

给水管网水泵的优化运行

舒诗湖¹, 周建华², 何文杰^{1, 3}, 赵 明¹, 袁一星¹

(1. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 哈尔滨 150090, E-mail: ssh314@126.com;

2. 广州市政工程设计研究院, 广州 510060; 3. 天津市自来水集团有限公司, 天津 3000403)

摘 要: 为了在保证模拟精度的前提下缩短计算时间, 进行了大规模给水管网微观模型简化的研究. 通过线性化管网微观模型方程, 应用 Gauss-Jordan 法简化线性模型, 研究了基于简化模型的大规模给水管网水泵优化运行决策模型的建立及求解过程. 结合天津市实际管网的计算, 结果表明: 其计算速度大幅度提高, 计算精度基本与简化前的微观模型相同, 与基于微观模型的管网优化运行决策相比有明显的优势.

关键词: 给水管网; 水泵; 优化运行; 遗传模拟退火算法

中图分类号: TU991.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0367-6234(2008)06-0905-05

Optimal pump scheduling based on simplified model of water distribution network

SHU Shi-hu¹, ZHOU Jian-hua², HE Wen-jie^{1, 3}, ZHAO Ming¹, YUAN Yi-xing¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, E-mail: ssh314@126.com; 2. Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute, Guangzhou 510060, China; 3. Tianjin Water Works Group Company Limited, Tianjin 300040, China)

Abstract: The simplification of a large water distribution network was studied to save the calculation time as well as guarantee the precision. The linear model based on linearization of the microscopic model equation was simplified by using Gauss-Jordan method. Establishment and solution of the pump optimal scheduling model based on the simplified model were studied. Results of the optimal scheduling for the water distribution system in Tianjin showed that the calculation time was greatly saved, while the precision was basically the same when the simplified model was used instead of the microscopic model. The simplified model for the optimal scheduling had remarkable advantages compared with the original microscopic model.

Key words: water distribution network; pump; optimal scheduling; hybrid genetic algorithm

给水管网优化运行决策大多基于宏观模型, 其可信性和实用性受到限制. 近年来, 随着计算机性能的大幅提高, 管网微观模型得到应用. 对于大规模给水管网系统微观模型, 单独一次的模拟计算时间完全可以接受. 目前用微观模型进行管网优化运行决策的研究还停留在小规模给水管网系统阶段. 对大规模给水管网系统, 一般保留主要干线建立粗略的微观模型用于优化运行控制, 这将

影响到微观模型的精度, 也影响到优化运行决策模型的精度. 为此, 进行了管网微观模型简化的研究, 以管网简化模型为约束条件, 建立含有混合离散变量的非线性规划模型, 用于优化决策管网系统中的水泵控制, 采用遗传模拟退火算法求解.

1 模型的建立

水泵优化运行决策模型一般以运行费用为目标函数, 目标函数包括:

1) 制水成本. 由水资源费、各水处理厂药剂费、取水与制水过程消耗的电费组成.

收稿日期: 2006-10-25

基金项目: 国家十一五科技支撑计划资助项目 (2006BAJ08B03);
黑龙江省自然科学基金重点资助项目 (ZJG0503).

作者简介: 舒诗湖 (1981—), 男, 博士研究生;

何文杰 (1956—), 男, 教授, 博士生导师.

$$F_1 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J S_{i,j} Q_{i,j} \quad (1)$$

式中: F_1 为制水成本, 元; $S_{i,j}$ 为第 i 泵站第 j 时段单位制水费用, 元 / m^3 ; $Q_{i,j}$ 为第 i 泵站第 j 时段产水量, m^3 ; I 为水源泵站总数; J 为调度周期内时段总数。

2) 泵站电耗. 各泵站将水通过水泵提升到一定扬程输送到配水管网中所消耗的电费 (一般只计直接费用)。

$$F_2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J SP_{i,j} \cdot \sum_{k=1}^K C \cdot Q_{i,j,k} \cdot HS_{i,j,k} \eta_{i,j,k} \quad (2)$$

式中: $SP_{i,j}$ 为第 i 泵站第 j 时段电费单价, 元 / 度; C 为单位换算系数; $Q_{i,j,k}$ 为第 i 个泵站第 j 时段第 k 台水泵的流量, m^3 ; $HS_{i,j,k}$ 为第 i 个泵站第 j 时段第 k 台水泵的扬程, m ; $\eta_{i,j,k}$ 为第 i 个泵站第 j 时段第 k 台水泵的效率; K 为各泵站的水泵总台数。

根据给水管网系统的特性, 建立优化运行决策模型还需考虑:

1) 各泵站日供水能力. 在实际的大规模给水系统中, 各水处理厂的供水能力是有限制的, 实际产水量不能超过水厂的设计供水能力. 考虑本站内水池的调节能力, 则有

$$\sum_{j=1}^J Q_{i,j} \leq Q_{\max i} + V_i, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (3)$$

式中: $Q_{\max i}$ 为第 i 泵站一日内最大出水量, m^3 ; V_i 为第 i 泵站的清水池的有效储量, m^3 。

2) 供需水量相等约束. 在实际管网系统中, 每时段的供水量等于管网系统的用水量, 这是模型中的一个硬约束条件, 采用简化模型或微观模型作为约束时, 可直接作为硬约束条件进行寻优计算

$$\sum_{i=1}^I Q_{i,j} = QF_j, \quad j = 1, \dots, J \quad (4)$$

式中: QF_j 为第 j 时段管网系统的总需水量, m^3 , 可通过水量预测计算。

3) 各水泵出水量之和等于泵站流量

$$\sum_{k=1}^K Q_{i,j,k} = Q_{i,j}, \quad i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J \quad (5)$$

4) 清水池水位的限制

$$VH_{\min i,j} \leq VH_{i,j} \leq VH_{\max i,j}, \quad i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J \quad (6)$$

式中: $VH_{\min i,j}$ 为第 i 泵站第 j 时段清水池水位的上限, $VH_{\max i,j}$ 为第 i 泵站第 j 时段清水池水位的下限。

5) 调度周期内清水池初始与终止水位相等

$$VH_{\text{init},i} = VH_{\text{final},i}, \quad i = 1, \dots, I \quad (7)$$

式中: $VH_{\text{init},i}$ 为第 i 泵站的初始水位, $VH_{\text{final},i}$ 为第 i 泵站的终止水位。

对于泵站内的清水池, 在水厂的供水能力范围内, 可调整产水量满足约束。

6) 各测压点的服务水压应在要求范围内

$$H_{\min i,j} \leq H_{i,j} \leq H_{\max i,j}, \quad i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, J \quad (8)$$

式中: $H_{\min i,j}$ 为第 i 个测压点第 j 时段所需最低的服务水压, m ; $H_{i,j}$ 为第 i 个测压点第 j 时段供水压力, m ; $H_{\max i,j}$ 为第 i 个测压点第 j 时段所允许的最大水压, m ; N 为测压点总数。

7) 节点连续性方程:

$$q_i + \sum_j Q_{ij} = 0, \quad i = 1, \dots, NN. \quad (9)$$

式中: q_i 为节点 i 的节点流量; Ω_i 为与节点 i 相连的所有节点集合; Q_{ij} 为连接节点 i 和 j 的管段的流量; NN 为管网节点总数。

8) 节点流量计算模型

$$q_i = q_{\text{大}} + q_{\text{小}} + q_{\text{漏}} \quad (10)$$

9) 管段压降方程:

$$Q_{ij} = (h_{ij}/s_{ij})^{1/n} = \left[\frac{H_i - H_j}{s_{ij}} \right]^{1/n} \quad (11)$$

式中: H_i 为节点 i 的绝对水压; s_{ij} 为连接节点 i 和 j 的管段阻抗; n 为指数 (取 1.8 ~ 2.0)。

10) 水泵特性曲线方程:

$$HS_{i,j,k} = a_{i,k} + b_{i,k} Q_{i,j,k} + c_{i,k} Q_{i,j,k}^2 \quad (12)$$

式中: $a_{i,k}$, $b_{i,k}$, $c_{i,k}$ 分别为第 i 泵站第 k 台水泵的特性曲线系数。

11) 调速泵的转速限制. 水泵转速受调速装置和水泵本身物理特性的限制, 水泵都有自己的调速范围 $[n_1, n_2]$. 通常, 把水泵发生振动时的转速称为临界转速 n_e . 因此, 调速泵的转速应限制在某一区间

$$n_1 \leq n_i \leq \min\{n_2, n_e\} \quad (13)$$

式中: n_i 为第 i 台调速泵的转速。

12) 水泵的供水能力限制

$$HS_{\min i,k} \leq HS_{i,j,k} \leq HS_{\max i,k} \quad (14)$$

式中: $HS_{\min i,k}$ 为第 i 泵站第 k 台水泵的最低供水扬程, $HS_{\max i,k}$ 为第 i 泵站第 k 台水泵的最高供水扬程. 这由水泵特性曲线的高效区决定。

13) 水泵的静扬程限制. 配水管网系统在规定时段内, 泵站出口压力必须高于某一压力, 对于开启的定速泵和转速已定的调速泵, 其静扬程必须高于泵站出口压力, 否则水泵将会出现倒灌现象. 尤其在大小水泵和高低扬程

水泵搭配时,水泵运行策略选择不当,易出现水泵倒灌现象.但以电耗为目标函数的寻优结果必然关闭倒灌水泵.

$$\left(\frac{n_i}{n_0}\right) a_{i,k} \geq HS_{i,j,k} \tag{15}$$

式中: n_0 为调速泵的额定转速;定速泵则取 $n_i = n_0$.

14)水泵开启次数限制.在给水管网系统的运行费用表达式中,没有考虑水泵维修费用.实际上,系统的运行方式,尤其是水泵频繁开启的次数,直接影响水泵的寿命和故障率. Coulbeck考虑水泵开启次数建立了近似费用项^[11], Lansey提出应在约束条件中加入限制水泵开启次数的系统约束项^[12].为防止水泵的频繁开启,在各时段内不改变水泵的开关状态下,将运行决策周期分成几个时段.综合式(4)~式(5)和式(9)~式(12),建立管网微观水力模型.

$$f(q, r, H, Q) = 0 \tag{16}$$

式中: f 为管网的节点连续性方程组; q 为节点流量向量; r 为管段阻力系数向量,且 $r_{ij} = 0.27853C \cdot D_{ij}^{2.63} / L_{ij}^{0.54}$; H 为节点绝对水压向量和管段流量向量, Q 为节点管段流量向量.

在求解优化运行决策模型时,直接调用管网水力模拟计算模块满足约束式(16).由于优化运行决策问题对管网水力计算有较为苛刻的要求,应对微观模型进行简化.管网简化^[3-7]是基于 Martinez F 的“静态压缩”提出的,属于参数拟合^[8]范畴.求解优化运行决策模型时,可调用简化后的模型满足管网的水力约束条件

$$f(q', r', H', Q') = 0 \tag{17}$$

式中: f 为简化后管网的节点连续性方程组; q' 为简化后的节点流量向量; r' 为简化后的管段阻力系数向量; H' 为简化后的节点绝对水压向量, Q' 为简化后的节点管段流量向量.

综上所述,基于管网微观简化模型的优化运行决策模型可表示为

$$\begin{aligned} \min F &= F_1 + F_2 \\ \text{s.t. } f(q', r', H', Q') &= 0 \\ H_{\min i, j} &\leq H_{i, j} \leq H_{\max i, j} \\ HS_{\min i, k} &\leq H_{i, j, k} \leq HS_{\max i, k} \\ \sum_j Q_{i, j} &\leq Q_{\max, i} + V_i \\ VH_{i, j, \min} &\leq VH_{i, j} \leq VH_{i, j, \max} \\ VH_{\text{init}, i} &= VH_{\text{final}, i} \\ n_1 &\leq n_i \leq \min\{n_2, n_e\}. \end{aligned} \tag{18}$$

2 模型的求解

对于式(18)所述的管网优化运行决策问题,其决策变量为定速泵的开启和调速泵的转速.由于大规模给水管网系统中定速泵居多,调速泵很少,且有调速范围限制,故可采用遗传模拟退火算法进行寻优计算,通过调用微观水力模型及简化模型使得隐式水力约束自动满足.由于不需梯度等高价值信息,因而适用于管网优化运行决策这种大规模的、高度非线性的多峰函数优化,具有良好的全局优化性和稳健性.

遗传模拟退火算法是将遗传算法^[9]与模拟退火算法结合而构成的一种混合优化算法.遗传算法的局部搜索能力较差,但把握搜索过程的总体能力较强;而模拟退火算法具有较强的局部搜索能力,可使搜索过程避免陷入局部最优解,但模拟退火算法却对整个搜索空间的状况了解少,不便于使搜索过程进入最有希望的搜索区域,从而使得模拟退火算法的运算效率不高.将遗传算法和模拟退火算法相互结合,互相取长补短,则可开发出性能优良的全局搜索算法.大量的实践发现管网优化运行决策问题是一个多极值点的非线性函数,因此首先采用 Rosenbrock函数和 Shubert函数对编制的程序进行测试. Rosenbrock函数局部极大点分别为 $f(-2.048, -2.048) = 3905.9262$ 和 $f(2.048, -2.048) = 3897.7342$, 其中 $f(-2.048, -2.048)$ 为全局最大点,由于该函数呈现病态,难以进行全局寻优. Shubert函数共有 760个局部最优点,其中有 18个是全局最优点,最优目标函数值为 -186.731.

$$\begin{aligned} \max f(x_1, x_2) &= 100(x_1^2 - x_2)^2 + (1 - x_1)^2 \\ \text{s.t. } -2.048 &\leq x_i \leq 2.048 \quad i = 1, 2, \end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned} \min f(x_1, x_2) &= \left\{ \sum_{i=1}^5 i \cdot \cos[(i+1)x_1 + i] \right\} \times \\ &\quad \left\{ \sum_{i=1}^5 i \cdot \cos[(i+1)x_2 + i] \right\} \\ \text{s.t. } -10 &\leq x_i \leq 10 \quad i = 1, 2 \end{aligned} \tag{20}$$

遗传模拟退火算法^[10]与基本遗传算法相似,遗传模拟退火算法也从一组随机产生的初始解开始搜索,其计算步骤为:1)初始化进化代数计数器 t 为 0; 2)随机产生初始群体 $P(t)$; 3)评价群体的适应度; 4)对个体进行交叉操作,得到 $P'(t)$; 5)对个体进行变异操作,得 $P''(t)$; 6)对个体进行模拟退火操作,得 $P'''(t)$; 7)评价群体 $P'''(t)$ 的适应度; 8)对个体进行选择 and 复制: $P(t+1) \leftarrow [P(t) \quad P'''(t)]$; 9)满足终止条件算法结束,否

则转到第 4 步。

针对式 (18) 可编制程序求解。决策变量为定速泵的开关状态和调速泵的转速比, 对于约束条件式 (13), 在编码时将其设为上、下限, 进行编码, 其它约束条件按罚函数的方式转化到目标函数中。根据所建模型及上述的遗传模拟退火算法可编制计算程序, 具体计算过程如图 1。同时, 编制程序时考虑可单独采用基本遗传算法和基本模拟退火算法求解。

3 水泵优化运行计算结果分析

天津市给水管网系统中, 基于简化模型的优化运行决策的监测点包括 34 个遥测点、21 个自计量点和 6 个水源出口压力、13 个水源出厂干管的测流点。求解运行优化方案时, 将一调度周期 (24 h) 分成 5 个时段。

将建立的水泵优化运行决策模型 (式 (18)), 按流程图 1 用 Delphi 编制程序, 应用于天津市给水管网系统。采用二进制对 35 台定速泵和 3 台调速泵编码, 将每一个时段的每一台定速泵编码 1 位, 每一台调速泵 5 位。对天津给水管网系统, 因没有调节水池, 且水源供水量稳定, 可对每个时段单独编码进行寻优计算。供水能力约束式 (3) 和测压点压力约束式 (8) 按罚函数的方式和电耗一起构成目标函数; 调用水力计算模块计算目标函数时将满足管网水力约束, 其它约束在编码时考虑可减小搜索范围, 若不考虑时程序搜索空间增大, 但由于水泵效率曲线和目标函数的特性, 寻优的结果也将必然满足约束条件。

遗传模拟退火算法群体规模的大小取 50, 交叉和变异概率采用自适应方法, 终止代数 100, 当连续 10 代目标函数值不再改变时程序终止。遗传模拟退火算法的初始温度可试算, 对天津给水管网系统的水泵优化运行决策, 初始温度取为 150, 终止温度取为 1.5 可收到良好效果。

按上述算法编制程序, 并考虑可采用基本遗传算法和模拟退火算法求解上述水泵优化运行决策模型。大量的实践表明: 从计算时间角度来看, 采用模拟退火算法最快, 从最终解的效果来看, 简单的模拟退火算法和遗传算法有可能收敛到局部最优解, 遗传模拟退火算法则可有效克服这种弊端。对天津给水管网系统, 在 P 300MHz 计算机上, 求解基于微观模型的管网优化运行决策模型时, 模拟退火算法约需 12 h, 基本遗传算法约需 28 h, 遗传模拟退火算法的时间更长。而城市给水管网系统的优化运行决策有严格的时间限制; 否

则, 只能计算管网各种不同运行工况下的水泵优化运行策略, 然后建立专家系统用以指导给水管网系统的优化运行, 即使这样, 现有的基于微观模型的管网优化运行决策问题的求解时间也较长。

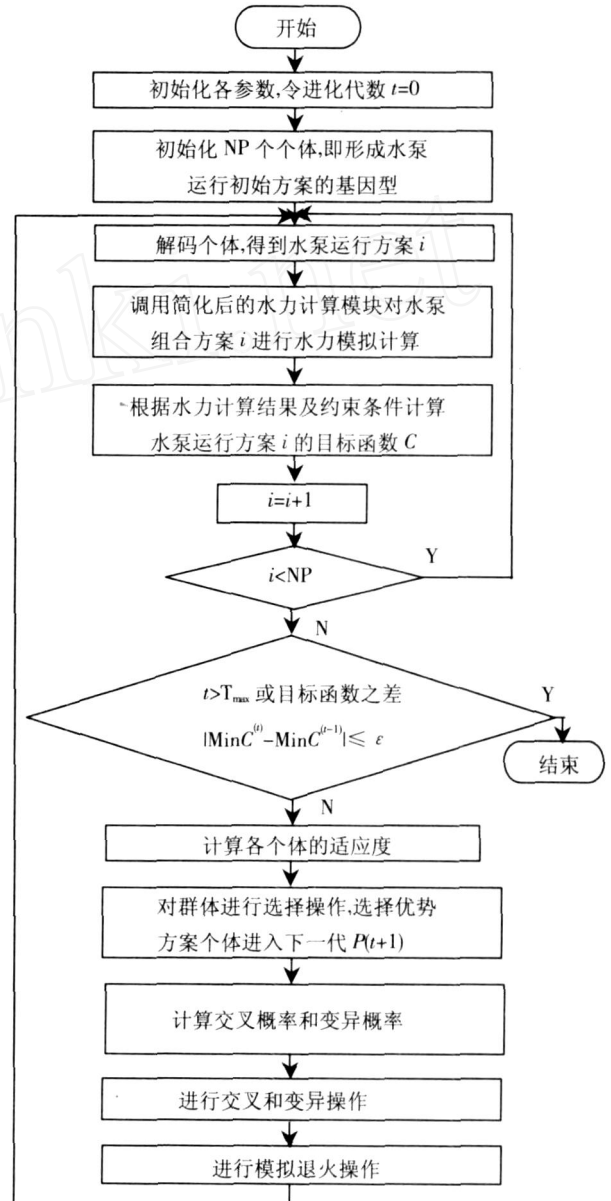


图 1 遗传模拟退火算法求解水泵优化运行模型流程图

为此, 求解基于简化模型的天津市给水管网系统的优化运行决策模型, 在 P 300MHz 计算机上, 模拟退火算法计算不到 1.5 min, 遗传算法计算约 2 min, 用遗传模拟退火算法计算约 3 min, 得到优化解。从实用角度看, 上述基于简化模型的管网优化运行决策的计算速度基本可满足要求, 计算出的某日水泵运行优化方案见表 1~表 3。

将上述基于简化模型的优化运行决策模型求解得到的优化运行方案与经验运行方案比较, 可节省电费 6.04%; 与基于宏观建模的求解得到的优化运行方案相比, 可节省电费 2.32%, 见表 4。

表 1 芥园泵站优化运行时的水泵组合方案

水泵分类	1, 2, 3, 4#	5, 7, 8, 9#	6#	10#	11#	12, 13#	14#
0 ~ 5时段	-	2台	-	1台	-	-	-
5 ~ 8时段	-	2台	-	-	-	-	1台
8 ~ 17时段	1台	3台	-	-	-	-	-
17 ~ 20时段	-	3台	-	-	-	-	1台
20 ~ 24时段	1台	1台	-	-	-	-	1台

表 2 凌庄泵站优化运行时的水泵组合方案

水泵分类	1#	2#	3, 4, 5, 7, 9#	6#	8#	10#
0 ~ 5时段	-	-	1台	-	-	93%
5 ~ 8时段	1台	1台	-	-	-	94%
8 ~ 17时段	-	-	2台	-	-	95%
17 ~ 20时段	1台	1台	-	-	-	94%
20 ~ 24时段	1台	1台	-	-	-	93%

表 3 新开河泵站优化运行时的水泵组合方案

水泵分类	1#	2#	4, 8#	3, 9#	5, 6, 7#	10#	11#	12, 13, 14#
0 ~ 5时段	-	85%	-	-	-	-	81%	-
5 ~ 8时段	-	86%	1台	-	-	-	81%	-
8 ~ 17时段	-	93%	1台	-	-	-	87%	-
17 ~ 20时段	-	93%	1台	-	-	-	85%	-
20 ~ 24时段	-	93%	-	-	-	-	85%	-

表 4 各运行方案所需电费比较 元

类别	实际运行	宏观模型	简化模型
0 ~ 5时段	2821. 4	2656. 2	2590. 2
5 ~ 8时段	5476. 1	5365. 5	5273. 3
8 ~ 17时段	28235. 6	26986. 9	26272. 4
17 ~ 20时段	12560. 1	12069	26272. 4
20 ~ 24时段	6221. 2	6129. 1	6029. 9
合计	55314. 4	53206. 7	51973. 8

4 结论

在可接受的时间范围内,求解基于简化模型的管网优化运行决策模型搜索到的水泵运行方案优于天津市给水管网系统的经验运行方案,也优于基于宏观模型的优化运行决策模型搜到的水泵运行方案.对天津给水管网系统来说,因各水源的制水成本基本相同,则节省的电耗一方面来自于水厂出口压力的降低,另一方面来自于水泵效率的提高.优化各水源之间的流量分配,可合理调度各水源的供水范围,在满足用户要求的前提下降低管网压力,从而减小某些水厂出口压力,达到节能目的,另外,各泵站内水泵数量众多、大小不一,在管网要求的某一出厂压力下,不同水泵组合运行时的效率不同,通过优化组合,可提高泵站效率.数据显示,基于简化模型的优化运行决策方案优于宏观模型.而简化模型是通过简化微观模型形成,计算精度基本与微观模型相同,则基于简化模型搜索到的水泵运行方案有良好的可信性.

参考文献:

[1] COULBECK B, STERLING M. Optimal control of water

distribution systems [J]. Proc. Institute of Electrical Engineers 1978, 125 (9): 43 - 48

[2] LANSEY K E, AWUMAH K. Optimal pump operations considering pump switches [J]. J. Water Resour. Plng. and Mgmt. 1994, 120 (1): 17 - 35

[3] JULIAN KIB, ZEHNPUND A, MARTNEZ F. Simplification of water distribution network models [C] // Proceedings of the Hydroinformatics '96 International Conference. Balkema: Taylor & Francis, 1996. 493 - 500

[4] MARTNEZ F, PEREZ R. Obtaining macromodels from water distribution detailed models for optimization and control purposes [C] // Integrated Computer Applications for Water Supply and Distribution. Balkema: Taylor & Francis, 1993. 1 - 4

[5] 高金良, 赵洪宾. 大型复杂给水管网系统简化 [J]. 给水排水. 2002, 28 (8): 28 - 31

[6] 赵洪宾. 给水管网系统理论与分析 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003

[7] 严煦世, 赵洪宾. 给水管网计算理论 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986

[8] EDWARD J A, KHAIRY H A. Hydraulic-network simplification [J]. J. Water Resour. Plng. and Mgmt. 1995, 121 (3): 235 - 240

[9] LLICH N, SMONOVIC S P. Evolutionary algorithm for minimization of pumping cost [J]. Journal of Computing in Civil Engineering 1998, 12 (4): 232 - 240

[10] 周建华. 大规模城市给水管网系统优化运行模型研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学. 2003

(编辑 张 红)