

节点流量和水损系数的不确定性对 供水管网水力特性的影响

常丽娟, 王军慧, 龙天渝

(重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要: 供水管网的节点用水量和水损系数具有明显的不确定性,为研究节点用水量和水损系数的不确定性对供水管网水力特性的影响,提出了在假定他们的随机变化服从正态分布的条件下,采用蒙特卡罗随机抽样法,对所获的每组节点用水量和水损系数的抽样值,应用稳态的水力模型计算相应的节点测压管水头和管段流量,得出节点测压管水头和管段流量的统计值的计算方法。文中给出了该算法在两管网中的应用。

关键词: 供水管网; 节点用水量; 水损系数; 蒙特卡罗随机抽样法; 水力特性

中图分类号: TU991.33

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)06-0086-04

Influence of uncertainty of node flow and water loss coefficient on hydraulic characteristics of water supply pipe network

CHANG Lijuan, WANG Junhui, LONG Tianyu

(College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Node water demand and water loss coefficient water supply pipe network possesses obvious uncertain. In order to analyze the influence of node water demand and uncertainty of water loss coefficient on hydraulic characteristics of water supply pipe network, the paper assumed that their random change obey the normal distribution condition of their normal distribution condition, and took Monte Carlo sampling method to get the values of node water demand and water loss coefficient. It applied steady-state hydraulic model to calculate corresponding water head of node pressure tube and pipe flow. At last the paper proposed the calculation method of statistical value of node pressure tube water head and pipe flow which is applied in two pipe network system.

Key words: water supply pipe network; nodal water demand; water loss coefficient; Monte Carlo random sampling method; hydraulic characteristics

供水管网在运行时,由于管网中用户分布的复杂性和各用户用水的随机性,使管网节点流量具有明显的不确定性。对于形成年代较长的管网,旧管的水损系数受管材、管径、使用年限及流速等的影响,也具有不确定性。节点流量和管道水损系数的不确定性将会对供水管网的水力特性产生影响,研究其对供水管网水力特性的影响,对于供水管网的优化设计和安全运行具有重要的意义。

关于供水管网系统的水力不确定性,国内外一些学者开展了研究, Kapelan 等^[1]在仅考虑节点流量不确定性的条件下,提出了一个随机优化设计模

型,并用遗传算法进行了求解。Babayan 等^[2]评价了节点流量不确定性对供水管网设计的影响,他们认为在设计过程中忽视这些不确定性将会导致不成功的设计。刘孟军等^[3]用一阶泰勒展开式导出的节点压力和管段流量对节点流量的近似偏导矩阵、金溪^[4]用线性化供水管网概率水力模型,研究了节点流量的随机性对管网水力特性的影响,研究发现当节点流量的变异系数较大时,进行线性近似的随机性分析会导致较大的误差。舒诗湖^[5]基于蒙特卡罗方法从输入数据精度方面分析了管网系统模型状态量的不确定性。

收稿日期:2014-05-03; 修回日期:2014-08-14

基金项目:“十二五”国家科技计划课题(2012BAJ25B09)

作者简介:常丽娟(1989-),女,河南驻马店人,硕士,研究方向:供水管网模型。

通讯作者:龙天渝(1960-),女,重庆人,教授,博士,主要从事水污染控制与水环境模拟方面的研究。

分析相关研究可以发现,目前有关供水管网水力不确定性的研究主要针对节点流量的随机性或输入数据的误差引起的管网系统模型参数的不确定性,但对节点流量和水损系数的不确定性对供水管网水力特性影响的研究极少。为此,本文在假定节点用水量和水损系数的随机性都服从正态分布的前提下,使用蒙特卡罗随机抽样法,对所获的每组节点用水量和水损系数的抽样值,应用稳态的水力模型,即连续性方程和动量方程计算相应的节点的测压管水头和管段流量,研究了节点流量和水损系数的不确定性对供水管网节点测压管水头和管段流量的影响,并给出了应用实例。

1 研究方法

有关研究表明节点用水量服从正态分布^[6],这里假定水损系数的随机变化也服从正态分布。

为研究节点用水量和水损系数的不确定性对供水管网水力特性的影响,首先利用蒙特卡罗模拟、根据节点用水量和水损系数的分布特征生成仿真值,记为 Q_j^i 和 C_k^i (上标 i 表示抽样组;下标 j 和 k 分别表示管网节点和管段),将已生成的每组仿真值 Q_j^i 和 C_k^i 作为水力模型的输入,应用模型计算出相应的各节点测压管水头 H_j^i 和各管段流量 q_k^i 。重复以上过程直至节点测压管水头和管段流量的统计量收敛。整个模拟计算通过 Matlab 中编程实现,其流程图如图1所示。

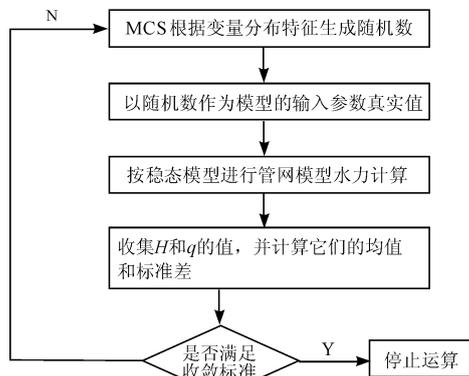


图1 算法流程图

2 供水管网水力特性模拟

图2为一简单管网的拓扑结构,供水管网包括4个用水节点、6根管段、1个水泵、1个水库和1个高位水池。图中给出了各节点的需水量和各管路的水损系数的特征值,假定 Q 和 C 都服从正态分布。参考有关文献^[7],取节点流量的变异系数为0.1、

水损系数的变异系数为0.05,由于4个节点用水量均相等,用水量都服从正态分布 $N(20, 2^2)$ 。管段 $P_1 \sim P_5$ 水损系数都服从正态分布 $N(100, 5^2)$,管段 P_6 在管网模型中水损系数为0。根据节点用水量和水损系数所对应的正态分布,利用蒙特卡罗模拟生成 Q_j^i 和 C_k^i 的随机数组,每组有4个节点用水量和5个水损系数,以这9个仿真值作为模型的输入进行管网水力计算,获得4节点测压管水头 H_j^i 和5个管段流量 q_k^i 。为了保证输出 H 和 q 的统计量完全收敛,对该管网进行了5万次的模拟计算,最后得出节点测压管水头和管段流量的特征值和统计量(表1)。

从表1中可以看出,输出量的均值和特征值非常相近,这与实际情况相符,证明了模拟的正确性。5万次的模拟结果反映了输出量的分布特征,我们可以对输出量的分布函数进行拟合,从而对不确定性进行量化和根据水力可靠性定义计算节点的水力可靠性。图3为节点测压管水头和管段流量的箱型图,其箱型图形状和正态分布很类似。

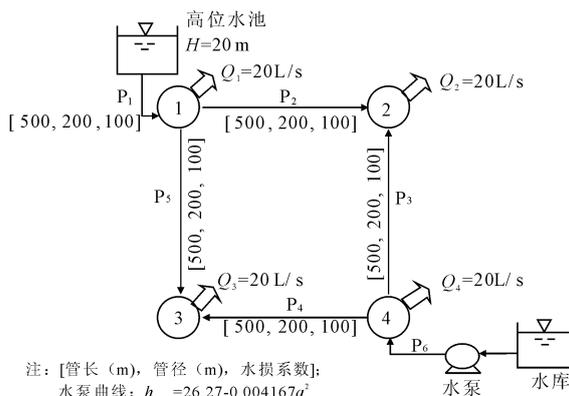


图2 管网拓扑图

根据模拟结果可以计算节点测压管水头和管段流量在不同概率下的置信区间,以节点1和4,管段 P_2 和 P_5 为例,其概率为99.7%的置信区间分别为 $[13.39 \text{ m}, 17.52 \text{ m}]$ 、 $[14.35 \text{ m}, 18.39 \text{ m}]$ 、 $[-9.87 \text{ L/s}, -0.63 \text{ L/s}]$ 和 $[0.56 \text{ L/s}, 9.85 \text{ L/s}]$ 。在只考虑水损系数的不确定性,对节点用水量进行随机抽样模拟计算时,节点1的测压管水头和管段 P_2 的管段流量的99.7%的置信区间分别为 $[14.92 \text{ m}, 16.41 \text{ m}]$ 和 $[-6.76 \text{ L/s}, -3.90 \text{ L/s}]$,可见水损系数的不确定性对供水管网的水力特性也是会产生较大的影响的。对节点测压管水头和管段流量的不确定性区间进行量化,可以对供水管网SCADA系统传回的数据进行甄别。

P_2 和 P_5 管段流量在模拟过程中的最大与最小

值分别为 -11.65 、 11.70 和 2.24 、 -1.02 L/s, 最大与最小值符号相反即模拟过程中此两管段的水流可能发生反向或者管段流速为 0, 这也可能是 P_2 和 P_5

管段流量相对不确定程度最大的原因。这种极端水力状况的频繁发生容易引起供水管网的二次污染^[8], 应引起高度重视。

表 1 管网节点测压管水头和管段流量的特征值和统计值

	节点测压管水头 H/m				管段流量/($L \cdot s^{-1}$)					
	1	2	3	4	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
特征值	15.73	15.56	15.56	16.62	30.89	-5.44	14.56	-14.56	5.44	49.11
均值	15.70	15.52	15.52	16.59	30.85	-5.43	14.57	-14.57	5.43	49.16
标准差	0.69	0.72	0.72	0.68	2.52	1.54	1.04	1.04	1.55	1.65
C_V	0.04	0.05	0.05	0.04	0.08	-0.28	0.07	-0.07	0.28	0.03

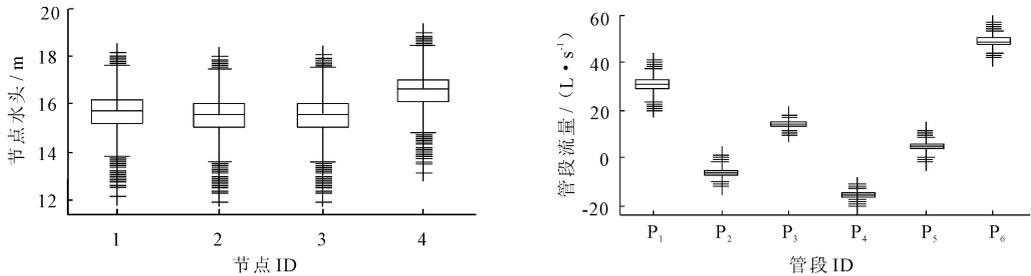


图 3 管网测压管水头和管段流量的箱型图

图 4 给出了节点测压管水头的累积密度曲线。根据曲线图可以得出各节点水头在不大于目标水头值的情况下所对应的概率, 并可按 Bao 等^[9] 的定义计算节点的可靠性。以节点 4 为例: 假定在不发生爆管和保证用水量的要求下, 测压管水头的最大限 $H_{\max} = 25$ m、最小限 $H_{\min} = 15$ m, 则节点可靠性 $R = P(H_{\min} < H < H_{\max}) = 1 - F(15) = 1 - 0.0141 = 0.9859$ 。节点 2 和节点 3 的压力水头累积密度曲线十分接近, 可知如果定义的节点水头可靠性区间上下限一致则有两节点可靠度相同。

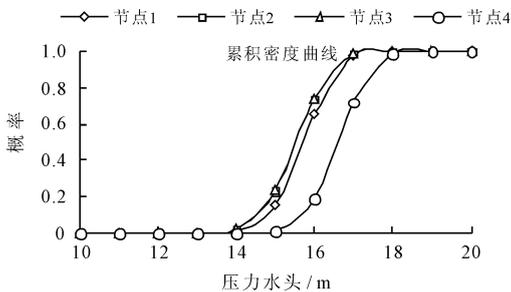


图 4 节点测压管水头的累积密度函数曲线图

3 实际应用

我国南方某镇的供水管网铺设于 20 世纪 90 年代, 其拓扑结构如图 5 所示。供水管网辐射面积约 64 km^2 , 拓扑图形中管段长度约 $70\,000 \text{ m}$ 。管网建

成之初只由水源 1 向管网供水, 用水主要是村镇生活用水工业用水较少, 所以管网中各管段的直径不是很大, 最小直径为 150 mm 。

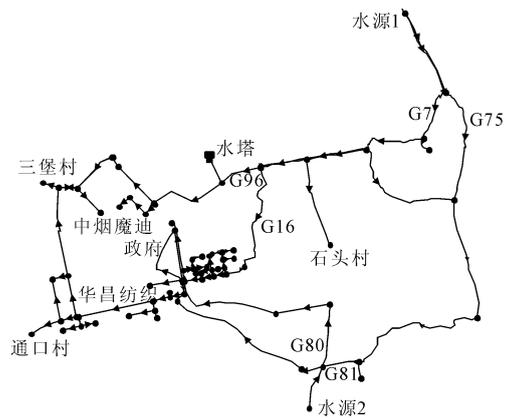


图 5 南方某镇供水管网拓扑结构

随着经济的发展, 该镇中心建设不断完善(集中在图 5 中用水节点密集区域)和一些工厂企业落户于该镇, 使用水量大大增加, 为保障供水, 在管网布局未经改造的情况下增加了水源 2, 其供水来自周边供水管网, 目前该镇日用水量 $40\,000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。选取小时最大用水量 ($12:00 - 13:00$) 对该供水管网的水力特性进行分析, 节点用水量的特征值来源于历史用水资料(表 2), 考虑到集中用水的节点用水量比较大且随时间基本不变化, 在计算过程中设为常数, 其他节点的

用水量的变异系数取 0.1;管段水损系数特征值 C 取 100,变异系数取 0.05(表 2)。对该供水管网进行了 5

万次的抽样计算,节点测压管水头和管段流量的统计量都已达到收敛标准。

表 2 供水管网水力置信区间($P = 0.997$)

节点 编号	$Q /$ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	特征水头/ m	节点水头 区间/m	管段 编号	管段 长度/m	管径/ mm	特征管段 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	管段流量 区间/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
石头村	33.3	37.489	[33.156,40.189]	G7	1101	600	1137.522	[1109.140,1157.971]
政府	29.0	32.059	[27.182,35.036]	G75	2513	200	75.078	[58.103,96.243]
华昌纺织	269.7	31.173	[25.960,34.352]	G96	853	300	179.454	[143.480,220.402]
中烟魔迪	143.0	28.634	[22.356,32.479]	G16	2564	600	814.712	[778.922,838.674]
三堡村	10.0	30.332	[24.643,33.794]	G80	1382	600	368.664	[332.082,401.695]
通口村	1.5	30.712	[25.282,34.021]	G81	792	300	46.834	[22.319,75.518]

表 2 给出了供水管网部分节点测压管水头和管段流量的概率为 99.7% 的置信区间,从计算的结果可以看出,最大用水量时,由于节点用水量和水损系数的不确定性引起的管网的节点测压管水头在一个较大的区间变化,所列的几个重要的节点水头变化范围较大,约为 7 ~ 10 m。供水管网在华昌纺织和中烟摩迪处设有压力监测点,根据其节点水头的不确定性区间可以判别监测数据的可取性,若从压力监测点返回的监测压力数据长期处于节点水头的不确定性区间之外可以判断压力检测设备可能发生故障,这样的监测数据不能用来反映管网的实际运行情况,不能用作校核管网之用。同时根据节点压力分布区间可以初步判断供水管网的水力可靠性,管网中是否存在明显压力不足的用水节点。管段流量的不确定区间相对其特征管段流量的变化也相差较大;G7 的相对变化最小,不确定区间是管段特征流量的 4%;G81 的相对变化最大,其不确定区间是特征流量的 114%。管段流量存在这样显著的变化除受节点流量和水损系数的不确定性影响外还与管段在供水管网中的位置和其管径有关。在对实际管网进行不确定分析时,应注意相对变化及变异系数比较大的管段,这些管段的优化设计和改造是提高可靠性的关键所在。

4 结 语

供水管网的节点用水量和水损系数具有明显的不确定性,假定他们的随机变化服从正态分布,使用蒙特卡罗随机抽样法,对所获的每组节点用水量和水损系数的抽样值,应用稳态的水力模型可以计算出相应的节点测压管水头和管段流量,应用统计分析方法,可以得出节点测压管水头和管段流量的统计值和分布特征。该方法可以定量评价供水管网节

点用水量和水损系数的不确定性对供水管网水力特性和水力可靠性的影响。本文所提出的计算方法可为供水管网的优化设计和安全运行提供参考。

参考文献:

- [1] Kapelan Z, Savic D, Walters G A. Robust least cost design of water distribution systems using GAs. [C] // International Conference on Computing and Control for the Water Industry, London, 2003.
- [2] Babayan A V, Savic D A, Walters G A. Multiobjective optimization of water distribution system design under uncertain demand and pipe roughness [C] // Impacts of Global Climate Change, Venice, 2005.
- [3] 刘孟军,邹平华,何钟怡. 供水管网中节点流量随机性的影响分析[J]. 给水排水, 2007, 33(z1): 350 - 354.
- [4] 金 溪. 供水管网概率水力模型线性化求解方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(4): 458 - 463.
- [5] 舒诗湖. 基于蒙特卡罗方法的供水管网系统不确定性分析[C] // 第六届海峡两岸水质安全控制技术及管理研讨会论文集, 2010: 1 - 8.
- [6] 谢善斌, 金 波, 刘遂庆. 基于不确定性度量的给水管网用户的用水模式分析[J]. 中国给水排水, 2011, 27(7): 59 - 62.
- [7] Doosun Kang, Kevin Lansey. Real - time demand estimation and confidence limit analysis for water distribution systems [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 135(10): 825 - 837.
- [8] 赵志领, 赵洪宾, 何文杰, 等. 城市给水管网水质安全保障研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2006, 22(6): 102 - 105.
- [9] Bao Yixing, Mays L W. Model for water distribution system reliability [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(9): 1119 - 1137.