

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222481

基于聚类分析法的二次供水错峰调蓄研究

王晴怡^a, 王 彤^a, 康炳卿^b, 李钟毓^b, 许德伦^b, 赵红斌^b, 洪 磊^b, 刘嘉祥^b

(长安大学 a. 建筑工程学院; b. 住房与城乡建设部给水排水重点实验室, 陕西 西安 710061)

摘要: 针对城镇供水的二次供水水资源利用效率低下的问题, 提出基于用户角度的需水侧管理模式(DSM), 从用户需求侧管理方面入手, 以管网末端二次供水系统中的低位水箱为例, 采用自适应FCM聚类分析和灰色关联度分析的数学模型分析法, 针对不同类型小区, 分析用户用水特征, 进行调蓄潜力的挖掘与错峰方案的研究, 最终确定合适的错峰方案, 从而以需求侧管理的用水模式实现良好的错峰。

关键词: 二次供水; 低位水箱; 用水特征; 自适应FCM聚类分析; 灰色关联度分析法

中图分类号: TV674; TU991

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0094-04

1 引言

目前我国提高水量供应的方式主要是增加水资源的开发力度, 从而尽可能去保障用户对水资源需求的供水侧管理模式。现阶段大多从供给侧入手进行分析, 需求管理的相关研究发展相对缓慢。AVNI N等^[1]利用水需求模型(WDMs), 确定了节水动机是影响居民用水量大小的主要因素。但这种模式存在凸显部分用户用水不受约束、水资源利用率低等缺陷。目前, 随户表改造、老旧小区改造、“三供一业”移交等, 二次供水大量使用的是低位水箱+变频调速供水, 所以对于低位水箱(池)来说可利用的错峰调蓄容量十分巨大。鉴于此, 本文从用户的需求侧管理方面入手, 以各居民二次供水系统中的低位水箱为例, 运用聚类分析法和灰色关联度分析法, 结合不同小区的用水特征进行调蓄潜力挖掘与错峰方案研究, 提出合理错峰调蓄方案, 以实现错峰供水, 结果对调节供水流量、缩小供需差距、有效利用水资源具有重要意义^[2]。

2 研究方法

为了能较准确地反映居民水资源利用的变化规律和各种影响因素对用水量的影响关系, 首先分析用水特征的影响因素, 从数据的标准化处理、聚类分析算法及同类型用水特征的典型水箱筛选

方法三个方面建立二次供水低位水箱用水特征的分析模型, 利用自适应模糊c均值聚类算法对二次供水低位水箱的用水特征进行聚类分析, 以实现不同用水类型的水箱分类, 运用加权重心法筛选出能代表各类用水特征的典型水箱, 并通过灰色关联度分析法与其他不同的筛选模型进行比较。

2.1 自适应FCM聚类算法

聚类分析是指将研究对象划分为由相似特征所组成的多种类别的分析过程^[3], 其目的就是将具有相似特征的对象划分为同一类。自适应FCM聚类算法是一种模糊、柔性的算法, 这种算法可使分类结果更合理、准确, 其整体流程见图1。

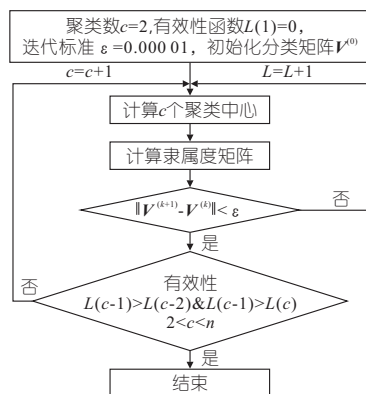


图1 自适应FCM聚类算法实现流程

Fig. 1 Flow chart of realization of adaptive FCM clustering algorithm

2.2 灰色关联度分析法

灰色关联度分析法的计算结果会反映出不同

收稿日期: 2022-11-24, 修回日期: 2022-12-24

基金项目: 水资源高效开发利用重点专项(2018YFC0406200)

作者简介: 王晴怡(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向为长距离输水水锤防护、二次供水, E-mail: 421911460@qq.com

通讯作者: 王彤(1965-), 男, 教授, 研究方向为长距离输水水锤防护、二次供水, E-mail: 894496318@qq.com

数据之间的关联程度^[4]。数据特征相差越大,对应序列之间的相关性越小,反之亦然。

3 二次供水的低位水箱水量特征分析

为准确掌握二次供水低位水箱服务用户的差异化用水行为,需对其用水特征进行精细化分析,所以首先采用聚类分析算法进行分析。一般由于数据样本容量巨大,且聚类数无法提前预知,对于一次聚类分析来说,合理的分类数是整个聚类分析的基石,但若分类数选取不当,则不管选择多精确的算法,最终的聚类结果均不准确。

3.1 聚类分析

3.1.1 原始数据来源

根据 2021 年 9 月调研的居民小区用水量数据及二次供水泵房基本信息,基于某市部分居民二次供水低位水箱服务用户的用水特征,收集了该市 100 个配有低位水箱(池)的用水量数据,并对水箱进行编号。

3.1.2 日用水曲线聚类分析

选取 100 个二次供水水箱夏季最高日 24 h 的用水量数据作为样本的特征向量,利用自适应 FCM 算法对其进行聚类分析。根据样本聚类有效性函数值计算公式可得 $L(2)=0.463$ 、 $L(3)=0.492$ 、 $L(4)=0.514$ 、 $L(5)=0.502$ 、 $L(4)>L(5)>L(3)$,可知最佳聚类数 $c=4$,并将其分别记为 A、B、C、D 类 4 种类别。4 种类别包含的水箱编号见表 1。

表 1 4 种类别包含的水箱编号

Tab. 1 Four categories contain tank numbers

类别	水箱编号
A 类	4、8、14、16、17、20、28、31、34、37、39、41、46、49、50、51、54、57、66、68、70、72、81、82、83、92、93、94
B 类	1、2、5、7、9、12、13、18、19、22、24、30、33、36、38、45、52、67、53、56、58、59、60、61、64、65、71、73、74、75、76、79、80、84、85、96
C 类	40、42、43、6、10、11、55、89、95、99
D 类	3、15、21、23、25、26、27、29、32、35、44、47、48、62、63、69、77、78、86、87、88、90、91、97、98、100

3.2 典型水箱筛选

为了提出更好的错峰方案,综合考虑水箱日用水量用水特征和其用水曲线峰谷特征,通过加权重心法从四类水箱的每一类中筛选出一个典型水箱作为代表性水箱。依据日用水量曲线和加权重心的典型水箱的筛选模型,筛选出 A、B、C、D 类中的代表性典型水箱编号分别为 31、56、42、29。

利用灰色关联度分析法,比较分析不同筛选

模型的计算结果,见表 2。由表 2 可知,无论是哪种用水量曲线,其中关联度最高的均为基于加权重心法所筛选出的典型水箱,因此加权重心法所筛选出的典型水箱亦最具代表性。

表 2 各类水箱计算关联度比较

Tab. 2 Comparison of calculation correlation of various water tanks

方法	A 类		B 类		C 类		D 类	
	用户编号	关联度	用户编号	关联度	用户编号	关联度	用户编号	关联度
加权重心法	31	0.813	56	0.796	42	0.862	29	0.855
平均值法	57	0.712	30	0.775	6	0.753	32	0.821
最大值法	54	0.639	38	0.636	55	0.704	44	0.736
随机筛选法	17	0.703	45	0.714	11	0.841	21	0.741

3.3 典型水箱用水特征分析

以筛选出的典型水箱为例,根据该日 24 h 用水量数据分别绘制出各自的用水量变化曲线,见图 2。由图 2 可看出,四类曲线均基本表现为“M”型势态,但各类曲线错峰潜力各不相同。根据对水箱服务用户的用水特征分析,并结合实地调研情况对各类水箱进行分类总结,见表 3。

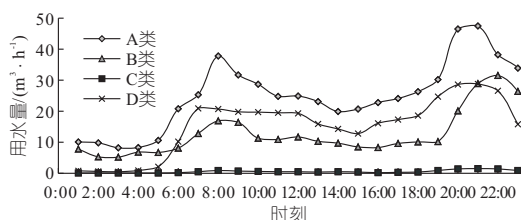


图 2 典型水箱日用水量曲线分类

Fig. 2 Curve classification of daily water quantity in typical water tanks

表 3 不同分类的低位水箱用水行为特点

Tab. 3 Characteristics of water consumption behavior of low water tank in different categories

类别	水箱服务用户类型	特征
A 类	服务用户多,老年人+上班族	服务户数多,用水总量大;全天的用水水平平均比较高。
B 类	服务用户较多,上班族占比大	服务户数较多,用水总量较大;白天用水量相对较少,晚高峰用水量明显偏大,时变化系数较大。
C 类	服务用户少,多为老旧小区	服务户数较少,相比较下全天的用水量均比较低。
D 类	服务用户较多,老年人占比大	早晚高峰期出现时间相对较早,白天用水量保持一定水平,时变化系数较小。

由表 3 可知,错峰潜力的大小与高峰期用水量密切相关。若低位水箱有效容积足够大,则水箱可服务的户数就越多,其错峰潜力也就越大。

同样以 100 个低位水箱的用水量数据与其有效容积为样本,重新划分为 a、b、c、d 类四类。四种类别包含的水箱编号见表 4。

根据分类结果,利用灰色关联度分析法计算的关联度筛选典型水箱,表 5 为筛选出的各类典型水箱的编号及相关用水特征。

表 4 低位水箱调蓄潜力分类

Tab. 4 Classification of low water tank regulation and storage potential

类别	水箱编号
a类	1,2,4,14,30,31,33,37,38,39,46,64,65,76,80,81,85,86,89,91,92,94,98,100
b类	3,5,9,23,24,27,29,41,56,59,60,61,62,66,67,69,70,71,73,74,75,78,79,82,83,87,88,90,93,95
c类	7,8,12,13,16,17,18,19,20,21,22,25,26,28,32,34,35,36,40,42,43,44,45,47,48,49,50,51,52,53,54,57,58,63,68,72,84,96,97
d类	6,10,11,15,55,77,99

表 5 典型水箱错峰分析

Tab. 5 Typical tank off-peak analysis

类别	典型水箱编号	日用水量/m ³	水箱有效容积/m ³
a类	31	593.29	382
b类	24	278.54	64
c类	63	352.69	50
d类	15	152.83	20

由表 5 分别绘制出四类典型水箱单位小时用水量与其有效容积占比曲线,见图 3。由图 3 可知,a、b、c、d 四类曲线特征各不相同,因此需针对不同曲线特征制定不同的调蓄方案。

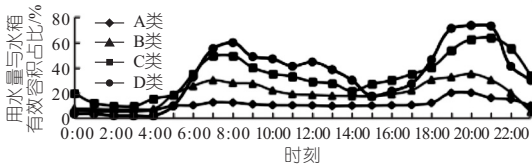


图 3 用水量与水箱有效容积占比曲线分类

Fig. 3 Curve classification of water consumption and effective volume of water tank

4 错峰调蓄实施方案

由于不同类别水箱的错峰调蓄潜力有所差异,因此应针对性地制定错峰改造方案。在维持原有日用水量总量的前提下,尽可能降低用水高峰期水量,将一些用水量转移到用水低峰或平期时间段,以实现用水量转移。表 6 为具体的错峰调蓄方案。

表 6 错峰调蓄方案

Tab. 6 Staggered peak storage scheme

水箱类型	整体采取的措施	细化措施	对应时间
a类	水箱夜间进水,白天短时段补水	夜间补水	23:00~6:00
		白天短时段补水	13:00~16:00
b类	低峰进水,高峰隔离	水箱补水时段	22:00~6:00
		水箱隔离时段	9:00~17:00
		水箱隔离时段	6:00~9:00
c类	高峰限流	小口径短管出流	17:00~22:00
		水箱引入管加装孔板	
		Y型过滤器内设穿孔管	
		增加进水旁通管	
d类	限频动	进水量等于其设计秒流量	

整理归类所调研水箱,获得适宜采用水位调控错峰方案的水箱共有 52 个,水位调控错峰主要由特定时间段水箱以特定流量进水;而适用于高峰限流方案的水箱共计 36 个,对于高峰限流来说可根据小区实际情况选择小口径短管出流、水箱引入管加装孔板、Y 型过滤器内设穿孔管或增加进水旁通管;而剩下的不适合参与错峰的水箱主要是因为该水箱服务户数少,用水量低,或存在水箱有效容积太小等问题,此类水箱共计 12 个。将各低位水箱进行不同错峰分类,结果见表 7。

表 7 各低位水箱错峰方案确定

Tab. 7 Determination of staggered peak schemes for each low water tank

错峰方案	水箱编号
水位调控	1,2,3,4,5,9,14,23,24,27,29,30,31,33,37,38,39,41,46,56,59,60,61,62,64,65,66,67,69,70,71,73,74,75,76,78,79,80,81,82,83,85,86,87,88,90,91,92,93,94,98,100
高峰限流	7,8,12,13,16,17,18,19,20,21,22,25,26,28,32,34,35,36,44,45,47,48,49,50,51,52,53,54,57,58,63,68,72,84,96,97
不错峰	6,10,11,15,40,42,43,55,77,89,95,99

以 a 类为例,其错峰后水箱水量变化见图 4。由图 4 可知,错峰后,该案例小区低位水箱避免了在高峰期进水,可减轻市政管网供水压力,避免了局部区域内市政直供用户高峰期供水不足的问题产生。

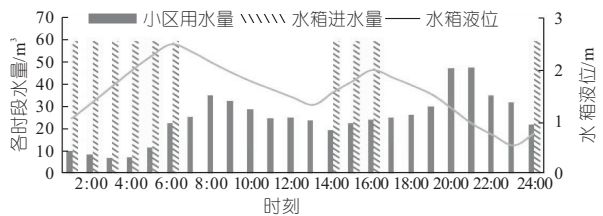


图 4 a 类案例小区水箱错峰后水量变化

Fig. 4 Water volume change after peak load shifting of water tank in class a case community

5 模拟算例

选取北方某市为算例,该市地势整体为东南高西北低,南边主要为地表水厂,为本市供水主要水源,是以重力流为主,水泵加压为辅的供水模式,北边以地下水源为主。利用 EPANET 软件构建管网拓扑结构^[5],并输入相关基础数据,对其进行延时模拟分析,模拟管道和节点错峰前后实际工况。简化后的拓扑结构见图 5。

选用目标节点压力波动强度和目标最低压力平均值作为评价指标。由图 5 可知,经模拟错峰后目标节点压力波动强度从 2.96 m 降至 2.43

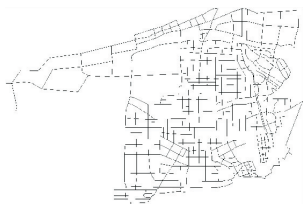


图 5 某市供水管网的简化拓扑结构

Fig. 5 Simplified topological structure of water supply network in a city

m,最低压力平均值则由 21.89 m 提升至 24.37 m。由此可知,充分利用各二次供水低位水箱和水池的调蓄容积,可降低管网供水节点的压力波动,起到稳定水压作用,同时能提升用水高峰期节点压力值,从而保障多层市政直供用户的用水需求。

6 结论

本文使用模糊 c 均值聚类算法分析不同用水特征的水箱,针对不同水箱提出了“水位调控”与“高峰限流”的错峰方案,解决了部分小区市政直供区域高峰期用水困难的问题,同时也避免了水

箱中产生“死水区”,提高了二次供水水质质量。通过高峰期的错峰,部分节点水压有所提高,具有一定的节能减碳作用,具有推广意义。

参考文献:

- [1] AVNI N, FISHBAIN B, SHAMIR U. Water consumption patterns as a basis for water demand modeling[J]. *Water resources research*, 2015, 51(10): 8165-8181.
- [2] PETERS L A H, CHANG H. Urban water demand modeling: Review of concepts, methods, and organizing principles[J]. *Water resources research*, 2011, 47(5): W05401.
- [3] 胡建军,唐常杰,李川,等.基于最近邻优先的高效聚类算法[J].*四川大学学报(工程科学版)*,2004,36(6):1-12.
- [4] 王俊岭,胡颖梦,徐强,等.基于 FAHP-灰色关联度分析的供水管网漏损影响因素评价[J].*给水排水*, 2022,58(3):116-122.
- [5] 王雪,焦星瑞,许铮,等.城市供水管网微观模型的建立[J].*中国资源综合利用*, 2017, 35(5): 123-124.

Study on Peak Staggered Storage of Secondary Water Supply Based on Cluster Analysis

WANG Qing-yi^a, WANG Tong^a, KANG Bing-qing^b, LI Zhong-yu^b,
XU De-lun^b, ZHAO Hong-bin^b, HONG Lei^b, LIU Jia-xiang^b

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Water Supply and Drainage,

Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: With the development of urbanization in China, secondary water supply has become a key part of urban water supply, but the utilization efficiency of water resources is low. This paper proposes the Demand Side Management (DSM) model based on the user's perspective. Starting from the user's Demand Side Management, the low water tank in the secondary water supply system at the end of the pipe network is taken as the research object. Using adaptive FCM clustering analysis and grey relational analysis, the paper analyzes the characteristics of user water use in different types of small areas, excavates the potential of regulation and storage and studies the peak-shifting scheme, and determines the appropriate peak-shifting scheme, so as to achieve good peak-shifting by demand-side management.

Key words: secondary water supply; low water tank; water use characteristics; adaptive FCM clustering analysis; grey correlation analysis method

(上接第 101 页)

Calculation of Water Supply Network Leakage Based on Kalman Filter Algorithm

WANG Yi-lin, DONG Shen, LV Mou, ZHAO Huan

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: With the acceleration of urbanization in China, the demand for water resources is increasing, and the leakage of the water supply pipe network has caused waste of water resources. Therefore, leakage control is imminent. The first is to accurately calculate the leakage of the pipe network, but the current methods have certain deficiencies. Based on the Kalman filter, this paper establishes an analysis model of pipeline network leakage, and uses the empirical formula of node leakage, standard Kalman filter (SKF) and innovation adaptive Kalman filter (IAKF) to calculate the leakage of the pipeline network, respectively. Taking the actual pipe network project as an example, the EPANET simulation was carried out, and the calculation results were compared. The results show that using both filtering algorithms is more accurate than the nodal leakage formula, and the result of the IAKF algorithm is better than that of the SKF algorithm. This provides a theoretical basis for accelerating the research on leakage control technology and implementing scientific and effective leakage control methods, which has certain significance for urban water saving and sustainable development.

Key words: water supply network leakage; Kalman filter; innovation adaptive Kalman filter; EPANET