

# 城市供水管网实时水力模拟节点流量的计算

陈 凌<sup>1</sup> 刘遂庆<sup>1</sup> 陈宇辉<sup>2</sup>

(1 同济大学污染控制与资源化研究重点实验室, 上海 200092; 2 宁波大学建筑工程与环境学院, 宁波 315211)

**摘要** 为解决供水管网实时水力模型节点流量计算不准确的问题, 提出了一种计算节点流量的方法。该方法通过供水管网 GIS 中的“水表上溯”来定位水力模型中的用水节点; 通过营业收费数据来确定节点的平均用水量; 通过现场测试和主成分分析法确定了 19 种用户类型及其用水变化曲线。同现有其他方法相比, 其定位更准确, 流量分配更符合实际情况, 使大型城市供水管网水力实时在线模拟成为可能。

**关键词** 供水管网 实时水力模型 水表上溯 营业收费数据 主成分分析 用水变化曲线

## Calculation of node water flow in real-time hydraulic model of urban water supply network

Chen Ling<sup>1</sup>, Liu Sui-qing<sup>1</sup>, Chen Yu-hui<sup>2</sup>

(1. State Key Lab of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Faculty of Architectural Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** This paper presents a better method to determine node-flow in hydraulic model of urban water supply network. The node-flow in the model should be traced by means of “meter tracing” method in water supply network GIS, and the average node-flow could be calculated on the base of systematic database of water sale charges. 19 kinds of water users and its daily water consumption variance curves were classified by field survey and the main composition factor approach. Contrast to other existing water-demand computing methods, this method has advantages of accurate orientation and node-flow calculation, which make it possible to realize real-time simulation of large-scale urban water supply network.

**Keywords:** Water supply network; Real-time hydraulic model; Meter tracing; Customer billing records; Main composition factor approach; Water consumption variance curve

尽管水力计算方法已经相当成熟,但在实际工程中的应用效果不甚理想,笔者认为节点流量计算不准确是导致水力模型不能反映实际管网工况的一个最重要的原因。

传统的给水管网流量计算方法主要采用比流量分配法,其缺陷十分明显。为了求得更精确的计算结果,许多学者都对节点流量分配的方法进行了研究和改进。杨玉奎等<sup>[1]</sup>借助 GIS 技术按照各个街区

的实际用水情况来计算各个街区的比流量,在此基础上确定各区的沿线流量,使得出节点流量尽量接近于实际;杜晓明等<sup>[2]</sup>利用营业收费数据,将供水区域分块,并在每个块中找出一个具有代表性的节点,作为块用水量节点;赫宗天<sup>[3]</sup>试图按配水管线图 and 带门牌号码的市街图确定每个枝管的位置,结合水费管理数据建立管网平差节点流量的自动采集系统。尽管他们的研究不同程度地提高了节点流量分配的准确度,但在确定节点流量的位置、大小以及时变化系数等方面仍存在一定距离。

国家自然科学基金资助项目(50409016)。

实时水力模拟的基本方法是以管网水力平差计算原理为基础,将分时段变化的用水量作为动态变量,对不同时段的管网运行状态进行计算模拟,在每个分段时间里认为工况不变<sup>[4]</sup>。笔者以上海市自来水市北有限公司(以下简称“市北公司”)供水管网为例,阐述了在建立供水管网水力实时模拟系统的过程中,基于 GIS 和营业收费数据库进行节点流量计算的方法。

### 1 用水节点定位

市北公司已经建立了较为完善的供水管网 GIS(以下简称“市北 GIS”),其中包括 DN75 以上管线总长度逾 3 000 km,客户水表数 130 余万只,因此可以根据水表位置用递归原理确定用水节点<sup>[5]</sup>。对给水管网结构分析可知,供水管网类似于一条内陆河,因此大部分情况下可以通过管径确定供水管网的方向,即对某条具体管段来说,相邻大口径管段为上游管段,相邻小口径管段为下游管段,下游逆向上游的过程称为“上溯”。在市北公司供水管网 GIS 中,水表一般位于末端管网 DN100 以下的小口径管段上,而需要建立的水力模型只包括 DN300 以上管段,因此建模时在管网简化过程中需要根据 GIS 中水表的位置重新定位用水节点。

以市北 GIS 为例,用水节点重新定位的步骤如下:①先把水表由末端小口径管线上溯到相邻上游大口径管线上,然后删除末端管线和节点;②按步骤①把水表信息逐级上溯,直至遇到 DN300 以上的管线为止,并将水表转移到所遇到的第一个 DN300 以上管线的节点上去;③如果在水表逐级上溯的过程中遇到由 DN300 以下的管线组成的环,即有两条以上上溯路径,优先选择管径较大的管线上溯;如果管径皆相等,任意选择一条上溯路径。这种采用递归上溯原理定位用水节点的过程即称为“水表上溯”。该方法在管网简化中最大程度地保证了节点流量的分配和实际情况一致。

## 2 用户分类和时段变化系数 $K$ 值的确定

### 2.1 用户初分类

市北公司供水系统营业收费数据库中包括了约 100 种简号,代表了约 100 种用水户类型。过多的用户类型会大大增加现场测试的工作量,也无助于节点流量计算精度的提高。因此必须结合营业收费

数据进行现场调查,根据用户用水规律的相似程度予以合并,如居民、办公、学校、商业等等。同时必须考虑用水大户等特性行业,例如工业企业按照其工作规律分别归并入一班制、二班制或三班制工业,但考虑到钢铁、纺织、医药、电子、食品饮料、塑料、陶瓷等行业的特殊性质,将它们独立划分出来作为特殊的用户类型。初分类的结果是保留了 40 种用水类型。

### 2.2 现场测试

根据初分类的结果选择代表性用户进行考察,考察的因素包括:规模、是否为封闭的用水区域、是否有集中水表、有几条进水管、属于单月收费还是双月收费等。对于居民小区,还必须考察小区的使用年份、是否有小区泵站、是否有屋顶水箱等因素;对于非居民大用户,还必须考察用户的类型、工作制度、是否有储水池、是否存在馈水(分包用水)等因素。每种用水类型选择了 3~5 个代表用户进行测试。测试的方法是:采用远程自动记录水表,每 15 min 记录一次累加流量,连续测定 7 d。用远传流量计算  $K$  值见式(1):

$$K_i = \frac{Q_i}{\sum q_m / N} = \frac{(V_i / T_i)}{\sum q_m / N} \quad i=1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

式中  $K_i$ ——用户  $i$  时段的流量变化系数,如果检测了多天应取平均值;

$V_i$ —— $i$  时段测得的用水量, L;

$T_i$ ——测量周期,取 900 s;

$\sum q_m$ ——这个测点检测日累计用水量之和, L;

$N$ ——检测日检测时段数,取 96 时段。

### 2.3 数据处理

数据处理分为两步:

(1) 首先对同类型用户测试数据进行相关性回归分析,剔除部分相关性较差的数据,然后将剩下的数据求平均值,即得到该类型用户各时段的流量变化系数。

(2) 然后对初分类的 40 类用水类型进行主成分分析。主成分分析法可实现用户类型的归类和综合。(由于篇幅所限,主成分分析方法具体步骤不在此详述,请参见相关文献[6].)一般取累计贡献率达 85%~95%的特征值所对应的主成分作为最后保留的成分。由相关系数矩阵计算特征值,以及各个主

成分的贡献率与累计贡献率可知,前 9 种主成分的累计贡献率已高达 85.512%(大于 85%),前 18 种主成分的累计贡献率则高达 95.701%(大于 95%)。综合考虑特性行业的用水规律,故保留了 18 种用户类型(见表 1)。而其余用户类型归并入混合模型,因此一共得到了 19 种用户类型。

根据数据处理的结果,绘制各类用户用水量变化曲线。混合模型采用系统用水量变化曲线。

表 1 用户类型及其主成分分析结果

序号	用户类型	贡献率/%	累计贡献率/%
1	居民生活用水	44.563	44.563
2	办公	13.602	58.165
3	一般一班制工业	5.803	63.968
4	学校	4.887	68.855
5	钢铁	3.890	72.744
6	商业	3.495	76.240
7	酒店宾馆娱乐	3.389	79.628
8	一般三班制工业	3.187	82.815
9	医院	2.697	85.512
10	一般二班制工业	2.542	88.055
11	纺织	2.119	90.174
12	医药	1.844	92.018
13	电子	1.293	93.311
14	食品饮料	1.123	94.434
15	塑料	0.920	95.354
16	陶瓷	0.269	95.623
17	环卫绿化	0.057	95.680
18	基建	0.021	95.701

### 3 节点流量的计算和校正

当确定了用水节点对应的水表和时段变化系数后,就可以根据营业收费数据计算节点用水量。设  $Q_{ji}$  为用水节点  $j$  在  $i$  时段的节点流量(L/s),  $K_i$  为  $i$  时段的水量系数,  $\bar{q}_j$  为用水节点  $j$  的平均流量(L/s),  $P$  为上溯的水表,  $Q(M)$  为水表的累计流量( $m^3$ ),  $n$  为抄表间隔天数(水表累计记录天数),则节点用水量的计算公式为:

$$Q_{ji} = K_i \bar{q}_j = K_i \frac{1000 \sum Q(M)}{86400n} \quad (2)$$

需要特别注意的是,按公式(2)求得的  $Q_{ji}$  实际是分配到各个节点的计量用水量。由于漏损水量和未抄见水量的存在,实际上营业收费数据库中记录

的总水量和水厂的总供水量之间还有一个较大的差额,即未计量用水量。管网未计量用水量的计算和分配过程如下:

(1) 首先计算系统用水量。系统用水量指的是管网中的实际用水量,它是一个不断变化的数值,可以通过管网 SCADA 系统获得。设  $Q_s$  为系统用水量,  $Q_1$  为模型中所有水厂的总供水量,  $Q_2$  为模型中水库的进水量,  $Q_3$  为模型中水库的出水量,  $Q_4$  为模型中边界上的进水量,  $Q_5$  为模型中边界上的出水量,则管网中的系统用水量可由式(3)得出:

$$Q_s = Q_1 - (Q_2 - Q_3) + (Q_4 - Q_5) \quad (3)$$

(2) 然后通过系统用水量和管网计量用水量的差值可以得出管网非计量用水量。设  $i$  时刻的系统用水量为  $Q_{i,s}$ , 该时刻的管网计量用水量和非计量用水量分别为  $Q_{i,count}$  和  $Q_{i,non-count}$ , 则:

$$Q_{i,non-count} = Q_{i,s} - Q_{i,count} = Q_{i,s} - \sum Q_{ij} \quad (4)$$

(3) 未计量用水的分配有两种方法。按比流量进行分配或按各节点已分配的计量用水的比例进行分配。通过验算和比较,证明当未计量用水在系统需水量所占的比例不超过 20% 时,两种分配方法对管网压力计算的影响可以忽略不计(小于 0.2 m)。为计算方便起见,采用第二种方法。故节点流量的计算公式最后修正为:

$$Q_{ij} = K_{i,b} K_i \frac{1000 \sum Q(M)}{86400n} \quad (5)$$

式中  $k_{i,b}$ ——节点流量修正系数,为  $Q_{i,s}/Q_{i,count}$ , 表示  $i$  时刻系统需水量与计量用水量的比值。

其余同式(2)。

### 4 实例计算

下面以一个简单实例(见图 1)说明实时水力模拟节点流量分配的过程。

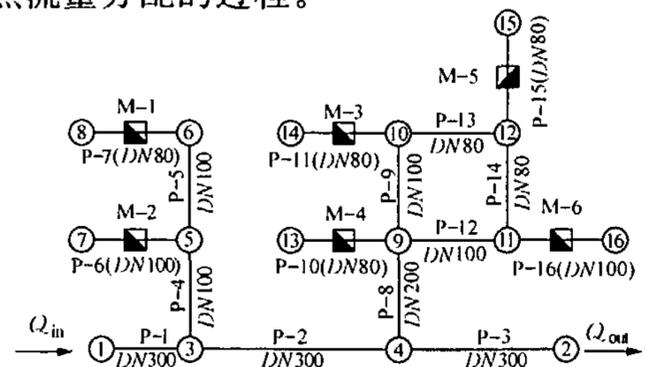


图 1 节点流量计算示意

图 1 所示是 GIS 的一部分,共有 16 个节点、16 根管线和 6 个水表。编号标志符说明如下:P 表示管线,M 表示水表,圆圈表示节点。各水表属性设定见表 2。

表 2 水表属性设定

编号	直径/mm	累计流量/m <sup>3</sup>	累计记录天数/d	用水类型
1	80	5 250	60	居民
2	100	36 800	60	商业
3	80	2 780	60	居民
4	80	3 660	60	居民
5	80	1 450	60	居民
6	100	23 800	60	商业

现场测试获得的居民、商业用水量变化曲线见图 2 和图 3。

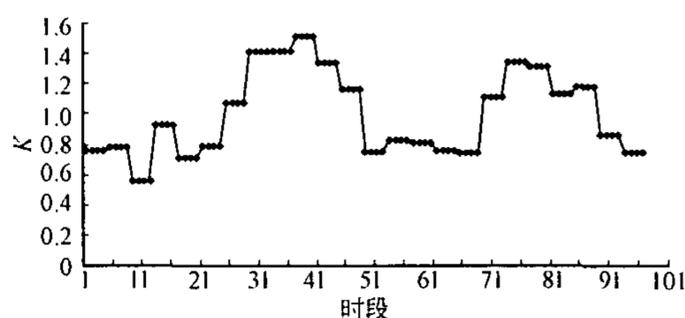


图 2 居民用水量变化曲线

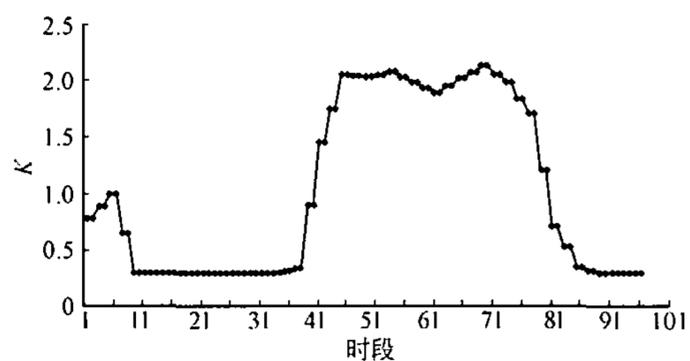


图 3 商业用水量变化曲线

如果要建立管径不小于 DN300 的管网模型,图 1 简化的结果是模型中只保留 1、2、3 号管线和 1、2、3、4 号节点。根据前述“水表上溯”原理,很明显可以推出,1、2 号水表上溯到 3 号节点,3、4、5、6 号水表上溯到 4 号节点。因此只有节点 3 和节点 4 是用水节点,需要计算节点流量。现在先以节点 4 为例计算节点流量:已知上溯到节点 4 的水表有 4 个,对应的用水类型有两种,因此先必须按式(2)分别求出两种用水类型的平均流量。

居民用水平均流量:

$$\begin{aligned} \overline{q_4(1)} &= \frac{1\,000[Q(M3)+Q(M4)+Q(M5)]}{86\,400n} \\ &= \frac{1\,000 \times (2\,780 + 3\,660 + 1\,450)}{86\,400 \times 60} = 1.52(\text{L/s}) \end{aligned}$$

商业用水平均流量:

$$\overline{q_4(2)} = \frac{1\,000Q(M6)}{86\,400n} = \frac{1\,000 \times 23\,800}{86\,400 \times 60} = 4.59(\text{L/s})$$

从图 2 和图 3 可以看出,居民和商业第 1 时段(即 0:00~0:15)的 K 值分别为 0.8 和 0.75,所以节点 4 第 1 时段的节点流量为:

$$\begin{aligned} Q_{4,1} &= K_1 \overline{q_4(1)} + K_2 \overline{q_4(2)} \\ &= 0.8 \times 1.52 + 0.75 \times 4.59 = 4.66(\text{L/s}) \end{aligned}$$

同理可以算得节点 3 相应的  $\overline{q_3(1)}$ 、 $\overline{q_3(2)}$  和  $Q_{3,1}$  值分别为 1 L/s、7.1 L/s 和 6.13 L/s。

假设此时流入图 1 所示系统的流量  $Q_{in}$  为 56 L/s,流出该系统的流量  $Q_{out}$  为 42 L/s,则系统用水量为:

$$Q_s = Q_{in} - Q_{out} = 14(\text{L/s})$$

则第 1 时段的节点流量修正系数:

$$k_{1,b} = 14 / (4.66 + 6.13) = 1.3$$

因此最后节点 3 和节点 4 第 1 时段的节点流量分别为:

$$Q_{3,1} = 1.3 \times 6.13 = 7.97(\text{L/s})$$

$$Q_{4,1} = 1.3 \times 4.66 = 6.06(\text{L/s})$$

同理可以求得节点 3 和节点 4 其他时段的节点流量。

## 5 应用效果检验和前景展望

### 5.1 应用效果检验和误差分析

本文提出的方法实际应用于市北公司供水管网水力建模,可以每 15 min 动态分配一次节点流量并进行管网平差计算,从而实现了大型供水管网的水力实时在线模拟。表 3 为市北管网上的 240 个测压点连续一周(2005 年 5 月 26 日~6 月 1 日)的压力校验效果。

从表 3 可以看出,水力模型的压力校验是非常成功的,证明节点流量的计算比较符合实际情况。笔者认为原因在于:①通过“水表上溯”来定位水力模型中用水节点,充分利用了 GIS 技术,远比按街

表3 压力校验结果

实测值与模拟值之差/ $\text{mH}_2\text{O}$	实际比例/%	标准要求/%
$\leq \pm 1$	65.5	50
$\leq \pm 2$	92	80
$\leq \pm 4$	100	100

区或者带门牌号码的市街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通过建立与营业收费数据库系统和 SCADA 系统的接口,直接根据水表流量来计算节点流量,不但比流量分配法(包括其改进形式)符合实际情况,而且容易实现实时在线水力模拟;③采用主成分分析法对现场测试数据进行处理,根据贡献率来确定保留用户类型的数量,不但避免了以往用户分类的人为主观性,而且最大程度地提高了节点流量计算的准确度。

系统误差分析和改进:①K 值的测量未考虑季节和特殊日期对用水量的影响,因此需要针对不同季节和特殊日期重新测定。②平均用水量对节点用水量计算的影响较大,计算平均用水量的基础数据应有较长的累积时间。因为水表查收时间误差一般不会大于 48 h,水费每月查收一次,如用一个月的数据计算,时间误差将是 6%,如用 6 个月的数据计算,误差将减小到 1%左右。因此最好采用较长时间的连续累积用水量数据来计算用户的平均用水量。

## 5.2 应用前景展望

本文提出的方法使大型供水管网水力实时在线模拟成为可能,大大拓宽了管网平差的应用范围和利用深度,改变了原来统计一次数据进行一次管网平差的传统作法,能实时地掌握管网的真实工况。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,便于实现水司信息化统一管理。

## 参考文献

- 1 杨玉奎,唐剑辉. 规划设计中给水管网计算方法的改进. 广州大学学报(自然科学版),2004,3(5):466~469
- 2 杜晓明,刘遂庆. 利用营业抄表用水量计算给水管网节点流量的方法. 城市公用事业,2003,17(2):14~17
- 3 赫宗天. 建立管网平差节点流量的自动采集系统. 辽宁工学院学报,2002,22(5):20~22
- 4 俞锋. 城市供水管网实时在线节点流量计算的研究:[学位论文]. 上海:同济大学环境工程学院,2004
- 5 龚亮,李黎武. GIS 环境下枝状配水管网分配流量的计算. 湖南城市学院学报,2003,24(3):63~65
- 6 林洪桦. 动态测试数据处理. 北京:北京理工大学出版社,1995,90~96

○通讯处:200092 上海市杨浦区密云路 528 弄

同济大学博士 4 号楼 601 室

电话:13761184216

E-mail:jackychenling@163.com

收稿日期:2006-05-15

修回日期:2006-08-03

## 水暖工程施工和监理中容易疏漏的几个问题

(1) 坐便器内冒气泡。这种现象是因为卫生器具的存水弯失效。存水弯失效多是因化粪池进出水管道的标高不当造成的。按规定进水管应比出水管高,高差 100 mm,使化粪池进水管始终处于池内水面以上,以保持管内气水流畅通。安装人员应核对化粪池进出水管道的预留预埋是否正确。

(2) 消防泵和生活泵出口的闸阀和止回阀的位置装反了。应该是先装止回阀,再装闸阀(按水流方向),以便于检修止回阀。

(3) 保温管道支架的做法。热水管、蒸汽管等保温管道的支架做法,应该按照动力设施国标图选用,其支架特点是:先在管道下部焊接一支座(俗称“高支座”),支座高度比保温层厚度稍大。当管道伸缩时,带动支座在支架横梁表面滑动,因而保温层不会因管道的伸缩位移而受到损坏。

(4) 金属波纹管伸缩器的安装。波纹管,应按设计要

求的规格、材质、耐压力、刚度和允许位移等进行核对,确定无误后方可安装。安装时在伸缩器两侧一定距离内要设导向支架和固定支架。特别要注意的是连接波纹管两端法兰盘上的定位螺栓,待管道固定支架安装后,应予拆除。

(5) 镀锌钢管螺纹接口外露螺纹的防腐问题。钢管的螺纹连接处是锈蚀的重点,因此《建筑给水排水及采暖工程施工质量验收标准》(GB 50242—2002)4.1.3 条规定,在接口的外露丝扣部分,要做防腐处理。规范没有详细说明,笔者认为,如果设计无规定,最少也应刷防锈底漆 2 道,面漆 2 道。刷漆工艺同样要严格按操作规程进行。

(6) 硬聚氯乙烯排水横管的伸缩问题。硬聚氯乙烯排水横管长度超过规定需装伸缩器,但伸缩器容易渗漏、维修麻烦。因此笔者主张,在实际工作中,尽量少装或不装伸缩器,在可能的情况下,尽量利用管道的自然弯曲来吸收膨胀量。(镇江市给排水管理处 赵宝康,镇江市五环建筑规划设计有限公司 徐庚章)