

· 治理技术 ·

基于呼吸计量法控制策略的评价基准

高志广, 周 琪, 顾国维

(同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 国际水质协会 (IWA) 在第 11 号科技报告中推出了基于呼吸计量法控制策略的评价基准, 本文详细阐述了该模拟基准所定义的三种布局、IWA 课题组推荐采用的活性污泥数学模型以及模型参数, 介绍了基准定义的进水文件以及对各种控制策略性能指标的计算方法, 说明了模拟基准的应用过程。

关键词: 呼吸计量法; 控制策略; 活性污泥数学模型

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1001-3644(2005)06-0036-04

Brief Introduction to IWA Simulation Benchmark

GAO Zhi-guang, ZHOU Qi, GU Guo-wei

(SKL of Pollution Control & Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The IWA simulation benchmark proposed in Scientific and Technical Report No. 11 is introduced. As a standardized simulation protocol and evaluation procedure, its plant layouts, simulation models and model parameters are comprehensively described. Disturbances to be applied during testing and evaluation criteria for testing the relative effectiveness of simulated strategies are also introduced. At last, the practical aspects of implementing and benchmarking control strategies are mentioned.

Key Words: Respirometry; control strategy; activated sludge model

1 前 言

为保证污水处理过程的正常运转以及出水的质量、降低系统能耗, 需对污水处理过程加以控制。国外, 尤其是北欧、日本、美国、英国等一些国家在 20 世纪 70 与 80 年代就开始污水生化处理过程建模和控制的研究, 发表了大量的研究报道^[1~5], 国内目前也开展了相关研究^[6,7]。呼吸速率指特定实验条件下微生物的耗氧速率, 由于其提供了包括生物活性、废水成分 (如浓度、成分、毒性等) 以及微生物与废水成分之间的反应情况、净化效果等在内的大量信息, 已日益成为活性污泥工艺模拟与运行的有效工具。自 1960 年以来, 呼吸计量法在工艺控制方面越来越受到人们的重视, 已经成为许多控制结构中的重要信息来源。

IWA 的研究小组对呼吸计量法在活性污泥工艺控制领域的发展动态进行了评价, 并于 1998 年发表了 IWA 第 7 号科技报告^[8], 报告总结了有关呼吸速率测定方法的研究状况并对呼吸速率的测定方法进行了系统地分类。此外, 课题组还对多年来应用呼吸计量法的控制策略定性地进行总结, 指出文献记载的许多控制策略并没有在实际生产中使用, 因而也无法对其应用前景做出评价。究其原因, 首先是由于当时模型和模拟技术还没有得到长足的发展, 几乎所有的控制策略都不是基于初步模拟分析基础上的。其次呼吸计量法在进行测定时需要相当多的混合液, 当时进行有关控制策略研究多采用小规模实验室装置, 过大的取样量会破坏装置的正常运行。进行基于呼吸运动的控制研究投入很高但很可能失败。由于风险较大, 自然就没有人建立大规模的实验装置对各种控制策略进行验证和评价, 而验证和评价的空白又增加了该项研究的风险, 因而出现现在的局面。

目前数学模型的各种模拟软件及其强大的计算能

收稿日期: 2005-06-03

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目——城市污水处理系统智能控制理论、方法与技术 (50138010)

作者简介: 高志广 (1978 -), 男, 河北邢台人, 同济大学环境科学与工程学院环境工程专业 2004 级博士研究生。研究方向为水污染控制。

力可被应用于进行各种控制策略的评价，因而有望改善上述被动局面。为此国际水协成立了新的研究组对各种控制策略进行客观评价，并最终提出了 IWA 基于呼吸计量法的控制策略评价基准^[10]。它是一个标准化的模拟协议及评价程序（包括污水处理厂的布局、模拟模型及参数、对测试过程中扰动的详细描述以及模拟策略有效性的评价标准）。不象其他的过程控制基准那样只是为了评价某特定水厂的控制操作，IWA 的模拟基准旨在对过去、现在和将来可能出现的控制策略提供一个无偏的比较平台。

2 工艺布局

与先前 Vonhooren 等人^[9]提出的模拟基准不同，IWA 的模拟基准包括了碳氧化、硝化和反硝化三种工艺布局，每种布局均包含 5 个串联在一起的反应器和一个分层为 10 层的二沉池，以便更好模拟分段进水的情况和二沉池的沉淀过程，其适应面更广。

2.1 碳氧化布局

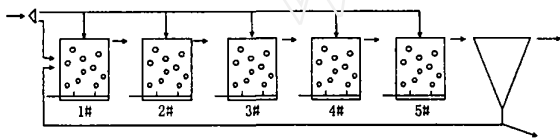


图 1 碳氧化布局示意图

碳氧化布局如图 1 所示，5 个生化反化池均为曝气池，DO 饱和值为 $8.0\text{gO}_2\text{m}^{-3}$ ，二沉池进水口位于底部以上 1.65m 处（即从沉淀池底部算起第六层中部）。各生化反应池体积及沉淀池体积、面积见表 1，流量等参数列于表 2。

表 1 模拟基准工艺布局各反应器物理参数^[10]

	物理参数		
	碳氧化布局	硝化布局	反硝化布局
1 # 池体积 (m ³)	600	1200	1000
2 # 池体积 (m ³)	600	1200	1000
3 # 池体积 (m ³)	600	1200	1333
4 # 池体积 (m ³)	600	1200	1333
5 # 池体积 (m ³)	600	1200	1333
二沉池高度 (m)	3	4	4
二沉池面积 (m ²)	1000	1500	1500
二沉池体积 (m ³)	3000	6000	6000

2.2 硝化布局

硝化布局与碳氧化布局基本类似，沉淀池进水口位于底部以上 2.2m 处（即从沉淀池底部算起第六层中部）。各生化反应池体积、流量等参数列于表 1、表 2。

表 2 模拟基准工艺布局各反应器运行参数^[10]

	流量及 KLa 值		
	碳氧化布局	硝化布局	反硝化布局
进水流量 (m ³ d ⁻¹)	18446	18446	18446
回流量 (m ³ d ⁻¹)	9223	18446	18446
内回流量 (m ³ d ⁻¹)	-	-	55338
排放污泥量 (m ³ d ⁻¹)	385	385	385
1 # 池 KLa 值 (hr ⁻¹)	10	10	-
2 # 池 KLa 值 (hr ⁻¹)	10	10	-
3 # 池 KLa 值 (hr ⁻¹)	10	10	10
4 # 池 KLa 值 (hr ⁻¹)	10	10	10
5 # 池 KLa 值 (hr ⁻¹)	3.5	3.5	3.5

2.3 反硝化布局

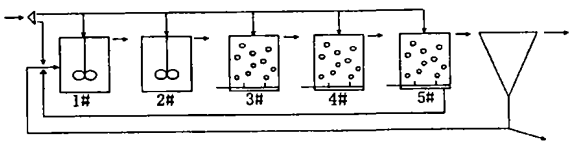


图 2 反硝化布局示意图

反硝化布局如图 2 所示，1 #、2 # 生化反应池完全混合但不曝气，3 #、4 #、5 # 生化反应池充分曝气，DO 饱和值为 $8.0\text{gO}_2\text{m}^{-3}$ ；沉淀池进水口位于底部以上 2.2m 处（即从沉淀池底部算起第六层中部）；该布局具有硝酸盐混合液和污泥回流两个回流系统。各生化反应池体积、流量等参数列于表 1、表 2。

3 过程模拟

为使获得的模拟结果能够得到广泛接受，基准采用了目前国际上广泛接受的活性污泥 1 号数学模型 (ASM1)^[11]和双指数沉降速率模型^[12]。

3.1 生化模型

为保证基准研究应用的一致性，课题组在模拟基准的描述中对 ASM1 中的化学计量参数和反应动力学参数进行了定义，详见表 3、表 4。

表 3 模拟基准中为 ASM 选定的化学计量参数^[10]

参 数	符号	取值	单位
自养菌产率	Y_A	0.24	$\text{g(细胞 COD)} / \text{g(氧化 N)}$
异养菌产率	Y_H	0.67	$\text{g(细胞 COD)} / \text{g(氧化 COD)}$
颗粒性衰减产物的比例	f_p	0.08	-
N 在生物量 COD 中的比例	i_{NB}	0.08	$\text{g(N)} / \text{g(生物量 COD)}$
N 在生物量产物 COD 中的比例	i_{XP}	0.06	$\text{g(N)} / \text{g(内源代谢产物 COD)}$

3.2 沉淀模型

与生化模拟类似，IWA 课题组选择了国际上广泛采用的双指数沉速方程进行沉淀模拟：

$$v_{sj} = v_0 e^{-r_h X_j^*} - v_0 e^{-r_p X_j^*}$$

$$0 \leq v_{sj} \leq v_0', \quad X_j^* = X_j - X_{in}f_{ns}$$

式中: v_{sj} 为沉速 (mday^{-1}), X_{in} 为进入沉淀池的混合液悬浮固体溶度 (gm^{-3}), X_j 为第 j 层悬浮固体溶度 (gm^{-3})。基准沉淀模型采用的其他参数见表 5。

表 4 模拟基准中为 ASM 选定的动力学参数^[10]

参 数	符号	取值	单位
异养菌最大生长速率	μ_{mH}	4.0	d^{-1}
异养菌生长半饱和和常数	K_S	10.0	gCODm^{-3}
异养菌生长溶氧半饱和和常数	K_{OH}	0.2	gO_2m^{-3}
硝酸盐半饱和和常数	K_{NO}	0.5	$\text{gNO}_3 - \text{Nm}^{-3}$
异养菌衰减速率	b_H	0.3	d^{-1}
缺氧生长速率校正因子	η_g	0.8	-
缺氧水解速率校正因子	η_h	0.8	-
最大比水解速率	k_H	3.0	$\text{gX}_s (\text{gX}_{B,H}\text{CODd})^{-1}$
水解半饱和和常数	K_X	0.1	$\text{gX}_s (\text{gX}_{B,H}\text{COD})^{-1}$
自养菌最大生长速率	μ_{mA}	0.5	d^{-1}
自养菌生长半饱和和常数	K_{NH}	1.0	$\text{gNH}_4 - \text{Nm}^{-3}$
自养菌衰减速率	b_A	0.05	d^{-1}
自养菌生长溶氧半饱和和常数	K_{OA}	0.4	gO_2m^{-3}
氨化速率	K_a	0.05	$\text{m}^3 (\text{gCODd})^{-1}$

表 5 模拟基准中为双指数沉速方程选定的参数^[10]

名 称	参数	取值	单位
最大实际沉速	v_0'	250	md^{-1}
最大理论沉速	v_0	474	md^{-1}
压缩沉淀区沉降参数	r_h	0.000576	$\text{m}^3\text{gSS}^{-1}$
絮凝沉淀区沉降参数	r_p	0.00286	$\text{m}^3\text{gSS}^{-1}$
不可沉降系数	f_{ns}	0.00228	

3.3 进水成分

用于测试控制策略有效性的进水扰动往往在评价过程中起到关键作用。活性污泥工艺中的扰动是多方面的, 某一特定的控制策略可能会对进水的某一扰动效果明显, 而对另一种扰动则没有作用。为了获得对控制策略的无偏评价, 必须定义一系列的进水扰动, 并使得每一项控制策略都经历这些各式各样的扰动。为此 IWA 模拟基准课题组共定义了四种的进水扰动文件, 每种文件代表一种不同的天气或进水条件。目前为止 IWA 模拟基准课题组已经公布了其中的三种文件^[10]。

进水扰动文件包括干旱天气、雨天、暴雨及 COD 溢流四种情况下的进水扰动。以干旱天气进水文件为例其进水总量为 $18446\text{m}^{-3}\text{d}^{-1}$, 相当于 100000 人口所产生的污水量, 进水总可降解 COD 为 300gm^{-3} 。进水流量和污染物浓度参考了各种文献中报道的进水负荷, 该进水文件共包括一周的数据量 (每 15 分钟一组数据)。进水数据依次包括下列项目: 时间; S_s ; $X_{B,H}$; X_s ; X_I ; S_{NH} ; S_I ; S_{ND} ; X_{ND} ; Q_{in} 。进水中的

S_0 ; $X_{B,A}$; X_P ; S_{NO} 假定为 0, S_{Alk} 值默认为 7。

这些文件描述了进水流量和 COD 每天的变化。另外, 周末的进水变化也在文件中得到反应, 与城市污水处理厂的运行相类似, 周末的进水流量峰值比平时要小。

4 性能指标

动态模拟计算产生的大量的结果文件和数据进行处理是对各种控制策略进行评价的关键问题之一。为此 IWA 模拟基准课题组引入了性能指标法。

所谓性能指标法是指一系列通用的将大量的模拟结果数据转化为少数几个表征控制策略优劣的指标项的方法。总的来说, IWA 模拟基准对控制策略的评价是通过计算两个不同层面的指标实现的。

第一层面的指标主要对控制策略实施后系统的性能进行综合评价, 包括出水水质、稳定性及系统运行指标。第二层面的指标主要对局部控制回路性能进行评价, 包括控制变量以及操作变量性能。

4.1 出水水质指标

$$EQ = \frac{1}{T1000} \int_{t_0}^{t_7 \text{ days}} [PU_{TSS}(t) + PU_{COD}(t) + PU_{BOD}(t) + PU_{TKN}(t) + PU_{NO}(t)] Q_e(t) dt$$

该指标表征出水水质的好坏, 主要考虑出水 TSS、COD、BOD、TKN 及硝态氮对受纳水体的影响, 式中:

$$PU_{TSS}(t) = \beta_{TSS} 0.75 (X_{S,e} + X_{BH,e} + X_{BA,e} + X_{P,e} + X_{I,e})$$

$$PU_{COD}(t) = \beta_{COD} (S_{S,e} + S_{I,e} + X_{S,e} + X_{BH,e} + X_{BA,e} + X_{P,e} + X_{I,e})$$

$$PU_{BOD}(t) = \beta_{BOD} 0.25 (S_{S,e} + X_{S,e} + (1 - f_p) (X_{BH,e} + X_{BA,e}))$$

$$PU_{TKN}(t) = \beta_{TKN} (S_{NH,e} + S_{ND,e} + X_{ND,e} + i_{XB} (X_{BH,e} + X_{BA,e}) + i_{XP} (X_{P,e} + X_{I,e}))$$

$$PU_{NO}(t) = \beta_{NO} S_{NO,e}$$

$PU_{TSS}(t)$ 、 $PU_{COD}(t)$ 等分别表示出水 TSS、COD 等项目 t 时段对出水水质指标 (EQ) 的贡献, 计算所采用的 TSS、COD 等项目的权值如表 6 所示 (篇幅所限, 对其他性能指标仅作简要介绍)。

4.2 出水稳定性指标

出水稳定性指标表征系统运行过程中的出水超标情况, 其计算是通过统计间隔 15 分钟进行的动态计算结果中氨氮、总氮、BOD₅、COD 及总悬浮固体五项

表 6 模拟基准中计算 EQ 选用的权值^[10]

	β_i		
	碳氧化工艺	硝化工艺	反硝化工艺
β_{TSS}	2	2	2
β_{COD}	1	1	1
β_{BOD}	2	2	2
β_{TKN}	-	7	20
β_{NO}	-	-	20

指标的超标次数和超标时间（百分比）而得到的。上述五项指标出水超标上限参见 IWA 第 11 号科技报告^[10]。

4.3 系统运行指标

系统运行指标可细分为污泥产量、泵送能量、曝气能量和搅拌能量四项，其中污泥产量又可分为处理污泥量和总污泥产量。处理污泥量反映模拟计算的 7 天内系统中颗粒性产物的增量以及排放污泥量。总污泥产量反映 7 天内系统总的污泥产生量，除处理污泥量外还包括随出水排出的颗粒物质的量。

4.4 控制变量与操作变量指标

控制变量指标指考察控制策略执行的 7 天时间内模拟计算结果中控制变量计算值与设定值之间偏差的统计指标，具体包括：最大偏差、绝对偏差积分、方差积分以及协方差。

操作变量指标主要指系统执行控制策略 7 天内有关操作变量的统计指标，具体包括：最大偏差、最大变化率以及变化率协方差。

5 基准应用

通过将动态模拟的计算结果转化为性能指标，便可以对各种控制策略进行综合比较与评价。然而采用模拟基准获得的计算结果，应该与所采用的模拟软件无关。但由于各种模拟软件模拟前都有特定的设置，在进行模拟计算之前优先要确保采用统一的设置，将模拟软件按照模拟基准的要求进行相应调整。

模拟计算工具可选择商业软件包或用户自行开发的程序。首先应建立基准配置，选择适当的工艺布局，对特定的单元过程选择适当的模型并应用基准定义过程参数，对模拟软件的数值计算相关参数进行设置；然后，采用不变的进水文件流量和组成进行稳态模拟；获得满意结果后采用进水扰动文件进行动态模拟。由于模拟基准是一个通用的比较平台，并非为某一种控制策略所量身定制，控制策略的执行需要按照一定的步骤进行，必要时需对控制策略或基准进行必要的调整和合理的改动。

6 结 语

IWA 基于呼吸计量法的控制策略模拟基准仅仅是探求支持污水处理控制系统发展的方法研究的开始，还有大量的工作需要去做。

由于 IWA 模拟基准是一个通用的模拟与评价协议，不可避免的存在一些内在限制性因素：首先，各种控制策略所针对的处理系统以及控制策略中的控制变量不可能正如模拟基准所定义的那样，在执行控制策略的时候必然要进行相应的处理，这不利于模拟基准计算得到的结果外推应用于实际污水处理系统。另外作为表征控制策略优劣的性能指标主要包括了处理效果和运行费用等，而这些可能并不是某些控制策略的控制目标。在表征多种性能指标时，IWA 课题组采用了比较直观的灰度表示法，然而该法亦有可能给人造成错觉。目前为止，IWA 模拟基准尚未包括生物除磷工艺以及序批式活性污泥工艺，因而有待于进一步完善与扩充。

虽然尚存在着一些缺憾和不足，但 IWA 基于呼吸计量法的控制策略模拟基准的提出确是一个不小的进步，因为它不仅是对各种控制策略进行比较和评价的平台，也是探索呼吸计量法在工艺过程控制中的作用，发展新控制策略的有效工具。应用 IWA 模拟基准筛选优秀的控制策略，配合针对某一污水处理工艺特定控制策略的细致模拟分析，为活性污泥控制策略相关研究提供了一条低投入、高产出地有效分析途径，必将有力推动污水处理控制新思想和新观念的推广与应用。

参考文献：

[1] Olsson G, Aspegren H, Nielsen M K. Operation and control of wastewater treatment —a Scandinavian perspective over 20 years [J]. Water Science and Technology ,1998 ,37(12) :1-13.

[2] Ohto T. Control ,computers and communications : Fusion in instrumentation , control and automation of water and wastewater system in Japan [J] . Water Science and Technology , 1998 ,37(12) :15-19.

[3] Garrett M T. Instrumentation , control and automation progress in the United States in the last 24 years [J]. Water Science and Technology , 1998 ,37(12) :21-25.

[4] Huntingdo R. Twenty years developments of ICA in a water utility [J]. Water Science and Technology , 1998 ,37(12) :27-34.

[5] Kabouris J C. Modeling , instrumentation , automation , and optimization of wastewater treatment facilities [J]. Water Environment Research ,1999 ,71 (5) :729-736.

[6] 刘建勇,周雪飞,等 . 智能控制在污水处理中的应用现状及展望 [J]. 中国给水排水 ,2002 ,18(11) :22-25.

[7] 高大文,彭永臻,等 . 污水处理智能控制的研究、应用与发展[J]. 中国给水排水 ,2002 ,18(6) :35-39.

[8] Spanjers H, Vanrolleghem P A, Olsson G, Dold P L. Respirometry in Control of Activated Sludge Process: Principles (IWA Scientific and Technical Report No. 7) [R]. London: IWA,1998.

[9] Vanhooren H,Nguyen K. Development of a simulation protocol for evaluation of respirometry based control strategies[R]. Gent , Belgium:University of Gent , 1996.

[10] Copp J B, Spanjers H, Vanrolleghem P A. Respirometry in Control of Activated Sludge Process: Benchmarking Control Strategies (IWA Scientific and Technical Report No. 11) [R]. London: IWA, 2002.

[11] Henze M. Activated Sludge Model No. 1 [R]. London, UK: IAW-PRC Scientific and Technical Reports , 1987.

[12] Takacs I, Patry G G, Nolasco D. A dynamic model of the clarification-thickening process[J]. Wat. Res. , 1991 , 25 :1263-1271.