



城市供水管网水质监测点优化选址的研究

周书葵¹, 许仕荣²

(1. 南华大学 建筑工程与资源环境学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 利用供水管网图形的拓扑矩阵, 在管网水力计算的基础上, 通过计算节点水量比例矩阵和节点水龄比例矩阵, 提出一种城市供水管网水质监测点的优化选址的方法。

关键词: 给水管网; 节点水龄; 水龄比例矩阵; 水量比例矩阵; 测点选址

中图分类号: TU991. 6; TU992. 01 文献标识码: B

An Optimal Locating of Quality Monitoring Stations in Urban Water Distribution Systems

ZHOU Shu kui¹, XU Shi rong²

(1. School of Architectural Engineering, Resources and Environment, Nanhua University, Hengyang, Hunan 421001, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: Through topology matrix of graphics of water distribution systems, current age proportioned matrix and water fraction matrix of nodes are calculated based on hydraulic calculation of water distribution systems. An of optimal locating of quality monitoring stations in water distribution systems is also put forward.

Key words: water distribution system. current age of the node. current age proportioned matrix. water fraction matrix. water quality monitoring station optimal locating.

0 前言

目前, 随着生活水平的提高, 人们越来越关心饮水水质的安全, 并对城市自来水这一商品的意识日益增强; 另外, 新的《生活饮用水水质卫生规范》(2001) 对城市供水水质作出了更高的要求, 因此, 研究如何对城市供水管网的水质状况进行监

测和控制, 已成为国内外供水企业需要研究和迫切解决的重要课题。

要实现对城市供水管网水质状况的实时在线监控, 要解决的首要问题是如何在适当的位置布置水质监测装置, 以便利用尽可能少的监测装置来获得尽可能多的供水管网中水质状况, 使所获得的监测数据具有代表性并建立与之相应的供水



管网的水质模型。国外学者 Byong H. lee 等(1991)^[1]以覆盖水量 DC(demand coverage) 和国内赵洪宾老师等(1996)^[2]以水质监测度为水质的度量指标,提出了供水管网水质监测点的优化选址的方法,这些研究成果在一定的条件下具有较好的实际应用价值。

以覆盖水量为管网水质指标的供水管网水质监测点的选址方法,主要考虑一节点水量来自其它相关各节点的水量比例,也就是说,若节点*i*的水量全部或大部分来自节点*j*时,则认为节点*i*与节点*j*的水质相似。对于一些管网,特别是枝状管网,由于管线很长,虽然节点*i*的水量大部分来自节点*j*,但因其水流流经时间很长,水质就有可能发生明显的变化,可见这一方法存在着局限性。本文利用节点水龄这一水质量度指标^[3,4]对上述方法加以改进和综合,对城市供水管网水质监测点优化选址方法进行了研究。

1 水量比例矩阵[W]

当在供水管网中对某一流出节点处进行水质监测时,很显然,了解到的仅仅是在这一点处的水质情况。如果进行监测的这一节点为*i*,其节点流量为*d_i*,此时整个供水管网的供水量若为*Q*,则此刻管网中所有比例为*d_i/Q*的水量其水质状况是已知的。当供水管网在某一正常工况下工作时,可以认为水从水源节点出发流向各管网节点,水质随着流经时间的延长而不断下降,也即靠近(指流经时间)水源点的节点(upstream node)的水质必优于远离水源点的节点(downstream node)。这样,供水管网中的任何一个节点的水质便通过管段和管网中其它的部分节点建立了联系。也就是说,当在监测一个节点的水质时,这个节点的水质状况不但反映了该节点本身,也在一定程度上反映了与其有连接路径的部分节点的水质状况。为此用水量比例矩阵[W](water fraction matrix)来度量供水管网中任意两节点间通过管段的这种在水质上的联系。水量比例矩阵定义如下(设管网中节点总数为*n*):

$$[W] = \begin{bmatrix} W(1, 1) & W(1, 2) & \dots & W(1, n) \\ W(2, 1) & W(2, 2) & \dots & W(2, n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W(n, 1) & W(n, 2) & \dots & W(n, n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,元素 $W(i, j)$ ($i, j \in \{n\}$) 表示节点*i*的节点流量 d_i 中来自节点*j*的那一部分所占的比例, $W(i, j)$ 可以分下面两种情况求得:

1) 节点*i* 和 *j* 直接相联

(1) 若节点 *j* 位于节点 *i* 的上游,且节点 *i* 的水全部来自节点 *j*,则有 $W(i, j) = 1$; 并认为: 当 $i = j$ 时,有 $W(i, j) = 1$;

(2) 若节点 *j* 位于节点 *i* 的下游,则有 $W(i, j) = 0$;

(3) 若节点 *j* 位于节点 *i* 的上游,且节点 *i* 的水部分来自节点 *j*,则 $W(i, j)$ 可用下式计算:

$$W(i, j) = \frac{Q(i, j)}{\sum_{k \in m} Q(i, k)} \quad (2)$$

式中 $Q(i, j)$ —— 管段(*i, j*) 的管段流量;

m —— 所有流入节点 *i* 的管段的集合。

2) 节点 *i* 和 *j* 间接相联

(1) 若节点 *i* 和 *j* 间接相联,且没有水流路径连接该两点,这样两节点之间没有任何水质联系,显然有 $W(i, j) = 0$; (2) 若节点 *i* 和 *j* 间接相联,但有水流路径连接该两点,采用下式求得 $W(i, j)$:

$$W(i, j) = \sum_{k, h \in \epsilon} W(i, k) \cdot W(h, j) \quad (3)$$

式中 ϵ —— 水流从节点 *i* 流向节点 *j* 所有流经中间节点的集合。

2 节点水龄比例矩阵

2.1 节点水龄

所谓“节点水龄”是指供水管网中水从水源到某一节点的流经时间^[4]。水源节点(包括泵站和高位水池等)处的水龄值为 0。

在计算节点水龄时,考虑到任一节点的水流来自不同的水源和不同的路径,以及进入该节点的流量也各不相同,那么,任一节点的水龄就等于水在该节点不同的水源供水路径所经历的不同时间的加权平均值,其数学表达式为:

$$T_i = \frac{\sum_{m=1}^N q_{0i}^{(m)} T_{0i}^{(m)}}{\sum_{m=1}^N q_{0i}^{(m)}}; N \in U^i \quad (4)$$

式中 $T_{0i}^{(m)}$ —— 沿节点 *i* 的第 *m* 条供水路径,水从水源流到节点 *i* 所流径的时间;

$q_{0i}^{(m)}$ —— 流径第 *m* 条供水路径的水量;

U^i —— 节点 *i* 所有上游水源供水路径的集合。

2.2 节点水龄比例矩阵

根据上述分析,可以用节点水龄比例矩阵[T] (current age proportioned matrix) 来度量供水管网中任意两节点间的水质上的联系。节点水



龄比例矩阵定义如下:

$$[T] = \begin{bmatrix} T(1, 1) & T(1, 2) & \dots & T(1, n) \\ T(2, 1) & T(2, 2) & \dots & T(2, n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T(n, 1) & T(n, 2) & \dots & T(n, n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中元素 $T(i, j)$ ($i, j \in \{n\}$) 表示节点 j 与节点 i 的水龄比值. $T(i, j)$ 可以分下面两种情况求得:

1) 若节点 i 和 j 之间没有水流路径连接该两点, 这样两节点之间没有任何水质联系, 显然有 $T(i, j) = 0$;

2) 若节点 i 和 j 有间接水流路径连接该两点, 可用下式求得:

$$T(i, j) = \frac{T_j}{T_i} \quad (6)$$

3 节点水质矩阵

由上述过程计算得到的管网节点水量比例矩阵 $[W]$, 很清楚地表明了管网中节点水质的相互关系, 例如, 水质矩阵 $[W]$ 中的行向量 $W[i]$ ($i \in \{n\}$) 表示管网中所有节点在节点 i 的节点流量中所占的比例, 亦即节点 i 的节点流量中有多大比例的流量分别来自管网中的其它节点. 如果节点 i 的进水的全部或大部分是来自上游节点 j 时, 可以认为节点 j “覆盖” 节点 i , 也就是说节点 i 与节点 j 具有相似的水质, 具有水质相似若干个节点就只可设置一监测点就行了. 根据城市供水管网技术经济条件, 选择一个比例作为覆盖标准 CC (coverage criteria). 当管网中某一节点 i 的节点流量中来自另一节点 j 的比例超过了覆盖标准 CC_w ($CC_w \leq 1$) 时, 则认为在给定的监测度下, 节点 j 能对节点 i 的水质起到监测作用, 也即节点 j 覆盖了节点 i .

同样由上述过程计算得到的管网节点水龄比例矩阵 $[T]$, 也很清楚地表明了管网中节点水质的相互关系, 如矩阵 $[T]$ 中的元素 $T(i, j)$ 之值接近于 1 时, 即节点 i, j 的水龄值相差不大时, 说明节点 i 与节点 j 具有相似的水质. 同样给定一个监测标准 CC_T ($CC_T \leq 1$), 当管网中某一节点 i 的节点水龄值与另一节点 j 的比例在允许监测标准 CC_T 之内时, 则认为在给定的监测标准下, 节点 j 能对节点 i 的水质起到监测作用, 反之亦然.

根据上述的讨论, 给定 CC_w 和 CC_T , 按下式建立节点水质关系矩阵, 用 $[R(CC)]$ 表示.

$$[R(CC)] = \begin{cases} 1 & W(i, j) \geq CC_w \\ & \text{且 } CC_T \leq T(i, j) \leq 1/CC_T \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$(i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

4 水质监测点的优化选址

假定一个监测点选址向量 L :

$$L = (l(i)) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

其中:

$$l(i) = \begin{cases} 1 & \text{在节点 } i \text{ 处设置监测点} \\ 0 & \text{不在节点 } i \text{ 处设置监测点} \end{cases}$$

根据上面的分析, 给定监测个数 LN , 问题可以描述为:

$$\max \sum_{i=1}^n DC(i) = \sum_{i=1}^n (l(i) \sum_{j=1}^n d(j)) \cdot [R(CC)](i, j) \text{ st. } \sum_{i=1}^n l(i) \leq LN \quad (9)$$

式中 $d(j)$ —— 为节点 j 的节点流量.

在上述优化模型中, 决策变量 $l(i)$ 的取值仅由 0 和 1 组成, 是一个 0-1 型整数规划问题. 求解 0-1 型的整数规划问题有很多方法, 如穷举法、分枝定界法、深度优先搜索法(DFS) 和隐含枚举法^[5,6]. 通过求解(9) 式, 求出最大覆盖水量的测点集合, 即为城市供水管网中最佳水质监测点集合. 对于具有多个供水工况的供水管网可以参照文献[2] 进行处理.

5 计算实例

某城市供水管网简化后如图 1 所示, 具有 33 个节点(包括水源节点) 46 根管段、两个供水泵站和一个高位水池. 本例取 $k = 1$ (即为单工况), 但为不失一般性, 故以最大日最大小时的供水工况为基本工况, 该工况各节点流量如表 1 所示.

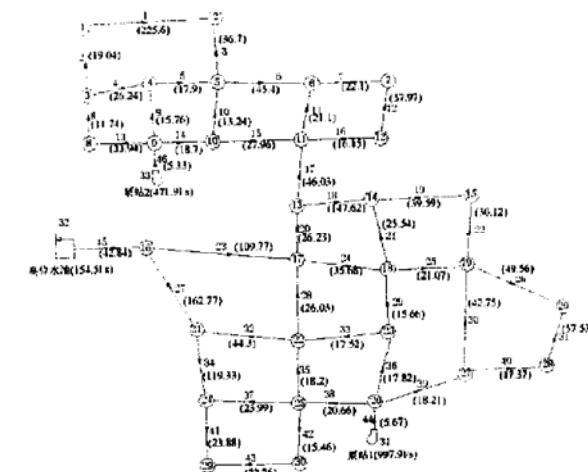


图 1 某城市供水管网图

Fig. 1 Water distribution systems in certain urban



表 1 节点流量 单位:l/s

Table 1 Flow of nodes unit: l/s

节点编号	节点流量	节点编号	节点流量
1	42	18	58.5
2	46.47	19	65.4
3	52.3	20	63.8
4	45.5	21	61.36
5	48.2	22	53.09
6	45.5	23	75.18
7	49.6	24	54.57
8	47.5	25	65.38
9	39.6	26	58.2
10	46.3	27	58.95
11	46.3	28	56.55
12	4.5	29	6.04
13	5.5	30	52.27
14	48.6	31	0
15	6.3	32	0
16	65.6	33	0
17	62.2		

进行水力计算后,各管段水流方向标注如图1所示,括号内数字表示水流流经该管段的时间.

由图论中关于图的概念可知,管网中的节点

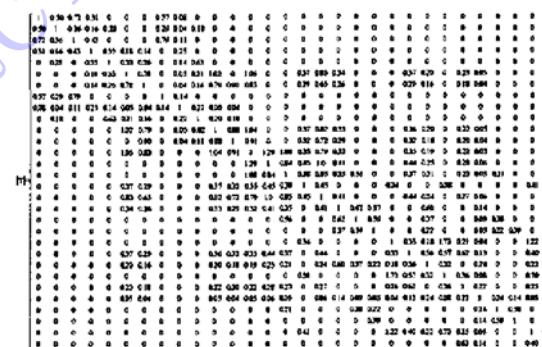
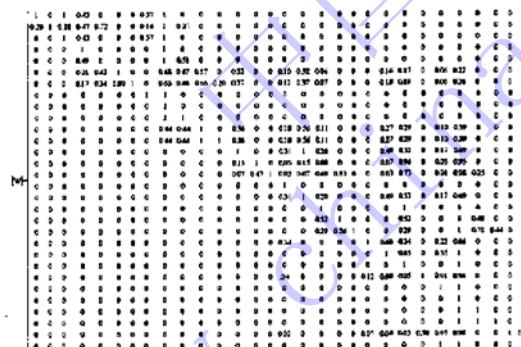
集合对应于图的顶点集合,管网的管段集合相对应于图的有向边的集合,管网图用图的十字链式方式来存储,管网中节点流量和管段流量分别存储在十字链表中的头节点和表节点的相应的信息域中[6]. 经过广度优先搜索找到任意两两节点之间的所有“路径”,再求出水量比例矩阵 W 和节点水龄比例矩阵 T .

根据具体情况,给定监测标准 CC_w 和 CC_T ,再按(7)式求出水质矩阵 $R[CC]$,这里采用分枝定界法求解式(9)这一0-1整数规划问题.为了便于比较,本文选用 $CC_w = 0.60$, $CC_T = 0.85$ 和 $CC_w = 0.85$, $CC_T = 0.85$,并根据给定不同的监测点个数进行了计算,其计算结果如表2.

表 2 计算结果

Table 2 Calculate result

测点数	测点位置	
	$CC_w = 0.6$	$CC_w = 0.85$
$LN = 3$	15, 14, 18	14, 18, 29
$LN = 4$	15, 14, 18, 7	14, 18, 29, 24
$LN = 5$	15, 14, 18, 7, 22	14, 18, 29, 24, 30
$LN = 6$	15, 14, 18, 7, 22, 29	14, 18, 29, 24, 30, 28
$LN = 7$	15, 14, 18, 7, 22, 29, 20	14, 18, 29, 24, 30, 28, 1



6 结论

从上面算例可以看出,计算结果和在实际工作中凭经验选择给水管网水质监测点的位置比较吻合.即供水管网水质监测点通常布置在管网末梢以及供水路径较多的节点上.再分别在各水厂的出水处布置水质监测装置以监测水厂出水水质,这样就可在规定监测点个数的情况下,得到水质监测点的最优选址方案.另外,本文所述监测点选址方法可用于监测城市供水管网中的余氯、浊度、色度、电导率等水质参数.此时,可以利用一种集同时能监测余氯、浊度、色度、电导率等水质参

数为一体的自动监测仪,布置在前述优化选址所获得的测点位置.因此本研究对于监测和控制城市供水管网水质具有重要的指导意义.

参考文献:

- [1] Lee B H. Locating monitoring stations in water distribution systems[J]. J. AWWA, 1991, 83(7): 60~ 66.
- [2] 张怀宇. 市政给水管网水质监测点的优化选址[J]. 给水排水, 1996, 22, (10): 5~ 8.
- [3] 许仕荣, 周书葵. 基于节点水龄的供水管网水质监测点的优化布置[J]. 南华大学学报(理工版), 2003, 17, (3): 13~ 16.
- [4] 伍悦滨. 用节点水龄量度给水管网的水质状况[J]. 给