

给水厂优化消毒数学模型及其应用

袁一星¹, 邓涛¹, 徐洪福², 高金良¹

(1 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2 深圳水务 <集团> 有限公司, 广东 深圳 518031)

摘要: 水厂常采用的保守消毒方式会导致管网末梢余氯浓度 $> 0.05 \text{ mg/L}$, 既不经济也不安全。为此, 建立了优化消毒数学模型, 并采用遗传—模拟退火混合算法对其进行求解。算例结果表明, 该模型可对现有给水厂不同时段加氯量进行优化, 降低了配水系统中消毒副产物的浓度。

关键词: 供水管网; 优化消毒; 遗传—模拟退火

中图分类号: TU991.2 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2005)09-0049-03

Mathematic Model for Optimization Disinfection in Water Supply Plant

YUAN Yi-xing¹, DENG Tao¹, XU Hong-fu², GAO Jin-liang¹

(1 School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2 Shenzhen Water <Group> Co Ltd, Shenzhen 518031, China)

Abstract: The conservative disinfection method used in water supply plant resulted in the chlorine concentration more than 0.05 mg/L at the end of pipe network, and it was neither economic nor safe. Therefore, the mathematic model for optimization disinfection was set up, and the hybrid genetic - simulated annealing algorithm was used for solution. The calculation result shows that the model can optimize chlorine dosage in different stages of the existing water supply plant, and thus reducing the disinfection byproduct in distribution system.

Key words: water distribution network; optimization disinfection; genetic - simulated annealing

1 优化消毒数学模型

对于水厂消毒工艺而言, 决策变量为各个时段的加氯浓度, 约束条件主要有两个: 管网末梢余氯浓度 $> 0.05 \text{ mg/L}$; 总三卤甲烷浓度 $< 0.1 \text{ mg/L}$ 。追求的目标为经济最优。

假设一个城市有 m 个水厂, 第 t 个时段 k 水厂出水余氯浓度为 $C_{k(t)}$ mg/L , 供水量为 $Q_{k(t)}$ m^3/h , 液氯价格为 P 元/ t , 那么日消毒成本为:

$$F = \sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^{24} \frac{Q_{k(t)} \cdot C_{k(t)} \cdot P}{10^6} \quad (1)$$

为了将有约束优化问题的求解变成无约束优化

问题的求解, 将约束条件乘上惩罚因子 α (当某个节点的余氯浓度低于安全标准或者三卤甲烷浓度高于安全标准时进行经济惩罚的额度) 得最终的目标函数为:

$$F' = \sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^{24} \left(\frac{Q_{k(t)} \cdot C_{k(t)} \cdot P}{10^6} + \alpha \cdot N_t \right) \quad (2)$$

式中 N_t ——在 t 时段不满足约束条件的节点个数

2 问题的求解

2.1 余氯最大浓度和最小浓度的确定

对于公式 (2), 决策变量是 24 个时段的余氯浓度, 其中各时段的余氯浓度最小值为 0.05 mg/L , 而

余氯浓度最高值则需要根据城市的源水特征、管网最远点的水龄大小来确定,在实际操作中可通过已校核准确的动态水质模型来确定。

根据 Rossman 等人的研究成果经推导得:

$$C_t = C_0 \cdot e^{-KT} \quad (3)$$

将最远点余氯浓度 (C_t) 设为 0.05 mg/L, 按照水龄 (T) 和平均衰减系数 (K) 可反推出出厂水余氯浓度 (C_0)。

根据李欣的研究成果经推导得:

$$\text{TIHM} = \text{TIHMFP} - e^{\frac{K_1}{K_2}} \cdot C_{01} \cdot e^{-K_2 t} \quad (4)$$

将最远点三卤甲烷浓度 (TIHM) 设为 0.1 mg/L, 按照水龄和平均三卤甲烷增长系数 (K_1)、余氯平均衰减系数 (K_2) 和出厂水的三卤甲烷生成潜能 (TIHMFP), 经反推可得出厂水三卤甲烷浓度 (C_{01}), 从而可推求余氯浓度最大值 $C_{0,\max} = \max\{C_0, C_{01}\}$ 。

2.2 参数的选择和计算流程

为改善性能和提高优化效率, 对供水管网优化消毒数学模型采用遗传—模拟退火混合算法进行求解。

2.2.1 遗传算法参数的选择

编码长度。将余氯浓度计算精度确定为 0.001 mg/L, 根据 $C_{0,\max}$ 、 $C_{0,\min}$ 确定编码长度为:

$$L_1 = \lg [1000 \cdot (C_{0,\max} - C_{0,\min})] \quad (5)$$

选择操作。采取最优保存策略, 每次按照随机概率对个体进行选择, 将适应度大的个体保存到下一代。

交叉概率选取为 0.65, 变异概率选取为 0.02。

种群大小选取为 90, 遗传代数数为 2000。

2.2.2 模拟退火算法参数的选择

拟退火初温 T_0 , 应确保 $e \geq 0.95$ 。

链长 L_2 和退温函数。退温函数选择为 $T_2 = \beta T_0$, 实践表明退温过程越平稳则越有利于模拟退火的搜索。系数 β 选择为 0.99, 选择 $T_2 = 0.001$ 时为降温的底限, 从而可得链长为:

$$L_2 = \lg_{0.99} \left(\frac{0.001}{T_0} \right) + 1 \quad (6)$$

新个体的产生函数采取 2、3 交替变换方法。

最终的算法求解流程见图 1。

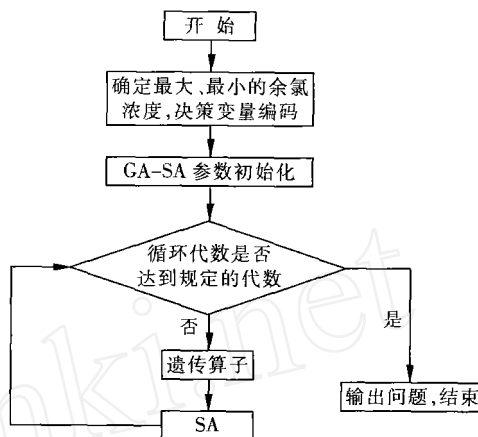


图 1 多水源优化消毒工艺的算法流程

Fig 1 Flow chart of multi-source optimal disinfection process

3 工程应用

某市由两个水厂供水, 其中一厂供水为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 二厂供水为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。按照上述算法对投氯量进行了优化计算, 结果见表 1。

表 1 优化前后的出厂水余氯浓度比较

Tab 1 Comparison on residual chlorine concentration in finished water before and after optimization

时段	供水量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)		优化前余氯浓度 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		优化后余氯浓度 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	
	一厂	二厂	一厂	二厂	一厂	二厂
1:00	484.9862	1916.9	0.7	1.04	0.46	0.36
2:00	347.1235	1372.0	1.04	1.13	0.6	0.40
3:00	275.2699	1088.0	1.13	1.11	0.56	0.51
4:00	263.91	1043.1	1.11	1.27	0.6	0.45
5:00	230.2603	910.1	1.27	1.18	0.42	0.58
6:00	226.2122	894.1	1.18	0.85	0.53	0.52
7:00	267.1991	1056.1	0.85	0.71	0.53	0.46
8:00	289.4382	1144.0	0.71	0.57	0.53	0.46
9:00	468.5408	1851.9	0.57	0.5	0.42	0.42
10:00	481.8995	1904.7	0.50	0.5	0.46	0.4
11:00	484.9356	1916.7	0.67	0.67	0.45	0.54
12:00	457.4845	1808.2	0.64	0.64	0.53	0.55
13:00	485.2392	1917.9	0.61	0.61	0.43	0.54
14:00	460.7482	1821.1	0.71	0.71	0.52	0.55
15:00	405.5424	1602.9	0.66	0.66	0.48	0.57
16:00	387.6044	1532.0	0.69	0.69	0.47	0.59
17:00	369.135	1459.0	0.69	0.69	0.44	0.59
18:00	425.7829	1682.9	0.71	0.71	0.43	0.56
19:00	475.1189	1877.9	0.53	0.53	0.39	0.45
20:00	549.7302	2172.8	0.57	0.57	0.46	0.48
21:00	567.4406	2242.8	0.63	0.63	0.53	0.52
22:00	503.7086	1990.9	0.72	0.72	0.54	0.61
23:00	532.5259	2104.8	0.68	0.68	0.51	0.56
24:00	544.1641	2150.8	0.68	0.68	0.49	0.56

根据优化结果,经计算得每年节省投氯费用为 9 071.6 元(氯的市场价格按 1 600 元/t 计),同时使三卤甲烷生成浓度有所降低(见图 2)。

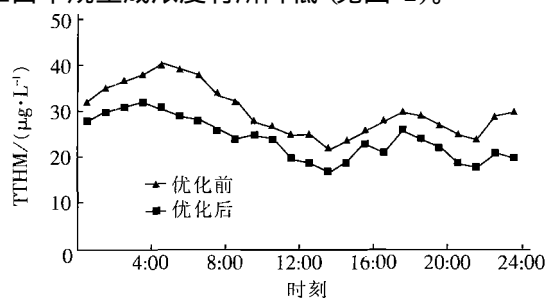


图 2 最不利点优化前后的 THM 对比

Fig 2 THM concentration curves at the worst node

4 结论

建立了优化消毒数学模型,并利用改进的遗传—模拟退火混合算法对其进行求解,有效地解决了多水源系统优化消毒的问题,不但节省了消毒费用,而且降低了管网中消毒副产物的浓度,为实现供

水系统安全运行提供了决策支持。

致谢:感谢深圳水务集团和水技术研究所有关同事提供的帮助,感谢程序员李国宾为计算提供了友好的程序界面,感谢赵洪宾教授在水质建模过程中提供的理论指导。

参考文献:

- [1] 赵洪宾. 给水管网系统理论与分析 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003
- [2] Lewis A Rossman. EPANET2 Users Manual [M]. America: EPA, 1996
- [3] 徐洪福,赵洪宾. 配水系统水质模型研究概况 [J]. 中国给水排水, 2002, 18(3): 33 - 36
- [4] 王凌. 智能优化算法及其应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2001

电话: (0451) 86282735 86284472

E-mail: taodeng@163.com

收稿日期: 2005 - 04 - 28

· 会讯 ·

2005年全国水处理技术研讨会暨第 25届年会预通知

中国化工学会工业水处理专业委员会主办的“2005年全国水处理技术研讨会暨第 25 届年会”将于 2005 年 10 月召开,具体时间地点敬请关注本学会网站 <http://www.iwtchina.org>。届时,业内知名专家、教授将应邀出席会议,并围绕会议主题“节水、回用、创新、发展”举办技术讲座和专题报告会。为使水处理工作者更充分地进行交流,请欲投稿的作者尽快提交论文的电子邮件至: kyan@iwtchina.org, 电话: 022 - 26689332, 26689329, 来稿请注明详细通信地址、电话、传真和电子信箱。同时欢迎相关企业在论文集上刊登广告宣传。诚邀水处理各领域代表出席会议。