

研究论文

基于有限元离散的不规则管道几何边界 红外瞬态检测识别

吕事桂, 杨 立, 范春利

(海军工程大学动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 建立了带有不规则腐蚀内边界的管道二维瞬态传热模型, 基于有限元法和共轭梯度法的导热反问题求解方法对管道内边界识别问题进行了研究, 比较分析了管道外表面稳态瞬态温度对内边界变化敏感程度的差异性, 指出内边界瞬态检测识别比稳态检测识别更具优越性并利用数值试验进行了验证。同时, 考察了测温误差、初始假设等因素对管道内边界瞬态检测识别结果的影响。在较大测温误差的情况下, 采用瞬态检测条件从不同初始假设值出发都能准确地反演识别出管道内边界腐蚀后的几何形状, 从而证明了算法的有效性和稳定性, 表明了红外瞬态检测定量识别管道内边界的可行性。

关键词: 边界识别; 导热反问题; 有限元法; 共轭梯度法; 红外检测

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2012.12.010

中图分类号: TK 38

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2012) 12-3805-07

Identification of irregular pipeline geometry boundary using infrared transient inspection based on finite element discretization

LÜ Shigui, YANG Li, FAN Chunli

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

Abstract: A two-dimensional physical and mathematical transient heat transfer model for the pipeline with irregular inner geometry boundary is built. The identification problem of pipeline inner boundary is solved by using finite element method and conjugate gradient method (CGM)-based inverse algorithm. The differences of sensitivities of the transient and steady pipeline outer surface temperature to the inner boundary change are analyzed and certified by a series of numerical simulation experiments, in which the influences of temperature measurement errors and initial inner boundary guesses are tested. It is found that the temperature measurement errors and initial inner boundary guesses have no obvious effect on the pipeline inner boundary identification results when the infrared inspection is carried out in the transient heat transfer state, while the accuracy of the boundary identification results is poor with temperature measurement errors when the infrared inspection is carried out in the steady heat transfer state. Therefore, in the engineering application, in order to identify the inner geometry boundary accurately, the infrared inspection in the transient heat transfer state is more appropriate than that in steady heat transfer state.

Key words: boundary identification; inverse heat conduction problem; finite element method; conjugate gradient method; infrared inspection

2012-04-25 收到初稿, 2012-05-30 收到修改稿。

联系人及第一作者: 吕事桂 (1986—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50906099)。

Received date: 2012-04-25.

Corresponding author: LÜ Shigui, shiguilv@hotmail.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50906099).

引 言

管道作为石化领域的重要输送设备,由于长期运行在高温、高压及化学腐蚀的恶劣环境下,内壁容易损伤脱落并最终导致管道的破裂,给生产实践带来安全隐患问题^[1]。目前,国内外在管道内腐蚀方面,提出了多种检测技术,如超声检测、漏磁检测及涡流检测等^[2-3]。然而受检测技术本身的局限性,管道损伤状况多数不明,维修手段不科学,经常造成不足维护、过剩维护,带来人力物力的较大浪费。因此,如何发现管道缺陷,提高检测技术水平,确保压力管道安全可靠运行,变过去的不足维护和过剩维护为视情维护,是当今世界各国同行普遍关注和迫切需要解决的重大课题。属于无损检测方法的红外热诊断技术,相比其他检测手段具有非接触、速度快、无有害射线及容易实现在线式操作等优势,在石化设备检测诊断中得到了广泛应用并取得了显著效果^[4-6]。张红等^[7]采用红外评估软件对保温管线进行了在线检测与评估,通过比较法证明了红外诊断软件在解决热力管道保温评估问题中的实用性和可靠性;赵石彬等^[8]将红外热波检测技术用于预埋有 3 种缺陷(腐蚀、结垢和裂纹)的聚丙烯管道无损检测中,根据典型时刻热图的灰度随时间的变化及曲线斜率变化对 3 种缺陷类型进行了定性分析和定位;沈功田等^[9]建立了大型管道红外热像检测试验装置,试验表明红外热像检测技术十分适用于检测高温压力管道内部腐蚀缺陷,检测灵敏度能够满足压力管道安全运行的要求。从总体上看,目前红外热诊断技术应用于设备诊断的结果多为定性的,易受人为因素的影响,为提高诊断结果的准确性有必要进一步开展红外热诊断技术量化应用研究,促进其向标准化、规范化、智能化方向的发展以满足现实需求。

管道缺陷红外定量热诊断是典型的不规则几何边界识别导热反问题,在工程实际中有着广泛的应用前景。针对不规则复杂区域导热反问题的求解,主要发展了边界元法、有限元法等计算方法。李斌等^[10-11]采用边界元离散方法对导热问题的几何边界识别算法进行了研究;陈怡等^[12]采用有限元法对高炉炉底侵蚀进行了监测;范春利等^[13]采用有限元法对圆管内壁的稳态检测识别进行了研究。相比于有限元法,边界元法应用反问题中有赖于边界

几何形状的近似拟合方法选取,当拟合方法选取不当时,容易造成求解区域的严重失真,反问题求解过程无法实现,如拉格朗日法会在拟合曲线的两端出现大幅振荡的“龙格”现象^[10]。另外,在众多缺陷定量热诊断中,大多是在稳态条件下进行的,但工程实际应用中往往是在瞬态条件下进行的,且在某些条件下达到稳态需要的时间很长,使稳态检测识别受到时间限制,因此,很有必要对瞬态检测定量热诊断进行研究。

本文利用有限元法处理不规则复杂区域比较随意的优点结合共轭梯度反问题算法,基于管道外表面温度信息对其腐蚀后不规则几何内边界的瞬态检测定量识别进行了研究,比较了稳瞬态检测识别的优劣性,分析了测温误差、初始假设等因素对识别结果的影响。

1 导热正问题

对于内部带有不规则几何边界的管道(图 1),其外表面的红外热特征可以通过求解以下二维导热控制方程得到。

$$\alpha \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \quad (1)$$

初始、边界条件

$$\begin{cases} T|_{t=0} = T_0 \\ \left. -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\Gamma_1} = h_f (T_{in} - T_f) \\ \left. -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\Gamma_2} = h_a (T_{out} - T_a) \end{cases} \quad (2)$$

式中 λ 、 ρ 、 c 分别为管道材料的热导率、密度和比热容; T_0 为管道初始温度; T_{in} 、 T_{out} 分别表示管道内外壁面温度; T_f 为管道内流体温度; h_f 为流体与管道内壁面 Γ_1 的对流传热系数; 管道外壁面 Γ_2 与温度为 T_a 的环境之间进行自然对流换热, h_a 为其传热系数。

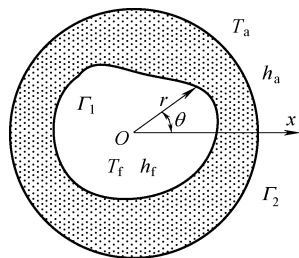


图 1 内部带有不规则几何边界的管道截面
Fig. 1 Cross-section schematic diagram of pipeline with irregular inner geometry boundary

2 几何边界识别反问题

2.1 几何边界的离散化

有限元法离散复杂区域时比较随意, 当离散网格足够密时, 边界上可用分段直线模拟求解区域边界的任意曲线, 并且能够获得较高的数值计算精度。本文通过有限元数值计算方法求解导热控制方程式(1)、式(2) 来获得二维不规则管道求解区域的温度分布, 有限单元采用线性三角形单元, 不规则几何边界置于有限元离散的单元边界之上, 局部求解区域有限元离散化如图 2 所示。

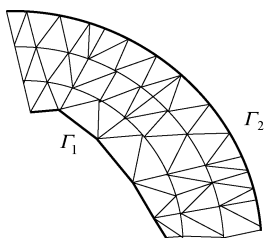


图 2 局部区域有限元离散化后的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of partial solution domain discretized with finite element

2.2 目标函数的确定

在极坐标下, 经有限元离散化后的管道内壁未知几何边界 Γ_1 可以表示成 $r(\theta)$, 其中, θ 为极角, r 为极半径。几何边界识别反问题的解可以通过如下目标函数 $S(\mathbf{R})$ 的最小化来获得

$$S(\mathbf{R}) = [\mathbf{Y} - \mathbf{T}(\mathbf{R})]^T [\mathbf{Y} - \mathbf{T}(\mathbf{R})] = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^M [Y_{ij} - T_{ij}(\mathbf{R})]^2 \quad (3)$$

式中 I 为红外测温时刻点总数; M 为每一个测温时刻点下红外测温点数; Y_{ij} 是第 j 个测温点在第 i 个测温时刻点时的测量温度; $T_{ij}(\mathbf{R})$ 是在一个估计的几何边界形状 $\mathbf{R}$ 下通过求解导热正问题得到的第 j 个测温点在第 i 个测温时刻点时的计算温度; $\mathbf{R}$ 是描述几何边界形状的参数向量; $\mathbf{Y}$ 、 $\mathbf{T}(\mathbf{R})$ 分别是不同时刻点下各测温点处测量温度与计算温度向量。

2.3 共轭梯度反演算法

共轭梯度反演算法通过迭代式(4) 不断修正估计的未知几何边界描述参数使目标函数达到最小化^[14]

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

其中, 上角标代表迭代次数 (下同); β^k 是搜索步长; $\mathbf{d}^k$ 是第 k 次迭代的下降方向, 其计算公式如下

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

式中 $-\nabla S(\mathbf{R}^k)$ 为梯度方向; γ^k 为共轭系数, 即

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

$\nabla S(\mathbf{R}^k)$ 可通过对目标函数式(3) 取在待估计参数向量 $\mathbf{R}^k$ 处的微分得到

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

其中, $\mathbf{J}^k$ 为敏感系数矩阵, $\mathbf{J}(\mathbf{R}) = \left[\frac{\partial \mathbf{T}^T(\mathbf{R})}{\partial \mathbf{R}} \right]^T$, 它反映了几何内边界描述参数单位扰动引起的管道外表面温度变化。

搜索步长 β^k 的表达式为

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

2.4 收敛条件

根据偏差原理, 当满足以下收敛条件时停止共轭梯度迭代过程, 得到未知几何边界识别结果

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

其中, 当不考虑测温误差时, ϵ 为很小的正数; 当考虑测温误差时, $\epsilon = IM\sigma^2$, σ 为测温误差的标准差。

3 算例及分析

以外壁半径 $r_{\text{out}} = 0.20$ m, 未发生腐蚀前内壁半径 $r_{\text{out}} = 0.15$ m 的二维钢材料管道为研究对象, 其热导率 $\lambda = 36$ W · (m · °C)⁻¹, 密度 $\rho = 7800$ kg · m⁻³, 比热容 $c_v = 460$ J · (kg · °C)⁻¹。管道初始均匀温度 $T_0 = 25$ °C, 管道内流体温度 $T_f = 200$ °C, 内壁面表面传热系数 $h_f = 1000$ W · (m² · °C)⁻¹, 环境温度 $T_a = 25$ °C, 外壁面表面传热系数 $h_a = 10$ W · (m² · °C)⁻¹。

考虑两种内壁面腐蚀的几何边界识别情形: 第一种 (Case A) 几何边界识别代表内壁面腐蚀后的几何形状为正弦曲线的情形; 第二种 (Case B) 几何边界识别代表内壁面局部腐蚀后的几何形状为阶跃曲线的情形。两种情形的几何形状函数表达式如下 ($i = 1, \dots, n$)。

Case A

$$r_{e_i} = 0.13 + 0.02 \sin \theta_i \quad (10)$$

Case B

$$r_{e_i} = \begin{cases} 0.15 & (\theta_i < \frac{2\pi}{3} \text{ 或 } \theta_i > \frac{4\pi}{3}) \\ 0.18 & (\frac{2\pi}{3} \leq \theta_i \leq \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (11)$$

管道不规则几何内边界识别问题可描述为: 根

据测量到的管道外表面温度,采用共轭梯度反问题算法对几何内边界描述参数进行反演估算。文中通过数值实验方法对该几何边界识别问题的可行性及有效性进行分析研究,管道外表面的测量温度通过已知真实几何内边界形状结合有限单元法求解导热控制方程式(1)、式(2)得到精确温度的基础上叠加一个随机测量误差进行模拟,即

$$Y_{ij} = T_{ij}(\mathbf{R}_e) + \omega\sigma \quad (12)$$

式中 $\mathbf{R}_e$ 是真实几何内边界形状的描述参数向量; ω 为一个在 $[-1, 1]$ 内均匀分布的随机变量; σ 为温度测量误差的标准偏差。

为了评价几何内边界识别的准确性,反演估算的平均相对误差定义为

$$Er_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{re_i - r_i}{re_i} \right| \times 100\% \quad (13)$$

式中 re_i 为 θ_i 极角处的真实几何内边界极半径值; r_i 为反演估算得到的 θ_i 极角处的几何内边界极半径值; n 为几何内边界离散的有限元节点总数。

为反映不同 θ_i 极角处的几何内边界参数在预期识别相对误差 Er_i 允许最大扰动量下的管道外表面温度变化大小,定义几何内边界参数 re_i 的相对敏感系数 Jr

$$Jr(re_i) = \max(|J(re_i)|)(Er_i \times re_i) \quad (14)$$

其中, $\max(|J(re_i)|)$ 反映了 re_i 单位扰动引起的管道外表面最大温度变化, $(Er_i \times re_i)$ 表示 re_i 预期识别相对误差为 Er_i 时允许的最大扰动量。各几何内边界参数的平均相对敏感系数 Jr_{av} 可表示为

$$Jr_{av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Jr(re_i) \quad (15)$$

相对敏感系数 Jr 越大,管道外表面温度对几何内边界参数的变化越为敏感,在相同测温误差标准偏差 σ 下,几何内边界参数的定量检测性也越高。图 3、图 4 给出了不同 θ_i 极角处几何内边界参数的相对敏感系数随时间的变化关系。由图 3、图 4 可知,对于不同的几何内边界识别情形,相对敏感系数 Jr 都是随着时间先增大后减小,当相对敏感系数 $Jr(re_i)$ 最大时为参数 re_i 的最佳检测时刻点,但是不同极角 θ_i 处几何内边界参数相对敏感数的最大值达到时间并不一致。为提高几何内边界整体定量检测的可靠性,本文选取各几何内边界参数的平均相对敏感系数 Jr_{av} 达到最大时作为瞬态检测的时刻点,平均相对敏感系数 Jr_{av} 随时间的变化关系如图 5 所示,其变化规律也是随着时间先增加后

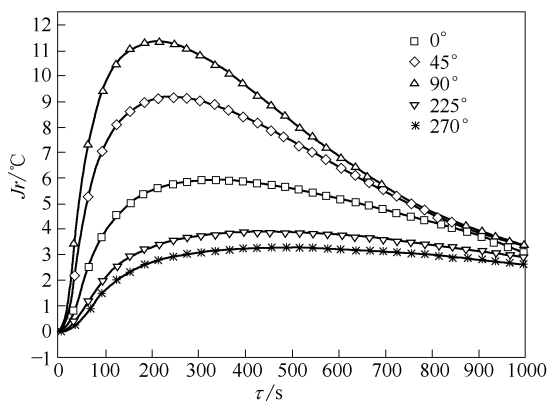


图 3 相对敏感系数随时间 τ 的变化 (Case A)

Fig. 3 Relative sensitivity coefficient Jr at different time τ in Case A

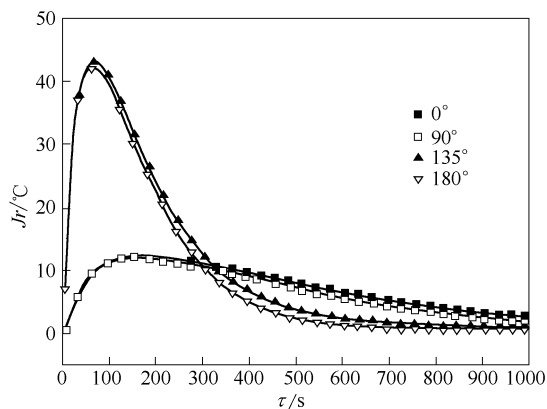


图 4 相对敏感系数随时间 τ 的变化 (Case B)

Fig. 4 Relative sensitivity coefficient Jr at different time τ in Case B

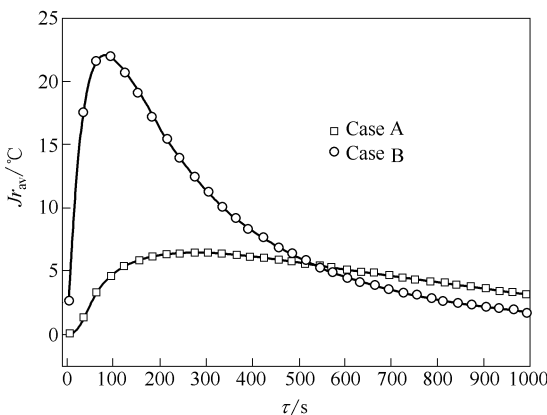


图 5 平均相对敏感系数随时间 τ 的变化

Fig. 5 Relation between average relative sensitivity coefficient Jr_{av} and time τ

减小。另外,从图 3~图 5 可知,当 $\tau \rightarrow \infty$ 时,管道处于稳态传热状态,几何内边界平均相对敏感系数及各参数的相对敏感系数都变得较小,几何内边

界的变化对管道外表面温度产生的变化很微小而容易淹没在测温误差中,故稳态条件下的内边界定量检测性较低。

管道发生腐蚀前后瞬态检测时刻点外表面的温度分布情况如图 6 所示。当管道未发生腐蚀前,其外表面的温度均匀分布;当管道发生腐蚀后,不同的腐蚀情形,其外表面产生不同的异常温度分布。根据文献 [15],基于红外热像测温判断材料内部是否存在缺陷的临界相对温差为 0.2°C ,从图 6 可看出,管道发生腐蚀后外表面的最大温差均远大于该临界相对温差,根据管道外表面的热像特征可以明显判断出管道内边界已经产生腐蚀,但这种判断仅是定性的,为进一步识别管道的腐蚀情形,还需要结合反问题算法作出定量反演估计,本文比较分析了稳瞬态检测条件下的内边界定量识别结果,考察了测温误差、初始假设对定量识别的影响。

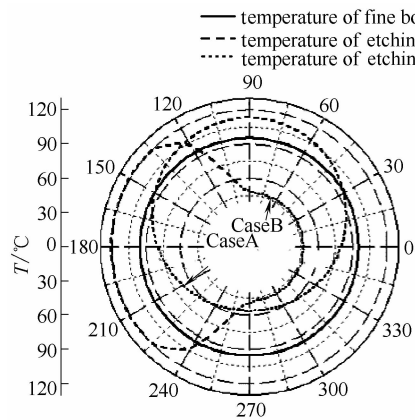


图 6 腐蚀前后管道外表面温度分布曲线
Fig. 6 Temperature distribution curves on pipeline outer surface before and after corrosion

图 7~图 10 分别考察了不同测温误差下,管道内边界的稳瞬态检测定量识别结果,当不考虑测温误差时,取收敛标准 $\epsilon=1\times 10^{-4}$ 。从图中可以看出,如果管道外表面温度测量精确 ($\sigma=0^{\circ}\text{C}$),采用稳态和瞬态检测方式都能很准确地识别出管道内边界腐蚀后的几何形状。实际检测难免存在测温误差,当测温存在测量误差时,管道内边界的识别结果会随着测温误差的增加而降低。比较稳瞬态识别结果可以发现:瞬态检测条件下,管道内边界的定量识别结果受测温误差的影响较小,在较大的测温误差下仍能比较准确地定量识别出内边界几何形状;而稳态检测定量识别对管道外表面的测温精度

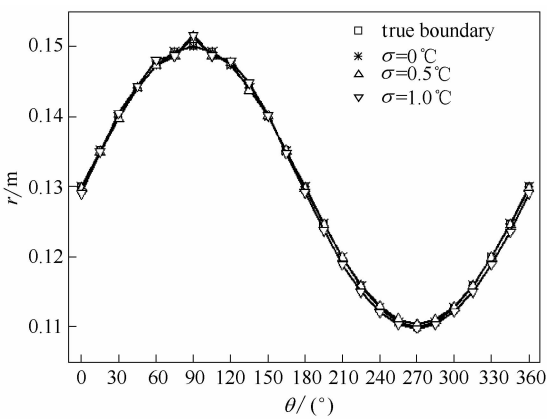


图 7 不同测温误差下 Case A 内边界的瞬态识别结果
Fig. 7 Transient identification results of inner boundary Case A with different temperature measurements

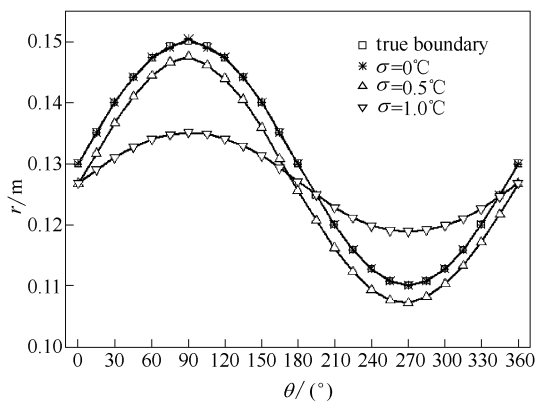


图 8 不同测温误差下 Case A 内边界的稳态识别结果
Fig. 8 Steady identification results of inner boundary Case A with different temperature measurements

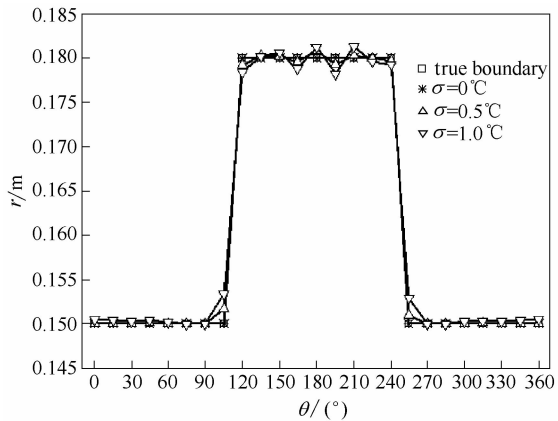


图 9 不同测温误差下 Case B 内边界的瞬态识别结果
Fig. 9 Transient identification results of inner boundary Case B with different temperature measurements

要求较高,在测温精度较低时能大致识别出内边界的几何形状,但识别结果准确性较低。这是因为管道外表面温度对内边界的敏感性越低,内边界的定

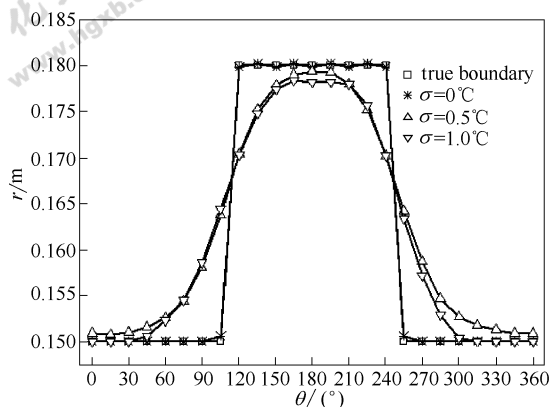


图 10 不同测温误差下 Case B 内边界的稳态识别结果
Fig. 10 Steady identification results of inner boundary Case B with different temperature measurements

量检测性就越差，瞬态检测条件下的管道外表面温度对内边界的敏感性大于管道外表面稳态温度对内边界的敏感性（图 4、图 5）。由此可知：当对管道内边界检测识别精度要求较高时，瞬态检测比稳态检测更具优势。

管道内边界的定量识别是依据外表面的测量温度，然后从某一初始假设值出发通过反演算法对该初值进行不断修正直至满足收敛条件最终获得识别结果的。因此，可靠的识别结果要求给定不同的初始假设值都能得到稳定的反演估计结果。图 11、图 12 给出了测温误差标准偏差 $\sigma=1.0^{\circ}\text{C}$ 时，不同初始假设下的瞬态识别结果。从图中可知：给定不同的内边界初值假设，不同管道内边界腐蚀情形下都能得到稳定的定量识别结果。因此，采用瞬态检测结合共轭梯度反演算法得到的管道内边界定量识别结果是稳定可靠的。

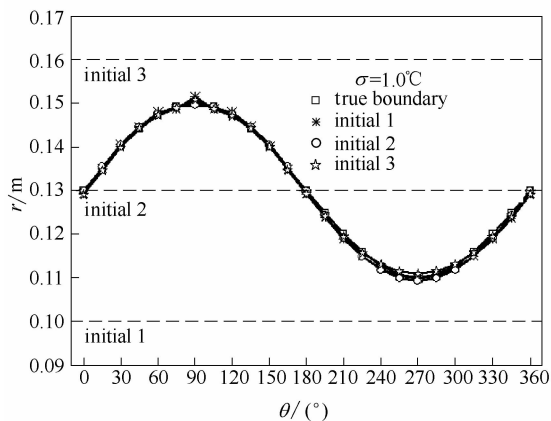


图 11 不同初值假设 Case A 内边界的瞬态识别结果
Fig. 11 Transient identification results of inner boundary Case A with different initial guesses

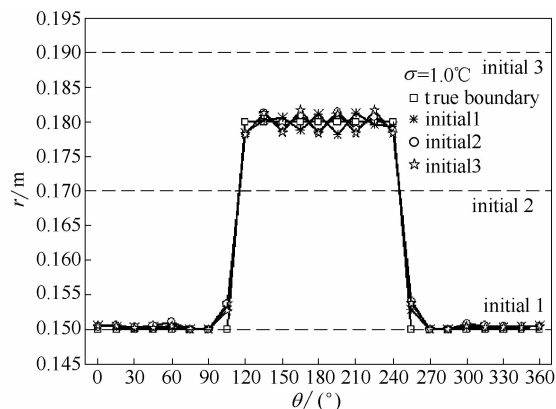


图 12 不同初值假设 Case B 内边界的瞬态识别结果
Fig. 12 Transient identification results of inner boundary Case B with different initial guesses

4 结 论

本文采用有限元法和共轭梯度法的反演算法对管道内边界腐蚀形状定量识别问题进行了研究，比较分析了稳瞬态检测的差异性，并对不同腐蚀内边界识别情形进行了数值实验，验证了算法的有效性。在实际管道内边界腐蚀缺陷检测识别时，瞬态检测识别结果比稳态检测识别结果更加准确、可靠。不存在测温误差时，稳瞬态检测方式都能准确地识别出管道内边界的几何形状，测温误差的增加对稳态检测识别结果影响较大，只能识别出管道内边界的大致形状，而瞬态检测方式在较大测温误差下仍能比较准确地识别出管道内边界形状，且在不同的内边界初始假设下都能得到稳定的识别结果。

References

- [1] Zhang Dahu (张大虎). Identification of hazards in pipeline oil transferring and accident prevention [J]. *Petroleum Products Application Research* (石油商技), 2004, **22** (6): 20-22
- [2] Liu Huifang (刘慧芳), Zhang Peng (张鹏), Zhou Junjie (周俊杰), Yu Lin (于林). Current state and development trend of internal corrosion detection technology for oil and gas pipeline [J]. *Pipeline Technique and Equipment* (管道技术与设备), 2008, **5**: 46-48
- [3] Zhang Qimin (张其敏), Yang Hongdong (严宏东). Leak detection techniques and its evaluation of pipeline [J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Science Edition* (重庆科技学院学报: 自然科学版), 2006, **8** (2): 33-35
- [4] Li Dansong (李丹嵩). Application and development of infrared thermal imaging technology in chemical engineering equipments inspection and testing [J]. *Shanghai Chemical Industry* (上海化工), 2010, **35** (6): 26-30

- [5] Jin Guangxi (金光熙), Xu Dan (徐丹), Pan Fenghong (潘凤红), Liu Tingting (刘婷婷). Application of infrared thermographic technique in detecting the thermal loss of petrochemical thermal equipment [J]. *Infrared Technology* (红外技术), 2009, **31** (11): 668-670
- [6] Liu Yanmin (刘衍民), Hu Binbin (胡彬彬). Application of infrared imaging technology on special equipment inspection and damage diagnosis [J]. *Nondestructive Inspection* (无损探伤), 2008, **32** (4): 37-49
- [7] Zhang Hong (张红), Li Xiaogang (李晓刚), Guo Lijie (郭丽杰). Application and research of infrared software system to evaluate the effect of heat preservation for lines [J]. *Infrared Technology* (红外技术), 2004, **26** (2): 72-75
- [8] Zhao Shibin (赵石彬), Zhang Cunlin (张存林), Wu Naiming (伍耐明), Duan Yuxia (段玉霞), Li Yanhong (李艳红). Infrared thermal wave non-destructive inspection for defects of polypropylene pipeline [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2010, **30** (2): 456-460
- [9] Shen Gongtian (沈功田), Li Tao (李涛), Yao Zehua (姚泽华), Qiu Hongcheng (邱虹程). Infrared thermography for high temperature pressure pipes [J]. *Nondestructive Testing* (无损检测), 2002, **24** (11): 473-476
- [10] Li Bin (李斌), Liu Linhua (刘林华). Geometry boundary identification of unsteady heat conduction based on dual reciprocity boundary element method [J]. *Proceedings of the CSEE* (中国电机工程学报), 2009, **29** (5): 66-71
- [11] Li Bin (李斌), Liu Linhua (刘林华). An algorithm for geometry boundary identification of heat conduction problem based on boundary element discretization [J]. *Proceedings of the CSEE* (中国电机工程学报), 2008, **28** (20): 38-43
- [12] Chen Yi (陈怡), Tan Yongji (谭永基), Gu Xianglin (顾祥林), Chen Helin (陈贺林). Monitoring the wear-line of blast furnace with inverse problem and genetic algorithm [J]. *Journal of Fudan University: Natural Science* (复旦学报: 自然科学版), 2006, **45** (2): 170-176
- [13] Fan Chunli (范春利), Sun Fengrui (孙丰瑞), Yang Li (杨立). Algorithm study on identification of pipeline's irregular inner boundary for infrared thermography [J]. *Journal of Thermal Science and Technology* (热科学与技术), 2006, **5** (2): 112-117
- [14] Necat Ozisik M., Hrb Orlande. Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications [M]. London: Taylor & Francis, 2000
- [15] Terumi Inagaki, Toshimitsu Ishii, Toshikatsu Iwamoto. On the NDT and E for the diagnosis of defects using infrared thermography [J]. *NDT&E International*, 1999, **32** (5): 247-257