

# 排队竞争算法在水污染控制系统 规划中的应用

沈 堃 胡晟华 鄢烈祥

(武汉理工大学化学工程学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:**水污染控制系统规划可归结为非线性规划来求解,应用排队竞争算法对水污染控制系统规划问题的求解进行了研究,对文献中的实例求解结果表明,排队竞争算法的计算结果优于遗传算法的计算结果,排队竞争算法为求解水污染控制系统规划问题提供了一种有效方法。

**关键词:**水污染控制系统规划;排队竞争算法;非线性规划

中图分类号:X506

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2004)S2-0182-03

## Application of line-up competition algorithm in water pollution control system planning

SHEN Kun, HU Sheng-hua, YAN Lie-xiang

(Department of Chemical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Water pollution control system planning can be described as a nonlinear programming problem. Water pollution control system planning problem was calculated by using a line-up competition algorithm(LCA). Taking the instance in the archives, a superior result by using a LCA to using a genetic algorithm was achieved. The LCA is a available way to solve the water pollution control system planning problems.

**Key words:** water pollution control system planning; line-up competition algorithm; nonlinear programming

水污染控制系统规划是以最优化理论为基本工具,合理利用水体的自净能力,协调水污染控制系统各组成部分之间的关系,在满足水体水质要求的约束下,使得整个水污染系统的污染物治理费用最低。水污染控制系统规划是一个有约束的非线性规划问题,通常采用 2 类方法求解:其一是将目标函数分段线性化,然后用线性规划技术对其求解,这种方法一般难以得到令人满意的解;其二是直接采用非线性规划方法求解。近年来,基于遗传算法求解水污染控制系统规划问题已有报道<sup>[1-4]</sup>,笔者应用一种新的全局优化算法——排队竞争算法(LCA)来求解水污染控制系统规划问题,并将这一算法与遗传算法进行比较,以检验该算法在求解水污染控制系统规划问题方面的应用效果。

### 1 水污染控制系统规划

水污染控制系统规划的核心就是求解费用函数这样一个单目标优化问题。由于污水处理的费用函数一般是非线性的,通常采用上述 2 类方法处理,很多情况下采用污水处理费用函数作为水污染控制系统的最优化目标函数。对于同一类型的污水处理

厂,费用可作为污水流量与处理效率的函数,目前应用较多的是幂函数<sup>[5]</sup>。

一般单个处理厂的费用函数可写为:

$$C_0 = k_1 Q^{k_2} + k_3 Q^{k_2} \eta^{k_4} \quad (1)$$

式中: $C_0$ 为污水处理工程费用,万元; $Q$ 为污水处理厂的规模,即流量,L/s; $\eta$ 为污水处理厂的处理效率,%; $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 和 $k_4$ 为参数,可由实际资料通过参数估值来确定。

对于多个处理厂的处理费用可写为:

$$F(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n) = \sum_{j=1}^n C_j(\eta_j) \quad (2)$$

用罚函数法,将有约束极小化问题转化为无约束极小化问题,即取优化准则函数为:

$$P_1(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n) \leq 0 \quad (3)$$

$$P_2(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n) \leq 0 \quad (4)$$

$$P_m(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n) \leq 0 \quad (5)$$

$$0 \leq \eta_j \leq 1$$

$$\min(F) = F(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n) + C \sum_{i=1}^m h_i(P_i)$$

式中: $F$ 为优化准则函数,即治理费用; $\eta_j$ ( $j=1, 2, \dots, n$ )为待求优化变量,其变化区间为 $\eta_j \in [0, 1]$ ;  $h_i(P_i)$ 为罚项,当满足所有 $m$ 个约束条件 $P_i$ 时取值

为0,否则取值罚系数为 $C$ 。

由于上述目标函数是非线性函数,所以水污染控制系统规划是求解非线性规划问题,笔者将应用列队竞争算法来求解。

## 2 列队竞争算法

列队竞争算法是一种群体并行搜索、多层次竞争的全局优化搜索算法,此算法在求解非线性规划问题和组合问题方面表现出了良好的特性,特别是对规模越大越难求解的全局优化问题,越能表现出该算法的稳健性和搜索效率<sup>[3]</sup>。

应用列队竞争算法求解连续变量问题的基本步骤为:

(1)在搜索空间中按均匀分散产生 $m$ 个个体,代表 $m$ 个家族,组成初始解群,并计算各个个体的目标函数值。

(2)按照目标函数值的大小对 $m$ 个个体排序:求全局最小值问题采用升序,求全局最大值问题采用降序。

(3)根据各个个体在列队中的位置,按一定比例确定其相应的搜索空间,处于第一位的搜索空间最小,处于最末位的搜索空间最大。

(4)各个体在各自的相应搜索空间内进行无性繁殖,产生 $n$ 个彼此差异性尽可能大的子代个体, $n$ 个子代个体与父代一起进行生存竞争,将其中最优秀的一个个体保留下来,代表它所属的家族参加下次列队地位的竞争。

(5)整体收缩搜索空间,然后转到第2步。终止

(上接第181页)

采用上节的小波网预测模型,并用递推最小二乘法进行权值在线修正,得到图5结果。由于泛化能力略好,0~100步内控制效果较好;模型发生变化时,权值经过100~150步间的短暂调整,使得预测模型能够适应对象变化,这点从预测模型误差曲线清楚的反应出来。

## 4 结论

从以上理论分析和仿真实验结果不难看出,小波网络作为预测模型,不仅有BP网的非线性拟合能力和良好的泛化能力,而且由于权值与网络节点输出呈线性关系,更容易做到在线递推校正,从而能够满足时变系统的要求。

同时采用遗传算法解决非线性优化问题,并针

条件为搜索空间收缩到接近于一点或达到指定的进化代数。

列队竞争算法的主要特性在于其可以有效地处理好全局搜索与局部搜索,个体的相互竞争与相互协作这样2对对立统一的矛盾。通过按优劣对各个家族排序,并根据列队顺序按一定比例搜索子空间,使得在列队中越优秀的个体分配的搜索子空间越小,这有利于加速局部搜索速度,而列队中越差的个体分配的搜索子空间越大,这有利于进行全局搜索。在搜索过程中,即使所有的个体都聚集在某一局部最优点的附近,也不容易陷入局部最优(除非收缩太快)。这是因为竞争推动力是一个相对量,只要个体间存在目标函数值的差异,彼此之间就存在相当大的竞争推动力而具有完全不同的搜索空间。处在列队后面的个体由于有较大的搜索空间,足以使它跳出局部最优,一旦它跳出此点,找到更优的点而位于列队的前面时,原先在列队前面的个体就会排到列队后面,从而获得较大的竞争推动力使搜索空间增大,跳出此局部最优,这一特性体现了竞争与合作的对立统一关系。由于上述特性,形成了各个家族你追我赶、地位交替上升、竞相争夺列队名次的态势,只要推动力不为零,竞争将一直进行下去。竞争的结果使列队中的首位个体不断地被其他家族个体所取代或其值被更新,快速地向最优点逼近。

## 3 应用实例

新疆乌鲁木齐市水磨河是以泉水补给为主,季节性地面水补给为辅的河流。20世纪90年代以

对控制器输出优化问题的特点对遗传算法初始化、遗传操作策略和优化指标函数进行修改,大大减少计算量。通过仿真实验可见,这些滚动优化策略在满足实时要求的条件下获得了满意的控制效果。

## 参考文献

- [1] 席裕庚,王凡.[J].自动化学报,1996,22(4):456-460.
- [2] Narendra K S, Parthasarathy K.[J].IEEE Trans Neural Networks, 1990, 1(1):4-27.
- [3] Zhang Q, Benvensite A.[J].IEEE Trans Neural Networks, 1992, 3(6): 889-898.
- [4] Jun Zhang, Walter G G, Miao Y, et al.[J].IEEE Trans Signal Processing, 1995, 43(6):1485-1497.
- [5] 黄德先,金以慧.[J].控制理论与应用,2001,18(增刊):63-68.
- [6] Huang Dexian, Jin Yihui, Zhang Jie, et al.[J].Chinese J Chem Eng, 2002, 10(4):435-433. ■

来,年均流量为 1.05 m<sup>3</sup>/s 左右,年均污水排放量为 0.32 m<sup>3</sup>/s 左右,全流域污净比为 0.30。全河段遭到了严重的污染,自上游至下游越流越差。按污水排放特性及水力特点,将水磨河自上游至下游划分为 7 个河段,断面依次为碱泉沟、硫磺沟、电厂、分水闸、化工厂、二附院、污水库。河流各断面主要污染物治理目标除了碱泉沟断面为Ⅱ类水以外,其余均为Ⅲ类水。水磨河水污染控制系统规划的数学模型为<sup>[5]</sup>:

$$f = \sum_{j=1}^5 C_j(\eta_j), 0 \leq \eta_j \leq 1 \quad (6)$$

$$\text{s.t. } U_c L_c + m_c \leq L_c^0 \quad (7)$$

$$U_N L_N + m_N \leq L_N^0 \quad (8)$$

$$V_c L_c + V_N L_N + n \leq O^0 \quad (9)$$

式中:  $f$  为水污染控制系统总的污水处理费用;  $C_j(\eta_j)$  为第  $j$  个污水处理厂的污水处理费用;  $L_c^0$ 、 $L_N^0$  和  $O^0$  分别为由河流各断面的 BOD<sub>5</sub>、氨氮和溶解氧约束组成的向量;  $L_c$  和  $L_N$  分别为由输入河流各个断面的 BOD<sub>5</sub> 和氨氮组成的向量;  $U_c$ 、 $U_N$ 、 $V_c$  和  $V_N$  分别为河流的 BOD<sub>5</sub>、氨氮和溶解氧的响应矩阵;  $m_c$ 、 $m_N$  和  $n$  分别为起始断面水质对下游各断面 BOD<sub>5</sub>、氨氮和溶解氧影响的向量。

代入各个处理厂的  $k$  值和规模得:

$$f = 680.0405 + 532.0052\eta_1^{6.2001} + 448.7620\eta_2^{5.9752} + 164.2497\eta_3^{6.8105} + 255.4859\eta_4^{6.1428} + 880.1318\eta_5^{6.0777} \quad (10)$$

以 BOD<sub>5</sub> 为研究变量的约束方程:

$$P_1: -1.3400\eta_1 + 1 \leq 0 \quad (11)$$

$$P_2: -1.2635\eta_1 - 0.1661\eta_2 + 1 \leq 0 \quad (12)$$

$$P_3: -1.2637\eta_1 - 0.1661\eta_2 + 1 \leq 0 \quad (13)$$

$$P_4: -1.2210\eta_1 - 0.1605\eta_2 - 0.05065\eta_3 + 1 \leq 0 \quad (14)$$

$$P_5: -0.7926\eta_1 - 0.1042\eta_2 - 0.03288\eta_3 - 0.3838\eta_4 + 1 \leq 0 \quad (15)$$

$$P_6: -0.2474\eta_1 - 0.03252\eta_2 - 0.01026\eta_3 - 0.1198\eta_4 - 0.7251\eta_5 + 1 \leq 0 \quad (16)$$

$$0 \leq \eta_i \leq 1 (i = 1, 2, 3, 4)$$

以氨氮为研究变量的约束方程:

$$P_1: -1.7715\eta_1 + 1 \leq 0 \quad (17)$$

$$P_2: -0.7530\eta_1 - 0.7715\eta_2 + 1 \leq 0 \quad (18)$$

$$P_3: -0.7531\eta_1 - 0.7715\eta_2 + 1 \leq 0 \quad (19)$$

$$P_4: -0.6854\eta_1 - 0.7023\eta_2 - 0.1185\eta_3 + 1 \leq 0 \quad (20)$$

$$P_5: -0.5191\eta_1 - 0.5318\eta_2 - 0.08976\eta_3 - 0.3079\eta_4 + 1 \leq 0 \quad (21)$$

$$P_6: -0.3302\eta_1 - 0.3384\eta_2 - 0.05703\eta_3 - 0.1956\eta_4 - 0.5149\eta_5 + 1 \leq 0 \quad (22)$$

$$0 \leq \eta_i \leq 1 (i = 1, 2, 3, 4, 5)$$

$$Q = [69.993, 70.002, 10, 29.996, 101.99], L/s \quad (23)$$

在用列队竞争算法求解此问题时,收缩因子取值 0.99,家族数和子代繁殖数均为 20,区间搜索临界值取 0.01。表 1 和表 2 给出了列队竞争算法的计算结果。

表 1 以 BOD<sub>5</sub> 为考虑对象时的规划结果

断面	污水处理效率/%			费用/万元		
	遗传算法	动态规划	列队竞争算法	遗传算法	动态规划	列队竞争算法
硫磺沟	80.93	74.63	82.78	300.94	244.37	322.49
电厂	53.14	34.35	56.91	100.05	90.54	105.25
化工厂	57.68	66.42	58.80	142.36	148.60	142.90
二附院	83.52	91.42	82.89	156.73	219.48	152.89
污水库	93.31	94.86	92.59	799.62	860.52	773.13
总和				1499.70	1563.51	1496.66

从表 1 和表 2 中的数据可以看出,无论是以 BOD<sub>5</sub> 为研究对象,还是以氨氮为研究对象,列队竞争算法算得的污水处理费用均少于文献[2]中采用遗传算法和动态规划法所得的费用。

表 2 以氨氮为考虑对象时的规划结果

断面	污水处理效率/%			费用/万元		
	遗传算法	动态规划	列队竞争算法	遗传算法	动态规划	列队竞争算法
硫磺沟	66.67	64.23	69.32	200.75	191.87	212.52
电厂	75.53	66.94	71.49	173.69	130.56	150.20
化工厂	62.71	76.08	64.30	145.33	164.00	146.59
二附院	68.47	78.69	72.15	97.18	130.85	106.62
污水库	68.87	70.70	68.24	313.05	328.86	308.11
总和				930.00	946.14	924.04

## 4 结语

用列队竞争算法对水污染控制系统规划问题的实例进行了计算,结果表明,此算法求解优于遗传算法得到的结果。由于列队竞争算法的运行控制参数少、计算简单、搜索效率高,因此是求解水污染控制系统规划问题的一种有效方法。

## 参考文献

- [1] Yan L X, Ma D X. [J]. Computers and Chemical Engineering, 2001, 25 (11): 1601 - 1610.
- [2] 黄国如,等. [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(4): 551 - 554.
- [3] 刘首文,等. [J]. 武汉水利电力大学学报, 1996, 29(4): 95 - 99.
- [4] 熊德琪,等. [J]. 水利学报, 1994, 39(12): 22 - 30.
- [5] 付国伟,程声通. 水污染控制系统规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985. ■