

## 基于表面测温等方差拟合的管内流量及温度识别

张 林, 杨 立, 寇 蔚, 范春利

(海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘 要:** 基于表面测温的管内流量及温度识别问题在红外无损检测领域还处于起步阶段, 是目前红外无损检测技术从定性向定量发展的关键理论基础。针对目前流量识别结果较温度识别结果差和基于最小二乘拟合的识别方法精度有限的问题, 使用 Gnielinski 关联式建立管道充分发展段的一维传热模型, 并采用 Levenberg-Marquardt(L-M)算法根据表面检测温度进行管内流体流量及温度的识别。通过理论推导和具体算例得, 待识别参数的相对识别误差值与参数灵敏度最大值和参数真实值乘积的绝对值成反比关系, 含测温误差的温度分布与基于最小二乘拟合得到的温度分布之间的方差不等于测温误差标准偏差的平方与测温点个数的乘积, 同时提出了基于表面测温等方差拟合的管内流量及温度的识别方法。数值实验证明该方法在存在测温误差时仍可以精确识别出管内流量及温度。

**关键词:** 红外无损检测; 反问题; 流量及温度识别; L-M 算法; 传热

**中图分类号:** TK31 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0104002

## Identification of flow rate and temperature in the pipeline based on equal variance fitting of surface temperature measurement

Zhang Lin, Yang Li, Kou Wei, Fan Chunli

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Identification of flow rate and temperature in a heat supply pipeline based on surface temperature measurement is still at the initial stage in the field of infrared nondestructive testing, which is the key theory for the development of infrared nondestructive testing. In order to solve the problem that the flow rate identification result was less accurate than the temperature identification result and the accuracy of the identification method based on least square fitting was limited, a heat transfer model of the fully developed region of the pipeline had been built based on Gnielinski correlation equation, and the identification problem had been solved by Levenberg-Marquardt (L-M) algorithm based on surface temperature measurement. Through theoretical derivation and numerical examples, it has been found that the parameter relative identification error is inversely proportional to the absolute value of the product of the sensitivity maximum and the true value of the parameter, and the variance between the measurement temperature distribution with measurement error and the temperature distribution based on least square fitting is not equal to the

收稿日期: 2017-06-10; 修订日期: 2017-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(51479203)

作者简介: 张林(1991-), 男, 博士生, 主要从事红外无损检测和传热反问题等方面的研究。Email: zhanglin145@163.com

导师简介: 杨立(1962-), 男, 教授, 博士, 主要从事传热传质热流体学应用及量测方面的研究。Email: lyang39@hotmail.com

通讯作者: 范春利(1978-), 男, 副教授, 主要从事红外无损检测和传热反问题等方面的研究。Email: chlfan@163.com

product of the standard deviation of the measurement error and the number of measurement points. The identification method based on equal variance fitting of surface temperature measurement was proposed. Numerical experiments have proved that the method can accurately identify the flow rate and temperature in the pipeline with measurement error.

**Key words:** infrared nondestructive testing; inverse problem; flow rate and temperature identification; L-M algorithm; heat transfer

## 0 引言

在工业生产中,及时掌握和了解设备的工作状态是十分必要的,而与设备连接的管道内的流体流量及温度可以反馈出设备目前的工作状况,因此管内流量和温度的监测对工业生产正常运行具有重要的意义<sup>[1]</sup>。然而在某些情况下,比如有特殊安全或结构完备性要求较高的管道系统,设置内部的流量监测设备和温度测量点比较困难,因此依靠表面测温及时准确确定内部流量和温度对于实际工业生产过程有很大的益处。

红外无损检测技术是基于检测表面温度,诊断出内部边界条件和初始条件、内热源项、热物性参数及几何边界形状等信息。近年来红外无损检测技术由于其检测面积大、不接触、操作简单、检测速度快等优势,在现今的社会生产、生活中得到越来越广泛的应用和研究<sup>[2-3]</sup>。而基于检测表面温度,使用传热反问题算法进行内部信息识别是红外无损检测技术从定性向定量的重点研究问题。Huang 等<sup>[4-5]</sup>使用 Levenberg-Marquardt(L-M)算法和共轭梯度法对边界条件和边界形状的定量识别进行了研究,王广军等<sup>[6]</sup>引入模糊推理方法,求解了设备内部温度分布的识别问题;石宏臣等<sup>[7]</sup>利用储罐筒体外表面的温度分布,对储罐多相界面及罐内流体温度进行了识别,薛齐文等<sup>[8]</sup>使用共轭梯度法对热导率和热边界条件等多宗量识别问题进行了研究,卢涛等<sup>[9]</sup>使用共轭梯度法求解了 T 型管内壁瞬态温度的识别问题。

在使用红外检测技术进行管内流量及温度识别的研究中,杨昆等<sup>[10]</sup>提出了使用管道传热计算公式由排气管表面温度确定柴油机排烟气体温度的计算方法,王焯等<sup>[11]</sup>提出使用 Dittus-Boelter 关联式构建管道充分发展段的一维传热模型和使用 L-M 算法

根据管道外壁温度识别管内流量及温度的方法,结果表明:相对于温度识别结果,流量识别结果较差和受测温误差影响较为明显,以致存在测温误差时,直接反问题识别无法得到可以接受的识别结果;提出基于最小二乘拟合消除测温误差的识别方法来提高识别精度,但是提高的精度还是有限的。

因此,文中使用 Gnielinski 关联式构建管道充分发展段的一维传热模型,并采用 L-M 算法根据表面检测温度进行管内流体流量及温度的识别,推导出参数相对识别误差值与参数灵敏度和参数真实值的关系,找出流量识别结果较温度识别结果差和基于最小二乘拟合的识别方法精度有限的原因,最终通过分析外壁温度的性质提出管内流量及温度新的识别方法。

## 1 模型建立

高温流体的热量通过管内强迫对流换热、管壁导热及外壁自然对流换热和辐射换热传递给环境。应用有限元思想,沿流动方向对管道进行单元划分,以管内入口温度为初始条件,依次对各个单元进行求解,得到所有单元的外壁温度。管道第  $i$  个单元的传热计算模型如图 1 所示。

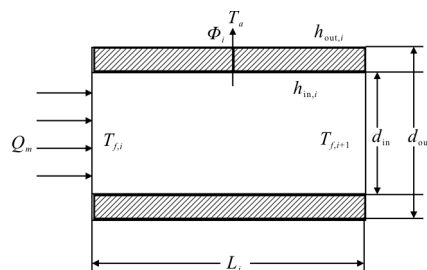


图 1 管道第  $i$  个单元计算模型

Fig.1 Calculation model of the  $i$ th unit of the pipeline

对管道单元模型做如下假设:

(1) 参考换热器计算模型构建思路, 不考虑沿管壁长度上的导热<sup>[2]</sup>;

(2) 各个单元的物性参数按平均温度选取。

第  $i$  个单元的管内流体温度变化为:

$$\Delta T_{f,i} = T_{f,i} - T_{f,i+1} = \frac{\Phi_i}{Q_m c_{p,i} / 3600} \quad (1)$$

式中:  $\Delta T_{f,i}$  为沿轴向流体的温降;  $Q_m$  为管内流体质量流量;  $c_{p,i}$  为流体比热。

稳态传热时, 第  $i$  个单元的管道换热量:

$$\Phi_i = \frac{T_{wi,i} - T_{wo,i}}{\frac{1}{2\pi k_w L_i} \ln \frac{d_{out}}{d_{in}}} = \frac{\frac{T_{f,i} - T_{f,i+1}}{2} - T_{wo,i}}{\frac{1}{\pi h_{in,i} d_{in} L_i} + \frac{1}{2\pi k_w L_i} \ln \frac{d_{out}}{d_{in}}} = \frac{\frac{T_{f,i} - T_{f,i+1}}{2} - T_a}{\frac{1}{\pi h_{in,i} d_{in} L_i} + \frac{1}{2\pi k_w L_i} \ln \frac{d_{out}}{d_{in}} + \frac{1}{\pi h_{out,i} d_{out} L_i}} \quad (2)$$

式中: 下标  $f, wi, wo$  分别表示流体温度、内壁温度和外表壁温度;  $k_w$  为管壁导热系数。

高温流体管内的流体大多属于湍流强迫对流。管内湍流强迫对流传热关联式, 目前常用的较为精确的关联式为 Gnielinski 式<sup>[13]</sup>:

$$Nu_{f,i} = \frac{h_{in,i} d_{in}}{k_{f,i}} = \frac{(f_i/8)(Re_{f,i} - 1000)Pr_{f,i}}{1 + 12.7(f_i/8)^{1/2} (Pr_{f,i}^{2/3} - 1)} c_{f,i} \quad (3)$$

对液体

$$c_{f,i} = \left( \frac{Pr_{f,i}}{Pr_{wi,i}} \right)^{0.01}, \frac{Pr_{f,i}}{Pr_{wi,i}} = 0.05 - 20 \quad (4)$$

对气体

$$c_{t,i} = \left( \frac{T_{f,i}}{T_{wi,i}} \right)^{0.45}, \frac{T_{f,i}}{T_{wi,i}} = 0.5 - 1.5 \quad (5)$$

式中:  $f_i$  为管内湍流流动的 Darcy 阻力系数, 按  $f_i = (1.82 \lg Re_{f,i} - 1.64)^{-2}$  计算。

外壁总换热系数为:

$$h_{out,i} = h_{outc,i} + h_{outr,i} \quad (6)$$

式中:  $h_{outc,i}$  为自然对流换热系数;  $h_{outr,i}$  为辐射换热系

$$T_{f,i+1 \text{ new}} = \left[ Q_m c_{p,i} T_{f,i} \left( \frac{1}{\pi h_{in,i} d_{in} L_i} + \frac{1}{2\pi k_w L_i} \ln \frac{d_{out}}{d_{in}} + \frac{1}{\pi h_{out,i} d_{out} L_i} \right) - 3600 \left( \frac{T_{f,i}}{2} - T_a \right) \right] / \left[ Q_m c_{p,i} \left( \frac{1}{\pi h_{in,i} d_{in} L_i} + \frac{1}{2\pi k_w L_i} \ln \frac{d_{out}}{d_{in}} + \frac{1}{\pi h_{out,i} d_{out} L_i} \right) + 1800 \right] \quad (11)$$

(5) 比较  $T_{f,i+1}$  和  $T_{f,i+1 \text{ new}}$ , 如果二者绝对值小于设定值  $\varepsilon$ , 认为  $T_{f,i+1}$  已经收敛, 否则使用  $T_{f,i+1 \text{ new}}$  替换  $T_{f,i+1}$  返回步骤(2)重新计算, 直到两次计算得到的结

数。

采用大空间自然对流换热实验关联式:

$$Nu_{a,i} = \frac{h_{outc,i} d_{out}}{k_{a,i}} = c (Gr_{a,i} Pr_{a,i})^n \quad (7)$$

式中:  $Gr$  为格拉晓夫数, 反映自然对流强度的量;  $c, n$  为由实验确定的系数和指数。

管外辐射换热量:

$$\Phi_r = h_{outr,i} \pi d_{out} L_i (T_{wo,i} - T_a) = \varepsilon_r c_b \pi d_{out} L_i \left[ \left( \frac{T_{wo,i}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a}{100} \right)^4 \right] \quad (8)$$

式中:  $\varepsilon_r$  为管道外壁发射率;  $c_b$  为黑体辐射系数。

给定模型的几何尺寸、边界条件及物性参数: 管径  $d_{in}, d_{out}$ , 管内流量  $Q_m$ 、入口温度  $T_{f,inlet}$ 、管道外壁发射率  $\varepsilon_r$ 、环境温度  $T_a$  以及一个很小的正数设定值  $\varepsilon$ , 则外壁温度求解步骤:

(1) 给出第  $i$  个单元出口温度  $T_{f,i+1}$  的初值。

(2) 给出第  $i$  个单元外壁温度  $T_{wo,i}$  的初值, 联立公式(1)和(2)求单元内壁温度  $T_{wi,i}$ :

$$T_{wi,i} = T_{wo,i} + \frac{Q_m c_{p,i} (T_{f,i} - T_{f,i+1})}{3600} \cdot \left( \frac{1}{2\pi k_w L_i} \ln \frac{d_{out}}{d_{in}} \right) \quad (9)$$

根据内壁温度  $T_{wi,i}$  和公式(3)~(5)计算得到第  $i$  个单元管内传热系数  $h_{in,i}$ , 联立公式(1)和(2)求单元外壁温度  $T_{wo,i \text{ new}}$ :

$$T_{wo,i \text{ new}} = \frac{T_{f,i} + T_{f,i+1}}{2} - \frac{Q_m c_{p,i} (T_{f,i} - T_{f,i+1})}{3600} \cdot \left( \frac{1}{\pi h_{in,i} d_{in} L_i} + \frac{1}{2\pi k_w L_i} \ln \frac{d_{out}}{d_{in}} \right) \quad (10)$$

比较  $T_{wo,i}$  和  $T_{wo,i \text{ new}}$ , 如果二者绝对值小于设定值  $\varepsilon$ , 认为  $T_{wo,i}$  已经收敛, 否则使用  $T_{wo,i \text{ new}}$  替换  $T_{wo,i}$  重新计算, 直到两次计算得到的结果小于设定值。

(3) 根据公式(6)~(8)计算得到计算管外传热系数  $h_{out,i}$ 。

(4) 联立公式(1)和(2)计算得到第  $i$  个单元出口温度  $T_{f,i+1 \text{ new}}$ :

果小于设定值。

(6) 计算第  $i+1$  个单元的出口温度  $T_{f,i+1}$  和外壁温度  $T_{wo,i+1}$ , 直到计算完所有网格单元。

传热正问题是：在管道内流量及温度和其他所有热物性参数、边界条件均为已知时，求解管道对流换热问题，得到外壁温度分布。

## 2 反问题识别

在反问题识别中，管内流量  $Q_m$  及入口温度  $T_{f,inlet}$  是未知的，需要根据检测得到的管道外壁温度分布和其他已知管道热物性参数、边界条件来确定。文中将管内流量  $Q_m$  设为识别参数  $P_1$ ，入口温度  $T_{f,inlet}$  设为识别参数  $P_2$ ， $P_1$ 、 $P_2$  构成反问题识别参数  $P$ 。通过不断迭代使公式(12)达到最小，得到流量及温度的识别结果。

$$S(P)=[Y-T_{wo}(P)]^T[Y-T_{wo}(P)] \quad (12)$$

式中： $T_{wo}(P)$ 为根据识别参数  $P$  在迭代计算中的值，求解传热正问题得到的外壁温度分布； $Y$  为通过红外检测得到的在某一管内流量及温度下测得的外壁温度分布。

### 2.1 L-M 算法

为使公式(12)取得最小值，对公式(12)求导可得：

$$\nabla S(P)=2\left[-\frac{\partial T_{wo}^T(P)}{\partial P}\right][Y-T_{wo}(P)]=0 \quad (13)$$

对公式(13)中的  $T_{wo}(P)$  进行泰勒级数展开并去掉高阶项，同时加入衰减参数  $\mu_{LM}$  来调节迭代的计算速率，得到 L-M 算法的迭代式<sup>[14]</sup>：

$$P^{n+1}=P^n+[(J^n)^T J^n+\mu_{LM}^n \Omega^n]^{-1}(J^n)^T \cdot [Y-T_{wo}(P^n)] \quad (14)$$

$$J^n=\left[\frac{\partial T_{wo}^T(P^n)}{\partial P^n}\right]^T \quad (15)$$

$$\Omega^n=\text{diag}[(J^n)^T J^n] \quad (16)$$

式中：上标  $n$  为迭代次数。

算法迭代开始时，对  $\mu_{LM}^n$  赋予一个较大的数，以较快的计算速度进行迭代求解，然后降低  $\mu_{LM}^n$  的值得到识别结果。

### 2.2 收敛条件

公式(12)的收敛条件为：

$$S(P)<\varepsilon_{LM} \quad (17)$$

式中： $\varepsilon_{LM}$  为一个很小的正数。当考虑温度分布中含测温误差时， $\varepsilon_{LM}=m\sigma^2$ ，其中  $\sigma$  为测温误差的标准偏差， $m$  为离散的测温点个数<sup>[15]</sup>。

### 2.3 数值计算过程

(1) 对管内流量  $Q_m$ 、入口温度  $T_{f,inlet}$  作初始假设，记为初值  $P^0$  开始迭代计算；

(2) 代入传热正问题模型进行计算，求解得到管道外壁温度分布  $T_{wo}(P^n)$ ；

(3) 根据公式(17)判断是否收敛，如果满足收敛条件则停止迭代计算，否则进入步骤(4)；

(4) 通过公式(14)求得  $P^{n+1}$  返回到步骤(2)。

### 2.4 识别误差

识别结果的相对识别误差定义为：

$$\delta P_j=\left|\frac{(P_j-\hat{P}_j)}{\hat{P}_j}\right| \quad (18)$$

式中： $\hat{P}_j$  为第  $j$  个识别参数的真实值。

将公式(14)代入

$$(P-\hat{P})\cdot/\hat{P} \quad (19)$$

并化简得：

$$(P-\hat{P})\cdot/\hat{P}=\{[J^T(\hat{P})J(\hat{P})+\mu_{LM}\Omega]^{-1}J^T(\hat{P})\cdot[T_{wo}(P)-Y]\}\cdot/\hat{P}\propto \left[\frac{J_{\max}(\hat{P}_1)^{-1}}{J_{\max}(\hat{P}_2)^{-1}}\right]\cdot/\hat{P}=1\cdot\left[\frac{J_{\max}(\hat{P}_1)\cdot\hat{P}_1}{J_{\max}(\hat{P}_2)\cdot\hat{P}_2}\right] \quad (20)$$

联立公式(18)和公式(20)可得：

$$\delta P_j=\left|\frac{(P_j-\hat{P}_j)}{\hat{P}_j}\right|\propto 1/\left|J_{\max}(\hat{P}_j)\cdot\hat{P}_j\right| \quad (21)$$

公式(21)表明，参数的相对识别误差值反比于参数灵敏度最大值和参数真实值乘积的绝对值。

根据公式(21)定义相对灵敏度，对多个参数的相对识别误差大小进行评估：

$$J_{rel,j}=J_{\max}(\hat{P}_j)\cdot\hat{P}_j \quad (22)$$

注意到，参数的相对识别误差  $\delta P_j$  反比于相对灵敏度  $J_{rel,j}$  的绝对值；同时，相对灵敏度  $J_{rel,j}$  单位为温度，不随参数  $P_j$  单位的不同而变化，因此相对灵敏度  $J_{rel,j}$  不仅可以对多个单位相同的参数进行评估，还可以对多个单位不同的参数进行评估。

## 3 算例计算及分析

文中算例中，管道内径为 0.108 m，壁厚 0.003 m，管道长度为 1.0 m。管内流体为空气，管壁为碳钢 (17.6 W/(m·K))，管外为空气自然对流，环境温度为 298.15 K，管道表面发射率为 0.95。为保证管内流体状态为湍流和探究管内流量和入口温度对识别结果

的影响, 设定本文所讨论的管内空气流量的范围为:  $100 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \leq Q_m \leq 800 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ , 管内空气入口温度的范围为:  $350 \text{ K} \leq T_{f,\text{inlet}} \leq 600 \text{ K}$ 。

### 3.1 外壁温度分布和外壁温度对管内流量及温度的灵敏度

管内入口温度为 400 K 时, 外壁温度随管内流量  $Q_m$  变化如图 2 所示, 管内流量  $Q_m$  为  $250 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  时, 外壁温度随管内入口温度  $T_{f,\text{inlet}}$  变化如图 3 所示。从图 2 和图 3 可以看出, 在不同的工况下, 管道的外壁温度分布从入口处到出口处的斜率变化均非常小, 均可近似为直线。管道外壁最大温差是指在某一工况的管道外壁温度分布中, 最大温度值和最小温度值之差; 在文中, 管道外壁最大温差即为入口处外壁温度和出口处外壁温度之差。对比不同工况的外壁温度分布可以看出, 管道外壁最大温差随管内流量增大而减小, 随管内入口温度增大而增大。

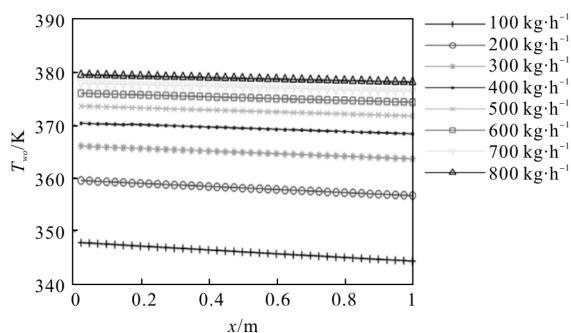


图 2 管内入口温度为 400 K 时, 外壁温度随管内流量变化  
Fig.2 Outer wall temperature with different pipeline flow rate when the inlet temperature is 400 K

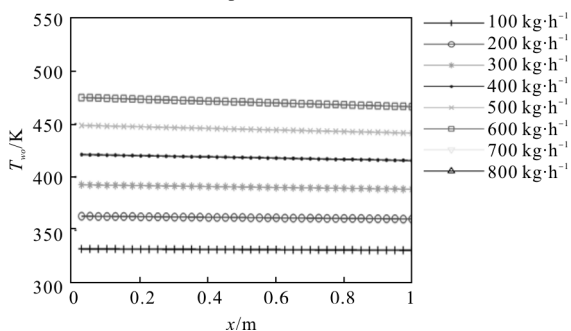


图 3 管内流量为  $250 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  时, 外壁温度随管内入口温度变化  
Fig.3 Outer wall temperature with different inlet temperature when the pipeline flow rate is  $250 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$

外壁温度对管内流量的相对灵敏度  $J_{\text{rel}}(Q_m)$  和对管内入口温度的相对灵敏度  $J_{\text{rel}}(T_{f,\text{inlet}})$  的变化趋势如图 4 和图 5 所示:  $J_{\text{rel}}(Q_m)$  随流量增大而减小, 随温度

增大而增大;  $J_{\text{rel}}(T_{f,\text{inlet}})$  随流量增大而增大, 随温度增大而增大。同时可得, 无论管内流量与入口温度如何变化,  $J_{\text{rel}}(Q_m)$  的绝对值始终小于  $J_{\text{rel}}(T_{f,\text{inlet}})$  的绝对值。因此, 流量的相对识别误差  $\delta Q_m$  大于温度的相对识别误差  $\delta T_{f,\text{inlet}}$ , 即相同的温度差  $Y-T_{w_o}(P)$  下, 流量的识别值相对于入口温度的识别值更远离真实值, 这就是相对于温度识别结果, 流量识别结果较差和受测温误差影响更为明显的根本原因。

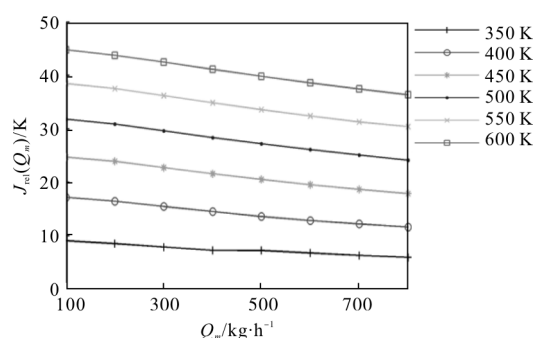


图 4 不同管道入口温度下外壁温度对管内流量的相对灵敏度

Fig.4 Relative sensitivity of outer wall temperature to pipeline flow rate with different inlet temperature

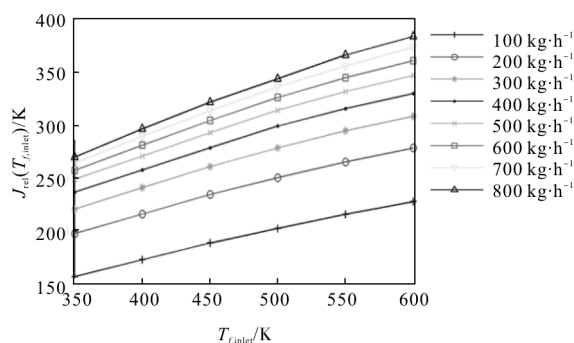


图 5 不同管内流量下外壁温度对管内温度的相对灵敏度

Fig.5 Relative sensitivity of outer wall temperature to inlet temperature with different pipeline flow rate

### 3.2 存在测温误差时管内流量及温度识别

在存在测温误差时, 一般考虑测温误差呈正态分布<sup>[15]</sup>。从图 2 和图 3 可得, 管内流量越大, 管内入口温度越小, 则管道外壁最大温差越小。将管内流量  $800 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  和入口温度 350 K 代入正问题模型, 可求得文中讨论范围内最小的管道外壁最大温差为 0.65 K。而测温误差的标准偏差必须小于最小的管道外壁最大温差, 因此文中测温误差的标准偏差分别取  $\sigma=0.2 \text{ K}$ ,  $\sigma=0.5 \text{ K}$ 。

识别过程中, 测温点越多, 获得的外壁温度信息

越多;同时在存在测温误差时,测温点越多,测温误差越接近正态分布,越有利于得到更加准确的识别结果;然而在实际工作中,测温点的个数受限于热像仪的分辨率和测量距离,不能够无限增加。文中测温点数取 40 个。参考文献[11]提出基于最小二乘拟合消除测温误差的识别方法,用以提高管内流量和温度的识别精度,但是提高的精度还是有限的。

基于最小二乘拟合得到的温度分布是:当含测温误差的温度分布数据与待求温度分布上温度数据的方差最小时得到的温度分布;也就是说,含测温误差的温度分布数据和基于最小二乘拟合得到的温度分布数据的方差不等于  $m\sigma^2$ , 即测温误差标准偏差的平方与测温点个数的乘积。因此,基于最小二乘拟合得到的温度分布是存在拟合误差的,并不能精确贴合准确温度分布。

直观上,使用最小二乘拟合,对管内流量  $Q_m$  为  $250\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$  和入口温度  $T_{f,\text{inlet}}$  为  $400\text{K}$  时测温误差  $\sigma=0.5\text{K}$  的外壁温度分布进行测温误差消除工作,如图 6 所示。可以看出基于最小二乘拟合得到的外壁温度分布的确存在拟合误差,并不能精确贴合准确温度分布。

因而基于最小二乘拟合的识别方法精度受限于拟合误差而无法进一步提高。为消除拟合误差、进一步提高识别精度,文中提出结合温度分布近似呈直线  $(ax+b)$  和测温误差的均值  $\mu=0$ , 标准偏差为  $\sigma$  的特点,进行测温误差的等方差消除工作:

$$a = \frac{1}{2 \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2} \left\{ 2 \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(T_{wo,i} - \bar{T}_{wo}) \pm \sqrt{\left[ 2 \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(T_{wo,i} - \bar{T}_{wo}) \right]^2 - 4 \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \left[ \sum_{i=1}^m (T_{wo,i} - \bar{T}_{wo})^2 - m\sigma^2 \right]} \right\} \quad (27)$$

可求得两条基于等方差拟合得到的温度分布,而且两条温度分布和含测温误差的温度分布数据的方差等于  $m\sigma^2$ 。也就是说,基于等方差拟合求得的两条温度分布中的一条必然可以精确贴合准确温度分布。当对一元二次方程式(26)中

$$\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 a^2 - 2 \left[ \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(T_{wo,i} - \bar{T}_{wo}) \right] a + \sum_{i=1}^m (T_{wo,i} - \bar{T}_{wo})^2 - m\sigma^2 = 0 \quad (28)$$

进行极小值求解,可得到极小值处斜率值:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(T_{wo,i} - \bar{T}_{wo})}{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2} \quad (29)$$

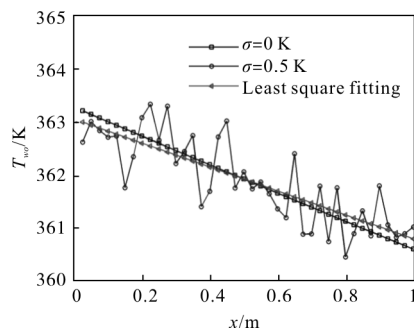


图 6 管内流量为  $250\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 、入口温度为  $400\text{K}$  时,基于最小二乘拟合得到的外壁温度分布

Fig.6 Outer wall temperature based on least square fitting when the pipeline flow rate is  $250\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$  and the inlet temperature is  $400\text{K}$

$$\mu = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [T_{wo,i} - (ax_i + b)] = 0 \quad (23)$$

化简公式(23)得:

$$b = \bar{T}_{wo} - a\bar{x} \quad (24)$$

代入标准偏差公式

$$\sum_{i=1}^m [T_{wo,i} - (ax_i + b)]^2 = m\sigma^2 \quad (25)$$

并化简得:

$$\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 a^2 - 2 \left[ \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(T_{wo,i} - \bar{T}_{wo}) \right] a + \sum_{i=1}^m (T_{wo,i} - \bar{T}_{wo})^2 - m\sigma^2 = 0 \quad (26)$$

将含测温误差的温度分布数据代入公式(24)和(27)

跟参考文献[16,17]中推得的直线最小二乘拟合斜率相同。所以,基于最小二乘拟合得到的温度分布刚好处于基于等方差拟合求得的两条温度分布中间。同时,基于最小二乘拟合得到的温度分布与准确温度分布之间的斜率差为:

$$\delta a = \pm \frac{1}{2 \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\left[ 2 \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(T_{wo,i} - \bar{T}_{wo}) \right]^2 - 4 \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \left[ \sum_{i=1}^m (T_{wo,i} - \bar{T}_{wo})^2 - m\sigma^2 \right]} \quad (30)$$

为直观说明,进行管内流量  $Q_m$  为  $250\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$  和入口温度  $T_{f,\text{inlet}}$  为  $400\text{K}$  时测温误差  $\sigma=0.5\text{K}$  的

外壁温度分布的测温误差消除工作如图 7 所示。由此可得，基于等方差拟合求得的两条温度分布中的一条精确贴合准确温度分布，而另一条则偏移到以基于最小二乘拟合得到的温度分布为对称轴的对称侧。

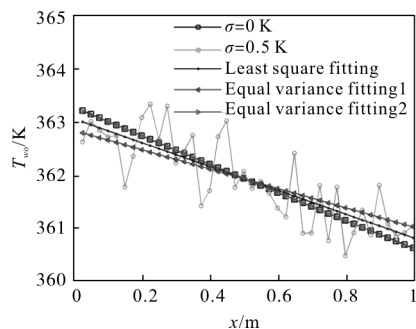


图 7 管内流量为 250 kg·h<sup>-1</sup>、温度为 400 K 时，基于等方差拟合得到的温度分布

Fig.7 Outer wall temperature based on equal variance fitting when the pipeline flow rate is 250 kg·h<sup>-1</sup> and the inlet temperature is 400 K

同时，明确了直接反问题识别得到的温度分布、基于最小二乘拟合得到的温度分布和基于等方差拟合得到的温度分布之间的关系：直接反问题识别得到的温度分布在基于等方差拟合求得的两条温度分布之间震荡；基于最小二乘拟合得到的温度分布处于基于等方差拟合求得的两条温度分布对称轴上。因此，直接反问题识别在流量识别较温度识别差的限制下，无法得到可以接受的流量识别结果；基于最小二乘拟合的识别方法可以保证流量识别稳定在可以接受的识别结果，但识别精度无法进一步提高；而对基于等方差拟合得到的两条温度分布分别进行管内流量及温度识别工作，得到的两组识别结果中必有一组贴合真实值。

因此，文中在存在测温误差时，提出新的管内流量及温度的识别方法——基于表面测温等方差拟合的识别方法：对管道外壁进行两次红外检测工作，得到两条含测温误差的外壁温度分布。分别对两条温度分布进行等方差拟合，得到四组  $a$ 、 $b$  的解；分别对四组  $a$ 、 $b$  构成的温度分布使用 L-M 算法进行管内流量及温度的识别工作，得到四组识别结果；对比前两组解和后两组解，对其中最相近的识别结果取平均，得到管内流量及温度的最终识别结果。

使用基于表面测温等方差拟合的识别方法进

行存在测温误差时的管内流量及入口温度识别工作，识别结果见表 1 和 2。从表中可看出，识别结果在存在测温误差时最大误差不超过 1%，在流量识别结果较温度识别结果差的限制下也可以精确识别出管内流量及温度。

表 1  $\sigma=0.2$  K 时不同工况下的流量及入口温度识别结果

Tab.1 Identification results of pipeline flow rate and inlet temperature in different conditions with  $\sigma=0.2$  K

$\hat{Q}_m/\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\hat{T}_{f,\text{inlet}}/\text{K}$	$Q_m/\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T_{f,\text{inlet}}/\text{K}$	$\delta Q_m$	$\delta T_{f,\text{inlet}}$
100	350	99.63	350.04	0.37%	0.01%
100	600	100.23	599.94	0.23%	0.01%
250	400	249.24	400.08	0.30%	0.02%
250	600	249.28	600.19	0.29%	0.03%
400	400	401.32	399.92	0.33%	0.02%
800	350	803.52	349.83	0.44%	0.05%
800	600	796.72	600.24	0.41%	0.04%

表 2  $\sigma=0.5$  K 时不同工况下的流量及入口温度识别结果

Tab.2 Identification results of pipeline flow rate and inlet temperature in different conditions with  $\sigma=0.5$  K

$\hat{Q}_m/\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$\hat{T}_{f,\text{inlet}}/\text{K}$	$Q_m/\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$T_{f,\text{inlet}}/\text{K}$	$\delta Q_m$	$\delta T_{f,\text{inlet}}$
100	350	100.68	349.89	0.68%	0.03%
100	600	99.45	600.66	0.55%	0.11%
250	400	251.52	399.83	0.61%	0.04%
250	600	248.70	600.54	0.52%	0.09%
400	400	397.84	400.16	0.54%	0.04%
800	350	805.92	349.89	0.74%	0.03%
800	600	804.64	599.46	0.58%	0.09%

## 4 结论

文中针对目前流量识别结果较温度识别结果差和基于最小二乘拟合的识别方法精度有限的问题，使用 Gnielinski 关联式建立管道充分发展段的一维传热模

型,采用 L-M 算法基于外壁温度分布对管内流量及温度的识别进行了研究,找出流量识别结果较温度识别结果差和基于最小二乘拟合的识别方法精度有限的原因,并通过分析外壁温度分布的性质提出了基于表面测温等方差拟合的识别方法。主要结论有:

(1) 参数的相对识别误差值反比于相对灵敏度的绝对值;而外壁温度对管内流量相对灵敏度的绝对值小于外壁温度对入口温度相对灵敏度的绝对值,因此相对于入口温度识别结果,管内流量识别结果较差和受测温误差影响更为明显;

(2) 存在测温误差时,基于最小二乘拟合的识别方法由于存在拟合误差而无法进一步提高识别精度,而基于表面测温等方差拟合的识别方法仍可以精确识别出管内流量及入口温度;

(3) 直接进行存在测温误差的管内流量及温度的反问题识别时,识别得到的温度分布有较大的收敛区间,识别结果极易产生较大的偏移,识别精度低。而这一特点普通存在各种反问题的研究工作,因此下一步的研究重点是,消除更多反问题中识别结果的偏移,提高识别精度。

#### 参考文献:

- [1] Liang Guowei, Wen Yingjie, Huang Zhenwei, et al. Analysis and studies for measuring principle and affecting factors of hot type gas flow meters [J]. *Journal of China Jiliang University*, 2008, 19(3): 201-205. (in Chinese)
- [2] Tian Gan, Yang Zhengwei, Zhu Jietang, et al. Vibration characteristics and acoustic chaos analysis of ultrasonic infrared thermal wave test [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 39-44. (in Chinese)
- [3] Li Meihua, Zeng Zhi, Shen Jingling, et al. Numerical simulation of defects depth quantitative measurement in pulsed infrared nondestructive testing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 875-879. (in Chinese)
- [4] Huang C H, Liu C Y. A three-dimensional inverse geometry problem in estimating simultaneously two interfacial configurations in a composite domain [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2010, 53(1-3): 48-57.
- [5] Huang C H, Chen C W. A boundary element-based inverse-problem in estimating transient boundary conditions with conjugate gradient method[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1998, 42(5): 943-965.
- [6] Wang G J, Zhu L N, Chen H. A decentralized fuzzy inference method for solving the two-dimensional steady inverse heat conduction problem of estimating boundary condition [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2011, 54(13): 2782-2788.
- [7] Shi Hongchen, Zhang Xiaohuai, Sun Fengrui, et al. Inverse heat transfer algorithm for multi-phase interface detection of oil tank based on infrared imaging temperature measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 24-29. (in Chinese)
- [8] Xue Qiwen, Zhang Xueshan. Research of inverse problem of thermo-mechanical coupling [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(18): 157-168. (in Chinese)
- [9] Lu Tao, Li Chunyong. Identifying of inner wall unsteady temperature at T-junction using conjugate gradient method [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2011, 10(1): 45-50. (in Chinese)
- [10] Yang Kun, Yang Li, Su Gao, et al. Diagnosis of exhaust temperature non-uniformity of diesel engine based on infrared temperature measurement [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(3): 244-248. (in Chinese)
- [11] Wang Ye, Yang Li. Research on identification of flow rate and temperature in the pipeline[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2017, 38(4): 477-480. (in Chinese)
- [12] Men Qiming. Study on heat transfer mechanism and calculation method of passive residual heat removal heat exchanger [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [13] Gnielinski V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flows [J]. *International Chemical Engineering*, 1976, 6(2): 359-368.
- [14] Chen Lin, Yang Li, Fan Chunli, et al. Quantitative identification of coating thickness and debonding defects of TBC by pulse phase technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2050-2056. (in Chinese)
- [15] Ozisik M N. Inverse Heat Transfer [M]. Britain: Taylor & Francis, 2000.
- [16] Gao Yongxiang. Calculating methods to standard error of parametric ratio of linear fitting [J]. *Journal of Shanxi University*, 2003, 26(4): 320-323. (in Chinese)
- [17] Fan Wenbo, Wang Wenlong, Chen Yuelong, et al. Methods for least squares fitting of a straight line and their application in geochronology[J]. *Geological Review*, 2013, 59(5): 801-815. (in Chinese)