

胡世沛, 杨坤, 鲍月全, 等. 大型多水源供水管网多目标分区优化方法[J]. 净水技术, 2026, 45(9): 64-72.

Hu S P, Yang K, Bao Y Q, et al. Multi-objective optimization of pipelines districting for large-scale water supply distribution networks with multiple water resources[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(9): 64-72.

大型多水源供水管网多目标分区优化方法

胡世沛¹, 杨坤^{2,*}, 鲍月全³, 张新³, 黄旦光⁴, 颜合想¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海城市水资源开发利用国家工程中心有限公司, 上海 200082; 3. 上海城投水务(集团)有限公司, 上海 200082; 4. 宁波水表(集团)股份有限公司, 浙江宁波 315000)

摘要 【目的】大型供水管网冗余度高、管理难度大,为保障供水管网系统安全、提升水资源利用率,供水管网分区管理是1种有效的技术手段。【方法】本文提出了1种便于实行压力与计量管理,同时兼顾改造经济性与水质安全的多目标供水管网分区方法。该分区方法以输配分离为核心管理理念,以管网运行能耗与改造费用、分区内部压力均匀性和管网水质安全性为主决策指标,通过构建大型供水管网输配分离格局明晰管道输配功能,结合空间聚类算法形成候选分区方案集,采用非支配排序遗传算法(NSGA-II)迭代更新以获得分区方案的帕累托(Pareto)前沿,实现大型供水管网优化分区。【结果】基于该分区方法对H市大型管网进行优化分区,形成H市管网输配分离格局,构成的Pareto集共包含22个解,分区数目为52~96个,压力标准差总和比为2.62~3.45,节点平均水龄比为0.68~0.98,每年运行与改造折算费用为8 722.6万元~9 294.8万元,最终选择方案分区数为59个,相对于优化分区前平均水龄降低11%,改造折算与运行能耗费用为8 890.4万元/a。【结论】本文提出的分区方法能高效实现大型管网自动优化分区,同时有效控制改造和长期运行成本,控制水龄,对于大型管网分区改造工程具有借鉴指导作用。

关键词 大型供水管网; 分区管理; 水压管理; 管网水龄; 多目标优化

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)09-0064-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.09.007

Multi-Objective Optimization of Pipelines Districting for Large-Scale Water Supply Distribution Networks with Multiple Water Resources

Hu Shippei¹, Yang Kun^{2,*}, Bao Yuequan³, Zhang Xin³, Huang Danguang⁴, Yan Hexiang¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. National Engineering Research Center of Urban Water Resources Co., Ltd., Shanghai 200082, China;

3. Shanghai Chengtong Water Group Co., Ltd., Shanghai 200082, China;

4. Ningbo Water Meter (Group) Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract [Objective] Large-scale water supply distribution networks are characterized by high redundancy and complex management challenges. To ensure the safety and reliability of the water distribution network system and improve the efficiency of water resource utilization, districting management has emerged as an effective technical approach. [Methods] This paper proposes a multi-objective water distribution network districting method that facilitated pressure and metering management while considering the economic feasibility of the modification and ensuring water quality safety. The core concept of this method was separation of the water supply and distribution functions. Key decision-making criteria include operational energy consumption, renovation costs, internal pressure uniformity within the districts, and water quality safety of the network. A spatial clustering algorithm was used to generate a set of candidate districting solutions. A non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) iteratively updated these solutions to derive the Pareto front of districting alternatives, facilitating the optimal districting of large-scale water distribution networks. [Results] The

[收稿日期] 2024-11-29

[基金项目] 上海市科委项目(22dz1201804);上海城投水务(集团)有限公司科研项目(KY.WB.23.008)

[作者简介] 胡世沛(2000—),男,硕士研究生,研究方向为水资源与给水排水系统设计与运行最优化,E-mail: 2232831@tongji.edu.cn。

[通信作者] 杨坤(1981—),女,高级工程师,主要从事供水系统安全保障与智慧化工作,E-mail: yklgd@163.com。

proposed districting method was applied to optimize the districting of the large-scale water distribution network in H City. This result ed in a separation pattern for the supply and distribution functions of the network, with the Pareto set containing 22 solutions. The number of districts ranged from 52 to 96, the range of total pressure standard deviation ratios was between 2. 62 and 3. 45, the range of average node water age ratios was from 0. 68 to 0. 98, and the annual operational and renovation equivalent costs ranged from 87. 22 million yuan to 92. 95 million yuan. The final chosen districting scheme consisted of 59 districts, which result ed in an 11% reduction in average water age compared to the pre-optimization state. The total equivalent cost for renovation and operational energy consumption was 88. 90 million yuan per year. [**Conclusion**] The districting method proposes in this paper efficiently achieves the automatic optimization of large-scale water distribution networks while effectively controlling renovation and long-term operational costs. It also ensures the management of water age. This approach offers valuable insights and guidance for partitioning and retrofitting projects in large-scale water distribution networks.

Keywords large-scale water supply distribution network; network districting; water pressure management; pipelines water age; multi-objective optimization

供水系统是城市最重要的市政设施之一,保障供水系统的高效安全运行是现代化城市发展的重要基石^[1-2]。近年来,随着我国城市化进程的快速推进,城市供水管网规模不断扩大,伴随着管网腐蚀老化问题日趋凸显,管网水力水质风险、漏损控制等管理技术难度增大^[3]。在此背景下,如何通过提升管理技术水平,保障供水管网系统的安全是供水企业面临的重要课题。管网区域化划分是1种高效的管理和监控供水系统的技术^[4]。通过将供水管网划分为若干相对独立的输配区域,结合流量监测、压力控制、中途加氯等,可实现水量分区独立计量、压力优化调控、水质管控等高效管理目标。

供水管网分区一般可采用人工经验分区方法和自动化分区方法。经验分区方法具有简单灵活的特点,但该方法依赖于专家经验、耗时长且效率低,常适用小型的管网系统^[5]。基于计算机技术、管网模型和优化技术等自动化分区方法具有速度快、精度高、适应性强等优点,更适合大规模、复杂管网系统分区,尤其适用于供水管网智慧化管理^[6]。现常用的自动分区方法有聚类分析法^[7-8]、社区发现法^[9]、路径分析法^[10]、广度优先搜索、深度优先搜索等,同时亦有部分学者^[11]结合神经网络算法进行分区,但实际应用较少。不同的自动分区方法具有各自的特点,但在超大型管网应用中尚存在一定的局限性,例如基于图论的路径分析法耗时长^[12],而社区发现法对数据要求高^[13],聚类分析法则缺乏对现状供水路径的分析^[14],且现有分区方法尚未将能耗核算纳入分区过程^[15]。基于以上问题,本文提出1种多目标高效自动分区优化方法,以输配分离为核心理念^[16],结合聚类分析、输水路径优化和多目

标优化算法,实现对超大规模供水管网的快速优化分区,为供水管网的智能化精细化高效管理提供技术支撑。

1 大型供水管网多目标分区方法

在城市化发展过程中,由于历史原因,城市大型供水管网常常经历多个阶段建设或合并而成,通常存在服务面积广、管线冗杂、主干层次不清而导致多水源之间事故互补能力弱、管理难度大等问题,为提升大型供水管网分区管理水平,本文将在满足用户用水要求的前提下重新梳理管网供水脉络,基于输配分离的理念,构建输配分离分区模型,以分区后压力均匀度改善、水质安全控制、运行能耗及改造费用最低为分区优化目标,为构建大型供水管网分区管理提供科学依据。区别于一般性的分区方法,基于输配分离的分区方法不仅可优化分区,同时也强调考虑多水源之间的互补。本文方法中各分区一般不串联,即输水主干管与分区之间连接1~2根配水管,只进不出,简化监测与数据分析管理。

1.1 基本分区方案构建流程

1.1.1 设定优化基础参数

本文中分区方法设置的参数包括分区最小和最大分区数量、节点服务水头、主干管最小识别管径、支管最小长度及理想配水管径。基于漏损管理的需求,独立计量分区(DMA)用户规模通常为500~5000户。节点服务水头可依据地方规范确定。考虑到主干管的输水能力需求,主干管识别的最小管径一般不宜小于400 mm;主干管支管最小长度与管网拓扑相关,通过设定长度将部分支管剥离,以增加配水管的候选数量。理想配水管径用于分区过程中的候选管道识别,主干管识别完毕后,应优先选择大

管径管道作为配水管,以降低分区的能耗损失。

1.1.2 主干管识别

(1) 基础主干管识别

对于管道冗杂的大型多水源管网系统,由于管网持续建设历史久远,管网建设能力与政策要求处于动态变化过程,新旧管网规划建设难以统一,水力条件复杂,各管道功能界限模糊。干管与配水管、分区内管道功能混杂,干管可承担配水功能,配水管及分区管道在某些时刻也能向干管输送流量。为识别主干管,需确保管道具备足够的输送能力,本方法中同时以管径与过流量作为主干管识别的指标。选择大管径管道(一般 ≥ 400 mm)作为候选“管径基础主干管”。同时,将过流量高于 $421 \text{ m}^3/\text{h}$ (相当于 500 mm 管道取经济流速为 0.9 m/s 时的过流量)的管道作为“流量基础主干管”,以确保识别拓扑的连通性。管径基础主干管与流量基础主干管取并集,结合连通性分析形成最终的基础主干管。

(2) 多水源最优连接路径分析

大型管网服务范围广、用水量大,通常通过多水源供水以降低水力损失、缩短水龄,并提升供水安全性。为充分发挥多水源联合调度的优势,本文将多水源纳入主干管管理,基于主干管强大的输水能力,构建多水源互补、调度统一的主干管布局。

如果分区后主干管无法串联所有水源节点,本算法将首先分析主干管各节点与水源的连通性,构成水源主干管节点集。随后,筛选节点度为1的节点作为候选连接节点集,并使用迪杰斯特拉算法计算不同候选节点集之间的最短路径。每个候选集选择最短的2条路径作为补充主干管,连接多个水源节点。对于图中任意连通节点,权重和最小的路径定义为最短路径。由于分区前后管网的水力状态发生变化,管段属性中的定值被用于计算管道权重,计算如式(1)所示。

$$w_i = 10.67C_i^{-1.852}D_i^{-4.871}l_i \quad (1)$$

其中: w_i ——管段 i 的权重;

C_i ——管段 i 的海曾-威廉系数;

D_i ——管段 i 的管径,m;

l_i ——管段 i 的长度,m。

对于阀门,在其开启时设其管段权值为0,而关闭时则直接将阀门从管网中移除;泵则均将其管道权值设为0。多水源连接主干管识别完成后,将多

水源连接主干管作为补充纳入基础主干管,使主干管具备多水源互连功能。

1.1.3 分区方案构建

(1) 构建候选配水管集

主干管识别完成后,沿主干管寻找其上的所有支管,这些支管构成配水管候选集。由于大型管网中的可选配水管较多,为提高分区效率并优化水力损失,设定管径高于理想配水管径的管道为“理想配水管”。在常态运行下,主干管与各分区仅通过配水管保持水力联系,各分区相互独立,分区后主干管与分区管道处于2个层级,主干管不再承担配水功能,并从原管网中“剥离”,使水力和拓扑结构发生改变,将原管网拆分为主干管及多个独立的供水片区(图1)。为确保每个独立片区都有足够的配水管供水,若片区内存在足量理想配水管,则仅采用这些管道作为候选配水管;否则,片区内所有配水管均作为候选。

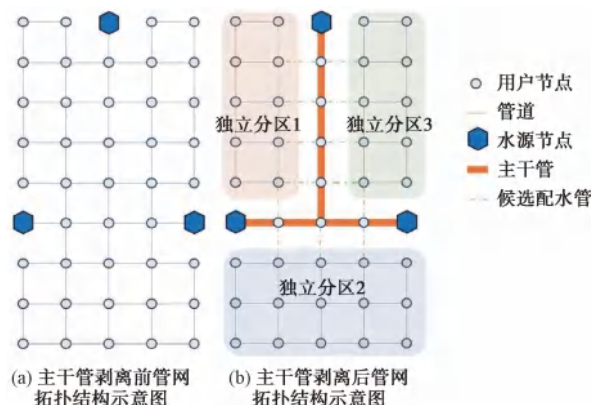


图1 主干管网拓扑结构变化

Fig. 1 Changes of Network Topology of the Trunk Pipelines

(2) 分区入口筛选

候选配水管集构建完成后,随机选择其中 N_{dp} 根配水管作为分区配水管,重复该随机过程即可得到配水管选择初始方案集。因1个分区仅采用1根配水管配水,所以方案中配水管数量即分区数量,即须保证个体中配水管总量满足式(2)。

$$Z_n^{\min} < N_{dp} < Z_n^{\max} \quad (2)$$

其中: N_{dp} ——管网中配水管数量;

$Z_n^{\min}$ ——分区最小数量;

$Z_n^{\max}$ ——分区最大数量。

(3) 节点聚合分区构建

在配水管选定后,针对每个分区方案,根据配水

管和分区入口位置进行空间聚类,确定节点分组。已有研究通过赋予管段权值并利用最短路径法将管网节点聚合于候选水源节点以完成分组。但对于大型管网,节点与管段数量的增加使最短路径法的耗时显著增加,难以满足分区需求。因此,本文提出使用空间聚类法替代最短路径法,大幅减少节点分组所需时间,从而适用于大规模管网。

聚类时,以入口节点为基准,根据拓扑结构对其非主干管邻接节点进行聚类。聚类后,邻接节点的需水量加和至入口节点需水量,并移除与入口节点相连的管段,将与非入口节点相连的管段迁移至入口节点,完成该入口节点的1轮聚类。当所有入口节点完成1轮聚类后,节点分组也完成。在聚类过程中,若入口节点需水量高于分区限制需水量,则该入口节点停止聚类,分区限制需水量如式(3)所示。

$$Z_d^{\max} = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N Q_i^t}{Z_n^{\min}} \quad (3)$$

其中: $Z_d^{\max}$ ——分区最大限制需水量, m^3/s ;

Q_i^t ——节点*i*在*t*时刻的需水量, m^3/s ;

T ——延时模拟总时刻数;

N ——管网中节点总数,个。

多轮聚类后,管网节点中仅剩主干管节点及入口节点,此时节点聚类完成,所有分区内节点均被入口节点“吸收”,每个入口节点“吸收”的节点构成1个分区。节点分组后,不同组节点间的管段即为分区边界管段,这些管段与未被选中的配水管均须通过阀门进行截断,以实现各个分区间独立。

1.1.4 多目标函数构建

采用上述方法形成分区方案后,为综合评估分区方案的对分区管理目标优越性,确保分区后能保证用户高质量供水服务,同时兼顾管网背景漏损、水质安全、供水能耗及改造经济性4者间的平衡,将采用多个指标对分区方案进行评估。本文的分区优化目标函数包括分区平均压力标准差、节点平均水龄、管网运行能耗及改造费用。

(1) 分区平均压力标准差比

供水管网分区后的分区内压力均匀性是管网分区的重要评价指标。在满足最低供水压力前提下,均匀压力可更好控制背景漏损,体现服务公平性。分区内的压力均匀性以延时模拟24 h的分区内节点压力

标准差均值进行表征,所有分区的节点压力标准差均值代表整个管网分区后的压力均匀性,均值越小,则均匀性越好。假设分区后共存在*K*个分区,则分区后管网各分区平均压力标准差与分区前各分区平均压力标准差之比 S_{DR} 作为目标函数,具体如式(4)所示。

$$\min S_{\text{DR}} = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sqrt{\frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} (p_i^t - \bar{p}_k^t)^2}}{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \sqrt{\frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} (p_{i0}^t - \bar{p}_{k0}^t)^2}} \quad (4)$$

其中: n_k ——第*k*个分区内的节点总数;

K ——分区总数,个;

p_i^t ——第*k*个分区内节点*i*在*t*时刻的压力, m ;

$\bar{p}_k^t$ ——第*k*个分区内所有节点在*t*时刻的平均压力, m ;

p_{i0}^t ——未分区时第*k*个分区内节点*i*在*t*时刻的压力, m ;

$\bar{p}_{k0}^t$ ——未分区时第*k*个分区内所有节点在*t*时刻的平均压力, m 。

上式中未分区时压力即管网未经任何调整时运行得到的压力。

(2) 节点平均水龄比

管网分区后,供水拓扑一般会产生较大变化,须保证分区后的供水水质。水质指标采用管网延时模拟24 h的节点平均水龄以表征管网水质,平均水龄越低则水在管网中停留时间越短,水中余氯消耗越少,管网水质安全性越高。为明晰分区前后水龄变化,采用分区前后节点平均水龄之比 W_{AR} 作为分区水质评判指标。假设管网中共存在*N*个节点,则 W_{AR} 计算如式(5)所示。

$$\min W_{\text{AR}} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T wa_i^t}{\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T wa_{i0}^t} \quad (5)$$

其中: wa_i^t ——节点*i*在时刻*t*的水龄;

wa_{i0}^t ——未分区时节点*i*在时刻*t*的水龄。

(3) 管网运行能耗与改造费用

管网分区改造须增加建设费用,并可能改变运行能耗。为保证改造及改造后长期运行能耗的经济性,尽可能使新增的阀门及监测设备数量费用较少,分区后管网内部运行能耗较小,管网运行及改造费

用 C 计算如式(6)所示。

$$\min C = \frac{\sum_{n_s=1}^{K_s} C_{n_s}^{\text{SCADA}} + \sum_{n_v=1}^{K_v} C_{n_v}^{\text{valve}}}{y} + \frac{365 \times 24 \times \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^m \rho g q_l^t h_l^t C_e^t}{T\eta} \quad (6)$$

式中: K_s ——须安装的数据采集与监控(SCADA)设备总数;

K_v ——须安装的阀门总数;

$C_{n_s}^{\text{SCADA}}$ ——第 n_s 个监测设备的费用,设备费用与管道管径相关,元;

$C_{n_v}^{\text{valve}}$ ——第 n_v 个阀门的费用,阀门费用与管道管径相关,元;

y ——改造后管网设计服务年限, a;

m ——管网中管道总数;

ρ ——水的密度, kg/m^3 ;

g ——当地重力加速度, m^2/s ;

q_l^t ——分区后管道 l 在 t 时刻的流量, m^3/s ;

h_l^t ——分区后管道 l 在 t 时刻的水头损失, m;

C_e^t —— t 时刻单位电价, 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$;

η ——经验系数, 供水时管网所有泵的平均效率, 常取 0.6~0.9。

1.1.5 分区约束条件

依据所有个体的目标函数值及是否满足约束条件进行非支配排序, 不满足约束条件的个体将被满足约束条件的个体所支配。本文考虑的约束条件包括这几点: 所有节点均须处于供水范围内、各水源日供水量均不超过其设计供水标准、分区数量约束[式(7)]、节点压力约束[式(8)]、质量与能量守恒约束[式(9)]。

$$n_{\text{DMA}}^{\min} < n_{\text{DMA}} < n_{\text{DMA}}^{\max} \quad (7)$$

$$H_i > H_i^{\min} \quad (8)$$

$$G(h, q) = 0 \quad (9)$$

其中: n_{DMA} ——管网分区数量;

$n_{\text{DMA}}^{\min}$ ——最小分区数量;

$n_{\text{DMA}}^{\max}$ ——最大分区数量;

H_i ——节点压力, m;

$H_i^{\min}$ ——节点服务压力, m;

$G(h, q)$ ——水力模型非线性方程组。

1.2 优化模型求解方法

为同步优化分区过程中的多目标函数, 本文采用非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解分区方案。NSGA-II 是 1 种常见的多目标优化算法, 该算法通过非支配排序和拥挤度距离的概念, 有效维护解集多样性。NSGA-II 通过选择、交叉和变异操作算子, 形成新一代解, 并通过非支配排序区分优劣, 最后依据拥挤度距离优选解集。

本文中分区优化时, 首先随机产生首代种群 P_0 , 种群由 N 个个体构成, 每个个体的染色体对应 1 种配水管筛选方案。配水管筛选方案用 1 串长度等于候选分区入口数目的二进制数来表达, “1”表示某配水管被选中, 须在该配水管安装传感器监测其流量和分区入口压力; “0”表示某配水管未被选中, 须在该配水管安装阀门将其截断。对每个个体的分区方案进行延时模拟, 计算目标函数和评估约束条件, 并进行非支配排序。根据排序结果, 选取个体直至种群上限, 若超过上限则按拥挤度距离排除部分个体, 组成第 1 代父代种群 P_1 。父代种群 P_1 通过选择、交叉和变异得到下 1 代子代种群 Q_1 , 重复迭代过程得到 P_2 , 不断循环迭代至满足算法终止条件, 得到最终代种群 P_{last} 。种群 P_{last} 即为帕累托(Pareto)近似最优解。算法流程图如图 2 所示。

2 案例分析

2.1 案例概况

选取 H 市供水管网系统作为案例分析对象, 该研究区域服务面积约为 568 km^2 , 包含 4 座水厂, 最高用水量为 $237 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, DN200 以上的管道总长度约为 $7\,056 \text{ km}$, 供水管网拓扑结构如图 3 所示。

目前整个供水管网系统连片统一供水, 存在供水管网冗余度高、规模大、管理难度大等问题, 为了实现更高效的管理, 拟基于输配分离分区管理理念对该管网进行优化分区, 通过分区降低管理难度, 从而实现高效管理。设置主干管最小识别管径为 800 mm , 对管网模型中符合识别管径的管段进行检索, 得到管径基础主干管, 如图 4(a) 所示。运行 EPANET 对管网模型进行延时模拟, 筛选过流量高于 $421 \text{ m}^3/\text{h}$ 管道作为流量基础主干管, 如图 4(b) 所示, 两者相结合得到 H 市管网基础主干管, 如图 4(c) 所示。

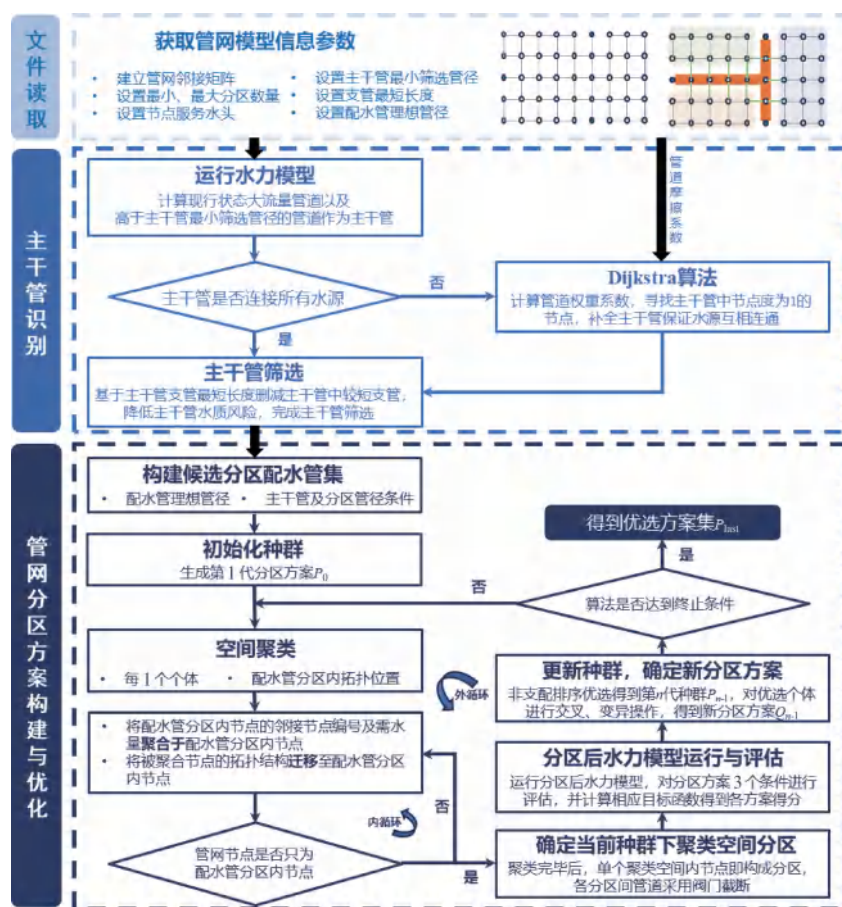


图2 多目标大型供水管网输配分离分区优化方法流程

Fig. 2 Flow of Multi-Objective Optimization of Pipelines Districting for Large Scale Water Supply Distribution Networks



图3 H市供水管网拓扑

Fig. 3 Topology of Water Supply Distribution Networks in H City

基于对管理便利性及改造经济性的考量, 预设分区数量为30~100, 即分区最小总需水量及最大总需水量为2.37万 m^3/d 和7.90万 m^3/d 。节点服务水头参照H市供水要求, 设为16 m。水力模型延时模拟时间设为48 h, 取后24 h节点压力及水龄结果作为分区分析结果, 每5 min读取1次。分区管网改造所新增流量计及阀门价格依据市价确定, 设计服务年限为15 a。

采用python中的Platypus库中的遗传算法包, 结合分区算法实现多目标优化分区程序, 设置个体数为50, 迭代次数为100, 交叉概率为0.8, 变异概率为0.2, 其余参数采用默认值。

2.2 分区结果分析

基于本文开发的程序算法对H市管网进行输配分离分区优化, 配水管候选集共包含375根管道, 最终迭代得到的Pareto前沿共包含22个解, 分区数目为52~96个, 压力标准差总和比为2.62~3.45,



图4 H市基础主干管

Fig. 4 Basic Trunk Pipes in H City

节点平均水龄比为 0.68~0.98,运行与改造折算年费用为 8 722.6 万元~9 294.8 万元,截断管段数为 1 213~1 684 根。从分区数目的范围而言,方案集中分区数目较设定下限(30 根配水管)较远,产生这种现象的原因可能是原始管网压力富裕度较低,因此管网部分区域降压空间较小,为获得满足约束条件的解需提高分区数目以降低管网水头损失。

根据分区优化结果,22 个解构成的解集大致构成一个三维曲面。为便于分析,将 22 个解按管网运行与改造费用划分为 4 组,并分别用 4 种颜色进行标识(图 5),每一组内的解集大致呈反比例函数趋势。由图 5 可知,当分区压力比较均匀,且水龄均取得较低值时,管网改造及长期运行费用较高(如左下角的红色点)。同时当改造费用处于 1 个分组时,管网分区压力标准差与水龄呈近似负相关关系。

分区方案中,管网节点平均水龄比均小于 1,即分区后管网水龄降低。经分区前后对比分析,发现分区后主干管流速显著提高,水在管道中存留时间变短,管网水龄降低。在输配分离框架下,各分区只跟主管相连,各个分区间通过阀门隔断不串联。这种只进不出的分区模式,对于单个分区的压力控制、流量分析、水质管控均带来了便利。同时,分区之间不串联也避免了水量分析时由于串联分区数据叠加导致的误差累积,提高管网监测分析结果的准确性与稳定性。运行能耗与投资改造费用对比如图 6 所示,由图 6 可知,对于大型供水管网,运行费用以运行能耗费用为主,投资改造费用占比极小,仅占总费用的 1.56%~2.59%,因此本方案在改造成本方面具有较好的经济性。

案例管网分区方案优化指标结果如表 1 所示。

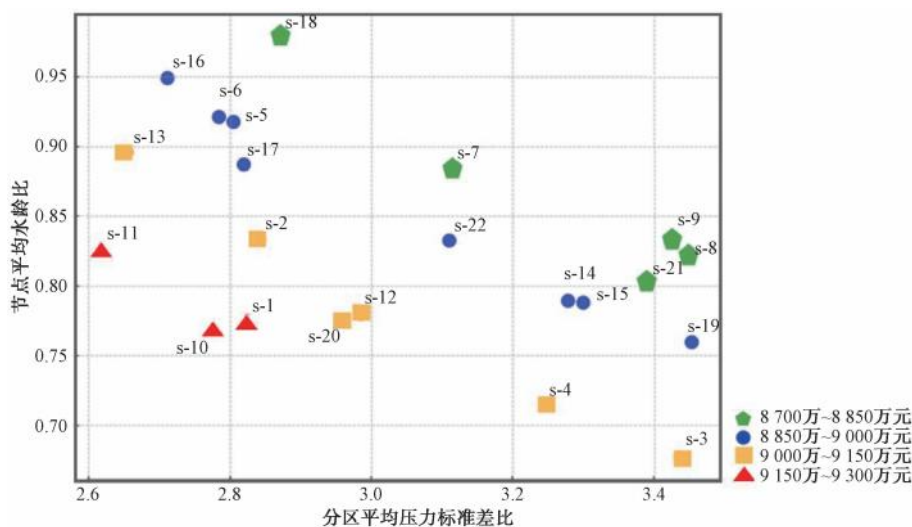


图5 案例管网分区 Pareto 解集

Fig. 5 Pareto Solution Set for Network Districting Case

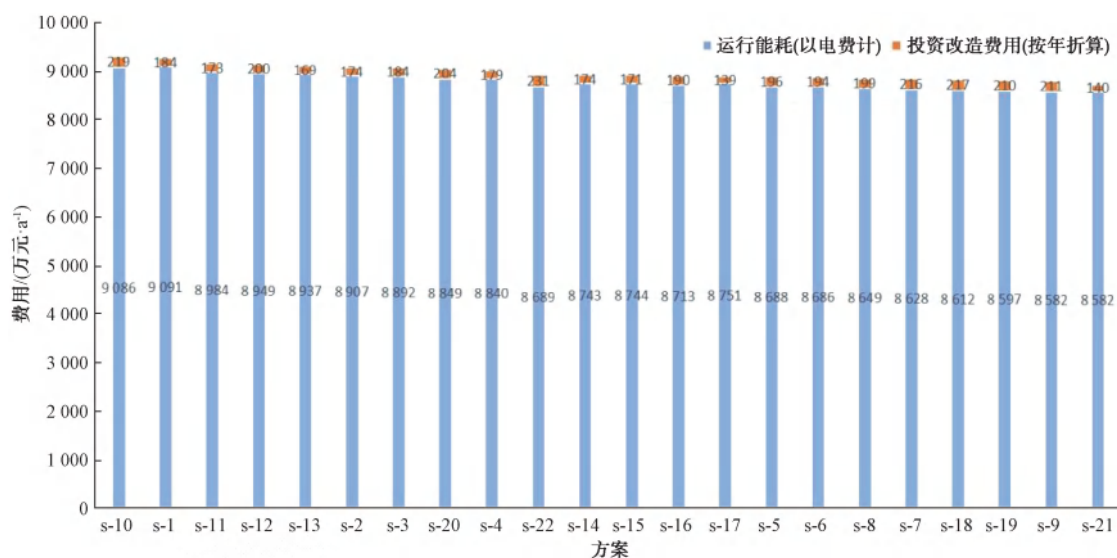


图 6 案例管网分区方案运行能耗与投资改造费用对比

Fig. 6 Comparison of Operational Energy Consumption and Investment Reconstruction Costs for Network Districting Solutions

表 1 案例管网分区方案参数指标结果

Tab. 1 Parameter Indicators and Results for Network Districting Solutions

方案	分区数	分区平均压力 标准差比	节点平均 水龄比	运行与改造折算 费用/(万元·a ⁻¹)
s-1	96	2.82	0.77	9 274.35
s-2	88	2.84	0.83	9 080.80
s-3	71	3.44	0.68	9 075.90
s-4	69	3.25	0.71	9 018.59
s-5	60	2.80	0.92	8 884.42
s-6	63	2.78	0.92	8 879.83
s-7	66	3.11	0.88	8 847.94
s-8	67	3.45	0.82	8 843.42
s-9	54	3.42	0.83	8 792.98
s-10	91	2.77	0.76	9 294.77
s-11	74	2.62	0.83	9 156.96
s-12	86	2.98	0.78	9 149.06
s-13	82	2.65	0.90	9 106.56
s-14	78	3.28	0.79	8 916.68
s-15	75	3.30	0.79	8 915.41
s-16	72	2.71	0.95	8 903.29
s-17	59	2.82	0.89	8 890.40
s-18	53	2.87	0.98	8 829.12
s-19	57	3.45	0.82	8 806.72
s-20	77	2.96	0.78	9 053.47
s-21	52	3.11	0.83	8 722.35
s-22	56	3.11	0.83	8 919.56

当分区数较少时分区方案运行与改造成本较低,但分区压力均匀性较低;当分区数量增加时分区平均压力或水龄均有所改善,但运行与与改造折算费用

较高,不利于长期运行经济性。因此综合考虑管网压力均匀性、管网水质安全及改造与运行费用节约,推荐选用方案 s-17。分区方案 s-17 有 59 个分区,分区平均压力标准差比为 2.82,较其他方案压力标准差变化较小,水龄比为 0.89,较改造前有一定程度降低,改造折算与运行能耗费用为 8 890.4 万元/a,该解对应分区方案如图 7 所示。

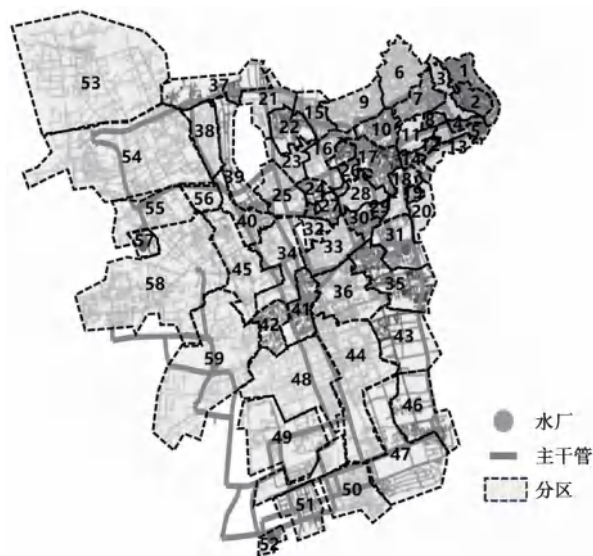


图 7 s-17 分区方案

Fig. 7 s-17 Districting Scheme for Network

3 结论

本文基于输配分离分区的框架,提出了 1 种针对多水源大规模供水管网的多目标分区优化方法。

通过实际管网案例应用测试分析,所提出的技术方法可有效应用于大规模多水源供水管网分区,获得满足多个优化目标指标均衡的优化分区方案。基于输配分离框架下的分区方案,主干管单向连接各分区,只进不出,且各分区保持相互独立,避免了分区串联导致的复杂性,降低各分区对压力、流量平衡分析、水质监控管理的难度,提升技术管理效率,增强了供水安全性。

参考文献

- [1] 国家发展和改革委员会,水利部,住房和城乡建设部,等. 国家发展改革委等部门关于进一步加强水资源节约集约利用的意见[EB/OL]. (2023-09-01)[2024-11-29]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202309/t20230922_1360777.html.
National Development and Reform Commission, Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, et al. Opinions of the National Development and Reform Commission and other departments on further strengthening the conservation and intensive use of water resources [EB/OL]. (2023-09-01)[2024-11-29]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202309/t20230922_1360777.html.
- [2] 国务院. 2024—2025 年节能降碳行动方案[EB/OL]. (2024-05-23)[2024-11-29]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/gwywj/202405/t20240530_1074495.shtml.
State Council. 2024-2025 action plan for energy conservation and carbon reduction[EB/OL]. (2024-05-23)[2024-11-29]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/gwywj/202405/t20240530_1074495.shtml.
- [3] 住房和城乡建设部办公厅. 城市公共供水管网漏损治理可复制政策机制清单[EB/OL]. (2024-02-07)[2024-11-29]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202402/content_6933654.htm. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. List of replicable policy mechanisms for addressing leakage in urban public water supply networks [EB/OL]. (2024-02-07)[2024-11-29]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202402/content_6933654.htm.
- [4] Kowalski D, Suchorab P. The impact assessment of water supply DMA formation on the monitoring system sensitivity[J]. Applied Sciences, 2023, 13(3): 1554. DOI: 10.3390/app13031554.
- [5] Kowalska B, Suchorab P, Kowalski D. Division of district metered areas (DMAs) in a part of water supply network using WaterGEMS (Bentley) software: A case study[J]. Applied Water Science, 2022, 12(7): 166. DOI: 10.1007/s13201-022-01688-2.
- [6] Pesantez J E, Berglund E Z, Mahinthakumar G. Geospatial and hydraulic simulation to design district metered areas for large water distribution networks[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2020, 146(7): 06020010. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001243.
- [7] 刘子叶,姜灿鹏,许丽达,等. 供水管网 DMA 分区与压力控制[J]. 给水排水, 2023, 49(7): 119-124.
Liu Z Y, Jiang C P, Xu L D, et al. Partition of district metered areas and pressure control in water supply network[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(7): 119-124.
- [8] Scarpa F, Lobba A, Becciu G. Elementary DMA design of looped water distribution networks with multiple sources[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2016, 142(6): 0000639. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000639.
- [9] 王彤,冯雪峰,赵明,等. 基于快速网络社区算法的供水管网区块化研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(5): 37-43.
Wang T, Feng X F, Zhao M, et al. Water supply network blocks based on a fast algorithm for detecting community structure in networks[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(5): 37-43.
- [10] 曾翰,陶涛. 供水管网多目标分区方法[J]. 净水技术, 2018, 37(5): 97-104.
Zeng H, Tao T. Multi-objective optimization of sectorization for water supply distribution network[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(5): 97-104.
- [11] Yu X P, Wu Y P, Meng F L, et al. A review of graph and complex network theory in water distribution networks: Mathematical foundation, application and prospects[J]. Water Research, 2024, 253: 121238. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121238.
- [12] 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 L D, Xin K L, Huang W Z, et al. Optimization method and software implementation of the DMA zoning for water distribution network[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(2): 112-115, 120.
- [13] Liu H X, Zhao M K, Zhang C, et al. Comparing topological partitioning methods for district metered areas in the water distribution network[J]. Water, 2018, 10(4): 368. DOI: 10.3390/w10040368.
- [14] Rong K Z, Fu M L, Huang Y Y, et al. Graph attention neural network for water network partitioning[J]. Applied Water Science, 2023, 13: 3. DOI: 10.1007/s13201-022-01791-4.
- [15] Tian J R, Long Z H, Zhu Z P, et al. Multilevel partitioning with multiple strategies for complex water distribution network[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2022, 148(12): 04022064. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001622.
- [16] 李树平. 日本供水管网布局理论与启示[J]. 中国给水排水, 2014, 30(22): 46-49.
Li S P. Review of Japanese theory on water distribution system layout[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(22): 46-49.