

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.03.009

供水管网DMA分区及优选分区边界管段方法研究

史文韬^{1,2}, 李红艳^{1,2}, 崔建国^{1,2}, 马熠阳^{1,2}, 李尚明³, 张 翀^{1,2},
王炳俨^{1,2}

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 晋中 030600; 2. 山西省市政工程研究生教育创新中心, 山西 晋中 030600; 3. 太原理工大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 针对目前城市供水管网进行独立计量分区(DMA)方法不成熟、依赖经验较多的问题,提出了一种新的DMA分区方法。以分区边界管段(BPs)长度和BPs中高流量管段数量最小化为目标,定义了两节点间相似度计算公式,利用谱聚类(SC)算法完成对DMA区域的划分。在满足管网压力限制的条件下,以节点压力标准差之和、综合水龄指数和分区成本作为优化目标,建立BPs上阀门和流量计优化布置模型。使用多目标粒子群(MOPSO)算法求解该模型,得到Pareto最优解集;通过优劣解距离法(TOPSIS)进行多个布置方案的决策。将该方法应用于某实际管网进行DMA分区,结果表明,该方法可以顺利完成管网DMA分区,并在改善分区后管网水力水质性能及降低分区成本等方面起到显著作用。

关键词: 供水管网; DMA分区; 谱聚类算法; 多目标粒子群算法; 优劣解距离法

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)03-0060-07

DMA Partition and Optimal Partition Boundary Pipe Selection of Water Distribution Network

SHI Wen-tao^{1,2}, LI Hong-yan^{1,2}, CUI Jian-guo^{1,2}, MA Yi-yang^{1,2}, LI Shang-ming³,
ZHANG Chong^{1,2}, WANG Bing-yan^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China; 2. Innovation Center for Postgraduate Education in Municipal Engineering of Shanxi Province, Jinzhong 030600, China; 3. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: A new district metered areas (DMA) partition method was proposed to solve the problems of immaturity and overreliance on experience of DMA for urban water distribution network partition. The similarity calculation formula between two nodes was defined, and the DMA region was divided by spectral clustering (SC) algorithm, so as to minimize the length of partition boundary pipes (BPs) and the number of large flow pipes in the BPs. Under the condition of meeting the pressure limit of the pipe network, the optimal arrangement model of valve and flowmeter on BPs was established by taking the sum of node pressure standard deviation, comprehensive water node age and partition cost as the

基金项目: 山西省科技成果转化引导专项(201904D131065); 山西省重点研发计划(社会发展领域)项目(201803D31046)

通信作者: 李红艳 E-mail: lhy3162@126.com

optimization objectives. The model was solved by multi-objective particle swarm (MOPSO) algorithm to obtain the Pareto optimal solution set, and the decision of multiple layout schemes was made by technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS). The method was applied to a real pipe network for DMA partition. This method successfully completed the DMA partition of pipe network, and played a significant role in aspects such as improving the hydraulic characteristics and water quality of pipe network and reducing the partition cost.

Key words: water distribution network; DMA partition; spectral clustering algorithm; multi-objective particle swarm algorithm; technique for order preference by similarity to ideal solution

独立计量分区(DMA)作为一种控制漏损和控制管理系统压力的手段被应用于供水管网,其通过在管网中关闭阀门和加装流量计将复杂的管网分隔成若干个不同的计量区域,通过对每个区域进出流量的监控,及时迅速地识别管网中漏点的位置,提高了漏损的控制效率,其控制漏损的作用在我国某些城市也得到了验证。李晓华等^[1]在娄葑东区实施了DMA分区,3年时间将管网漏损率降低了10.7%。单国平等^[2]对南京100个DMA区域进行了主动查漏,查出漏点483处,DMA的平均漏失率下降了27.4%。

目前主流的DMA分区方法有两种:经验法和算法分区。许刚等^[3]通过经验并结合管网实际情况,提出三级分区计量的方法。但依靠经验分区始终存在随机性强的问题,难以使管网的运行状态达到最优。周立典等^[4]基于图划分算法得到分区边界管段(BPs)后,以工程造价为目标函数,利用遗传算法完成分区,但该方法在分区时单纯追求工程造价的最小化,这可能对管网的水力水质特性产生不利影响,且主要依靠经验确定分区数量。Hajebi等^[5]则考虑了多个目标函数和约束条件,然后采用NSGA-II算法实现分区。但是该分区方法还需设计者依靠经验选择最终方案,且在优化目标中未考虑管网水质。

针对现有DMA分区方法存在的缺陷,笔者根据常用的DMA设计规模并结合分区结构模块度 f_q 、分区规模均匀性 f_s 、分区后BPs的数量 f_b 3种评价指标来确定分区数目,避免传统分区方法确定分区数目的盲目性,通过谱聚类(SC)算法优选出理想的BPs,在使用多目标粒子群(MOPSO)算法求解BPs上阀门和流量计优化布置模型时综合考虑分区的经济性和有效性及分区后管网的水力水质特性,最后用

优劣解距离法(TOPSIS)进行科学决策,完成管网DMA分区。

1 划分DMA分区边界

1.1 确定管网的相似度矩阵

在供水管网运行过程中,流量较大、管径较大、长度较长的管段发挥着极其重要的作用,承担管网的主要配水功能,保障管网中用户用水的水量与水压需求。管径较大的管段往往流量也很大,一旦管网中流量较大的管段被截断,会造成管网整体压力的急剧下降,从而给用户的正常用水带来极大威胁。此外,在分区时关闭BPs上阀门,管网水质变差的风险会随着DMA截断管长度的增加而变大。因此定义管网中两节点的相似度为两节点相连管段管径、流量、长度三者的乘积,从而避免SC算法将管网中流量较高、长度较长的管段划分为BPs。相似度的具体计算方法见式(1)。

$$\omega_{ij} = \begin{cases} Q_{ij} D_{ij} L_{ij} & i \neq j (i, j \in N) \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω_{ij} 、 Q_{ij} 、 D_{ij} 、 L_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间管段的相似度值、流量(L/s)、管径(mm)、长度(m); N 为管网中所有节点的集合。

节点间的相似度矩阵 W_{ij} 见式(2)。

$$W_{ij} = \begin{cases} \omega_{ij} & i, j \in E \\ 0 & i, j \notin E \end{cases} \quad (2)$$

式中: E 为管网中所有管段的集合。

1.2 确定供水管网DMA分区数目区间

根据国际上通常采用的DMA设计规模^[6],并结合当地实际情况,选择合适的单个DMA户数范围。若户数太多,使用最小夜间流量法评估该区域漏损程度时会较为困难,降低了漏损监测水平;若户数太少,会导致分区数目过多,分区成本过大。因此,应根据合适的户数范围及当地人口数量确定供水

管网DMA分区数目区间。

1.3 应用SC算法对供水管网进行分区

将供水管网看作是由节点和管段构成的无向图模型,SC算法可以将聚类问题转化成图划分问题。对管网进行分区,就是对管网中不同节点进行聚类,使处于同一区域内的节点相似程度高,不同区域内的节点差异较大。应用SC算法从分区数目区间下限依次增长到分区数目区间上限对管网进行DMA分区,能够得到不同分区数目下各自的分区结果。

1.4 确定最终分区数目

对获得的几种分区结果计算它们的分区结构模块度 f_Q 、分区规模均匀性 $f_s^{[7]}$ 和分区后BPs的数量 f_B 。 f_Q 反映分区结果在分区结构上的优越性,其值在 $[0,1]$ 的范围内越大越好; f_s 反映了分区偏离平均规模的程度,其值越小则分区规模越均匀; f_B 在一定程度上反映了分区成本大小和分区后管理的难易程度,其值越小越好。对这3种指标赋予各自的权重,将其值进行归一化处理后计算满意度。满意度最大的值所对应的分区数目即为最终分区数目。

2 BPs上阀门和流量计优化布置模型

2.1 建立目标函数及约束条件

确定好DMA分区边界以后,还需关闭部分BPs上的阀门和加装流量计构造出具有永久性边界且相互独立的供水区域以完成DMA分区工作,而阀门的关闭可能会导致部分管段的水流出现停滞,进而影响整个管网的水质。此外关闭阀门还会造成管网中水头损失的增大,由此可能会导致部分节点的压力不满足管网规定的最小服务水压,还可能使管网中压力分布的均匀性变差,出现局部高压或者局部低压的现象,增大了管网发生故障的可能。综合水龄指数是一个能够合理代表整个管网水质情况的指标,它将节点按照水龄大小分为近水源节点、管网中段节点和管网末梢节点,相同类别的节点构成一个区域。然后用节点流量对于节点水龄的加权平均值反映每个区域水龄情况,不同区域间用权重系数加以区分,这样可以充分保证大流量用户和管网末梢区域的水质。分区节点压力标准差反映了在同一分区内不同节点压力的离散程度,其值越小,说明该区域内压力的分布越均衡,分区就越合理。最后应将管网分区的成本也纳入考虑范围,由

于分区的BPs上一般均已安装阀门,因此在分区成本计算时仅计算流量计的费用即可。综上所述,指定优化目标为最小化“综合水龄指数 f_1 ”“分区节点压力标准差之和 f_2 ”“分区成本 f_3 ”,其中节点水龄利用EPANET 2.2计算得出,各个优化目标计算公式为:

$$\begin{cases} 0 < t_i \leq \frac{t_{\max}}{3} & i \in S_1 \\ \frac{t_{\max}}{3} < t_i \leq \frac{2t_{\max}}{3} & i \in S_2 \\ \frac{2t_{\max}}{3} < t_i \leq t_{\max} & i \in S_3 \end{cases} \quad (3)$$

$$\lambda_m = \frac{1/\sum_{i \in S_m} q_i}{1/\sum_{i \in S_1} q_i + 1/\sum_{i \in S_2} q_i + 1/\sum_{i \in S_3} q_i} \quad m = 1, 2, 3 \quad (4)$$

$$\min f_1 = \sum_{m=1}^3 \lambda_m \left(\frac{\sum_{i \in S_m} t_i q_i}{\sum_{i \in S_m} q_i} \right) \quad (5)$$

$$\min f_2 = \sum_{j=1}^K \sqrt{\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (H_i - H_{av,j})^2} \quad (6)$$

$$\min f_3 = \sum_{v=1}^T C_{\text{meter},v} \quad (7)$$

式中: t_i 为节点*i*的水龄, h ; t_{\max} 为管网中的最大节点水龄, h ; S_m 为属于所在区域的节点集合, S_1 、 S_2 和 S_3 分别表示近水源区域、管网中段区域和管网末梢区域; λ_1 、 λ_2 和 λ_3 分别表示近水源、管网中段和管网末梢的加权系数; q_i 为节点*i*的需水量, L/s ; K 为分区个数; n_j 为第*j*个分区内包含的节点数; H_i 为节点*i*的水压, m ; $H_{av,j}$ 为第*j*个分区的平均水压, m ; T 为加装的流量计数量,台; $C_{\text{meter},v}$ 为加装的第*v*台流量计的费用,元。

在优化过程中,应使节点压力满足管网所需的最小服务压力且不大于规定的最大压力。此外,住房城乡建设部印发的《城镇供水管网分区计量管理工作指南——供水管网漏损管控体系构建(试行)》中指明,单个DMA进水口的数量不宜超过两个。约束条件的数学表达式如下:

$$H_{i,\max} \geq H_i \geq H_{\min} \quad (8)$$

$$WI_j \leq 2 \quad j = 1, 2, \dots, K \quad (9)$$

式中: H_{\min} 为管网最小服务水压, m ; $H_{i,\max}$ 为管网中节点*i*允许的最大水压, m ; WI_j 为第*j*个分区进水

口的个数。

2.2 采用MOPSO算法求解模型

BPs上阀门和流量计的优化布置属于组合优化问题,随着BPs数量的增多,可行解的数量会呈现爆炸式增长。MOPSO算法非常适合求解大规模组合优化问题,具体流程如图1所示。本研究的决策变量为关闭阀门或者是安装流量计,其维度等于BPs的数量,编码方式采用二进制编码,其中“0”代表安装流量计,“1”代表关闭阀门。经优化计算后,可得一系列Pareto最优解。

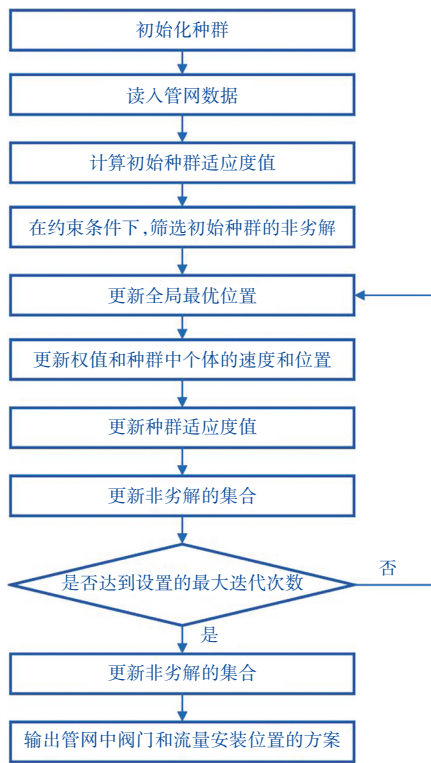


图1 多目标粒子群算法流程

Fig.1 Flow chart of multi-objective particle swarm algorithm

2.3 采用TOPSIS进行多目标决策

优劣解距离法(TOPSIS)可对大量的备选方案进行排序,计算每个解到正理想解和负理想解的距离,综合效益最好的解是到正理想解的距离最短、到负理想解的距离最远。本研究中TOPSIS的求解步骤如下:

① 根据求得的Pareto最优解,构造一个初始矩阵 I ,若有 n 个Pareto最优解,则初始矩阵是一个 $n \times 3$ 的矩阵,见式(10)。

$$I = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{21} & f_{31} \\ f_{12} & f_{22} & f_{32} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{1n} & f_{2n} & f_{3n} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: f_{1i} 、 f_{2i} 、 f_{3i} 分别为第 i 个Pareto最优解中综合水龄指数、分区节点压力标准差之和、分区成本的值。

② 将初始矩阵 I 正向化和标准化。由于3个指标都是极小型指标,需要将所有指标的类型统一转化成极大型指标,再将正向化后的矩阵进行标准化处理,构成新的决策矩阵 N ,见式(11)。

$$N = \begin{bmatrix} f_{11}^{**} & f_{21}^{**} & f_{31}^{**} \\ f_{12}^{**} & f_{22}^{**} & f_{32}^{**} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{1n}^{**} & f_{2n}^{**} & f_{3n}^{**} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中:

$$f_{1i}^{**} = \frac{f_{1i}^*}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_{1i}^*)^2}} \quad (12)$$

$$f_{1i}^* = \max \{f_{11}, f_{12}, \dots, f_{1n}\} - f_{1i} \quad (13)$$

同理可求得 f_{2i}^{**} 、 f_{3i}^{**} 、 f_{2i}^* 和 f_{3i}^* 。

③ 确定正理想解向量 N^+ 和负理想解向量 N^- ,见式(14)和(15)。

$$N^+ = (f_1^+, f_2^+, f_3^+) \quad (14)$$

$$N^- = (f_1^-, f_2^-, f_3^-) \quad (15)$$

其中:

$$f_1^+ = \max (f_{11}^{**}, f_{12}^{**}, \dots, f_{1n}^{**}) \quad (16)$$

$$f_1^- = \min (f_{11}^{**}, f_{12}^{**}, \dots, f_{1n}^{**}) \quad (17)$$

同理可求得 f_2^+ 、 f_2^- 、 f_3^+ 和 f_3^- 。

④ 计算各个方案中3个指标到最优、最劣值的欧氏距离,见式(18)和式(19)。

$$D_i^+ = \sqrt{(f_1^+ - f_{1i}^{**})^2 + (f_2^+ - f_{2i}^{**})^2 + (f_3^+ - f_{3i}^{**})^2} \quad (18)$$

$$D_i^- = \sqrt{(f_1^- - f_{1i}^{**})^2 + (f_2^- - f_{2i}^{**})^2 + (f_3^- - f_{3i}^{**})^2} \quad (19)$$

式中: D_i^+ 、 D_i^- 分别表示第 i 个Pareto最优解中3个指标与最优值和最劣值的欧氏距离。

⑤ 计算各个方案的评分,评分最大的即为综

合效益最优方案,评分计算见式(20)。

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (20)$$

式中: S_i 为第 i 个 Pareto 最优解所对应方案的评分。

3 案例分析

3.1 案例概况

案例管网^[8]位于意大利 Fossolo 小镇,如图2所示。该管网有37个节点(包含1个水源节点)和58条管段。管网服务人口约为13 000人,每个节点还有最低压力40 m和最高压力53.1~59.76 m的限制。

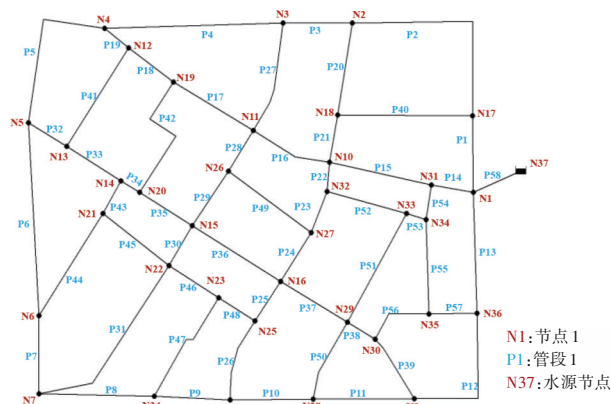


图2 案例管网拓扑图

Fig.2 Case pipe network topology diagram

在EPANET 2.2中建立该管网水力模型,执行分析后有9条管段的流量超过4 L/s,其余管段的流量均未超过3 L/s,因此定义这9条管段为高流量管段。按照管段流量从大到小的顺序排列分别对应图中管段P58、P14、P15、P16、P54、P53、P23、P17和P52。为凸显高流量管段保障管网水压的重要作用,在EPANET 2.2中模拟分别关闭高流量管段上阀门后管网中各节点压力的变化情况,结果如图3所示。可知,关闭阀门管段的流量越高,节点压力降低幅度就越大。若关闭P14或者P58管段,则整个管网处于瘫痪状态。若关闭P15管段、管网中各节点的压力只有很少一部分高于40 m,整个管网处于故障状态,不能保障管网中部分用户的正常用水。若关闭P54等其他高流量管段,管网中各节点压力虽然都能满足最小压力,但会制约后续关闭阀门的数量,从而增加分区改造成本,并降低DMA分区计量精度,影响分区效果。

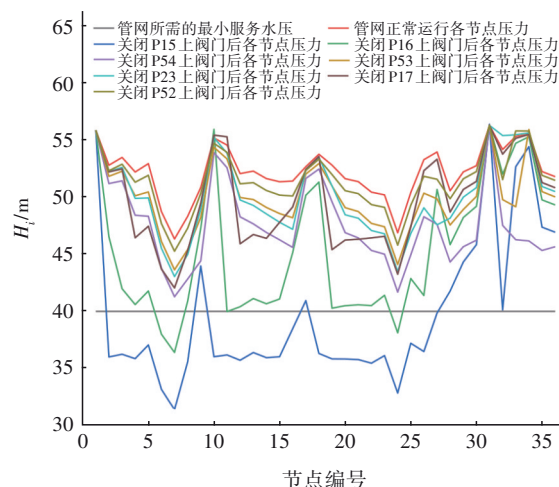


图3 关闭高流量管段阀门后各节点压力变化

Fig.3 Change of each node pressure after closing large flow pipe section

若分区时统一在高流量管段上安装流量计也会带来一些问题,一方面是高流量管段对应的管径往往很大,管径越大,安装流量计的费用就越高,所以应尽量选择在管径较小的管段上安装流量计以减少分区成本;另一方面分区计量精度要求较高,每个DMA进口的个数不宜超过两个,若统一在高流量管段上安装流量计,可能会导致一个DMA出现很多个入口,从而影响DMA分区计量效果。因此应尽可能选择流量较小的管段作为BPs。

3.2 确定案例管网分区BPs

案例管网选择单个DMA户数范围为700~2 500户,根据管网的服务人口数,确定DMA分区数目的区间为[2,6]。相关学者^[9-10]也建立了节点间的相似度矩阵,然后运用SC算法成功进行了管网的DMA分区。对比本研究提出的相似度矩阵,同时对案例管网进行分区,验证它们在规避高流量管段和降低BPs长度上的优劣性。将使用以上3种相似度矩阵得到的分区结果分别记为方案A(文献[12])、方案B(文献[13])和方案C(本研究),对比结果如图4所示。可以看出,不管划分的DMA数量为多少个,方案C的BPs中高流量管段的数量均为最低值,与之对应的高流量管段的流量之和也均最低,BPs的平均长度也最短。并且随着DMA分区个数的增大,本研究确定的相似度矩阵计算方法在规避高流量管段和降低BPs长度上所展现出的优势更加明显。

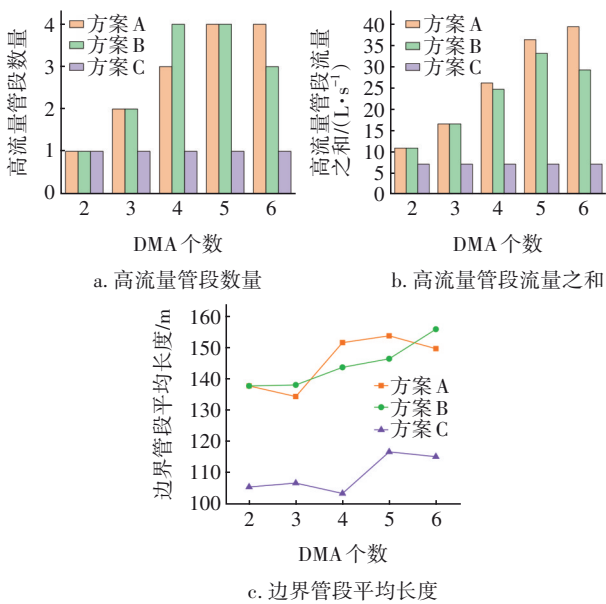


图4 DMA个数不同时得到的3种分区方案中部分指标对比
Fig.4 Comparison of partial indicators of the three partition schemes obtained under different DMA numbers

在MATLAB中编写程序计算每种分区的 f_Q 和 f_S ,并获得 f_B 。表1为不同DMA个数对应的3种评价指标进行归一化处理前的值,由于 f_B 必然会随着分区个数的增加而增大,因此其只能在一定程度上反映出该分区个数设置的合理性,故设置 f_B 的权重为0.2。DMA的规模是DMA设计时非常重要的一个指标,每个DMA应该具有非常相似的规模以确保DMA功能的顺利实现。当 $f_Q>0.3$ 时可以说明管网具有非常清楚的聚类结构^[7],由表1可知,案例管网在不同的分区数目下其 f_Q 均大于0.3,因此设置 f_Q 的权重为0.3。根据文献^[7], f_S 的权重设置为0.5。确定各指标权重后,将表1中数据进行归一化处理可得到满意度最大值所对应的分区个数为4,因此确定案例管网分区个数为4。

表1 归一化前不同DMA个数对应的评价指标

评价指标	DMA个数				
	2	3	4	5	6
f_Q	0.480	0.466	0.462	0.459	0.461
f_S	16.11	15.21	6.82	5.93	8.61
f_B	10	16	17	19	21

3.3 确定案例管网BPs上阀门和流量计布置方案

MOPSO算法的参数设置如下:种群个数为50,最大迭代次数为200,最大速度为10,加速度因子为

2,惯性权重由0.9线性递减至0.4。经计算得到8个Pareto最优解。在MATLAB中编写TOPSIS算法程序得到案例管网最终的布置方案,即实施DMA分区的成本为66 066.8元,流量计的费用数据来源于造价通,分区共加装流量计7台,关闭阀门10个,4个DMA进水口的数量分别为2、1、2、2,管网正常运行时各节点压力均能满足管网规定的最小服务水压,分区结果如图5所示。

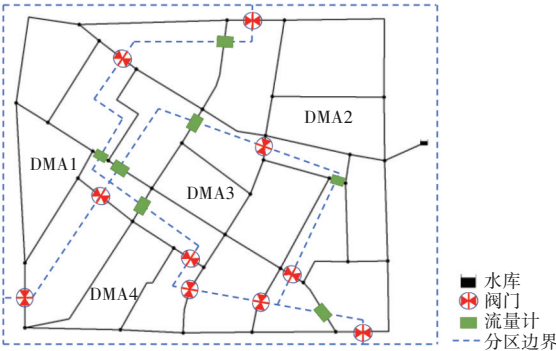


图5 案例管网分区结果
Fig.5 Partition result of case pipe network

案例管网分区前后运行压力等值线见图6。

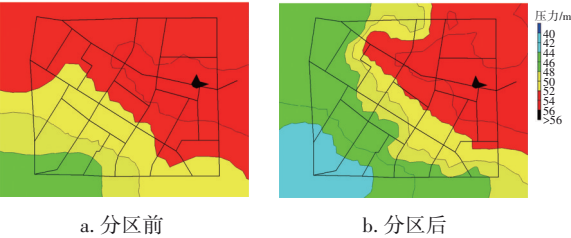


图6 案例管网运行前后压力等值线
Fig.6 Pressure contour of case pipe network before and after partition

由图6可知,分区后比分区前红色高压区范围明显缩小,整个管网运行压力显著降低,可适当减少由于管网系统压力过高而造成的漏损问题,与此同时实施DMA分区为管网漏损率及产销差的空间分解和细化提供了条件,因此发现漏损、找到漏点的时间会大大缩短,可帮助水务公司进一步降低产销差率和管网的漏损率。分区后4个DMA区域的节点压力标准差分别为1.59、2.12、1.72和1.66 m,均低于分区前管网的节点压力标准差2.32 m,其中最高降幅达31.5%,平均降幅为23.6%,说明分区后管网压力分布的均匀性得到显著提升,减少了管网发生故障的几率,提高了供水的稳定性。分区后节点的综合水龄指数为0.66 h,相较于分区前降低了

40.5%。这是由于管网中部分管段被阀门截断,该部分管段的流量分散到了其他管段上,使得其他管段水流的流速增大,从而缩短了水流在管网中流动的时间,因此分区后综合水龄指数下降,另外在划分DMA区域时选择了长度较短的管段为BPs,二者结合可有效保障管网供水水质。由此可知,分区后在保证管网正常运行的条件下,其水力水质特性都得到了一定程度的改善。

4 结论

本研究提出了一种新型城市供水管网DMA分区方法,定义了新的相似度计算公式,在此基础上运用SC算法得到的分区结果可使BPs的长度和BPs中高流量管段数量均处于较低水平,为后续顺利完成分区和保障分区后管网水质奠定基础。运用MOPSO算法和TOPSIS方法确定阀门和流量计的最优布置方案,基于Fossolo小镇管网对上述DMA分区方法进行了验证,结果表明,分区以后管网的综合水龄指数降低40.5%,各区域节点压力标准差的平均降幅达到23.6%,管网整体的运行压力显著降低,并且每个DMA区域进水口的数量均被限制在两个以内,该方法能够科学、高效地实现管网DMA分区。

参考文献:

- [1] 李晓华,魏占锋. 利用DMA分区技术降低管网漏损率[J]. 给水排水, 2016, 42(S1): 270-272.
LI Xiaohua, WEI Zhanfeng. Using DMA partition technology to reduce the leakage rate of pipe network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(S1): 270-272 (in Chinese).
- [2] 单国平,丁宏进,张俊杰. 独立计量分区在南京水司降低产销差中的应用[J]. 中国给水排水, 2012, 28(19): 63-65.
SHAN Guoping, DING Hongjie, ZHANG Junjie. Application of DMA to reduction in NRW by Nanjing Tap Water General Company [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(19): 63-65 (in Chinese).
- [3] 许刚,朱子朋,刘文杰,等. 大规模供水管网分级分区计量应用研究[J]. 给水排水, 2015, 41(1): 96-98.
XU Gang, ZHU Zipeng, LIU Wenjie, et al. Research on large scale water supply network graded and zoning measurement [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(1): 96-98(in Chinese).
- [4] 周立典,信昆仑,黄慰忠,等. 供水管网DMA分区优化方法及软件实现[J]. 给水排水, 2020, 46(2): 112-115, 120.
ZHOU Lidian, XIN Kunlun, HUANG Weizhong, et al. Optimization method and software implementation of the DMA zoning for distribution network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(2): 112-115, 120 (in Chinese).
- [5] HAJEBI S, TEMATE S, BARRETT S, et al. Water distribution network sectorisation using structural graph partitioning and multi-objective optimization [J]. Procedia Engineering, 2014, 89: 1144-1151.
- [6] BUI X K, MARLIM M S, KANG D. Water network partitioning into district metered areas: a state-of-the-art review [J]. Water, 2020, 12(4): 1002.
- [7] LIU J, HAN R. Spectral clustering and multicriteria decision for design of district metered areas [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2018, 144(5): 04018013.
- [8] BRAGALLI C, D'AMBROSIO C, LEE J, et al. On the optimal design of water distribution networks: a practical MINLP approach [J]. Optimization & Engineering, 2012, 13(2): 219-246.
- [9] 李斌,蒋浩,聂锦旭,等. 基于节点能量冗余差的供水管网DMA分区方法研究[J]. 给水排水, 2017, 43(3): 120-126.
LI Bin, JIANG Hao, NIE Jinxu, et al. Study on automated creation of DMA boundaries of water supply networks based on the difference of energy redundancy of nodes [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(3): 120-126 (in Chinese).
- [10] 周中健,王琦,吉瑞博,等. 基于节点自然邻的供水管网DMA分区方法研究[J]. 给水排水, 2019, 45(7): 118-123.
ZHOU Zhongjian, WANG Qi, JI Ruibo, et al. Partition of DMAs within water distribution systems based on natural neighbors of nodes [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(7): 118-123 (in Chinese).

作者简介:史文韬(1996-),男,山西吕梁人,硕士研究生,主要从事城市水系统优化研究。

E-mail: 150473846@qq.com

收稿日期: 2021-07-06

修回日期: 2021-10-06

(编辑:任莹莹)