

基于 Matlab 的供水管网余氯衰减模拟

董晓磊¹, 信昆仑¹, 刘遂庆¹, 于景洋², 徐 军³

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3 大丰市自来水有限公司, 江苏 大丰 224100)

摘 要: 建立了基于拉格朗日时间驱动法的供水管网余氯衰减微观模型, 使用具有科学计算和绘图功能的 Matlab 软件和 Access 数据库建立了供水管网余氯衰减动态模拟系统。该模拟系统不仅可以对不同工况、不同时刻供水管网的余氯衰减进行动态模拟, 而且还可以动态绘制管网余氯等值线图 and 等值面图。经算例验证, 该模拟系统可准确地进行管网余氯衰减动态模拟, 通过分析模拟结果和系统绘制的动态余氯等值图可以全面反映不同时刻供水管网所有节点的余氯衰减状况。

关键词: 供水管网; 余氯衰减; 动态模拟; 时间驱动法; Matlab

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000 - 4602 (2009) 01 - 0049 - 04

Modeling Residual Chlorine Decay in Water Distribution Network Based on Matlab

DONG Xiao-lei¹, XIN Kun-lun¹, LIU Sui-qing¹, YU Jing-yang², XU Jun³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2 School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3 Dafeng City Water Supply Co., Ltd., Dafeng 224100, China)

Abstract: A decay model of residual chlorine in the water distribution network was established using the Lagrangian time-driven method. The network model is based on the program Matlab which computes and generates figures, and the program Access which provides a database. The system can simulate the decay of residual chlorine in the network dynamically, and also generate 2-D contour maps of residual chlorine. After analyzing the simulation results and contour maps, the model can reflect the decay of residual chlorine at all nodes of the network under different hydraulic conditions and during different time periods.

Key words: water distribution network; residual chlorine decay; dynamic simulation; time-driven method; Matlab

余氯是供水管网水质评价的一个主要指标, 为了准确全面地了解管网水质变化情况, 应建立管网余氯衰减模型 (包括主体水余氯衰减模型和管壁余氯衰减模型)。其中主体水余氯衰减模型包括一级动力学衰减模型和二级组合动力学衰减模型^[1]、 n

级模型 ($1 < n < 2$)、一级平行模型、一级限制模型等。管壁余氯衰减模型^[2]包括零级模型和一级衰减模型。余氯在水中的衰减是复杂反应, 受很多因素的影响, 主体水余氯衰减系数 (k_b) 受到温度、初始氯浓度、水中有机物浓度等的影响^[3]。有研

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2006BAJ08B03)

究^[4,5]认为,在反应的不同阶段 k_b 值也不相同。

吴晨光等^[6]研究表明,一级余氯衰减模型是所有模型中较简单、应用较广泛、适合计算机运算的模型,在实际工程中应用较多^[7]。为直观全面地了解不同时刻管网各节点的水质变化,笔者使用拉格朗日时间驱动法建立管网余氯衰减一级微观模型,运用科学计算软件 Matlab 和 Access 软件实现了管网余氯衰减的动态模拟和余氯等值图动态绘制。

1 供水管网余氯衰减模型

余氯衰减模型采用主体水余氯衰减一级反应和管壁余氯衰减一级反应。主体水和管壁余氯衰减一级反应模型分别见式 (1)、(2)。

$$\frac{dc}{dt} = -k_b c$$

(1)

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{k_w k_f}{r_h (k_w + k_f)} c$$

(2)

式中 k_b ——管道主体水余氯衰减系数, s^{-1}
 k_w ——管壁反应速率系数, m/s
 k_f ——质量转移系数, m/s
 r_h ——水力半径, m
 c ——管道水中余氯的浓度, mg/L

管道余氯衰减模型:

$$\frac{dc}{dt} = -kc = -\left[k_b + \frac{k_w k_f}{r_h (k_w + k_f)}\right] c$$

(3)

对式 (3) 积分可得:

$$c_t = c_0 \cdot \exp(-k \cdot t)$$

(4)

式中 c_0 ——余氯初始浓度, mg/L
 c_t ——经过 t 时后余氯浓度, mg/L
 t ——时间, s

2 余氯衰减模型的求解方法

Rossman 等^[8]指出拉格朗日法适于管网内化学物质的模拟,欧拉法则适于水龄的模拟,总体上看拉格朗日法在计算时间和空间效率上更优,同时拉格朗日时间驱动法不会出现任何数值发散的现象,所以选择拉格朗日时间驱动法进行余氯衰减模拟。

拉格朗日时间驱动法^[8]能够追踪管网中每条管道的水流变化。由于水质步长明显小于水力步长,使得水流在管道内发生变化。随着时间的推移,当水进入管道时大多数上游水流片段的体积将变大,而当水离开管道时下游水流片段的体积将变小,在它们之间的片段体积将不变。在每个水质时间步长结束时都发生下列步骤:

- ① 每一水流片段的水质将被更新,以反映在这一个时间步长内发生的任何变化;
- ② 来自于管道的首个水流片段的水进入节点,在节点混合后产生新的水质值;
- ③ 节点处、外部流入的水流也将影响水质,调蓄池的水质更新取决于水池的混合模型;
- ④ 水流从节点、水池、水库流出,如果流出管道末端的水质与出流节点水质之差大于允许值,则在出流管道中产生新的水流片段。如果水质差低于允许值,则在该时间步长后流出管道末端片段的水流体积将随着流入量的体积而不断增大。

供水管网余氯衰减模拟过程见图 1。

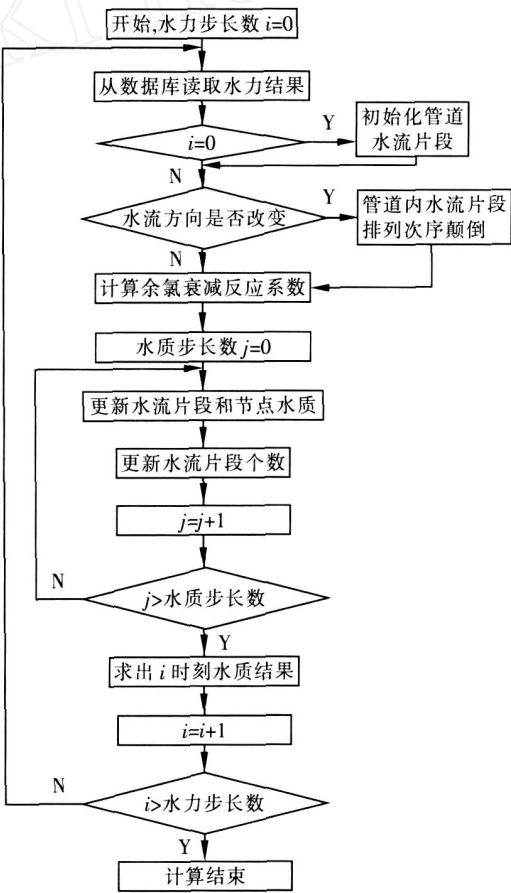


图 1 供水管网余氯衰减模拟步骤

Fig 1 Schematic diagram of modeling decay of residual chlorine in water distribution network

3 供水管网余氯等值线图的动态绘制

系统在余氯衰减模拟计算之后可以动态绘制余氯等值线图 and 余氯等值面图。通过和数据库连接,从中读取数据后,首先绘出管网拓扑图,之后动态绘出所有时刻管网余氯等值线图和管网余氯等值面

图,从而直观了解不同时刻管网各节点的余氯变化。

3.1 供水管网拓扑图的生成

① 使用 sparse 函数将管道数据矩阵压缩为稀疏矩阵,使用 meshgrid 函数生成沿 X、Y 轴的均一平面格栅矩阵;

② 使用 gplot 函数绘出所有管道;

③ 使用 plot 函数绘出所有节点;

④ 使用 text 函数绘出节点编号。

3.2 供水管网余氯等值线图的动态绘制

从数据库中读出所有节点的余氯值,以一个矩阵表示,当需要绘出某水力步长余氯等值线图时,从矩阵中读取该步长的数据用于绘图,之后读取下一步长的数据并绘图,直至最后一个步长从而实现余氯等值线图的动态绘制。其具体步骤如下:

① 使用 griddata 函数将当前水力步长下的余氯计算数据格栅化;

② 使用 contour 函数绘出余氯等值线图,使用 clabel 函数绘出图例,用 text 函数绘出图名。

3.3 供水管网余氯等值面图的动态绘制

同余氯等值线图绘制类似,不同的是在绘制图形时需采用 contourf 函数。

4 算例分析

以图 2 所示的供水管网为计算实例,管道节点的构造属性和拓扑属性见该图。该供水管网共有 16 个节点、20 条管道,其中 21、22 为水泵,水源点为 15、16。模拟时间为 1 h。

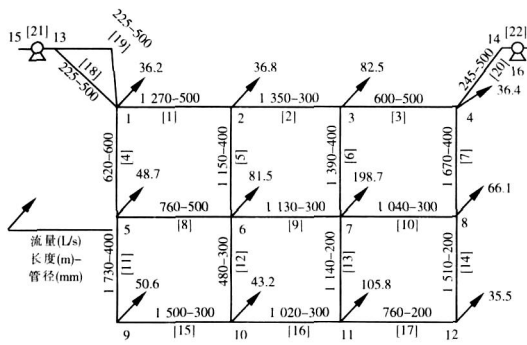


图 2 供水管网余氯衰减模拟例图

Fig 2 Illustration of modeling decay of residual chlorine in water distribution network

参数设置:水力时间步长采用 15 min,水力模型解法采用线性化算法^[9],水力计算结果来自文献[9],水头损失公式采用海曾—威廉公式,图中管道均考虑为旧铸铁管,海曾—威廉系数 C 取 100。水

质时间步长采用 1 min,水源节点 15 和 16 的出水余氯浓度取 1.00 mg/L,其余节点余氯初始浓度取零。余氯衰减系数 k_b 的影响因素很多,取值差异很大,根据文献[10]取 0.1 h^{-1} ,管壁反应速率系数 $k_w = F/C$ (F 为管道粗糙系数, C 为海曾—威廉系数)。

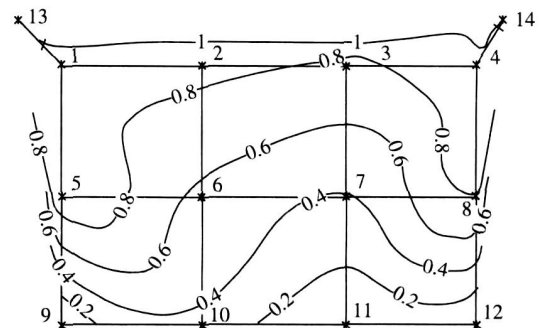
管道为旧铸铁,故 F 取 0.014, C 取 100,求得 $k_w = 0.00014\text{ m/s}$,并进行模拟计算。为了检测模拟系统计算的精确度,采用平均绝对误差、平均相对误差和均方差作为评价指标,将模拟结果与美国环境署开发的 EPANET 2 软件的计算结果进行比较,结果见表 1。

表 1 模拟结果分析

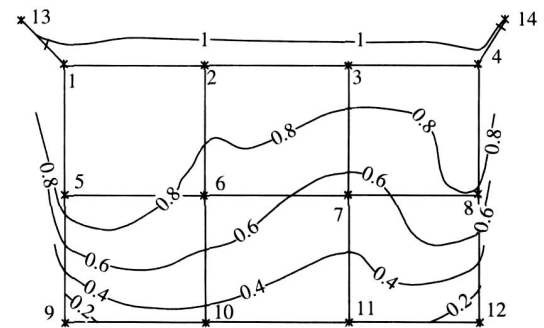
Tab 1 Analysis of simulation results

项 目	平均绝对误差 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	平均相对 误差 /%	均方差 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
数 值	0.036 1	6.74	0.044 9

由表 1 可知,这种误差在实际工程中是可以接受的。余氯衰减模拟计算之后,系统动态绘制部分时刻下供水管网的余氯等值线和等值面图,结果见图 3、4。



a. 45 min 时管网余氯等值线图



b. 60 min 时管网余氯等值线图

图 3 供水管网余氯等值线图

Fig 3 2-D contour map of residual chlorine in water distribution network

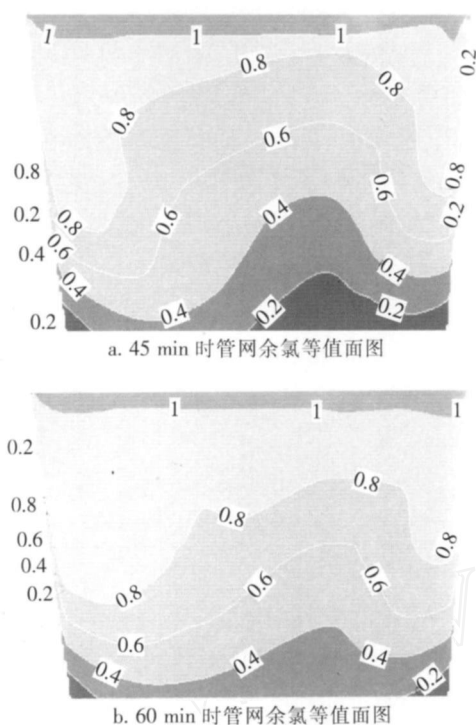


图 4 供水管网余氯等值面图

Fig 4 2-D filled contour map of residual chlorine in water distribution network

5 结论

① 所建立的模型模拟系统包含数据库,可以实现高效的数据输入输出、数据查询和数据分析。

② 模拟系统通过动态绘制不同时刻供水管网的余氯等值线和等值面图,直观反映了管网内各节点余氯值的变化,并全面了解不同时刻管网各节点的水质变化。

③ 通过对模拟结果以及余氯等值面图进行分析,可以为管网水质监控、寻求提高管网水质的措施、寻求管网水质事故发生的时间和地点、管理管网

水质等提供科学依据。

参考文献:

- [1] 周建华,赵洪宾,薛罡. 配水管网中与有机物反应的余氯衰减动力学模型[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 45 - 49
- [2] Rossman L A. EPANET 2 Users Manual[M]. Washington D. C.: USEPA, 2000
- [3] 罗旖旎,黄赛琴,何文杰,等. 余氯在主体水中衰减情况的分析[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2006, 22(5): 38 - 42
- [4] 徐洪福,赵洪宾,张金松,等. 输配水系统中水体余氯的衰减规律研究[J]. 中国给水排水, 2003, 19(8): 15 - 18
- [5] 王旭晔,黄廷林,邱尚志,等. 余氯静态衰减过程及影响因素分析[J]. 给水排水, 2006, 32(11): 8 - 12
- [6] 吴晨光,孙雨石,赵洪宾,等. 环状管网模拟余氯衰减模型[J]. 中国给水排水, 2006, 22(1): 9 - 12
- [7] 邓涛,宁冉,吴晨光,等. 供水管网中余氯浓度模拟计算及工程应用[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2006, 23(增刊): 153 - 155
- [8] Rossman L A, Boulos P F. Numerical methods for modeling water quality in distribution systems: A comparison[J]. J Water Resour Plan Manage, 1996, 122(2): 137 - 146
- [9] 于景洋. 供水管网水力动态模拟[D]. 合肥:合肥工业大学, 2006
- [10] 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

电话: (021) 65985869

E-mail: dxldxl1981@126.com

收稿日期: 2008 - 06 - 14

防止水源枯竭和水体污染,

保证城乡居民饮用水安全