

以河流水质为目标的排污量控制的仿真研究

樊立萍^{1,2}, 于海斌¹, 袁德成²¹中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁沈阳 110016; ²沈阳化工学院信息工程学院, 辽宁沈阳 110142)

摘要:城市排水管网与污水处理厂的运行状态直接影响受纳河流的水质。以河流水质为最终目标, 根据河流纳污能力控制废水排放量, 可有效保护河流生态质量。本文根据国际水协会发布的1号河流水质模型, 构造了能模拟河流水质动力学和生化特征的仿真平台。进一步以河流断面氨浓度为控制指标, 研究了基于河流水质的排水系统的排污流量控制问题。仿真结果验证了基于河流水质控制污水排放量策略的有效性。

关键词: 河流; 纳污能力; 污水排放; 控制; 仿真

文章编号: 1004-731X (2005) 03-0728-04

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Simulation Investigation of Wastewater Discharge Control Focused on River Water Quality

FAN Li-ping^{1,2}, YU Hai-bin¹, YUAN De-cheng²¹ Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;² Automation Dept, Shenyang Institute of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

Abstract: The urban sewer systems and the wastewater treatment plants have detrimental impacts on the receiving river water quality. Focusing on the river water quality, to control wastewater outflow discharge based on the receiving capacity of the river can preserve the river ecological quality effectively. Based on the River Water Quality Model no.1 (RWQM1) issued by the International Water Association (IWA), the simulation software for river systems is developed with MATLAB programming language, and the problem of wastewater discharge control focused on river water quality is studied by using the ammonia concentration at the river section as an index. Simulations verify the effectiveness of wastewater discharge control based on river water quality.

Keywords: river; receiving capacity; wastewater discharge; control; simulation

引言

工业化进程的加快与人口的增长导致水污染日趋严重。改善水体质量, 保护水生态环境, 成为城市环境治理的一个重点。作为城市污水最终受纳体, 河流的水质受城市污水排放量与排放质量的直接影响。将城市废水系统作为一个整体进行集成规划与设计, 根据河流水质与生态要求, 控制城市排水管网与污水处理厂的排放, 对城市水系统实现一致而有效的管理, 可以实现降低运行代价并改善水生态环境的目标, 是实现城市可持续发展的有效途径^[1]。

由于污水处理业特殊的“非营利”性, 该行业一直属于仪表、控制与自动化(ICA)技术相对薄弱的领域。传统的“管末处理, 达标排放”的污水处理方式对污水的处理仅限于处理能力有限的污水处理厂, 而现有的污水处理厂由于成本等原因很少装备自动化仪表与控制系统, 往往很难满足日益严格的排污标准。另一方面, 河水质的变化是由物理传输与交换过程以及生物、生化或物理转化过程等多方面因素引起, 即使污水达标排放河流, 也不能保证河流水质达标。

根据河流纳污能力对废水排放进行有效控制, 方可阻止河流水质的进一步恶化, 改善水生态环境。欧盟各国在水框架指令驱动下对以河流为目标的集成水系统控制进行了大量研究^[2], 国内在这方面也取得一些研究成果^[3-4]。

本文以国际水协会河流水质1号模型(RWQM1)为基础, 建立了河流的简化数学模型, 开发了基于MATLAB语言的河流水质仿真平台; 以河流氨浓度标准为依据确定河流纳污能力, 根据入口污水关键组分的在线测量值调整污水排放量, 实现排污流量的实时控制。

1 系统建模

作为城市污水的最终受纳体, 河流每天要接纳来自污水处理厂和排污管网的大量废水。以河流水质为管理目标的集成化城市废水系统要求根据河流水质要求控制污水处理厂和排水管网的污水排放。以河流为核心的城市废水系统的组成如图1所示。排水管网对工业废水、生活污水及降雨径流进行收集, 然后输送到污水处理厂或直接排入受纳河流。经污水处理厂处理的污水达到排放标准后排入河流, 因其污染物含量较低, 对河流水质影响不大。而含高浓度污染物的未处理废水的直接排放, 对河流水生态环境会造成严重破坏。目前, 我国污水处理能力还较低, 仍有大量废水未经处理直接排入河流, 为有效阻止河流水质的进一步恶化, 根据河流纳污能力控制污水排放是必需的。

收稿日期: 2004-03-03

修回日期: 2004-08-03

作者简介: 樊立萍(1965-), 女, 山东人, 副教授, 博士生, 研究方向为集成化城市水资源管理; 于海斌(1964-), 男, 研究员, 博士, 研究方向为实时系统理论、智能生产调度等; 袁德成(1960-), 男, 内蒙古, 教授, 博士, 研究方向为生化过程建模与优化控制等。

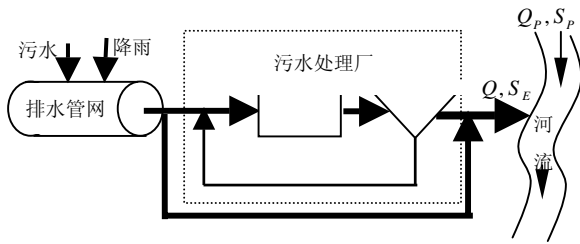


图1 废水系统组成

基于集成控制思想, 本文建立了以河流为核心的集成废水系统模型。排水管网的输出和污水处理厂的输出作为河流的输入。在国际水协河流水质1号模型(RWQM1)^[5]基础上, 根据子模型选择基本原则^[6], 假定转化过程只受悬浮细菌控制而与藻类及浮游生物无关, 建立了河流的简化生化反应模型。简化的模型更方便控制方案的实施。简化模型所包含的变量包括: 易生物降解有机物 S_S 、惰性溶解有机物 S_I 、溶解氧 S_O 、氨氮 S_{NH_4} ($S_{NH_3} + S_{NH_4}$)、亚硝酸盐 S_{NO_2} 、硝酸盐 S_{NO_3} 、磷酸盐 S_{PO_4} ($S_{HPO_4} + S_{H_2PO_4}$)、异养菌 X_H 、亚硝化菌 X_{N1} 、硝化菌 X_{N2} 、惰性粒子有机物 X_I 、粒子有机物 X_S 。简化模型的矩阵描述如表1所示。表1中, 所有不为1的化学计量系数均只给出符号: “+”表示正的化学计量系数, “-”表示负的化学计量系数, “?”表示该系数的符号依赖于过程有机物成分与化学计量参数, 据此可得到每种组分的转化过程速率方程:

$$r_i = \sum_j v_{ji} \rho_j \quad (1)$$

其中, ρ_j 为j过程的反应速率, v_{ji} 为化学计量系数。

考虑水力动态, 河流水质模型用下列简化模型表示:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{Q_{in}}{V} (C_{i,in} - C_i) + r_i \quad (2)$$

其中, Q_{in} —河流进水流量;

V —河段体积;

$C_{i,in}$ —组分*i*流入浓度;

C_i —组分*i*流出浓度。

表1 河流水质生化转化简化模型

过程 j	组分 i	S_{M2}	S_I	S_{NH_4}	S_{NO_2}	S_{NO_3}	S_{PO_4}	S_O	X_H	X_{N1}	X_{N2}	X_S	X_I
异养菌借助 NH_4 好氧生长		-	?		?	-		1					
异养菌借助 NO_3 好氧生长		-			-	?		1					
异养菌的好氧内源呼吸			+				+	-	-1				+
异养菌借助 NO_3 缺氧生长		-		+	-	?		1					
异养菌借助 NO_2 缺氧生长		-			-	?		1					
异养菌的缺氧呼吸			+		-		+	-	-1				+
一阶段硝化菌生长			-	+			-			1			
一阶段硝化菌好氧呼吸			+				+	-					+
二阶段硝化菌生长				-	+		-				1		
二阶段硝化菌好氧呼吸			+				+	-				-1	+
水解			+	+			+	+					-1

对于河流中的溶解氧, 考虑大气进入河流形成的复氧作用, 溶解氧浓度变化方程为

$$\frac{dS_O}{dt} = \frac{Q_m}{V} (S_{O,in} - S_O) + K_2 (S_{O,sat} - S_O) + r_O \quad (3)$$

其中, $S_{O,sat}$ 为河流中溶解氧浓度饱和值, K_2 为复氧系数。

实施集成控制时, 排水管网和污水处理厂的排放量根据河流容许排污量进行调节。

2 纳污能力确定

限于当前的处理条件, 本文研究的河流所接纳的废水绝大多数是未经处理的直接排放废水。排水口处设有闸门, 用于调节排水量的大小。

不考虑空间方向上的浓度梯度, 污染物进入河流后, 完全混合于断面。根据节点平衡原理, 排污口与控制断面之间水域的允许纳污量可按下式计算^[7]:

$$W_C = S(Q_P + Q) - S_P Q_P \quad (4)$$

式中: W_C —水域允许纳污量, g/s;

S —水质标准, mg/l;

Q_P —上游来水流量, m^3/s ;

Q —污水排放量, m^3/s ;

S_P —本底浓度, mg/l;

据此可得到对应不同排污浓度的允许排污量为

$$Q = \frac{S Q_P - S_P Q_P}{S_E - S} \quad (5)$$

其中, S_E 为排污浓度。

鉴于河流中氨浓度对河水质量的特殊意义, 本文选择氨浓度为参照对象, 建立基于氨浓度的污水排放量控制策略, 满足排水断面氨浓度不超过 1 mg/l 的控制目标。控制系统采集排污入口处传感器在线测量的排水氨浓度, 根据上式计算对应的容许排放流量作为流量设定值, 据此控制进入河流的实际排污流量, 实现污水的可控排放, 确保河流的良好水质。

3 控制策略仿真

本文以流经某城市的河流为背景, 研究根据河流纳污能力控制废水排放量。该城市汇水总面积 186.67 km^2 , 服务人口 362 万, 日均流量 138.67 万立方米。河流全长 172.6 公里, 其中城市段全长 28.6 公里, 河道宽 250m~600m, 设计流量 14.45 m^3/s 。以该河流位于城区的 5.7km 中心河段作为研究对象。该河段水深约 4 米, 每天接纳约 50 万吨污水。大量入流污水对河流造成了严重影响, 该河段水体一直属于超五类水质, 尤其夏季水体恶臭程度达到 5 级以上。

因污水处理厂排放物的污染物含量低, 对河流水质影响不大, 且该河段污水主要来自排污管网的未处理废水, 本文忽略污水处理厂排放物对河流的影响, 将直接排放的未处理污水作为河流输入, 对河流入流污水流量几种不同控制方案在 MATLAB 仿真环境下进行了仿真。由于缺乏可靠数据, 本文入流污水的水质成分通过国际水协提供的污水输入文件获得^[8]。该输入文件将污水组分抽象为与活性污泥模型 ASM1 中对应的 13 种元素, 而河流水质模型 RWQM1 所涉及组分与 ASM1 存在很大差异, 使用这些文件时需作相应处理^[9]。对应本文建立的简化河流模型, 对来自输入文件的

各组分作如下转化计算:

磷酸盐浓度:

$$S_{PO4} = 3.6(S_{NH} + S_{ND} + X_{ND}) / (3.6 + 16.0)$$

氨氮总浓度:

$$S_{NH4} = 16.0(S_{NH} + S_{ND} + X_{ND}) / (3.6 + 16.0)$$

总固体悬浮物浓度:

$$X_{TSS} = 0.75(X_I + X_S) + 0.90(X_A + X_H + X_{PAO})$$

亚硝酸盐:

$$S_{NO2} = 0.75 S_{NO}$$

硝酸盐:

$$S_{NO3} = 0.25 S_{NO}$$

亚硝化菌:

$$X_{N1} = 0.75 X_{BA}$$

硝化菌:

$$X_{N2} = 0.25 X_{BA}$$

经过以上的变换处理, 以 ASM1 状态变量为基础的输

入气象文件则可以用于河流的仿真计算。仿真在 MATLAB 平台下进行。主程序采用 MATLAB 程序设计语言编写, 河流动态过程描述则采用 C++ 编程后编译生成动态库连接 (DLL) 子程序。在 MATLAB 程序中调用 C++ 开发的 DLL 可缩短大量仿真时间。数值积分调用 ODE45 求解器, 计算步长 0.1 分钟。

图 2 为目前直接排放情况下的河流水质的变化情况。河流每日接纳 50 万吨未处理废水, 排污流量为 20833m³/h。图 2 (a) 对应溶解氧变化情况, 图 2 (b)、(c) 分别对应河流中磷酸盐和氨的浓度变化曲线, 图 2 (d) 是排污口处河流断面氨浓度变化曲线。从仿真曲线可见, 这种无限制直接排放方式引起河流水质严重恶化, 溶解氧浓度在污水排放后迅速下降, 河流溶解氧浓度长期低于 2mg/l, 达不到 V 类地面水标准; 河流中磷与氨的浓度均严重超出 V 类水标准, 断面氨浓度远远超过容许指标, 水质属严重污染。

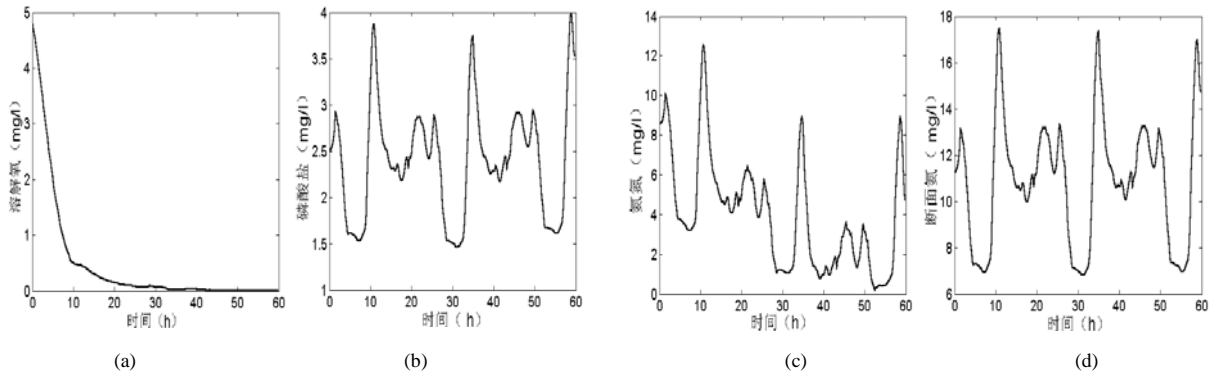


图 2 流量未加控制时河流运行情况 (q=20833 连续排放)

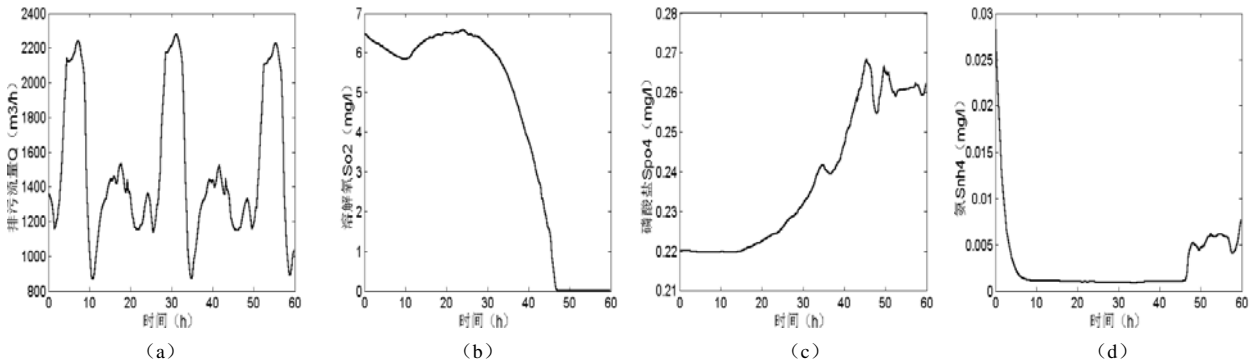


图 3 满足断面氨浓度 1mg/l 标准时排污及河流情况

为解决河流污染问题, 必须根据河流纳污能力控制污水排放量。采集排污口处排污氨浓度, 根据式 (5) 计算对应的容许排污流量作为被控流量的给定值, 通过流量控制实现断面氨浓度的控制。图 3 满足断面氨浓度为 1mg/l 时与排入污水相匹配的容许流量及按此流量排放时河流水质变化情况。其中 (a) 图对应理想排污量, (b) 图是此排放方式下河流溶解氧浓度变化情况, 图 (c) 和 (d) 分别为河段中磷酸盐和氨的变化曲线。如果流量可以完全控制到以图 3 (a) 所示变化规律排入河流, 则该河段断面氨浓度将严格控制在 1mg/l。

根据上述控制要求, 本文对排污流量实施简单的比例 (P) 控制, 仿真结果示于图 4。其中图 (a) 是控制作用下产生的排污流量, 图 (b) 为对应排放方式下溶解氧的变化曲线, 图 (c) 和 (d) 分别为磷酸盐和氨的变化曲线, 图 (e) 是该控制方式下受控变量断面氨浓度的实际变化情况, 断面氨浓度基本控制在 1mg/l, 但存在波动的控制误差。

为实现断面氨浓度的无差控制, 本文将前述比例控制器改进为比例积分 (PI) 控制器。采用 PI 控制器时的仿真运行结果示于图 5。河流氨、磷及溶解氧浓度指标均有所改进, 断面氨浓度被控制在设定值 1mg/l。

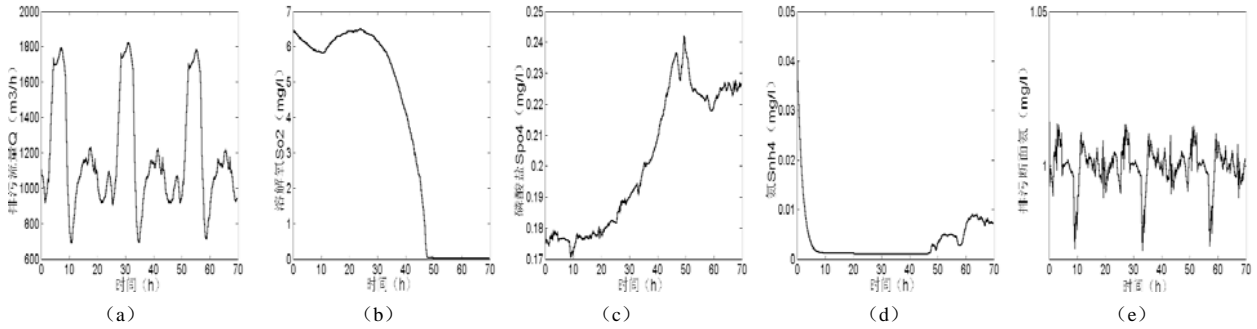


图4 简单比例控制时河流水质变化情况

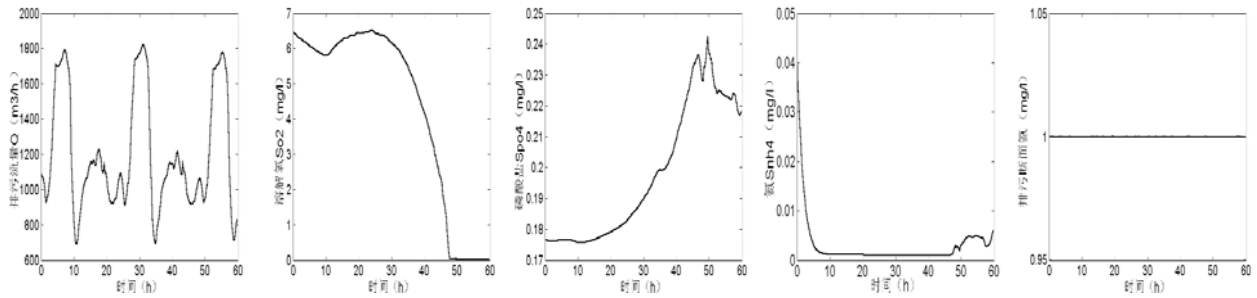


图5 PI控制时河流水质变化情况

通过以上的仿真研究可见,不加限制的直接排放对河流水质与生态会产生很大损害,必须严格禁止;对排污量进行基于接纳河流纳污能力的实时控制可以实现在保护河流环境的前提下的最大污水排放。从仿真还可看出,单纯以断面氨浓度为控制指标构成的控制系统只保证了氨浓度标准,其他方面如溶解氧浓度等指标尚不能满足生态要求。将河流各项水质与生态指标进行合理集成,构造更合理的综合性能指标作为控制指标,设计更先进的控制策略对河流上游污水处理厂与排污管网进行实时控制,将进一步改善河水质量。

4 结论

以河流水质为目标,结合净水调度和强化废水处理深度,以及把控制延伸到城市排污管网,是维持城市水资源环境良性循环的理想手段。目前要研究这样一个复杂的大系统,需要借助仿真工具。本文基于国际水协最新发布的河流水质模型,构造了河流水质的仿真平台。在此基础上对以河流水质为目标的几种排污量控制方案进行了仿真,结果表明了该类控制方案对改善河流水质的有效性。集成多项河流水质与生态指标,设计更先进的系统控制策略,是目前正在开展的工作。

参考文献:

- [1] Harremoës P. Integrated urban drainage, the status and perspectives [J]. *Water Science & Technology*, 2002,45(3): 1-10.
- [2] Meirlaen J., Van Assel J and Vanrolleghem P.A. Real-time control of integrated urban wastewater system using simultaneously simulation surrogate models[J]. *Water Science & Technology*, 2002, 45(3): 109-116.
- [3] 袁彩凤, 孟西林, 蒋火华, 汪斌. 入河排污口在总量控制中的作用[J]. *中国环境监测*, 1999, 15(3): 17-20.
- [4] 李嘉, 张建高. 水污染协同控制[J]. *水利学报*, 2001, (12): 14-18.
- [5] Reichert P, Borchardt D, Henze M, et al. River Water Quality Model no.1(RWQM1): II. Biochemical process equations [J]. *Water Science & Technology*, 2001, 43(5):11-30.
- [6] Vanrolleghem P, Borchardt D, Henze M, et al. River Water Quality Model no.1(RWQM1): III. Biochemical submodel selection [J]. *Water Science & Technology*, 2001,43(5): 31-40.
- [7] 陈晓宏等. 水环境评价与规划[M]. 广州: 中山大学出版社, 2001, 144-152.
- [8] Pons M N. URL[ED/OL].<http://www.ensic.u-nancy.fr/COSTWWTP>.
- [9] 袁德成, 樊立萍, 于海斌. 典型污水生化处理过程仿真平台的构造[J]. *系统仿真学报*. 2003, 15 (11): 1509-1513.