

文章编号:1001-5078(2007)09-0849-03

圆筒内壁热流密度和对流换热系数的红外热诊断研究

曹春梅

(华北电力大学数理系,河北保定 071003)

摘要:利用红外测温技术,结合导热反问题求解,给出了一种根据圆筒外壁温度数据红外监测做为第一类边界条件反推圆筒内壁热流密度分布和对流换热系数分布的红外热诊断方案,得到了二维稳态圆筒内壁热流密度分布和对流换热系数分布的普适解析级数解,从而为这一类热设备内壁热流密度和对流换热系数分布的红外诊断提供了充分的理论依据。

关键词:红外测温;导热反问题;热流密度;对流换热系数

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A

Infrared Thermaldiagnosis Study on Inner Wall Heat Flux and Heat Transfer Coefficient of Pipeline

CAO Chun-mei

(Dept. of Mathematics and Physics, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: By solving an inverse heat conduction problem, one method is developed about how to determinate inner wall heat flux and heat transfer coefficient of pipeline. Analytic equations are given making use of the surface temperature distribution obtained by scanning the outer wall of pipeline. The conclusion can be drawn that this method is theoretically reasonable and feasible.

Key words: infrared temperature-measuring; inverse heat conduction problem; local heat flux; local heat transfer coefficient

1 引言

红外技术作为一门20世纪发展起来的高新技术,近年来越来越多地用于热设备的状态检测和故障诊断中^[1]。对于科学实验和工程中的热设备的运行状态,内部热参量如热流密度分布、对流换热系数分布是确定其运行状态是否正常的重要参量,依据这些热参量,可及时在线了解热设备的使用状态,从而为热设备的正常运行提供可靠的依据,而其内部热参量如热流密度、对流换热系数通常是难以直接测量的^[2-5]。本文以动力工程中常见的一定壁厚的圆筒状热设备为研究对象,利用红外热像仪扫描容易实现的圆筒外壁得到的温度分布作为附加边界条件,结合导热反问题的求解^[6],给出了相应内壁为第二类边界条件时的热参量热流密度和第三类边

界条件时的热参量对流换热系数的解析级数解,为红外热诊断又提供了一个理论实例。

2 物理模型

以图1中的有一定壁厚的圆筒结构的热设备截面俯视图为例。该系统达到稳定工况后,是一稳态、无内热源、常物性和各向同性均匀介质系统。圆筒外壁以对流换热方式(对流换热系数为 h_1)自由冷却,并由红外热像仪扫描可获得其外壁温度离散数

基金项目:河北保定华北电力大学青年教师基金(No. 93210028)。

作者简介:曹春梅(1965-),女,教授,在读博士,从事物理教学工作,主要研究方向为红外热诊断在工程实际中的应用,已发表论文多篇。E-mail: caochunmeihd@sohu.com

收稿日期:2007-06-02

据;内壁可具有第二类边界条件(Neumann条件),但其热流密度为 q 是未知的;或具有第三类边界条件(Robin条件),但其对流换热系数 h_2 也是未知的。这里是要根据红外热像仪扫描得到的筒体外壁温度分布规律反推出其内壁热流密度或对流换热系数的分布规律。

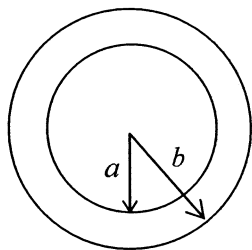


图1 圆筒热设备俯视图

Fig. 1 vertical view of cylinder-shaped equipment

假设圆筒的长度远远大于其截面半径,从而可忽略边缘效应而认为圆筒为无限长,并且忽略筒体的轴向导热和温度变化,若材料的物性均匀且不随时间变化,内部无热沉积,达到稳定状态时,可以用以下方程和定解条件来描述上述热传导问题^[7]:

控制方程:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} = 0 \quad (a < r < b \quad 0 < \theta <$$

$$2\pi) \quad (1a)$$

边界条件:

$$\text{外壁面: } -k \frac{\partial T}{\partial r} = h_1 (T - T_\infty) \quad r = b \quad (\text{外壁对}$$

$$\text{流散热条件)} \quad (1b)$$

$$\text{内壁面: } -k \frac{\partial T}{\partial r} = q \quad r = a \quad (\text{内壁第二类边界}$$

$$\text{条件)} \quad (1c)$$

$$\text{或 } -k \frac{\partial T}{\partial r} = h_2 (T - T_0) \quad r = a \quad (\text{内壁第三类边}$$

$$\text{界条件)} \quad (1c')$$

$$T(r, \theta + 2\pi) = T(r, \theta) \quad (0 < \theta < 2\pi) \quad (\text{自然的}$$

$$\text{周期条件)} \quad (1d)$$

其中, T_∞ 为筒外环境温度; h_1 为圆筒外壁面与空气的对流换热系数; k 为圆筒材料的热传导系数; T_0 为筒内介质温度。计算的目的在于求解内壁面上的热流密度分布 $q(\theta)$ 或对流换热系数 $h_2(\theta)$ 。

3 求解方法

在极坐标中,方程(1a)在周期条件式(1d)下的一般解可表为^[8]:

$$T(r, \theta) = C_0 + D_0 \ln r + \sum_{m=1}^{\infty} [(A_m r^m + B_m r^{-m}) \cos m\theta + (C_m r^m + D_m r^{-m}) \sin m\theta] \quad (2)$$

为确定傅里叶系数 C_0, D_0, A_m, B_m, C_m 和 D_m ,需将式(2)代入边界条件(1b)和(1c)或(1c'),但(1c)中 $q = q(\theta)$ 是未知的,(1c')中的 $h_2(\theta)$ 是未知的,而且是需要确定的量,显然只有边界条件(1b)是不够的,为此我们提供由红外热像仪扫描圆筒外壁一周获得的一些点的离散温度值:

$$T(b, \theta_j) = T_j \quad (j = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (1e)$$

作为附加条件,其中 N 为红外热像仪沿圆周扫描点的总个数。然后将外壁面具有的红外测温离散数据(1e)按方程(2)的形式拟合,即:

$$T(b, \theta) = T(\cos m\theta, \sin m\theta) \quad (1f)$$

此时再将(2)式代入边界条件(1f)和(1b),则傅里叶系数 C_0, D_0, A_m, B_m, C_m 和 D_m 可如下确定:

$$C_0 + D_0 \ln b + \sum_{m=1}^{\infty} [(A_m b^m + B_m b^{-m}) \cos m\theta + (C_m b^m + D_m b^{-m}) \sin m\theta]$$

$$= T(b, \theta) = T(\cos m\theta, \sin m\theta) \quad (0 < \theta < 2\pi)$$

$$C_0 h + D_0 (h \ln b + \frac{k}{b}) - h T_\infty +$$

$$\sum_{m=1}^{\infty} [(A_m (hb^m + b^{m-1}) + B_m (hb^{-m} - mb^{-m-1})) \cos m\theta +$$

$$[C_m (hb^m + mb^{m-1}) + D_m (hb^{-m} - mb^{-m-1})] \sin m\theta = 0$$

$$(0 < \theta < 2\pi)$$

可解出:

$$C_0 = \frac{\beta_0}{2} - Bi (T_\infty - \frac{\beta_0}{2}) \ln b$$

$$D_0 = Bi (T_\infty - \frac{\beta_0}{2})$$

$$A_m = \frac{\beta_m}{2m} (mb^{-m} - hb^{1-m})$$

$$B_m = \frac{\beta_m}{2m} (hb^{m+1} + mb^m)$$

$$C_m = \frac{\alpha_m}{2m} (mb^{-m} - hb^{1-m})$$

$$D_m = \frac{\alpha_m}{2m} (hb^{m+1} + mb^m)$$

以上傅里叶系数各式中 $\beta_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} T(b, \theta) d\theta, \beta_m =$

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} T(b, \theta) \cos m\theta d\theta, \alpha_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} T(b, \theta) \sin m\theta d\theta, \text{其中}$$

$Bi = \frac{hb}{k}$ 为毕渥准则,在此以圆筒的外半径 b 作为毕渥准则的特征尺度。

从而本问题的解析级数解为:

$$T(r, \theta) = \frac{\beta_0}{2} - Bi(T_\infty - \frac{\beta_0}{2}) \ln b + Bi(T_\infty - \frac{\beta_0}{2}) \ln r + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\left(\frac{\beta_m}{2m} (mb^{-m} - hb^{1-m}) r^m + \frac{\beta_m}{2m} (hb^{m+1} + mb^m) \cdot r^{-m} \right) \cos m\theta + \left(\frac{\alpha_m}{2m} (mb^{-m} - hb^{1-m}) r^m + \frac{\alpha_m}{2m} (hb^{m+1} + mb^m) r^{-m} \right) \sin m\theta \right] \quad (3)$$

利用已求得温度场式(3),在计入圆筒内壁具有第二类边界条件的情况下,将式(3)代入式(1c),即可得圆筒内壁热流密度分布规律的级数形式为:

$$q(a, \theta) = -k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=a} = k \cdot Bi \cdot \frac{\beta_0}{2a} - k \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \left[\frac{\beta_m}{2} (mb^{-m} - hb^{1-m}) a^{m-1} - \frac{\beta_m}{2} (hb^{m+1} + mb^m) a^{-m-1} \right] \cos m\theta + \left[\frac{\alpha_m}{2} (mb^{-m} - hb^{1-m}) a^{m-1} - \frac{\alpha_m}{2} (hb^{m+1} + mb^m) a^{-m-1} \right] \sin m\theta \right\}$$

利用已求得温度场式(3),在计入圆筒内壁具有第三类边界条件的情况下,则将式(3)代入(1c'),即可得圆筒内壁对流换热系数分布规律的级数形式为:

$$h_2 = -k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=a} / (T_{r=a} - T_0) = -k \left\{ -Bi \cdot \frac{\beta_0}{2a} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{\beta_m}{2} (mb^{-m} - hb^{1-m}) a^{m-1} - \frac{\beta_m}{2} (hb^{m+1} + mb^m) a^{-m-1} \right] \cos m\theta + \left[\frac{\alpha_m}{2} (mb^{-m} - hb^{1-m}) a^{m-1} - \frac{\alpha_m}{2} (hb^{m+1} + mb^m) a^{-m-1} \right] \sin m\theta \right\} / \left\{ \frac{\beta_0}{2} - T_0 + Bi(T_\infty - \frac{\beta_0}{2}) \ln \frac{a}{b} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{\beta_m}{2m} (mb^{-m} - hb^{1-m}) a^m + \frac{\beta_m}{2m} (hb^{m+1} + mb^m) a^{-m} \right] \cos m\theta + \left[\frac{\alpha_m}{2m} (mb^{-m} - hb^{1-m}) a^m + \frac{\alpha_m}{2m} (hb^{m+1} + mb^m) a^{-m} \right] \sin m\theta \right\}$$

从上述过程可看出,圆筒内壁热参数 $q(\theta)$ 和 $h_2(\theta)$ 的求解结果表示依赖于相应问题的温度场和内壁的温度分布,而内壁温度通过红外测温与导热反问题结合求解,在数学上已证明该解的唯一性、连续性和稳定性^[3],从而 $q(\theta)$ 和 $h_2(\theta)$ 的结果也具有唯一性、连续性和稳定性。

4 结论

本文给出了基于外壁温度由红外测温技术监测的由表及里红外热诊断内壁热参量(热流密度、对流换热系数)的解析方案,得到了二维稳态圆筒内壁热参量(热流密度、对流换热系数)的普适解析级数解,此方法可以级数解的形式精确地给出内边界的未知热参量,结果满足科研和工程应用的要求。从而为这一类热设备内壁热参量条件的红外热诊断提供了充分可靠的理论依据,同时也拓宽了红外测温技术的应用前景,有利于促进红外技术的快速发展。

参考文献:

- [1] 陈衡,侯善敬. 电力设备故障红外诊断[M]. 北京:中国电力出版社,1999.
- [2] Huang C H, Ozisik M N. Inverse problem of determining unknown wall heat flux in laminar flow through a parallel plate duct. [J]. Numerical Heat Transfer, 1992, 21 (Part A):55-70.
- [3] 李世雄,刘家琦. 小波变换和反演数学基础[M]. 北京:地质出版社,1994.
- [4] Jin-Hong Liu, Chao-Kuang Chen, Yue-Tzu Yang. An inverse method for simultaneous estimation of the center and surface thermal behavior of a heated cylinder normal to a turbulent air stream[J]. Journal of Heat Transfer, Transactions of the ASME, 2002, 124(8):601-608.
- [5] 吕邦泰. 汽包水空间内壁等价换热系数的计算[J]. 中国电机工程学报,1988,9(4):8-13.
- [6] Hsieh C K, et al. A general method for the solution of inverse heat conduction problems with partially unknown-system geometries [J]. Int. J. Heat Mass Transfer., 1986, 29 (1):47-58.
- [7] 程尚模. 传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988.
- [8] 徐世良. 数学物理方法解题分析[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1982.