

文章编号:1001-5078(2007)07-0658-03

圆筒内壁温度的红外热诊断解析方案

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作为一强加边界条件反推圆筒内壁温度分布的红外热诊断方案,得到了二维稳态圆筒内壁温度分布的普适解析级数解。并从理论上证明该级数解是实用的,从而为这一类热设备内壁温度边界条件的确定提供了充分的理论依据。

关键词:红外测温;导热反问题;解析级数解

中图分类号:TN219

文献标识码:A

Infrared Thermaldiagnosis Study on Inner Wall Temperature 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 compute inner wall temperature of pipeline. An analytic equation is given making use of the surface temperature distribution obtained by scanning the outer wall of pipeline, and its properties are discussed. The conclusion can be drawn that this method is theoretically reasonable and feasible.

Key words: infrared temperature-measuring; inverse heat conduction problem; analytic equation

1 引言

随着现代红外技术的不断成熟和日臻完善,利用红外热像仪温度检测的远距离、不接触、准确、实时、快速等特点发展起来的加热设备温度控制与监测的红外检测技术在工程实践中备受重视,并得到快速发展。红外热诊断技术^[1]是一种由表及里,由局部到整体,由目前推测过去和预测未来的技术,红外热诊断的理论依据是物体温度低于摄氏千度以下的红外热辐射和导热反问题^[2]的求解,红外测温结果常可用来判定与温度有关的设备状态是否正常^[3-4]。

在工程实践和科学实验中,使用许多与热有关的设备。对于高温筒状热设备而言,内部温度分布是确定其状态的重要参量之一。依据这一参数,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,而其内部温度通常是难以直接测量的^[5-6]。本文以动力工程中常见的一定壁厚的圆筒为研究对象,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^[7],结合导热反问题的求解由表及里推算出其内壁温度,给出了相应的解析级数解,并对结果进行了讨论。

2 数学模型

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、

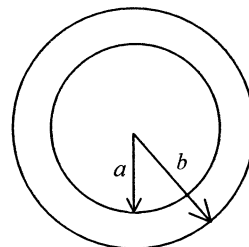


图1 圆筒热设备俯视图

Fig. 1 vertical view of cylinder-shaped equipment

基金项目:河北保定华北电力大学青年教师基金(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: caochunmei@sohu.com

收稿日期:2006-12-10

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冷却,并由红外热像仪扫描获得其外壁温度离散数据,内壁温度分布未知,是需确定的。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温度的分布规律。

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这个热传导问题^[8]:

控制方程:

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

边界条件:

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T - T_\infty), r = b \text{ (外壁对流散热条件)} \quad (1b)$$

$$T = T(\theta), r = a \text{ (待定的未知内壁温度分布)} \quad (1c)$$

$$T(r, \theta + 2\pi) = T(r, \theta) \quad (0 < \theta < 2\pi) \text{ (自然的周期条件)} \quad (1d)$$

其中, T_∞ 为筒外环境温度; h 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。计算的目的在于求解内壁面上的温度分布。

3 求解方法

在极坐标系中,方程(1a)在周期条件式(1d)下的一般解表为^[9]:

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

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),但式(1c)中 $T = T(\theta)$ 是未知的,而且要求去确定它,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:

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

此时再将式(2)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:

$$C_0 + D_0 \ln b + \sum_{m=1}^{\infty} [(A_m b^m + B_m b^{-m}) \cos m\theta + (C_m b^m + D_m b^{-m}) \sin m\theta] = T(b, \theta) = T(\cos m\theta, \sin m\theta) \quad (0 < \theta < 2\pi)$$

$$C_0 h + D_0 (h \ln b + \frac{k}{b} - h T_\infty + \sum_{m=1}^{\infty} [(A_m (hb^m + mb^{m-1}) + B_m (hb^{-m} - mb^{-m-1})) \cos m\theta + [(C_m (hb^m +$$

$$mb^{m-1}) + D_m (hb^{-m} - mb^{-m-1})] \sin m\theta] = 0 \quad (0 < \theta < 2\pi)$$

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:

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

将 $r = a$ 代入式(3),即得圆筒内壁温度分布规律的级数形式为:

$$T(a, \theta) = \frac{\beta_0}{2} - Bi(T_\infty - \frac{\beta_0}{2}) \ln b + Bi(T_\infty - \frac{\beta_0}{2}) \ln a + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \left[\left(\frac{\beta_m}{2m} (mb^{-m} - hb^{1-m}) a^m + \frac{\beta_m}{2m} (hb^{m+1} + mb^m) a^{-m} \right) \cos m\theta + \left[\left(\frac{\alpha_m}{2m} (mb^{-m} - hb^{1-m}) a^m + \frac{\alpha_m}{2m} (hb^{m+1} + mb^m) a^{-m} \right) \sin m\theta \right] \right\} \quad (4)$$

4 实用性分析

红外热诊断是通过探测物体表面红外热辐射来获得物体表面温度场,在将现代红外检测技术与导热反问题研究相互结合的基础上,得到设备内部温度分布。以上得出的圆筒内壁温度分布的普遍解析解是否实用,关键在于解的性质如何。

(1)解是存在的。

(2)解是唯一的。数学上早已证实,拉普拉斯方程的解是唯一的。式(2)中的傅里叶系数 C_0, D_0, A_m, B_m, C_m 和 D_m 与求解它们时所用的非齐次条件的位置无关,因此傅里叶系数(因而这个导热反问题的解)也必然是唯一的。

(3)解是连续依赖于数据的。式(2)中的傅里叶系数 C_0, D_0, A_m, B_m, C_m 和 D_m 是通过式(1f)和(1b)求出的,而 $T(b, \theta)$ 为红外热像仪扫描的离散点温度场拟合而成,不可避免存在着测量数据的误差及拟合引起的误差。为此,针对不同型号红外热像仪测温的测量精度^[10],在 $T(b, \theta)$ 上引入 $\pm 5\%$ 的最大温度相对偏差。根据傅里叶系数的计算公式,可知此时傅里叶系数的最大相对偏差也为 $\pm 5\%$,即当数据有“微小”变化时,解的改变量也“很小”,因而本反问题的解是连续依赖于数据的^[2]。

综上所述,即说明本文的红外热诊断问题的解析方案是实用的。

5 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温度的解析方案,得到了二维稳态圆筒内壁温度分布的普适解析级数解。并从理论上证明该级数解是实用的,从而为这一类热设备内壁温度边界条件的确定提供了充分的理论依据,同时也开拓了红外测温技术的应用前景。

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] 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.
- [3] 范春利,孙丰瑞,杨立. 管壁减薄的红外检测方法研究[J]. 激光与红外,2004,34(6):452-454.
- [4] 王红,赫冀成,宋利明. 二维双层球壳红外 CAT 的研究[J]. 东北大学学报,1997,18(4):347-350.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 程尚模. 传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988.
- [9] 徐世良. 数学物理方法解题分析[M]. 江苏:江苏科学技术出版社,1982.
- [10] 吴宗凡,柳美琳,张绍举,等. 红外与微光技术[M]. 北京:国防工业出版社,1998.

(上接第 657 页)

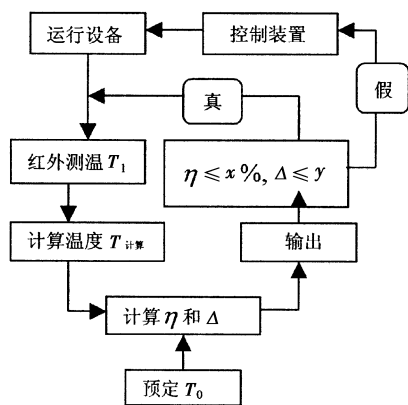


图1 跟踪与调控

Fig. 1 tracking and controlling

5 结论

以上研究了圆柱体内壁红外测温的误差。可以看到,偏移偏差 ΔT 在测温中起着十分重要的作用。一方面,相对误差 η 的正、负取决于红外测温的偏移偏差 ΔT ,所得到的管内壁计算温度可能大于、也可能小于实际温度,也就是说,即可能存在正向偏差,又可能存在负向偏差,计算温度不可能只存在大于管内壁温度一种情况^[3]。另一方面,偏移偏差 ΔT 还直接影响了相对误差 η 的大小,当偏差 ΔT 太大

时,可能造成导热问题反推法的失效。因此,采用该方法之前,针对具体测温精度要求,选用恰当型号的红外热像仪是十分必要的。

因为在实际问题中,用红外热像仪测得的外壁温度,与真实温度相比,确实存在着可能偏大也可能偏小的情况,所以文中给出的结论具备一定的参考价值,对实现温度调控制过程的自动化设计,将对工程实际问题提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 关荣华. 非接触测温技术对圆筒设备内部温度的定量检测[J]. 红外技术,2002,24(2):46-48.
- [2] Jin-Hong Liu, Chao-Kuang Chen, Yue-Tzu Yang. An inverse method for simultaneous estimation of the center and surface thermal behaviour of a heated cylinder normal to a turbulent air stream [J]. Journal of Heat Transfer, Transactions of the ASME, 2002, 124(8):601-608.
- [3] 曹春梅. 红外测温对加热圆柱体轴线上热导线温度的测量[J]. 激光与红外,2006,36(9):864-865.
- [4] 康文秀,关荣华. 红外测温对圆筒设备内部温度及内壁缺陷的定量检测[J]. 激光与红外,2006,36(10):948-949.
- [5] 程尚模. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1990.