

文章编号:1000-2472(2003)05-0061-04

## 事件驱动法模拟输配水管网中余氯浓度变化\*

许仕荣<sup>1</sup>, 李斌<sup>2</sup>, 李黎武<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南长沙 410083)

**摘要:**考虑余氯在水体中衰减和与管壁发生反应两个消耗输配水管网中余氯的主要途径,依据这两个途径组合下的余氯浓度衰减模型,利用事件驱动模拟机制及事件调度算法,实现对输配水管网中余氯浓度变化的动态模拟.文中给出了一个模拟实例,模拟结果与真实的余氯浓度变化情况体现出良好的吻合性.

**关键词:**输配水管网;事件驱动;余氯浓度;动态模拟**中图分类号:**TU991.33**文献标识码:**AModeling Chlorine Residual in Water Distribution Network  
Using Event-Driven MethodXU Shi-rong<sup>1</sup>, LI Bin<sup>2</sup>, LI Li-wu<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan Univ, Changsha 410082, China;

2. College of Information Sci and Eng, Center South Univ, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The characteristic of chlorine residual variations in water distribution networks was considered as a combination of decaying in the bulk liquid in the two aspects, which combine the both two aspects, the chlorine residual in water distribution network was modeled dynamically, using an event-driven modeling framework and an event-operation algorithm. Also a modeling case is presented, and the computing results well corresponded with the true situations.

**Key words:** distribution networks; event-driven; chlorine residual; dynamic modeling

氯是我国目前使用最广泛的一种饮用水消毒剂.在管网中添加氯以维持一定的余氯浓度是维持管网水质的主要手段之一,因此,余氯浓度也成为衡量管网水质好坏的一个重要指标.由于对余氯浓度在输配水管网中变化的机理研究相对成熟,目前国内外管网水质变化模拟的一个最主要指标便是余氯.本文采用适合于离散动态系统模拟的事件驱动法来实现对管中网余氯浓度变化的模拟.

## 1 余氯在管网中衰减的动力学模型

引起余氯在输配水管网中衰减的影响因素很多,其中主要的且目前研究比较深入的有两大原因:余氯与水体中存在的多种有机物和无机物发生反应;通过管壁附近层流层的质量转输与附着在管道或水池等其他管网组件壁上的生物膜发生反应.

## 1.1 余氯在水体中的衰减

设水体中的余氯浓度  $C$ , 初始余氯浓度  $C_0$ , 学者 R. M. Clark 等<sup>[1]</sup> 给出余氯浓度在水体中随时间的衰减函数为

$$C = \frac{C_0(1-K)}{1 - Ke^{-M(1-K)t}} \quad (1)$$

函数中的两个参数  $K, M$ , 可由如下两个经验

\* 收稿日期:2002-10-10  
基金项目:湖南省建委资助课题[湘建科(2001)字第428号]  
作者简介:许仕荣(1962-),男,湖南永州人,湖南大学教授.

式求得

$$K = e^{0.32(C_{A0})^{-0.44}(TOC)^{0.63}(pH)^{-0.29}(T)^{0.14}} \quad (2)$$

$$\ln(M) = -2.46 - (0.19 TOC) - (0.14 pH) - (0.07 T) + (0.01 T \cdot pH) \quad (3)$$

式中 TOC 为总有机碳, mg/L; T 为摄氏温度, °C.

### 1.2 余氯与管壁生物膜的反应和质量转移

给定余氯在容器壁上与生物膜反应的衰减速率常数  $k_w$ , 整个过程中余氯衰减的微分动力式可表述为<sup>[2]</sup>

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{k_f}{r_h} \left( C - \frac{k_f C}{k_w + k_f} \right) = -\frac{k_w k_f C}{r_h (k_w + k_f)} \quad (4)$$

式中  $r_h$  为水力半径, m;  $k_f$  为层流层到管壁的余氯传质系数, m/d.

且  $k_f = Sh \frac{D}{d} \quad (5)$

式中  $Sh$  为舍伍德数;  $d$  为管径;  $D$  为余氯在水中的扩散系数(20 °C 时, 为  $0.10 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{d}$ ).

舍伍德数可以用以下两式来求得

当  $Re < 2300$  时

$$Sh = 3.65 + \frac{0.0668(d/L)ReSc}{1 + 0.04[(d/L)ReSc]^{2/3}} \quad (6)$$

当  $Re \geq 2300$  时

$$Sh = 0.023Re^{0.83} Sc^{0.333} \quad (7)$$

式中  $Re$  为雷诺数( $Re = \frac{ud}{\nu}$ );  $Sc$  为施密德数( $Sc = \frac{\nu}{D}$ );  $L$  为管壁沿水流方向长度, m;  $\nu$  为水的运动粘滞系数(20 °C 时, 为  $0.09 \text{m}^2/\text{d}$ );  $u$  为水的流速, m/s.

## 2 控制模拟进程的事件调度法

### 2.1 事件驱动模拟机制

根据所采用的坐标系的不同, 实现对输配水管网水质变化动态模拟的数值方法可分为欧拉法和拉格朗日法.

常用的实现欧拉法的数值模拟方法包括有限差分、有限元模型和离散体积模型. 拉格朗日法可通过时间驱动机制和事件驱动机制来实现. 其中事件驱动机制在节省存储量和计算时间及减小数值计算弥散上均十分有效<sup>[3]</sup>. 有关输配水管网中水质动态变化的事件驱动模拟机制的详细说明可参考文献<sup>[4]</sup>.

### 2.2 事件调度法

在离散动态系统的计算机模拟中, 用来控制模

拟进程的常用算法有活动扫描法, 进程交互法, 事件调度法等, 其中事件调度法在逻辑结构上直接与事件驱动机制相对应, 最易于实现.

事件调度法的基本思想是, 将响应事件的过程作为算法的基本单元, 按照事件发生的先后顺序, 不断执行相应的事件响应进程. 每一已经确定其发生时间的事件都有与其相应的能响应该事件的实体, 实体的事件响应活动执行对该事件的处理进程, 改变系统的状态, 并安排后续的事件. 其基本流程如图 1 所示:

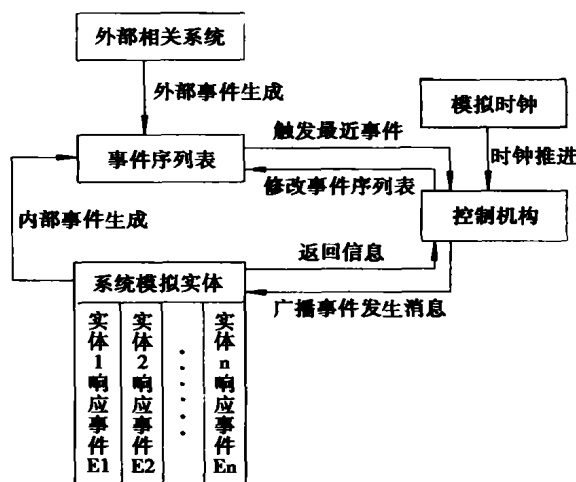


图 1 事件调度法基本流程

Fig. 1 The basic flow chart of event scheduling

### 2.3 事件序列列表

事件序列列表统一管理各类事件, 其预期发生时间各不相同. 事件序列列表必须选择所有预期事件中其预期发生时间距模拟时间最近的那一个来触发. 因此, 事件序列列表必须能实现依据预期发生时间对表中各预期事件排序的能力. 对于复杂的市政输配水管网, 模拟过程中动态生成的预期事件非常的多, 而事件序列列表的每一次触发, 都必须事先对序列列表进行排序. 排序操作十分频繁, 宜选用高效的排序算法如归并排序.

### 2.4 并发事件的处理

模拟过程当中, 有可能出现多个事件的预期发生时间在同一时刻. 由于数字个人计算机本质上只能顺序处理各种指令, 因此在进行模拟时, 必须事先安排对并发事件的处理.

对于同一时刻发生的不同类事件, 如在同一时刻有水力事件和水质事件都发生, 则根据不同类型

事件之间的逻辑关系和事件的重要性,对各类事件设定不同的触发优先级。

对于同一时刻发生的同类事件,如在同一时刻有多个水流单元体到达目标节点,则随机顺序触发各个事件。

### 3 模拟实例

美国康州中南水务局(SCCRWA)Cherry Hill / Brushy Plains 服务区的输配水管网如图 2 所示。1991 年 8 月 13 日到 15 日,研究人员对该管网进行了连续 54 h 的余氯浓度和氟化物浓度采样检测,共在管网中的 9 个不同采样点获得了 181 组有价值的原始数据<sup>[5,6]</sup>。

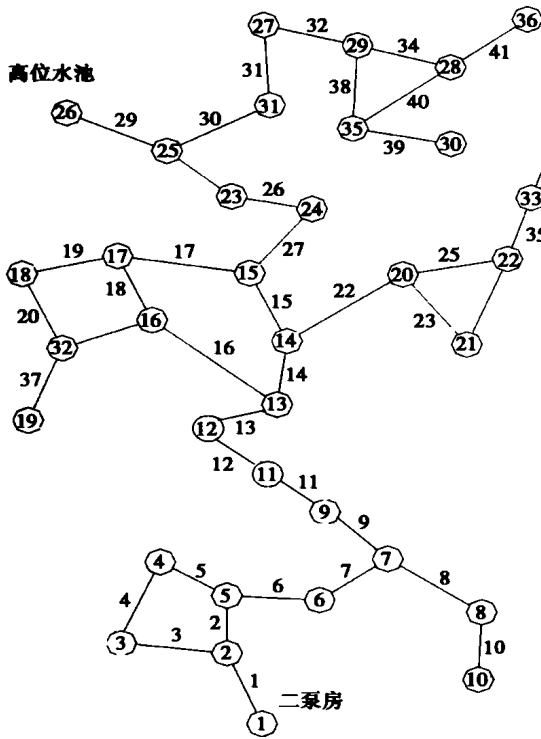


图 2 管网示意图

Fig. 2 The sketch map of pipe network

不失一般性,选取节点 3 和节点 6 的余氯浓度用事件驱动法进行计算机模拟。同时,为了更清楚的看出模拟的效果,笔者还使用由美国国家环保局(USEPA)研制的专业管网水质变化模拟软件 EPANET1.1,以同样的计算参数对节点 3 和节点 6 的余氯浓度进行对比模拟。该软件采用了欧拉法中的离散体积元素法来实现对管网水质变化的动态模

拟,其实测值和最终的模拟值见表 1。

实测值与模拟值的图示如下:

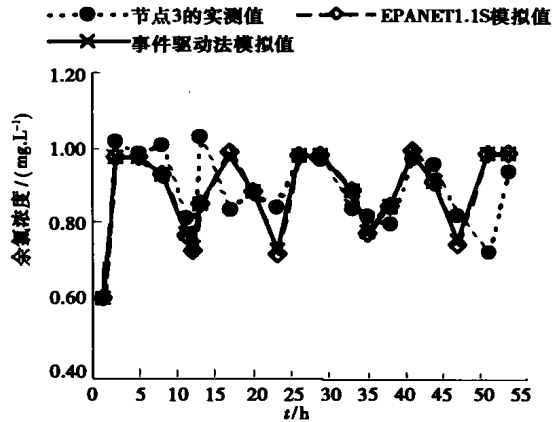


图 3 节点 3 的模拟值与实测值

Fig. 3 Simulant value and measured value of node 3

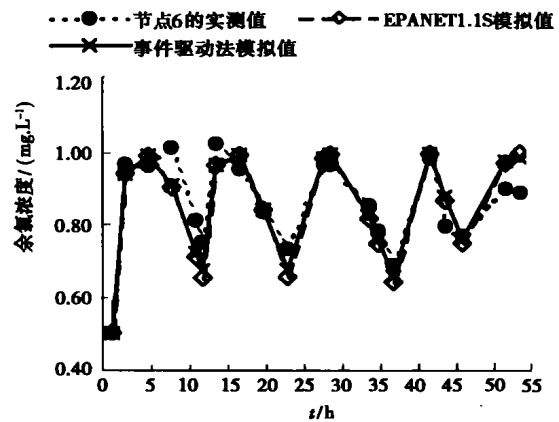


图 4 节点 6 的模拟值与实测值

Fig. 4 Simulant value and measured value of node 6

采用下述三项指标对上述整体的模拟结果进行评价:(以下各式中,  $y_i$  为实际值;  $y_i$  为模拟值;  $n$  为模拟数据个数)

$$1) \text{ 平均绝对误差: } MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (8)$$

2) 平均绝对百分比误差:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (9)$$

3) Theil 不等系数

$$U = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 / n}{\sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2 / n + \sum_{i=1}^n y_i^2 / n}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2 / n + \sum_{i=1}^n y_i^2 / n}}{2}}} \quad (10)$$

其中:  $0 \leq U \leq 1$ ,  $U \rightarrow 0$  精确度高;  $U \rightarrow 1$  精确度差。

表 1 节点 3 和节点 6 的余氯浓度值

Tab.1 The residual chlorine density value of node 3 and node 6

节点 3 的情况				节点 6 的情况			
采样时间 /h	实测值 /(mg·L <sup>-1</sup> )	EPANET1.1 模拟值 /(mg·L <sup>-1</sup> )	事件驱动法 模拟值 /(mg·L <sup>-1</sup> )	采样时间 /h	实测值 /(mg·L <sup>-1</sup> )	EPANET1.1 模拟值 /(mg·L <sup>-1</sup> )	事件驱动法 模拟值 /(mg·L <sup>-1</sup> )
0	0.59	0.59	0.59	0	0.50	0.50	0.50
2	1.02	0.98	0.98	2	0.97	0.94	0.94
5	0.99	0.98	0.98	5	0.96	0.99	0.99
8	1.01	0.93	0.93	8	1.01	0.90	0.91
11	0.81	0.76	0.77	11	0.81	0.71	0.72
12	0.72	0.72	0.73	12	0.75	0.65	0.67
13	1.03	0.85	0.85	14	1.02	0.96	0.96
17	0.83	0.99	0.98	17	0.95	0.99	0.99
20	0.88	0.88	0.88	20	0.83	0.84	0.84
23	0.84	0.71	0.72	23	0.73	0.65	0.67
26	0.98	0.98	0.98	28	0.96	0.98	0.98
29	0.97	0.98	0.98	29	0.96	0.99	0.99
33	0.83	0.88	0.88	34	0.85	0.81	0.82
35	0.81	0.76	0.77	35	0.78	0.74	0.75
38	0.79	0.84	0.84	37	0.68	0.63	0.65
41	0.97	0.99	0.98	42	0.98	0.99	0.99
44	0.95	0.90	0.90	44	0.79	0.86	0.87
47	0.81	0.73	0.74	46	0.76	0.74	0.75
51	0.71	0.98	0.98	52	0.89	0.96	0.97
54	0.93	0.98	0.98	54	0.88	0.99	0.98

对节点 3 和节点 6 的模拟效果评价见表 2

表 2 模拟效果评价表

Tab.2 The evaluation sheet of simulant effect

评价指标	节点 3			节点 6		
	MAE	MAPE	U	MAE	MAPE	U
EPANET1.1	0.0640	0.0757	0.0536	0.0510	0.0602	0.0357
事件驱动法	0.0615	0.0728	0.0522	0.0460	0.0536	0.0324

由表 2 可知,事件驱动法的模拟结果基本反映了管网中真实余氯浓度变化的规律,其模拟的精度较高,能满足工程实际的需要,而且,用事件驱动法对大型的市政输配水管网中余氯浓度变化的动态模拟在计算的时间和存储空间上的效率明显较传统的方法为优。

## 参考文献

- [1] CLARK R M. Chlorine demand and TTHM formation kinetics: a second-order model[J]. J Water Resour Plng and Mgmt, 1998, 124(1):16-24.
- [2] HELENE BARIBEAU. Changes in chlorine and DOX concentrations in distribution systems[J]. J AWWA, 2001, 93(12):102-114.
- [3] ROSSMAN L A, BOULOS P F. Numerical methods for modeling water quality in distribution systems: a comparison[J]. J Water Resour Plng and Mgmt, 1996, 122(2):137-146.
- [4] 李斌. 城市输配水管网水质变化的动态模拟[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2002.
- [5] ROSSMAN L A. Modeling chlorine residuals in drinking water distribution systems[J]. J Envir Engrg, 1994, 120(4):803-820.
- [6] ROSSMAN L A. Epanet Users Manual Version 1.1[M]. Cincinnati, Ohio: Drinking Water Research Division, Risk Reduction Engineering Laboratory, 1994.