

充分发展湍流管道内壁边界的红外定量识别*

张林, 杨立, 范春利

(海军工程大学动力工程学院, 湖北武汉 430033)

摘要:基于导热的管道内壁边界识别已发展成熟,但更贴合实际的湍流管道内壁边界的定量识别尚未见报道。通过关联 COMSOL 和 MATLAB,利用有限元方法和 Levenberg-Marquardt 算法对二维轴对称充分发展的湍流管道内壁边界形状的稳态识别进行研究。数值实验证明了本方法的有效性。结果表明,在含内壁缺陷的湍流管道中,外壁最大温差和由缺陷引起的绝对温差并不是同步增加的;在进行内壁边界反问题识别时,由于绝对温差中负增长的出现,绝对温差越大,识别结果未必越好;识别精度在不规则内壁终点处略微变差。

关键词:反问题;边界识别;Levenberg-Marquardt 算法;COMSOL

中图分类号:TK38 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)05-185-08

Infrared quantitative identification for inner boundary of fully developed turbulent pipeline

ZHANG Lin, YANG Li, FAN Chunli

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

Abstract: Although the identification of pipelines' inner boundary based on heat conduction has been matured, the quantitative identification of inner boundary of turbulent pipe, which is more practical, has scarcely been reported yet. The steady-state identification of the inner boundary shape of a turbulent pipe with fully developed two-dimensional axial symmetry was studied through the connection of COMSOL and MATLAB, as well as the use of finite element method and Levenberg-Marquardt method. The validity of this method was proved by numerical experiments. The results show that, in a turbulent pipeline with a defective inner boundary, the maximum temperature difference of outer wall and the absolute temperature difference caused by defect do not increase synchronously. During the identification of inverse inner boundary problem, due to the negative growth in the absolute temperature difference, the identification results do not necessarily improve with the increase of absolute temperature difference. The identification accuracy slightly deteriorates at the end of the irregular inner boundary.

Keywords: inverse problem; boundary identification; Levenberg-Marquardt method; COMSOL

许多热力设备的管道内壁长期受管内环境的影响产生金属损失、腐蚀等缺陷,对设备的安全运行带来隐患^[1]。因此,对管道内壁边界的检测和监测具有重要意义^[2-4]。

红外无损检测技术是指通过红外热像仪得到设备表面温度的变化情况来判断设备内部信息的技术,由于其非接触、无损伤、检测速度快、扫描面积大等优势已成为一种非常有效的无损检测技术^[5-7],被广泛应用于石化、冶金、电力等领域。

传热反问题理论是开展内部缺陷红外定量检测与识别的重要基础。基于导热反问题的红外检测研究已实现了对热物性参数、内热源强度、边界

条件和边界形状等参数的精确检测和识别^[8-11]。基于对流换热反问题的研究,由于流动的复杂性,不适定性严重,尚处于起步阶段。湍流由于质点相互掺混、碰撞的流动,不适定性更严重,解的存在性与唯一性更难确定,湍流对流换热反问题的研究比层流对流换热反问题的研究发展更慢^[12]。

基于对流换热反问题的管道或平板通道的定量识别已由一些学者进行了研究和讨论^[13-14]。Chen 等^[15-16]使用共轭梯度法估计二维轴对称层流管道外壁的未知霜层边界形状和管道内壁上的未知污垢边界形状;Rouizi 等^[17]使用红外热像仪测量得到 1 mm 厚的平板微通道的外表面温度分布,基于测得的外表面温度分布对微通道内流体

* 收稿日期:2018-06-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51479203)

作者简介:张林(1991—),男,山东枣庄人,博士研究生,E-mail:zhanglin145@163.com;

范春利(通信作者),男,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:chlfan@163.com

的温度分布进行了估计。

在工业生产中,大多数管道内流体为湍流流动状态。随着工业生产对设备安全性和可靠性的要求越来越高,发展基于对流换热反问题的湍流管道内壁边界的红外定量检测和识别具有重要的意义,但是关于湍流管道内壁边界的识别研究尚未见相关报道。

在实际中,内壁缺陷的存在往往会破坏管道几何的对称性,但是直接开展三维管道内壁边界识别研究,管道内流体变化复杂,管壁轴向和周向的传热互相影响,反问题研究的不适性强,内壁边界识别规律难以分析归纳。参考 Chen 等^[15-16]、肖丹等^[18]的研究,首先开展二维轴对称管道的研究工作,为三维管道内部缺陷定量识别提供理论依据。

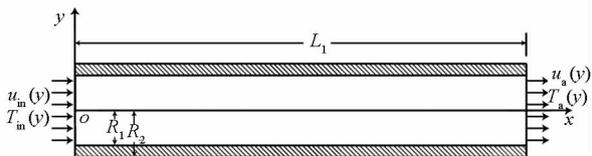
本文提出基于管道外壁温度分布,使用多物理场软件 COMSOL 建立充分发展的湍流管道模型,并与传热反问题算法——Levenberg-Marquardt 算法相结合的识别方法,对二维轴对称充分发展的湍流管道内壁边界的识别问题进行研究。

1 对流换热正问题

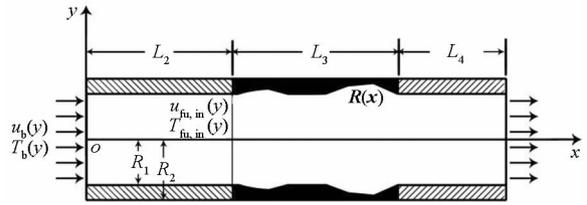
构建如图 1 所示的分段充分发展的湍流管道模型。管道内部为远高于环境温度的热流体,管道置于自然环境中,通过管道外壁的自然对流和辐射换热将热量传递给周围环境。

对入口段和充分发展段分别进行建模,充分发展段会出现进出口效应,而且管壁轴向导热在分段处中断,因此设置虚拟管道前置入口段 L_1 用以保证流体形成充分发展流,设置虚拟管道前置段 L_2 和虚拟管道后置出口段 L_4 来避免进出口效应和轴向导热的影响。本文研究的管道检测段为图中管道黑色区域 L_3 。 R_1 和 R_2 分别为管道内壁和外壁的半径。入口段 L_1 入口的流体均匀速度和均匀温度分别为 u_{in} 和 T_{in} ,检测段 L_3 入口的流体速度和温度分别为 $u_{in,in}$ 和 $T_{in,in}$ 。在工作一段时间后,假定在管道检测段 L_3 内壁上生成了一层腐蚀缺陷,缺陷处的不规则内壁边界形状为 $R(x)$ 。

对管道的流动和传热特性进行数值模拟,作如下合理假设^[19]:



(a) 入口段
(a) Entrance region



(b) 充分发展段
(b) Fully developed region

图 1 管道的物理模型

Fig. 1 Schematic of pipeline

- 1) 管内流体稳态且不可压缩;
- 2) 流体在边界上为无滑移流动;
- 3) 忽略重力影响。

则管道模型内部流体流动的质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程为:

$$\rho \nabla \cdot (\mathbf{u}) = 0 \tag{1}$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot \{ -p\mathbf{I} + \mu[\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T] \} \tag{2}$$

$$\rho c_p \mathbf{u} \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \tag{3}$$

其中, \mathbf{u} 是速度矢量, \mathbf{I} 是单位矩阵, ρ 是流体密度, p 是压力, μ 是动力黏度, c_p 是定压比热, T 是温度, k 是导热系数。

管壁稳态导热的能量守恒方程为:

$$\nabla^2 T = 0 \tag{4}$$

对流换热正问题是在管道检测段 L_3 的内壁边界形状 $R(x)$ 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管道检测段 L_3 外壁温度分布。

对于充分发展的湍流管道内壁形状识别问题,管道内壁在每次迭代过程中都会发生变化,因此管道内流场不能被指定,需要反复求解对流换热问题,计算过程中的模型自动重建、网格自动划分和求解计算是必需的。

多物理场软件 COMSOL 可以在模型计算过程中自动重建几何模型、更新网格和求解计算,同时 COMSOL 和 MATLAB 之间不需要使用输入/输出文件就可以进行数据传递^[20-21],可以用来计算许多实际而复杂的对流换热问题。因此,本文使用 COMSOL 对对流换热正问题进行求解,在 MATLAB 中使用读取函数 mphinterp 直接读取正问题的外壁温度分布。

2 反问题识别

对于反问题,不规则内壁边界 $R(x)$ 被认为是未知的,而式(1)~(4)中其他所有热物性参数、边界条件均为已知的。此外,在管外壁上通过

红外热像仪采集得到的温度分布被认为是可用的,将测量得到的温度用 \mathbf{Y} 表示, $\mathbf{Y} = [Y_1, Y_2, \dots, Y_i, \dots, Y_m]^T$, $i = 1 \dots m$, 其中 m 表示测温点数目。反问题的求解方法是以式(5)最小化的方式获得:

$$S(\mathbf{R}) = [\mathbf{Y} - \mathbf{T}(\mathbf{R})]^T [\mathbf{Y} - \mathbf{T}(\mathbf{R})] \quad (5)$$

式中: $\mathbf{T}(\mathbf{R})$ 为在迭代计算中,根据识别参数 \mathbf{R} 求解对流换热正问题得到的管道检测段 L_3 外壁温度分布。

2.1 Levenberg-Marquardt 算法

为使式(5)取最小值,通过求导可得^[22-23]:

$$\nabla S(\mathbf{R}) = 2 \left[-\frac{\partial \mathbf{T}^T(\mathbf{R})}{\partial \mathbf{R}} \right] [\mathbf{Y} - \mathbf{T}(\mathbf{R})] = 0 \quad (6)$$

对式(6)中的 $\mathbf{T}(\mathbf{R})$ 进行泰勒级数展开并去掉高阶项,并加入衰减参数 μ_{LM}^n 来调节迭代速度,得到 Levenberg-Marquardt 算法的迭代式,其表达式为:

$$\mathbf{R}^{n+1} = \mathbf{R}^n + [(\mathbf{J}^n)^T \mathbf{J}^n + \mu_{\text{LM}}^n \mathbf{\Omega}^n]^{-1} (\mathbf{J}^n)^T \cdot [\mathbf{Y} - \mathbf{T}(\mathbf{R}^n)] \quad (7)$$

式中,

$$\mathbf{J}^n = \left[\frac{\partial \mathbf{T}^T(\mathbf{R}^n)}{\partial \mathbf{R}^n} \right]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{\Omega}^n = \text{diag}[(\mathbf{J}^n)^T \mathbf{J}^n] \quad (9)$$

n 为迭代次数。

迭代开始, μ_{LM}^n 采用一个较大的数,以较快的迭代速度进行识别求解,然后降低 μ_{LM}^n 的值得到最终解。

2.2 收敛条件

通过 Levenberg-Marquardt 算法迭代识别管道检测段 L_3 内壁边界形状的收敛条件为:

$$S(\mathbf{R}) < \varepsilon \quad (10)$$

式中, ε 为一个很小的正数^[24]。

2.3 MATLAB 调用 COMSOL

MATLAB 调用 COMSOL 的语句为:

```
model = mphload ('E: \ pipeline _ heat _ thtransfer');
```

其中,“E: \ pipeline _ heat _ thtransfer”为求解外壁温度分布的 mph 文件的所在路径, mphload 表示 MATLAB 加载 COMSOL 的 mph 文件。

2.4 数值计算过程

通过 Levenberg-Marquardt 算法根据管道外壁温度分布定量识别管道检测段 L_3 内壁边界形状 $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ 的迭代求解步骤:

1) 给出管道内壁边界形状 $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ 的初始假设 \mathbf{R}^0 作为输入,开始迭代计算;

2) 将估计值 \mathbf{R}^n 传递到 COMSOL 中, MATLAB 调用 COMSOL, 求解得到管道检测段 L_3 的外壁温度分布 $\mathbf{T}(\mathbf{R}^n)$;

3) 根据式(10)判断是否收敛,如果收敛则输出结果,否则继续;

4) 采用迭代式(7)修正识别参数 \mathbf{R}^n , 求得 \mathbf{R}^{n+1} 返回到步骤2。

3 仿真结果与讨论

数值实验中,建立二维轴对称管道对流换热模型,管道内半径 R_1 为 0.047 m,壁厚 0.010 m。依据管道湍流充分发展经验公式 $L/D \geq 60$, 管道模型数据取为:0 ~ 5.64 m 为虚拟管道前置入口段 L_1 , 0 ~ 0.5 m 为虚拟管道前置段 L_2 , 0.5 ~ 1.5 m 为管道检测段 L_3 , 1.5 ~ 1.8 m 为虚拟管道后置出口段 L_4 , 管道总长为 7.44 m。

管内流质为空气,物性参数取自 COMSOL 材料库。管壁导热系数为 $17.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; 外界环境温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 管道外壁发射率为 0.95。使用 COMSOL 5.2, 采用标准 $k - \varepsilon$ 湍流模型,进行正问题模型的求解计算。湍流模型收敛条件设置为 1×10^{-6} 。

管道内壁缺陷只存在于管道检测段 L_3 , 虚拟管道段 L_1 、 L_2 和 L_4 内壁均不存在缺陷。在管道检测段 L_3 外壁表面上均匀布置的测温点数为 11 个,内壁边界均匀分布的离散点亦为 11 个。算例中,含内壁缺陷的管道内壁边界形状 $R(x)$ 为:

$$R(x) = 0.047 + 0.007 \sin[(x - 0.5)\pi], 0.5 \leq x \leq 1.5 \quad (11)$$

3.1 不规则内壁边界的红外特征规律

对模型的流体域和管道壁固体域均进行结构化网格剖分。为保证模型的计算精度,对模型网格进行独立性检验。对径向(流体域 + 固体域) \times (虚拟入口段 L_1 、虚拟前置段 L_2 、检测段 L_3 和虚拟出口段 L_4) 的网格划分分别为 $(12 + 5) \times (141 + 12 + 100 + 7)$ 、 $(25 + 5) \times (282 + 25 + 200 + 15)$ 和 $(50 + 5) \times (564 + 50 + 400 + 30)$ 的 3 套网格进行试算。在检测段入口速度 $u_{\text{in}} = 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、入口温度 $T_{\text{in}} = 573.15 \text{ K}$ 的情况下,得到管道检测段 L_3 外壁面中心处的温度分别为 487.15 K, 491.68 K, 491.91 K, 相对误差分别为 0.93% 和 0.05%。为同时保证计算精度和计算效率,选用第二套网格划分方案。

使用第二套网格划分方案,对管道内壁形状为式(11)的管道检测段 L_3 进行网格划分,如图 2

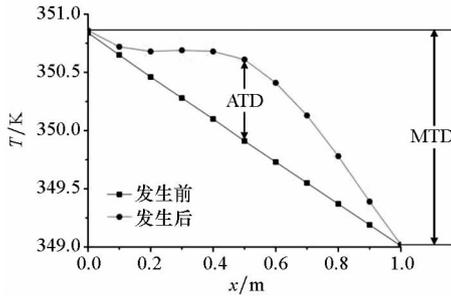
所示。可以看出,管道检测段 L_3 管壁中间部分的厚度小于两端部分的厚度,且从中间部分到两端部分内壁面呈圆滑过渡。



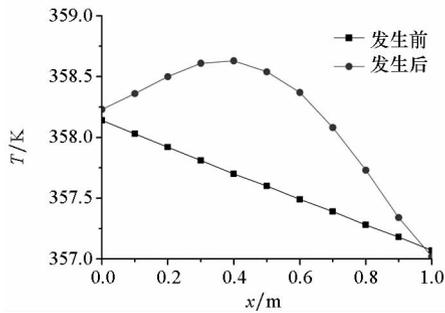
图 2 管道检测段 L_3 的网格划分

Fig. 2 Grid-meshing of pipeline inspection section L_3

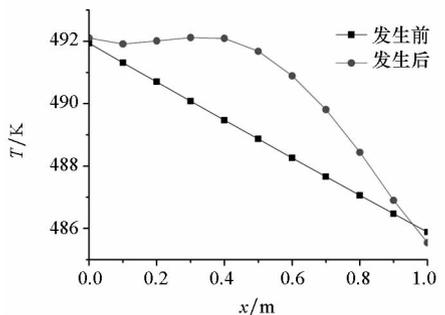
图 3 为管道检测段 L_3 检测表面温度分布和管道检测段 L_3 入口速度 $u_{fu,in}$ 、入口温度 $T_{fu,in}$ 的关系。图中,检测表面最大温差 (Maximum Temperature Difference, MTD) 是指管道检测段 L_3



(a) $u_{fu,in} = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $T_{fu,in} = 373.15 \text{ K}$



(b) $u_{fu,in} = 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $T_{fu,in} = 373.15 \text{ K}$



(c) $u_{fu,in} = 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $T_{fu,in} = 573.15 \text{ K}$

图 3 内壁发生变化前后,检测表面的温度分布和入口速度 $u_{fu,in}$ 、入口温度 $T_{fu,in}$ 的关系

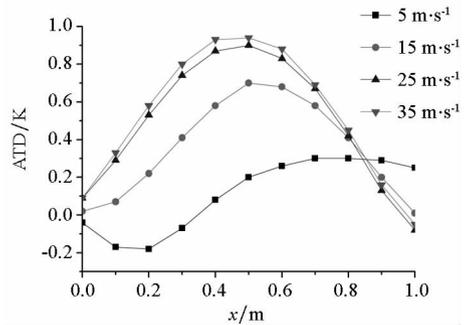
Fig. 3 Relationship between temperature distribution of outer pipeline surface, the inlet velocity $u_{fu,in}$ and the inlet temperature $T_{fu,in}$ before and after corrosion

外壁温度分布中最高温度值和最低温度值之差;而内壁变化后管道检测段 L_3 外壁温度分布和内

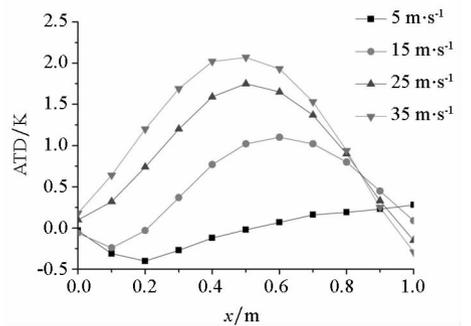
壁没有发生变化时的温度分布之差为绝对温差 (Absolute Temperature Difference, ATD)。

由图 3 可得,在内壁无缺陷时,管壁温度分布呈线性降低,且入口速度 $u_{fu,in}$ 越慢,入口温度 $T_{fu,in}$ 越高,换热越充分,管壁温度分布最大温差越大;存在内壁缺陷时,管壁温度分布随内壁缺陷变化,最大温差略有变化,且入口速度 $u_{fu,in}$ 越慢,入口温度 $T_{fu,in}$ 越高,管壁温度分布最大温差越大。综上,缺陷的存在与否,不改变外壁温度分布最大温差随入口速度 $u_{fu,in}$ 、入口温度 $T_{fu,in}$ 的变化规律。

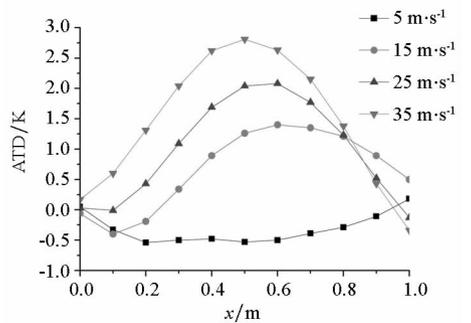
图 4 和图 5 分别为管道检测段 L_3 检测表面温度分布绝对温差和管道检测段 L_3 入口速度 $u_{fu,in}$ 、入口温度 $T_{fu,in}$ 的关系。



(a) $T_{fu,in} = 373.15 \text{ K}$



(b) $T_{fu,in} = 473.15 \text{ K}$



(c) $T_{fu,in} = 573.15 \text{ K}$

图 4 检测表面绝对温差和入口速度 $u_{fu,in}$ 的关系

Fig. 4 Relationship between absolute temperature difference of outer pipeline surface and inlet velocity $u_{fu,in}$

从图 4 中可得:由缺陷引起的绝对温差在缺陷初始处基本为零,即有缺陷时与无缺陷时的外

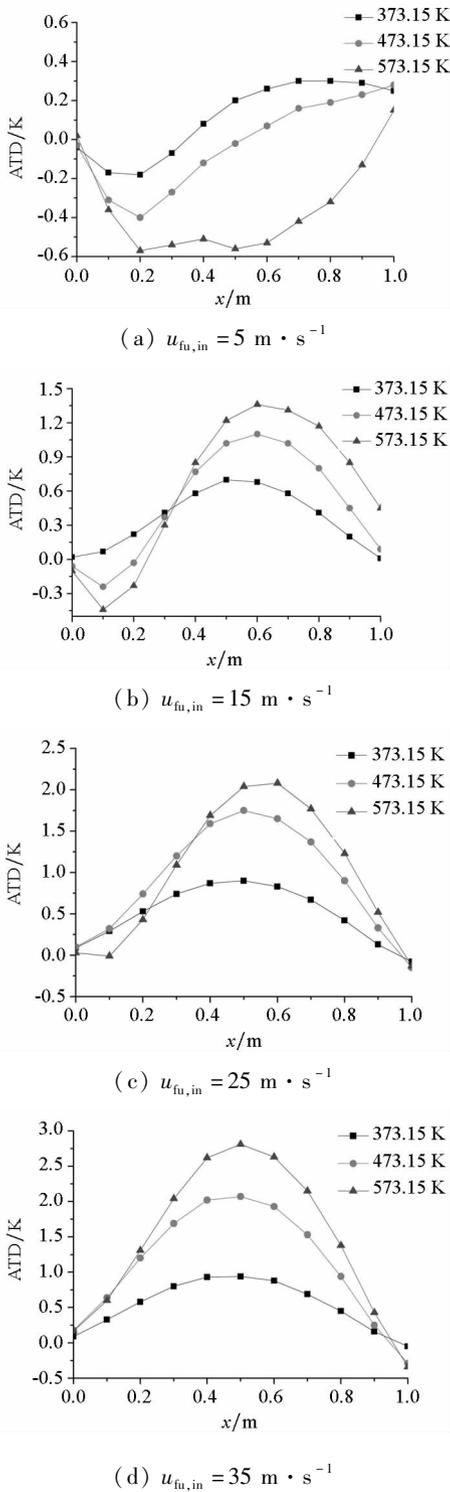


图5 检测表面绝对温差和入口温度 $T_{fu,in}$ 的关系

Fig.5 Relationship between absolute temperature difference of outer pipeline surface and inlet temperature T_{in}

壁温度在缺陷初始处差别很小。入口速度 $u_{fu,in}$ 越快,绝对温差正增长的幅值越大。在入口速度 $u_{fu,in}$ 较慢时,由于检测表面温度受管壁轴向导热的影响,绝对温差在前半缺陷处呈下降趋势,为负增长;随着入口速度 $u_{fu,in}$ 的增大,绝对温差在前半缺陷处负增长的幅值逐渐变小直至负增长消失。综合绝对温差中正增长和负增长的变化规

律,入口速度 $u_{fu,in}$ 越快,外壁温度的绝对温差越大。

从图5中可以看出:入口温度 $T_{fu,in}$ 越高,绝对温差正增长的幅值越大;同时,由于检测表面温度受管壁轴向导热的影响,随着入口温度 $T_{fu,in}$ 的升高,绝对温差在前半缺陷处逐渐形成负增长,且负增长的幅值越来越大。综合绝对温差中正增长和负增长的变化规律,入口温度 $T_{fu,in}$ 越高,外壁温度绝对温差越大。

因此,入口速度 $u_{fu,in}$ 越快,入口温度 $T_{fu,in}$ 越高,由缺陷引起的外壁温度绝对温差越大。结合图3中的分析可得,在含内壁缺陷的高温管道中,最大温差和由缺陷引起的绝对温差并不是同步增加的。

3.2 内壁边界识别

通过在不同入口速度 $u_{fu,in}$ 和入口温度 $T_{fu,in}$ 下,求解对流换热正问题得到的管道检测段 L_3 的外壁温度分布,来模拟在实际检测工作中测量得到的外壁温度分布 Y ,对式(11)所示的内壁缺陷进行识别研究。

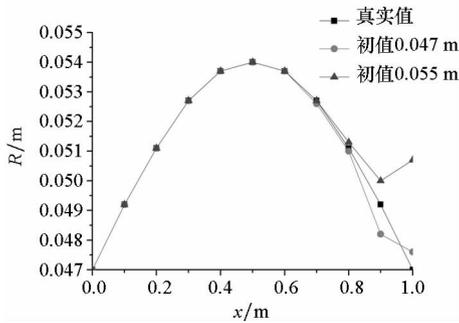
要说明的是,在实际检测过程中,热像仪对管道外壁进行检测工作,得到的是二维热图,可以使用热像仪自带的软件进行温度提取工作,使用“线提取”得到管道外壁上沿轴向变化的温度分布。

图6和图7分别为在不同入口速度 $u_{fu,in}$ 和入口温度 $T_{fu,in}$ 时,不同初始边界假设(初始边界假设分别为0.047 m和0.055 m)的内壁边界识别结果($\varepsilon = 0.0001$)。

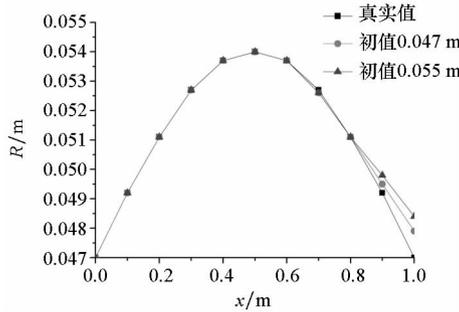
从图6可以看出,入口速度 $u_{fu,in}$ 越快,不同初值得到的识别结果曲线越贴合真实缺陷曲线,即识别结果越好,符合3.1节图4的分析,即入口速度 $u_{fu,in}$ 越快,温度分布绝对温差越来越大。由图7得,随着入口温度 $T_{fu,in}$ 的升高,识别结果曲线先是贴近真实缺陷曲线,然后远离真实缺陷曲线,即识别结果先是变好,然后变差,结合3.1节图5(c)的分析,可得识别结果变好主要是由于温度分布绝对温差随着入口温度 $T_{fu,in}$ 的升高而增大,识别结果变差主要是由于在入口温度 $T_{fu,in}$ 继续升高的过程中温度分布绝对温差在前半缺陷处逐渐形成负增长。

因此,在对流换热反问题中,绝对温差大,识别结果未必好。在进行湍流管道的内壁边界识别时,应尽可能提高管内入口速度,提高绝对温差。同时,将入口温度尽可能地控制在一个合理的范

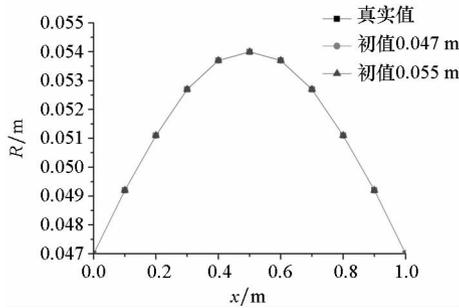
围内:入口温度太低,绝对温差过小;入口温度过高,绝对温差前半部分出现的负增长会导致识别结果变差。



(a) $u_{fu,in} = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



(b) $u_{fu,in} = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



(c) $u_{fu,in} = 35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

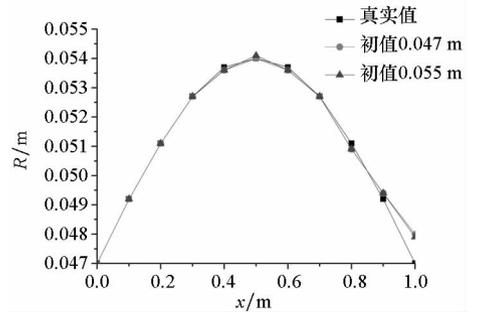
图 6 入口温度 $T_{fu,in} = 573.15 \text{ K}$ 时内壁边界识别结果

Fig. 6 Identification results of inner boundary with inlet temperature $T_{fu,in} = 573.15 \text{ K}$

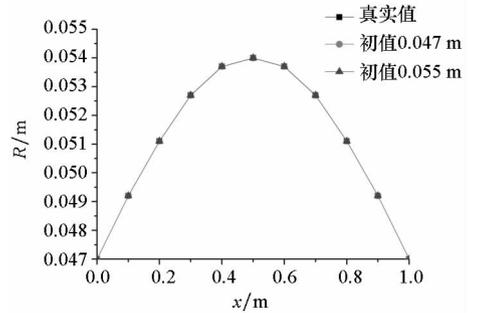
从图 6 和图 7 亦可以看出,在入口速度较快且入口温度没有导致绝对温差出现负增长时,不同的初值得到几乎相同的识别结果;而在绝对温差出现负增长时,不同的初值得到不同的识别结果,识别结果有好有坏,即初值对识别结果的影响大小取决于绝对温差中是否出现负增长。

同时还可得,无论哪种入口条件下的识别结果,前半缺陷的识别精度都很高,而后半缺陷的识别精度变低,在不规则内壁终点处识别精度略微变差。这是一个明显而且非常有用的经验。在不同的入口条件下识别时,尽管不能识别得到完整的内壁缺陷,但能得到前半缺陷的准确形状和缺陷的最大值等信息,这对于缺陷检测工作来说已

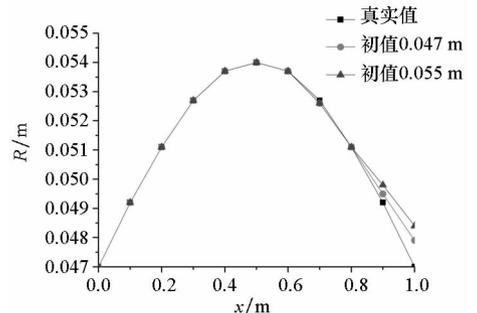
经是很有用的了。



(a) $T_{fu,in} = 373.15 \text{ K}$



(b) $T_{fu,in} = 473.15 \text{ K}$



(c) $T_{fu,in} = 573.15 \text{ K}$

图 7 入口速度 $u_{fu,in} = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时内壁边界识别结果

Fig. 7 Identification results of inner boundary with inlet velocity $u_{fu,in} = 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

4 结论

针对基于表面测温的充分发展湍流管道内壁边界形状的识别问题,使用 COMSOL 构建分段充分发展湍流管道模型,关联 COMSOL 和 MATLAB,利用 Levenberg-Marquardt 算法对二维轴对称充分发展的湍流管道的内壁边界形状的识别进行了研究。算例验证了该方法识别充分发展湍流管道内壁边界形状的有效性,可以得出如下结论:

1) 在含内壁缺陷的湍流管道中,入口速度越慢,且入口温度越高,外壁最大温差越大;入口速度越快,且入口温度越高,由缺陷引起的外壁绝对温差越大。因此,外壁最大温差和由缺陷引起的绝对温差并不是同步增加的。

2) 对流换热反问题的识别规律和导热反问题的识别规律并不一致,在对流换热反问题中,由于绝对温差中负增长的出现,绝对温差大,识别结果未必好。

3) 反问题方法的识别精度在含缺陷内壁的终点处略微变差,但能准确地预测得到内壁的其余轮廓,这对管道维护有很大的帮助。

参考文献 (References)

- [1] Fan C L, Sun F R, Yang L. A new computational scheme on quantitative inner pipe boundary identification based on the estimation of effective thermal conductivity [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41(20): 205501.
- [2] 徐志远, 林章鹏, 袁湘民, 等. 管道弯头缺陷检测外置式远场涡流探头设计[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(5): 1119-1125.
XU Zhiyuan, LIN Zhangpeng, YUAN Xiangmin, et al. External remote field eddy current probe for defect detection at pipe elbows [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(5): 1119-1125. (in Chinese)
- [3] 杨理践, 郭天昊, 高松巍, 等. 油气管道特殊部件的漏磁检测信号特征分析[J]. *沈阳工业大学学报*, 2017, 39(1): 43-47.
YANG Lijian, GUO Tianhao, GAO Songwei, et al. Feature analysis on magnetic leakage detection signal for special parts of oil and gas pipeline [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2017, 39(1): 43-47. (in Chinese)
- [4] 张林, 范春利, 孙丰瑞, 等. 基于 APDL 的管道内壁边界识别算法[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(5): 1477-1484.
ZHANG Lin, FAN Chunli, SUN Fengrui, et al. Identification algorithm of pipelines' inner boundary based on APDL [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1477-1484. (in Chinese)
- [5] 张宏鹏, 丁克勤, 薛彬, 等. 复合材料气瓶分层缺陷的红外检测数值模拟[J]. *武汉工程大学学报*, 2016, 38(6): 583-587.
ZHANG Hongpeng, DING Keqin, XUE Bin, et al. Numerical simulation of delamination defect of composite cylinder by infrared detection [J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2016, 38(6): 583-587. (in Chinese)
- [6] 侯旺, 钟立军, 张小虎, 等. 红外目标分割方法研究[J]. *国防科技大学学报*, 2013, 35(2): 173-178.
HOU Wang, ZHONG Lijun, ZHANG Xiaohu, et al. Research on infrared target segmentation [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2013, 35(2): 173-178. (in Chinese)
- [7] 周正干, 贺鹏飞, 赵翰学, 等. 钛合金蜂窝结构蒙皮脱焊缺陷锁相红外热成像检测[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(9): 1795-1802.
ZHOU Zhenggan, HE Pengfei, ZHAO Hanxue, et al. Detection of skin desoldering defect in Ti-alloy honeycomb structure using lock-in infrared thermography test [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(9): 1795-1802. (in Chinese)
- [8] 李斌, 刘林华. 基于双倒易边界元法的非稳态导热几何边界识别[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(5): 66-71.
LI Bin, LIU Linhua. Geometry boundary identification of unsteady heat conduction based on dual reciprocity boundary element method [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(5): 66-71. (in Chinese)
- [9] Wang G J, Lü C, Chen H, et al. A multiple model adaptive inverse method for nonlinear heat transfer system with temperature-dependent thermophysical properties [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 118: 847-856.
- [10] 陈闽慷, 杜涛, 苏雪, 等. 二维非线性正交各向异性材料的瞬态热传导反问题数值方法[J]. *国防科技大学学报*, 2017, 39(1): 194-198.
CHEN Minkang, DU Tao, SU Xue, et al. A numerical method for two-dimensional nonlinear transient inverse heat conduction problems for orthotropic material [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2017, 39(1): 194-198. (in Chinese)
- [11] 韩雯雯, 卢涛. 基于共轭梯度法的圆管内部流体温度识别[J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(2): 371-375.
HAN Wenwen, LU Tao. Estimating fluid temperature of pipe by using conjugate gradient method [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2015, 36(2): 371-375. (in Chinese)
- [12] Min C H, Li X L, Yuan Y W, et al. An inverse study to optimize the rib pitch in a two-dimensional channel flow problem for heat transfer enhancement [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 112: 1044-1051.
- [13] Vanderveer J R, Jaluria Y. Solution of an inverse convection problem by a predictor-corrector approach [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 65: 123-130.
- [14] Naveira-Cotta C P, Cotta R M, Orlande H R B. Inverse analysis of forced convection in micro-channels with slip flow via integral transforms and Bayesian inference [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, 49(6): 879-888.
- [15] Chen W L, Yang Y C. Inverse estimation for the unknown frost geometry on the external wall of a forced-convection pipe [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 50(6): 1457-1464.
- [16] Chen W L, Yang Y C. Inverse estimation for unknown fouling-layer profiles with arbitrary geometries on the inner wall of a forced-convection duct [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, 49(1): 86-98.
- [17] Rouizi Y, Maillat D, Jannot Y, et al. Inverse convection in a flat mini-channel: towards estimation of fluid bulk temperature distribution with infrared thermography [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2012, 395(1): 012070.
- [18] 肖丹, 师奕兵, 黄博. 基于远场涡流法的管道缺陷识别的有限元仿真研究[J]. *测控技术*, 2012, 31(5): 131-135.
XIAO Dan, SHI Yibing, HUANG Bo. Finite element research of defects detection in pipeline based on remote field eddy current [J]. *Measurement and Control Technology*, 2012, 31(5): 131-135. (in Chinese)
- [19] Ren Y, Cai W H, Chen J, et al. Numerical study on the shell-side flow and heat transfer of superheated vapor flow in spiral wound heat exchanger under rolling working conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 121: 691-702.

- [20] 陈晓明, 冀宏, 张硕文, 等. 基于 COMSOL 的滑阀流固耦合共轭传热仿真研究 [J]. 液压与气动, 2017(5): 35 - 40.
CHEN Xiaoming, JI Hong, ZHANG Shuowen, et al. The simulation investigation on fluid-solid coupled conjugate heat transfer for spool valve based on COMSOL [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2017(5): 35 - 40. (in Chinese)
- [21] Jakkareddy P S, Balaji C. A non-intrusive technique to determine the spatially varying heat transfer coefficients in a flat plate with flush mounted heat sources [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 131: 144 - 159.
- [22] 陈林, 杨立, 范春利, 等. 热障涂层厚度及其涂敷下材料内部缺陷的红外定量识别 [J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(1): 107 - 113.
CHEN Lin, YANG Li, FAN Chunli, et al. Infrared quantitative identification for thickness and material inner defects of thermal barrier coating [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(1): 107 - 113. (in Chinese)
- [23] 梅宁, 焦思. 基于工程反问题的圆管湍流流体热物性参数反演 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2014, 44(10): 142 - 147.
MEI Ning, JIAO Si. A research on identifying thermophysical of pipe turbulence fluid by inverse heat transfer problem [J]. Periodical of Ocean University of China (Natural Science), 2014, 44(10): 142 - 147. (in Chinese)
- [24] Ozisik M N. Inverse heat transfer: fundamentals and applications [M]. Britain, UK: CRC Press, 2000.