

动态规划法在污水处理厂优化设计中的应用

胡满银 张硕 李长义

(华北电力大学环境科学与工程学院 河北保定 071003)

摘要 对具有代表性的系统优化模型进行分析比较,选用动态规划法对城市污水处理厂进行优化设计,得到了城市污水处理厂投资和运行的最优决策,为城市污水处理厂运行和设计提供了依据。

关键词 城市污水处理 系统模型 优化设计

Application of Dynamic Layout Theory in Optimal Design of Urban Sewage Treatment Plant

HU Man-yin ZHANG Shuo LI Chang-yi

(School of Environment Science and Engineering, North China Electricity Power University Baoding, Hebei 071003)

Abstract Analyses and comparisons on the representative system optimal model are conducted and the dynamic layout is selected for optimal design to the urban sewage treatment plant, attaining the optimum decision of the investment and operation to the urban sewage treatment plant and providing basis for operation and design of the urban sewage treatment plant.

Keywords urban sewage treatment system model optimal design

现代化的城市集中了大量的人口和各种各样的工业企业,是水污染源的集中产地。随着污水治理的市场化,建设一个经济、合理的污水处理系统是解决水污染问题的关键措施。长期以来,由于受污水净化理论及数学计算工具发展的局限,污水处理工艺系统的设计方案采用单体设计方法来获得。工程设计人员通常是根据工程经验或直觉判断,在设计规划指导下拟定有限的备选设计方案,然后在其中通过经济指标核算并筛选出认为技术合理、经济可行的最终设计方案。这种设计方法首先是不够精确的,其次也往往可能忽略许多更好的设计方案。与传统设计方法不同,近代系统优化设计方法体系是在“系统分析和系统综合”的理论基础上建构起来的,以专业知识和最优化问题的数学求解技术为理论支撑,依靠电子计算机作为实施手段,而最终获得各项设计目标均达到优化的一种工程设计方法。理论认为,采用系统优化设计方法获得的设计方案是所有可行方案中的最佳方案^[1]。

系统优化设计方法在众多的工程设计领域已得到较广泛的实践和应用,该法较之传统设计方法,不仅能大幅度降低工程投资,缩短建设周期,而且还能有效提高设计质量和设计效率,节省设计人力、物力。所以建立的可行性数学模型与实际系统的吻合程度是优化方法成败关键所在。

1 典型的城市污水处理优化模型

污水处理工艺系统优化设计始于20世纪60年代初^[2],并随着电子计算机技术的飞速发展,系统优化设计在污水处理工艺中得到广泛应用,已经采用动态规划法、非线性规划法等建立起优化模型。

1.1 动态规划优化模型

动态规划多用于研究多层次、多阶段决策过程的最优策略问题。在污水处理工艺系统优化模型中,结合动态规划的

方法就是将污水净化“动态过程”的决策问题按时间分解成相互联系的阶段,进而将各个阶段作为静态问题来分析和研究。结合动态规划进行研究的成果较多,其中以 Chia^[2]等建立的动态规划模型最早,并具有相当的代表性。

Chia等将污水处理系统抽象为一个连续并相互关联的多阶段系统,且每阶段都具有最优决策的选择,而这种选择是结合整个过程中其他阶段的选择相互联系考虑的,最后形成各个阶段优化决策的集合策略。研究中所采用的抽象系统流程如图1所示。

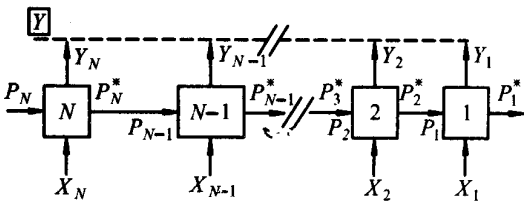


图1 Chia等建立的系统流程

在模型中, i 表示任意的阶段($N \geq i \geq 1$); Y_i 表示阶段效益,具体为第 i 阶段的费用值; X_i 表示第 i 阶段的决策变量(如 BOD_5 的去除率); P_i 和 P_i^* 分别表示第 i 阶段的输入与输出量; Y_i 与 X_i 、 P_i 以及 P_i^* 之间的联系由传递函数 T_i 表示:

$$Y_i = Y_i(X_i, P_i), i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

$$P_i^* = T_i(X_i, P_i^*), i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

与抽象系统相对应,污水工艺系统优化模型的目标函数就可设定为:

$$\text{Min } W^* = \sum_{i=1}^N W_i(S_i, d_i), i = 1, 2, 3, \dots, N \text{ 特征参数} \quad (3)$$

式中, W^* 为整个污水处理工艺系统的年度运行费用; W_i 为第 i 个处理单元的年度运行费用; d_i 为第 i 个处理单元的基



本设计要求; S_i 为进入第 i 处理单元的污水入流的定性特征参数; N 为处理工艺中总的单元数量。

上述参数之间的联系同样可由传递函数 T_i 表示:

$$S_i^* = T_i(S_i, d_i); \text{ 且 } S_i = S_{i+1}^* \quad (4)$$

式中, S_i^* 为第 i 个处理单元的污水出流的定性特征参数; T_i 为联系工艺单元 i 与 $i+1$ 的传递函数。

在运用动态规划方法求解系统优化设计模型最关键的是,模型中的函数关系并不需要具体的数学公式表达形式,因此,较适宜求解以表格或曲线形式给定费用函数关系的污水处理系统优化设计问题。

1.2 非线性规划优化模型

Tyteca^[3]建立的污水处理系统结构模型较为完整,整个系统模型含有污水线(初沉池、曝气池)以及污泥线(浓缩池、厌氧消化池、真空过滤器),还考虑了系统内污泥回流影响及污泥污水的回流影响。系统流程及各控制节点标注如图 2 所示。模型中各个控制节点的参数(状态变量)如表 1 所示。

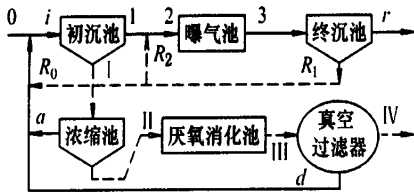


图 2 Tyteca 所建立的优化系统结构模型

表 1 控制节点处状态变量取值

	Q	L_b	M_{bs}	M_s	S	S^*
0	Q_0	L_{b0}	M_{bs0}	M_{s0}	0	0
i	Q_i	L_{bi}	M_{bsi}	M_{si}	S_i	0
1	Q_1	L_{b1}	M_{bs1}	M_{s1}	S_1	0
2	Q_2	L_{b2}	M_{bs2}	M_{s2}	S_2	0
3	Q_3	L_{b3}	M_{bs3}	M_{s3}	S_3	0
r	Q_r	L_{br}	0	0	0	0
R_1	q_{R1}	L_{bR1}	M_{bsR1}	M_{sR1}	S_{R1}	0
R_2	q_{R2}	L_{bR2}	M_{bsR2}	M_{sR2}	S_{R2}	0
R_0	q_{R0}	L_{bR0}	M_{bsR0}	M_{sR0}	S_{R0}	0
q	L_{bq}	M_{bsq}	M_{sq}	S_q	0	
q	L_{bq}	M_{bsq}	M_{sq}	S_q	0	
q	L_{bq}	M_{bsq}	M_{sq}	S_q	S	S
q	L_{bq}	M_{bsq}	M_{sq}	S_q	S	S
a	f_a	L_{ba}	0	0	0	0
d	f_d	L_{bd}	0	0	0	0

表中, Q, q, f 为污水(混合液)、污泥、上清液的流量; L_b 为可生化降解的溶解性污染负荷浓度; M_{bs} 为可生化降解的悬浮态污染负荷; M_s 为不可降解的悬浮物污染负荷; S, S^* 为混合液和污泥中的活性生物量。

系统数学模型由 43 个系统方程、51 个系统变量(8 维自由度)以及 12 个不等式约束所组成。目标函数以 $TC = \sum aX_i^b$ 表示。其中, TC 表示给定的处理单元总费用(含基础投资、操作维护费用等); X_i 表示系统模型中第 i 个工艺单元的设计参数; a, b 分别为估计参数。寻优决策目标是系统

总投资、固定或可变的运行维护费用最小。模型在求解时构成几何规划,采用广义简约梯度法求解。

1.3 鲁棒优化设计模型

Uber 等^[4]建立了鲁棒优化设计模型来扩展典型的最小费用模型,以期能用少量费用增加(ΔTC)来增强整个系统对水质水量变化的稳定性,即降低系统对参数波动的敏感性^[5]。Uber 等对系统设计鲁棒性(Robustness)所下定义是:当系统实际运行参数值与估计参数值有所偏离时,系统在某一区间范围内具有维持某种性能的能力。在设计模型中,出流水质(BOD 和 TSS 等指标)具有相当的稳定度可以避免参数不确定性给系统所带来的敏感性影响。

Uber 等所建立的系统结构模型沿用了 Tang 的研究成果,并与 Tyteca 研究的系统结构相似。模型由污水子系统和污泥子系统两级系统所构成。其中污水子系统包括初沉池、曝气池和二沉池,污泥子系统包括重力浓缩池、初级和二级厌氧消化池以及真空过滤器等工艺单元。系统结构模型中同时考虑了污泥回流及旁流对系统工艺设计的影响。

系统模型构成的数学规划问题如下:

目标函数: $\text{Min}_{x,y,u} TC(x, y, u)$

约束函数: $h(x, y, u) = 0$

$$BOD(x, y, u) \leq BOD_{\max}$$

$$TSS(x, y, u) \leq TSS_{\max}$$

$$R(BOD) \leq R(BOD)_{\max}$$

$$R(TSS) \leq R(TSS)_{\max}$$

式中:

$$R(BOD) = \sum_{j=1}^{55} w_j \cdot \left| \frac{\partial BOD}{\partial u_j} \right|$$
$$= \sum_{j=1}^{55} w_j \cdot \left| - \left(\frac{\partial BOD}{\partial x} \right)^T \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^{-1} \left(\frac{\partial H}{\partial u_j} \right) + \frac{\partial BOD}{\partial u_j} \right|$$

$$R(TSS) = \sum_{j=1}^{55} w_j \cdot \left| \frac{\partial TSS}{\partial u_j} \right|$$
$$= \sum_{j=1}^{55} w_j \cdot \left| - \left(\frac{\partial TSS}{\partial x} \right)^T \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^{-1} \left(\frac{\partial H}{\partial u_j} \right) + \frac{\partial TSS}{\partial u_j} \right|$$

数学模型中, TC 为总年度费用(含初始投资的等年值,运行维护费用等); h 表示处理系统的数学模型,在模型中以等式出现在约束条件集合中; BOD 和 $BOD_{\max}$ 分别表示出流 BOD_5 的浓度值及限制值; TSS 和 $TSS_{\max}$ 分别表示出流总悬浮固体浓度值及限制值; $R(BOD)$ 和 $R(TSS)$ 分别表示系统对出流 BOD 、 TSS 稳定性的量度, $R(BOD)_{\max}$ 和 $R(TSS)_{\max}$ 则相应分别表示工艺系统对稳定性要求的约束边界。

系统方程组 h 由决定处理系统特性的代数方程组成(既可为等式也可为不等式),几乎都是高度非线性的函数关系。这些函数关系表达了系统内各节点处的物料平衡关系以及污染物降解的经验性或半经验性的反应动力学关系。其中, $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^T$ 表示模型中的非独立状态变量向量,具体表现为污水或污泥在各控制节点的属性,这些属性界定为:流量 Q_i ;溶解性 BOD_5 浓度 S_i ;可生物降解挥发性悬浮固体浓度 X_{Di} ;惰性的挥发性悬浮固体浓度 X_{Li} ;无机的



悬浮固体浓度 X_{Tj} ; 活性生物浓度 X_{Aj} 以及总悬浮固体浓度 X_{Tj} 等 (j 表示节点); $y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)^T$ 则表示系统模型中可独立变化的决策变量向量; $u = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_n)^T$ 表示系统模型中各项参数向量, 该系统模型包含 55 个模型参数变量。

Uber 等对系统模型进行了最坏情况分析, 研究结论是, 提升系统出流生化需氧量 (BOD) 的稳定性, 必然需要提高系统内活性污泥的平均停留时间 (θ_c), 这与典型最小费用优化模型的研究结论截然相反。同时, Uber 等也指出, 尽管所建立的系统数学模型无法体现活性污泥平均停留时间 (θ_c) 与污泥沉降性之间的关系, 但该稳定优化设计的模型理论完全可以应用到许多需要侧重考察参数不确定性的设计问题之中。

2 运用动态规划法进行城市污水处理厂的最优化

我国解决城市污水的净化问题始于 20 世纪 70 年代。随着城市化进程的加快和城市水污染问题日益受到重视, 城市排水设施建设有较快发展。据估计到 2000 年底, 我国已建成城市污水处理厂 427 座, 其中二级污水处理厂 282 座, 二级处理效率约为 15%。在已经建成的城市污水处理厂中有 80% 是使用传统的活性污泥法, 其广泛采用的处理流程见图 3。

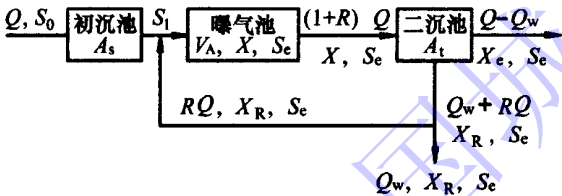


图3 活性污泥法处理工艺流程

图 3 中各符号的意义: Q 为原水流量, m^3/T ; R 为污泥回流比; S_0 为原水中的底物浓度, mol/m^3 ; S_1 为曝气池进水中底物浓度, mol/m^3 ; A_s 为初沉池面积, m^2 ; V_A 为曝气池容积, m^3 ; A_1 为二沉池面积, m^2 ; X 为曝气池中活性污泥浓度或混合液悬浮固体浓度, mol/m^3 ; Q_w 为剩余污泥排放量, m^3/t ; X_e 为出水活性污泥浓度, mol/m^3 ; S_e 为出水中底物浓度, mol/m^3 ; X_R 为回流污泥中的活性污泥浓度, mol/m^3 。

2.1 单元过程模型

图 3 所示的问题是一多层次、多决策的最优化设计问题, 因此可利用动态规划法求解。利用动态规划法进行优化设计时使用的单元过程模型为:

(1) 初沉池。初沉池中悬浮固体的去除率是停留时间 t 的函数。设计时使用的函数关系式可以通过沉淀柱试验得出, 也可以使用有关经验公式或经验曲线计算所需的沉淀池面积。初沉池的费用是初沉池面积 (A_s) 的函数。

(2) 曝气池。曝气池是活性污泥法处理的核心部分, 活性污泥曝气池内的活性污泥浓度 X 由下式计算:

$$X = [Q\theta_c(S_0 - S_e)] / V_A(1 + \theta_c)$$

曝气池的总费用由曝气池容积及曝气设备的供气量决定。常见的曝气方法有完全混合曝气、合建式表面曝气、阶段曝气以及延时曝气。本文中建立模型选取完全混合式曝

气法。

(3) 二沉池。二沉池的面积由下式计算:

$$A_1 = Q/[g(h-1)][(h-1)/h]^{h-1}R^{1-h}X^h(1+R)^h$$

二沉池总费用是沉淀池建造费和循环泵运转费用之和。

2.2 系统的信息流图

可以将上述完全混合活性污泥处理过程转换为如下信息流图 (图 4)。

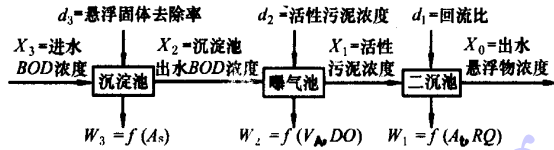


图4 完全混合活性污泥处理系统的信息流

由于在处理系统中采用完全混合曝气方式, 所以可在设计计算中消除循环流, 将计算过程简化为串联信息流形式, 用动态规划法进行最优化计算。

2.3 问题分析^[6]

运用上述模型来解决一处理规模为 $3.8 \times 10^4 t$ 废水工艺, 具体问题主要包括以下几个步骤:

2.3.1 设计参数确定

城市污水处理厂设计参数的确定: $k=0.00114$, $b=0.003 h^{-1}$, $Y=0.5$, $g=7.56 \times 10^{-5} m/d$, $h=2.25$, 停留时间: $\theta_c=5.8 d$ 。

2.3.2 决策变量的选取及其取值范围的确定

在给定日处理规模、进、出水质的条件下, 可选取初沉池悬浮固体的处理效率、曝气池活性污泥的浓度及二沉池的污泥回流比为决策变量。根据该问题其 3 个变量的取值范围为: 55%~75%、2~4 g/L、0.2~0.7, 为此在该范围内取 5 个值。

初沉池悬浮固体去除率: 55%、60%、65%、70%、75%。

曝气池活性污泥质量浓度: 2 g/L、2.5 g/L、3 g/L、3.5 g/L、4 g/L。

二沉池污泥回流比: 0.2、0.3、0.4、0.5、0.7。

对于上述 3 个决策变量应有 $5 \times 5 \times 5 = 125$ 种可能的组合, 利用动态规划法可以大大简化其计算过程。

按信息流的方向逐级算出各级的有关信息 (包括输出状态、决策变量与年费用)。在寻优过程中, 由决策变量建立起费用效益函数, 以年费用的最小值为目标函数, 采用函数迭代法, 计算出二沉池的目标函数值 [$W_1 = W_1(X_1, X_0)$] (表 2), 曝气池与二沉池的联合目标函数值 ($W_2 = \{W_2(X_2, d_2) +$

表2 二沉池的目标函数值 万元

$X_1/$ ($g L^{-1}$)	d_1				
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7
2	50.9 *	51.0	54.4	57.3	64.3
2.5	66.2	58.6 *	60.6	63.5	70.5
3	86.5	73.8	70.5	68.1 *	75.1
3.5	106.5	89.8	83.8	80.1 *	82.4
4	124.7	103.4	96.0	90.9 *	93.0

*最优决策

$W_1[f(X_2, d_2), X_0]$) (表 3), 初沉池、曝气池与二沉的联合目



标值 ($W_3 = \{ W_3 (X_3, d_3) + W_2 [f (X_3, d_3), X_0] \}$) (表 4), 从而达到系统最优化。上述优化结果汇入表 5 中。

表 3 曝气与二沉池的联合目标函数值

X_2	$X_1 / (g \cdot L^{-1})$				
	2	2.5	3	3.5	4
375	246.7	239.8	242.0	248.5	255.6
390	253.6	245.3 *	247.8	254.3	261.5
405	261.7	254.3	254.1 *	261.1	267.3
420	268.4	261.5	260.9 *	266.4	271.8
435	275.5	268.6	265.7 *	271.6	277.8

* 最优决策

表 4 初沉池、曝气池与二沉池的联合目标值 万元

X_2	X_3	
	600	
375	$239.8 + 50.9 = 290.7$	
390	$245.3 + 34.6 = 279.9$	
405	$254.1 + 26.6 = 280.7$	
420	$260.9 + 21.6 = 282.5$	
435	$265.7 + 19.2 = 284.9$	

表 5 优化结果

最优决策		年费用
初沉池	悬浮物取出 70 % 表面积 1 860 m^2	34.6 万元
曝气池	活性污泥质量浓度 2.5 mg/L 容积 19 102 m^3 曝气量 744 m^3/min	186.7 万元
二沉池	污泥回流比 0.3 表面积 2 390 m^2	58.6 万元
总年费用		279.9 万元

通过上述城市污水处理厂优化的分析, 动态规划法在进行城市污水处理厂优化设计与运行中, 尤其是以表格或曲线给出的费用函数具有优越性。

3 结论

(1) 对城市污水处理系统的最优化设计进行了初步研究, 并指出研究将始终处于持续、动态的发展过程。

(2) 任何系统优化模型都具有一定时效性和适用范围, 这是由污水处理理论和数学最优化技术的发展水平以及计算机更新发展态势所决定。

(3) 在动态规划寻优中, 所建立的单元构筑物费用函数拟合所取参数主要来自经验数据, 同时与时间、地点相关, 有时不能正确反映地点时间的变化, 因此必须进行修正。单元构筑物函数的拟合算法也不一定合理, 有待应用检验。

(4) 应用动态规划解决污水处理的优化问题是一种有效的方法, 避免了建立繁琐的约束条件, 尤其对以表格或曲线给出的多目标、多决策问题更适用。

参考文献

- 1 庞煜, 龙腾锐. 污水处理工艺系统优化设计理论的研究与发展. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(3)
- 2 陈积福. 最优化理论在水处理中的应用. 北京: 水利电力出版社, 1993, 11
- 3 Chia S S, Krishnan P. Dynamic optimization for industrial waste treatment design. J. Water Pollut. Control Fed., 1969, 41: 1787 ~ 1802
- 4 Tyteca D, Smeers Y. Nonlinear programming design of wastewater treatment plant. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, 1981, 107(4): 747 ~ 766
- 5 Uber J C, Pfoetter J T, Brill E D, et al. Robust Optimal Design for wastewater treatment: Application Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, 1991, 117(4): 438 ~ 456
- 6 Uber J C, Pfoetter J T, Brill E D, et al. Robust Optimal Design for wastewater treatment: Application Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, 1991, 117(4): 425 ~ 437
- 7 傅国伟. 水污染控制系统规划. 北京: 清华大学出版社, 1986. 53 ~ 61

作者简介 胡满银, 男, 汉族, 山西阳泉人, 教授, 从事环境工程方面的教学和科研工作。

(收稿日期: 2005-09-18)

碱水的“威力”

(1) 清洗桃子。清洗桃子最重要的工作就是去除桃毛, 因为桃毛很难除净, 沾在身上特别难受。其实您只需把桃子放到碱水中泡几分钟后, 桃毛就脱掉了, 然后再用清水冲洗 1 遍即可食用。

(2) 去除蔬菜残余农药。买回家的蔬菜上大多留有残余农药, 必须认真清洗。用 500 mL 清水加 5 ~ 10 g 食用碱配成碱水 (根据菜量配足碱水), 将蔬菜放入其中浸泡几分钟后,

再用清水冲洗干净。

(3) 食用碱其实是最好的清洁剂。它比如今流行的各种化学制品清洁剂好得多: 第一环保, 流入下水道后不污染环境; 第二方便, 不会像洁灵一类东西可能结成块, 堵塞下水道; 第三绿色, 哪怕稍有残留, 也对健康无害; 第四经济, 食用碱比任何清洁剂都便宜。