

基于综合权重因子的城市时需水量预测

李树平¹, 周艳春¹, 赵子威¹, 王磊新², 陆纳新², 高乃云¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 无锡市自来水有限公司, 江苏 无锡 214031)

摘要: 提出了基于综合权重因子的城市时需水量预测方法。根据预测日前几日和前几周的用水量数据, 计算平均时用水量; 引入综合权重因子, 构建预测日前1日时用水量模型。结合日需水量预测数据, 将获得的最优连续日数、最优连续周数和综合权重因子, 用于预测日的时需水量预测。算例验证结果表明, 预测值平均绝对百分比误差较小。

关键词: 城市时用水量; 综合建模; 权重因子; 需水量预测

中图分类号: TU991

文献标志码: A

Prediction of Urban Hourly Water Demand Based on Synthetic Weight Factor

LI Shuping¹, ZHOU Yanchun¹, ZHAO Ziwei¹, WANG Leixin², LU Naxin², GAO Naiyun¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Wuxi Drinking Water Company, Wuxi 214031, China)

Abstract: A prediction method of urban hourly water demand based on synthetic weight factor is proposed. According to the water consumption data of the days and weeks before the forecasting day, the average hourly water consumption is calculated. Then, the synthetic weight factor is introduced to construct the water consumption model of the day before the forecasting day. Combined with the daily water demand forecasting data, the optimal continuous days, the optimal continuous weeks and the synthetic weight factors are used to forecast the hourly water demand of the forecasting day. The case study shows that the average absolute percentage error of the predicted values is small.

Key words: urban hourly water consumption; synthetic modeling; weight factor; water demand forecasting

城市短期需水量预测是根据过去几天、几周的实际用水量记录, 对未来几小时、一天或几天的需水量做出预测, 以此作为水厂运行和管网系统调度的基本依据。如果实际用水量没有达到预测需水量, 就会导致资源的浪费。如果实际用水量超过预测需水量, 就会使供水系统难以满足实际需求^[1]。城市需水量预测模型主要有回归分析模型、灰色预测模型、时间序列模型、神经网络模型等^[2]。短期需水量预测的常规方法是: 利用时间序列法预测日需水量, 再结合时变模式分配到各个小时。时变模式常分为星期日、星期一、……、星期六的星期模式, 并考虑需水量的月变化、季变化和节假日变化^[3-5]。日需水量预测常考虑季节性、气候相关性和自相关性, 时需水量常常提前一天(即提前24 h)预测^[6]。

1 用水量变化特征

通常认为日用水量变化具有较强的周期性和随机扰动性。图1为一周内每日用水量变化, 图2为7周内每星期二用水量变化。由图1a看出, 晚上出现用水低谷, 白天出现用水高峰, 用水高峰和用水低谷在各日有前后移动; 由图1b看出, 一周内各日用水量具有变化性。由图2a看出, 用水高峰和用水低谷在各周星期二基本处于同一时段; 由图2b看出, 由于相邻两周有7天的跨度, 因此用水量出现明显的上升或下降。受降雨、相对湿度、特殊因素(如节假日、体育赛事活动等)等影响, 用水量总会出现一定程度的扰动。

当采用时间序列法预测需水量时, 序列时段的选择尤为重要。如果时间序列过短, 序列中可能没有用于预测的充分信息。如果时间序列过长, 太多的老旧信息可能对预测没有帮助, 或者导致扰动过大, 使预测精度变差。

收稿日期: 2021-04-12

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07201002)

第一作者: 李树平(1972—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为给水排水工程设计与运行最优化。

E-mail: lishuping@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

根据图1和图2的分析可知:预测日需水量的变化特征与预测日前几日用水量的变化特征具有相似性;该日所在星期几,需水量的变化特征与前数周内所在特定星期几的变化特征也具有相似性。为衡量预测日需水量与哪方面的相似性占比更大,引入综合权重因子 w 。当 w 接近1时,就说明该日之前几日

的用水量对预测日需水量的影响较大;当 w 接近0时,就说明前几周该日所在星期几的用水量对预测日需水量的影响较大。在本研究中,基于近几日的各日用水量、近几周特定星期几的用水量信息,并结合综合权重因子,进行时用水量综合建模和需水量预测。

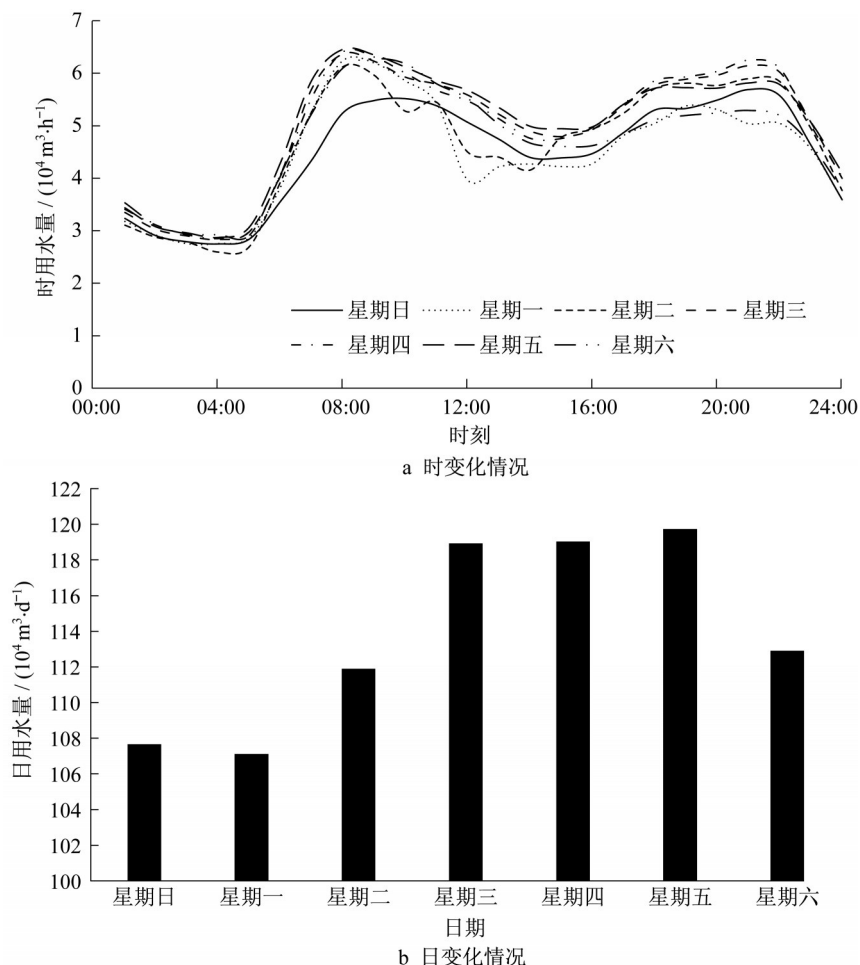


图1 一周内每日用水量

Fig.1 Daily water consumption in one week

2 综合建模和预测

为预测时需水量,假设使用的原始用水量数据已进行过误差处理,均反映了真实的用水情况。第一部分为建模,确定所采用的日内数据、连续周内该日所在星期几数据,以及如何组合这两组数据(即这两组数据所占权重),该部分将采用迭代方法。第二部分为预测,根据建模日确定的连续日数和连续周数,选择相应的日期和权重,预测第2日各时段的需水量。

2.1 综合建模方法

(1) 设建模日之前连续日数为 I ,建模日之前连续周数为 J ,一日内用水量变化时段数为 K (若假设每一个小时用水量变化一次,则用水量变化时段数 $K=24$)。

(2) 取建模日连续前 I 日内的用水量数据,计算第 i 日时段 k 用水量变化因子 $f_{i,k}$,然后求连续 I 日内时段 k 的用水量平均变化因子 $\bar{f}_{i,k}$ 。 $f_{i,k}$ 和 $\bar{f}_{i,k}$ 的计算式如下所示:

$$f_{i,k} = \frac{Q_{i,k}}{Q_i} \quad (1)$$

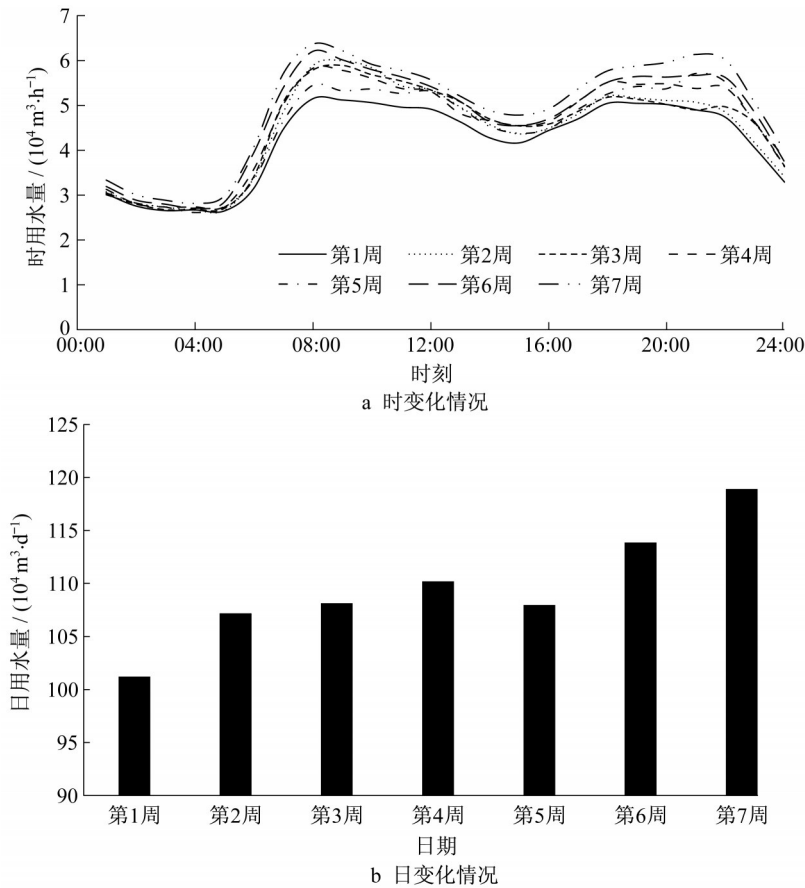


图2 7周内每星期二用水量

Fig.2 Tuesday water consumption in seven weeks

$$\bar{f}_{i,k} = \frac{\sum_{i=1}^I f_{i,k}}{I} \quad (2)$$

式中: $Q_{i,k}$ 为建模日之前 i 日时段 k 的用水量 ($k=1, 2, \dots, K$); \bar{Q}_i 为建模日之前 i 日单个时段的平均用水量。 \bar{Q}_i 的计算式如下所示:

$$\bar{Q}_i = \frac{\sum_{k=1}^K Q_{i,k}}{K} \quad (3)$$

(3) 取建模日之前连续 J 周内该日所在星期几的用水量数据, 计算第 j 周该日所在星期几的时段 k 用水量变化因子 $f_{j,k}$, 然后求连续 J 周内该日所在星期几的时段 k 用水量平均变化因子 $\bar{f}_{j,k}$ 。 $f_{j,k}$ 和 $\bar{f}_{j,k}$ 的计算式如下所示:

$$f_{j,k} = \frac{Q_{j,k}}{\bar{Q}_j} \quad (4)$$

$$\bar{f}_{j,k} = \frac{\sum_{j=1}^J f_{j,k}}{J} \quad (5)$$

式中: $Q_{j,k}$ 为建模日之前 j 周该日所在星期几的时段 k 用水量; \bar{Q}_j 为建模日之前 j 周该日所在星期几的

个时段平均用水量。 \bar{Q}_j 的计算式如下所示:

$$\bar{Q}_j = \frac{\sum_{k=1}^K Q_{j,k}}{K} \quad (6)$$

(4) 设建模日平均用水量为 \bar{Q}_r 。根据连续 I 日内时段 k 的用水量平均变化因子 $\bar{f}_{i,k}$ 和连续 J 周内该日所在星期几的时段 k 用水量平均变化因子 $\bar{f}_{j,k}$, 分别获得建模日时段 k 的模拟用水量 $Q_{m,I,k}$ 和 $Q_{m,J,k}$, 计算式如下所示:

$$Q_{m,I,k} = \bar{f}_{i,k} \bar{Q}_r \quad (7)$$

$$Q_{m,J,k} = \bar{f}_{j,k} \bar{Q}_r \quad (8)$$

(5) 模拟用水量 $Q_{m,I,k}$ 和 $Q_{m,J,k}$ 与建模日时段 k 的真实用水量 $Q_{r,k}$ 相比, 均有一定程度的偏差。为减小偏差, 引入综合权重因子 w ($0 \leq w \leq 1$), 试图考虑 $Q_{m,I,k}$ 和 $Q_{m,J,k}$ 在综合模拟用水量 $Q_{m,k}$ 中所占的比重, 计算式如下所示:

$$Q_{m,k} = wQ_{m,I,k} + (1-w)Q_{m,J,k} \quad (9)$$

模拟值的误差平方和

$$E = \sum_{k=1}^K (Q_{r,k} - Q_{m,k})^2 \quad (10)$$

通过最小化误差平方和 E ,可以确定综合权重因子 ω 。当 $\omega=1$ 时,说明 $Q_{m,k}$ 仅用该日之前几日的用水量建模;当 $\omega=0$ 时,说明 $Q_{m,k}$ 仅用前几周该日所在星期几的用水量进行建模。

(6)对于不同连续日数 I 和不同连续周数 J 的组合,产生不同的误差平方和 E 。各误差平方和最小值对应的连续日数和连续周数,被选为最佳连续日数 I_{opt} 和最佳连续周数 J_{opt} ,用于需水量预测。

2.2 需水量预测和验证

利用建模日确定的最佳连续日数 I_{opt} 、最佳连续周数 J_{opt} 、相应综合权重因子 ω ,以及建模日之后一日(预测日)的总预测需水量(或平均需水量),确定预测日各时段需水量 $D_{m,k}$ 。注意,由于预测日不同于建模日,在计算 $\bar{f}_{l,k}$ 和 $\bar{f}_{r,k}$ 时将分别使用新的最佳连续日数 I_{opt} 的用水量,以及新的最佳连续周数 J_{opt} 内预测日(而不是建模日)所在星期几的用水量。

为验证模型的合理性,采用平均绝对百分比误差(α_{MAPE})评估预测需水量和实际用水量之间的差异,计算式如下所示:

$$\alpha_{MAPE} = \frac{\sum_{k=1}^K \frac{|D_{r,k} - D_{m,k}|}{D_{r,k}}}{K} \times 100\% \quad (11)$$

式中: $D_{r,k}$ 和 $D_{m,k}$ 分别为预测日时段 k 的实际用水量和预测需水量。注意:为了区分,在这里预测日水量采用 D 表示,而建模日(即预测日的前一日)水量采用 Q 表示。

理想 α_{MAPE} 应为零,意味着预测需水量和实际用水量之间没有差异; α_{MAPE} 数值越大,说明预测数据的准确性越低。通常认为, α_{MAPE} 小于10%时模型预测精度较好(见表1)^[7]。

表1 预测精度 α_{MAPE} 划分

Tab.1 α_{MAPE} class of forecasting precisions

预测精度等级	$\alpha_{MAPE}/\%$
高精度预测	< 10
好的预测	$\geq 10 \sim 20$
可行预测	$\geq 20 \sim 50$
不可行预测	≥ 50

3 示例分析

对我国华东某市2020年4月至5月用水量数据进行分析,原始数据为每小时用水量。根据这些用水量数据,预测5月24日(星期日)至5月30日(星期六)一周内各日的时需水量。在此基础上,根据预测日的实际用水量,采用式(11),评判预测结果的合

理性。

第1步,对5月23日(星期六)的用水量建模,利用5月16日(星期六)至5月22日(星期五)的连续7日、4月4日至5月16日连续7周各星期六数据,寻找最佳综合权重因子。

第2步,利用5月23日用水量数据获得综合权重因子,并考虑一周内连续日数、最近周数,预测5月24日(星期日)需水量。

第3步,利用5月24日(星期日)的需水量,5月17日(星期日)至5月23日(星期六)连续7日数据,以及4月5日至5月17日连续7周各星期日数据,寻找最佳综合权重因子。

第4步,利用5月24日用水量数据获得综合权重因子,并考虑一周内连续日数、最近周数,预测5月25日(星期一)的需水量。

第5步,依据以上第3步、第4步,依次分析5月26日(星期二)、5月27日(星期三)、5月28日(星期四)、5月29日(星期五)和5月30日(星期六)的需水量。

3.1 最佳预测模型参数

为提高预测需水量的精确性,分别采用距5月23日(星期六)最近7日以及距5月23日最近7周各星期六的用水量数据,计算综合权重因子,寻找最佳综合权重因子以用于预测的最近天数和最近周数,如表2和表3所示。

由表2和表3看出:仅用前1日的用水量模式或仅用前1周星期六的用水量模式预测本周星期六的需水量,效果不如综合前几日或前几周用水量的模拟情况;利用前3日、前7周各星期六数据,在综合权重因子为0.61时建模,模拟值的误差平方和 E 最小($19\,523\,569\text{ (m}^3\cdot\text{h}^{-1})^2$),因此在预测5月24日(星期日)需水量时,最佳连续日数、最佳连续周数和综合权重因子将分别采用 $I_{opt}=3$, $J_{opt}=7$, $\omega=0.61$ 。图3为2020年5月23日(星期六)用水量建模。

3.2 时用水量预测和验证

采用 $I_{opt}=3$, $J_{opt}=7$, $\omega=0.61$ 预测5月24日各时段需水量,得到 $\alpha_{MAPE}=2.79\%$ 。其他日期仍然通过分析前1日的用水情况建模,预测当日的需水量,所获得的 I_{opt} 、 J_{opt} 、 ω 和 α_{MAPE} 如表4所示。

由表4看出,各日预测需水量与实际用水量的平均百分比误差均小于10%,说明这几日的预测属于高精度预测。2020年5月24日至5月30日各小时预测需水量的相对误差如图4所示。图4中,横坐标0表示2020年5月24日00:00。

表2 连续日数与连续周数组合下的 w 和 E (前 1 周到前 4 周)

Tab.2 w and E in continues days and continues weeks(from one week to four weeks before forecasting day)

连续日	连续周							
	前1周星期六 (5月16日)		前2周星期六 (5月16日,9日)		前3周星期六 (5月16日,9日,2日)		前4周星期六 (5月16日,9日,2日,4月25日)	
	w	$E/((m^3 \cdot h^{-1})^2)$	w	$E/((m^3 \cdot h^{-1})^2)$	w	$E/((m^3 \cdot h^{-1})^2)$	w	$E/((m^3 \cdot h^{-1})^2)$
前1日(5月22日)	0.54	30 466 205	0.57	28 309 577	0.54	23 415 768	0.58	24 826 853
前2日(5月21日至5月22日)	0.58	26 498 614	0.61	25 588 843	0.58	22 269 859	0.62	22 994 493
前3日(5月20日至5月22日)	0.56	24 729 802	0.59	24 345 487	0.56	21 110 240	0.60	21 672 265
前4日(5月19日至5月22日)	0.53	27 144 654	0.57	30 552 933	0.54	27 844 169	0.59	29 518 546
前5日(5月18日至5月22日)	0.62	22 865 976	0.66	24 675 215	0.63	22 734 614	0.67	23 597 117
前6日(5月17日至5月22日)	0.70	22 727 075	0.76	25 003 241	0.73	23 904 541	0.77	24 630 671
前7日(5月16日至5月22日)	0.82	22 727 397	0.90	23 736 430	0.83	22 977 054	0.90	23 356 322

表3 连续日数与连续周数组合下的 w 和 E (前 5 周至前 7 周)

Tab.3 w and E in continues days and continues weeks(from five weeks to seven weeks before forecasting day)

连续日	连续周					
	前5周星期六 (5月16日,9日,2日,4月25日,18日)		前6周星期六 (5月16日,9日,2日,4月25日,18日,11日)		前7周星期六 (5月16日,9日,2日,4月25日,18日,11日,4日)	
	w	$E/((m^3 \cdot h^{-1})^2)$	w	$E/((m^3 \cdot h^{-1})^2)$	w	$E/((m^3 \cdot h^{-1})^2)$
前1日(5月22日)	0.61	25 426 179	0.62	25 819 390	0.59	22 993 524
前2日(5月21日至5月22日)	0.65	23 394 228	0.66	23 796 129	0.63	21 127 446
前3日(5月20日至5月22日)	0.63	22 041 739	0.64	22 509 440	0.61	19 523 569
前4日(5月19日至5月22日)	0.62	30 431 310	0.64	31 362 601	0.60	26 955 172
前5日(5月18日至5月22日)	0.70	24 094 090	0.71	24 678 053	0.67	21 676 558
前6日(5月17日至5月22日)	0.80	24 964 442	0.81	25 349 983	0.80	23 343 893
前7日(5月16日至5月22日)	0.90	23 421 923	0.90	23 557 450	0.82	22 396 849

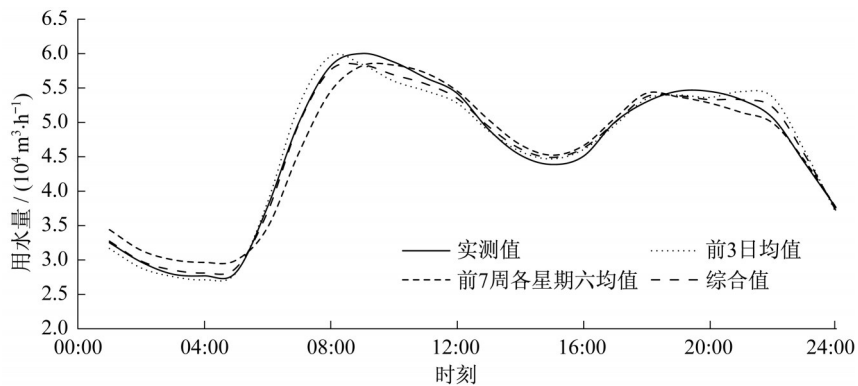


图3 2020年5月23日(星期六)用水量建模

Fig.3 Water consumption modeling on May 23th (Saturday), 2020

表4 2020年5月24日至5月30日需水量预测

Tab.4 Daily water demand forecasting from May 24th to 30th, 2020

日期	I_{opt}	J_{opt}	w	$\alpha_{MAPE}/\%$
5月24日(星期日)	3	7	0.61	2.79
5月25日(星期一)	5	2	0.35	5.30
5月26日(星期二)	5	1	0.73	5.44
5月27日(星期三)	1	1	0.44	1.79
5月28日(星期四)	1	1	0.15	2.12
5月29日(星期五)	2	1	0.60	1.55
5月30日(星期六)	2	1	0.10	2.90

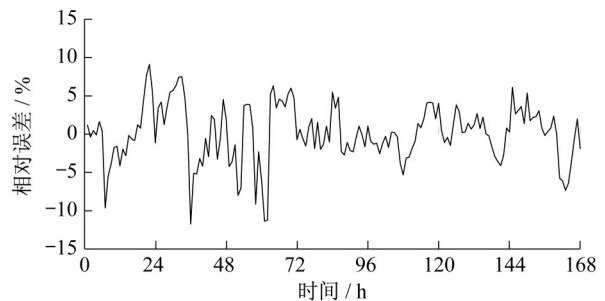


图4 2020年5月24日至5月30日时需水量预测的相对误差

Fig.4 Relative errors of hourly water demand forecasting from May 24th to 30th, 2020

4 结语

根据建模日连续前几日和连续前几周的用水数据,计算平均时用水量;引入综合权重因子,构建建模日时用水量模型。结合日需水量预测数据,将获得的最优连续日数、最优连续周数和综合权重因子,用于预测日(建模日后一日即后24 h)的时需水量预测。经算例分析,需水量预测结果平均绝对百分比误差较小,表明基于综合权重因子的城市时用水量建模与需水量预测方法具有实用价值。

应用中最优连续日数、最优连续周数和综合权重因子不是常数,它们将随着预测日实时更新,使用水量建模和需水量预测具有自适应性。

城市时需水量的准确预测,不仅体现在供水系统运行调度方面,对于突发的异常用水(如大型漏水、爆管事件)的判断也有辅助作用。随着分区计量(DMA)的普及,城市需水量预测方法也可用于分区内的水量预测,评判漏损水量。污水泵站或污水处理厂调度中的污水量短期预测也可借鉴城市时需水量预测方法。

因时需水量预测要结合日需水量预测,若日需水量预测误差较大,则可能引起时需水量预测的更大误差,所以应在实践中逐步调整,寻找减小误差的途径。

作者贡献说明:

李树平:汇总材料,总体组织文字。

周艳春:处理数据,整理文献。

赵子威:处理数据,整理文献。

王磊新:筛查原始数据,提出研究需求。

陆纳新:提出研究需求,进行算例验证。

高乃云:协调研究进展,提出研究方案。

参考文献:

- [1] 李树平,刘遂庆.城市给水管网系统[M].北京:中国建筑工业出版社,2012.
LI Shuping, LIU Suiqing. Urban water distribution system [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [2] MARUYAMA Y, YAMAMOTO H. A study of statistical forecasting method concerning water demand [J]. Procedia Manufacturing, 2019, 39: 1901.
- [3] BRENTAN B M, MEIRELLES G L, MANZI D, *et al.* Water demand time series generation for distribution network modelling and water demand forecasting [J]. Urban Water Journal, 2018, 15(2): 150.
- [4] CANDELIERI A, ARCHETTI F. Identifying typical urban water demand patterns for a reliable short-term forecasting: the icewater project approach [J]. Procedia Engineering, 2014, 89: 1004.
- [5] MAMO T G, JURAN I, SHAHROUR I. Urban water demand forecasting using the stochastic nature of short term historical water demand and supply pattern [J]. Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering, 2013, 2(3): 92.
- [6] BRENTAN B M, RIBERIRO L C L J, LUVIZOTTO E L, *et al.* Synthetic reconstruction of water demand time series for real time demand forecasting [J]. Journal of Water Resource and Protection, 2014, 6: 1437.
- [7] 尹学康,韩德宏.城市需水量预测[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.
YIN Xuekang, HAN Dehong. Urban water demand forecasting [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006.