

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201605095

结合夜间最小流量法的减压阀经济效益模型

李建宇,高金良,乔怡超

(哈尔滨工业大学 市政环境工程学院,哈尔滨 150090)

摘要: 为了对城市管道漏失进行有效控制,根据压力驱动漏失水力模型结合夜间最小流量法,确定管网节点的漏失系数,建立考虑压力引起漏失量的改良水力模型——减压阀经济效益模型.该模型使用遗传算法进行求解,以管道漏失量最小化为目标函数,以减压阀最大安装数量、节点压力流量方程、最大允许漏失率为约束条件,求出减压阀安装数量及安装位置,再从所有可行解里面选择一组花费最小的解作为最优解.并以 HJ 分区为例详细讨论减压阀经济效益模型的求解过程,对实际的管道漏失控制具有指导意义.

关键词: 遗传算法;夜间最小流量法;压力驱动;漏失控制

中图分类号: TU991

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)08-0055-05

Economic benefit model of reducing valve by minimum night flow

LI Jianyu, GAO Jinliang, QIAO Yichao

(Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To effectively control the urban pipeline leakage, the study combines minimum night flow with pressure-driven leakage hydraulic model to calculate the leakage coefficient of network nodes and establish an enhanced hydraulic model considering pressure dependent leakage terms. The model uses the genetic algorithm to solve the problem, taking the minimized pipeline leakage loss as the objective function, the maximum installed number of the pressure reducing valve, the node pressure flow equation, and the maximum allowable leakage rate as the constraint conditions, to find out the installation number and locations of the pressure reducing valves. The one which costs the least is chosen from all the feasibilities as the optimal solution, and HJ area partition is taken as an example to illustrate in detail the calculation procedures of the decision support model. Our study possesses the guiding significance for the control of the actual pipeline leakage.

Keywords: Genetic Algorithm; minimum night flow; pressure-driven; leakage control

中国大部分城市供水管网漏失率居高不下,许多供水单位为满足管网末端最不利点的用水压力需求直接对管网进行加压,并未对沿途管网采取有效的降压及保护措施,导致陈旧的管网不堪重负,爆管现象频发,漏损现象严重,水质易受到污染,导致饮用水卫生安全隐患.而采取智能减压阀是当今减缓漏损情况的有力手段,如何在铺设减压阀前根据不同的位置及开度对减压效益进行评估,从而确定最优决策一直是需要解决的问题.

本文提出的减压阀经济效益模型如图 1 所示.

1 改进压力驱动漏失水力模型

传统压力驱动节点流量模型^[1]中节点流量为节点实际用水量与节点漏失量之和,需分别计算二

者再叠加,可以更精确地反映管网实际运行工况,但存在复杂度太大的问题,增加了计算时间.在节点用水量受压力影响较小的情况下,本文假定用水量与压力无关,从而获得更加简洁实用的改进压力驱动漏失水力模型.

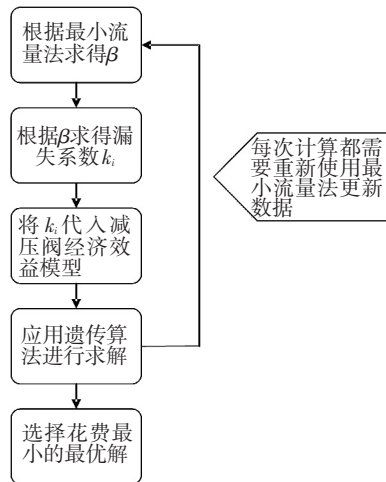


图1 减压阀经济效益模型求解流程

Fig.1 Flow chart for economic benefit model of reducing valves

收稿日期: 2016-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(51278148); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07405002); 广东省教育部产学研结合项目(2011A090200040)

作者简介: 李建宇(1994—),男,硕士研究生

通信作者: 高金良,16678993@qq.com

对于压力优化控制分析,需要建立一个包含压力相关漏失量的改进水力模型.漏失量通常分为背景漏失和爆管两类.其中背景漏失代表管段、接头和连接件等处产生的渗漏,取决于管道的服务压力,因此,压力控制的目的是要减少这一部分的漏失.近年来,国内外学者通过大量的实验数据,得出了许多漏失量与管网服务压力间的数学模型[2-5].在估计出管网背景漏失总量的大概值后,为了确保模型的准确性需要将其按照比例分配至管网水力模型的每个节点上.根据实际工程经验,在接头和连接件处最容易发生漏失,故背景漏失量分配标准按照各节点流量(或用户连接数)比例制定.

节点漏失与压力间的经验关系式如式(1)所示.该式将被添加到标准的管网水力平衡方程式中,以形成一个适于压力控制和漏失分析的拓展水力模型

$$l(t) = k \cdot p(t)^\alpha = k \cdot (h(t) - H)^\alpha. \quad (1)$$

式中: $l(t)$ 为 t 时刻的节点漏失量, $p(t)$ 为节点压力, $h(t)$ 为总水头, k 为漏失系数, α 为漏失指数, H 为节点高程.

假定漏失只在有流量的节点上产生,将这些节点记作 I_d .经大量实验证明,漏失指数 α 的影响因素包括管材、漏失类型和土质等,其取值一般在0.5~2.5^[6-8].

结合 HJ 分区实际情况,根据文献中的建议,本文取 α 为常数 1.18^[9],而漏失系数 k_i 取决于各节点的流量,可通过夜间最小流量法^[1,10]得出.

夜间最小流量法一般取凌晨 2~4 点的夜间流量,由于此时用户用水量处于全天最低点,漏损量所占比例最大,因此,根据夜间最小流量计算出来的漏失系数较为准确.

根据英国水道协会(WRC)长期研究结果,夜间居民的平均用水量为 1.7 L/(户·h),则可得夜间最小流量时刻的管网漏失量计算公式为

$$q(t_{\min}) = Q(t_{\min}) - 0.0017 \times \text{用户数}. \quad (2)$$

式中: $q(t_{\min})$ 为夜间最小流量时刻的漏失量, m^3/h ; $Q(t_{\min})$ 为夜间最小流量, m^3/h .

夜间最小流量时刻的漏失量等于各节点漏失量之和,即

$$q(t_{\min}) = \sum_{i \in I_d} l_i(t_{\min}) = \sum_{i \in I_d} k_i \cdot p_i(t_{\min})^{1.18}. \quad (3)$$

式中 $p_i(t_{\min})$ 为夜间最小流量时刻的节点压力, m .

假定漏失量与节点流量成正比^[11],引入比例因子 β ,各节点的漏失系数 k_i 计算如下:

$$k_i = \beta \cdot d_i(t_{\min}), \quad (4)$$

式中 $d_i(t_{\min})$ 为夜间最小流量时刻的节点流量, m^3/h .

综合式(3)、(4)得

$$q(t_{\min}) = \sum_{i \in I_d} l_i(t_{\min}) = \sum_{i \in I_d} \beta \cdot d_i(t_{\min}) \cdot p_i(t_{\min})^{1.18}. \quad (5)$$

由于在该模型中,夜间最小流量时刻的节点流量和压力均已知,该比例因子 β 可由式(6)估计得到:

$$\beta = \frac{q(t_{\min})}{\sum_{i \in I_d} d_i(t_{\min}) \cdot p_i(t_{\min})^{1.18}}. \quad (6)$$

求得 β 后,分区内每条管段的漏失系数 k_i 即可求得.

以 EPANET 2.0 平台进行微观水力模拟,算得各节点的漏失系数后,通过 MATLAB 软件编写程序将这些漏失系数值导入 EPANET 中,即可得到拓展的压力驱动漏失水力模型.

2 减压阀经济效益模型

减压阀^[12]控制方式一般有固定出口压力控制、基于时间调节出口压力控制、基于流量调节出口压力控制以及基于最不利点的出口压力闭环控制,考虑到 DMA 分区属于三级分区,本文采用固定出口压力控制,即将阀门开度设置为固定值,运行维护方便且十分低廉.

一般减压阀的服役寿命为 15 a,优化的目标是在给定投资费用收回年限和给定最大允许漏损量以及保证管网最不利点满足最小压力需求的前提下,寻找减压阀的最优安装位置、开度及安装数量.

2.1 目标函数

该模型目标函数是安装减压阀后年平均利润最大,即

$$\max f = \frac{15 \times 365c(q_{\text{leak}} - f_1) - f_2}{15}. \quad (7)$$

式中: f 为 15 a 内年平均利润; c 为单位水价,取 0.6 元/ m^3 ; q_{leak} 为未安装减压阀前分区的总漏损量, m^3/d ; f_1 为安装减压阀后分区的总漏损量, m^3/d ; f_2 为减压阀投资成本,元.

$$f_1 = \sum_{i \in I_b} l_i(t) = \sum_{i \in I_b} k_i p_i(t)^{1.18}, \quad t \in T. \quad (8)$$

式中: $l_i(t)$ 为 t 时刻分区入口节点 i 的漏失量, m^3/h ; I_b 为入口节点集合; T 为时间段序列.

$$f_2 = \sum_{j=1}^n c_j. \quad (9)$$

式中 c_j 为第 j 个减压站的投资费用,元.

国产 200X 减压阀具体投资费用见表 1.

表 1 国产 200X 减压阀具体投资费用 元
Tab.1 Investment cost of 200X pressure reducing valve from China

型号	单价	型号	单价
DN150	3 060.00	DN400	14 606.00
DM200	4 330.00	DN450	17 830.00
DN250	7 425.00	DN500	21 645.00
DN300	10 090.00	DN600	32 465.00
DN350	12 026.00		

此外,安装费、现场测试费、减压阀维护费用等

其他费用为 8 000 元/个。

2.2 约束条件

2.2.1 最大允许漏失量率约束

$$\frac{l_i}{Q} < R_{AL}. \quad (10)$$

式中: l_i 为所有节点全天 (24 h) 漏失总流量, m^3/h ; Q 为总流量, m^3/h ; R_{AL} 为最大允许漏失率。

2.2.2 水力平衡约束

管网水力平衡约束包括管段压力损失方程 (闭合环路水头损失为 0) 和节点流量连续方程, 如式 (11)、(13) 所示:

$$\sum_{i \in \text{loop}} \Delta h_i = 0. \quad (11)$$

式中 Δh_i 为环路中管段水头损失。

$$h_{ij} = 10.667 C_{ij}^{-1.852} (k_{ij} d_{ij})^{-4.871} L_{ij} Q_{ij}^{1.852}. \quad (12)$$

式中: h_{ij} 为节点 i 和 j 之间的管道水头损失, m ; C_{ij} 为管道粗糙系数; k_{ij} 为节点 i 和 j 之间管道的减压阀开度, 取值为 0~1; d_{ij} 为节点 i 和 j 之间的管道直径, m ; L_{ij} 为节点 i 和 j 之间的管道长度, m ; Q_{ij} 为节点 i 和 j 之间的管道流量, m^3/h 。

$$\sum_{j \approx i}^n q_{ij} - d_i - l_i = 0. \quad (13)$$

式中: q_{ij} 为节点 i 相连接管道的流量, m^3/h ; d_i 为节点 i 用水量, m^3/h ; l_i 为节点 i 漏失量, m^3/h 。

2.2.3 节点压力约束

各节点供水压力既要满足最小服务水头, 又不能过高造成不必要的能源浪费, 即

$$h_{i,\min} \leq h_i \leq h_{i,\max}. \quad (14)$$

式中节点压力的上下限 $h_{i,\min}$ 和 $h_{i,\max}$ 依据节点类型和实际情况具体定值, 必须保证最不利点压力的最小服务水头, 其他节点可相对宽松。

2.2.4 减压阀数量约束

$$n \leq N_v, \quad (15)$$

式中 N_v 为减压阀最大安装数量。

2.2.5 投资费用回收年限约束

$$y \leq 2, \text{ 即 } 2 \times 365c(q_{\text{leak}} - f_1) \geq f_2, \quad (16)$$

式中 y 为费用回收年限, a 。

则管网减压阀优化控制问题具体表示为

$$\max f = \frac{5\,475c(q_{\text{leak}} - f_1) - f_2}{15}.$$

其中

$$f_1 = \sum_{i \in I_b} l_i(t) = \sum_{i \in I_b} k_i p_i(t)^{1.18}, t \in T,$$

$$f_2 = \sum_{j=1}^n c_j.$$

subject to:

$$\sum_{j=1}^n q_{ij} - d_i - l_i = 0,$$

$$\sum_{i \in \text{loop}} \Delta h_i = 0,$$

$$h_{ij} = 10.667 C_{ij}^{-1.852} (k_{ij} d_{ij})^{-4.871} L_{ij} Q_{ij}^{1.852},$$

$$\frac{l_i}{Q} < R_{AL},$$

$$h_{i,\min} \leq h_i \leq h_{i,\max},$$

$$n \leq N_v,$$

$$2 \times 365c(q_{\text{leak}} - f_1) \geq f_2.$$

3 经济效益模型求解

为了求解该减压阀优化控制模型, 采用遗传算法^[13]. 遗传算法主要包括染色体编码、适应度选择、交叉、变异。

3.1 染色体编码

该模型决策变量为减压阀位置 (位于哪个管道 ID 上) 以及开启状态下每个时间段下的开度, 浮点数编码。值得注意的是, 如果减压阀开度为 1, 表明该管道未安装减压阀。每条染色体包括所有管道减压阀铺设位置以及开度信息。

3.2 适应度选择

为了减少运算量, 适应度函数取 $f_1 = \sum_{i \in I_b} l_i(t) = \sum_{i \in I_b} k_i p_i(t)^{1.18}$, 即所有时间段管道的漏失总和, 显然该值越小, 适应度越好。

个体能否被保留复制至下一代采用轮盘赌方式进行随机选择, 即

$$1 - P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i}. \quad (17)$$

式中: P_i 为该染色体被保留的概率; f_i 为该染色体的目标函数值, 即漏失量, m^3/h ; $\sum_{i=1}^n f_i$ 为所有染色体目标函数值之和, m^3/h 。

从而, 每条染色体被选择的方式得以建立。

3.3 交叉

一组染色体 (浮点数) 交叉的规则是构造 0~1 之间的随机数 α 和 β , 对于一对染色体 ch1 和 ch2, 通过交叉后得到 ch1' 和 ch2', 满足以下关系:

$$\begin{cases} \text{ch1}' = (1 - \alpha) \text{ch1} + \beta \text{ch2}, \\ \text{ch2}' = (1 - \beta) \text{ch1} + \alpha \text{ch2}, \\ \text{ch2}' = L(\text{If } \text{ch2}' \leq L), \\ \text{ch1}' = L(\text{If } \text{ch1}' \leq L), \\ \text{ch2}' = R(\text{If } \text{ch2}' \geq R), \\ \text{ch1}' = R(\text{If } \text{ch1}' \geq R). \end{cases} \quad (18)$$

式中 L, R 分别代表定义区间的上下确界。

3.4 变异

变异是针对开度非 1 的减压阀(即管道存在减压阀),将原有开度随机变成(0~1)的任意开度.

4 算例模拟

算例取自文献[1]中的 HJ 分区模型,具体参数可参考原文,管网拓扑如图 2 所示,部分参数见表 2.

该分区共有 623 个节点,其中 329 个节点有流量,每次使用遗传算法模拟减压阀位置及开度时,均需要重新使用夜间最小流量法计算 β 和 k_i ,即将夜间最小流量法内置于遗传算法内.管段管径均位于 300 mm 之下,且存在大量管径小于 100 mm 的管段,管段具体管径参考文献[13].迭代次数取 100 次.

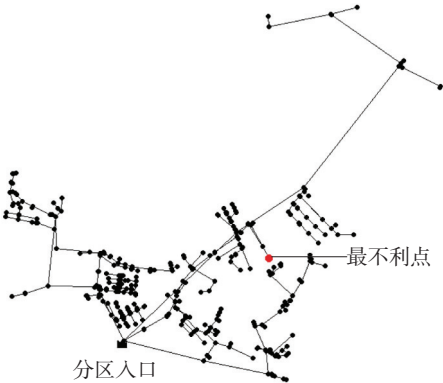


图 2 HJ 分区间网拓扑结构

Fig.2 HJ Partition network topology structure

表 2 HJ 分区间网参数

Tab.2 HJ Partition network parameters

夜间最小流量/ 小流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	分区用 户数/户	减压阀最 大允许安 装个数/个	正常工况 下流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	原漏损 率/%	最大允许 漏损率/%
40	2 932	2	1 788.3	12.1	7

4.1 编码

为了减少计算量,对算法进行优化,假定减压阀仅设在管径较大的 100 条管段上,其他小管径或者枝状管网末端不考虑安装减压阀,则染色体长度为 100 位,分别代表 100 个管段 ID 对应的减压阀开度,样本个数取 200 个,每个样本有且仅有一个单位非 1,且每个管段 ID 所对应的同一阀门(非 1)位置只有两条染色体表示(代表 200 种情况,每种情况有且只有一个减压阀安装在对应的管道 ID 上,同时可以保证每个管段上安装阀门有不同的开度情况,方便交叉变异时进行保留),所安装的减压阀开度随机在(0~1)取值.这 200 个个体作为初始种群 P_0 .

4.2 选择

将 100 个个体代入目标函数,由于全天各时段的每个节点压力和管道流量已知,可以求得各自的

漏损量及漏损率.如果此时有满足漏损率<7%的情况出现,将其输出至资源库.如果有压力不满足 18 m 最小水头,或阀门个数超过 2 个的情况,直接将其从资源库剔除.使用轮盘赌方法选择 100 条染色体,构成种群 R_i (i 为代数).

4.3 交叉变异

对种群 R_i 的染色体进行交叉变异操作.交叉是将 100 条染色体随机分成 50 对,每对进行交叉,如果是同一位置的减压阀进行交叉,该染色仍然只有一个减压阀,减压阀位于不同位置的染色体交叉,则会产生两个减压阀.为满足减压阀最大个数为 2 的要求,设定当染色体非 1 位置为 2 时,只能与同一位置的染色体交叉.交叉概率取 80%.

变异则是随即改变非 1 位置的数字,范围为(0~1),0 和 1 不能取,变异概率取 5%.

通过交叉变异后得到 100 条新的染色体 Q_i ,与 R_i 合并,得到种群 P_{i+1} .

再进行 4.2 的选择操作,循环至 100 次的迭代次数为止.

最后对资源库的染色体进行筛选,年均利润最大的染色体就是所需的最优解.流程图如图 3 所示.

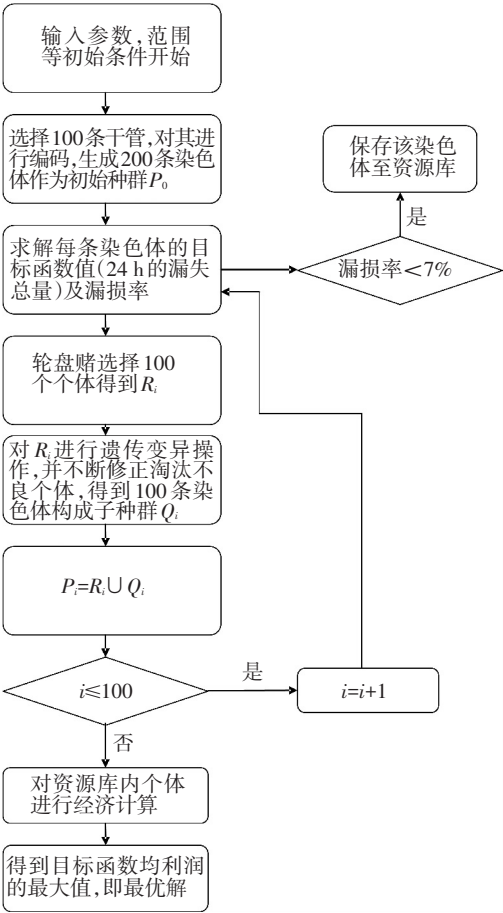


图 3 求解 HJ 分区遗传算法流程

Fig.1 Genetic algorithm flow chart for HJ partition solution in meeting leakage rate lower than 7% and investment cost recovered within two years

前提下,应用减压阀经济效益模型对 HJ 分区管网进行求解,最终最优解为在管段分区入口处设置一个减压阀,开度 0.2 为该算例的最优解.优化前后分区入口流量变化见图 4.

该管网在正常工况下总流量为 496.75 L/s,未设置减压阀时的管网漏失量为 60.11 L/s,经减压阀优化控制后的漏失量为 32.78 L/s,漏失率由 12.1% 最多可下降至 6.6%,满足了漏损率低于 7%的要求;减压阀投资费用为 40 465 元,每年可节约因漏损造成的水费 517 127 元,3 个月即可回收成本;安装减压阀带来的年平均利润为 514 430 元.

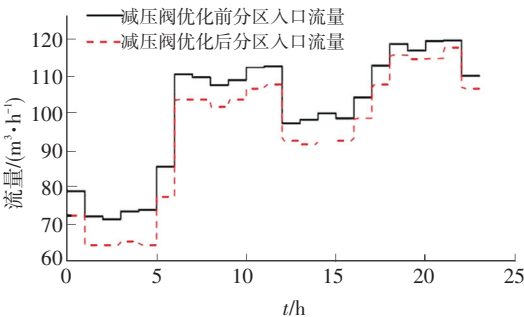


图 4 HJ 分区减压阀优化控制前后入口流量

Fig.4 Partition pressure reducing valve inlet flow before and after optimization control

5 结 论

- 1) 本文根据压力驱动漏失水力模型结合夜间最小流量法,确定管网节点的漏失系数,代入遗传算法内,从而建立考虑压力引起漏失量的改良水力模型.
- 2) 传统遗传算法对全管网进行减压阀位置和开度的优化时,得到的结果往往因设置阀门数量过多而缺乏实际意义,本文中经济效益模型则以经济实用性对实际进行衡量.
- 3) 将减压阀优化控制模型应用到算例管网中,证明了该模型理论的可行性和实用性.
- 4) 由于算例中最大安装减压阀个数较少,本文中算法比较适用于 DMA 分区中确定减压阀相关信息.

参考文献

[1] 乔怡超.供水管网减压阀优化控制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

QIAO Yichao. Research on leakage control of water distribution system by on presure reducing valves[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[2] 董深,吕谋,盛泽斌,等. 基于遗传算法的供水管网反问题流失定位[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013, 45(2):106-128.

DONG Shen, LV Mou, SHENG Zebin, et al. Inverse transient leakage location of water supply network based on genetic algorithm[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(2):106-128.

[3] GIUSTOLISI O, SAVIC D, KAPELAN Z. Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(5):626-635.

[4] SHAMMAS N K, KHALED H. Effect of pressure on leakage rate in water distribution networks[J]. Methods, 1993.

[5] NOACK C, ULANICKI B. Modeling of soil defensibility on leakage characteristics of buried pipes[C]//8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium. Cincinnati, Ohio, USA, 2006.

[6] THORNTON J, LAMBERT A. Progress in practical prediction of pressure: Leakage, pressure: Burst frequency and pressure: Consumption relationships [C]//Proceedings of IWA Special Conference 'Leakage 2005'. Halifax, Nova Scotia, Canada, 2005.

[7] ULANICKI B, PRESCOTT S L. Anatomy of leakage [C]// Unpublished Notes Available from Process Control-Water Software Systems. The Gateway, Leicester, LE1 9BH, UK: De Montfort University, 2006.

[8] WU Z Y, SAGE P, TURTLE D. Pressure-dependent leak detection model and its application to a district water system[J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2010, 136(1):116-128.

[9] 高金良,李娟娟,郑成志,等.区域供水管网盲源分离漏失量研究[J].哈尔滨工业大学学报,2015, 47(6):33-37.

GAO Jinliang, LI Juanjuan, ZHENG Chengzhi, et al. Study on leakage of regional distribution network using blind source separation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(6):33-37.

[10] 陈迪超,奚卫红,江标初.供水管网主动漏损控制方法与管理流程[J].中国给水排水,2015,31(18):11-13.

CHEN Dichao, XI Weihong, JIANG Biaocho. Study on active control and management for water supply networks[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(18):11-13.

[11] 马悦,高金良.管网供水压力与漏失量关系研究[J].供水技术, 2013,7(5):15-18.

MA Yue, GAO Jinliang. Study on the relations of water supply pressure and leakage[J]. Water Technology, 2013,7(5):15-18.

[12] 黄钢,金涛,周泽渊.协同进化遗传算法在减压阀优化配置中的应用[J].计算机与数字工程,2014,42(1):36-40.

HUANG Gang, JIN Tao, ZHOU Zeyuan. Application of co-evolutionary genetic algorithm in optimal pressure reducing valve placement[J]. Computer & Digital Engineering, 2014,42(1):36-40.

[13] LING S H, LEUNG F H F. An improved genetic algorithm with average-bound crossover and wavelet mutation operations[J]. Soft Computing, 2007, 11(11):7-31.

(编辑 刘 彤)