DOI: 10.3901/JME.2015.16.171

基于导热反问题的二维圆管内壁面第三类边界条件的反演*

韩雯雯¹ 吴健² 刘长亮² 卢涛¹ 姜培学³ 祝银海³

(1. 北京化工大学机电工程学院 北京 100029;

2. 中国核电工程有限公司 北京 100840;

3. 清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室 北京 100084)

摘要: 对于诸如核电领域中有特殊安全要求或结构完备性要求较高的管道系统,不允许在管道开孔来安装温度传感器测量管道内壁面温度和流体温度,需要寻求一种间接无损的方法来预测或评估管道内壁面温度的分布及变化。在有限元法基础上建立温度场数学模型,基于共轭梯度法进行反问题分析,利用圆管外壁面可测的有限温度信息同时反演出第三类边界条件,即内壁面温度、近内壁流体温度以及表面传热系数,并能够获得整个壁面温度的全貌及其分布特征。计算结果及误差分析表明,此方法的精度较高,共轭梯度法能够准确地反演出该圆管内壁的第三类边界条件。该方法不仅可以为结构应力分析和热疲劳分析提供准确的瞬时热载荷,而且为实现一种无损测温方法提供坚实的理论基础。

关键词: 多宗量;导热反问题;有限元法;共轭梯度法;稳压器波动管

中图分类号: O482

Inversion of the Third Boundary Condition on the Inner Wall of a Two-dimensional Pipe Based on Inverse Heat Conduction Problems

HAN Wenwen¹ WU Jian² LIU Changliang² LU Tao¹ JIANG Peixue³ ZHU Yin Hai³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering,

Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840;

3. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: The piping system with special safety requirements or higher requirements for structural completeness in nuclear power field, are not allowed to install the temperature sensor through opening pore in the pipe to measure the pipe wall temperature and fluid temperature. A kind of indirect and nondestructive method is in need to predict or evaluate the distribution and variations of the inner wall temperature. The mathematical model of temperature field is established based on the finite element method. And the inverse problem analysis is based on the conjugate gradient methods. The third boundary condition—the inner wall temperature, the fluid temperature near the inner wall, and the convective heat transfer coefficient—is simultaneously inverse solved, and the whole picture and distribution of the wall temperature are obtained. The calculation results and the error analysis indicates that the method is with high accuracy and can inverse estimate the third boundary condition precisely. The method can not only offer exact transient thermal load for the structure stress analysis and thermal fatigue analysis, but also provide a solid theoretical basis for achieving a kind of nondestructive measurement method.

Key words: multi-variables; inverse heat conduction problems; finite element method; conjugate gradient methods; pressurizer surge line

* 国家自然科学基金(51276009)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0651)和国家核电重大专项(2011ZX06004-004-001)资助项目。20141025收到初稿,20150410收到修改稿

0 前言

圆管是工业中流体输送装置中最普遍的装置,广泛应用于化工、核电等领域。在流体输送过程中,冷热流体交汇时会出现温度波动,并形成热分层现象。温度波动会诱发固体壁面疲劳裂纹,进而引起结构热疲劳^[1-2]。冷热流体热分层现象多存在于诸如液体火箭液氧贮箱^[3]、核电稳压波动管^[4]及安注管道^[5]等工程领域中。在核工业界,仅在 1970—1999 年间,全球核电厂有报告的由热疲劳引起的管道破裂事件就有 54 起。所以预测弯管内壁面热波动是核电厂及化工厂等事故预防和安全运行的亟待解决的课题之一。

对于一些诸如核电、化工、石油等领域中有特殊安全要求或结构完备性要求较高的管道系统,不允许或不便在管道内部或通过开孔在管道内壁安装温度传感器来直接测量内壁面温度,需要寻求一种间接无损的方法来预测或评估管道内壁面温度的分布及变化。运用 CFD 方法可以对稳压波动管的热分层现象进行数值分析^[6-7],此方法虽然可以预测管线的热波动,但一般耗时很长。在核电领域一般会采用疲劳监测系统来监测管道壁面的热波动^[8],但监测的仅仅是外壁面的温度波动,而管壁疲劳裂纹一般都是从管道内壁开始产生的,所以准确监测内壁面温度波动更为重要。因此,本文提出了一种根据外壁面温度波动预测内壁面温度波动的方法—瞬态多宗量导热反问题。

随着计算机技术的快速发展,导热反问题在航空航天、土木工程、无损检测等领域得到了广泛的应用。所谓导热反问题,是指通过研究对象内部(或边界)一点或多点的温度信息来反推未知的宗量,如边界条件、初始条件、导热系数、内热源强度、物体体的几何条件等宗量中未知的部分,是涉及传热学、物理、数学、计算机、试验技术等学科的交叉领域^[9]。近年来,导热反问题在工程实际中得到了广泛的应用。石宏臣等^[10]利用红外热像仪检测得到的储罐外表面温度反演估计了储罐液位和管内流体温度。吕事桂等^[11]利用测得的瞬态管道外壁面温度识别了管道内边界腐蚀后的几何形状。董深等^[12]用反问题方法对供水管网进行了漏失定位。薛齐文等^[13]对一阶非定常热力耦合反问题中的热导率和热边界条件等宗量进行有效的单一和组合识别。

本课题中以稳压器波动管模拟件为模型(按照 AP1000 的稳压器波动管实际尺寸进行比例缩放),如图 1 所示,直径较大的管道为主回路管道,直径

较小的管道为稳压器波动管,稳压器波动管一端与主管道热段上的波动管接管嘴相连,另一端与稳压器下部的波动管接管嘴相连。由于稳压器中的冷却剂温度比主回路中的高,在出现波动流的情况下,来自主回路的冷却剂温度低,密度高,占据波动管水平管段截面的下部;来自稳压器的冷却剂温度高,密度低,占据波动管水平管段截面的上部。工程上将上述现象称为稳压器波动管的热分层。稳压器波动管内流体的温度分层引起管壁的温度分层,这就会使管壁产生疲劳应力,从而产生疲劳裂纹,严重时会使管道破裂产生事故。因此监测管壁温度波动,为热疲劳分析及结构应力分析提供准确的瞬时热载荷十分必要。

图 1 稳压波动管示意图

工程经验表明,如图 2 所示,管道拐角处 24D 截面容易发生热分层现象,因此本文选取 24D 截面作为研究对象,本文所建二维模型具有很强的通用性和代表性。

图 2 截面示意图

本课题利用外壁面测得的温度值作为唯一输入变量,同时反演出内壁面温度、圆管内部流体温度以及表面传热系数等三个变量。先前的一些研究中^[14-15]反演了内壁面的温度,但是除此变量外,其

他物性参数均为已知, 属于单宗量反问题的范畴。而本课题中同时反演 3 个变量, 属于多宗量的范畴。由于核电中对结构完整性要求很高, 通过管道外壁面测量温度, 通过多宗量瞬态导热反问题反演管道内壁面第三类传热边界具有重要的学术价值和工程实际意义。

1 数学模型

导热反问题在求解过程中包括正问题求解和优化两个过程。正问题求解采取了有限元法, 此方法可以有效地应用于一些工程问题, 且可以较方便地进行敏度分析。优化过程采用了共轭梯度法, 因为此方法可以有效克服或减轻反问题的不适定性特征。

选取波动管 24D 截面作为研究对象, 其物理模型如图 3 所示。圆管外径为 65 mm, 内径为 56 mm; 导热系数 $\lambda = 19.35 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; 内壁与流体之间为对流换热, 流体温度与表面传热系数待求; 外壁面绝热; 时间步长 $\Delta\tau = 1 \text{ s}$, 总时间为 300 s。试验测得外壁数据仅为 0° 和 180° 两个测量点的温度。

图 3 物理模型

二维导热正问题的控制方程及边界条件为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (x, y) \in \Omega \quad (1)$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = h_{f, \text{in}} (T_{f, \text{in}} - T_w) \quad (x, y) \in \text{内壁面} \quad (2)$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = q_w = 0 \quad (x, y) \in \text{外壁面} \quad (3)$$

式中 ρ ——材料密度;
 c ——材料比热;
 τ ——时间;
 $h_{f, \text{in}}$ ——表面传热系数;
 $T_{f, \text{in}}$ ——流体温度;
 T_w ——壁面温度;
 q_w ——热流密度。

构建已知外壁面温度数据求解内部流体温度及内部流体与内壁间表面传热系数的反问题。该反问题在数学上可以转化为以下泛函变分的最优化问题, 即

$$J(\mathbf{R}) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M [T_{n, m, \text{cal}}(\mathbf{R}) - T_{n, m, \text{mea}}]^2 \quad (4)$$

式中, $\mathbf{R}$ 为待反演参数矢量, 即 $\mathbf{R} = \{r_1, r_2, \dots, r_{M+1}\} = \{T_{f1}, T_{f2}, \dots, T_{fM}, h\}$, $T_{n, m, \text{cal}}$ 为计算而得的外壁面温度; $T_{n, m, \text{mea}}$ 为外壁面的测量温度。 M 为外壁面测量点数目, N 为时间步长数。当 $J(\mathbf{R})$ 最小时, 认为反演计算值 $T_{n, m, \text{cal}}$ 和试验测量值 $T_{n, m, \text{mea}}$ 最为接近, 从而获得最优的反问题解。

2 有限元分析

文中采用有限元法求解导热方程, 根据伽辽金法建立瞬态导热问题有限元格式, 用三角形单元剖分区域, 采用线性温度插值函数, 将式(1)转换成关于节点温度值的代数方程组, 写成矩阵形式

$$\mathbf{C}\dot{\mathbf{T}} + \mathbf{K}\mathbf{T} = \mathbf{P} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{C}$ 为热容矩阵; $\dot{\mathbf{T}}$ 为温度节点对时间的导数列阵; $\mathbf{K}$ 为热传导矩阵; $\mathbf{T}$ 为未知的节点温度列阵; $\mathbf{P}$ 为温度载荷列阵。其中计算 $\mathbf{C}$ 时, 选用调和热容矩阵, 因为与集中热容矩阵相比, 调和热容矩阵对时间步长的限制要小些。通过该式就可以求解管壁温度分布。当管道内流体温度波动时, 其对应的外壁面温度也将发生相应的变化。

3 共轭梯度优化算法

根据共轭梯度法, 待反演参数 $\mathbf{R}$ 迭代式为

$$\mathbf{R}^{b+1} = \mathbf{R}^b - \beta^b \mathbf{d}^b \quad (6)$$

式中, b 为迭代步数; β^b 为迭代步长; $\mathbf{d}^b$ 为共轭搜索方向, 由式(7)求得

$$\mathbf{d}^b = \nabla J(\mathbf{R}^b) + r^b \mathbf{d}^{b-1} \quad (7)$$

式中, r^b 为共轭系数, 由式(8)求得

$$r^b = \frac{\nabla J(\mathbf{R}^b) \nabla J^T(\mathbf{R}^b)}{\nabla J(\mathbf{R}^{b-1}) \nabla J^T(\mathbf{R}^{b-1})} \quad (8)$$

式中, $\nabla J(\mathbf{R}^b)$ 为目标函数的梯度。

$$\nabla J(\mathbf{R}^b) = (\partial J / \partial r_1, \partial J / \partial r_2, \dots, \partial J / \partial r_{M+1}) \quad (9)$$

$$\frac{\partial J(\mathbf{R}^b)}{\partial r_l} = 2 \sum_{k=1}^4 [T_k^{\text{cal}}(\mathbf{R}^b) - T_k^{\text{cal}}] \frac{\partial T_k^{\text{cal}}}{\partial r_l}$$

$$l=1,2,\dots,M+1$$

迭代步长 β^b 可通过优化目标函数获得

$$\beta^b = \frac{\sum_{k=1}^4 [T_k^{\text{cal}}(R^b) - T_k^{\text{cal}}] \nabla T_k d^b}{\sum_{k=1}^4 (\nabla T_k d^b)^2} \quad (10)$$

行矢量

$$\nabla T_k = \left(\partial T_k^{\text{cal}} / \partial r_1, \partial T_k^{\text{cal}} / \partial r_2, \dots, \partial T_k^{\text{cal}} / \partial r_{M+1} \right) \quad (11)$$

在应用中, ∇T_k 由有限元法确定。

利用共轭梯度法求解此反问题的流程如图4所示。首先, 设置流体温度和表面传热系数的初值 $R_0 = \{r_1, r_2, \dots, r_{M+1}\} = \{T_{f1}, T_{f2}, \dots, T_{fM}, h\}$; 把初值代入式(5)进行正问题求解; 把求解得出的外壁面测点温度值代入式(4)得出 J , 判断是否满足 $J \leq e$, 若满足则输出结果, 若不满足则转到下一步; 利用共轭梯度法对流体温度和表面传热系数的估计值进行优化, 返回到第二步继续运算。

图4 求解流程图

4 计算结果及误差分析

由二维瞬态多宗量导热反问题求解的圆管温度云图如图5所示。从图5可以看出, 在不同时刻温度分布近似, 都是 0° 处的温度最高, 沿周向方向递减, 到 180° 处温度达到最低, 且在径向无较大温度梯度。由于热流体密度低, 冷流体密度高, 所以温度最高点在顶部, 最低点在底部, 且沿周向递减; 由于不锈钢的导热性良好, 所以在径向上无较大温度梯度。

二维瞬态多宗量导热反问题求解结果为 $h = 4\,006\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 对应 0° 和 180° 位置处的流体、内壁面及外壁面温度随时间的变化曲线如图6所示。

由图6可以看出, 在不同测点处都是流体温度波动最大, 内壁面温度波动次之, 外壁面温度波动最小。这是由于表面传热与热传导对温度波动信号

具有衰减作用。在 0° 处, 内部流体温度最高, 总体上热量从流体向管壁方向传递, 且流体、内壁面和外壁面温度的平均值基本相等。在 180° 处, 三者的温度均达到最低, 受二次流和壁面导热的综合影响, 使得外壁面的温度波动略高于内壁面的温度波动。

(a) 第100 s

(b) 第200 s

图5 圆管温度云图

(a) 0°

图 6 流体、内壁面及外壁面温度随时间的变化曲线

图 7 为外壁面温度测量值与估算值随时间的变化曲线。从图 7 中可以看出估算值与测量值的变化趋势及波动幅度基本一致。

图 7 外壁面温度测量值与估算值随时间的变化曲线

为检验外壁面估算平均值与测量平均值的偏离程度, 定义平均相对误差为

$$\bar{\varepsilon} = \frac{|\bar{T}_{\text{mea}} - \bar{T}_{\text{cal}}|}{|\bar{T}_{\text{mea}}|} \quad (12)$$

式中, $\bar{T}_{\text{mea}}$ 为某一测量点的测量值在计算时间内的平均值; $\bar{T}_{\text{cal}}$ 为某一测量点的估算值在计算时间内的

的平均值。 $\bar{\varepsilon}$ 越小, 意味着估算平均值与测量平均值的偏离程度越小, 计算精度也越高。表 1 为不同测点处的平均相对误差。

表 1 平均相对误差值

测点位置	0°	180°
平均相对误差(%)	0.35	0.34

为了看出外壁面温度的波动程度, 定义测量值与估算值的最大振幅分别为

$$\Delta T_{\text{max,mea}} = |T_{\text{max,mea}} - \bar{T}| \quad (13)$$

$$\Delta T_{\text{max,cal}} = |T_{\text{max,cal}} - \bar{T}| \quad (14)$$

式中, $T_{\text{max,mea}}$ 为外壁面测量值中的最大值; $T_{\text{max,cal}}$ 为外壁面估算值的最大值; $\bar{T}$ 为平均温度。 $\Delta T_{\text{max,mea}}$ 、 $\Delta T_{\text{max,cal}}$ 越大, 意味着外壁面温度波动越大。表 2 为测量值与估算值的最大振幅。

为检验估算值最大振幅与测量值最大振幅的偏离程度, 定义最大振幅相对误差, 见表 3。

$$\varepsilon_{\Delta T} = \frac{|\Delta T_{\text{max,mea}} - \Delta T_{\text{max,cal}}|}{|\Delta T_{\text{max,mea}}|} \quad (15)$$

表 2 测量值与估算值的最大振幅

测点位置	0°	180°
$\Delta T_{\text{max,mea}} / ^\circ\text{C}$	3.96	2.27
$\Delta T_{\text{max,cal}} / ^\circ\text{C}$	4.51	2.50

表 3 最大振幅相对误差值

测点位置	0°	180°
相对误差值(%)	14	10

5 结论

(1) 以外壁面有限测点温度作为反问题的输入条件, 二维多宗量瞬态导热反问题能够反演出内壁面固体温度、近壁面流体温度和表面传热系数, 并能够获得整个壁面温度的全貌及其分布特性。

(2) 稳压波动管 24D 截面外壁面最大温度振幅的反演值与试验值的相对误差不超过 15%, 说明二维多宗量瞬态导热反问题具有较高的反演精度。

(3) 二维多宗量瞬态导热反问题以外壁面较弱的温度波动信息为输入条件, 可以反演得到较强的内壁面和近壁面较强的温度波动特征及管壁的传热特征, 该方法不仅可为结构应力分析和热疲劳分析提供准确的瞬态热载荷, 而且为实现一种无损测温方法提供坚实的理论基础。

参 考 文 献

- [1] MESHII T, SHIBATA K, WATANABE K. Simplified method to evaluate upper limit stress intensity factor range of an inner-surface circumferential crack under steady state thermal striping[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236(10): 1081-1085.
- [2] LEJEAIL Y, KASAHARA N. Thermal fatigue evaluation of cylinders and plates subjected to fluid temperature fluctuations[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(7): 768-772.
- [3] 程向华, 厉彦忠, 陈二锋, 等. 新型运载火箭射前预冷液氧贮箱热分层的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(9): 1132-1136.
CHENG Xianghua, LI Yanzhong, CHEN Erfeng, et al. Numerical investigation of thermal stratification in liquid oxygen tank for new-style launch vehicle during ground precooling[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(9): 1132-1136.
- [4] JI C C, TUAN P C, JANG H Y. A recursive least-squares algorithm for on-line 1-D inverse heat conduction estimation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40(9): 2081-2096.
- [5] 郭德朋, 陆道纲, 冯预恒. 核电厂管线中的热分层现象[J]. 原子能科学技术, 2007, 41(5): 570-574.
GUO Depeng, LU Daogang, FENG Yuheng. Thermal stratification phenomenon in pipelines of nuclear power plant[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41(5): 570-574.
- [6] 张力, 赖建永, 黄伟, 等. 压水堆核电厂稳压器波动管热分层现象数值分析[J]. 核动力工程, 2009, 30(4): 91-95.
ZHANG Li, LAI Jianyong, HUANG Wei, et al. Numerical simulation for thermal stratification of PWR NPP pressurizer surge line[J]. Nuclear Power Engineering, 2009, 30(4): 91-95.
- [7] KANG D G, JHUNG M J, CHANG S H. Fluid-structure interaction analysis for pressurizer surge line subjected to thermal stratification[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(1): 257-269.
- [8] BIENIUSSA K W, RECK H. Piping specific analysis of stresses due to thermal stratification[J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 190(1): 239-249.
- [9] 薛齐文. 多宗量热传导反问题的数值求解[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
XUE Qiwen. Numerical solutions of inverse heat conduction problems with multi-variables[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [10] 石宏臣, 张晓怀, 孙丰瑞, 等. 基于红外成像测温的储罐液位传热反问题识别方法[J]. 化工学报, 2013, 63(12): 3771-3775.
SHI Hongchen, ZHANG Xiaohuai, SUN Fengrui, et al. An inverse heat transfer algorithm for liquid level detection of storage tank based on infrared imaging temperature measurement[J]. CIESC Journal, 2013, 63(12): 3771-3775.
- [11] 吕事桂, 杨立, 范春利. 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[J]. 化工学报, 2013, 63(12): 3805-3811.
LÜ Shigui, YANG Li, FAN Chunli. Identification of irregular pipeline geometry boundary using infrared transient inspection based on finite element discretization[J]. CIESC Journal, 2013, 63(12): 3805-3811.
- [12] 董深, 吕谋, 盛泽斌, 等. 基于遗传算法的供水管网反问题漏失定位[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(2): 106-110.
DONG Shen, LÜ Mou, SHENG Zebin, et al. Inverse transient leakage location of water supply network based on genetic algorithm[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(2): 106-110.
- [13] 薛齐文, 张雪珊. 热力耦合反问题研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 157-168.
XUE Qiwen, ZHANG Xueshan. Research of inverse problem of thermo-mechanical coupling [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 157-168.
- [14] LU T, LIU B, JIANG P X. Inverse estimation of the inner wall temperature fluctuations in a pipe elbow[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(11-12): 1976-1982.
- [15] LU T, LIU B, JIANG P X, et al. A two-dimensional inverse heat conduction problem in estimating the fluid temperature in a pipeline[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(13): 1574-1579.

作者简介: 韩雯雯, 女, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为工程热物理。

E-mail: hbhanwenwen@163.com

吴健, 男, 1982 年出生, 硕士, 工程师。主要研究方向为核电站工艺系统设计。

E-mail: wujian-114@163.com

刘长亮, 男, 1981 年出生, 硕士, 工程师。主要研究方向为核反应堆系统和设备设计。

E-mail: liucl_cnpe@163.com

卢涛(通信作者), 男, 1975 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为工程热物理。

E-mail: likesurge@sina.com

姜培学, 男, 1964 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为工程热物理。

E-mail: jiangpx@mail.tsinghua.edu.cn

祝银海, 男, 1981 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为喷射制冷和传热传质。

E-mail: yinhai.zhu@tsinghua.edu.cn