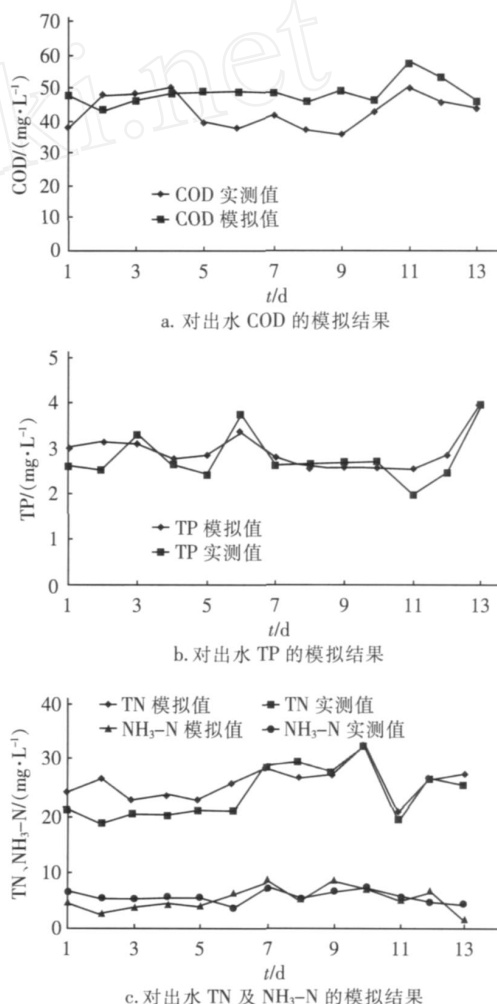


图 3 ODSS 模拟值与实测值的对比

Fig 3 Comparison between simulated value and measured value

由图 3可以看出,ODSS系统对 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN、TP的模拟值与污水处理厂的实测值基本相符。COD模拟值与实测值之间的最大相对误差基本在 30%之内; $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TN 和 TP的模拟值与实测值非常接近且变化趋势基本一致。可以认为模型软件经过校正后,基本可以正确反映实际污水处理厂生物

处理单元中的微生物状态以及各单元的动力学状态。

3.2 水力停留时间的优化

太平污水处理厂的 AO 池分为五段:第一段为缺氧段,设置推流装置;第二段为过渡段,设有曝气装置和推流装置;第三、四、五段为好氧段,设置曝气装置。过渡段可根据具体情况进行调整。此次模拟即对过渡段的运行进行优化,分别在过渡段全段曝气(污水处理厂原运行工况)、过渡段 80%长度段进行曝气、过渡段 60%长度段进行曝气的情况下进行模拟,模拟出水水质如图 4 所示。由图 4 可以看出,调整过渡段的曝气状况,对出水 COD 和 TN 的影响不明显,但对出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的影响很大,随着缺氧段长度的增加、曝气段长度的减少,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度不断升高, $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度不断下降,这主要是由于硝化段的水力停留时间减小所致。

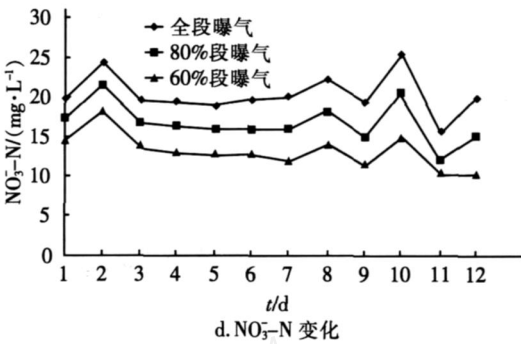
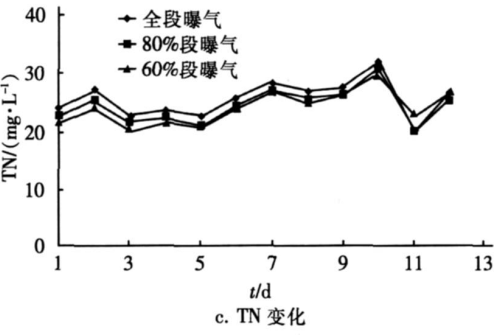
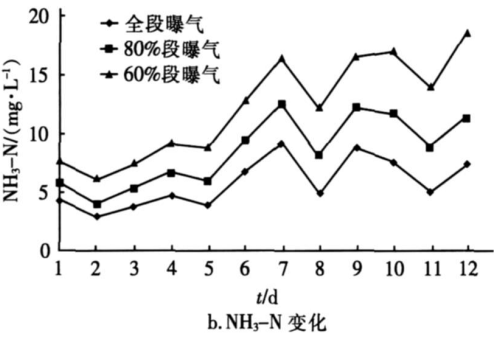
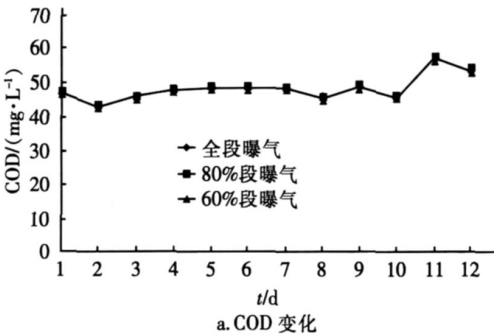


图 4 调整过渡段曝气状况的模拟结果

Fig 4 Simulated result by adjusting aeration status of transition stage

增加缺氧段的水力停留时间,可以减小曝气总量,从而实现节能。而出水氨氮浓度的上升可以通过调整曝气强度来解决。从氨氮浓度的变化曲线来看,缺氧段水力停留时间增加 40%时,出水氨氮浓度较高,考虑到污水处理厂应对氨氮浓度的变化具有一定的抗冲击能力,而且此时溶解氧浓度尚未优化,确定采用增加 20%的缺氧段长度的优化措施,这样既能保证较低的出水氨氮浓度,又能节省一定的曝气量。

3.3 排泥量的优化

排泥量对曝气池内的污泥浓度影响极大,由于该 AO 工艺中不考虑除磷问题,因此可将反应池内的污泥浓度控制在一个较高的水平^[2],即采用较长的污泥龄以确保反应池内有足够的硝化菌,从而保证脱氮效果。但当排泥量过小时,会使污泥浓度过高,污泥活性变差,从而影响二沉池的沉淀效果,导致出水水质欠佳。为了对太平污水处理厂的排泥量进行优化,分别选取排泥量为 1 200、1 600、2 000、2 400、2 800 m³/d 进行模拟,比较出水水质,结果如表 1 所示。

表 1 不同排泥量下的出水水质模拟结果

Tab 1 Simulated result of effluent quality at different discharge rates of excess sludge

排泥量 (m ³ · d ⁻¹)	出水 COD /(mg ·L ⁻¹)	出水 NH ₃ -N (mg ·L ⁻¹)	出水 TN (mg ·L ⁻¹)	出水 TP (mg ·L ⁻¹)	污泥浓度 /(mg ·L ⁻¹)	污泥龄/d
1 200	101.54	6.71	24.57	2.76	4 665.37	22.01
1 600	85.90	7.30	24.76	2.63	4 635.02	20.55
2 000	48.47	7.43	24.80	2.60	4 612.79	23.05
2 400	47.76	8.22	24.83	2.64	4 229.79	19.83
2 800	47.72	10.01	25.44	2.14	3 908.36	15.83

注：出水水质数据均为平均值。

由表 1 可见,当排泥量为 1 200、1 600 m³/d 时,出水 COD 较高,二沉池的沉降效果受到影响。随着排泥量的增加,反应器内污泥浓度逐渐下降,出水氨氮浓度逐渐升高,但系统对总磷的去除效果有所改善。由表 1 中的各组数据可以确定,排泥量控制在 2 000 m³/d 左右较为适宜。

3.4 内回流比、污泥回流比和溶解氧浓度的优化

污水处理厂的时变性特点(进水水质和水量会随时间变化)要求水厂的控制操作应根据进水的变化而做出相应的调整^[3]。对于污水处理厂而言,水力停留时间和剩余污泥排放量的控制是一个比较长期的控制策略,这些操作的变动无法收到立竿见影的效果;相对而言,对内回流比、污泥回流比以及溶解氧的控制却可以立即影响到污水处理厂的处理效果。因此,有必要根据进水条件对这些操作进行优化模拟。

在相同进水流量(25 × 10⁴ m³/d)、不同进水污染物浓度下,分别选取不同的内回流比、污泥回流比和溶解氧浓度,比较出水水质模拟结果。进水水质指标和控制参数的取值情况如表 2 所示。

表 2 模拟选取操作控制值

Tab 2 Operation conditions in simulation

进水 COD / (mg · L ⁻¹)	进水 NH ₃ - N / (mg · L ⁻¹)	内回流 比 / %	污泥回流 比 / %	DO / (mg · L ⁻¹)
150	35	125	40	1.5
200	40	150	60	2.0
250	45	175	80	2.5
300	50	200		3.0
350	55			3.5

为了评价工艺和控制策略的优劣,Copp 提出了包括出水水质参数、出水超标率及各种能耗的评价指标^[4]。笔者采用 Copp 提出的评价指标对此优化方案进行分析,由于 Copp 是基于欧洲污水处理标准开发的针对 ASM1 模型的评价指标,故此处对其进行一定的修改。

① 水质指数

$$EQ = \frac{1}{T \times 1\,000} \int_{t_0}^T (\beta_1 TSS_t + \beta_2 COD_t + \beta_3 BOD_t + \beta_4 TKN_t + \beta_5 NO_t) Q_e(t) dt \quad (1)$$

式中 β_i ——出水组分在出水水质评价中的权重,

$$\beta_1 = \beta_{TSS} = 2, \beta_2 = \beta_{COD} = 1, \beta_3 = \beta_{BOD} = 2, \beta_4 = \beta_{TKN} = 20, \beta_5 = \beta_{NO} = 20$$

T ——水质指数计算的时间段, $T = 7$ d

Q_e ——出水流量

t_0 ——计算时间的起点

t_f ——计算时间的终点

根据哈尔滨太平污水处理厂的出水排放标准,对式(1)中的出水水质参数权重进行修改,得:

$$EQ = \frac{1}{T \times 1\,000} \int_{t_0}^T (\beta_1 SS_t + \beta_2 COD_t + \beta_3 BOD_t + \beta_4 NH_3 - N_t + \beta_5 TN_t) Q_e(t) dt \quad (2)$$

式中 β_i —— $\beta_1 = \beta_{SS} = 2, \beta_2 = \beta_{COD} = 1, \beta_3 = \beta_{BOD} = 2, \beta_4 = \beta_{NH_3 - N} = 20, \beta_5 = \beta_{TN} = 20$

② 成本指数 (Cost Index, CI)

成本指数 (CI) 的含义是污水处理厂的运行成本,数值越小表示成本越低。

$$CI = [(AE + PE + ME) \cdot UP_{electricity} + P_{sludge} \cdot UP_{sludge}] / Q_{effluent} \quad (3)$$

式中 AE、PE、ME——分别为曝气总耗能、泵耗能和搅拌耗能

P_{sludge} ——剩余污泥产率

$UP_{electricity}$ ——电力单价

UP_{sludge} ——污泥处置单位费用

$Q_{effluent}$ ——出水流量

③ 处理指数 (Treatment Index, TI)

处理指数 (TI) 的含义是单位水量的处理效果,数值越大表示处理能力越强。

$$TI = (EQ_{inlet} - EQ_{effluent}) / EQ_{effluent} \quad (4)$$

式中 EQ_{inlet} ——进水水质指数

$EQ_{effluent}$ ——出水水质指数

④ 单位成本效率 (TI/CI)

用处理指数除以成本指数,就得到单位成本效率,也就是单位费用能够达到的处理效果。数值越大表示单位成本处理效率越高。

在选取控制策略时,为了提高能源利用效率,确定选取原则为:出水 COD < 100 mg/L,出水 NH₃ - N < 15 mg/L,单位成本效率 (TI/CI) 最大。

根据上述原则,可得优化操作结果(见表 3)。

表 3 中所列的结果为在保证出水水质的条件下,单位成本效率最佳的操作方案。若已知污水处理厂的进水流量和水质情况,就可根据进水情况找到相对应的控制策略。

为了能够将表 3 中的控制策略应用到太平污水处理厂,有必要对太平污水处理厂的进水情况进行

统计分析,以合理选取控制时间段。通过对太平污水处理厂进水量及进水氨氮和 COD 浓度连续一周的监测,发现进水存在一定的规律性,综合考虑进水情况及该厂的实际情况,将控制时间段分为 5 段,0: 00—8: 00, 8: 00—14: 00, 14: 00—16: 00, 16: 00—20: 00, 20: 00—24: 00。

表 3 不同进水条件下模拟优化操作结果

Tab 3 Optimized operations under different conditions of influent

进水 COD ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	优化 参数	进水 $\text{NH}_3 - \text{N} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$				
		35	40	45	50	55
150	$Q_R / (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	100 000	150 000	150 000	150 000	150 000
	$Q_r / (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	312 500	312 500	312 500	312 500	312 500
	$\text{DO} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	2	2.5	3	3	2.5
200	$Q_R / (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	100 000	100 000	150 000	150 000	150 000
	$Q_r / (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	375 000	375 000	375 000	312 500	312 500
	$\text{DO} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	2.5	3	2.5	2.5	2.5
250	$Q_R / (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	100 000	100 000	100 000	150 000	150 000
	$Q_r / (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	375 000	375 000	375 000	375 000	312 500
	$\text{DO} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	2.5	3	3	2.5	2.5
300	$Q_R / (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	100 000	100 000	100 000	150 000	150 000
	$Q_r / (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	375 000	375 000	375 000	375 000	375 000
	$\text{DO} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	2.5	3	3	2.5	2.5
350	$Q_R / (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	100 000	100 000	100 000	150 000	150 000
	$Q_r / (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	375 000	375 000	375 000	375 000	375 000
	$\text{DO} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	3	3	3	2.5	2.5
注: Q_R 为污泥回流量, Q_r 为内回流量。						

4 结论和建议

① ODSS软件可对污水处理厂的操作运行进行较为全面的模拟优化,它比试验优化更方便,是提

高污水处理厂运行效率的有效途径之一。
② 采用 ODSS软件对太平污水处理厂的冬季运行进行优化,结果显示,过渡段的曝气长度应控制在过渡段全长的 80%左右,剩余污泥排放量宜控制在 $2\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 左右;对污泥回流比、内回流比和溶解氧浓度的控制可根据进水污染物浓度选取能源利用率最高的方案。
③ 利用 ODSS软件指导污水处理厂运行,对进水数据的要求较高,建议安装适量的在线仪表对进水水质进行定期监测,以适时校正输入软件的进水水质数据。

参考文献:

[1] Henze M, Gujer W, Mino T, et al Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2D and ASM3[M]. London: WA Publishing, 2000.

[2] 王洪臣. 城市污水处理厂运行控制与维护管理[M]. 北京:科学出版社, 1997.

[3] Ohtsuki T, Kawazoe T, Masui T Intelligent control system based on blackboard concept for wastewater treatment processes[J]. Water Sci Technol, 1998, 37 (12): 77 - 85.

[4] Copp J B. The COST Simulation Benchmark: Description and Simulator Manual (a product of COST Action 624 & COST Action 682) [M]. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2002.

E - mail: shenyong00@mails. tsinghua. edu. cn
收稿日期: 2007 - 05 - 18

节约用水 合理用水
防治水污染 保护水资源