山地城市供水管网分区优化两步法

何忠华[1], 袁一星[1,2]

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 城市水资源开发利用(北方) 国家工程研究中心, 150090 哈尔滨)

摘 要: 为解决山地城市供水管网能耗大、漏损严重、爆管频繁和压力分布不均等问题,建立了山地城市供水管网分区优化模型,提出针对已建成管网的分区优化方法.该法先对已建管网进行分区,然后采用 NSGA-Ⅱ算法对各区进行管径组合方案优化.供水管网分区先以两个节点间的高差作为管段的特征值,以管段为单位,兼顾各区内部节点的连通性,依次对每根管段上的两个节点按照一个给定的区内最大允许高差值进行分区,使得每个分区内最高点同最低点的高差均在该值范围内.管径组合方案优化采用 NSGA-Ⅱ算法进行求解,该算法以各管段管径逼近其经济管径的方向为遗传变异方向.通过编制计算程序,对某一山区管网进行分区优化设计. 结果表明,采用该法进行分区优化,既能有效地降低供水能耗,又能很好地保证管网内压力分布的均匀性.

关键词: 山地城市;供水管网;分区;优化; 区内最大允许高差;NSGA-Ⅱ算法;变异

中图分类号: TU991.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)08-0017-07

A two-step method for dividing districts and optimization of water distribution system in mountainous urban

HE Zhong-hua[1], YUAN Yi-xing[1,2]

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;
2. National Engineering Research Center of Urban Water Resource, 150090 Harbin, China)

Abstract: To reduce the energy consumption and solve the problems of serious leakage, frequent bursting of pipes and uneven pressure distribution in water distribution system of mountainous urban, a model for dividing districts and optimization is built. Based on systematized study of water distribution system of mountainous urban, a two-step method is proposed for optimizing the built water distribution system. In the first step, the built network is districted by the algorithm proposed in this paper; in the second step, every sub-district is optimized by NSGA-Ⅱ. In district algorithm, the elevation difference value between two nodes is taken as the characteristic value of corresponding pipe in pipe network. Whether a node in a pipe is classified as one sub-district depends on that the characteristic values between the node and other nodes in this sub-district is within a given maximum allowable elevation difference. The optimization of pipe diameter in every sub-district is solved by NSGA-Ⅱ, which has been successfully used in many multi-objective cases. In the process of evolution, the direction of mutation is that the diameter of every pipe approximates its economic pipe diameter. A practical dividing district and optimization of water distribution system is made by concerned calculation programs. And the results show that the energy consumption is reduced greatly and the pressure distribution of water distribution system is more even by proposed method.

Key words: mountainous urban; water distribution system; district; optimization; maximum allowable elevation difference; NSGA-Ⅱ; mutation

山地城市供水管网标高与水源地面标高相差悬殊[1],一方面导致供水管网整体能耗大、运行成本高;另一方面常使处于地势低区的管网压力

收稿日期: 2011-10-16.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(青年)(51108123).
作者简介: 何忠华(1980—),男,博士研究生;
袁一星(1957—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 何忠华, zhhe06@yahoo.com.cn.

大、漏损严重、爆管事故频繁,而处于地势高区的管网水压往往难以保证,用户吃水困难. 此外,地形的特殊性又增加了管线敷设的难度,管网基建费用巨大. 这些特点决定了分区优化是山地城市供水管网优化设计的主要内容,分区优化的效果将直接影响供水管网的经济性和可靠性. 山地城市供水管网的优化设计应该建立在供水管网分区的基础上,但目前各种分区优化方法都是以节点水压值为依据,这导致该区内部分节点自由水压很高,压力分布不均匀,优化效果有限. 本文提出一种基于地面标高的管网分区与管径组合方案优化相结合的方法,即针对现有管网,在优化分区的基础上,采用 NSGA - Ⅱ 算法进行管径的寻优,以供水管网系统建造费最小和剩余能量最小两个目标为约束条件.

1 供水管网分区算法

假设供水管网中有 n 个节点,每个节点的地面标高均已知. 定义高差矩阵 Δh 中的各元素为相应两节点的地面标高之差,即

$$\Delta \boldsymbol{h} = \begin{pmatrix} \Delta h_{11} & \Delta h_{12} & \cdots & \Delta h_{1n} \\ \Delta h_{21} & \Delta h_{22} & \cdots & \Delta h_{2n} \\ \cdots & \cdots & & \cdots \\ \Delta h_{n1} & \Delta h_{n2} & \cdots & \Delta h_{nn} \end{pmatrix}.$$

Δh_{ij} 为节点 i 与节点 j 的高程差.

设 h_i,h_j 分别表示节点 i 和节点 j 的地面标高,则 $\Delta \boldsymbol{h}$ 矩阵中,元素 Δh_{ij} 的取值为

$$\Delta h_{ij} = \begin{cases} |h_i - h_j|, & \text{节点 } i \text{ 与 } j \text{ 相接;} \\ 0, & \text{节点 } i \text{ 与 } j \text{ 为同一个节点;} \\ \infty, & \text{节点 } i \text{ 与 } j \text{ 不相接.} \end{cases}$$

Δh_{ij} 越小,说明节点 i 与节点 j 越有可能归为同一个区内.

分区算法的计算步骤:

1)数据准备. ① 根据对高差矩阵的定义,得到 $\Delta \boldsymbol{h}$ 的值,该矩阵是一个主对角线元素为 0 的对称矩阵;② 按照管段的编号顺序,给管网中各管段依次赋一个“特征值”,该值取自高差矩阵 $\Delta \boldsymbol{h}$ 中相应元素的值(如管网中总共有 p 根管段,管段 k 上的节点 1 和节点 2 分别是节点 i 和节点 j,相应地,其特征值取自 $\Delta \boldsymbol{h}$ 中元素 Δh_{ij} 的值). 管段的“特征值”即该管段上两个节点的地面标高之差. 管段赋值完毕后,构建一个管段矩阵,其数据格式如表 1 所示;③ 各节点间的区内最大允许高差值为 ε m,;④ 分区后的结果存放在矩阵 Result 中,该矩阵是 $n \times n$ 型,在分区前,其所有元素均为 0,每一行代表一个区.

表 1 管段矩阵的数据格式

管段编号	特征值/m	节点 1	节点 2
1	1.1	4	6
2	6.3	6	8
…	…	…	…
k	h_{ij}	i	j
…	…	…	…
p	…	…	…

2)按照管段的编号顺序,从管段 1 开始搜索,直到搜索完管网中所有的管段为止.

3)以管段 k 为例,假定区内最大允许高差值为 ε m,当搜索到管段 k 时,其对应的节点 1 和节点 2 分别是节点 i 和节点 j. 先判断节点 i 是否已经被分区(即是否已在矩阵 Result 的某一行中). 如果节点 i 已在 Result 中,则转到步骤 4),否则节点 i 自成一个新区(即将节点 i 赋给 Result 中一个 0 行,以形成一个新区).

4)判断节点 j 是否已在矩阵 Result 的某一区(行)内,① 如果在,则先找出节点 j 在矩阵 Result 中所在的区(行),然后判断节点 j 所在区(行)中的每个节点同节点 i 所在区(行)中所有节点之间的特征值是否均满足小于 ε. 如果“是”,则将节点 i 所在的区(行)和节点 j 所在的区(行)合并成一区(行);如果“否”则直接转到步骤 5);② 如果不在,则先找出节点 j 在矩阵 Result 中所在的区(行),然后判断节点 j 节点 i 所在区(行)中所有节点之间的特征值是否均满足小于 ε. 如果“是”,则将节点 j 加入到节点 i 所在的区(行)中;如果“否”则将节点 j 赋给 Result 中一个 0 区(行),以形成一个新区(行).

5)对管段 $k+1$ 依次按照步骤 3)和步骤 4)的方法进行分区,直至管段 p 分区完毕为止.

6)输出分区的结果矩阵 Result. 算法流程见图 1.

2 供水管网管径组合优化设计

2.1 优化设计目标函数

管网管径优化设计数学模型采用多目标优化模型,包括经济性目标函数和可靠性目标函数.

1)经济性目标函数. 以管网建造费用的年折算值[2]度量,包括投资偿还期内每年分摊的建造费和每年扣除的折旧大修费两项. 用数学模型表示为

$$W = \left[(A/P,i,t) + \frac{p}{100} \right] \sum (a + bD_{ij}^{\alpha}) l_{ij}.$$

式中，$(A/P,i,t)$ 为等额分付资金回收系数，其值为 $\frac{i(1+i)^t}{[(1+i)^t-1]}$；$i$ 为年利率(%)；t 为投资偿还期(a)；p 为每年扣除的折旧和大修费(%)，以管网造价的百分比计；a,b,α 为单位长度管线造价公式中的系数和指数；D_{ij} 为管径(m)；l_{ij} 为管段长度(m).

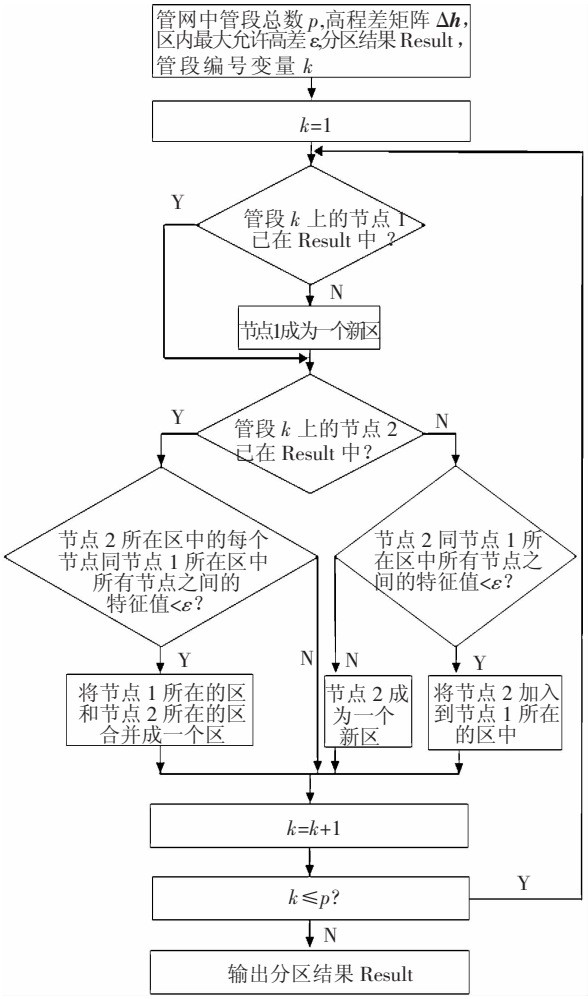


图 1　管网分区算法流程图

2）可靠性目标函数. 一般来说，管网系统的爆管率、漏失量、管件及其他设备的故障率均与管网中水压存在正相关性[3]. 要满足正常供水要求，各节点的自由水头必须高于各自所要求的最小自由水头. 高出的那部分水头叫节点剩余水头. 该值越小，事故发生率越低，可靠性就越高；反之，可靠性就越低. 各节点的剩余水头可表示为 $H_{si}=H_i-H_{\min}, i=1,2,\cdots,n$. 于是，将整个管网系统的可靠性定义为剩余能量[4]，其数学表达式为

$$E_s=\sum_{i=1}^{n}\rho g Q_i(H_i-H_{\min}).$$

式中：H_i 为节点 i 的自由水头；$H_{\min}$ 为节点所要求的最小自由水压；Q_i 为节点 i 的流量.

2.2　约束条件及其处理

1）节点水压. 任意一个节点 i 的自由水头 H_i 应大于该节点的最小服务水头 $H_{i,\min}$，即 $H_i \geqslant H_{i,\min}$；2）管径. 考虑到市售管径的规格，优化过程中，管径的搜索空间限定在一定的区间内，即 $D_i \in \{D_1,D_2,\cdots,D_m\}$，$m$ 为可选的市售管径种类数目.

2.3　多目标优化模型及其求解

综上考虑，管网优化设计的多目标函数数学模型为

$$\begin{cases}\min W=\left[(A/P,i,t)+\dfrac{p}{100}\right]\sum(a+bD_{ij}^{\alpha})l_{ij},\\ \min E_s=\sum\limits_{i=1}^{n}\rho g Q_i(H_i-H_{\min}).\end{cases}$$

该模型综合了管网的经济性和可靠性要求，以一组离散的市售管径为决策变量. 进行管网优化设计，实质就是寻找优化的管径组合方案，以满足管网的经济性和可靠性要求[5].

对于布局已定的管网，最小化管网建造费就意味着减小管径；而减小管径势必增大水泵扬程，加剧管网内部地面标高最低点同控制点之间的自由水压差，增大低节点的自由水压. 因此，两个目标是相互冲突的. 为对其同时进行优化，需对各子目标作折衷考虑. 理想情况下，如果事先已知这些子目标之间的相对重要性(权值)，可采用权值和的方法来求解. 然而，大部分例子中的权值是未知的，需要采用在多目标之间不产生偏见的多目标优化方法[6].

采用 NSGA-II 算法[7-9]求解多目标优化模型，过程见图 2.

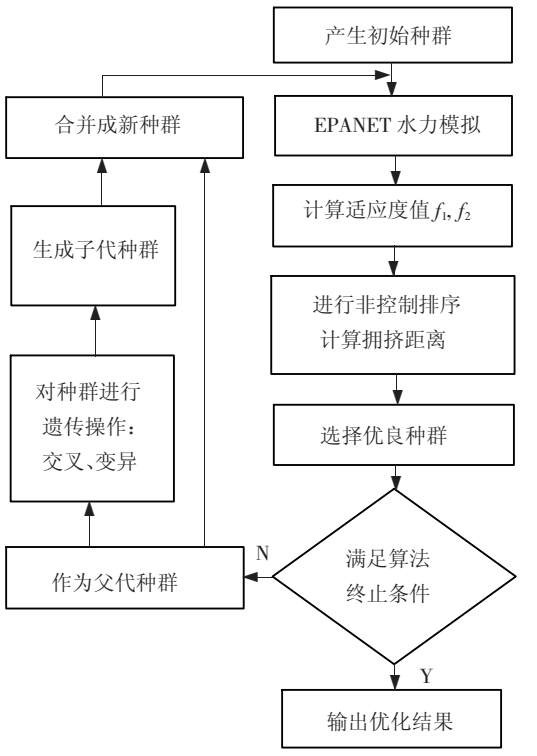


图 2　NSGA-II 的优化过程

以管网中每根管段的管径作为染色体的一个基因,各管径的取值受市售管径规格的约束,这样一个染色体的长度即为管段的总数,一个染色体(即一个个体)就对应于一组可能的管径组合方案.将一组管径的组合方案代入到目标函数中,即得到该方案的适应度值:$f_1 = 1/W$,$f_2 = 1/E_s$.

3 分区优化计算步骤

分区完成之后,根据各区之间的位置及地面标高即可确定整个管网中各区之间的供水关系.为便于说明,将含有水源的分区称为1类区(单水源供水仅有1′区,多水源供水还有1″区、1‴区等),与1类区相邻的分区称为2类区(如2′区、2″区等),与2区相连的称为3区(或有3′区、3″区等),依次类推,各区的地面标高大致从低到高.

对于串联分区供水而言,分区前,1类区同2类区之间一般存在多根连接管段.分区后,这些连接管必须取消,然后以1类区与2类区相连的节点作为候选节点,从其中选取若干个节点作为1类区到2类区的流量转输点.总的分区优化步骤见图3.

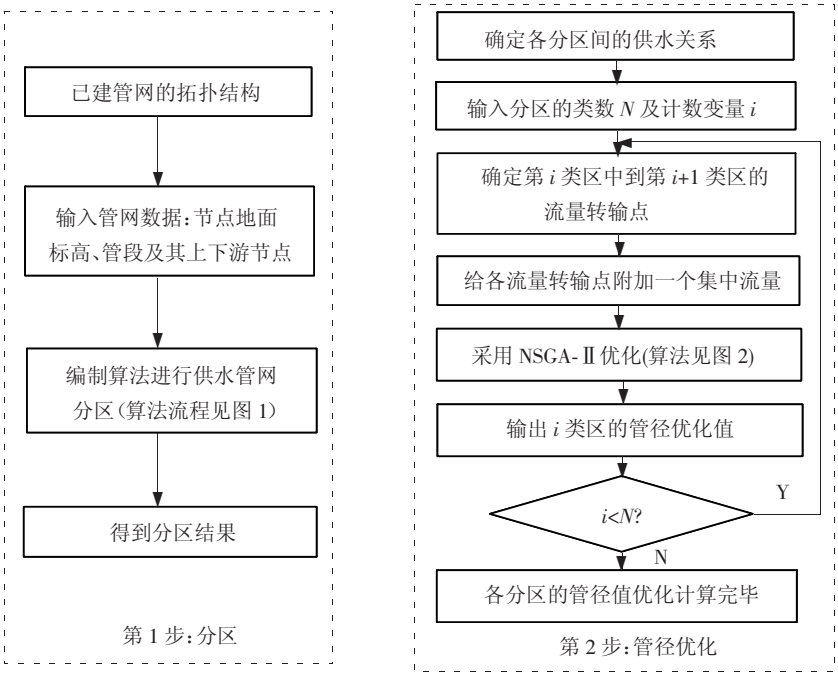


图3　分区优化计算流程图

4 算　例

管网拓扑结构如图4所示,各节点的地面标高见表2,用水节点的最小自由水头以28 m计.管径D(m)同管网综合造价C(元/m)之间的关系式[10]:$C = 3.890\,1 + 4\,109.8D^{1.016\,6}$.

根据各节点的地面标高数据,利用MATLAB绘出管网的等高线图,见图5.

采用本文的分区计算方法,得到区内最大允许高差同分区数目之间的关系,见图6.随着区内最大允许高差值的增大,分区数目越来越少.

根据已有的研究成果,区内最大允许高差一般取30~40 m.以分区数分别为5,4,3,2这4种情形作为研究样本.当分区数为5,4,3,2时,区内高差分别为31,35,39.5和61.5 m.分区结果见图7~10,供水关系见图11~14.

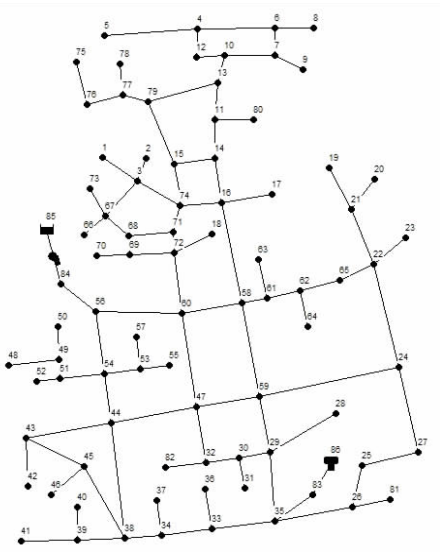


图4　管网拓扑结构图

表 2　节点地面标高

节点编号	标高 m	节点编号	标高 m	节点编号	标高 m
1	472.4	30	549.4	59	520.0
2	464.6	31	551.3	60	494.7
3	470.9	32	527.9	61	500.4
4	488.0	33	555.4	62	510.3
5	485.3	34	534.3	63	500.0
6	489.0	35	566.8	64	513.0
7	493.0	36	553.1	65	518.8
8	495.3	37	533.0	66	471.4
9	493.3	38	517.6	67	474.8
10	495.1	39	514.2	68	478.3
11	496.1	40	513.0	69	479.3
12	492.4	41	510.1	70	474.8
13	495.9	42	505.3	71	487.8
14	496.3	43	504.4	72	488.5
15	487.3	44	507.4	73	471.1
16	497.0	45	509.3	74	487.6
17	503.7	46	508.9	75	486.2
18	491.2	47	519.7	76	476.8
19	516.8	48	476.2	77	482.0
20	526.0	49	484.9	78	491.9
21	521.5	50	485.4	79	484.3
22	528.8	51	485.0	80	501.1
23	528.0	52	480.0	81	551.1
24	539.3	53	491.8	82	526.9
25	554.3	54	491.7	83	578.0
26	559.6	55	488.1	84	476.2
27	559.5	56	476.2	85	473.0
28	560.4	57	485.7	86	578.0
29	555.0	58	499.1		

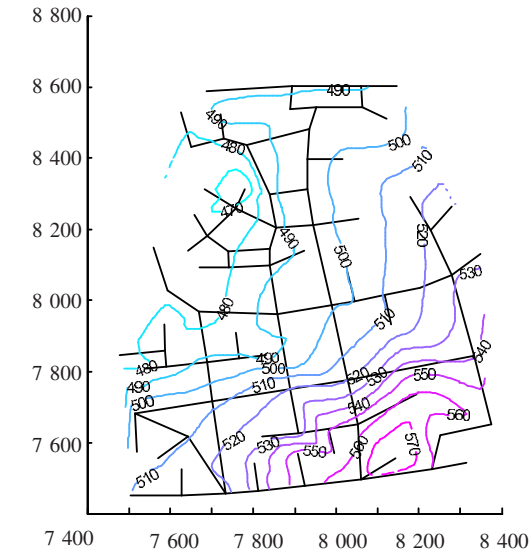


图 5　管网等高线图

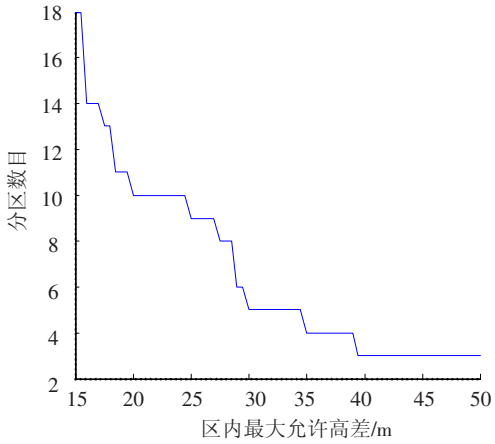


图 6　区内高差与分区数目的关系

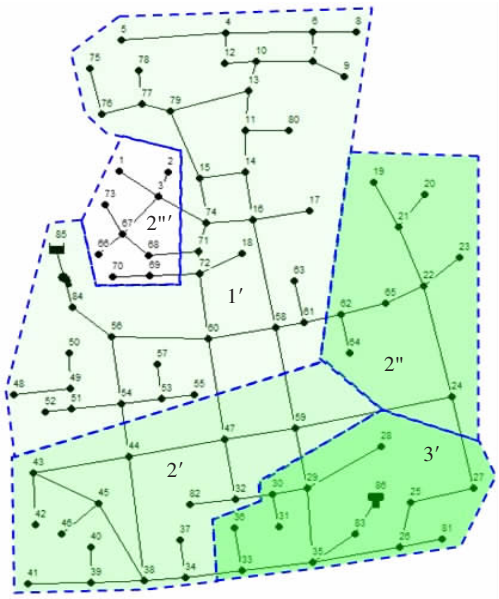


图 7　分区数为 5 的分区结果

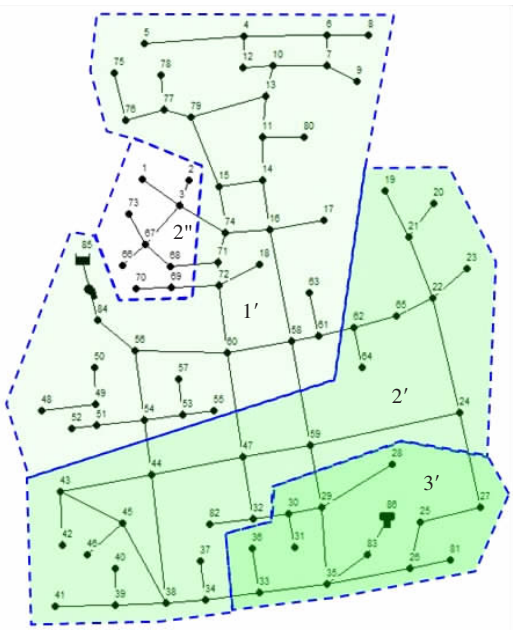


图 8　分区数为 4 的分区结果

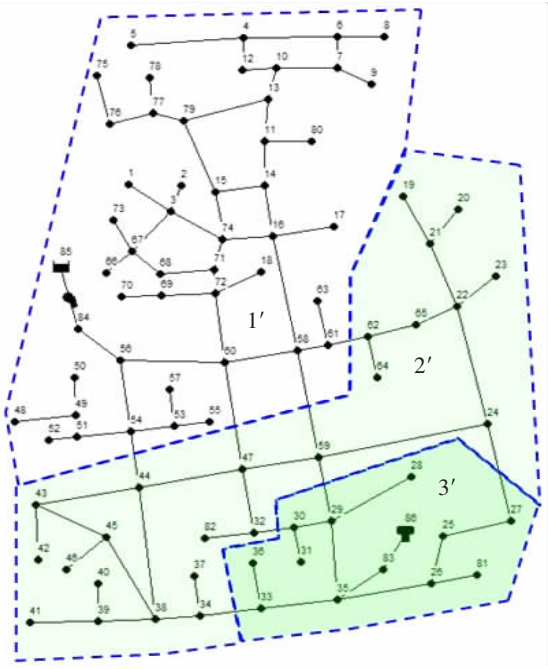


图 9 分区数为 3 的分区结果

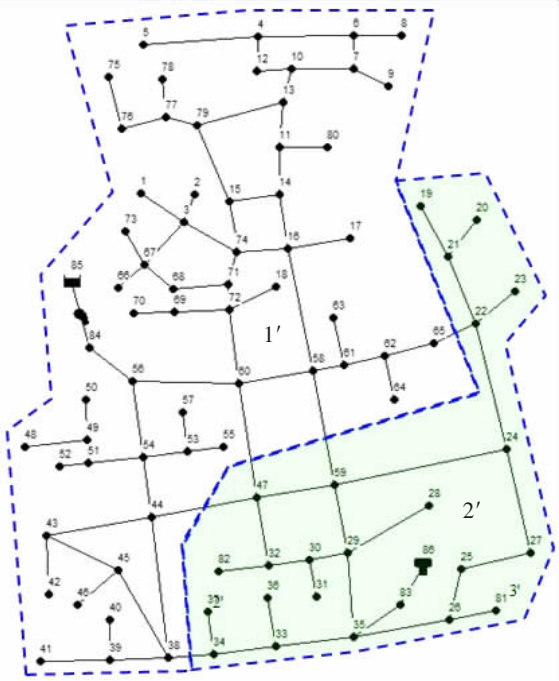


图 10 分区数为 2 的分区结果

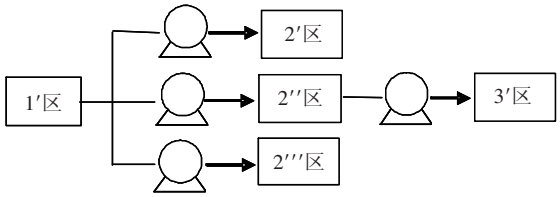


图 11 分区数为 5 时的供水关系

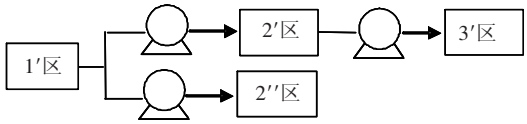


图 12 分区数为 4 时的供水关系

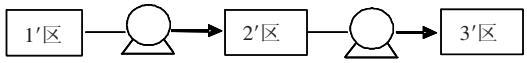


图 13 分区数为 3 时的供水关系

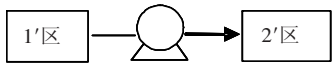


图 14 分区数为 2 时的供水关系

结合管网等高线图,从图 5 ~ 10 可以看出,各类分区大致沿着等高线狭长生成.

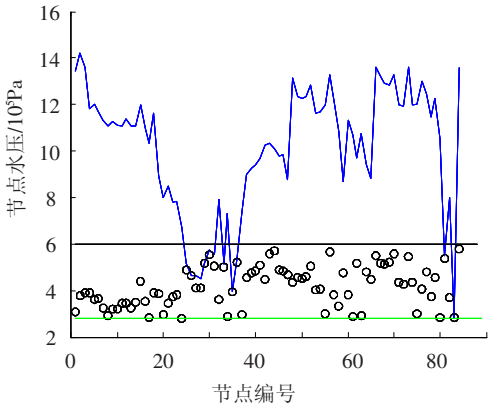
分区数为 5,4,3,2 时,各项指标的计算结果见表 3.

从表 3 可以看出,随着分区数的减少,剩余能量增加,泵站供水能量和水泵扬程均增加. 一方面,分区数目越多,泵站供水能量节省些,但同时也增加了加压泵站的建造费. 综合各项指标可知,分区数为 4 时效果最佳.

表 3 不同分区结果比较

分区数目	剩余能量/kJ	泵站供水能量/kJ	管网综合造价/万元	年费用折算值/万元	水泵扬程/m	节点最大压力值/MPa
5	43.226	206.954	149.297 0	290.446 3	61	0.59
4	48.028	207.047	148.861 7	290.073 4	61	0.58
3	51.701	207.047	150.368 5	291.580 2	61	0.60
2	75.755	231.191	146.741 1	304.419 8	76	0.88
不分区	166.649	334.393	171.294 7	399.360 2	139	1.42

根据计算结果，分别绘制分区数为 4 时和不分区时的节点水压分布图（见图 15）. 可以看出，在优化设计节点自由水压均满足 0.28 MPa 要求的情况下，在节点水压分布的均匀性方面，分区数为 4 的设计方法明显比不分区具有优越性.



曲线为不分区时的优化设计节点自由水压，圆圈为分区数为 4 时的优化设计自由水压，两水平直线分别是自由水压为 0.28 和 0.6 MPa时的水压线.

图 15　节点水压分布图

5　结　论

1）提出的分区方法以各用户节点的地面标高为依据，将地面标高在某个标高差范围内的节点归为一类. 分区的结果也保证了每个子区内节点间的连通性.

2）经分区优化后的管网，其节点压力分布均匀性有明显的改善.

3）无论是从管网年费用折算值、管网建造费还是管网剩余能量等方面来衡量，本文提出的分区优化设计方法都具有显著的实用性.

参考文献：

[1] 王圃. 分区优化模型在山地城市给水管网中的应用[J]. 北京：应用基础与工程科学学报，2007，15(3)：396－404.

[2] 严煦世，范瑾初. 给水工程[M]. 4 版. 北京：中国建筑工业出版社，1999：78－85.

[3] 张世泽. 城市供水管网优化设计两步法[J]. 哈尔滨工业大学学报，2009，41(4)：111－117.

[4] WU Wenyan，SIMPSON A. Trade-off analysis between cost and reliability of water distribution systems using genetic algorithms[C]//Computing and Control in the Water Industry 2009 'Integrating Water Systems'. London：[s. n.]，2009：687－693.

[5] EZIO T. Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach[J]. Urban Water，2000(2)：115－122.

[6] 周明，孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京：国防工业出版社，2002：130－137.

[7] KALY D. Multi-objective genetic algorithms：problem difficulties and construction of test problems[J]. Evolutionary Computation，1999，7(3)：205.

[8] MD A，LIONG S Y，YU Xinying. Alternative decision making in water distribution network with NSGA-II[J]. Journal of Water Resources Planning & Management，2006，132(2)：122－126.

[9] PRASAD D，PARK N S. Multi-objective genetic algorithms for design of water distribution networks[J]. Journal of Water Resources Planning and Management，2004，130(1)：73－82.

[10] 汪翔. 给水排水管网工程[M]. 北京：化学工业出版社，2006：96－111.

（编辑　刘　彤）