

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.13.008

# 基于产销差和营销数据的节点流量分配方法研究

王彤<sup>1</sup>, 张苗<sup>1</sup>, 张艳军<sup>1</sup>, 张春生<sup>2,3</sup>, 杨军<sup>1</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 3. 中冶南方工程技术有限公司, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 为了解决供水管网水力模型节点流量分配不准确的问题,基于J市供水管网水力建模项目提出新的节点流量分配方法,此方法先根据营业收费数据将供水区域划分区块,再利用GIS技术,采用“水表上溯”法找出用水量节点,该流量分配方法中的节点流量是营销节点流量和产销差节点流量之和。营销节点流量通过营销数据确定;在各个供水区域分别采用传统沿线流量法和人口密度法分配节点产销差流量。结果表明,两种方法所分配的节点流量都可满足流量监测点误差以及测压点相对误差要求,对比后发现应用人口密度法进行流量分配计算时,模型精度更高。

**关键词:** 供水管网模型; 节点流量分配; 产销差; 营销数据

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)13-0044-06

## Distribution Method of Node Flow Based on Non-revenue Water and Business Sales Data

WANG Tong<sup>1</sup>, ZHANG Miao<sup>1</sup>, ZHANG Yan-jun<sup>1</sup>, ZHANG Chun-sheng<sup>2,3</sup>, YANG Jun<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. WISDRI, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of inaccurate node flow distribution of water supply network hydraulic model, a new node flow distribution method based on a water supply network hydraulic modeling project in J city was proposed. This method first divided the water supply area according to the business sales data, and adopted GIS technology to find the water consumption node by using the “water meter up-tracking” method. Node flow in the allocation method was the sum of the business scales node flow and the non-revenue water node flow. Business scales node flow was determined by business scales data. The traditional linear flow method and the population density method were used to distribute the difference between the production and sales of the nodes in each water supply area. The node flow rate assigned by the two methods could meet the requirements of flow monitoring point error and pressure measuring point relative error. After comparison, it was found that the model accuracy was higher when the population density method was applied for the flow distribution calculation.

**Key words:** water supply network model; node flow distribution; non-revenue water (NRW); business sales data

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07406-003)

通信作者: 张春生 E-mail: 940054730@qq.com

目前国内关于供水管网水力计算方法的理论研究已经相当完善了,但在实际工程应用中效果却不太理想,一个重要的原因就是节点流量分配不够准确。在供水管网建模过程中对每个节点的需求估计和分配是管网建模的重要步骤,为了加快设计规程,通过计算机编程的方法,流量分配方法逐渐从人工分配发展到自动分配。然而节点流量分配不准确,会导致供水管网的微观水力模型不能准确反映实际管网运行工况<sup>[1]</sup>。为了求得更精确的计算结果,许多学者对节点流量分配方法进行了研究。陈凌等<sup>[2]</sup>通过供水管网 GIS 中的“水表上溯”来定位水力模型中的用水节点。尽管不同的节点流量分配方法在一定程度上提高了节点流量分配的准确度,但在节点流量分配时未考虑产销差水量(简称 NRW<sup>[3]</sup>),从而使得计算结果不能准确反映出厂水的分配情况;王俊良等<sup>[4]</sup>将泄漏—压力的关系与耗水量—压力的函数相结合(两者相加),得到由压力驱动力的节点流量,并结合遗传算法对其进行了优化,因此获得了更接近管网实际工作状态的节点压力和流量。王焯等<sup>[5]</sup>鉴于 GIS 系统的不完善,首先根据业务抄表方法划分区块,然后在区块内利用比流量法分配节点流量。

笔者在前人研究的基础上,对供水管网建模中的一些过程进行了创新。针对供水管网水力模型节点流量分配不准确的问题,结合比较成熟的 GIS 技术<sup>[6]</sup>,在 EPANET 软件上建立管网水力模型,添加节点流量分配模块,实现模型管网流量初分功能。节点水量分为两部分,第一部分是营销节点流量,应用 GIS 水表层,从水表直接获得;另一部分是产销差节点流量,分别采用沿线流量法和人口密度法将产销差水量分配到区块内节点上。现以 J 市供水管网为例,阐述了在建立供水管网微观水力模拟系统的过程中,基于 GIS、营销收费数据库以及产销差水量数据库进行节点流量分配的计算方法,并验证了考虑产销差水量后的模型精度和实际应用效果。

## 1 营销节点流量的计算

### 1.1 用户用水类型及其逐时变化系数的确定

统计营业收费数据库中的用水类型。针对各种用水类型,分别采用现场试验测试确定各种用水类型的逐时变化系数。若用水类型过多,将用水量较少的用水类型合并,每种用水类型有节假日、工作日之分。每种用水类型选择 3~5 个代表用户进行测试,

并将各个代表用户的变化系数求平均值。测试方法:采用远程自动记录水表,每 1 h 记录 1 次累计流量,连续测量 24 h,然后求出每小时的用水量。根据数据处理结果,绘制用户用水量变化曲线。

$$K_{ij} = \frac{24Q_{ij}}{Q_i} \quad (1)$$

式中: $K_{ij}$ 为第  $i$  类用水类型在第  $j$  时的变化系数; $Q_{ij}$ 为第  $i$  类用水类型在第  $j$  时的用水量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $Q_i$ 为第  $i$  类用水类型的 24 h 累计水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ 。

### 1.2 定位用水节点

J 市已经有相当完整的供水管网 GIS 图,可以采用“水表上溯”方法定位用水节点。首先将末端小口径管线的水表上溯到相邻上游大口径管线上,删除末端管线和节点,然后逐级上溯直至遇到 DN200 以上的管线为止,并将水表转移到所遇到的第 1 个 DN200 以上管线的节点上,然后统计用水节点的各种用水类型及其用水量。确定了用水节点对应的水表和逐时变化系数后,就可以根据营业收费数据计算节点用水量。营销节点流量包括节点上各种用水类型的流量。

## 2 产销差部分节点流量的初分

由于漏失、计量有误等问题,使得分配到节点的营销节点流量之和并不等于水厂出厂水量,其差值就是产销差。为了使节点分配符合实际情况,需要将产销差这部分流量分配到模型中的各个节点上。以下采用沿线流量法和人口密度法将产销差流量分配到管网各个节点上。将 J 市的供水管网根据各个营销公司的供水范围,分成 24 个计算产销差区域,分别计算各个区域的产销差。

### 2.1 传统沿线流量法分配产销差流量

假定用水量均匀分布在全部干管上,由此算出单位管线长度的比流量:

$$q_s = \frac{Q}{\sum l} \quad (2)$$

式中: $Q$ 为区域内的产销差水量,  $\text{L/s}$ ;  $\sum l$ 为区域内的干管当量总长度(不包括穿越广场、公园等无建筑物地区的管线;只有一侧配水的管线,当量长度按一半计算),  $\text{m}$ ;  $q_s$ 为区域内比流量,  $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。

根据比流量求出各管段的沿线流量:

$$q_{li} = q_s \times l_i \quad (3)$$

式中: $q_{li}$ 为管段  $i$  的沿线流量,  $\text{L/s}$ ;  $l_i$ 为管段  $i$  的当量长度,  $\text{m}$ 。

从沿线流量折算得出节点流量:

$$q_i = 0.5 \times \sum_{j=1}^N q_{ij} \quad (4)$$

式中:  $q_i$  为节点  $i$  的产销差流量,  $L/s$ ;  $N$  是与节点  $i$  相连的管段数;  $q_{ij}$  是与节点  $i$  相连的第  $j$  个管段的沿线流量,  $L/(s \cdot m)$ 。

## 2.2 人口密度法分配产销差流量

以区为单位计算各个区的比流量:

$$q_a = \frac{\sum q + A \times P \times Q_p}{\sum l} \quad (5)$$

式中:  $q_a$  为区域内的比流量,  $L/(s \cdot m)$ ;  $\sum q$  为区域内各大用户总用水量,  $L/s$ ;  $A$  为区域内的面积,  $m^2$ ;  $P$  为区域内的人口密度,  $人/m^2$ ;  $Q_p$  为区域内的人口平均用水量标准,  $L/(人 \cdot s)$ ;  $\sum l$  为区域内周围所规划管线的总长度 ( $m$ ), 在四周均有管线时, 管线总长度即为区域周长。

区域所赋予该区周围  $L$  管线 (长度为  $l$ ) 的沿线流量如下:

$$Q_l = \sum (q_a \times l) \quad (6)$$

式中:  $Q_l$  为区域内的沿线流量之和,  $L/s$ ;  $l$  为区域内的管线长度,  $m$ 。

从沿线流量折算得出节点流量:

$$q_i = 0.5 \times \sum Q_l \quad (7)$$

式中:  $q_i$  为节点  $i$  的产销差流量,  $L/s$ ;  $Q_l$  为区域内的沿线流量之和,  $L/s$ 。

即任意一节点的产销差节点流量等于与该节点相连各管段沿线流量总和的一半。各节点分配的节点流量是营销节点流量和产销差节点流量之和。

## 2.3 节点产销差计算源程序

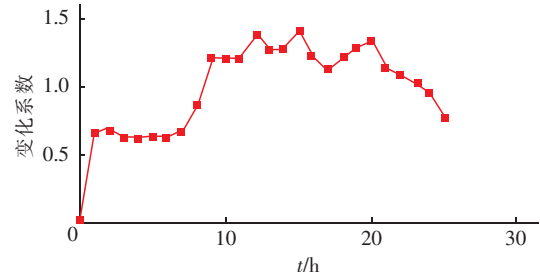
在 EPANET 软件上开发新的模块, 增加管网节点流量分配功能 (限于篇幅, 节点产销差分配的源程序不再列出)。

## 3 实例应用

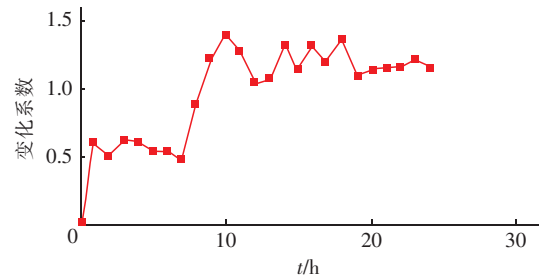
J 市已经有相当完备的 GIS 水表层, 采用“水表上溯”法, 求出整个管网的节点用水类型及平均时用水量。J 市有加压泵站、水厂共 28 个, 将整个管网按营销公司分成 24 个区块, 每个区块的产销差可以通过出加压站或者水厂的供水量与销售水量之差求得。各区域的平均时产销差水量如下: 板桥区域为  $719.93 m^3/h$ 、甸柳庄区域为  $246.21 m^3/h$ 、分水岭建设路区域为  $330.08 m^3/h$ 、解放桥区域为  $106 m^3/h$ 、金鸡岭区域为  $193.52 m^3/h$ 、老新辛庄区域为  $1265.53 m^3/h$ 、历南区域为  $455.37 m^3/h$ 、领秀城区

域为  $510.56 m^3/h$ 、七贤区域为  $122.24 m^3/h$ 、千佛山区域为  $379.42 m^3/h$ 、鹊华玉清八里桥区域为  $3869.8 m^3/h$ 、奥体区域为  $231.62 m^3/h$ 、白泉区域为  $235.23 m^3/h$ 、板桥东片区域为  $768.75 m^3/h$ 、东片区区域为  $202.82 m^3/h$ 、二环东路东源区域为  $142.88 m^3/h$ 、官庄区域为  $57.08 m^3/h$ 、刘智远区域为  $144.11 m^3/h$ 、龙洞北区域为  $153.31 m^3/h$ 、名士豪庭区域为  $78.88 m^3/h$ 、牛旺区域为  $75.26 m^3/h$ 、七里河区域为  $56.06 m^3/h$ 、千佛山东片区域为  $97.11 m^3/h$ 、雪山区域为  $112.34 m^3/h$ 。

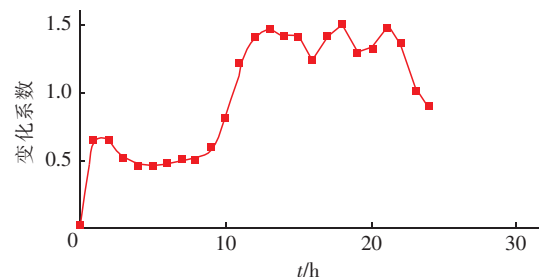
J 市的营业收费数据库中包含了 18 种简号, 代表了 18 种用水类型。为了降低用户类型对现场测试工作量的增加, 以及对节点流量计算精度的影响, 根据用户用水规律的相似程度, 将用户类型进行一定程度的合并。合并后的用户用水类型有居民、办公、学校、商业等等, 并且每种用水类型有节假日、工作日之分。各种用水类型的用水变化系数通过现场实测法求解, 求解后的部分用水类型的变化系数如图 1 所示。



a. 办公类用水变化系数



b. 服务类用水变化系数



c. 居民类用水变化系数

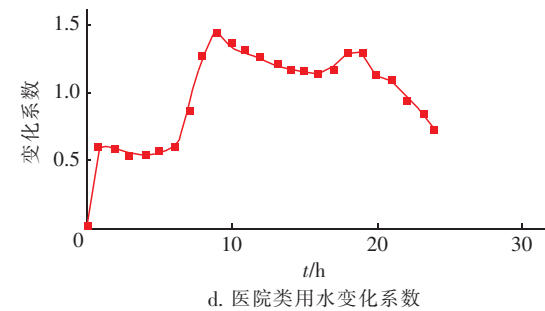


图 1 部分用水类型的变化系数

Fig. 1 Variation coefficient in water use for some water use types

经过上述两种算法分配流量后,通过 EPANET 软件对初分结果进行管网水力平差计算,得到模型平差结果。将平差结果中的节点水压、流量与实际压力监测点和流量监测点的数据进行对比分析,通过计算得到各个流量监测点和压力监测点的压力误差。利用传统比流量法分配流量时 J 市流量监测点的流量误差见表 1;利用人口密度法分配流量时 J 市流量监测点的流量误差见表 2;利用传统比流量法分配流量时实际压力监测点与模拟压力值的误差以及利用人口密度法分配流量时实际压力监测点与模拟压力值的误差见表 3。

表 1 传统比流量法分配流量时 J 市流量监测点的流量误差

Tab. 1 Relative error of J city node flow with traditional specific flow method used to distribute flow %

流量监测点位置	相对误差						平均相对误差
	00:00	08:00	12:00	16:00	20:00	24:00	
1 板桥清水池	1.271	0.674	0.133	0.508	0.100	0.065	0.458
2 甸柳庄清水池	5.639	3.476	3.23	3.202	3.239	3.552	3.723
3 千佛山清水池	0.002	0.000 4	0.000 2	0.001	0.000 5	0.004	0.001
4 名士豪庭加压站清水池	5.995	8.078	9.028	7.745	10.612	-6.447	7.984
5 舜雅路加压站清水池	1.774	0.577	0.678	0.389	0.188	0.679	0.714
6 七里河加压站清水池	2.490	1.24	1.055	3.431	1.360	2.269	1.974
7 白泉水厂	0.015	0.006	0.005	0.899	0.005	0.025	0.159
8 官庄水厂	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.008	0.003
9 二环东路加压站清水池	0.252	2.122	2.700	0.002	3.519	6.696	2.548
10 龙洞北加压站清水池	0.326	0.327	0.236	1.812	0.135	0.114	0.492
11 东源加压站清水池	0.032	4.159	3.477	0.236	1.692	4.407	2.334
12 雪山水厂	9.617	4.139	7.451	4.263	8.465	9.219	7.192
13 牛旺水厂	2.606	1.028	2.928	2.496	2.920	0.758	2.123
14 奥体加压站清水池	5.679	0.776	1.273	0.907	2.34	4.631	2.601
15 历南清水池	0.001	0.000 3	0.000 2	0.000 4	0.000 2	0.002	0.000 6
16 金鸡岭清水池	0.002	0.000 8	0.000 8	0.000 9	0.001	0.000 6	0.001
17 东片区加压站清水池	0.011	0.010	0.168	0.169	0.259	0.229	0.141
18 解放桥清水池	2.974	1.376	1.244	1.428	1.110	1.780	1.651
19 领秀城清水池	0	0	0.000 4	0	0.000 2	0.003	0.000 7
20 七贤清水池	0.023	0.000 4	0.003	0.000 06	0.003	0.030	0.010
21 新辛庄清水池	1.857	5.793	0.056	3.013	3.734	1.382	2.639

表 2 人口密度法分配流量时 J 市流量监测点的流量误差

Tab. 2 Relative error of J city node flow with population density method used to distribute flow %

流量监测点位置	相对误差						平均相对误差
	00:00	08:00	12:00	16:00	20:00	24:00	
1 板桥清水池	1.03	0.42	0.21	0.370	0.134	0.04	0.368
2 甸柳庄清水池	4.37	3.21	3.29	3.100	2.857	2.16	3.165
3 千佛山清水池	0.01	0	0	0.001	0	0	0.002
4 名士豪庭加压站清水池	5.21	7.36	7.49	7.826	8.573	-3.95	6.735
5 舜雅路加压站清水池	1.25	0.38	0.72	0.277	0.105	0.82	0.592
6 七里河加压站清水池	2.21	1.05	1.20	3.001	1.176	2.05	1.781



续表 2 (Continued)

流量监测点位置	相对误差						平均相对误差
	00:00	08:00	12:00	16:00	20:00	24:00	
7 白泉水厂	0	0	0.01	0.631	0.002	0.03	0.112
8 官庄水厂	0	0	0	0.001	0.002	0	0.001
9 二环东路加压站清水池	0.34	2.05	1.89	0.004	2.782	6.04	2.184
10 龙洞北加压站清水池	0.31	0.32	0.18	1.625	0.114	0.09	0.440
11 东源加压站清水池	0	5.24	3.02	0.156	0.937	3.80	2.192
12 雪山水厂	10.35	2.46	5.23	3.176	7.135	8.50	6.142
13 牛旺水厂	1.81	1.03	2.92	2.732	1.765	0.84	1.850
14 奥体加压站清水池	4.87	0.68	3.21	1.251	2.790	4.71	2.919
15 历南清水池	0	0	0	0	0	0	0
16 金鸡岭清水池	0	0	0.01	0.001	0.004	0	0.002
17 东片区加压站清水池	0.01	0.01	0.25	0.076	0.283	0.17	0.133
18 解放桥清水池	3.58	0.88	1.02	1.156	0.460	1.19	1.381
19 领秀城清水池	0.01	0	0.01	0	0	0	0.003
20 七贤清水池	0.02	0	0	0	0	0.02	0.007
21 新辛庄清水池	1.85	4.52	0.02	4.152	2.103	0.51	2.193

表 3 传统比流量法和人口密度法分配流量时 J 市测压点相对误差

Tab. 3 Relative error of pressure in J city with traditional specific flow method and population density method used to distribute flow %

测压点位置	传统比流量法						人口密度法					
	相对误差					平均相对误差	相对误差					平均相对误差
	00:00	08:00	12:00	16:00	20:00		00:00	08:00	12:00	16:00	20:00	
1 竹园馨居	-3.81	2.83	3.82	-0.32	3.68	2.892	-2.87	4.26	3.93	0.15	3.20	2.882
2 经十一路	-1.29	-3.79	-1.47	-3.72	-3.99	3.052	-1.78	-3.72	-2.14	-4.56	-3.87	3.214
3 环山路	-0.56	-1.96	0.21	-0.34	0.60	0.734	-0.15	1.24	-0.38	1.59	0.90	0.852
4 邦泰绿苑	-1.16	-1.53	0.01	-0.68	0.18	0.712	-1.21	-1.83	-0.05	-1.72	1.01	1.164
5 省中医东院	2.05	-1.23	0.33	-2.20	-0.15	1.192	3.17	1.56	-0.98	0.27	-0.07	1.210
6 回民小区	-1.12	1.66	0.68	-1.87	-1.30	1.326	-0.95	1.32	0.37	-1.51	1.02	1.034
7 济南宾馆	1.09	1.54	1.73	0.27	0.87	1.100	1.78	2.17	1.96	-0.35	0.99	1.450
8 御园小区	0.83	0.29	0.13	-1.48	0.50	0.646	0.99	0.21	0.39	-1.46	1.20	0.850
9 白马山南路	-1.21	-0.99	0.15	-0.67	-0.31	0.666	-1.35	-0.97	-0.23	0.89	-0.66	0.820
10 山大南校区	2.49	-0.95	0.28	1.34	1.43	1.298	2.15	-1.04	0.21	1.39	0.24	1.006
11 西苑小区	-1.27	0.35	0.74	-1.38	0.16	0.780	-1.36	0.47	1.23	-2.01	0.04	1.022
12 天桥区检察院	-2.19	0.42	0.50	-2.13	0.25	1.098	-3.05	-0.68	0.70	2.19	1.03	1.530
13 省委党校	-3.85	-1.35	1.30	-3.45	-2.55	2.500	-3.71	-0.89	1.00	-2.58	2.13	2.062
14 河务局宿舍	-2.81	2.89	0.88	-0.26	0.64	1.496	2.57	-2.05	1.02	-0.10	0.03	1.154
15 历下房管所	-0.55	2.57	3.97	-3.05	1.80	2.388	0.74	-1.35	-2.56	-3.03	1.53	1.842
16 天桥营业所	-3.33	0.91	-0.81	-3.53	-0.93	3.902	-3.01	-0.82	0.70	-4.10	-0.17	1.760
17 女子学院	0.04	0.20	2.01	-0.15	-0.36	0.552	-0.01	0.10	1.82	0.05	-0.41	0.478
18 职业学校	3.98	1.14	0.10	5.43	2.38	2.666	4.25	1.04	0.01	3.20	1.85	2.070
19 二七南路	-1.94	1.94	3.97	1.49	-0.30	1.928	1.82	-1.65	3.47	1.29	-0.27	1.700
20 经一路	0.33	2.09	0.96	0.85	-0.42	0.930	0.58	2.01	-0.71	0.82	-0.22	0.868

结合模型模拟结果对两种方法所产生的流量误差值和测压点误差值进行对比,如图 2 所示。结果显示,J 市水力模型的流量、压力校验是成功的,证

明两种节点流量的分配方法都符合实际情况,并且应用人口密度法与 GIS 系统相结合进行流量分配计算时,模型精度更高。原因在于:①利用了 GIS 技

术,采用“水表上溯”法来定位用水节点,比利用街区、带门牌号的市政图人工选定用水节点的方法要准确,避免了以往用水节点确定的盲目性;②利用营业收费数据库确定已知的节点流量与区域产销差流量的节点分配,分配方法更符合实际情况;③用水类型的时变化系数采用现场测试确定,避免了人为主观性的影响,从而最大程度地提高了节点流量计算的准确度;④人口密度法考虑了人口分布的不均匀性,从而提高了供水可靠性和高效性。

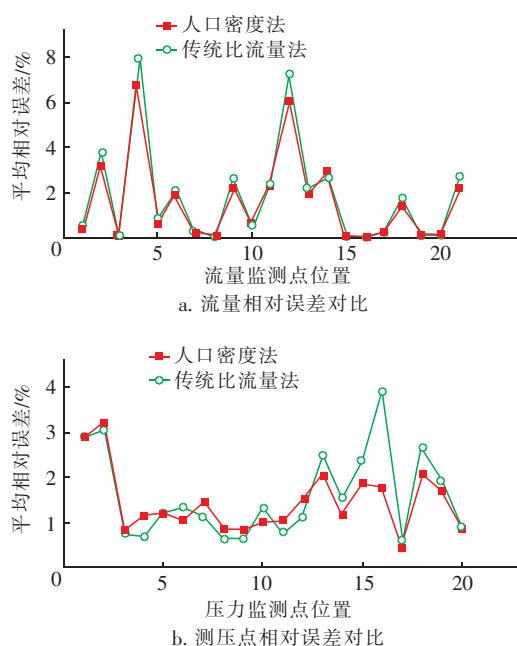


图2 传统比流量法与人口密度法的相对误差对比

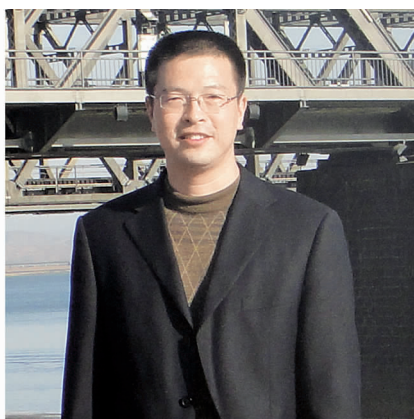
Fig. 2 Comparison of relative error between traditional specific flow method and population density method

#### 4 结论

提出的水量分配方法提高了供水管网模型精度,大大拓宽了管网平差的应用范围和利用深度,能准确地掌握管网的真实工况。通过对两种方法建模结果的比较得出,人口密度法更加可靠和实用;此外,该方法有利于实现水力模型和供水管网GIS的无缝连接,便于供水企业实现信息化统一管理。

#### 参考文献:

- [1] Ates S. Hydraulic modelling of closed pipes in loop equations of water distribution networks [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, 40(2): 966–983.
- [2] 陈凌,刘遂庆,陈宇辉. 城市供水管网实时水力模拟节点流量的计算[J]. *给水排水*, 2006, 32(10): 106–110.
- [3] Kanakoudis V, Gonelas K. Forecasting the residential water demand, balancing full water cost pricing and non-revenue water reduction policies [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 89: 958–966.
- [4] 王俊良,李娜娜,高金良,等. 基于压力驱动节点流量模型的供水管网漏失控制[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(13): 106–108.
- [5] 王焯,蒋白懿,张志磊,等. 供水管网水力建模节点流量分配方法研究[J]. *供水技术*, 2014, 8(6): 25–28.
- [6] 郝银霞,任乃宾. 基于GIS系统的给水管网信息系统之管见[J]. *中国建设信息*, 2010(6): 66–69.



作者简介:王彤(1965–),男,陕西汉中,人,硕士,副教授,硕导,主要从事给排水系统优化的科研与教学工作。

E-mail: 894496318@qq.com

收稿日期: 2019-04-10