

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.15.007

基于聚类分析的管网分区及水量调配能力研究

田峻仁¹, 朱子朋², 陈冬雷², 龙志宏², 许刚², 程伟平¹

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 广州市自来水有限公司, 广东 广州 510600)

摘要: 大型管网的日趋复杂和多水源的供水结构导致了水量调度有诸多不确定性因素,而有效分区是可行的解决方法。利用基于围绕中心点的划分(PAM)改进的二分K-means模型实现了大型管网的聚类分区,并结合“手肘图”得到了科学的分区方案;根据二八原则、最优切分算法对区域间重要管道进行识别,可以为分区阀门的关闭提供理论支撑;通过管道的流量响应分析了水厂调配能力及区域间的水量调配效率。将该方法应用到G市大型供水系统中,取得了良好的分区效果,为下一步区域间联合水量优化调度提供了决策依据。

关键词: 供水系统; 管网分区; 水量调配; 聚类算法

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)15-0051-07

District-dividing and Water Dispatch Capacity of Water Supply Network Based on Cluster Analysis

TIAN Jun-ren¹, ZHU Zi-peng², CHEN Dong-lei², LONG Zhi-hong², XU Gang², CHENG Wei-ping¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Guangzhou Water Supply Co. Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract: The complexity of large-scale water supply network and multi-source water supply structure lead to many uncertain factors in water dispatch, and effective district-dividing is considered to be a feasible solution to solve this problem. The clustering district-dividing of large-scale water supply network was realized by using binary split K-means model modified by partitioning around medoid (PAM), and a scientific partitioning solution was obtained by combination with “elbow diagram”. The important inter-regional pipelines were identified according to the two-eight principle and the optimal segmentation algorithm, which could provide theoretical support for the closure of partition valves. The water dispatch capacity of water treatment plant and the efficiency of water dispatch between regions were analyzed through the flow response of pipeline. The method was applied to a large-scale water supply system in G city, and good performance was obtained, which provided a decision-making basis for the next step of inter-regional combined water dispatch optimization.

Key words: water distribution system; district-dividing of water supply network; water

基金项目: 住房和城乡建设部科学技术计划项目(2022-K-161); 浙江省重点研发计划项目(2021C03017); 广州市自来水有限公司科研项目(科技20-2)

通信作者: 程伟平 E-mail: chengweiping@zju.edu.cn

dispatch; clustering algorithm

近年来,我国城市规模迅速扩大,供水管网也越来越复杂。由于规划建设与实际需求的差异,常常需要进行多水源联调。目前,管网系统常采用的是分级分区管理:一级分区通常需要考虑水量平衡或行政管理;二级分区需要考虑压力、流量管理;三级分区则需要考虑到更精细的管理,如漏损控制等。大尺度的一级分区是多级调度的基础,如何科学合理划分并制订相应的调度计划仍是不断需要研究的内容。刘俊等^[1]根据管理和压力分布将供水管网先分为几个较大的区域,再根据最短水力、耗散路径等拓扑方法和参数指标进行评价,并对DMA的数量和规模进行调整;孙国胜等^[2]结合人工经验先基于压力均匀性进行二级压力分区,再根据供水分界线对二级分区进行归并,向上实施一级分区;Elad等^[3]与Martínez-Solano等^[4]利用水源关系和水平衡分析进行初步的人工经验分区,后续再利用优化算法并基于压力均匀性及节点需求等进行更加具体的分区。上述研究中较大尺度的分区方法主要依赖于人工经验。另外,也有一些分区研究基于聚类算法:高金良等^[5]利用AP聚类算法进行压力分区,并借助投资效益的指标确定分区数目;Bruno等^[6]和王彤等^[7]利用社区网络的聚类算法并基于压力分析、节点需求等进行自动分区。以上研究主要考虑了小尺度的管理需求,在多个水厂水源的整体供水格局下,有些区域并非单个水厂直接控制,而是受到多个水厂的耦合影响,前期研究均尚未解决多水厂共同影响区域的水量不平衡问题,研究方法是从小水力分界角度展开的,例如Karwan等^[8]根据水流通关系确定水源的影响并执行分区,Carlo等^[9]以水力特性为主要指标进行大型管网分区。

笔者针对复杂供水管网一级分区和水量调度的技术需求,首先确定了水源供水范围的特征指标,并利用聚类算法划分合理的分区,明确分区数量和分区范围;其次采用敏感性分析法对区域间重要管道进行识别,分析各水源之间的调配能力,提出分区方案下区域间的调水效率,旨在为大型复杂管网水量平衡联调联控优化提供决策依据。

1 基于聚类分析的大型管网一级分区技术

大型供水管网通常由多个水源进行供水。面

对成千上万的需水节点,多个水源对诸多节点均有影响,其影响关系是实现整体水量平衡的基本要素。本研究解析了各水厂的供水范围,得到了节点受各水厂的影响程度,从而构建了需水节点的供水结构特征,并采用基于围绕中心点的划分(PAM)改进的二分K-means聚类模型进行分区,实现了基于水量平衡的分区方案。具体技术路线如图1所示。

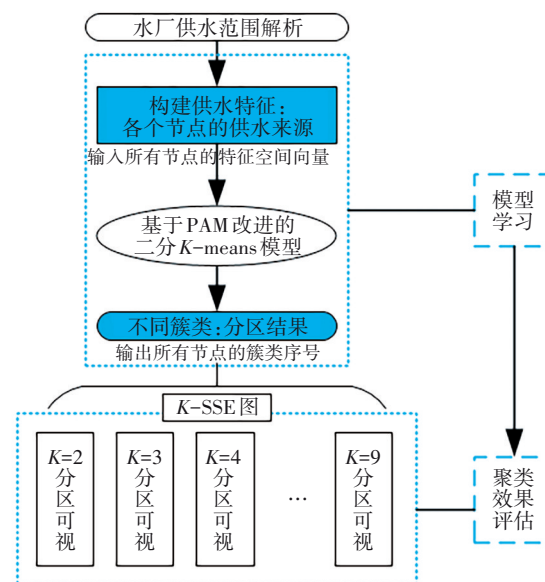


图1 聚类分区技术路线

Fig.1 Technical route of clustering district-dividing

1.1 供水结构特征指标的构建

为明确需水节点受供水水源的影响程度,对各水厂的供水范围进行解析。本研究采用粒子追踪算法进行分析,其设定粒子点从水源出发,沿着水流方向进行正向追踪,一直到达受影响的节点,通过延时水力模型的模拟,得到链路流量、流速的时间序列。作为一种进行物质追踪的方法,其将输出点的浓度描述为输入源强度的线性函数,见式(1)。

$$c_0(T_0) = \sum_{j=1}^N \Gamma_j c_j (T_0 - t_j) \quad (1)$$

式中: c_0 为输出点浓度; N 为输入、输出之间的行程路径数; T_0 为输出时间; c_j 为水质源输入强度; t_j 为行程路径 j 的延时; Γ_j 为行程路径 j 的影响系数。其中,水质源输入强度 c_j 和影响系数 Γ_j 的单位取决于所使用的源模型。

在各水厂相同的输入源强度下,分别进行粒子

正向追踪计算,得到水厂影响节点流量的结果。聚类算法对数据缺失与尺度比较敏感,需要进行数据预处理,具体流程如下:①聚合,将各水厂对节点的影响流量按照节点ID进行聚合,从而获得每一个节点ID对应水厂的影响流量。其中,某些节点ID不受某个水厂影响时,影响流量的缺省值为“0”。②标准化,由于计算所得的节点受影响流量是绝对量值,可能导致数据的不规则性,从而减弱聚类效果。在此,将节点对应水厂的影响流量转化为节点受水厂影响的占比,进而得到该节点的供水结构。

1.2 基于PAM改进的二分K-means聚类

二分K-means模型是一种基于二分法的K-means聚类模型,通过在逐次二分聚类($K=2$)中寻找区分度最大的簇再次进行二分聚类,直至达到聚类目标。使用该模型聚类可使误差平方和(SSE)在一定迭代步数内最大程度地降低,从而提高簇之间的区分度,提升算法的效果。二分K-means的聚类步骤为:①令 $K=2$,用K-means将样本集分为两个簇,记录各自聚类的SSE。②对于每一个簇来说,都有自己当前的SSE,取名为父节点SSE。a. 对所有的簇分别进行 $K=2$ 的K-means聚类,并记录分出的两个簇的SSE之和,称为子节点总SSE;b. 记录这个簇被二分类之后SSE的差值, $\text{SSE差值}=\text{父节点SSE}-\text{子节点总SSE}$ 。③选择SSE差值最大的那个簇进行划分,而其他的簇不进行划分。④重复步骤②、③,直到簇的总个数达到最终聚类数。

围绕中心点的划分(PAM)是一种聚类优化的方法:将样本集合中的 K 个对象作为初始簇中心点,计算损失后,将样本集合中的其他 K 个对象轮番作为初始簇中心点,并与之前的算法损失进行比较,选择损失最小的方案,从而确定初始簇中心点。这种改进主要避免了选取聚类簇中心的随机性,在每个簇划分阶段选择了令簇区分度最大的中心点。本研究基于PAM对二分K-means进行了改进,K-means可发现内部区分度最大的簇,但PAM能让该簇得到最大化区分的划分结果。PAM的改进主要体现在二分K-means每一次执行 $K=2$ 的K-means聚类划分时,过程如下:①随机选择两个样本点作为初始的簇中心点,计算其他各点到两个样本点的距离。根据距离判断簇的归属,从而将整体分为两个簇,同时计算簇间的分离度。②选择其他两个样本点作为初始簇的中心点,按同样的方式将整体分为

两个簇,并计算簇间的分离度,与上一步结果相比较,选择簇间分离度更大的样本点组合。③重复步骤②,直至在所有样本中选择使簇间分离度最大的样本点组合,实施得到对应的二分聚类结果。

1.3 模型实现及评估

本研究采用C#编制了机器学习计算框架来实现聚类,以节点的供水结构特征为输入,利用基于PAM改进的二分K-means将节点进行自然划分,获得不同 K 值的划分方案。在聚类分区中, K 的选择比较关键,一般采用K-SSE图(又称“手肘图”)中的下降拐点进行评估。该图以聚类数目为横坐标,以聚类误差的平方和为纵坐标,反映了聚类误差随类别数增加而降低的过程。SSE的计算见式(2)。

$$\text{SSE} = \sum_{i=1}^K \sum_{p \in C_i} |p - m_i|^2 \quad (2)$$

式中: C_i 为第 i 个簇; p 为 C_i 中的样本点; m_i 为 C_i 的质心(C_i 中所有样本的均值);SSE为所有样本的聚类误差平方和,与聚类效果相关。

随着类别数的增加,不同供水特征的节点区分度越大,则SSE越小,但同时类内距离越近,也会导致SSE减小,在评估时绘制 K 与 SSE/\sqrt{K} 的散点图,以减少类内距离对SSE的影响。采用幂回归进行拟合,并结合管网具体情况选择合适的分区类别数。

2 多水源分区的水源调配能力

基于聚类分析,将大型管网按照水的来源进行了区域自动划分,而基于分区如何进行水量平衡,则需要对各个分区内的水源调配能力进行分析。本研究先进行区域间重要管道的识别,进而探讨分区内水源对分区之间调水的影响。

2.1 区域间重要调水管道的识别

首先,基于分区结果进行区域间管道的提取。针对每个节点的所属分区编号,并结合管道信息匹配每个管道的头、尾节点对应的分区。利用异或运算 $a \oplus b = (\neg a \wedge b) \vee (a \wedge \neg b)$,判断是否属于不同区的节点,从而判断是否为分区边界管道,自动提取边界管道信息,见表1。

其次,借助敏感性衡量管道的重要性。具体而言,在模拟管网时,依次改变各水厂的出水压力或出水流量,得到边界管道的流量变化值,从而确定边界管道对水源调控的响应敏感程度。将边界管道的响应流量作为敏感性分析中的参数,进而衡量

边界管道在水源调控中的重要性。

表 1 边界管道信息

Tab.1 Information of boundary pipe

字段	字段含义
管道 ID	唯一的管道标识
头节点 ID	头节点标识,来源于管道信息
尾节点 ID	尾节点标识,来源于管道信息
头节点分区 ID	头节点分区标识,来源于聚类结果
尾节点分区 ID	尾节点分区标识,来源于聚类结果
管道类别 ID	管道类别标识,根据异或运算判断并自动编号

最后,利用最优切分算法对区域间重要管道进行识别,步骤:①将边界管道按流量变化值的降序排列;②对于排序后的 N 根管道,可以依次将前 1 根、前 2 根、…、前 $N-1$ 根作为重要管道,因此有 $N-1$ 种分类方式,从而确定有 $N-1$ 个切分点;③依次遍历所有切分点,基于某个目标函数确定最优的切分策略,其通常是基于平方误差的最小化,见式(3)。

$$Y = \min \left[\sum_{x_i \in R_1(s)} (x_i - c_1)^2 + \sum_{x_i \in R_2(s)} (x_i - c_2)^2 \right] \quad (3)$$

式中: Y 为最终的优化目标; s 为切分点; $R_1(s)$ 与 $R_2(s)$ 分别为被切分后的两组数据; c_1 与 c_2 分别为两组数据的平均值。

区域间重要管道识别流程如图 2 所示。

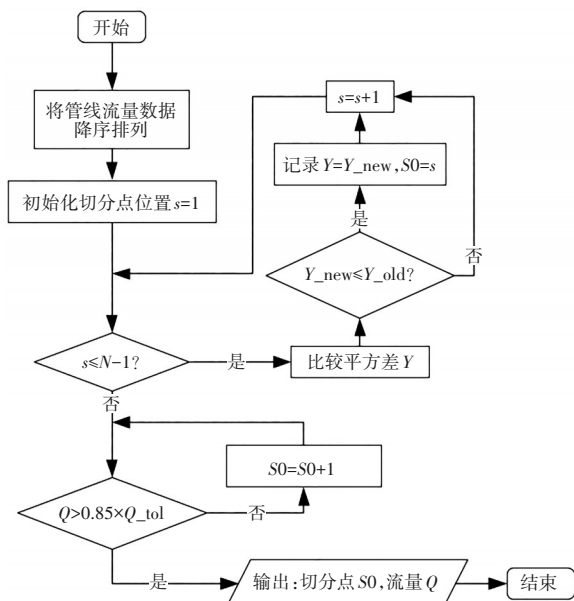


图 2 区域间重要管道识别流程

Fig.2 Flow chart of identification for inter-regional important pipelines

在进行具体划分时,同时融合两个策略:其一利用最优切分算法寻找所谓的最优切分点;其二判断当前切分的管道总响应流量是否占边界管道总变化流量的 85%,若无则移至下一个切分点,直至达到总变化流量的 85%。通过约束区域间重要管道的流量占比在 85% 以上,避免因管道流量的极端分布导致过多的数据被剔除。

2.2 水源调配效率分析

基于分区结果及区域间重要管道的识别,汇总、统计各分区边界的重要管道总流量,可以得到各区域之间的水量传递能力。在实际生产过程中,水量是波动变化的,如果采用管道绝对流量值就很难进行推广应用,因此提出了流量传递效率(其是指水厂增流影响下边界管道的增流占比),即通过管网模拟水厂增流,计算各边界管道的响应增加流量,衡量该边界管道在水厂水源调配时的流量传递效率。

为更好地展示各分区间的水源调配情况,针对上述边界管道的响应流量汇总统计,分析水厂影响下各边界的供水传递效率(边界管道总增加流量占水厂总出水提升流量的比例)。具体分析步骤为:①针对各水厂分别增加 1 000 m³/h 的出水流量;②管网模拟,得到与该水厂所在分区相邻的各分区边界上重要管道的变化总流量,计算各边界的供水传递效率(即变化总流量的值除以 1 000);③分别计算各水厂所在分区向相邻分区调水的效率(即供水传递效率);④在分区图的基础上,为各分区边界标注供水传递效率,从而得到边界供水效率图。

3 案例分析

以南方 G 市为例介绍如何进行自动一级分区和区域间水量调配分析。长期以来,该市处于供水“紧平衡”状态,为满足用户用水量不断增长的需求,频繁地进行阀门操作和水厂供水压力调整,因而有必要从顶层设计角度,基于水量平衡对该市进行分区,分析区域间的水量调配能力及效率。

3.1 南方某市管网聚类分区结果

针对 G 市的 8 个水厂分别进行管网模拟,在水厂节点设置粒子源(具有一定的输入源强,通常按流量考虑),通过粒子正向追踪得到各水厂影响的节点及影响流量值,从而计算各水厂所有节点的影响占比,得到节点的供水结构特征,部分节点的特征结构见表 2。

表2 各水厂部分节点的影响占比

Tab.2 Influence proportion of partial nodes in each water treatment plant %

管道编码ID	水厂名称							
	石门水厂	南洲水厂	西村水厂	新塘水厂	西洲水厂	北部水厂	江村水厂一期	江村水厂二期
28461103C0115	0.07	0.01	0.56	48.36	50.98	0	0	0.02
PT_n1_47224	0	0	0	0	0	82.05	17.95	0.00
28460115C0007	3.86	0	0	11.83	13.33	0	0	70.99
28461413C0066	0.51	78.98	4.16	7.94	8.09	0	0	0.32
PT_n2_74226	10.20	3.81	85.26	0.14	0.15	0	0	0.44
PT_n2_58939	0.58	21.28	4.77	36.14	36.86	0	0	0.36

将该市所有节点的供水结构特征作为模型输入,利用基于PAM改进的二分K-means聚类生成多种分区方案,并绘制了评估曲线,具体如图3所示。

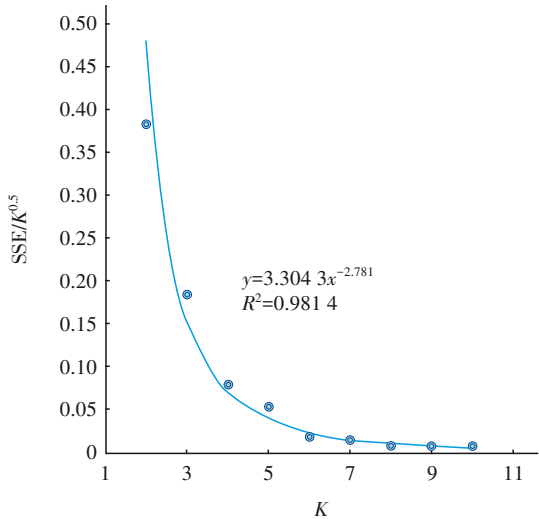


图3 G市分区方案评估曲线

Fig.3 Evaluation curve of district-dividing plan in G city

从图3可以看出,分类误差随着类别数的增加而降低,当K=2~6时,分类误差下降幅度很大,说明每次增加分类都有效地提升了类别内部数据的相关性。但当K=6~10时,分类误差下降明显缓慢,这反映了聚类效果无法更加有效地提升。根据评估曲线的降速变缓点(靠近K=6的位置),并结合聚类分区结果(K<5时,未得到有效分类;K>7时,部分分区节点呈散乱状态),选择分区尺度较为适宜的K=6分区方案。

这种分区方案更好地展示了各水厂的共同供水关系,并且较好地将该市划分为多个明显的供水板块:①北部、江村一期影响区;②江村二期控制区;③新塘、西洲影响区;④西村控制区;⑤南洲控制区;⑥石门控制区。从分区结果来看,该方案与实际运行管理也是一致的。如西洲水厂和新塘水

厂在东部地区共同供水,实际运行中也将两个水厂划在同一个管理分区,由此说明该分区方法具有较好的实用性。

3.2 区域间重要管道的识别结果

基于G市的分区结果,针对所划分的6个区(共计10个边界),提取边界区域管线。以西村控制区与南洲控制区的边界为例,改变南洲水厂单位水压,统计并绘制边界管道的流量直方图及累积频率曲线,如图4所示。

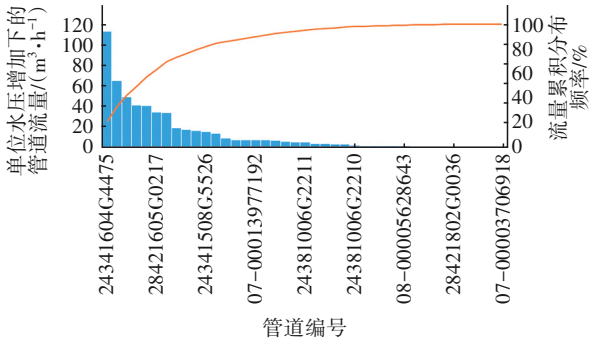


图4 西村-南洲边界管道的流量直方图及累积频率曲线

Fig.4 Flow histogram and cumulative frequency curve of the Xicun-Nanzhou boundary pipelines

从图4可以发现,边界管道共41根,其中响应流量最大的管道增流接近120 m³/h,响应流量较大的前7根管道增流均在30 m³/h以上,累积增流影响占比约为75%,基本符合“二八原则”(分区边界上约20%的管道提供了约80%的流量传递),而其余响应流量较小的管道(5 m³/h以下)虽然数量更多,但增流影响很小,几乎为0。边界上大部分供水能力很弱的管道在分区间水量传递过程中起到的作用很小,可有针对性地关闭部分阀门,明确管理边界,降低管理复杂度。

针对西村-南洲的边界管道,原有41根边界管道的平均管径为596 mm。将这41根管道按照影响

流量值降序排列,依次按前 $N(N=1,2,\cdots)$ 根管道将整体划分为两类。根据最优切分过程,可知切分为前 13 根管道与后 28 根管道时,整体的平方误差和最小。因此采用该切分方案,认定前 13 根管道为边界重要管道,平均管径为 846 mm,即大多数 DN800 以上的大直径管道为边界重要管道。虽然总调水流量由 444 m^3/h 变为 383 m^3/h ,减少了约 13.7%,但管道数量减少了 68.3%,极大地方便了分区边界的调度操作,降低了不确定影响。平均调水流量由 11 $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{根})$ 变为 29 $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{根})$ 。对比其他边界也可以发现,在选择最优切分策略并保证占比不少于原调水能力 85% 的情况下,管道数量减少约 65%~80%,总调水流量下降约 10%~15%,但平均调水流量提升约 150%,由此可见,重要管道的识别效果较好。在分界管道中也存在大管径但传递效率不高的管线,传统管理中对于这类大管径管道不敢随意关闭,通过识别调水能力后,管理单位在实际操作过程中就会有比较科学的支撑依据。

3.3 分区调水能力案例分析

以 G 市南部的南洲水厂为例,研究分区结构下的水源调配能力。提升南洲水厂单位流量,在管网模型中计算分区间重要管道的响应流量,得到边界供水效率,结果如图 5 所示。南洲水厂出厂压力增加 1 m 水柱(1 m 水柱的压强约为 10 kPa),则出厂水流量增加 778 m^3/h 。提高南洲水厂出水流量至

1 000 m^3/h ,需要提高 1.3 m 水柱的出厂压力,将会有近 46.6% 的水量供给至西村控制区,仅有约 9.6% 的水量传递至石门控制区。

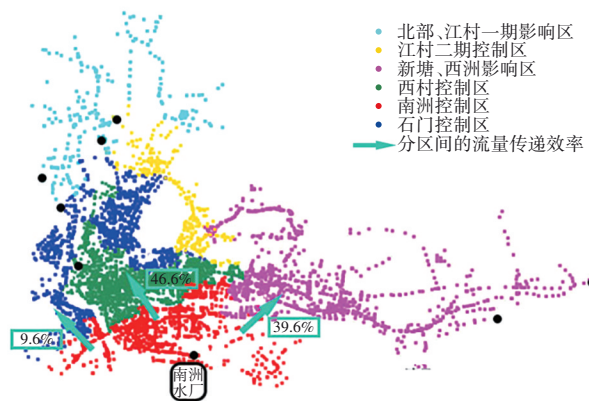


图 5 南洲水厂控制区边界供水效率

Fig.5 Boundary water treatment supply efficiency of control area of Nanzhou Water Treatment Plant

对于分区的缺水情况,需要进行外部分区的水量调度,但由于各水厂水源的调配能力存在差异,因此需要考虑相邻分区水厂方案优选问题。分析各邻区水源的调水效率,对于南洲控制区而言,主要与石门控制区、西村控制区、新塘/西洲影响区相邻,通过管网模拟计算各边界管道的响应流量,从而编制各分区边界的重要管道调度情况。其中,有关南洲-新塘/西洲的边界重要管道调度情况见表 3。

表 3 南洲-新塘/西洲区域边界重要管道调度情况

Tab.3 Dispatch of important pipelines along boundary of Nanzhou and Xintang/Xizhou area $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$

南洲-新塘/西洲分区间边界重要管道		改变南洲水厂		改变新塘水厂		改变西洲水厂	
管道编码 ID	管径规格	1 000 m^3/h	1 m 水柱	1 000 m^3/h	1 m 水柱	1 000 m^3/h	1 m 水柱
28461413G0060	DN1 200	104	81	68	21	80	32
24461208G0002	DN800	71	55	34	10	41	16
28461312G0109	DN800	56	43	37	11	43	17
24460906G1837	DN800	42	33	33	10	40	16
24461207G0006	DN800	25	19	26	8	31	12
24461106G0003	DN800	24	18	24	7	29	11
TMP18111	DN800	24	18	24	7	29	11
24461205G1110	DN800	23	18	24	7	29	12
24460206G5991	DN600	16	12	1	0	1	0
24461208G0003	DN600	12	9	13	4	15	6
边界合计响应水量		397	306	284	85	338	133

从表 3 可以发现,不同水厂水源多提供 1 000 m^3/h 的水量,产生的效果不一样。西洲水厂能为南洲控制区带来 338 m^3/h 的水量,而新塘水厂可为其

供给 284 m^3/h 的水量。比较石门水厂和西村水厂的提升情况,均未超过西洲水厂的影响。因此对于该区域而言,缺水时优先考虑西洲水厂的增压增流。

另外,根据调度情况可以确定流量影响作用最大的边界管道。南洲水厂的变化会对3个供水区域产生影响,如果要集中向其中一个区域调整流量,就可以对另外两个区域主要供水通道的阀门进行调整,强化南洲水厂对目标区域的调水能力。

4 结论

① 一级分区自动划分与调水能力是一项具有明确“问题导向”的理论与应用研究。本研究利用二分 K -means模型实现了大型管网的聚类分区,采用敏感度分析法识别出区域间重要管道,并得到了水厂调配能力和分区间的水量调度效率。应用该方法对G市大型管网进行了分区并研究了分区间的水量调度,结果表明该方法可以实现大型管网基于水量平衡的大尺度分区,有利于科学制订大型管网的供水调度计划。

② 针对第一级尺度提出的分区方案,该方法的技术原理清晰、简单,且具有较强的实用性,所得结果与实际中应用的方案相似,充分证明了该方法的科学合理性,具备应用于其他大型管网的推广潜力。后期将从水量优化、二级、三级的角度考虑开展更深入的分析。通过本研究总结了以下两点经验供参考:基于聚类的分区方法可以不拘泥于水厂数量的限制,可根据实际情况及调度需求确定适宜的分水方案;区域间的水量调度主要以水厂调配能力为驱动、区域间重要管道为载体,进而比较分区之间的调水效率,可以大幅简化日常调度分析的难度,提高管网水力模型的实用性。

参考文献:

- [1] 刘俊,俞国平. 结合图论与地理信息系统的供水管网分区优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(12): 1863-1869.
LIU Jun, YU Guoping. Integration of graph theory and GIS for district metered areas of water distribution systems [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(12): 1863-1869 (in Chinese).
- [2] 孙国胜,高金良,姚芳,等. 南方某城市供水管网系统三层分区控漏实践[J]. 中国给水排水, 2017, 33(3): 42-45.
SUN Guosheng, GAO Jinliang, YAO Fang, et al. Leakage control of three-level partition for water supply network system in a southern city [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(3): 42-45 (in Chinese).
- [3] ELAD S, OLYA S, AVI O. Battle of water networks DMAs: multistage design approach [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2017, 143(10): 4017059. 1.
- [4] MARTÍNEZ-SOLANO J F, PEDRO L I R, DANIEL M M, et al. Combining skeletonization, setpoint curves, and heuristic algorithms to define district metering areas in the battle of water networks district metering areas [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2018, 144(6): 4018023.
- [5] 高金良,姚芳,叶健. 结合图论的供水管网PMA分区方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(8): 67-72.
GAO Jinliang, YAO Fang, YE Jian. Optimization of water supply network PMA partition by graph theory [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(8): 67-72 (in Chinese).
- [6] BRUNO B, ENRIQUE C, THAISA G, et al. Social network community detection and hybrid optimization for dividing water supply into district metered areas [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2018, 144(5): 4018020.
- [7] 王彤,刘翔翔,赵明,等. 基于水力模型的供水管网分区管理在北方某市的应用[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(1): 88-96.
WANG Tong, LIU Xiangxiang, ZHAO Ming, et al. Application of water supply network distribution management based on hydraulic model in a city in the North [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(1): 88-96 (in Chinese).
- [8] KARWAN M, RAZIYEH F, KOUROSH B, et al. Optimal rehabilitation of water distribution systems using a cluster-based technique [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2017, 143(7): 4017022.
- [9] CARLO C, ENRICO M, SARA T. Modularity-based procedure for partitioning water distribution systems into independent districts [J]. Water Resources Management, 2016, 30(6): 2021-2036.

作者简介:田峻仁(1997-),男,山西晋城人,硕士研究生,主要研究方向为城市供水管网系统。

E-mail: tianjunren@zju.edu.cn

收稿日期: 2021-07-07

修回日期: 2021-09-28

(编辑:任莹莹)