

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2023. 23. 006

# 基于智慧监测和DMA预测居民夜间用水量

许兴中<sup>1</sup>, 李伟英<sup>2</sup>, 魏忠庆<sup>1</sup>, 许俊鸽<sup>3</sup>

(1. 福州市自来水有限公司, 福建 福州 350001; 2. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 3. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 为挖掘智能水表的水量数据价值,以福州市7个独立计量区(DMA)的居民小区窄带物联网(NB-IoT)水表的远传数据为基础样本,采用统计学方法,探究户均用水量和户均夜间用水量之间的规律,并据此科学预测福州市居民的夜间用水量。结果表明:当采用样本总体平均值法预测居民夜间用水量时,部分小区的估计值误差较大;当采用线性回归法时,户均合法夜间用水量与户均合法用水量、户均有效夜间用水量与户均有效用水量均存在显著的线性相关性。抽样其他3个户数规模不同的居住小区进行验证,证明线性回归法具有普适性且误差小等特点。据此,未装智能远传水表的DMA小区居民夜间用水量能够由此预测推算,从而为小区的漏损量化控制提供科学依据。

**关键词:** 居民夜间用水量; 智慧监测; 独立计量区(DMA); 线性回归; 漏损量化控制  
**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)23-0040-06

## Prediction of Residential Water Consumption at Night Based on Intelligent Monitoring and DMA

XU Xing-zhong<sup>1</sup>, LI Wei-ying<sup>2</sup>, WEI Zhong-qing<sup>1</sup>, XU Jun-ge<sup>3</sup>

(1. Fuzhou Water Supply Co. Ltd., Fuzhou 350001, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** To exploit the potential value of water consumption data monitored by smart meters, this paper analyzed the remote transmission data of narrow band Internet of Things (NB-IoT) water meters (basic samples) in 7 district metered area (DMA) residential districts in Fuzhou by using statistical methods to explore the relationship between average household water consumption and average household water consumption at night, so as to scientifically forecast the residential water consumption in Fuzhou at night. When sample population mean method was used to predict residential water consumption at night, the estimation errors of some districts were relatively large. When linear regression method was used to forecast, there was a significant linear correlation between average legitimate household water consumption at night and average legitimate household water consumption, and average effective household water consumption at night and average effective household water consumption. Three other residential areas with different household scales were sampled for verification, which proved that the linear regression method had the characteristics such as universality and small error. Therefore,

基金项目: 福建省住建厅科研项目(2017-K-54)

通信作者: 许俊鸽 E-mail: xujunge@163.com

residential water consumption at night can be predicted in DMA community without intelligent remote water meter, which provides scientific basis for the quantitative control of leakage in DMA community.

**Key words:** residential water consumption at night; intelligent monitoring; district metered area (DMA); linear regression; quantitative control of leakage

随着智慧水务的蓬勃发展,管网基础信息日臻完善,管网大数据应运而生,要使其成为提升漏损控制的有效工具,亟需专业人员挖掘大数据的价值<sup>[1-2]</sup>。目前,许多供水企业仅将智能水表作为替代人工抄表的工具,对其监测所得水量数据蕴含的规律则研究偏少<sup>[3-4]</sup>。因此,若想进一步提升管网漏损控制的智慧化水平,亟待充分挖掘监测的水量数据对掌握用户用水规律及理解管网漏损的意义。

独立计量区(DMA)技术在20世纪80年代由英国科学家首先提出,将供水管网分割成若干小区域,通过夜间用水量参数与夜间最小流量相结合来判断区域漏损大小,故用户夜间用水量准确性与否将直接影响漏损量计算结果的可信度<sup>[5-6]</sup>。国内外进行了很多关于夜间用水量的研究,但各地区之间因地域、气候、生活水平和用水习惯不同,夜间用水量有很大差异,如英国、德国、澳大利亚、加拿大、马来西亚以及我国深圳、南京的夜间用水量分别为1.7~2.5、0.6、1.08、3.5、3.1 L/(户·h)<sup>[7]</sup>。基于传统的人工抄录水表数据来分析夜间用水量,存在用户样本偏少、用水周期偏短或数据滞后等缺陷,由此预测夜间用水量时会导致在准确性和普适性等方面存在问题。窄带物联网(NB-IoT)技术可以利用运营商的网络组织物联网,将实时监测的海量数据直接上传到漏损平台,由专业人员对实时数据进行分析,从而克服用户样本少和数据滞后等缺陷<sup>[8-9]</sup>。

笔者以福州市区7个DMA居住小区中7 000多户居民的用水量数据为基础样本,这7个居住小区的建筑年限、户数规模、供水方式和用水器具数量不同。通过样本总体平均值法和线性回归法对居民夜间用水量进行分析,并评估这两种方法预测居民夜间用水量的有效性。此外,抽样调查3个供水和户数规模不同小区的夜间用水量,加以验证两种估计方法是否具有良好的精度和普适性,以期挖掘智能水表监测水量数据的价值。据此,未装智能远传水表的DMA小区的夜间用水量能够由此预测推算,从而为小区漏损控制提供理论依据。

## 1 夜间最小流量时段的确定

合法居民用水量是指供水企业明确授权给注册居民的计量水量,有效居民用水量则指当日消费水量不为零的计量水量。户均用水量包括户均合法用水量和户均有效用水量,前者指一个DMA内注册用户的户均日用水量;后者则指一个DMA内有效用户的户均日用水量<sup>[10]</sup>。居民夜间用水量可分为合法夜间用水量和有效夜间用水量,前者指在最小夜间流量时段内注册居民用户的用水量;后者则指在最小夜间流量时段内有效居民用户的用水量<sup>[10]</sup>。

夜间最小流量指用户夜间用水最小时段的流量,由于此时用户用水量为全天的最低点,漏损量所占比例最高,此时定量漏损最为准确,且用户不规则用水方式较少,可有效提高漏损数据分析的准确性<sup>[11]</sup>。通常,将夜间用水量与夜间最小流量相结合估算漏损,两者的时段应统一,所以首先要确定夜间最小流量的时段,以此作为居民夜间用水量的调取时段<sup>[7,12]</sup>。基于福州市区10个已安装NB户表的DMA小区的实时回传数据,确定福州市居住小区夜间最小流量时段为03:00—05:00,见表1。

表1 最小夜间流量出现时段的频次

Tab.1 Frequency of minimum night flow occurrence period 次

| 项 目    | 02:00—03:00 | 03:00—04:00 | 04:00—05:00 |
|--------|-------------|-------------|-------------|
| 世茂外滩花园 | 0           | 57          | 34          |
| 世纪蓝景城  | 1           | 32          | 58          |
| 正祥一品新筑 | 2           | 31          | 57          |
| 迎飞花园   | 0           | 56          | 35          |
| 登云佳园   | 0           | 53          | 38          |
| 金城华府   | 3           | 39          | 49          |
| 飞凤水岸   | 0           | 66          | 25          |
| 永南佳园   | 3           | 55          | 33          |
| 骏夷花园   | 3           | 45          | 43          |
| 金浦小区二期 | 7           | 55          | 30          |
| 合计     | 19          | 489         | 402         |

## 2 居民用水量数据分析与预测

夜间用水量是用户数量和户均夜间用水量的函数,故户均夜间用水量的计算是关键。本研究采

用样本总体平均值法和线性回归法预测户均合法夜间用水量和户均有效夜间用水量参数,评估这两种方法在居住小区夜间用水量测算上的有效性。

## 2.1 样本总体平均值法

### 2.1.1 居民合法用水量平均值法

以抽样调查的7个居民小区用户智能水表实时监测的水量数据为基础样本,计算出每个小区全年的户均合法用水量和户均合法夜间用水量。将样本平均值作为推广参数,不考虑小区及用户之间的区别进行参数估计,计算得出7000余户的户均合法用水量和户均合法夜间用水量的平均值分别为 $0.396 \text{ m}^3/(\text{户}\cdot\text{d})$ 和 $2.557 \text{ L}/(\text{户}\cdot\text{h})$ 。7个居民小区全年的户均合法用水量和户均合法夜间用水量的实测值与估计值见表2。其中飞凤水岸小区的户均合法用水量与户均合法夜间用水量相对误差[(实测值-估计值)/估计值]的绝对值分别达到38.38%和24.87%。因此,总体平均值法未考虑小区及居民之间的差异,由此参数进行预测可能会导致部分小区估计值的误差过大。

表2 7个居民小区户均合法用水量与户均合法夜间用水量的实测值与估计值

Tab.2 Actual and estimated values of average legitimate household water consumption and average legitimate household water consumption at night in seven residential communities

| 项 目    | 户均合法用水量  |  |        | 户均合法夜间用水量  |  |        |
|--------|--|--|--------|--|--|--------|
|        | 实测值/<br>( $\text{m}^3\cdot$<br>$\text{户}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | 估计值/<br>( $\text{m}^3\cdot$<br>$\text{户}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | 相对误差/% | 实测值/<br>( $\text{L}\cdot\text{户}^{-1}\cdot$<br>$\text{h}^{-1}$ ) | 估计值/<br>( $\text{L}\cdot\text{户}^{-1}\cdot$<br>$\text{h}^{-1}$ ) | 相对误差/% |
| 世茂外滩花园 | 0.401  | 0.396  | 1.26   | 2.414  | 2.557  | -5.59  |
| 金城华府   | 0.429  | 0.396  | 8.33   | 2.620  | 2.557  | 2.46   |
| 正祥一品新筑 | 0.433  | 0.396  | 9.34   | 2.718  | 2.557  | 6.30   |
| 迎飞花园   | 0.444  | 0.396  | 12.12  | 2.808  | 2.557  | 9.81   |
| 世纪蓝景城  | 0.408  | 0.396  | 3.03   | 2.660  | 2.557  | 4.03   |
| 飞凤水岸   | 0.244  | 0.396  | -38.38 | 1.921  | 2.557  | -24.87 |
| 登云佳园   | 0.415  | 0.396  | 4.80   | 2.758  | 2.557  | 7.86   |

### 2.1.2 居民有效用水量平均值法

同理,以抽样调查的7个居民小区用户智能水表实时监测的水量数据为基础样本,剔除日用水量为零的用户,计算出每个小区全年的户均有效用水量和户均有效夜间用水量。将样本平均值作为推

广参数,不考虑小区及用户之间的区别进行参数估计,计算得出户均有效用水量和户均有效夜间用水量的平均值分别为 $0.477 \text{ m}^3/(\text{户}\cdot\text{d})$ 和 $3.084 \text{ L}/(\text{户}\cdot\text{h})$ 。7个居民小区全年的户均有效用水量和户均有效夜间用水量的实测值与估计值见表3。其中个别小区户均有效用水量相对误差的绝对值高达22.22%,即并非所有小区的户均有效用水量都处于同一水平,采用总体平均值的统一参数进行预测,可能导致部分小区的估计值误差过大。

表3 7个居民小区户均有效用水量和户均有效夜间用水量的实测值与估计值

Tab.3 Actual and estimated values of average effective household water consumption and average effective household water consumption at night in seven residential communities

| 项 目    | 户均有效用水量  |  |        | 户均有效夜间用水量  |  |        |
|--------|--|--|--------|--|--|--------|
|        | 实测值/<br>( $\text{m}^3\cdot$<br>$\text{户}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | 估计值/<br>( $\text{m}^3\cdot$<br>$\text{户}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | 相对误差/% | 实测值/<br>( $\text{L}\cdot\text{户}^{-1}\cdot$<br>$\text{h}^{-1}$ ) | 估计值/<br>( $\text{L}\cdot\text{户}^{-1}\cdot$<br>$\text{h}^{-1}$ ) | 相对误差/% |
| 世茂外滩花园 | 0.530  | 0.477  | 11.11  | 3.186  | 3.084  | 3.31   |
| 金城华府   | 0.520  | 0.477  | 9.01   | 3.168  | 3.084  | 2.72   |
| 正祥一品新筑 | 0.501  | 0.477  | 5.03   | 3.144  | 3.084  | 1.95   |
| 迎飞花园   | 0.497  | 0.477  | 4.19   | 3.137  | 3.084  | 1.72   |
| 世纪蓝景城  | 0.476  | 0.477  | -0.21  | 3.090  | 3.084  | 0.19   |
| 飞凤水岸   | 0.371  | 0.477  | -22.22 | 2.906  | 3.084  | -5.77  |
| 登云佳园   | 0.447  | 0.477  | -6.29  | 2.960  | 3.084  | -4.02  |

## 2.2 线性回归法

### 2.2.1 居民户均合法夜间用水量线性回归法

从不同住宅小区户均用水量和用户夜间用水特点推测,当用户数量达到一定规模时,户均合法夜间用水量与户均合法用水量可能存在正相关关系<sup>[13]</sup>。基于此推测,对不同住宅小区的实测户均合法夜间用水量( $Y_1$ )与实测户均合法用水量( $X_1$ )的关系进行相关性分析,如图1所示。可知, $Y_1$ 与 $X_1$ 存在较好的相关性,采用皮尔森相关系数 $r$ ( $-1\leq r\leq 1$ )衡量两个变量之间的线性相关关系<sup>[14]</sup>,如下所示:

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{X_i - \bar{X}}{S_X} \right) \left( \frac{Y_i - \bar{Y}}{S_Y} \right) \quad (1)$$

式中: $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 为平均数; $S_X$ 和 $S_Y$ 为样本标准差。

经过计算, $Y_1$ 与 $X_1$ 的 $r$ 为0.953,线性相关程度显著。因此,假设两者为线性相关关系,继而进行

线性拟合,其拟合公式如下:

$$Y_1=4.264X_1+0.866 \quad R_1^2=0.889 \quad (2)$$

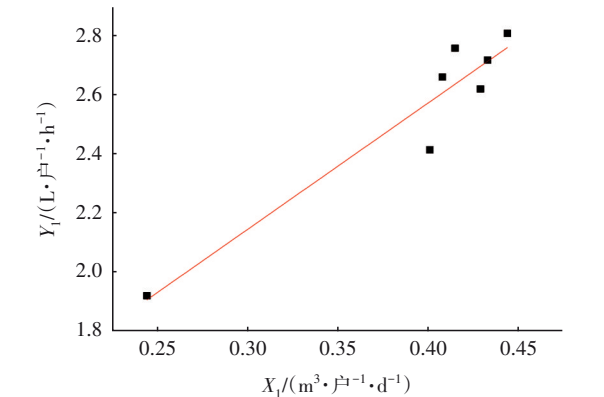


图1 居民户均合法用水量与户均合法夜间用水量的线性拟合

Fig.1 Linear fitting between average legitimate household water consumption and average legitimate household water consumption at night

采用  $t$  检验法对回归方程进行检验,显著性水平为 0.05。经过计算,  $|t_1|=6.518>t_{0.025}(5)=2.571$ 。根据  $t$  检验法的判定标准,可知  $Y_1$  关于  $X_1$  的回归效果显著,具有一定的实用价值。使用拟合方程对 7 个居民小区的数据进行估计,结果见表 4。

表 4 7 个居民小区户均合法夜间用水量的实测值与线性回归估计值

Tab.4 Actual value and linear regression estimation value of average legitimate household water consumption at night in seven residential communities

| 项 目    | 户均合法用水量实测值/<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{户}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ) | 户均合法夜间用水量实测值/<br>( $\text{L} \cdot \text{户}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 户均合法夜间用水量估计值/<br>( $\text{L} \cdot \text{户}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 相对误差/% |
|--------|---|---|---|--------|
| 世茂外滩花园 | 0.401   | 2.414   | 2.574   | -6.22  |
| 金域华府   | 0.429   | 2.620   | 2.693   | -2.71  |
| 正祥一品新筑 | 0.433   | 2.718   | 2.712   | 0.22   |
| 迎飞花园   | 0.444   | 2.808   | 2.759   | 1.78   |
| 世纪蓝景城  | 0.408   | 2.660   | 2.606   | 2.07   |
| 飞凤水岸   | 0.244   | 1.921   | 1.906   | 0.79   |
| 登云佳园   | 0.415   | 2.758   | 2.635   | 4.67   |

2.2.2 居民户均有效夜间用水量线性回归法

以各小区的实测居民户均有效夜间用水量与实测户均有效用水量为样本(见表 3),进行相关性分析。经过计算可得居民户均有效夜间用水量( $Y_2$ )

与户均有效用水量( $X_2$ )的  $r$  为 0.960,线性相关程度较高。假设两者为线性相关关系,继而进行线性拟合,结果如图 2 所示。

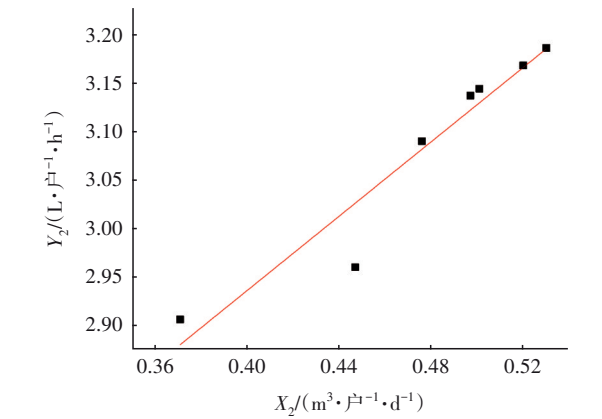


图2 居民户均有效用水量与户均有效夜间用水量的线性拟合

Fig.2 Linear fitting between average effective household water consumption and average effective household water consumption at night

其拟合公式如下:

$$Y_2=1.918X_2+2.168 \quad R_2^2=0.900 \quad (3)$$

经过计算,  $|t_2|=7.527>t_{0.025}(5)=2.571$ ,可知  $Y_2$  关于  $X_2$  的回归效果显著。使用拟合方程对 7 个居民小区的数据进行估计,结果见表 5。

表 5 7 个居民小区户均有效夜间用水量的实测值与线性回归估计值

Tab.5 Actual value and linear regression estimation value of average effective household water consumption at night in seven residential communities

| 项 目    | 户均有效用水量实测值/<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{户}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ) | 户均有效夜间用水量实测值/<br>( $\text{L} \cdot \text{户}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 户均有效夜间用水量估计值/<br>( $\text{L} \cdot \text{户}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 相对误差/% |
|--------|---|---|---|--------|
| 世茂外滩花园 | 0.530   | 3.186   | 3.184   | 0.06   |
| 金域华府   | 0.520   | 3.168   | 3.165   | 0.09   |
| 正祥一品新筑 | 0.501   | 3.144   | 3.129   | 0.48   |
| 迎飞花园   | 0.497   | 3.137   | 3.121   | 0.51   |
| 世纪蓝景城  | 0.476   | 3.090   | 3.081   | 0.29   |
| 飞凤水岸   | 0.371   | 2.906   | 2.880   | 0.90   |
| 登云佳园   | 0.447   | 2.960   | 3.026   | -2.18  |

夜间用水最小时段的用水量少,此时估算得出小区的漏损值接近真实的漏失量。因此,可采用该



回归公式作为户均有效夜间用水量的预测方法。

### 2.3 两种预测方法的对比

将样本总体平均值法得到的单一参数应用于不同居民小区时,部分小区夜间用水量的估计值与实测值之间差别很大,相对误差绝对值甚至达到20%以上,表明不同小区之间的户均夜间用水量有较大差异。因此采用总体平均值的单一参数去估算所有小区的夜间用水量时,会造成估计值与实测值之间误差过大。线性回归法则考虑了小区及用户之间的差别,7个抽样居民小区户均合法夜间用水量的相对误差绝对值均在7%以内,整体误差范围小;7个抽样居民小区户均有效夜间用水量的相对误差绝对值均在3%以内,整体误差范围更小。因此,线性回归法是一种具有小区识别功能的夜间用水量预测方法。

### 2.4 线性回归预测方法准确性的验证

7个居民小区户均合法用水量与户均合法夜间用水量、户均有效用水量与户均有效夜间用水量的线性回归效果显著,线性回归法在7个小区的估算精度良好。为进一步检验这种预测方法在其他小区推广时是否仍具有普适性,调取其他3个户数规模不等的安装NB智能户表的居民小区为样本,对线性回归公式进行验证。户均合法用水量、户均合法夜间用水量、户均有效用水量和户均有效夜间用水量均为全年平均值,计算结果见表6。

表6 3个居民小区户均夜间用水量线性回归法的验证

Tab.6 Verification of linear regression method for average household water consumption at night in other three residential communities

| 项目   | 合法用水  |   |   |        | 有效用水  |   |   |        |
|------|---|---|---|--------|---|---|---|--------|
|      | 户均合法用水量实测值/( $\text{m}^3 \cdot \text{户}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ) | 户均合法夜间用水量实测值/( $\text{L} \cdot \text{户}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 户均合法夜间用水量估计值/( $\text{L} \cdot \text{户}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 相对误差/% | 户均有效用水量实测值/( $\text{m}^3 \cdot \text{户}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ) | 户均有效夜间用水量实测值/( $\text{L} \cdot \text{户}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 户均有效夜间用水量估计值/( $\text{L} \cdot \text{户}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 相对误差/% |
| 永南佳园 | 0.378   | 2.700   | 2.478   | 8.96   | 0.427   | 3.034   | 2.987   | 1.57   |
| 骏夷花园 | 0.428   | 2.462   | 2.691   | -8.51  | 0.495   | 2.848   | 3.117   | -8.63  |
| 金浦小区 | 0.358   | 2.470   | 2.394   | 3.17   | 0.424   | 2.916   | 2.980   | -2.15  |

由表6可知,3个小区的相对误差绝对值均在9%以内,整体准确性较高,表明采用线性回归法预

测合法夜间用水量和有效夜间用水量,具有一定的普适性。

### 3 结论

① 采用总体平均值法计算得出抽样小区的户均合法夜间用水量为 $2.557 \text{ L}/(\text{户} \cdot \text{h})$ ,户均有效夜间用水量为 $3.084 \text{ L}/(\text{户} \cdot \text{h})$ 。由于居住小区之间的户均合法夜间用水量和户均有效夜间用水量存在比较大的差异,采用样本总体平均值单一参数进行预测时,部分小区夜间用水量的估计值与实测值之间存在很大误差,影响漏损的量化水平。

② 对抽样小区的户均合法用水量和户均合法夜间用水量、户均有效用水量和户均有效夜间用水量之间进行线性拟合分析,均表现出显著的回归效果;抽取其他3个小区的夜间用水量对回归方程进行验证,呈现普适性特点。因此,采用回归方程可以较为准确地预测福州市居民的夜间用水量,进而可以用于预测推算未装智能远传水表的DMA小区的夜间用水量,为小区漏损量化提供科学依据。

### 参考文献:

- [1] 马金锋,陈求稳,徐强,等. DMA漏损控制大数据处理模式[J]. 中国给水排水, 2019, 35(10): 36-41.  
MA Jinfeng, CHEN Qiuwen, XU Qiang, et al. Big data processing mode for district metered area leakage control [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(10): 36-41 (in Chinese).
- [2] 姜遍地,陈博. 浅谈大数据在供水管网漏损控制中的应用[J]. 测绘通报, 2016(S1): 216-217, 230.  
JIANG Biandi, CHEN Bo. Introduction to big data in the application of the water supply pipe network leakage control [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016 (S1): 216-217, 230 (in Chinese).
- [3] 徐强,张佳欣,王莹,等. 智慧水务背景下的供水管网漏损控制研究进展[J]. 环境科学学报, 2020, 40 (12): 4234-4239.  
XU Qiang, ZHANG Jiaxin, WANG Ying, et al. Research progress on water loss control of distribution networks under smart water supply conditions [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40 (12): 4234-4239 (in Chinese).
- [4] 董驹萍,吴珊,陈鹏,等. 供水管网独立计量区域管理数据库系统开发[J]. 给水排水, 2015, 41(7): 103-107.  
DONG Juping, WU Shan, CHEN Peng, et al.

- Development of district metering area (DMA) databank system for water supply network [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, 41 (7): 103-107 (in Chinese).
- [5] ZHOU X, TANG Z, XU W, *et al.* Deep learning identifies accurate burst locations in water distribution networks[J]. *Water Research*, 2019, 166: 115058.
- [6] 李斌, 张国力, 聂锦旭, 等. 给水管网DMA优化分区方法研究综述[J]. *广东工业大学学报*, 2018, 35 (2): 19-27.
- LI Bin, ZHANG Guoli, NIE Jinxu, *et al.* An overview of optimized DMA zonal methods in water distribution system [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2018, 35(2): 19-27(in Chinese).
- [7] 李岚, 吴珊, 寇晓霞, 等. 基于独立计量区的夜间最小流量的研究进展[J]. *给水排水*, 2018, 44(6): 135-141.
- LI Lan, WU Shan, KOU Xiaoxia, *et al.* Research progress of minimum night flow based on district metering area [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 44(6): 135-141(in Chinese).
- [8] 张一凡, 崔建国, 张峰, 等. 物联网和云计算下的城市供水管网漏损控制系统设计[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(1): 34-40.
- ZHANG Yifan, CUI Jianguo, ZHANG Feng, *et al.* Design of leakage control system for urban water supply network using Internet of Things and cloud computing [J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2019, 40(1): 34-40 (in Chinese).
- [9] 周世年, 龚元明. 基于窄带物联网的水务管网参数监测系统设计[J]. *软件工程*, 2021, 24(5): 51-55.
- ZHOU Shinian, GONG Yuanming. Design of water pipeline network parameter monitoring system based on narrow band Internet of Things [J]. *Software Engineering*, 2021, 24(5): 51-55(in Chinese).
- [10] PEARSON D. Standard Definitions for Water Losses [M]. London: IWA Publishing, 2019.
- [11] 李建宇, 高金良, 乔怡超. 结合夜间最小流量法的减压阀经济效益模型[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(8): 55-59.
- LI Jianyu, GAO Jinliang, QIAO Yichao. Economic benefit model of reducing valve by minimum night flow [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49 (8): 55-59(in Chinese).
- [12] 江永伟, 杨奇, 王海涛, 等. 小区漏损预警中最小夜间流量法的改进与应用[J]. *浙江水利水电学院学报*, 2020, 32(1): 68-71, 90.
- JIANG Yongwei, YANG Qi, WANG Haitao, *et al.* Application of improved minimum night flow method in residential community leakage detection [J]. *Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power*, 2020, 32(1): 68-71, 90(in Chinese).
- [13] 刘晓飞, 刘肃, 何元春, 等. 广州市小区居民夜间合法用水量研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(9): 45-48, 52.
- LIU Xiaofei, LIU Su, HE Yuanchun, *et al.* Analysis of residential nighttime water consumption in Guangzhou [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(9): 45-48, 52(in Chinese).
- [14] 马啸, 李露. 基于线性回归法预测南方居民夜间合法用水量研究[J]. *给水排水*, 2018, 44(2): 87-93.
- MA Xiao, LI Lu. Prediction of nighttime water consumption by residents in southern China based on linear regression method [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 44(2): 87-93(in Chinese).

作者简介:许兴中(1975- ),男,福建德化人,硕士,高级工程师,主要研究方向为供水设施建设、运行与管理。

E-mail:jskxxz@sina.com

收稿日期:2022-05-30

修回日期:2022-09-13

(编辑:沈靖怡)