

管道阻抗的不确定性对热网水力工况计算的影响^{*}

哈尔滨工业大学 刘孟军[☆] 邹平华 何钟怡

摘要 利用一阶 Taylor 展开的方法分析了由于管道阻抗的不确定性所导致的热网中管段流量和节点压力的不确定性问题。基于正态分布导出了管网中管段流量和节点压力的概率密度分布和数学期望、方差等数字特征。对实例的分析表明,管道阻抗的不确定性对热网中的管段流量和节点压力有较大的影响。

关键词 热网 阻抗 不确定 管段流量 节点压力 正态分布

Effect of uncertainty of pipeline impedance on hydraulic analysis of heat-supply networks

By Liu Mengjun[★], Zou Pinghua and He Zhongyi

Abstract Studies the uncertainty of pipe flow and node pressure resulting from the uncertainty of pipeline impedance by means of the first order Taylor expansion. Based on the normal distribution, deduces the probability density distributions of pipe flow and node pressure and the numerical features such as mathematic expectation and variance. The results of an example analyses indicate that the uncertainty of pipeline impedance has notable effects on pipe flow and node pressure in heat-supply networks.

Keywords heat-supply network, impedance, uncertainty, pipe flow, node pressure, normal distribution

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

0 引言

在热网的设计计算中,管道阻抗用下式计算^[1]:

$$S = 6.88 \times 10^{-9} \times \frac{K^{0.25}}{d^{5.25}} (l + l_d) \rho \quad (1)$$

式中 S 为管道阻抗, kg/m^7 ; K 为管道内壁当量绝对粗糙度, m ; d 为管段的管径, m ; l 为管段的长度, m ; l_d 为管段局部阻力当量长度, m ; ρ 为水的密度, kg/m^3 。

实际上,热网中管道的阻抗是不确定的,这种不确定性存在于热网的设计计算和运行计算中。

对于新出厂的管道,同一个生产厂家生产的同

一型号的管道的管径和管壁的粗糙度都会略有不同,是随机变化的;对于不同厂家生产的管道,更是如此。另外也无法获取管道局部阻力系数的精确值,因此管道的阻抗是一个随机变量。在热网设计中所选用的管道的阻抗大体上是这一随机变量的平均值。

热网投入运行后,由于管壁腐蚀、结垢等因素的影响,管道的阻抗要发生变化。在热网运行计算

①[☆] 刘孟军,男,1978年1月生,在读博士研究生
150090 哈尔滨市南岗区海河路202号哈尔滨工业大学二校
区2612信箱
(0451) 86283342-2
E-mail: liumengjun@126.com
收稿日期:2006-06-01
修回日期:2007-01-09

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50378029)

时,要采用参数辨识的方法来辨识出热网管道的阻抗。由于模型的不完善、测量仪器的精度、测点个数的限制、测点位置的不同等因素的影响,辨识出的管道阻抗的数值与真实值相比,总有一个随机性误差,因此,这种情况下的管道阻抗也是一个随机变量。在热网的运行计算过程中,所采用的管道阻抗大体上可以看作是这一个随机变量的平均值。这样,管道的阻抗可以表示为 $S=E(S)+\delta S$, 其中 $E(S)$ 为随机变量 S 的数学期望, δS 是一个数学期望为零的随机变量。

在热网的设计和运行工况分析中,热网管道阻抗是一个重要的基本量,由于它的不确定性,必然导致热网中的管段流量和节点压力的不确定性。定量地研究由于管道阻抗的不确定性引起的热网中管段流量和节点压力的变化,对于掌握热网的水力工况具有重要意义。本文主要基于矩阵论和概率论解析研究该问题。

1 热网水力工况模型分析

研究由于管段阻抗的不确定性所导致的管网中的管段流量和节点压力的不确定性问题,首先要了解管段阻抗的微量变化所导致的管段流量和节点压力的变化,即要求出它们之间的导数关系,这是进行不确定性分析的基础。

对于一个有 b 个管段, $n+1$ 个节点的热水管网,按照图论的方法,管网的拓扑结构可以用它的关联矩阵 A 来描述,其中的元素 a_{ij} 按下式确定:

$$a_{ij} = \begin{cases} +1 & \text{当节点 } i \text{ 与管段 } j \text{ 相关联,} \\ & \text{且水的流向背离节点 } i \\ -1 & \text{当节点 } i \text{ 与管段 } j \text{ 相关联,} \\ & \text{且水的流向指向节点 } i \\ 0 & \text{当节点 } i \text{ 与管段 } j \text{ 不关联} \end{cases}$$

去掉作为参考压力的节点,矩阵 A 为 n 行 b 列的矩阵。根据管网的拓扑性质,整个管网的流动符合下列矩阵方程组^①:

$$\left. \begin{aligned} AG &= 0 \\ A^T p &= \Delta H \\ \Delta H &= (ES) | G | G + Z - DH \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 G 为各管段的管段流量列向量, $G=(G_1 \ G_2 \ \cdots \ G_b)^T$; p 为节点压力列向量, $p=(p_1 \ p_2 \ \cdots \ p_n)^T$; ΔH 为各管段的阻力损失列向量, $\Delta H=(\Delta H_1 \ \Delta H_2 \ \cdots \ \Delta H_b)^T$; $E=(e_{ij1} \ e_{ij2} \ \cdots \ e_{ijk} \ \cdots \ e_{ijb})_{1 \times b}$, 其中的元素 e_{ijk} ($i=1, 2, \cdots, b; j=1, 2, \cdots, b; k=1, 2, \cdots, b$) 是一

个向量,定义为

$$e_{ijk} = \begin{cases} 1 & i=j=k \\ 0 & \text{其他} \end{cases};$$

S 为管段阻抗列向量, $S=(S_1 \ S_2 \ \cdots \ S_b)^T$; $|G|$ 为管段流量绝对值对角阵, $|G|=\text{diag}(|G_1| \ |G_2| \ \cdots \ |G_b|)$; Z 为各管段中两节点的位能差列向量, $Z=(Z_1 \ Z_2 \ \cdots \ Z_b)^T$; DH 为水泵扬程列向量, $DH=(DH_1 \ DH_2 \ \cdots \ DH_b)^T$, 当管段 j 不含水泵时,该管段 $DH_j=0$ 。

E 中元素 e_{ijk} 和 S 中元素 S_k 的乘积可以表示为:

$$e_{ijk} S_k = \begin{matrix} & \text{第 } k \text{ 列} \\ \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & S_k & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \end{pmatrix} & \text{第 } k \text{ 行} \\ & b \times b \end{matrix}$$

因此

$$ES = \text{diag}(S_1 \ S_2 \ \cdots \ S_b) \quad (3)$$

联立式(2)中的第 2 式和第 3 式,然后对 S 求偏导数,得

$$A^T \frac{\partial p}{\partial S} = E(|G|G) + 2(ES)|G| \frac{\partial G}{\partial S} - \frac{\partial DH}{\partial G} \frac{\partial G}{\partial S} \quad (4)$$

由此得到

$$\frac{\partial G}{\partial S} = \left[2(ES)|G| - \frac{\partial DH}{\partial G} \right]^{-1} \cdot \left[A^T \frac{\partial p}{\partial S} - E(|G|G) \right] \quad (5)$$

令 $M=2(ES)|G| - \frac{\partial DH}{\partial G}$, 则式(5)成为

$$\frac{\partial G}{\partial S} = M^{-1} \left[A^T \frac{\partial p}{\partial S} - E(|G|G) \right] \quad (6)$$

由式(2)中的第 1 式,可知

$$A \frac{\partial G}{\partial S} = 0 \quad (7)$$

将式(6)代入式(7)得

$$AM^{-1}A^T \frac{\partial p}{\partial S} = AM^{-1}[E(|G|G)] \quad (8)$$

① 石兆玉. 流体网络的分析与综合. 1993

由此可得到

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{S}} = (\mathbf{A}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}^T)^{-1}\mathbf{A}\mathbf{M}^{-1}[\mathbf{E}(\mathbf{G} | \mathbf{G})] \quad (9)$$

将式(9)代入式(6)得

$$\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{S}} = [\mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}^T(\mathbf{A}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}^T)^{-1}\mathbf{A} - \mathbf{I}] \cdot \mathbf{M}^{-1}[\mathbf{E}(\mathbf{G} | \mathbf{G})] \quad (10)$$

式中 $\mathbf{I}$ 为 $b \times b$ 阶单位阵。

式(9)和式(10)也就是文献[2]所得到的结果,本文仅对它作了少量的变动:一是对把列向量转化为对角矩阵的过程作了注记;另外对一处印刷错误进行了订正。

$\mathbf{M} = 2(\mathbf{E}\mathbf{S}) | \mathbf{G} | - \frac{\partial \mathbf{DH}}{\partial \mathbf{G}}$ 是一个对角阵。对一个平面布置及热用户负荷确定的热水管网,关联矩阵 $\mathbf{A}$ 是已知的, $\mathbf{S}$ 采用式(1)的计算值或者辨识出的值。采用基本回路法或节点分析法可以求出管段的流量 $\mathbf{G}$, 因此式(9)中的 $\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{S}}$ 与式(10)中的 $\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{S}}$ 都可以求出。

根据矩阵微分的定义,有

$$\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{S}} = (\mathbf{C}_{ij})_{b \times b} = \begin{bmatrix} \frac{\partial G_1}{\partial S_1} & \frac{\partial G_1}{\partial S_2} & \cdots & \frac{\partial G_1}{\partial S_b} \\ \frac{\partial G_2}{\partial S_1} & \frac{\partial G_2}{\partial S_2} & \cdots & \frac{\partial G_2}{\partial S_b} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial G_b}{\partial S_1} & \frac{\partial G_b}{\partial S_2} & \cdots & \frac{\partial G_b}{\partial S_b} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{S}} = (\mathbf{F}_{ij})_{n \times b} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_1}{\partial S_1} & \frac{\partial p_1}{\partial S_2} & \cdots & \frac{\partial p_1}{\partial S_b} \\ \frac{\partial p_2}{\partial S_1} & \frac{\partial p_2}{\partial S_2} & \cdots & \frac{\partial p_2}{\partial S_b} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial p_n}{\partial S_1} & \frac{\partial p_n}{\partial S_2} & \cdots & \frac{\partial p_n}{\partial S_b} \end{bmatrix} \quad (12)$$

2 管段流量和节点压力的不确定性分析

不确定性分析的方法有一阶、二阶矩法和蒙特卡罗模拟法等。Dettinger 等人提出了一阶和二阶矩序列分析法,即利用一阶 Taylor 展开式和二阶 Taylor 展开式分析随机变量的数学期望、方差及协方差等特征量^[3]。姚磊华和虎维岳在地下水的随机性分析中均采用了一阶和二阶矩序列分析法对随机变量进行分析^[4-5]。在随机变量较少的情况

下,利用这种方法进行不确定性分析非常方便。本文利用一阶矩序列分析法进行管段流量和节点压力的不确定性分析。

设第 i 个管段实际的阻抗 $S_i = E(S_i) + \delta S_i$ ($i=1,2,\dots,b$), 其中 $E(S_i)$ 为第 i 个管段计算时采用的阻抗,也就是随机变量 S_i 的数学期望; δS_i 是一个数学期望为 0 的随机变量,写成矩阵的形式为

$$\delta \mathbf{S} = \begin{bmatrix} \delta S_1 \\ \delta S_2 \\ \vdots \\ \delta S_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 - E(S_1) \\ S_2 - E(S_2) \\ \vdots \\ S_b - E(S_b) \end{bmatrix} \quad (13)$$

δS_i 这一随机变量受到很多独立的随机因素的影响,这些因素的影响是微小的且可以叠加,所以可以认为 δS_i 服从正态分布^[6]。设 δS_i 服从数学期望为 0、方差为 σ_i^2 的正态分布,即 $\delta S_i \sim N(0, \sigma_i^2)$, 根据 δS_i 的定义, $\delta S_1, \delta S_2, \dots, \delta S_b$ 是相互独立的。

管网中任一管段的流量 G_j ($j=1,2,\dots,b$) 都是 $S_1, S_2, \dots, S_b$ 的函数。设 $G_j = f_j(S_1, S_2, \dots, S_b)$, 则 G_j 的数学期望为 $E(G_j) = f_j(E(S_1), E(S_2), \dots, E(S_b))$ 。

定义 $\delta G_j = G_j - E(G_j)$ ($j=1,2,\dots,b$), 将 $G_j = f_j(S_1, S_2, \dots, S_b)$ 在 $E(S_1), E(S_2), \dots, E(S_b)$ 处进行 Taylor 展开,并取一阶近似,得

$$G_j = E(G_j) + \frac{\partial G_j}{\partial S_1}[S_1 - E(S_1)] + \frac{\partial G_j}{\partial S_2}[S_2 - E(S_2)] + \cdots + \frac{\partial G_j}{\partial S_b}[S_b - E(S_b)] \quad (14)$$

因此

$$\delta G_j = \frac{\partial G_j}{\partial S_1} \delta S_1 + \frac{\partial G_j}{\partial S_2} \delta S_2 + \cdots + \frac{\partial G_j}{\partial S_b} \delta S_b = C_{j1} \delta S_1 + C_{j2} \delta S_2 + \cdots + C_{jb} \delta S_b \quad (15)$$

随机变量 $\delta S_1, \delta S_2, \dots, \delta S_b$ 是相互独立的,都服从正态分布,且 δG_j 是 $\delta S_1, \delta S_2, \dots, \delta S_b$ 的线性组合。由于有限个独立正态分布的线性组合仍是正态分布^[6], 所以 δG_j 也服从正态分布。因此,只要求出 δG_j 的数学期望和方差,就可以确定 δG_j 的概率密度分布函数。

由于随机变量和的数学期望等于随机变量数学期望的和,所以对式(15)求数学期望可得:

$$E(\delta G_j) = C_{j1}E(\delta S_1) + C_{j2}E(\delta S_2) + \cdots + C_{jb}E(\delta S_b) = 0 \quad (16)$$

由于相互独立的随机变量的和的方差等于随机变量方差的和,所以对式(15)求方差可得

$$D(\delta G_j) = D(C_{j1}\delta S_1) + D(C_{j2}\delta S_2) + \cdots + D(C_{jb}\delta S_b) = \sum_{i=1}^b C_{ji}^2 \sigma_i^2 \quad (17)$$

写成矩阵的形式为

$$D(\delta \mathbf{G}) = \begin{bmatrix} D(\delta G_1) \\ D(\delta G_2) \\ \vdots \\ D(\delta G_b) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^b C_{1i}^2 \sigma_i^2 \\ \sum_{i=1}^b C_{2i}^2 \sigma_i^2 \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^b C_{bi}^2 \sigma_i^2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

因此,随机变量 δG_j 服从数学期望为 0、方差为 $\sum_{i=1}^b C_{ji}^2 \sigma_i^2$ 的正态分布。

对于节点压力 p_k ($k=1, 2, \dots, n$), 设 $p_k = \psi_k(S_1, S_2, \dots, S_b)$, 则 p_k 的数学期望 $E(p_k)$ 为

$$E(p_k) = \psi_k(E(S_1), E(S_2), \dots, E(S_b))$$

设 $\delta p_k = p_k - E(p_k)$, 则 δp_k 为数学期望为 0 的随机变量。

利用类似的方法同样可以推导出随机变量 δp_k 也是服从数学期望为 0 的正态分布。 δp_k 的方差为

$$D(\delta p_k) = \sum_{i=1}^b \left(\frac{\partial p_k}{\partial S_i} \right)^2 D(\delta S_i) = \sum_{i=1}^b F_{ki}^2 \sigma_i^2 \quad (19)$$

写成矩阵的形式,有

$$D(\delta \mathbf{p}) = \begin{bmatrix} D(\delta p_1) \\ D(\delta p_2) \\ \vdots \\ D(\delta p_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^b F_{1i}^2 \sigma_i^2 \\ \sum_{i=1}^b F_{2i}^2 \sigma_i^2 \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^b F_{ni}^2 \sigma_i^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

所以,随机变量 δp_k 服从数学期望为 0、方差为 $\sum_{i=1}^b F_{ki}^2 \sigma_i^2$ 的正态分布。

求出了随机变量 $\delta G_j, \delta p_k$ 的概率密度分布,还

需要概括了解它们在一定置信度下的置信区间。

假设 a 为具有 95% 置信度的管段阻抗的相对误差,即 $P(\delta S_i < S_i a) = 0.95$ 。后文的算例选用了 $a=5\%$ 和 $a=10\%$ 两种情况来观察 $\delta G_j, \delta p_k$ (置信度亦为 95%) 的量化大小。

由于 δS_i 服从数学期望为 0、方差为 σ_i^2 的正态分布,所以根据正态分布的分布函数的性质有

$$F_{0.1} \left(\frac{S_i a - 0}{\sigma_i} \right) = 0.95$$

$F_{0.1}(x)$ 为标准正态分布函数。查标准正态分布的分布函数表,可以写出:

$$\sigma_i = \frac{S_i a}{1.645} \quad (21)$$

根据式(21)可以求出 σ_i , 再根据式(17)和式(19)求出随机变量 $\delta G_j, \delta p_k$ 的方差 $D(\delta G_j), D(\delta p_k)$ 。

取 δG_j 的置信度为 95%, 则 δG_j 要满足 $P(-d_{\delta G_j} < \delta G_j < d_{\delta G_j}) = 0.95$, $[-d_{\delta G_j}, d_{\delta G_j}]$ 为 δG_j 的置信度为 95% 的置信区间。根据正态分布的分布函数的性质^[6] ($F_{0.1}(x) - F_{0.1}(-x) = 2F_{0.1}(x) - 1$), 有

$$F_{0.1} \left(\frac{d_{\delta G_j} - 0}{\sqrt{D(\delta G_j)}} \right) - F_{0.1} \left(\frac{-d_{\delta G_j} - 0}{\sqrt{D(\delta G_j)}} \right) = 0.95$$

$$d_{\delta G_j} = 1.96 \sqrt{D(\delta G_j)} \quad (22)$$

同样,可以求出 δp_k 的置信度为 95% 的置信区间 $[-d_{\delta p_k}, d_{\delta p_k}]$, 其中

$$d_{\delta p_k} = 1.96 \sqrt{D(\delta p_k)} \quad (23)$$

3 算例分析

某供热管网如图 1 所示, 主要分析环形干线上管段阻抗的不确定性对管段流量和节点压力的影响, 因此图中仅画出了环形干线部分的管网。该管网有 16 个节点、19 个管段, 选择节点 0 为参考节

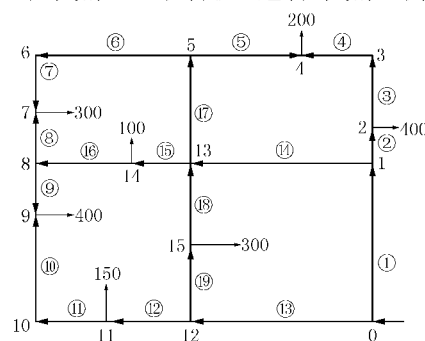


图 1 某供热管网示意图

点。图中箭头所指的数值为热用户流量(t/h)。表 1 给出了各管段的阻抗和流量。

表 1 各管段的阻抗和流量

管段	阻抗/ ($10^{-4} \text{ h}^2/\text{m}^5$)	流量/ (t/h)	管段	阻抗/ ($10^{-4} \text{ h}^2/\text{m}^5$)	流量/ (t/h)
1	0.027	952.4	11	0.074	340.8
2	0.016	532.8	12	0.038	490.8
3	0.817	132.8	13	0.027	897.6
4	0.628	132.8	14	0.096	419.6
5	1.256	67.2	15	0.074	290.0
6	0.409	169.2	16	0.223	190.0
7	0.167	169.2	17	0.133	236.4
8	0.565	130.8	18	1.256	106.9
9	0.565	59.2	19	0.032	406.9
10	0.156	340.8			

根据式(9)和式(10)可以计算出 $\frac{\partial p}{\partial S}$ 和 $\frac{\partial G}{\partial S}$, 再根据式(21)求出各管段阻抗的方差 σ_i^2 ($i=1, 2, \dots, 19$)。这样, 由式(17)可以求出随机变量 δG_j ($j=1, 2, \dots, 19$) 的方差 $D(\delta G_j)$ 。表 2 中给出了 $a=5\%$ 和 10% 时随机变量 δG_j 的标准差 $\sqrt{D(\delta G_j)}$ 。

表 2 各管段的标准差 t/h

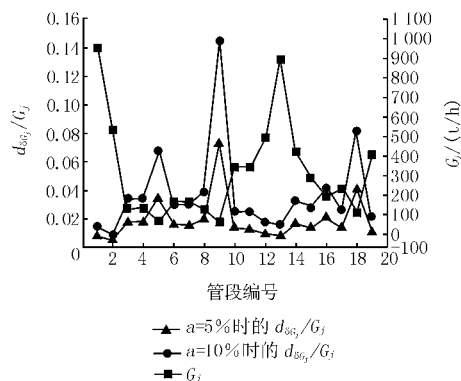
	$a=5\%$	$a=10\%$		$a=5\%$	$a=10\%$
δG_1	3.54	7.07	δG_{11}	2.19	5.00
δG_2	1.15	2.30	δG_{12}	2.19	5.00
δG_3	1.15	2.30	δG_{13}	3.54	7.46
δG_4	1.15	2.30	δG_{14}	3.51	6.91
δG_5	1.15	2.30	δG_{15}	2.02	4.44
δG_6	1.28	2.56	δG_{16}	2.02	4.44
δG_7	1.28	2.56	δG_{17}	1.58	3.21
δG_8	1.28	2.56	δG_{18}	2.21	5.12
δG_9	2.19	4.38	δG_{19}	2.21	5.12
δG_{10}	2.19	4.38			

从表 2 中可以看出, 随着管段阻抗误差的增加, δG_j 的标准差也增大, 也就是随机变量 δG_j 与其期望值 0 之间的偏差越来越大。这说明管段的计算流量 G_j^0 随着管段阻抗误差的增大而更加偏离其真实值 G_j 。

求出随机变量 δG_j 的方差 $D(\delta G_j)$ 后, 就可以利用式(22)求出 $d_{\delta G_j}$ 的值, 也就求出了 δG_j 的置信度为 95% 的置信区间。由于篇幅所限, 本文没有给出 δG_j 的置信区间的数值。

为了分析各管段流量的变化对管段阻抗的不确定性的敏感程度, 图 2 给出了 $a=5\%$ 和 10% 时各管段的 $d_{\delta G_j}/G_j$ 及流量 G_j 的变化曲线。

从图 2 中可以看出, $d_{\delta G_5}/G_5$, $d_{\delta G_9}/G_9$, $d_{\delta G_{16}}/G_{16}$, $d_{\delta G_{18}}/G_{18}$ 的数值比较大, 说明管段 5, 9, 16, 18

图 2 各管段的 $d_{\delta G_j}/G_j$ 和 G_j

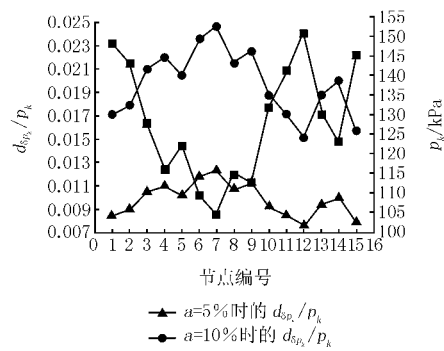
的流量更易受到管段阻抗的不确定性的影响。从图 2 中也可以看出, 这些管段的流量相对于其他点是比较小的。尤其对于管段 9, 位于一个水力交汇点处, 流量仅为 59.2 t/h, 对管段阻抗的不确定性最敏感。因此, 热网中流量越小的管段对管段阻抗的变化就越敏感。

类似地, 可以求出各节点压力的方差 $D(\delta p_k)$ ($k=1, 2, \dots, 15$) 和置信区间 $[-d_{\delta p_k}, d_{\delta p_k}]$, 表 3 给出了 δp_k 的标准差 $\sqrt{D(\delta p_k)}$ 。

表 3 各节点的 δp_k 的标准差 Pa

	$a=5\%$	$a=10\%$		$a=5\%$	$a=10\%$
δp_1	644	1 289	δp_9	646	1 292
δp_2	654	1 307	δp_{10}	628	1 256
δp_3	684	1 367	δp_{11}	615	1 229
δp_4	652	1 303	δp_{12}	582	1 164
δp_5	635	1 271	δp_{13}	624	1 248
δp_6	660	1 321	δp_{14}	628	1 256
δp_7	655	1 310	δp_{15}	582	1 164
δp_8	627	1 253			

图 3 为 $a=5\%$ 和 10% 时各节点的 $d_{\delta p_k}/p_k$ 及节点压力 p_k 的变化曲线。从图 3 中可以看出, 压力大的节点的 $d_{\delta p_k}/p_k$ 较小, 压力小的节点的 $d_{\delta p_k}/p_k$ 较大, 说明压力越小的节点对于管段阻抗的不

图 3 各节点的 $d_{\delta p_k}/p_k$ 和 p_k

确定性越敏感。对比图 2 和图 3 可知,由于管段阻抗不确定性的影响,热网中节点压力的变化率要比管段流量的变化率小。

4 结论

4.1 求解了管段流量、节点压力对管段阻抗的偏导数 $\frac{\partial G}{\partial S}, \frac{\partial p}{\partial S}$, 这两个偏导数矩阵表示管段阻抗的微量变化导致的管段流量和节点压力的变化, 是进行不确定性分析的基础。

4.2 利用 Taylor 一阶展开式分析了随机变量 δG 和 δp 的分布, 以及方差和数学期望等数字特征。当管道的 δS 服从正态分布时, 各管段的 δG 和各节点的 δp 也服从正态分布。

4.3 实例表明, 如果管段阻抗测量或辨识的结果有较大误差时, 管网的流量和节点压力的误差也比较大, 采用这样的参数进行分析, 会影响结果的精确性。

4.4 本文是以供热管网作为例子来分析由于管道

阻抗的不确定而引起的流体网路的不确定性问题, 可以将这种方法应用到供水管网等其他流体网路中。

参考文献

- [1] 贺平, 孙刚. 供热工程[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993
- [2] 江亿. 管网的可调性和稳定性的定量分析[J]. 暖通空调, 1997, 27(3): 1-7
- [3] Dettinger M D, Wilson J L. First order analysis of uncertainty in numerical models of groundwater flow [J]. Water Resources Research, 1981, 17(1): 149-161
- [4] 姚磊华. 地下水水流模型的 Taylor 展开随机有限元法[J]. 煤炭学报, 1996, 21(6): 566-570
- [5] 虎维岳. 地下水管理模型中的参数随机性问题[J]. 煤炭学报, 2000, 25(6): 581-584
- [6] 同济大学数学教研室. 概率论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982

· 会讯 ·

第 4 届居住建筑能源与环境国际研讨会召开

第 4 届居住建筑能源与环境国际研讨会(The 4th International Workshop on Energy and Environment of Residential Buildings, 简称 IWEERB 2007) 于 2007 年 1 月 15~16 日在哈尔滨工业大学市政环境工程学院召开。有来自中国、美国、日本、英国、法国、瑞士、保加利亚、韩国、匈牙利等国家和中国香港地区的 120 多位代表出席。世界卫生组织驻中国办事处代表也出席了本次研讨会。

开幕式由中国哈尔滨工业大学郭骏教授和日本东北大学 Hiroshi Yoshino 教授主持, 哈尔滨工业大学副校长孙和义教授和市政环境工程学院副院长赵庆良教授出席了会议并致欢迎辞。Hiroshi Yoshino 教授, 美国普度大学和哈尔滨工业大学境外兼职博导陈清焰教授, 中国工程院院士、清华大学江亿教授分别以《中国和日本居住建筑的能源现状》、《中国的可持续城市住宅建筑》、《中国建筑能耗调查》为题作了大会主题发言。美国加州伯克利大学劳伦斯国家实验室 Alan Meier 先生为大会作了总结发言。

本届会议共收到国内外论文 132 篇。大会围绕“居住建筑节能与环境——可持续发展”会议主题, 就可持续发展的居住环境与能源政策、居住建筑室内热环境与热舒适、室内空气质量、建筑仿真与实验研究、建筑节能设备技术与开发、建筑新材料、围护结构节能新技术和寒冷地区居住建筑环境与能源等方面进行了广泛而深入的交流。会议的议题中对建筑能耗、气候变化对建筑的影响和高科技并非都对

建筑环境有益等方面进行了着重讨论。

本次会议突出了建筑师与暖通空调工程师在建筑设计和建筑室内环境等方面的紧密结合。主要体现在建筑室内通风设计及建筑小区设计对建筑风环境影响等方面, 既经济又环保的自然通风方式备受关注。

会议还就“中国北方农村居住建筑能源与室内空气品质”问题召开了专题研讨会。以往暖通空调专业的科研人员侧重于对城市居住建筑能源与环境问题进行研究, 此次会议对我国农村居住建筑能源与室内环境问题着重进行了研讨。研讨内容主要包括农村居住建筑能源调查、北方各种炕的能耗研究、农村住宅室内环境、新型节能燃料灶具、生物质能的高效清洁利用、传统民居建筑如何设计以适应社会发展等。提出在农村不应照搬城市建筑模式, 应因地制宜开展理论和实验研究工作。

本次国际会议是哈尔滨工业大学供热、供燃气、通风及空调工程学科首次独立承办的国际系列会议, 市政环境工程学院人工环境科学与工程研究所赵加宁教授、王昭俊副教授、刘京副教授以及该研究所的全体研究生作为组委会成员独立承担了会议组织、筹备和接待等工作。此次会议获得了圆满成功, 得到了与会代表的一致好评。

第 5 届居住建筑能源与环境国际研讨会将于 2008 年在中国湖南省长沙市举行。

(本刊特约通讯员 王昭俊)