

基于覆盖水量的监测点优化选址法的缺陷与改进

刘书明,李振瑜,陈晋端,王琦,孟凡琳

(清华大学环境科学与工程系,北京 100084)

摘要:研究了给水管网水质监测点选址的方法,分析了覆盖水量法存在的缺陷,针对这一缺陷,提出了一种基于覆盖水量指数的改进方法.在评价节点的代表性时,该方法同时考虑了总覆盖水量和覆盖水量时间分布对节点代表性的影响,提高了管网水质监测点优化选择的准确度和监测数据的代表性.为了提高优化问题求解的速度,采用了遗传算法求解水质监测点优化选址问题,并将此两类方法应用于2个案例管网.对于案例中的管网,采用布设7个监测点,可有效监控所有95个节点中85%以上的管网水量.同时,实际案例管网的应用表明,与覆盖水量法相比,覆盖水量指数法的计算结果具有更好的代表性.基于此建立的给水管网在线监测网络能够更好地代表管网的水质情况.

关键词:给水管网;监测点;优化选址;遗传算法;安全供水

中图分类号:X832 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)01-0088-05

Flaw of Demand Coverage Based Method for Optimal Locations of Monitoring Stations and Modification

LIU Shu-ming, LI Zhen-yu, CHEN Jin-duan, WANG Qi, MENG Fan-lin

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The method of locating online sensor on a water distribution system for monitoring water quality was investigated. A flaw of demand coverage method was identified. To overcome this flaw, a demand coverage index based method was proposed in this paper. The demand coverage index method evaluates a node's representativeness by taking both the total amount of demand coverage and its temporal distribution into account. This increases the calculation accuracy and data representativeness. In order to increase the speed of optimization, a genetic algorithm was employed to solve the optimization problem in this work. Two example water distribution systems were employed to evaluate the performances of both methods. It was obtained that more than 85% of node demand can be covered by 7 monitoring stations for the example water distribution system with 95 nodes. Example applications show that results from this method have better representativeness than the one from demand coverage method. An online monitoring network based on optimal locations obtained from demand coverage method can better represent water quality of the distribution systems.

Key words: water distribution systems; monitoring; optimal location; genetic algorithm; water-supply safety

饮用水的安全问题一直是社会各界广泛关注的对象之一.通过在管网中设置监测点而监控整个管网的水质状况是保证供水安全、降低最终到达用户的水污染风险的一种有效方法.然而,管网节点数量众多,在每个节点都设置监测设备是不现实的,一种常用的方法是在对管网水质有较大代表性的节点设置监测设备,从而实现用较少的监测设备监控较大范围的管网系统的目标.

常用的表征节点代表性的方法为覆盖水量法.该方法由 Lee 等^[1]最早提出,覆盖水量指的是监测点能够监测到的管网中的水量.当下游节点 j 的水量有大于等于覆盖标准(coverage criteria)的比例来自上游节点 i 时,则认为节点 i 能够被节点 j 覆盖,即通过监测节点 j 的水质能够反映节点 i 的水质状况.覆盖水量的前提假设是管网水质状况从水源点沿水流路径和流经时间不断下降,即“上游”节点的水质必优于“下游”节点的水质.因此,“下游”节点的

水质必然在一定程度上反映了“上游”节点的水质状况,由此建立了管网中各节点间的水质联系,使得通过监控少数几个节点的水质就能够反映整个管网的水质状况. Lee 等^[1]提出建立水质比例矩阵(water fraction matrix)来度量管网中任意两节点间的水质联系,建立覆盖矩阵(coverage matrix),表征节点的代表性,并采用了整数规划方法求解监测点的优化选址问题.在此基础上,众多研究人员探讨了多种求解监测点优化选址的方法,如 Kumar 等^[2]尝试了采用基于贪婪启发式的方法, Al-Zahrani 等^[3]采用了遗传算法求解优化选址问题, Pool^[4]采用了混合整数规划的方法等. Tryby 等^[5]、许仕荣等^[6]、伍悦滨等^[7]探讨

收稿日期:2009-02-21;修订日期:2009-04-23

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z301);国家重点实验室专项基金项目(08K01ESPCT);环境污染控制与质量改善关键技术研究项目(2007DFC90170)

作者简介:刘书明(1976~),男,博士,副研究员,主要研究方向为供水管网模拟分析与管理, E-mail: shumingliu@tsinghua.edu.cn

了以节点水龄表征管网内的水质变化,以节点水龄矩阵(water age matrix)代替水质比例矩阵来度量管网中任意两节点间的水质联系.

张士乔等^[8,9]在 Lee 等^[11]的研究基础上,定义了供水管网水质监测点选址的风险度,开展了利用二进制编码的微粒群算法求解监测点优化选择问题.黄亚东等^[10]针对覆盖水量法中覆盖标准的刚性取值问题,提出了部分覆盖的概念,将单一的覆盖标准扩展为覆盖标准区间,认为当下游节点水量来自上游节点的比例在最小覆盖标准与最大覆盖标准之间时,在下游节点设置水质监测点,不仅能够监测其自身的水质状况,而且可以在一定程度上部分地反映上游节点的水质状况.建立了部分覆盖下水质监测点优化选址的数学模型,对管网水质监测点的优化选址问题进行了研究.同时,也探讨了采用节点水龄法求解监测点的优化选择问题的原理,并在实际供水管网进行了应用.

在应用于多工况条件下的监测点优化选择问题时,上述覆盖水量法以及各种改进方法的一个共同特点是采用了累加覆盖水量,即通过建立各个工况下的水质比例矩阵或者水龄监测度矩阵,计算出节点在各个工况对应的覆盖水量,并求解对应于所有工况的累加覆盖水量[式(1)],以此来判断某节点(或节点组合)是否为最优监测点位置.

$$\text{Max} \sum_{K=1}^K \sum_{i=1}^I d_{ik} y_{ik}$$

(1)

式中, y_{ik} 为 0、1,为覆盖矩阵; d_{ik} 是节点 i 在 k 工况的水量, I 是总节点数, K 是总工况数.然而,这类方法仅仅考虑了总覆盖水量方面的节点代表性,而忽略了覆盖水量在各工况的时间分布特征对节点代表性的影响,从而不可避免地造成计算误差,所求解出的监测点的布置方式并不能真实地反映各个工况下的管网水质.

本研究针对覆盖水量法中存在的缺陷,提出了一种基于覆盖水量指数的管网水质监测点优化选址方法.该方法同时考虑了总覆盖水量和覆盖水量时间分布对节点代表性的影响.

1 研究方法

1.1 覆盖水量法的缺陷

在管网连续运行过程中,管网内的水力学条件等随时发生变化,从而导致各个管段内的水质、组成比例等也随时发生变化.较优的监测点应该能够最大限度地适应不同时段内管网水力学的变化,反映

最多时段内的管网水质.因此,节点具有较大的代表性这一概念包含了 2 个方面的含义:①能够反映最多水量的水质,即有最大的覆盖水量,反映最多节点和管线的水质状况;②能够反映最多时段内的管网水质,即在最多的时段内(或工况条件下),该节点的覆盖水量都是最大.然而,在传统的覆盖水量方法中,仅仅考虑了第一个方面的含义,即最大的总覆盖水量,而没有考虑节点的覆盖水量是否在各个时间阶段(或工况)也是最大的,从而可能导致计算出的最优监测点位置仅仅能够反映较小时间段内的管网水质,从而大大降低了管网监测的有效性,这是传统的覆盖水量法的一个缺陷.

为了更加清楚地阐述这一缺陷,以算例管网 1 (如图 1)为例进一步地说明.假设共有 4 种工况,求解最优的 1 个监测点布置位置.根据覆盖水量法,各个节点在各个工况下的覆盖水量计算如表 1 所示.

根据式(1),节点 4 和节点 5 的总覆盖水量都为

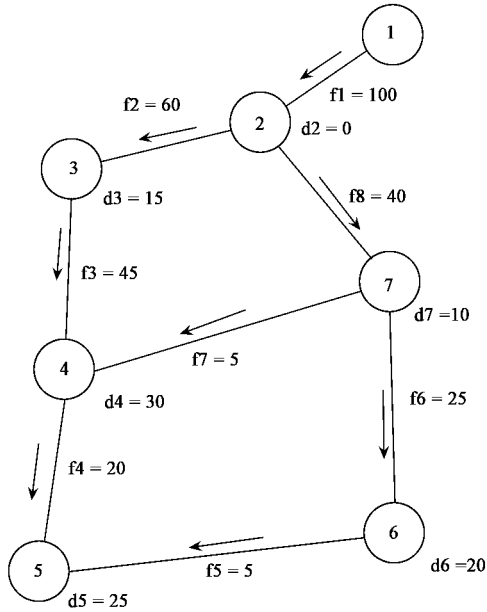


图 1 算例管网 1
Fig. 1 Example network 1

表 1 节点覆盖水量/L

Table 1 Demand coverage of nodes/L

工况	节点						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	15	45	70	30	10
2	0	0	12	45	40	23	8
3	0	0	15	45	35	15	10
4	0	0	20	50	40	25	10
合计	0	0	62	185	185	93	38

185 L,因此,依据覆盖水量法,这2点都能最好地代表整个管网的水质,监测点可以设置在节点4或者节点5.然而,通过比较节点4和节点5在各个工况下的覆盖水量可知,除了在工况1下节点5的覆盖水量大于节点4的覆盖水量(即节点5的代表性大于节点4)以外,其余的3个工况下,节点4的代表性均大于节点5.监测点的布置要求是在管网连续运行的时间内最大限度地反映管网的水质.然而,如果将监测点布置在节点5,在绝大多数时间内,并不能真实地反映整个管网的水质.显然,覆盖水量法不能有效地识别覆盖水量的时间分布对节点代表性的影响,从而造成优化选址的计算误差.

1.2 覆盖水量指数法

覆盖水量时间分布特征采用各个工况下节点覆盖水量的相对大小来表征,节点的覆盖水量指数(demand coverage index,DCI)定义为该节点在所有工况下的总覆盖水量(total demand coverage,TDC)与节点在各个工况下的覆盖水量的累积排序值(accumulation of demand coverage ranking,ADCR)的比值,如式(2)所示:

DCI = TDC/ADCR (2)

ADCR = \sum_{i=1}^j DCR_i (3)

式中,DCR_i为在第*i*工况下的覆盖水量的排序值,*j*为总的工况数.

由此可见,覆盖水量指数不仅包含了总覆盖水量对节点代表性的影响,同时也包含了覆盖水量时间分布特征对节点代表性的影响.在不同监测点组合的情况下,覆盖水量累积排序值的数量级可能不同,从而会对覆盖水量指数的计算产生影响,为了消除这一影响,在覆盖水量累积排序值的计算过程中,进行了标准化处理,即对与某一确定的监测点组合相对应的各个节点覆盖水量的累积排序值集合,统一除以该集合中的最小值.经过标准化处理后,所有监测站点组合条件下覆盖水量的累积排序值集合中的最小值均为1.

因此,多工况条件下的给水管网水质监测点的优化选址问题可以表达为以下最优化问题,

Max \frac{TDC}{ADCR} (4)

约束条件为:

\sum x_i \leq NS (5)

\sum \bar{a}_{ij}x_i - y_i \geq 0 \quad i, j = 1, 2, \dots, n (6)

式中,*x_i*为监测矩阵,表征某一节点是否为监测点,

取值为0或1,*y_i*为覆盖矩阵,取值为0或1,NS为水质监测点的个数,*a_{ij}*为覆盖矩阵的转置矩阵,*i*、*j*为节点,*n*为节点数.

2 算法应用

为了验证覆盖水量指数法的合理性和有效性,选取了一个已发表的算例管网,分别应用覆盖水量法与覆盖水量指数法进行计算,求解最优的1、2、3、4、5、6和7个监测点位置.所采用的算例管网如图2所示,该管网共有95个节点,118条管段,各个工况如表2所示.在计算过程中,覆盖标准取值为50%.

表2 管网多工况条件

Table 2 Multiple demand patterns in the network					
时间段	时变系数	时间段	时变系数	时间段	时变系数
01 00	1.34	09 00	0.96	17 00	0.79
02 00	1.94	10 00	1.1	18 00	0.74
03 00	1.46	11 00	1.08	19 00	0.64
04 00	1.44	12 00	1.19	20 00	0.64
05 00	0.76	13 00	1.16	21 00	0.85
06 00	0.92	14 00	1.08	22 00	0.96
07 00	0.85	15 00	0.96	23 00	1.24
08 00	1.07	16 00	0.83	24 00	1.67

在求解最优的1、2、3、4、5、6和7个监测点位置时,优化过程全部采用遗传算法进行计算,遗传算法的参数取值为:种群规模为100,交叉概率为0.90,变异概率为0.05,进化代数为50代,终止条件为连续20代无明显改进或达到总进化代数.以求解3个监测点的问题为例,对于采用覆盖水量指数法,迭代至第12代即可收敛至最优解,收敛过程如图3所示,显示遗传算法可以有效地解决给水管网水质监测点优化选址问题.

表3列出了求解最优的1个监测点的覆盖水量和覆盖水量指数,受篇幅所限,其中仅列出了部分节点的覆盖水量和覆盖水量指数.如表3中所示,节点5和节点7的总覆盖水量分别为26 213 L和25 551 L,覆盖水量累积排序值(标准化处理后)分别为1.05和1,覆盖水量指数分别为25 056 L和25 551 L,根据覆盖水量法,节点5的总覆盖水量最大,应该为最优监测点位置.然而,根据覆盖水量指数法,最优监测点的位置为节点7.较小的覆盖水量累积排序值意味着在较多的时段内该节点的覆盖水量大于其他的节点.因此,节点7比节点5更具有代表性,更能较准确地反映整个管网的水质.这一现象与算例管网1(表1)相一致,按照覆盖水量法,节点5的总覆盖水量最大,然而,根据覆盖水量指数法,最优监测点

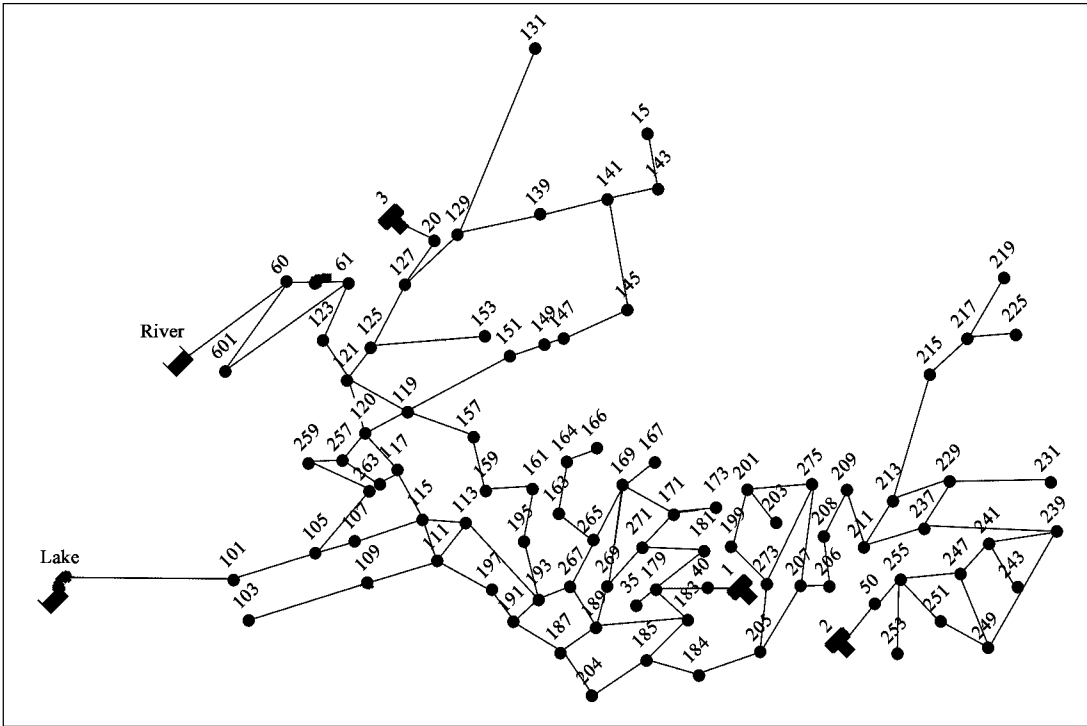


图 2 算例管网 2
Fig. 2 Example network 2

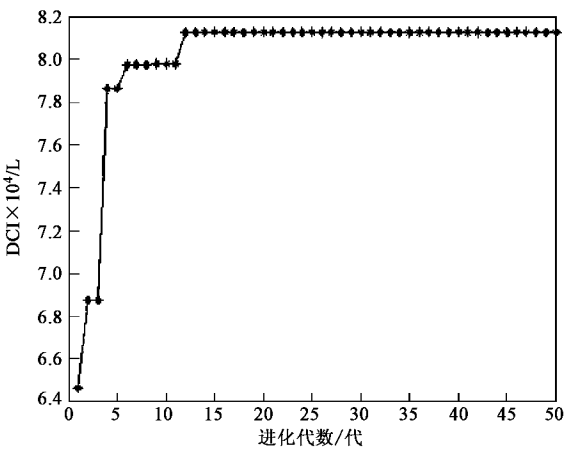


图 3 遗传算法寻优过程
Fig. 3 Optimization using genetic algorithm

的位置为节点 4。表 3 列出的其他节点也存在总覆盖水量较大,而覆盖水量指数较小的现象,如节点 13 和节点 15。由此可见,多工况条件下,由于管网内部水力条件发生变化,从而导致节点在不同工况下(或者时段内)的相对代表性也会发生变化,即一个节点在工况 i 内的覆盖水量较大,其代表性也较大,可以用来表征管网的水质,然而随着工况的变化,该节点在 j 工况下的覆盖水量可能较小,因此如果还用他来表征管网水质,误差是显而易见的。因此,覆

盖水量法仅仅考虑总覆盖水量,不能有效地保证所计算出的监测点位置能够在较多的时段内都能较准确地反映管网的水质,而覆盖水量指数法可以弥补这一缺陷。

表 4 列出了应用覆盖水量法和覆盖水量指数法求解的 1~7 个监测点的最优解。从中可以看出,2 种方法计算出的结果不同。同时,对于相同的监测点数,覆盖水量法得出的覆盖率比覆盖水量指数法得出的高,主要原因是对覆盖水量指数法而言,所得到的最优解是覆盖水量指数最大,而不一定是覆盖水量最大,同样,覆盖水量最大,不一定对应着最大的覆盖水量指数。除此之外,2 种算法都得出,采用 7 个监测点(总节点数为 95),可以有效地监测超过 85% 的管网水量。

3 结论

(1) 覆盖水量法表征节点代表性时存在缺陷,仅仅考虑了总覆盖水量,采用此方法求解在线水质监测点问题时会带来误差。

(2) 由于综合考虑了总覆盖水量和覆盖水量时间分布特征对节点代表性的影响,覆盖水量指数法比覆盖水量法能够更好地表征节点的代表性,从而提高管网水质监测点优化选址的准确度,并提高监

表 3 覆盖水量矩阵与覆盖水量指数(L)¹⁾

Table 3 Demand coverage matrix and demand coverage index(L)									
工况	节点编号								
	...	5	7	14	17	31	63	84	...
.....
20		471.4	462.5	399.2	391.3	372.9	367.6	360.1	
		4	5	6	7	9	10	11	
21		798.6	522.3	450.8	440.2	411.3	400.4	388.8	
		2	5	6	8	10	11	14	
22	674.6	1 135	682.4	827.9	547.8	533.7	517.2	
		6	2	5	4	8	9	11
23		1 211	908.6	784.2	691.5	618.2	620.9	601.4	
		3	5	7	9	12	11	14	
24		719.1	1 118	629.3	611.1	546.3	555.1	513.2	
		6	2	7	9	12	11	13	
TDC/L		26 213	25 551	22 867	23 017	21 239	20 647	19 021	
ADCR	68(1.1)	65(1.0)	137(2.1)	145(2.2)	167(2.5)	171(2.6)	196(3.0)	
DCI/L		25 056	25 551	10 849	10 321	8 266	7 848	6 307	

1)TDC 表示总覆盖水量 ;ADCR 表示覆盖水量的累积排序值 ;DCI 表示覆盖水量指数 ,表中省略号表示由于篇幅所限 ,仅在表中列出了部分节点和工况(总结点数为 95 个 ,工况数为 48 个)

表 4 覆盖水量法与覆盖水量指数法的比较

		覆盖数量法		覆盖水量指数法	
监测点数		最优监测点位置	覆盖率	最优监测点位置	覆盖率
1		5	0.396 2	7	0.393 7
2		7 ,17	0.519 7	7 ,14	0.501 0
3		5 ,7 ,17	0.680 1	5 ,7 ,14	0.603 4
4		7 ,31 ,63 ,84	0.751 1	5 ,7 ,14 ,84	0.699 5
5		5 ,7 ,14 ,59 ,84	0.833 2	5 ,7 ,13 ,14 ,84	0.760 1
6		5 ,7 ,9 ,18 ,63 ,74	0.877 7	5 ,7 ,13 ,14 ,59 ,84	0.809 0
7		5 ,7 ,14 ,18 ,59 ,73 ,84	0.903 3	5 ,7 ,13 ,14 ,16 ,59 ,84	0.855 0

测数据的代表性和可信性.

(3)遗传算法可以有效地解决给水管网水质在线监测点优选问题 ,具有较快的计算速度.

参考文献 :

[1] Lee B H , Deininger R A . Optimal locations of monitoring stations in water distribution system[J]. J Environ Eng-ASCE , 1992 , **118** (1) : 4-16 .
[2] Kumar A , Kansal M L , Arora G . Identification of monitoring stations in water distribution system[J]. J Environ Eng-ASCE , 1997 , **123** (8) : 746-752 .
[3] Al-Zahrani M A , Moied K . Locating optimum water quality monitoring stations in water distribution system[A]. In : Proceedings of the ASCE annual conference on Water Resources Planning and Management . Bridging the Gap : Meeting the World ' s Water and Environmental Resources Challenges[C]. Reston , Va , 2001 . 179-186 .

[4] Pool S . Optimal operation and location of chlorine boosters[D]. Tucson , Ariz . : University of Arizona , 2002 . 135-177 .
[5] Tryby M E , Uber J G . Representative water quality sampling in water distribution systems[A]. In : Proceedings of the ASCE annual conference on Water Resources Planning and Management . Bridging the Gap : Meeting the World ' s Water and Environmental Resources Challenges[C]. Reston , Va , 2001 . 125-131 .
[6] 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 .
[7] 伍悦滨 ,赵洪宾 ,张海龙 . 用节点水龄量度给水管网的水质状况[J]. 给排水 , 2003 , **28** (5) : 36-38 .
[8] 张士乔 ,黄亚东 ,吴小刚 . 供水管网水质监测点优化选址研究[J]. 浙江大学学报 (工学版) 2007 , **41** (1) : 1-5 .
[9] 张士乔 ,黄亚东 ,吴小刚 . 供水管网水质监测点选址风险研究[J]. 自然灾害学报 , 2006 , **15** (1) : 149-154 .
[10] 黄亚东 ,张士乔 ,王直民 ,等 . 部分覆盖下供水管网水质监测点优化选址方法[J]. 浙江大学学报 (工学版) 2008 , **42** (1) : 9-12 .