

城市污水系统的实时控制技术

赵晨红, 彭永臻, 魏 齐

(北京工业大学 北京市水质科学与水环境恢复重点实验室, 北京 100022)

摘 要:回顾了城市污水系统的实时控制技术在世界各国的应用和发展;阐述了城市污水系统实时控制的概念,并对相关专业术语做出精确定义;介绍了城市污水系统中常用的传感器、执行器、控制器;总结了决定控制策略的控制设备、控制目标和控制方法;对控制类型进行了分类;介绍了对一个给定系统如何建立控制程序的方法论;对城市污水系统实时控制技术未来的发展作了展望。

关键词:城市污水系统;实时控制;传感器;执行器;控制器;控制程序

中图分类号: X701

文献标识码: A

文章编号: 1672 - 0946(2007)02 - 0158 - 04

Study on real time control of urban wastewater systems

ZHAO Chen-hong, PENG Yong-zhen, WEI Qi

(Key Laboratory of Beijing Water Quality Science and Water Environment
Recovery, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: This paper presents a review of the application and development of real time control (RTC) of urban wastewater systems in the world. The concept of RTC of urban wastewater systems and some concise definitions of terms are outlined. Main sensors, actuators, controllers used in urban wastewater systems are introduced. Some of the measures and objectives of control as well as methods that can be applied to determine control strategies are summarized. Control types are classified. Methodologies of how to derive a control procedure for a given system are put forward.

Key words: urban wastewater system; real time control; sensor; actuator; controller; control procedure

在过去的 30 年中,国外的学者针对“如何实现城市污水系统的实时控制(Real Time Control,以下简称 RTC)和根据污水系统改善了的特性和效率评价 RTC 潜在的益处”,已进行过多次研究^[1~6],并对北美和欧洲各国的多个城市污水系统,开发应用了实时控制技术.自 20 世纪 70 年代起,美国的芝加哥等 9 个城市就开始积极筹建城市污水系统实时控制项目,而在加拿大蒙特利尔市,也于 20 世纪 80 年代早期建成了污水系统的局部控制站,从 1999 年开始又运行了“全局最优预测

RTC 系统”,现在正在筹备完成“集成控制系统”.在欧洲,RTC 项目的建设要稍落后于北美,但也在 1980 年之后在法国的巴黎等 8 个主要城市、德国的汉堡等 7 个城市,陆续将 RTC 技术应用于当地的城市污水系统中.此外,瑞典、瑞士、丹麦、奥地利等国家的主要城市目前也纷纷将 RTC 系统的建设列入市政建设项目的规划之中.通过 RTC 系统在以上众多工程实践中的应用,发现对城市污水系统进行实时控制是可行的、高效的,可以改善整个城市污水系统的特性,保证污水厂的出水乃至受纳水

收稿日期: 2006 - 04 - 10.

资助项目:“863 计划 国家重大科技专项项目(2004AA601020)

作者简介:赵晨红(1974 -),博士,教师,研究方向:污水的生物处理及其智能控制.

体的水质,大大节省了污水管道系统基建投资和污水厂运行、维护管理费用.因此,对其开展广泛而深入的研究有着十分深远的意义.

1 城市污水系统实时控制技术

1.1 城市污水系统实时控制的概念和控制回路

Manfred Sch üze 等人^[7]首次明确提出城市污水系统的实时控制概念,并对有关专业术语进行了定义,便于在 RTC 系统未来的发展过程中,与其相关的不同学科领域的专家和学者能够更好地合作.

对一个城市污水系统,假如在污水流动过程中,过程变量(如水位、流量、污染物浓度等)被监测,同时执行器在运行,就认为该系统在受实时控制.其过程控制可通过图 1 所示的控制回路原理图表示.该控制回路通过硬件部分实现,各硬件及其所起作用: 传感器—监测过程发展; 执行器—影响过程发展; 控制器—调整执行器,使被控制的过程变量取得离设定点的最小偏差值; 数据传输系统—在不同的设备间传输数据.

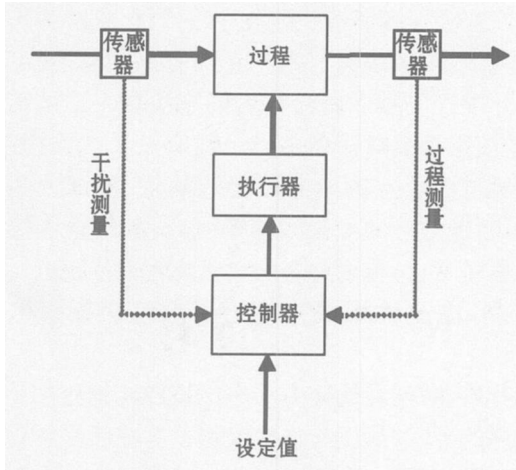


图 1 前馈(干扰测量)和反馈(过程测量)控制回路

1.2 城市污水系统中的传感器

城市污水系统的实时控制对传感器提出很严格的要求,如测量的准确性、可靠性、适合连续记录和远程传输等.城市污水系统中经常使用的传感器如下.

雨量器(表),如称量表、倾卸桶、雨点计数器等,雨量的测量也可通过气象雷达进行短期下雨预测得到.

水准仪(用于液位测量),如浮子式比重计、扩散器、压力传感器、声音传感器等.

流量计,如转子流量计、涡轮式流量计、靶式计

量槽、超声波流量计、电磁流量计等.

水质测量仪,如测有机污染物(TOC、易生物降解 COD)的传感器、测营养物(总氮、氨氮、 NO_3^- 、P)的传感器、测生物量(浊度或呼吸量)的传感器、测毒性(借助呼吸仪)的传感器等.

这些传感器能提供高价值信息,但同时对它们的运行和维护能力也提出较高的要求.实际工程中经常使用更简单却更坚固耐用的设备去代替真实变量的测量,包括测定 pH 值、电导率、ORP、UV 和 IR 吸光度的传感器.这样就需要创造“翻译单元”,将原传感器的输出信号转换成所需求的信息.

1.3 城市污水系统中的执行器

城市污水系统中经常使用的执行器主要包括: 泵(轴流泵或螺旋泵),恒速或变速的;

阀门(闸阀,辐向或滑动的);

溢流堰(溢水孔或排水孔),如对合流制污水管道要采取溢流措施;

曝气设备,是大部分污水处理厂最基本和决定运行费用的设备,氧气对 COD、氨氮等污染物质的生物去除过程是必须的;

化学投加设备,如向池子中投加碳源以提高反硝化作用、投碱以促进硝化过程的进行、投加聚合物以提高生物絮凝体的沉降作用等等.

1.4 城市污水系统中的控制器

前面所定义的控制回路是任何实时控制系统的基本要素.在反馈回路控制中,根据控制过程离设定点的测量偏差执行命令.如果没有偏差,反馈控制器不执行命令.前馈控制器使用过程模型预测这些偏差的立即未来值,它提前激活控制,避免偏差.反馈-前馈控制器是这 2 种类型控制器的结合.

用于连续变量执行器设定值的标准控制器是“比例积分微商 PD - 控制器”(它的简化是 P、PI 或 PD).它给执行器的信号是测量变量和设定点之间的差别函数.假如控制器没有配备自动调节设备,则此函数中的参数必须被校准.一般经微分方程分析、实际或模拟实验完成校准.

两点控制或开/关控制是离散控制方式中最简单和应用最多的一种.它只有 2 个位置,打开/关闭.以水泵两点控制池子的进水为例,泵在低液位下开,在高液位下关,在两个液位之间的地带是不工作区域.阀门和可移动溢流堰等执行器的控制经常用到三点控制器.在控制器的中间位置,输出信号保持它以前的状态,在其他 2 个位置,分别假定是最大或最小.

近年来数字可编程逻辑控制器(PLC)已代替

了模拟控制器, PLC对整个系统的控制和协调功能包括:采集测试数据,预处理,检查状态、功能和极限,暂时数据存储,控制行为计算,从中心台接收或报告数据等.在控制房间中,监控控制和数据采集系统处理所有输入和输出数据,数据的传输可通过专用电话线、无线通讯系统、网络系统或卫星通讯设备实现.

2 城市污水系统的控制要素

城市污水系统作为一个城市的市政基础设施,是一个复杂的大系统,由污水管道、污水处理厂和接纳水体三个子系统组成.对城市污水系统的实时控制不仅要考虑污水管道系统,而且要考虑污水处理厂和接纳水体.表 1对决定城市污水系统控制策略的控制设备、控制目标和控制方法作了总结^[8].

表 1 城市污水系统的控制要素

子系统	设备	目标	方法
污水管道系统	泵	预防洪水	直观推断
	溢流口	减少溢流 (频率, 体积, 负荷)	自学习专家系统
	阀门	流量平衡	脱机最优化
污水处理厂	溢流堰 阀门	维持出水标准	在线最优化
	回流污泥泵	过程维持	基于模型控制
	剩余污泥泵	污泥容积取得最小	控制理论的应用
	曝气设备	取得最低的费用	
	内回流泵		
接纳水体	溢水口	改善水质	
	阀门	洪水防护	

3 城市污水系统实时控制的类型

RTC的控制类型根据自动化程度可分为手动的、监控的和自动的三类.手动的指系统的执行器由操作员调节;监控的指执行器由自动控制器操作,其中的设定值由操作员或监控系统指定;自动是指由控制器以完全自动的方式实现控制.

RTC的控制类型根据控制范围可分为 3 类:局部控制、全局控制和集成控制.假如过程测量是在执行器所在地点直接进行,而不是在一个控制房间中远程操作,则认为该系统是在局部控制水平下运行.通常系统在只有一个执行器的情况下采用局部控制.如果系统比较复杂,要求 2 个或 2 个以上的执行器必须联合运行,这时采用全局控制,即传感器与位于系统其它地点的执行器相互传递数据,由中央控制房间接收所有局部传感器的测量数据,以一种协调的方式在中心控制执行器的运行.当局部控制和全局控制都不能改善城市污水系统的特性

时,可采用集成控制.集成控制是污水管道系统和污水处理厂 (也可能有接纳水体)的同时和协调控制.这种控制便于定量和定性分析废水,控制接纳水体的环境条件.集成控制包括两方面:目标集成和信息集成.目标集成是指一个子系统的控制目标是建立在其他子系统测量标准的基础上,比如,在污水管道系统中泵的运行要考虑使得接纳水体中氧的消耗取得最小值.信息集成是指一个子系统采用的控制决定可能是建立在其它子系统状态信息的基础上,比如,在污水管道系统中泵的运行要考虑建立在污水处理厂的进水数据基础上.

4 建立控制程序的方法论

当开发一个城市污水实时控制系统时,核心任务就是要建立正确的控制程序.控制程序也称“控制算法”或“控制策略”,这里是指在 RTC系统中所有执行器设定点的时间顺序.控制程序可由“判决矩阵”表示,矩阵中的每一个元素代表对给定的状态变量和输入变量而必须执行的控制行为,判决矩阵使控制程序能够快速地在在线执行.判决矩阵也可以简化成“判决树”,是一套“if-then-else”语句.

开发控制程序的最常用的方法是人工试错方法,是在系统模拟模型基础上建立一个迭代程序,然后通过评价一些模拟运行的结果、测试一些策略,不断地进行试算来改善得到的程序,直到建立最优程序为止.应用此方法对污水管道系统进行实时控制,溢流体积减少的上界很容易靠模拟得到^[4].

此外,数学最优化方法也已被成功地应用于控制程序的开发.最优化方法又可分为在线最优化和脱机最优化两种.在线最优化方法是建立一个在线模拟模型,对其执行在线校正,被校正的模型能够测试系统的当前状态,并对系统的未来状态进行预测.计算时间在此方法中是一个关键问题,取决于所使用模型的复杂性.大量潜在的不同控制行为和它们对污水系统的影响要求在相当短的时间内被评价,所以在线方法要求对城市污水系统及其相关过程的描述充分详细却足以简单,为了最大限度的降低计算机运行时间,有必要对系统描述进行简化,如线性化.而在脱机最优化方法中,可以克服以上问题,当对系统建模时,可进行很详尽的系统描述,可以评价在较长的时间段内的控制行为和它们对污水系统的影响.模型可以相当复杂,不必考虑计算时间问题.

线性化是对实时控制系统特性的严格简化,当

系统在污水处理厂和受纳水体中包括复杂的过程时,线性化提供的控制策略在理论上是最优的,但在实际中却是次最优的.为此,Wolfgang Rauch^[9]等人开发出将遗传算法作为城市污水系统的实时控制的最优程序,此方法可直接根据水质参数而使系统最优,是一种非线性模型预测控制的脱机应用.系统的流动规则的最优时间顺序由有各种约束条件的目标函数的最大值或最小值确定.例如,受纳水体缺氧对水生生物和生态系统带来的有害影响取决于溶解氧浓度和在该浓度下持续的时间.生物处于恒定的、对其有害的较低溶解氧浓度的环境中的时间越短,其死亡率越低.此问题转化成数学最优问题就成为:限定持续时间为约束条件,目标是确定溶解氧的最小值.对特定河流断面 i 在时刻 t 时的氧气平均浓度为 $DO_{t,i}$,这里 $DO_{t,i} = [DO_i(t) + DO_i(t-1) + \dots DO_i(t-k+1)]/k$,其中 $i(i=1, \dots, NS)$ 表示河流断面的空间离散化, NS 表示河流断面的数量, k 表示在离散时间阶跃中相应的持续时间长度, t 处于 $[t_0+k-1, t_0+T_p]$ 时间间隔中.因而最优问题就成为:求目标函数 $Z = \text{minimum} [DO_{t,i} \prod_{i=1}^{NS} \int_{t=t_0+k-1}^{t_0+T_p} 1]$ 的最小值.

5 结 语

对城市污水系统进行实时控制可以减小该系统对环境的不利影响,降低基建和运行维护管理费用,是改善其性能的有益方式.由于 RTC 系统中设备、方法论和工具的巨大改善,即使在过去表现出不能从 RTC 获益的城市污水系统也有了实时控制的潜力.但仍应该看到 RTC 尚处于发展中阶段,许多知识空白仍然存在,比如在城市污水系统的设计和运行的水质评价中,水质变量和水量变量之间的关系如何等;另外,由于操作员的水平有限、部门之间存在竞争和缺乏协调、工程设计和运行管理的矛盾、污水管道系统和污水处理厂的矛盾等,这些因素也影响了 RTC 的发展.

由于近 30 年来计算机和信息技术在处理容量、人机对话界面、可访问性、坚固性、可靠性等方面有了飞跃发展,同时也促进了城市污水系统 RTC 技术的发展,但未来 RTC 在新硬件技术(如测

量系统、执行器)、软件应用(开发新的控制策略和程序)、建模方法、最优化技术方面仍有待进一步提高和改进,以不断增强其安全性、可靠性、适应性和灵活性,使其逐步走向成熟和完善.

国内关于城市污水系统 RTC 技术的应用虽尚未见报道,但随着我们国家经济和科技的飞速发展,掌握水处理、计算机、通信、自动控制等综合学科知识的复合型人才不断地壮大,相信 RTC 系统在我国污水处理界未来的应用具有光明的前景和无限的潜力.

参考文献:

- [1] SCHILLING W. Real - Time Control of Urban Drainage Systems [C]// The State - of - the - art AWPRC Task Group on Real Time Control of Urban Drainage System, London, 1989.
- [2] SCHILLING W. Smart sewer systems improved performance by real time control[J]. Eur Water Pollut Control 1994, 4(5): 24 - 31.
- [3] CAMPISANO A, MODICAC. Modern technologies for real time control of wastewater systems[C]// Proceedings of 16th European Junior Scientist Workshop Real Time Control and Measurement in Urban Drainage Systems, Valle dei Margi, Gramsciole, Catania, Italy, 7 - 10 November 2002.
- [4] ENFALT T, STOLTING B. Real - time control for two communities - technical and administrative aspects[C]// Ninth International Conference on Urban Drainage, Portland/Oregon, USA, September 2002.
- [5] MERLAEN J, VAN ASSEL J, VANROLLEGHEM P A. Real time control of the integrated urban wastewater system using simultaneously simulating surrogate models[J]. Water Sci Technology 2002, 45(3): 109 - 116.
- [6] SCHEER M, NUSCH S. Optimum performance of a sewer and treatment system by application of real time control[C]// International Conference on Sewer Processes and Networks, Paris, 15 - 17 April, 2002.
- [7] MANFRED S. Real time control of urban wastewater system - where do we stand [J] Journal of Hydrology, 2004, 299(3 - 4): 335 - 348.
- [8] DAVID B. Integrating simulation models with a view to optimal control of urban wastewater system [J]. 2005, 20(4): 415 - 426.
- [9] WOLFGANG R, POUL H. Genetic algorithms in real time control applied to minimize transient pollution from urban wastewater systems [J]. 1999, 33(5): 1265 - 1277.