

## 基于 APDL 的管道内壁边界识别算法

张 林, 范春利, 孙丰瑞, 杨 立

(海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘 要:** 基于表面测温的缺陷或缺陷边界的定量识别算法是目前红外无损检测从定性向定量发展的关键理论基础。针对目前方法识别不规则缺陷边界精度相对较低的问题, 通过关联 ANSYS 软件和 MATLAB 软件, 利用有限元方法和共轭梯度法对二维管道内壁边界形状的稳态识别进行了研究。针对不同内壁边界形状以及试件形状的识别问题, 系统地讨论了边界形状初始假设、检测表面温度测量误差及测温点数目、所识别边界的离散点数目以及试件的导热系数等一系列因素对识别结果的影响。数值实验证明了该方法的有效性及其精确性。该方法可以在较短的计算时间内得到非常精确的稳态识别结果, 大大提高了管道内壁边界形状识别的效率。

**关键词:** 导热反问题; 红外无损检测; 边界识别; 共轭梯度法; APDL

**中图分类号:** TK38 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1477-08

## Identification algorithm of pipelines' inner boundary based on APDL

Zhang Lin, Fan Chunli, Sun Fengrui, Yang Li

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

**Abstract:** Quantitative identification algorithm of defect or defect boundary is the key theoretical basis for the development of quantitative nondestructive testing and evaluation. For the geometry identification of inner pipe boundary (i.e. geometry-varied boundary due to defects), most methods developed up to now are not precise for the identification of irregular-shaped inner boundary. In this paper the steady-state identification problem was solved, with different inner boundary geometries and different test piece shapes, based on finite element method and conjugate gradient method by associating ANSYS software with MATLAB. A series of effecting factors, such as the initial boundary geometry guess, temperature measurement error and number of measurement points at the inspection boundary, number of discrete points of the boundary to be identified, and the thermal conductivity of the test piece, were studied systematically on the effect on the identification result. Numerical experiments certified the effectiveness of the method and proved the method to be very precise and time saving.

**Key words:** inverse heat conduction problem; thermographic non-destructive inspection; boundary identification; conjugate gradient method; APDL

收稿日期: 2014-09-05; 修订日期: 2014-10-03

基金项目: 国家自然科学基金(51479203, 50906099)

作者简介: 张林(1991-), 男, 硕士生, 主要从事缺陷故障红外热诊断方面的研究。Email: zhanglin145@163.com

导师简介: 范春利(1978-), 男, 副教授, 主要从事传热传质、传热反问题及红外无损检测等方面的研究。Email: chlfan@163.com

## 0 引言

在工业生产中,许多热设备管道长期运行在高温、高压、腐蚀性强的恶劣环境中,管道内壁损坏、破裂的事故时有发生,造成巨大的资源和资金损失<sup>[1]</sup>。因此对管道内壁状况的检测和监测具有非常重要的意义。尽管目前存在着超声检测、漏磁检测及涡流检测等<sup>[2]</sup>多种无损检测技术,但这些方法也是各有所长,在使用范围上存在着各自的局限性。

近年来,红外无损检测技术以其非接触、无损伤、检测速度快、适合大面积扫描、无有害射线等优势,已经在管道缺陷检测和故障诊断方面获得了广泛的应用<sup>[3]</sup>。然而,目前的检测大多还停留在根据检测表面温差来定性的判断内部边界变化的水平上,随着工业生产对设备安全性、可靠性等的要求越来越高,发展根据表面红外测温识别内部边界状况的定量算法具有非常重要的意义。

管道内壁缺陷红外定量检测本质上属于一类不适定性导热反问题。目前,不适定导热反问题的求解主要采用L-M法<sup>[4-5]</sup>、共轭梯度法<sup>[6]</sup>、遗传算法<sup>[7]</sup>等。遗传算法是全局搜索算法,不容易陷入局部极小值,但是当识别的参数增多时,计算时间增长迅速;在识别参数较少时L-M法和共轭梯度法均非常有效;而在识别参数较多时,共轭梯度法比L-M法更有优势。

导热反问题的计算过程中,离不开对导热正问题的求解。针对不规则复杂区域的正问题求解,目前主要有边界元法、有限元法等计算方法。李斌<sup>[8]</sup>等采用边界元法对管道内壁边界形状识别问题进行了研究。Huang等<sup>[9]</sup>亦采用边界元法对二维模型中两个交界面同时识别的问题进行了研究。边界元法的求解有赖于边界形状的近似拟合方法选取,当近似拟合方法选取不当时,容易造成正问题求解区域的严重失真,进而反问题识别计算也就无法实现。吕事桂等<sup>[10]</sup>等采用有限元法研究了管道内壁边界形状红外瞬态识别问题,得到了比较好的识别精度。然而,在实际管道检测工作中,大多只能采用稳态方法。因此,探讨稳态检测条件下提高管道内边界识别精度的计算方法具有重要意义。

综合以上分析,文中利用有限元法易于处理不规则复杂区域的优点,结合共轭梯度算法,基于管道

外壁边界温度信息对其腐蚀后不规则内壁边界形状的定量识别进行研究,同时系统地分析边界形状初始假设、测温误差、测温点数目、识别边界离散点数目、试件导热系数等一系列因素对识别结果的影响。有限元软件ANSYS可以很好地求解复杂模型的传热问题,并且可以利用ANSYS的编程语言APDL编写传热正问题计算程序,因此文中在内壁边界形状识别计算过程中利用有限元软件ANSYS求解传热正问题,通过输入/输出文件建立ANSYS和MATLAB(用来编写共轭梯度法识别程序)之间的联系来对管道内壁的识别问题进行求解。

## 1 导热正问题求解外壁边界温度分布

带有不规则内壁边界形状的管道截面示意图如图1所示,管道暴露在空气中,内有热流体流过。通过求解二维导热方程可以求得外壁边界的温度分布。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

边界条件为:

$$\begin{cases} -\lambda \frac{\partial T}{\partial n_i} |_{\zeta_i} = h_i(T_i - T_f) \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n_o} |_{\zeta_o} = h_o(T_o - T_\infty) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\lambda$ 为管道材料的导热系数; $\zeta_i$ 、 $T_i$ 、 $h_i$ 分别为管道内壁的边界、边界温度、对流换热系数; $\zeta_o$ 、 $T_o$ 、 $h_o$ 分别为管道外壁的边界、边界温度、对流换热系数; $T_f$ 、 $T_\infty$ 分别为管道内热流体和管道外空气的温度。

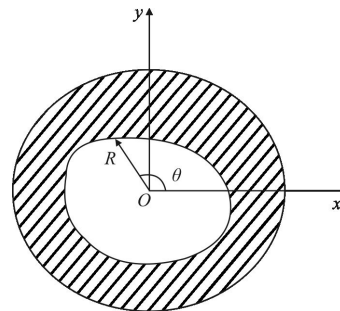


图1 带有不规则内壁边界形状的管道截面

Fig.1 Cross-sectional schematic of pipeline with irregular inner boundary shape

文中使用ANSYS软件进行正问题的求解计算,将管道几何模型建立,物性参数设定,网格划分,求解及外壁边界的温度分布提取等写成APDL命令流

文件,以供 MATLAB 调用。其中,选用 PLANE35 单元进行网格划分。PLANE35 单元是一个六节点的三角形单元,三角形能够很好地适应不规则模型的分网。在 ANSYS 通用后处理器中提取外壁边界的温度分布:在外壁边界上建立路径,将外壁边界上节点的温度映射到该路径上,插值得到测温点温度并存入数组参数,使用命令 \*VWRITE 将该数组参数写出到外部文件,等待 MATAB 读取。

## 2 内壁边界形状的反问题识别

管道内壁边界形状的反问题识别是根据外壁边界的温度分布确定内壁边界的形状。内壁边界形状由极坐标  $R(\theta)$  描述,其中  $\theta$  为极角, $R$  为极半径,如图 1 所示。通过不断的迭代使得公式(3)达到最小得到管道内壁边界识别结果。

$$S(\mathbf{R})=[\mathbf{T}(\mathbf{R})-\mathbf{Y}]^T[\mathbf{T}(\mathbf{R})-\mathbf{Y}] \quad (3)$$

式中: $\mathbf{T}(\mathbf{R})=(T_1, T_2, \dots, T_M)$ ,是在迭代计算中求解正问题得到的外壁边界的温度分布; $\mathbf{Y}=(Y_1, Y_2, \dots, Y_M)$ ,是实际检测工作中检测表面所测温度分布, $M$  为外壁测温点个数。

## 3 共轭梯度法

迭代求解内壁边界形状矩阵  $\mathbf{R}$  的公式为:

$$\mathbf{R}^{k+1}=\mathbf{R}^k-\beta^k \mathbf{d}^k \quad (4)$$

式中: $\beta^k$  为搜索步长; $\mathbf{d}^k$  为共轭搜索方向:

$$\mathbf{d}^k=\nabla S(\mathbf{R}^k)+\gamma^k \mathbf{d}^{k-1} \quad (5)$$

式中: $\gamma^k$  为共轭系数:

$$\gamma^k=\frac{\nabla S^T(\mathbf{R}^k) \nabla S(\mathbf{R}^k)}{\nabla S^T(\mathbf{R}^{k-1}) \nabla S(\mathbf{R}^{k-1})}, \gamma^0=0 \quad (6)$$

列向量  $\nabla S(\mathbf{R}^k)$  为梯度方向:

$$\nabla S(\mathbf{R}^k)=2(\mathbf{J}^k)^T[\mathbf{T}(\mathbf{R}^k)-\mathbf{Y}] \quad (7)$$

式中: $\mathbf{J}^k$  为敏感度系数矩阵, $\mathbf{J}^k=\left[\frac{\partial T^r(\mathbf{R}^k)}{\partial \mathbf{R}^k}\right]^T$ ,即  $J_{ij}^k=$

$$\frac{\partial T_i^k}{\partial R_j}, i=1-M, j=1-N, N \text{ 为内壁边界离散点个数。}$$

$$\frac{\partial T_i^k}{\partial R_j} \text{ 由差分法近似计算。}$$

搜索步长  $\beta^k$  为:

$$\beta^k=\frac{[\mathbf{T}(\mathbf{R}^k)-\mathbf{Y}]^T[\mathbf{J}^k \mathbf{d}^k]}{[\mathbf{J}^k \mathbf{d}^k]^T[\mathbf{J}^k \mathbf{d}^k]} \quad (8)$$

## 4 MATLAB 调用 ANSYS

MATLAB 调用 ANSYS 的语句为:

```
system('D:\ANSYS\v121\ansys\bin\intel\ ANSYS121
-b -p ane3fl -i E:\inputfile.txt -o E:\outfile.txt');
```

其中,"D:\ANSYS\v121\ansys\bin\intel\ ANSYS121" 为 ANSYS 软件的安装路径。"-b" 为 ANSYS 软件的批处理模式。"-p ane3fl" 表示选用 ANSYS 软件产品 ANSYS Multiphysics。"-i E:\inputfile.txt" 为求解外壁温度分布的 APDL 命令流文件所在路径。"-o E:\outfile.txt" 为存放正问题程序运行结果的文件所在路径。

## 5 收敛条件

共轭梯度法迭代过程收敛条件为:

$$S(\mathbf{R})<\varepsilon \quad (9)$$

式中:当不考虑温度测量误差时, $\varepsilon$  为一个任意小的正数;当考虑温度测量误差时, $\varepsilon=M\sigma^2$ ,其中  $\sigma$  为测温误差的标准差。

## 6 识别计算步骤

管道在缺陷产生之前的内壁边界形状是已知的,文中根据这已知的边界形状确定迭代计算初始估计值  $\mathbf{R}^0$ 。假设在第  $k$  步的估计值为  $\mathbf{R}^k$ ,应用共轭梯度法根据外壁边界温度分布求解管道内壁边界形状的步骤如下:

(1) 将内壁边界估计值  $\mathbf{R}^k$  传递到 ANSYS 中,根据公式(1)和公式(2),MATLAB 调用 ANSYS 建立管道模型,进行有限元网格划分,求解得到管道外壁边界的温度分布  $\mathbf{T}(\mathbf{R})$ ;

(2) 将温度分布  $\mathbf{T}(\mathbf{R})$  传递到 MATLAB 中,根据公式(9)判断是否收敛,如果收敛则输出内壁边界识别结果,否则继续;

(3) 按公式(6)、(7)、(8)分别计算出共轭系数  $\gamma^k$ 、搜索步长  $\beta^k$ ,然后根据公式(5)求解搜索方向  $\mathbf{d}^k$ ;

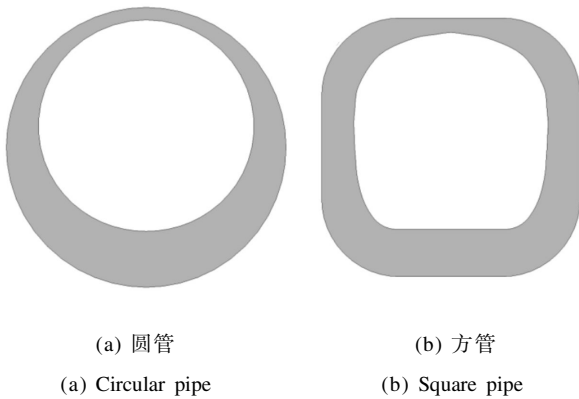
(4) 根据公式(4)计算出新的内壁边界估计值,然后返回到步骤(1)。

## 7 算例及讨论

为了验证算法对不规则内壁边界形状识别的有

效性,文中采用二维数值实验来进行验证。算例中,圆管道外半径为 0.09 m,内半径为 0.054 m,方管道外边长为 0.18 m,内边长为 0.108 m。内壁边界对流换热系数为 1000 W/(m<sup>2</sup>·K),热流体温度为 200 ℃;外壁边界对流换热系数为 10 W/(m<sup>2</sup>·K),空气温度为 20 ℃。管道导热系数为 1 W/(m·K)。在外壁边界上均匀设置 24 个测温点;内壁边界由 24 个均匀分布的离散点通过 ANSYS 命令 BSPLIN 样条拟合得到。

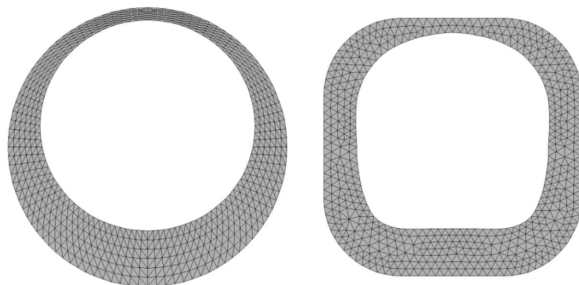
算例中所要识别的圆管、方管内壁边界形状如图 2 所示(图中为二维管道,管道内壁边界即为所要识别边界)。在 ANSYS 软件中,应用三角形网格进行管道有限元网格划分,圆管、方管求解区域的网格划分见图 3,求解得到管道外壁边界的温度分布,温度分布曲线见图 4,通过该温度分布曲线模拟实际检测的外壁边界测量温度来对管道内壁边界形状进行识别计算。通过将识别结果和已知内壁边界形状进行对比来验证算法的有效性。



(a) 圆管 (b) 方管  
(a) Circular pipe (b) Square pipe

图 2 管道内壁真实边界

Fig.2 True pipeline inner boundaries



(a) 圆管 (b) 方管  
(a) Circular pipe (b) Square pipe

图 3 求解区域网格划分

Fig.3 Grid-meshing of computation domains

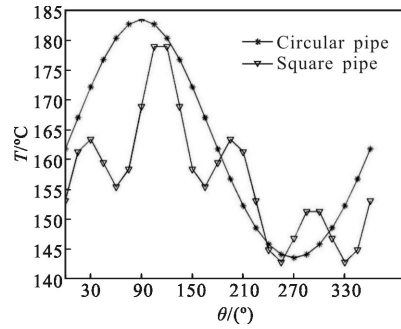


图 4 管道外壁边界的温度分布

Fig.4 Temperature distributions of pipeline outer boundaries

在实际检测工作中,测量必会存在测量误差,因此,将随机误差加到管道外壁边界的温度分布中来模拟带有误差的温度测量结果:

$$Y_i = Y_{\text{exact}} + \omega_i \sigma \quad (10)$$

式中:  $Y_{\text{exact}}$  为根据真实内壁边界形状求解正问题所得的第  $i$  个温度值;  $\sigma$  为温度测量的标准偏差;  $\omega_i$  为  $-1.0 \sim 1.0$  之间的随机数。

内壁边界形状识别结果的平均相对误差定义为:

$$Er_{\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{R_j - \hat{R}_j}{\hat{R}_j} \right| \times 100\% \quad (11)$$

式中:  $R_j$  为离散的内壁边界形状识别结果;  $\hat{R}_j$  为离散的真实内壁边界形状;  $N$  为内壁边界离散点个数。

### 7.1 不同初始假设时的内壁边界形状识别结果

图 5、图 6 为圆管、方管在不同初始边界假设(圆管以不同半径的内壁边界作为初始边界假设,方管

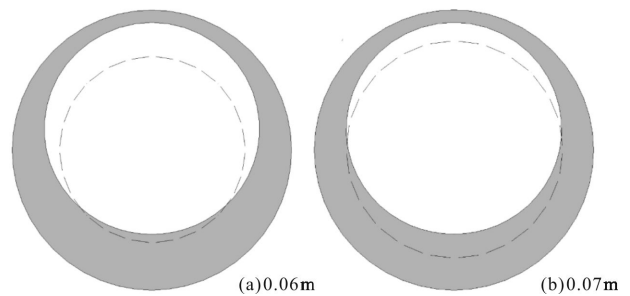


图 5 不同初值条件时圆管内边界识别结果

Fig.5 Identification results of circular pipe inner boundary shape with different initial guesses

以不同边长的内壁边界作为初始边界假设,图中以虚线表示)时内壁边界形状的识别结果。不同初始边界假设时识别结果数据见表 1。迭代过程收敛条件为  $\epsilon=0.1$ 。从识别结果中不难看出,共轭梯度法可以

比较精确的识别出管道内壁边界形状, 初始边界假设对识别结果几乎没有明显影响。在识别过程中, 目标函数值随迭代次数的变化曲线如图 7, 可以看出共轭梯度算法的收敛速度快、识别效率高, 且迭代过程稳定, 非常适用于管道内壁边界形状识别问题。

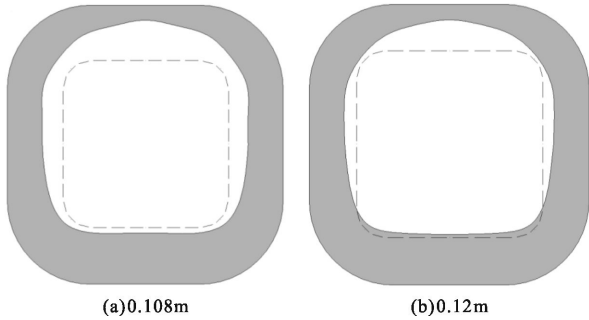


图 6 不同初值条件时方管内边界识别结果

Fig.6 Identification results of square pipe inner boundary shape with different initial guesses

表 1 不同初值假设时管道内壁边界形状识别结果

Tab.1 Identification results of pipeline inner boundary shape with different initial guesses

Case	Initial guess/m	CPU time/s	$Er_{ave}$
Circular pipe	0.06	74.05	0.08%
	0.07	87.80	0.06%
Square pipe	0.108	194.27	0.45%
	0.12	128.56	0.39%

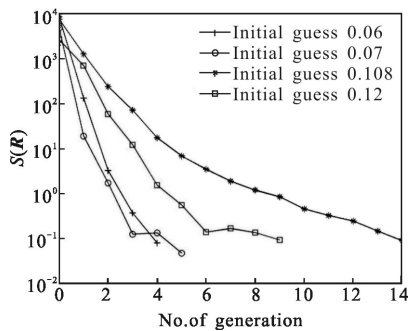


图 7 目标函数随迭代次数的变化曲线

Fig.7 Variation of target function with the number of iterations

### 7.2 不同温度测量误差时的内壁边界形状识别结果

图 8、图 9 分别为圆管、方管在测温误差  $\sigma=0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\sigma=1\text{ }^{\circ}\text{C}$  时内壁边界形状的识别结果。更多的识别结果的数据见表 2。从中可以看出, 测温误差对圆管的内壁边界形状的识别结果影响比较小, 当测温误差

小于  $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 识别平均相对误差不超过 1.81%。测温误差对方管内壁边界形状识别结果的影响相对较大, 但当测温误差为  $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 识别结果的平均相对误差仅为 2.59%。可见, 测温误差对识别精度没有明显的影响。在文中所考虑的误差范围内, 算法均能比较准确地识别出管道内壁边界形状。

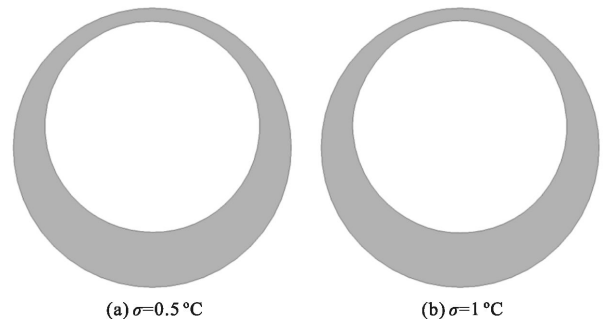


图 8 不同测量误差时圆管内边界识别结果

Fig.8 Identification results of circular pipe inner boundary shape with different measurement errors

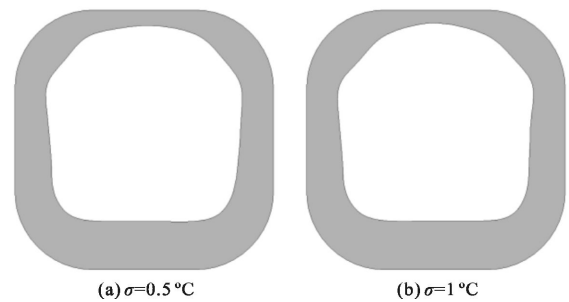


图 9 不同测量误差时方管内边界识别结果

Fig.9 Identification results of square pipe inner boundary shape with different measurement errors

表 2 不同测量误差时管道内壁边界形状识别结果

Tab.2 Identification results of pipeline inner boundary shape with different measurement errors

Case	$\sigma/^{\circ}\text{C}$	CPU time/s	$Er_{ave}$
Circular pipe	0.5	44.65	0.34%
	1.0	44.09	0.55%
	2	43.69	0.90%
	3	28.78	1.81%
Square pipe	0.5	91.98	0.99%
	1.0	79.24	1.43%
	2	54.08	2.44%
	3	53.60	2.59%

### 7.3 不同测温点个数时内壁边界形状识别结果

7.1 节中图 5、图 6 为圆管、方管外壁边界测温点为 24 时的识别结果。此节外壁边界温度测温点个数分别取 16 和 32, 研究其对内壁边界形状识别的影响, 识别结果见图 10、图 11 和表 3。可知, 当测温点

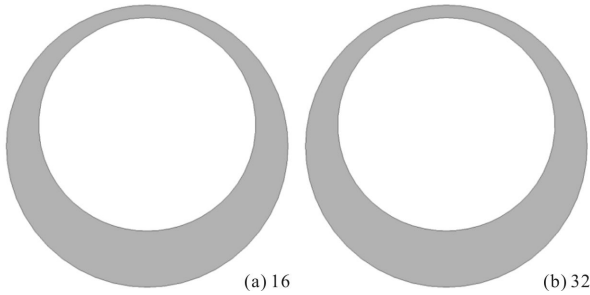


图 10 不同测量点个数时圆管内边界识别结果

Fig.10 Identification results of circular pipe inner boundary shape with different numbers of measurement points

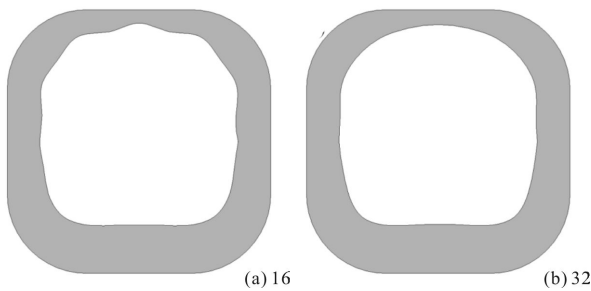


图 11 不同测量点个数时方管内边界识别结果

Fig.11 Identification results of square pipe inner boundary shape with different numbers of measurement points

表 3 当测温点个数分别为 16 和 32 时, 管道内壁边界形状识别结果

Tab.3 Identification results of pipeline inner boundary shape when the number of measurement points is 16 and 32

Case	Measurement points	CPU time/s	$Er_{ave}$
Circular pipe	16	71.41	0.10%
	24	74.05	0.08%
	32	71.99	0.06%
Square pipe	16	206.14	1.18%
	24	194.27	0.45%
	32	447.70	0.36%

点数增加时, 识别精度有所提高。这主要是因为测温点数目增加, 内壁边界的离散点反映到测温点上的温度灵敏度增加, 外壁边界温度分布中体现内壁边

界形状的信息增多, 所以可以更加准确地识别出内壁边界形状。但从结果也可看出, 识别精度提高有限, 即测温点个数达到一定值时, 再增加其个数对识别精度的提高影响不大。另外, 在测温点个数减少时, 识别精度亦很高, 仍可以比较准确地识别出内壁边界形状。

### 7.4 不同内壁边界离散点个数时的内壁边界形状识别结果

7.1 节中图 5、图 6 为圆管、方管内壁边界离散点为 24 个时的识别结果。此节将离散点的个数分扩大到 48 个和缩小到 12 个, 从而研究其对内壁边界形状识别的影响, 识别结果见图 12、图 13 和表 4。从中可以看出, 算法在不同的离散点个数时, 均可以得到比较精确的识别结果。当内壁边界离散点数目增加到超过外壁边界上的测温点数目时, 识别精度并没有提高, 这是因为识别结果的好坏主要依赖于管道外表面的温度测量信息。温度测量点数不变, 识别结果精度就不会有明显变化。方管离散点减少时, 识别精度提高主要是因为初值为方形边界, 离散点越少, 初值越近于圆形, 对识别此节所示的相对光滑的内壁边界形状有一定优势。

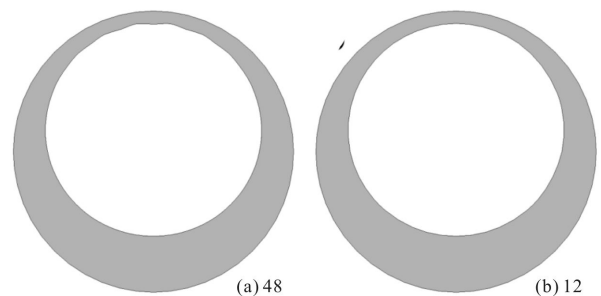


图 12 不同离散点个数下圆管内边界识别结果

Fig.12 Identification results of circular pipe inner boundary shape with different numbers of discrete points

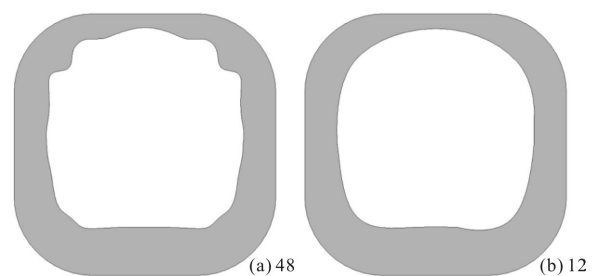


图 13 不同离散点个数下方管内边界识别结果

Fig.13 Identification results of square pipe inner boundary shape with different numbers of discrete points

表 4 当离散点个数分别为 48 和 12 时,管道内壁边界形状识别结果

Tab.4 Identification results of pipeline inner boundary shape when the numbers of discrete points is 48 and 12

Case	Measurement points	CPU time/s	$Er_{ave}$
Circular pipe	48	163.52	0.19%
	24	74.05	0.08%
	12	37.02	0.09%
Square pipe	48	498.38	1.31%
	24	194.27	0.45%
	12	66.98	0.18%

7.5 不同导热系数时的内壁边界形状识别结果

图 14 及表 5 为内壁边界形状在导热系数为 15.2 W/(m·K)时,圆管、方管内壁边界形状的识别结果。分别同图 5(a)与图 6(a)的识别结果对比可得,导热系数大的管道,相同条件下识别精度要低于导热系数小的管道。这是由于管道的导热系数越大,

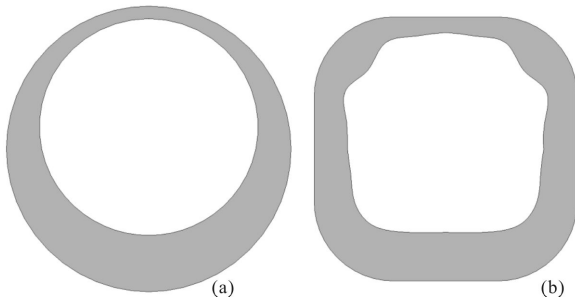


图 14 导热系数为 15.2 W/(m·K)时内壁边界识别结果

Fig.14 Identification results of pipeline inner boundary shape when the thermal conductivity is 15.2 W/(m·K)

表 5 导热系数为 15.2 W/(m·K)时,管道内壁边界形状识别结果

Tab.5 Identification results of pipeline inner boundary shape when the thermal conductivity is 15.2 W/(m·K)

Case	Thermal conductivity	CPU time/s	$Er_{ave}$
Circular pipe	1	74.05	0.08%
	15.2	44.34	0.27%
Square pipe	1	194.27	0.45%
	15.2	144.25	1.53%

管道的热阻就越小,在管道改变相同的壁厚条件下检测边界温度变化就越小,检测边界温度分布对所识别边界形状的变化灵敏度就越低,因此,识别精度就会下降。

8 结 论

文中针对基于表面测温的管道内壁边界形状的识别问题,通过关联 ANSYS 和 MATLAB 软件,利用共轭梯度法对圆管和方管内壁边界形状的识别进行了研究。一系列算例验证了该方法在稳态条件下识别管道内边界形状的有效性和高效性,为进行实际工业设备管道红外无损检测与定量边界识别工作打下基础。文中主要结论如下:

(1) 文中所采用方法可以得到非常精确的管道内边界稳态识别结果,识别结果受管道内边界初始假设的影响可以忽略。

(2) 当检测边界温度测量存在一定误差时,算法仍能够比较准确地识别出内壁边界形状,算法没有明显放大温度测量误差。

(3) 增加外壁边界测温点数目,识别精度有所提高,但精度提高有限。

(4) 当内壁边界离散点数目增加时,识别精度提高;但当增加到超过外壁边界上的测温点数目时,识别精度并不再提高,故离散点个数不能为了更好的描绘内壁边界形状而设置过多,要根据外壁边界上的测温点个数合理设置。

(5) 识别计算程序编写迅速,且识别计算时间较短,为识别算法的快速、在线应用提供了便利,这主要是因为:使用 ANSYS 编程语言 APDL 可以迅速进行不同形状管道的正问题计算程序编写工作,且程序出错率低;迭代计算过程中,ANSYS 后台运行正问题计算程序,计算速度快;共轭梯度法迭代计算收敛速度快。

参考文献:

[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(205501): 1-10.

[2] Liu Xuechen, Xu Binshi, Dong Shiyun, et al. Nondestructive testing technologies for the inner defect detection of pipeline

- [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 29(10): 603–606. (in Chinese)
- [3] Dai Jingmin, Wang Zijun. Infrared thermography non-destructive testing technology and its applications [J]. *Techniques of Automation & Applications*, 2007, 26(1): 1–7. (in Chinese)
- [4] Wang Hailiang, Fan Chunli, Sun Fengrui, et al. Transient quantitative infrared thermographic identification of two-dimensional inner defect [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1714–1720. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] Zhu Lina, Wang Guangjun, Chen Hong. Estimating steady multi-variables inverse heat conduction problem by using conjugate gradient method [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(8): 58–61. (in Chinese)
- [7] Liu F B. A hybrid method for the inverse heat transfer of estimating fluid thermal conductivity and heat capacity [J]. *International Journal of Thermal Science*, 2011, 50 (5): 718–724.
- [8] 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] Huang C H, Shih C C. A shape identification problem in estimating simultaneously two interfacial configurations in a multiple region domain [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26: 77–88.
- [10] Lv Shigui, Yang Li, Fan Chunli. Identification of irregular pipeline geometry boundary using infrared transient inspection based on finite element discretization [J]. *CIESC Journal*, 2012, 63(12): 3805–3811. (in Chinese)