

文章编号:1001-5078(2007)07-0656-02

红外测温法确定圆柱内壁温度的误差分析和优化研究

张成义^{1,2}, 陶纯堪², 李传起¹, 程国生¹

(1. 南京信息工程大学物理系, 江苏 南京 210044; 2. 南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210094)

摘 要:对采用红外监测反推法,由加热圆柱外壁温度,确定圆柱体内壁温度的误差进行了量化分析。在分析的基础上,给出了影响圆柱体内壁温度测量的主要因素,提出了优化加热柱体内壁温度测量的途径。基于上述分析,给出了一种适时调控的温度测量解决方案。

关键词:红外测温;加热圆柱体;误差分析;优化方法

中图分类号:TN219;O551.2

文献标识码:A

Quantitative Diagnosis and Optimization to Estimation Errors of Internal Temperature of a Hot Wire Embedded at the Center of a Cylinder Based on Infrared Temperature-Measuring

ZHANG Cheng-yi^{1,2}, TAO Chun-kan², LI Chuan-qi¹, CHENG Guo-sheng¹

(1. Department of Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Electronic Engineering & Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: It is given that quantitative diagnosis to estimation errors of internal temperature of a hot wire embedded at the center of a cylinder-shaped heat equipment. The methods of optimization are developed for the quantitative diagnosis by solving an inverse heat condition problem based on infrared temperature-measuring. After that, a case of control is designed based on the diagnosis above.

Key words: infrared temperature-measuring; heated cylinder; estimation errors; optimization method

1 引言

工业生产中的许多设备,都采用了呈圆柱形的输运管道,这些输热管道内壁温度的高低及温度的分布,往往是标志生产运行状态的重要参量,如何准确获得这一内部信息,并应用所获信息判断生产过程是否正常,以便对生产过程采取适时调控,是非常重要的课题之一。现在,已经获得了确定输热管道内壁温度高低、温度分布的一些卓有成效的方法。例如,可通过红外热像仪获取设备外表面的温度分布,将所获温度分布与设备正常运行条件下的热像图比较,从而获得输热管道内壁的温度及温度的分布情况,但是,这种方法只能给出定性分析;将红外测试技术与计算传热学反问题相结合,通过红外热像仪采集到的设备外表面温度分布,反推出设备内壁各点的温度,从而对设备的运行状态做出合理判断,是一种新颖的方法。这方面已经获得了一些研

究成果可供参考,如:采用有限差分法进行数值计算^[1-2],用导热问题反推法进行解析计算^[3-4]等。事实上,导热问题反推法中除了数值计算的舍入误差外^[3],还存在着由于圆柱外壁红外测温的误差对内壁温度确定的影响。

下面将研究圆柱外壁红外测温的误差对确定内壁温度的影响和优化内壁温度测量的途径等问题,同时,给出一种适时调控的温度测量解决方案。

2 用导热问题反推法测圆筒内壁温度

为了行文的方便,简要叙述导热问题反推法测量圆筒内壁温度的基本原理。

基金项目:江苏技术与经济管理委员会立项项目(06JC043);江苏高校自然科学基金项目(07KJB510066)。

作者简介:张成义(1961-),男,教授,博士,主要感兴趣的领域是信息光学及其成像技术,应用物理学,热力学等。E-mail: dzcy1@163.com

收稿日期:2006-12-24

假定输运管道的长度远大于管道截面的内、外半径 r 和 R , 忽略沿管道长度方向的温度变化, 将温度场视为二维场, 若材料的物性均匀且不随时间变化, 内部无热的沉积(该模型和半径为 r 的热丝放在半径为 R 柱体轴线是相同的, 大多数输热管道在考察区段可用该模型模拟)。当达到稳定状态时, 可用以下的控制方程和定解条件来描述这个热传导问题^[1-5]:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial T}{\partial \rho} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} -\kappa \frac{\partial T}{\partial \rho} = h(T - T_{\infty}) & , \quad \rho = R \\ T_1 = T & , \quad \rho = R \\ T = T_0 & , \quad \rho = r \end{cases} \quad (2)$$

将控制方程、对流散热条件和附加的外壁红外测温条件联立, 解得内壁温度为:

$$T_{\text{计算}} = T_1 + B_i(T_1 - T_{\infty}) \ln \frac{R}{r} \quad (3)$$

上面各式中, T_1 为采用红外测温技术测得的外壁温度; T_{∞} 为环境温度; h 为圆柱体外壁面与环境的对流换热系数; κ 为圆柱体材料的热传导系数; $B_i = Rh/\kappa$ 为毕渥数。上式表明, 利用所测得的外壁面温度 T_1 可反推得到圆柱体内壁温度 T_0 。

然而, 在实际测量中, 由于红外测温有一定的偏差, 会影响上述导热问题反推法测圆筒内壁温度的测量精度。

3 圆筒内壁温度的误差分析与优化

将控制方程和对流散热条件、内壁等温条件联立求解, 考虑到外壁面 $\rho = R$ 得^[3]:

$$T = T_0 - \frac{T_0 - T_{\infty}}{\ln \frac{R}{r} + \frac{1}{B_i}} \ln \frac{R}{r} \quad (4)$$

为了验证导热问题反推法是否合理, 可取式(4)中的 T_0 为圆柱体内壁的真实温度, 考虑由式(3)得到的计算温度与真实温度的差别。注意到红外测温有一定的偏差, 其中偏移偏差 ΔT 是最坏的偏差, 可设

$$T_1 = T + \Delta T \quad (5)$$

此处的 T 为外壁面的真实温度。将式(4)、(5)代入式(3)后, 可解得:

$$T_{\text{计算}} = T_0 + \Delta T \left(1 + B_i \ln \frac{R}{r} \right) \quad (6)$$

可将计算温度与内壁真实温度的相对误差定义为:

$$\eta = \frac{T_{\text{计算}} - T_0}{T_0} \times 100\% \quad (7)$$

由式(6)、(7)联立可解得相对误差

$$\eta = \left(1 + B_i \ln \frac{R}{r} \right) \frac{\Delta T}{T_0} \quad (8)$$

而计算温度与内壁真实温度的偏差可表示为:

$$\Delta = \left(1 + B_i \ln \frac{R}{r} \right) \Delta T \quad (9)$$

从式(8)、(9)可以看出: ①导热反问题方法的偏差 Δ 、相对误差 η 均可正、可负, 正负取决于红外测温的偏移偏差 ΔT , 以矿渣棉保温材料构成的圆柱管道为例, 其物性参数为: 热传导系数 $\kappa = 0.13 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, 对流换热系数 $h = 10.46 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, 圆柱体内、外半径分别为 $r = 136.5 \text{ mm}$ 和 $R = 216.5 \text{ mm}$, 取环境温度 $T_{\infty} = 20^\circ\text{C}$, 设管道内壁温度为 500°C , 忽略舍入误差的详细情况如表 1 所示。②偏差与相对误差的大小还依赖于毕渥数 $B_i = Rh/\kappa$, 毕渥数小, 相对偏差也较小, 反之亦然。这实际上向我们展示了优化圆筒内壁温度测量的解决方案。在测量中, 为了减小偏差与相对误差, 可采用外壁半径 R 较小的圆柱体; 选用热传导系数 κ 较大的材料作为圆柱体材料(但对输热管, 该方法限用); 尽量控制圆柱体的外壁面与环境的对流换热。③在外壁半径 R , 毕渥数 B_i 确定的条件下, 可考虑采用管壁较厚的圆柱体, 使圆柱体内半径 r 增大, 从而减小 $\ln \frac{R}{r}$ 以使误差减小到最低限度。

由上面的分析可见, 给定对测温相对偏差的要求 η_0 后, 就确定的设备而言, 由于其毕渥数基本上是确定的, 当管道内壁温度 T_0 发生变化时, 测量的相对误差将发生变化。例如, 随着 T_0 的降低, 测量相对偏差将加大。据此, 根据所测得的 η 值与设定 η_0 的差别, 可以采用适时、自动控制, 使控制过程自动化。

表 1 测量误差对结果的影响

Tab. 1 the effect of measuring errors upon results

$\Delta T/^\circ\text{C}$	-0.5	-0.2	0.0	0.2	0.5
$T_{\text{计算}}/^\circ\text{C}$	495.48	498.19	0	501.81	504.42
Δ	-4.52	-1.81	0	1.81	4.52
$\eta/\%$	-0.90	-0.36	0	0.36	0.9

4 圆筒内壁温度测量的跟踪与调控

为实现温度调制过程自动化, 维持内壁温度在预定值 T_0 , 可采取如图 1 所示的技术路线。

(下转第 660 页)

(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)

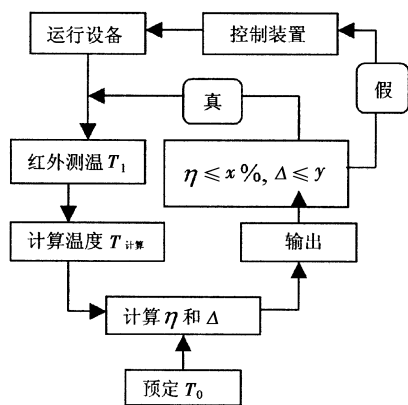


图1 跟踪与调控

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.