



# 供水管网多点加氯优化选址方法的研究

刘 渊<sup>1,2</sup>, 王慧斌<sup>2</sup>, 崔建国<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西省城乡规划设计研究院, 山西 太原 030001)

**摘 要:** 为了使管网运行调节更加灵活, 把加氯点位置的选择和加氯量的确定分开来进行优化, 基于图论的有关理论, 通过分析供水管网的图形结构和水力特性, 建立了加氯点有效作用矩阵, 并对作用范围的重合度进行分析, 试图在不涉及加氯量的前提下, 寻求一种供水管网多点加氯优化选址的方法, 为多点加氯技术在实际管网的运行和调节进行了有益的探索, 大大增强了多点加氯技术的可操作性。

**关键词:** 给水管网; 多点加氯; 优化选址; 安全消毒

**中图分类号:** TU991.33 **文献标识码:** A

近年来, 随着社会经济发展和人民生活水平的提高, 对供水水质的要求越来越高, 饮用水安全消毒问题已经成为研究的热点。为了保证管网水质, 我国《生活饮用水水质卫生规范》(2001) 明确规定: 加氯消毒时, 游离余氯在与水接触 30 min 后, 应不低于 0.3 mg/L, 管网末梢水不应低于 0.05 mg/L。目前大多数水厂消毒都是在管网前端的清水池一次性投加以保证管网末梢余氯达标的氯量。然而, 由于管网系统的庞大性和复杂性, 要保证末梢的余氯量达标, 势必会在管网中形成余氯浓度过高的区域, 特别是靠近加氯点的地区, 这样不仅使水的口感变差, 而且增大了生成三卤甲烷 (THMs) 等有毒有害消毒副产物的风险, 使得供水存在很大的化学安全隐患。因此, 改变传统加氯模式, 推广多点加氯, 既能保证各管段的余氯量, 又能控制余氯水平不至于过高。近年来国内外学者对此进行了很多研究探索<sup>[1-3]</sup>, 取得了一定的成果。如何选择加氯点, 确定各点的加氯量已成为供水管网安全研究的关键。本文基于管网图形结构和水力特性, 运用有效作用范围理论, 对管网多点加氯的优化选址方法进行了探索性研究。

## 1 有效作用范围的概念

国外学者 Byong H Lee 等<sup>[4]</sup>于 1991 年提出了基于监测水量的水质监测点优化选址的方法, Arvner Kessler 等<sup>[5]</sup>于 1998 年提出了基于有效监

测范围的水质监测点优化选址的方法, 合理地补充和发展了水质监测点优化选址理论和方法。国内学者<sup>[6,7]</sup>在这方面也进行了大量的研究。笔者借鉴了他们的方法, 并将其拓展应用于管网多点加氯时加氯点的优化选址中, 提出了基于有效作用范围的加氯点优化选址方法。该问题的出发点是: 当在管网某些节点加氯时, 在一定的有效作用级的限制下, 这些加氯点能作用到管网中所有的节点。利用该方法选择的加氯点集合应该是能够作用到管网中任意一节点, 并且是在可选集合中加氯点个数最少的一种情况。

该方法中将涉及到以下一些概念:

1) 水流路径。指一系列节点或管段的有序序列, 水流可以从其中的任一点, 沿该序列流到序列的最后一个节点或管段。从管网的一点到另一点可能有多条水流路径, 其中按时均流量计算径流时间最短的一条路径称为最短水流路径。

2) 作用有效级。指用于确定加氯点作用范围大小的一个标准。对于一个确定的加氯点, 其作用有效级越大, 相应的作用范围就越广。一般作用有效级可以简单地用加氯点与考察节点之间的水流时间和该管段的余氯衰减系数的乘积表征。这里为了讨论问题的方便, 我们认为管段的衰减系数相等, 这样本文中我们仅用节点之间的水流时间来表示。

3) 有效作用范围。指在所研究的周期工况内, 某一加氯点加氯时所能起到消毒作用的节点的集

合,当选定一个合理的加氯点集合时,该集合中所有加氯点的有效作用范围的并集应该是整个管网所有的节点。

4) 重合度。在实施管网多点加氯时,各个加氯点的作用范围会存在重合现象,重合范围的大小就定义为重合度。显然,加氯点个数最少的集合是最优选择,但是,往往会有多个加氯点个数最小的不同集合,这时,我们就需要从安全性的角度来选择重合度高的集合作为优选集合。重合度越高,就说明当其中一个加氯点情况异常时其中越多的节点可以由其它加氯点来起到消毒作用。

## 2 基于有效作用范围的多点加氯优化选址分析及步骤

以下将用一个示意的多水源供水管网为例说明优化选址的原理及方法。

### 2.1 建立管网辅助图

某管网运行周期中的水力工况已知,依照水流路径的概念建立管网的辅助有向图模型如图1所示。图中线段上的箭头表示水流方向;线段上标注的数字为该运行周期内水流从管段起始点到终止点所需要的平均时间(以小时h计);节点旁边的标注为节点编号。

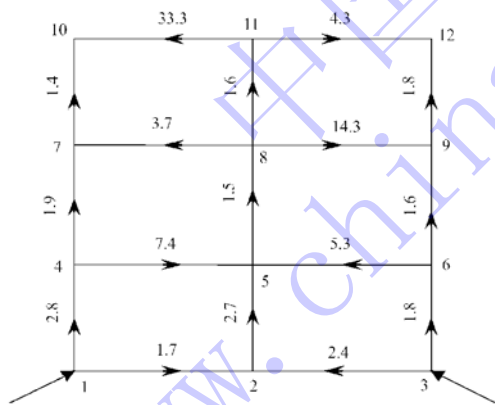


图1 示例管网有向模型

### 2.2 最短水流路径

以节点1和8为例,从节点1到节点8共有2条路径,水从节点1流到节点8所需时间是不一样的。

路径一: 1- 2- 5- 8, 所需时间:  $1.7 + 1.6 + 1.5 = 4.8(h)$ ;

路径二: 1- 4- 5- 8, 所需时间:  $1.8 + 7.4 + 1.5 = 10.7(h)$ 。

由上面的计算可知,节点1到节点8的最短水流路径为: 1- 2- 5- 8, 其对应的最短径流时间为4.8 h。采用弗洛伊得算法<sup>[8]</sup>,在有向图中寻找出两

两之间的最短路径,得到管网任意两节点*i, j*之间的最短水流时间 $t(i, j)$ ,如表1所示。

表1 各节点水流时间计算结果 h

节点 <i>i</i>	节点 <i>j</i>												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	0	1.7	∞	1.8	3.3	∞	3.4	4.8	19.2	5.2	7.5	11.8	
2	∞	0	∞	∞	1.6	∞	6.8	3.1	17.4	8.6	5.8	10.1	
3	∞	2.40	∞	4.0	1.4	9.2	5.5	3.3	11.0	8.2	6.1		
4	∞	∞	∞	0	7.4	∞	1.6	8.9	23.2	3.4	11.6	15.9	
5	∞	∞	∞	∞	0	∞	5.2	1.5	15.8	7.0	4.2	8.5	
6	∞	∞	∞	∞	5.3	0	9.5	6.8	1.91	1.3	9.5	4.7	
7	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0	∞	∞	1.8	∞	∞	
8	∞	∞	∞	∞	∞	∞	3.7	0	14.3	5.5	2.7	7.0	
9	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0	∞	∞	2.8	
10	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0	∞	∞	
11	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	33.3	0	4.3
12	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	0

### 2.3 有效级的确定

将氯消毒剂投加到管网中,其随水流传播到下游各个节点处。由于余氯在管网中不仅随水流扩散而且与水中物质发生着复杂的物理化学反应<sup>[3]</sup>,随着传播距离和停留时间的增加,其浓度必然是逐渐减小的。由于投加量的有限,使得消毒剂不一定对下游的全部范围都能起到消毒效果,这样必然存在一个有效范围的问题。在有效范围以外,余氯浓度将低于某一限值,这是一个非常复杂的水力和反应过程。为简化问题,采用从开始加氯到余氯浓度小于某一个限值而经历的时间,即作用有效级来表征。

加氯点的作用有效级是与加氯量、管网水力条件、水质以及管壁材料有关的一个量,在实际管网运行中,某一加氯点的有效级是动态变化的。据有关研究表明,氯在入水中大致经历2个阶段的反应,第一个阶段是消毒反应阶段,第二阶段是维持抑制阶段。关于两个阶段在反应时间上的划分,国内外学者进行了研究探索。Jadas-hecart<sup>[9]</sup>采用的是4 h,美国EPA<sup>[10]</sup>采用的是5 h, Gallard<sup>[11]</sup>采用的是3 h。在静态条件下的稳态管网中,由于实施多点加氯,初始投加量不需要很大,管网只需要维持较低的余氯水平即可,可以认为经过第一阶段的反应后余氯将低于0.05 mg/L,因此,把第一阶段的反应时间作为有效级是可行的。在本例中作用有效级 $t_c$ 采用4.0 h。

### 2.4 有效作用矩阵的建立

假定管网中某一节点*i*为加氯点,消毒剂将从*i*开始向管网下游扩散,传播到其他各节点*j*的最短时间,即为从*i*到*j*的最短路径所对应的时间 $t(i, j)$ 。在给定有效级 $t_c$ 后,建立管网的有效作用矩阵为:



$$M(i, j) = \begin{cases} 1, & t(i, j) \leq t_e; \\ 0, & t(i, j) > t_e. \end{cases}$$

$t(i, j) > t_e$  时, 说明节点  $i$  投加消毒剂将不会对节点  $j$  产生影响; 当  $t(i, j) < t_e$  时, 说明节点  $i$  投加消毒剂会对节点  $j$  产生影响即对节点  $j$  的作用是有有效的。整个管网节点两两之间的最短径流时间已知, 假定管网加氯点的有效作用级  $t_e = 4.0 \text{ h}$ 。构造管网有效作用矩阵  $M(i, j)$ 。如表 2 所示。

表 2 节点有效作用情况表

拟加氯点	对各节点作用情况											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
3	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
8	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0
9	0	0	0	0	0	0	0	1		0	0	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

注: 表中 1 表示该节点在对应加氯点的有效作用范围内; 0 表示不在对应加氯点的有效作用范围内。

## 2.5 最小全覆盖点集合及重合度分析

由以上得到的有效作用矩阵可以确定在给定有效级  $t_e$  下任意一节点作为加氯点时的有效作用范围。选址的理想目标就是所选择加氯点的集合, 是能够作用到整个管网的全部节点的集合, 并且是可选集合中加氯点个数最少的一个集合。通过求解有向图的极小支配集合的布尔代数算法<sup>[12]</sup>来求解该管网多点加氯的最优加氯点集合。

记所有非多余支配集的幂集为  $\Psi$ , 则可由下面的公式来求解所有非多余支配集:

$$\Psi(v_1, \dots, v_i, \dots, v_n) = \prod_{i=1}^n \left[ v_i + \sum_{v \in N(v_i)} u \right].$$

式中,  $N(v_i)$  表示无向图  $M(V)$  中节点  $v_i$  的邻接点集合。在图 1 所示的示例管网中, 对应表 2 矩阵  $M(i, j)$ , 计算下式:

$$W(i, j) = \frac{Q(i, j)}{\sum_{k \in m} Q(k, j)}.$$

其中  $Q(i, j)$  为管段  $(i, j)$  的管段流量;  $m$  表示所有入流节点  $j$  的管段的集合。可以得到所有的最小非多余支配集有 4 个, 分别是:  $\{1, 3, 4, 8, 9\}$ ,  $\{1, 3, 4, 8, 12\}$ ,  $\{1, 3, 7, 8, 9\}$  和  $\{1, 3, 7, 8, 12\}$ 。

从加氯点数目最少的角度看, 这四个集合都是可选的。但从消毒安全性角度来考虑, 应从中选定一个重合度最高的集合作为加氯点优选方案。在这里, 我们定义重合度  $D_o$  为该加氯点集合中各点的有效范围所包含的管网节点之和, 即

$$D_o = \sum_{j \in S} \sum_{i=1}^n M(i, j).$$

其中,  $S$  为待选定的最少加氯点集合,  $M(i, j)$  为管网的有效作用矩阵。

利用上文提出的重合度的计算方法计算这四个最小集合的重合度为:

$$D_o[\{1, 3, 4, 8, 9\}] = 5 + 5 + 3 + 3 + 2 = 18,$$

$$D_o[\{1, 3, 4, 8, 12\}] = 5 + 5 + 3 + 3 + 1 = 17,$$

$$D_o[\{1, 3, 7, 8, 9\}] = 5 + 5 + 2 + 3 + 2 = 17,$$

$$D_o[\{1, 3, 7, 8, 12\}] = 5 + 5 + 2 + 3 + 1 = 16.$$

可见, 加氯点选址方案  $\{1, 3, 4, 8, 9\}$  的重合度最大, 即集合中的某一个加氯点的作用范围内情况发生异常, 使得余氯量不足时, 其他的加氯点向该作用范围内提供消毒作用的可能性是最大的。因此, 选方案  $\{1, 3, 4, 8, 9\}$  作为加氯点实施多点加氯效果是最优的。

## 3 结论

1) 城市管网多点加氯优化选址方法, 为改进传统的加氯模式进行了有益的探索。优化选择的加氯点分布合理, 而且, 在未涉及加氯量的前提下, 可以优选出加氯点的位置, 这样可以在管网运行工况发生变化而调整加氯量时, 加氯点位置可以固定不变, 增强了多点加氯的可操作性。

2) 在管网实际运行时, 水质水量是动态变化的, 此时加氯点有效级的定义就要充分反应水质和水力条件变化的影响, 作用有效范围将不再是静态不变的, 此时多点加氯应根据管网运行工况的动态改变作出相应的调整。

### 参考文献:

- [1] 张晓健, 陈超. 安全氯化消毒工艺的消毒副产物的控制[J]. 中国给水排水, 2004, 20 (9): 13-16.
- [2] 周鸿, 张晓建. 安全消毒技术展望[C]. 中国土木工程学会水工业分会给水委员会第八次年会会议论文集, 2001.



- [ 3] 徐洪福,赵洪宾. 输配水系统中水体余氯的衰减规律的研究[J]. 中国给水排水, 2003, 19( 8) : 15-18.
- [ 4] Lee B H. Locating monitoring stationa in water distribution systems[J]. JAWWA, 1991, 83( 7) : 60-66.
- [ 5] Avner Kessler. Detecting accidental contaminations in municipal water networks[J]. J Water Resour Plng and Mgmt, 1998, 128( 2) : 192-198.
- [ 6] 周书葵,许仕荣. 城市供水管网水质监测点优化选址的研究[J]. 南华大学学报( 自然科学版), 2004, 18( 3) : 62-66.
- [ 7] 张怀宇. 市政供水管网水质监测点的优化选址[J]. 给水排水, 1996, 22( 10) : 5-8.
- [ 8] 周炳生. Floyd 算法的一个通用程序及在图论中的应用[J]. 杭州应用工程技术学院学报, 1999, 11 ( 3) : 2-9.
- [ 9] Jadas Hecart A, Morer A E, Stitou M, et al. The chlorine demand of a treated water[J]. Water Research, 1992, 26( 8) : 1073-1084.
- [ 10] Boccellia D L, Tryby M E, Uber J G, et al. A reactive species model for chlorine decay and THM formation under rechlorination conditions[J]. Water Research, 2003, 37( 11) : 2654-2666.
- [ 11] Gallard H, von Gunten U. Chlorination of natural organic matter : kinetics of chlorination and of THM formation[J]. Water Research, 2002, 36( 1) : 65-74.
- [ 12] 杨洪. 图论常用算法选编[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.

## Study on Optimizing the Location of Multi-point Chlorination in Water Supply Network System

LIU Yuan<sup>1,2</sup>, WANG Hui-bin<sup>2</sup>, CUI Jian-guo<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering of TUT, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Academy of Urban and Rural Planning Design, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** Multi-point chlorination is a guarantee of water quality in water distribution system. Recently, optimizing the chlorine's adding position and doses at each adding point are integrated into one optimal equation, it limits the practicability of water pipe network's running and adjusting. Authors aimed to divide the two process above, based on the knowledge of graphic theory related, through analyse the graphic structure and hydrodynamic trait of the water supply network system, found the effect matrix of chlorine adding point and analysing the coincidence degree of chlorine action area, try to find a way to optimize the location of multi-point chlorination unrelated the quantity of chlorination in water supply network system, give a beneficial exploration in further study on quantifying the mass of chlorinated, also in running the water pipe system as well. it can enhance the maneuverability of multi-point chlorination.

**Key words:** water supply network system; multi-point chlorination; optimizing location; safty disinfection

(编辑: 张红霞)