

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.21.010

考虑成本-弹性-水质的供水管网多目标协同设计方法

苏炯恒¹, 王琦¹, 王礼炳¹, 黄稳¹, 王志红¹, 刘书明²

(1. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006; 2. 清华大学环境学院 智慧水务研究中心, 北京 100084)

摘要: 基于多目标优化的思想提出一种统筹考虑经济性、弹性和水质状况的供水管网协同设计方法。首先,在满足多个工况(最高日最高时、典型日和多种消防事件)及约束条件下,以管网总成本(包含建设与运营成本)、管网弹性力指数和水龄作为优化目标,建立供水管网多目标设计的数学模型。然后,采用自适应多目标进化算法(Borg)对优化模型进行求解,获得帕累托(Pareto)最优解集。最后,以Anytown管网为研究对象,通过与基于NSGA-Ⅱ的优化计算结果以及仅考虑成本和弹性的优化计算结果进行对比,验证所提出的协同设计方法的合理性。结果显示,上述协同设计方法既能揭示成本、弹性和水质的权衡关系,又可在满足多种条件的同时显著改善管网水质状况,从而为决策者提供综合效益更优的管网设计方案。

关键词: 供水管网; 弹性; 水质; 多目标优化; Borg

中图分类号: TU991.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)21-0058-08

A Multi-objective Coordinated Design Method for Water Distribution Networks Considering Cost, Resilience and Water Quality

SU Jiong-heng¹, WANG Qi¹, WANG Li-bing¹, HUANG Wen¹, WANG Zhi-hong¹,
LIU Shu-ming²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Smart Water Research Centre, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the idea of multi-objective optimization, a coordinated design method of water distribution network considering economy, resilience and water quality was proposed. Firstly, a multi-objective design mathematical model of water distribution network was established by taking total cost (including construction and operational costs), network resilience index and water age as optimal objectives under satisfying multiple loading (instantaneous peak, average day demand, multiple fire events) and constraint conditions. Then, the optimal model was solved by using auto-adaptive multi-objective evolutionary algorithm (Borg), and Pareto optimal solution set was obtained. Finally, rationality of the proposed coordinated design method was verified in the Anytown network by comparing with the optimal results of those based on NSGA-Ⅱ as well as only considering cost and resilience. The above coordinated design method can not only reveal the trade-off between cost, resilience and water

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51879139)

通信作者: 王琦 E-mail:wangqiguangzhou@163.com

quality, but also significantly improve the water quality of water distribution network while satisfying various conditions, so as to provide decision-makers with design solutions of better overall benefits.

Key words: water distribution network; resilience; water quality; multi-objective optimization; Borg

供水系统是城市基础设施建设的重要组成部分,是保障人民正常生活和生产的重要物质基础,是城市发展的重要依托和制约因素。其中,供水管网承担自来水的储存、运输和调度等重大任务,在供水系统中具有举足轻重的地位。然而,我国供水管网的老化问题较为严重,导致系统水力性能下降,供水可靠性不足^[1]。同时,管网老化会加剧水质恶化程度,使供水安全性无法得到保障^[2]。目前,如何在降低供水管网总成本的同时使效益最大化,是该领域的研究热点。传统的供水管网设计主要以优化经济性和可靠性指标为主^[3-4],较少考虑水质。但是,随着社会经济的不断发展,供水水质安全越来越受到重视。

计算机技术和优化算法的不断发展为供水管网的多目标优化设计提供了新工具。目前,以SPEA2^[5]、NSGA-II等^[6]为代表的多目标进化算法已成为解决多目标优化问题的主要方法之一,它们具有并行随机搜索、全局搜索能力强、能求解高度复杂非线性问题的优势^[7]。但是,随着优化目标的增加,帕累托(Pareto)解集空间中非支配解的规模呈指数增加,对种群的选择和进化产生“支配阻力”,从而对传统进化算法中的搜索算子性能和非支配排序方法构成挑战^[8]。相关对比试验指出,自适应多目标进化算法Borg在解决不同规模和复杂度的多目标优化问题上具有较大优势^[9-10]。因此,笔者建立管网总成本、弹性和水质的多目标优化数学模型,通过与采用NSGA-II对目标寻优的计算结果以及未考虑水质的传统优化模型进行对比分析^[11],为决策者提供更全面的结果,从而制定综合效益更优的方案。

1 供水管网多目标优化数学模型

1.1 经济性目标函数

供水管网总成本是指建设成本与建设年限内运行成本的现值之和。该计算方法引入折现率,将未来的成本折算成现值。具体表达见下式:

$$\text{Minimize: } S = C + O \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (1)$$

式中 i ——折现率, %

n ——建设年限, a

C ——供水管网建造成本, 美元

O ——供水管网每年运行成本, 美元

S ——供水管网总成本, 美元

1.2 可靠性目标函数

管网可靠性评价的替代指标包括最小剩余水头指数、总剩余水头指数、流量熵、弹性力指数和管网弹性力等。相关对比试验^[12]指出,管网弹性力指数(Network Resilience, 表示为 I_n)与系统可靠性的相关性更强。因此,选择管网弹性力 I_n 作为可靠性评价的替代指标。该指标引入节点均匀系数(U_j),可综合考虑节点冗余能量和可靠性回路的影响,具体表达见以下公式:

$$U_j = \frac{\sum_{i=1}^{np_j} D_i}{np_j \times \max(D_i)} \quad (2)$$

Maximize: $I_n =$

$$\frac{\sum_{j=1}^{nn} U_j Q_j (H_j - H_j^{\text{req}})}{\left[\sum_{k=1}^{nr} Q_k H_k + \sum_{i=1}^{npu} \left(\frac{P_i}{\gamma} \right) + \sum_{t=1}^{nt} Q_t H_t \right] - \sum_{j=1}^{nn} Q_j H_j^{\text{req}}} \quad (3)$$

式中 U_j ——节点 j 的均匀系数。 $U_j = 1$ 表示连接至节点 j 的所有管道管径相同。 $U_j < 1$ 表示连接至节点 j 的管道至少有两条直径不相同

D_i ——连接至节点 j 的管道 i 直径, mm

np_j ——连接至节点 j 的管道数量

I_n ——管网弹性力指数

Q_j, Q_k, Q_t ——分别表示节点 j 、水源 k 、水池 t 的流量, m^3/s

H_j, H_k, H_t ——分别表示节点 j 、水源 k 、水池 t 的自由水头, m

nr, npu, nt ——分别为水源、水泵和水池的数量

P_i ——水泵 i 的输出功率, kW

γ ——水的容重, $9.81 \text{ kN}/\text{m}^3$

1.3 水质安全性目标函数

管网水质状况与水龄大小有关,随水龄增大,油

度、色度、臭味、COD_{Mn}等常规指标均呈上升趋势,水质逐渐变差^[13]。因此,选取管网水龄作为水质安全性评价的替代指标,用于表征水在管网系统中水质最不利点(即管网系统中水龄最高的节点)的停留时间。通过优化水质最不利点的水龄,达到提高管网整体水质的目的,具体表达见下式:

$$\text{Minimize: Age} = \max(\text{Waterage}_j) \quad (4)$$

式中 Waterage_j——节点 j 的水龄, h

1.4 决策变量与约束条件

决策变量包括供水管网中需要优化的对象,如管道的直径、水池的水位、泵的开启状态等(具体问题具体分析)。在优化设计过程中,必须满足节点连续性方程、能量守恒方程、节点水压约束和可选标准管径约束等条件,具体数学表达见以下公式:

节点连续性方程:

$$Aq + Q = 0 \quad (5)$$

能量守恒方程:

$$Lh = 0 \quad (6)$$

节点水压约束:

$$H_j \geq H_{\min} \quad (7)$$

可选标准管径约束:

$$D_k \in \{D_1, D_2, \dots, D_z\} \quad (8)$$

式中 A——衔接矩阵(联系矩阵)

Q——管网系统的节点流量, m³/s

q——管网系统的管段流量, m³/s

L——回路矩阵

h——管网系统的管段水头损失, m

H_j、H_{min}——分别为节点 j 的实际水压和最小水压, m

D_k——任意一根管道的管径大小, mm

z——可选标准管径总数目

1.5 优化算法

借助 Borg 算法求解供水管网的多目标优化模型。Borg 算法由宾夕法尼亚大学 Reed 教授课题组研发,是一种适用于求解多目标优化问题的高级算法^[8],具有以下 3 大特点:①采用基于 ε-支配的排序方式。为保证解集的收敛和多样性,在 Pareto 支配的基础上,利用 ε-支配作为新的评价准则对解集进行比较与排序。建立外部解集档案 Archive,用于保存当前最优的非支配解。其中,ε 代表解集的最小分辨率,ε 值的设定会影响求解目标的精度,从而影响进化速度。排序过程中会忽略小于一个 ε 的

数值差异,有效控制 Pareto 的解集规模。②具有自适应的种群大小以及两种重启机制。第一种方式是在 ε-支配的基础上,建立衡量搜索进程的指标 ε-progress。搜索过程中,若解的进化距离小于 ε,原搜索停滞,并重新激活新的搜索。另外一种方式是通过判断种群大小与外部解集档案大小的比值决定是否激活新的搜索,若该比值大于 4(即当前种群的规模超过最优解集规模的 4 倍),则会触发重启(以原始的种群大小在解空间重新初始化)。③配备多种搜索算子进行联合优化。在优化计算过程中,Borg 算法使用 6 种不同搜索性能的算子。根据每个算子所产生子代的质量,建立反馈机制,并自动调整每个算子的应用比例,以保证搜索性能突出的算子有更大的概率产生子代个体,从而提高解集的质量。

Borg 算法的主循环流程如图 1 所示^[8]。

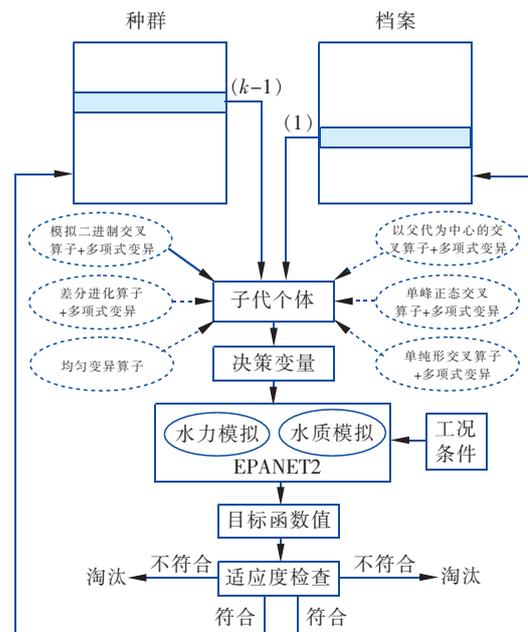


图 1 Borg 算法主循环流程

Fig. 1 Flow chart of the Borg algorithm main loop

依据自适应多算子反馈机制,每次选择一种算子进行遗传操作(图 1 中 6 种算子的选择以虚线和实线表示,实线表示选取,虚线表示待选取),而每种算子被选择的机会取决于其子代个体在外部档案的存活情况。图 1 显示当前选择了模拟二进制交叉算子和多项式变异进行遗传操作。该过程均匀且随机地从档案中选取 1 个父代个体,通过联赛选择法从种群中选取 k-1 个父代个体。含有 k 个父代个

体的算子生成一个子代个体后,作为决策变量传入优化数学模型(其中包括基于EPANET2的水力、水质计算过程)。随后,结合多种工况条件算出当前子代个体对应的目标函数值。对该目标函数值进行适应度检查,不符合保留条件的子代个体将被淘汰,符合存活条件的子代个体被保留,分别保存至种群和档案中。在Borg算法的优化计算过程中,程序将定期检测 ϵ -progress搜索进程以及种群大小与外部集解档案大小的比值这两个判断条件。若达到重启的条件,则主循环停止,并调用重启动机制。重启动完成后,恢复主循环过程。整个优化过程将一直重复上述步骤,直至满足终止条件。

2 案例管网

2.1 管网简介

以Anytown管网为研究对象进行案例分析。该管网是由Walski等^[14]建立起来用于试验的基准管网,与实际供水管网的特征非常相似,详细数据可从英国埃克斯特大学水系统中心网站获取^[15],具体结构见图2。

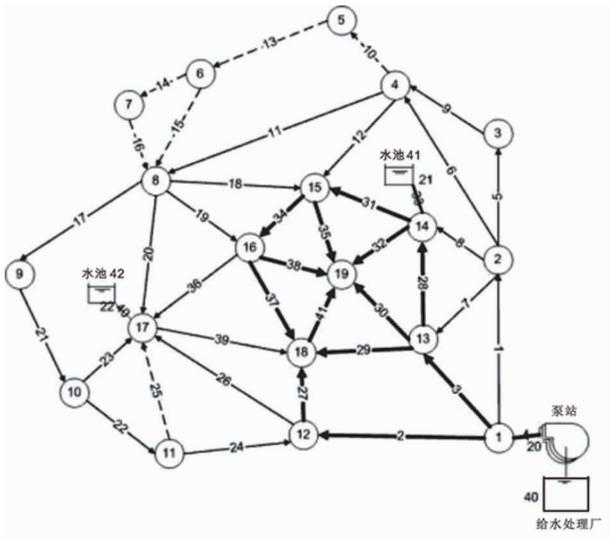


图2 Anytown供水管网结构

Fig. 2 Configuration of Anytown water distribution network

自来水从给水处理厂出发,经过3台性能完全相同的并联水泵,进入管网。在图2的管网中,管道主要分为3种类型,中心城区的15根已建管道以粗实线表示,住宅区的20根已建管道以细实线表示,6根新建管道以虚线表示(其中5根位于管网北部的开发区)。现有两个用于调蓄的水池41和42,分别连接节点14和17,标高均为65.53 m。整个供水管网的运行需满足5种工况条件,具体包括典型日

(24 h)、最高日最高时(1 h)及三种不同火灾位置的运行工况(2 h)。

2.2 目标函数与决策变量

本研究以最小化总成本、最大化管网弹性力指数和最小化水质最不利点的水龄为目标函数,实现多个目标之间的协同优化设计。根据对象类型的不同,分为管道类、水池类及水泵类三种类型,共计77个决策变量,具体的决策变量结构见图3。在管道类变量中,针对35根现有管道,可选择不做任何处理、管内清洁衬里或铺设平行管三种处理措施。针对6根新建管道和2根水池立管,可选择新建或者不建的处理方式(若水池立管管径为0,则表示不建水池)。每根管道的处理方式对应一个变量,因此,管道类变量共有43个,对应1~43编码位。在水池类变量中,根据文献^[3]的设计条件,可考虑新建不超过2个水池,且新建水池不能设计在已建水池和与泵站直接连接的节点位置上(即节点1、14和17)。2个新建水池的设计均需要考虑5个变量,包括位置、直径、水池底部标高、溢流水位高度和消防水位高度。因此,水池类变量共有10个,对应44~53编码位。在水泵类变量中,模拟周期为1 d(24 h),以1 h为时间步长,每个时间步长内水泵开启台数为一个变量。因此,水泵类变量共有24个,对应54~77编码位。



图3 决策变量结构

Fig. 3 Configuration of decision variables

2.3 约束条件

除了1.4节中提到的约束条件外,还包括节点压力最低值(因不同工况条件而异)、节点压力差异累加值(Nodal Pressure Difference, NPD)和水池运行水位差异累加值(Tank operating Level Difference, TLD)。不同工况条件下,每个节点应满足最低压力值要求,且节点压力差异累加值为0。此外,在24 h模拟周期中,即水池从初始进水到结束放空的时间

内,水池运行水位差异累加值也为 0。具体约束条件见表 1。

表 1 约束条件

Tab. 1 Constraint conditions

约束函数	约束形式	约束限制
典型日工况的节点压力最低值	\geq	276 kPa(40 psi)
最高日最高时工况的节点压力最低值	\geq	276 kPa(40 psi)
火灾工况的节点压力最低值	\geq	138 kPa(20 psi)
节点压力差异累加值(NPD)	$=$	0 kPa(0 psi)
水池运行水位差异累加值(TLD)	$=$	0 kPa(0 psi)

NPD 和 TLD 的计算见以下公式:

$$NPD = \sum_{j=1}^{nl} \sum_{t=1}^{ns} \sum_{i=1}^{nn} |p_{i,t}^j - p_{i,t}^{j_{min}}| \quad \text{if: } p_{i,t}^j < p_{i,t}^{j_{min}} \quad (9)$$

$$TLD = \sum_{i=1}^{nn} (|h_i^{min} - H_i^{min}| + |h_i^{max} - H_i^{max}| + |h_i^{end} - h_i^{start}|) \quad \text{if: } h_i^{end} \neq h_i^{start} \quad (10)$$

式中 nl 、 ns 、 nn ——分别为 j 工况、 t 时刻和节点 i 的数量

$p_{i,t}^j, p_{i,t}^{j_{min}}$ ——分别为 j 工况条件下 t 时刻节点 i 的实际压力值和最低压力值

h_i^{max}, h_i^{min} ——分别为典型日工况下水池 i 的模拟最高水位和最低水位

H_i^{max}, H_i^{min} ——分别为典型日工况下水池 i 要求达到的最高水位和最低水位

h_i^{end}, h_i^{start} ——分别为典型日工况下水池 i 的结束水位和初始水位

3 结果分析

3.1 Pareto 解集分析

在优化计算过程中,确定决策变量的上下界值,并分别预设 3 个目标函数的精度值(总成本、管网弹性力指数、水龄)为 0.001、0.000 1、0.01,初始种群大小为 100,进化代数为 5 000。为降低初始种群随机性对优化结果的影响,采用 10 个不同的随机数种子独立运行优化程序,通过合并 10 次计算的最优解集获得 Anytown 管网多目标优化的 Pareto 最优解。优化计算结果见图 4。其中,图 4(a)显示两种算法的优化结果,均为 Pareto 曲面。在非支配解的数量上,Borg 算法获得 248 个解,NSGA - II 算法获得 189 个解,总体相差不大。从优化的质量上看,Borg 算法的 Pareto 前锋朝理论最优点(〔成本,弹性,水龄〕=〔0,1,0〕)的收敛程度比 NSGA - II 算法更充分。因此,Borg 算法在求解多目标优化问题上具有较好的效果。

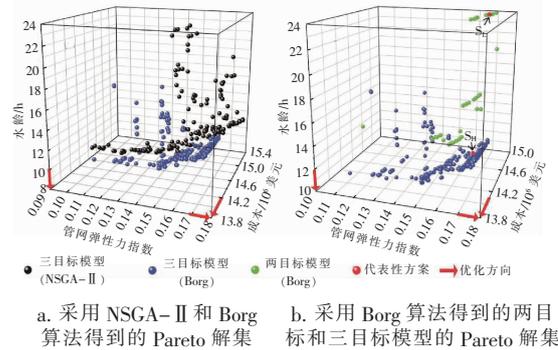


图 4 多目标优化模型的 Pareto 解集对比

Fig. 4 Comparison of the Pareto solution sets of multi-objective optimization models

图 4(b)显示采用 Borg 算法获得的两种多目标优化模型(以下分别简称为三目标模型和两目标模型)的 Pareto 最优解集。由三目标模型的优化结果可知,管网水龄的降低(水质改善)必须以牺牲管网弹性力指数(可靠性降低)或增加总成本为代价。随着管网弹性力指数的增大,水龄和总成本也会随之增大。换句话说,在管网设计阶段盲目追求节约成本,将导致管网整体可靠性的降低以及增加水质恶化的风险。因此,通过详细分析 Pareto 曲面上 3 个目标之间的权衡关系,有望找到最佳的折衷方案。两目标模型的优化结果是由总成本和管网弹性力指数所在空间构成的 Pareto 曲线。为便于与三目标模型进行对比,将两目标模型的解代入三目标模型中,计算得出水龄的具体数值,并投影至三维空间中。将三目标模型的优化结果与两目标模型进行对比分析,发现三目标优化模型的解集数量显著多于两目标模型,这是因为非支配解的数目随目标函数个数的增加而呈指数增长,因此三目标模型能提供更多的解决方案。在总成本对比中,两种模型大部分在 1 400 ~ 1 500 万美元之间,总体差别不大。在管网弹性力指数对比中,两目标模型的解基本上为 0.15 ~ 0.18,其中约 75% 的解大于 0.16,甚至有的解达 0.17 以上。三目标模型的解基本上为 0.12 ~ 0.17,其中约 70% 的解大于 0.15,且所有解均小于 0.17,证明两目标模型的管网弹性力指数比三目标模型略有优势。在水龄对比中,三目标模型的水龄大部分处在 10 ~ 12 h 的区间,两目标模型的水龄基本处在 14 ~ 24 h 的范围,证明三目标模型的水质总体优于两目标模型。因此,在水质要求较高的情况下,考虑水质的管网优化设计更具有优势。

3.2 代表性方案分析

从 Borg 算法获得的两种多目标优化模型的 Pareto 解集中,分别选取总成本相当接近的两个代表性方案进行分析,以 S_H (考虑水质) 和 S_L (未考虑水质) 表示,具体细节见表 2 和图 5。

表 2 代表性方案详细对比

Tab.2 Detailed comparison of representative schemes

变量	方案	
	S_L	S_H
管道清洁衬里成本/ 10^6 美元	0.34	0.41
平行管铺设成本/ 10^6 美元	7.75	7.41
新管建造成本/ 10^6 美元	0.61	0.96
管道建造成本/ 10^6 美元	8.70	8.78
水池建造成本/ 10^6 美元	0.14(1 个水池)	0
水泵运行成本/ 10^6 美元	5.89	5.95
水泵累积运行小时数/h	44	40
总成本/ 10^6 美元	14.73	14.73
管网弹性力指数	0.17	0.16
水龄/h	24.00	10.68

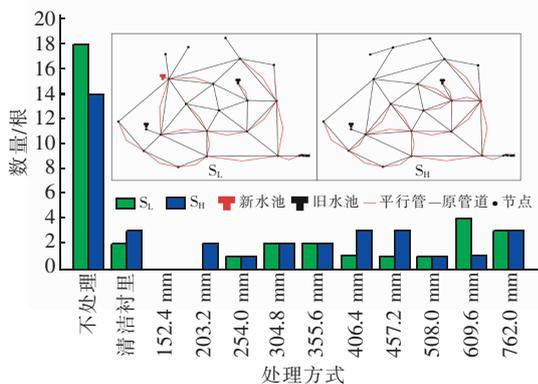


图 5 两个代表性均衡解的管网设计方案

Fig.5 Comparison of two representative solutions (S_L vs. S_H)

由两种方案中管网弹性力指数与水龄的关系可知, S_H 方案以牺牲少量可靠性为代价, 获得管网水龄的显著降低。进一步细化, 发现两种代表性方案的成本结构有所不同, S_H 方案的水池建造成本为 0 (表示不建新水池), 而 S_L 方案选择新建一个水池。新水池虽可提高管网系统的调蓄能力, 但可能增加水在管网系统的停留时间, 从而增大水质恶化的风险。在水泵运行成本中, S_L 方案的水泵累积运行小时数比 S_H 方案多 4 h, 运行成本却低 6 万美元, 这是因为 S_L 方案中有更多数量的水池与水泵进行联合供水, 可达到优化运行成本的目的。在管道建造成本中, S_L 方案铺设平行管的成本比 S_H 方案高约 5%, 而管网弹性力指数约增大 6%。结合图 5 可

知, 虽然 S_L 方案的平行管数量比 S_H 略少, 但大管径 (609.6 mm) 比例较高, 因此, 提高大管径管道的比例比增加平行管的铺设数量更有利于管网弹性力指数的提升。此外, 图 5 还绘制了两种方案的管网布局图, 直观显示新水池、平行管和新管的具体位置。

为进一步比较两种代表性方案, 以 24 h 为一个周期, 分析每小时管网弹性力指数、水龄、泵开启台数以及水池运行水位的变化情况, 结果见图 6。

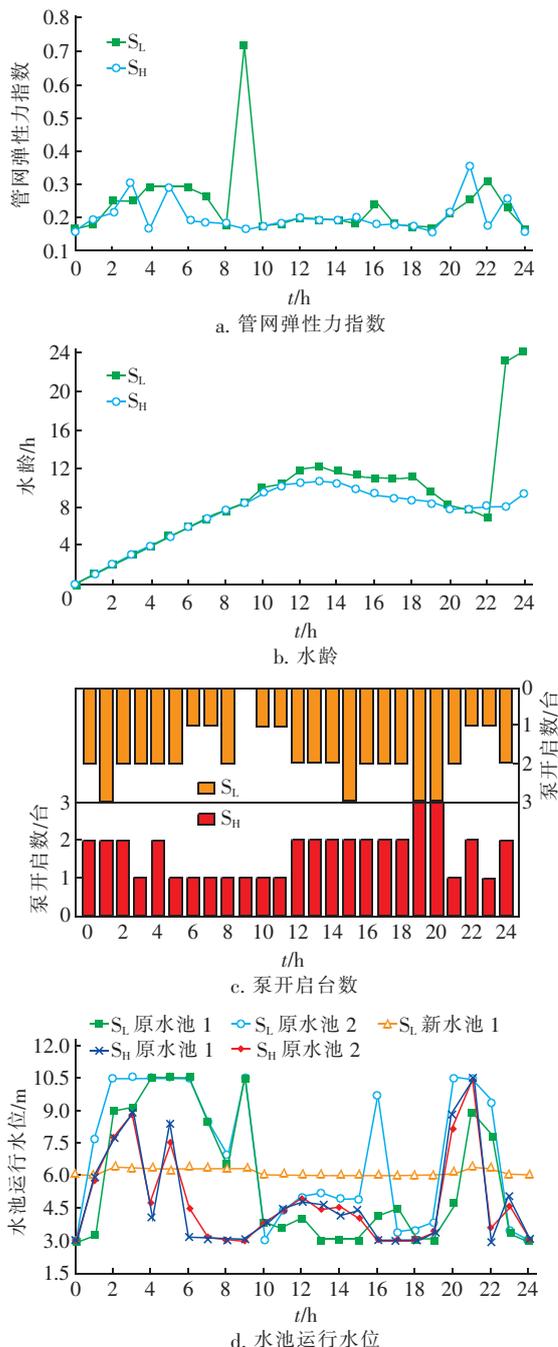


图 6 系统运行时的动态变化情况

Fig.6 Variations of system operations

图6(a)显示, S_H 方案的管网弹性力指数变化与 S_L 方案相似,但 S_L 方案在第9个小时有突变的管网弹性力指数,达0.7以上。具体原因是该时刻全部水泵处于停机状态,管网中可利用的最大冗余能量急剧降低,导致管网弹性力指数显著上升。图6(c)显示水泵每个小时的开启台数,通过统计其标准差,发现三目标模型和两目标模型的标准差分别为0.62和0.75,证明 S_H 方案在水泵运行中具有更高的稳定度。因此,虽然 S_L 方案的运行成本更低,但是频繁启闭会加速水泵机组的磨损。图6(b)中, S_L 方案的水龄在第22小时前的变化趋势与 S_H 方案相似,但在第23小时,节点8的水龄突变式地增大至23 h,随后节点6和7的水龄增大至24 h。对照图6(d)中新水池的运行水位可知,新水池在第22小时开始出水,此时水池内的水龄为22 h,当在第23小时出水完毕时,与水池相连的节点8的水龄变为23 h。位于节点8且水龄为23 h的水在管内运行1 h后到达节点6和7,此时节点6和7的水龄为24 h。由图6(d)中各水池的运行方式可知, S_L 方案中原水池的运行方式和 S_H 方案相近,但新水池的变化幅度为0.30 m,远小于两种方案的原水池变幅。这是因为布置在节点8的新水池的主要功能体现在有效降低开发区(节点5-7)的消防隐患。仔细分析发现,新水池的消防预留水位达到6.10 m,而原水池的消防预留水位仅为3.05 m。在消防流量最大的工况中(即节点5-7同时发生火灾),节点8紧邻着火点,可快速满足消防用水需求。因此,虽然新水池的布置和运行方式显著提高了开发区的消防安全水平,但其副作用是容易导致附近区域的水龄过长,带来额外的水质安全风险。

4 结论

① 提出统筹考虑总成本、弹性和节点最大水龄的供水管网多目标协同设计方法。通过构建包含水质的多目标优化模型及采用Borg算法进行求解,既能实现较为理想的优化效果,又能有效帮助管理人员揭示总成本、可靠性和水质目标之间的权衡关系,可为制定综合效益更优的管网设计方案提供科学的决策支持,最大程度避免由于考虑单一目标而带来的负面效应。

② 基于Anytown案例管网对上述协同设计方法进行验证,选择两种代表性方案进行比较分析,发现在未考虑水质目标的传统优化模型中会提供新建

水池的设计方案。虽然该方案能提高管网的调蓄水平,同时显著提升系统应对消防事故的能力,但这种方案也会对管网水质带来负面影响。采用多目标协同设计方法,能够在不建造新水池的条件下,既满足各种消防工况的供水需求,又合理控制管网水质的恶化,同时对管网系统的可靠性水平不会带来显著的影响。因此,考虑水质的多目标协同设计方法能够协助决策者制定出更加合理的管网设计方案,实现最优的投入产出比。

参考文献:

- [1] 马卫东. 汉阳供水管网一体化规划方案的设计与实施[J]. 中国给水排水, 2013, 29(20): 53-56.
Ma Weidong. Design and implementation of integrated planning of Hanyang water supply pipe network [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(20): 53-56 (in Chinese).
- [2] 李新貌, 严国, 陈丽娜. 生活饮用水管网水质管理的探讨[J]. 城镇供水, 2013(6): 82-84.
Li Xinmao, Yan Guo, Chen Lina. Discussion on water quality management of drinking water pipe network [J]. City and Town Water Supply, 2013(6): 82-84 (in Chinese).
- [3] Farmani R, Walters G A, Savic D. Trade-off between total cost and reliability for anytown water distribution network [J]. J Water Resour Plan Manage, 2005, 131(3): 161-171.
- [4] 刘书明, 李明明, 王欢欢, 等. 基于NSGA-II算法的供水管网多目标优化设计[J]. 中国给水排水, 2015, 31(5): 50-53.
Liu Shuming, Li Mingming, Wang Huanhuan, et al. Multi-objective optimization design of water distribution system based on non-dominated sorting genetic algorithms-II [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(5): 50-53 (in Chinese).
- [5] Zitzler E, Laumanns M, Thiele L. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm [A]. Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial Problems [R]. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- [6] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Trans Evol Comput, 2002, 6(2): 182-197.
- [7] 杨夏雯. 多目标进化算法的改进及其应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

- Yang Xiawen. Improved Multi-objective Evolution Algorithms and Their Applications [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012 (in Chinese).
- [8] Hadka D, Reed P. Borg: An auto-adaptive many-objective evolutionary computing framework [J]. *Evol Comput*, 2013, 21(2): 231–259.
- [9] Reed P M, Hadka D. Evolving many-objective water management to exploit exascale computing [J]. *Water Resour Res*, 2014, 50(10): 8367–8373.
- [10] Reed P M, Hadka D, Herman J D, *et al.* Evolutionary multiobjective optimization in water resources; The past, present, and future [J]. *Adv Water Res*, 2013, 51: 438–456.
- [11] 熊柳. 基于高维多目标优化的供水管网设计研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
Xiong Liu. Design of Water Supply Network Based on High Dimensional Multi-objective Optimization [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018 (in Chinese).
- [12] Raad D, Sinske A N, van Vuuren J H. Comparison of four reliability surrogate measures for water distribution systems design [J]. *Water Resour Res*, 2010, 46(5): W05524.
- [13] 洪觉民, 陆坤明, 何寿平. 中国城镇供水技术发展手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
Hong Juemin, Lu Kunming, He Shouping. Development Manual of Urban Water Supply Technology in China [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006 (in Chinese).
- [14] Walski T M, Brill E D, Gessler J, *et al.* Battle of the networks models: Epilogue [J]. *J Water Res Plan Manage*, 1987, 113(2): 191–203.
- [15] Centre for Water Systems (CWS). Benchmark networks for design and optimisation of water distribution networks, University of Exeter, Exeter, (U. K) [EB/OL]. <http://www.exeter.ac.uk/cws/benchmarks>, 2004–10–11.



作者简介: 苏炯恒 (1993 –), 男, 广东新会人, 硕士研究生, 研究方向为城市给水排水系统模拟与优化。

E-mail: sujiongheng@foxmail.com

收稿日期: 2019–06–14

节约每一滴水,

回收每一滴水,

让每一滴水多循环一次