

文章编号: 1001-5078 (2006) 09-0864-02

红外测温对加热圆柱体轴线上热导线温度的测量

曹春梅

(华北电力大学应用物理系, 河北 保定 071003)

摘要:利用红外测温技术, 结合导热反问题求解, 给出了一种根据加热圆柱体外壁温度红外监测反推圆柱体中心轴线上热导线温度的方法。经数值计算验证, 本方法可对薄壁高温的加热圆柱体轴线上热导线的温度给出高精度的定量检测结果。

关键词:加热圆柱体; 红外测温; 导热反问题; 数值计算

中图分类号: TN219; O511. 2

文献标识码: A

Temperature Estimation of a Hot Wire Embedded at the Center of a Cylinder Based on Infrared Temperature measuring

CAO Chun-mei

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

Abstract: By solving an inverse heat conduction problem, one method is developed for the estimation of the temperature of a hot wire embedded at the center of a cylinder based on infrared temperature measuring. The conclusion can be drawn that the method can be applied to the determination of the temperature of a hot wire embedded at the center of a cylinder.

Key words: heated cylinder; infrared temperature measuring; inverse heat conduction problem; numerical method

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发展起来, 具有远距离、不接触、准确、实时、快速等特点, 对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, 并已取得快速发展。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设备状态是否正常。

本文参考文献 [3] 的物理模型, 并进行合理的简化。考虑一长介质圆柱体, 其中心轴线处嵌入有一半径为 r 的热导线作为热源用来加热圆柱体, 为简化起见, 忽略介质圆柱体外围空气的流动, 并假设热导线维持一均匀稳定的温度 T_0 , 本文的目的是通过红外热像仪检测加热介质圆柱体的外壁面的温度, 给出一种由表及里反推其中心轴线处用于加热圆柱体的热导线的温度 T_0 的一种导热反问题求解方法, 并对结果进行了数值验证。

2 基本原理

图 1 为一简化的轴线上嵌入有等长热导线的介质圆柱体截面俯视图, 其外壁半径为 R , 向周围环境

自然对流换热, 并且该面温度可由红外测温获得; 内壁半径为 r , 假设内壁与其中心轴线处的通电导线接触良好, 则认为热平衡时具有相同的温度, 为一等温面, 但由于热导线嵌入在圆柱体中心轴线处, 其温度不易测得, 是需确定的量。这里是要根据红外测温得到的圆柱体外壁温度计算出内壁温度, 亦即热导线的温度。

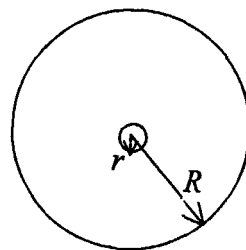


图 1 轴线上嵌入有热导线的介质圆柱体截面俯视图

Fig 1 vertical view of the cylinder system embedded a hot wire at its center

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上的应用, 已发表论文多篇。E-mail: caochunmeihd@sohu.com

收稿日期: 2006-06-02

假设圆柱体的长度远远大于其截面半径,从而可忽略边缘效应,而认为圆柱体为无限长,并且忽略柱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^[4]:

$$\text{控制方程: } \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho \frac{\partial T}{\partial \rho}) = 0 \quad (1)$$

定解条件:

$$-k \frac{\partial T}{\partial \rho} = h(T - T_{\infty}), \rho = R \text{ (对流散热条件)} \quad (2)$$

$$T = T_1, \rho = R \text{ (附加的红外测温条件)} \quad (3)$$

$$T = T_0, \rho = r \text{ (待测的未知内壁等温条件)} \quad (4)$$

其中, T_{∞} 为环境温度; T_1 为利用红外测温技术测得的外壁温度; h 为圆柱体外壁面与空气的对流换热系数; k 为圆柱体材料的热传导系数; T_0 为内壁温度,是本问题中需确定的量。

式(1)的通解为:

$$T = A' + B \ln \rho \quad (5)$$

利用外壁面同时具有的两个边界条件,对流散热条件(2)和附加的红外测温条件(3)可解出:

$$A' = T_1 + B_i (T_1 - T_{\infty}) \ln R \quad (6)$$

$$B' = -B_i (T_1 - T_{\infty}) \quad (7)$$

其中, $B_i = Rh/k$ 为毕奥数。再利用内壁的等温条件(4),有:

$$T_0 = A' + B \ln r \quad (8)$$

联立(6)、(7)、(8)三式,即可计算出内壁温度,亦即加热导线的温度 T_0 。

3 方法验证

上述问题实际上是一个导热反问题^[1-3],其解算方法是否可行,可通过数值计算加以说明。方法是预先给定内壁温度值 T_0 ,由相应的常规导热正问题即式(1)、(2)、(4)求得外壁温度值,以该值模拟红外测温数据 T_1 ,并根据此数据用前面讨论反问题的求解方法反求内壁温度值(加热导线的温度) T_0 。

正问题的控制方程和定解条件如式(1)、(2)、(4)。

满足定解条件的解为

$$T = T_0 - \frac{T_0 - T_{\infty}}{\ln \frac{R}{r} + \frac{1}{B_i}} \ln \frac{\rho}{r} \quad (9)$$

$\rho = R$ 时

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

表 1 加热圆柱体物性

Tab 1 property of the heated cylinder

物性参数	$k(\text{w/m} \cdot ^\circ\text{C})$	0.13
	$h(\text{w/m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	10.45

取圆柱体的半径 $R = 0.05\text{m}$, 热导线半径 $r = 0.005\text{m}$, 并预设 $T_{\text{测定}} = 500^\circ\text{C}$, $T_{\infty} = 20^\circ\text{C}$, 将表 1 中的物性参数(这些数据是参照文献[5]选取的)代入(9)式,可解得外壁面温度为 $T = 67.06^\circ\text{C}$, 利用此温

度模拟红外测温温度值 T_1 , 并根据反问题的计算公式(6)、(7)、(8)可反求得热导线的温度 $T_{\text{计算}}$ 。

为进一步说明本方法是切实可行的,考虑实际应用时红外测温有一定的测温误差,其中偏移误差是遇到的最坏情况,为模拟测量误差,在精确值上引入一定的偏差,即用导热正问题的解(忽略数值计算误差)作为温度测量的真值,“假想”测量值用 $T_{\text{测}} = T_{\text{真}} + \Delta T_{\text{引}}$ 引入,针对不同型号红外热像仪测温的测量精度^[6],温度测量误差分别取 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 、 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,再利用反问题的计算公式求得热导线的温度 $T_{\text{计算}}$,并与预定热导线的温度 $T_{\text{测定}}$ 相比较,按式

$$E_T = \frac{T_{\text{计算}} - T_{\text{测定}}}{T_{\text{测定}}} \times 100\%$$

计算相对误差,所得结果列于表 2。

表 2 测量误差对结果的影响

Tab 2 the effect of measuring errors upon results

$\Delta T / ^\circ\text{C}$	-0.5	-0.2	0.0	+0.2	+0.5
$T_{\text{计算}} / ^\circ\text{C}$	501.68	501.98	502.18	502.38	502.68
$E_T / \%$	0.34	0.40	0.43	0.48	0.54

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推算介质圆柱体中心轴线热导线温度的方法。数值计算的结果表明,即使考虑了外壁面温度的红外测温误差,虽然这些误差在推算导线温度时会有不同程度的放大,但介质圆柱体中心轴线热导线温度的预定值和计算值的误差在工程要求允许的范围内高度吻合。分别改变介质圆柱体的运行参数及几何参数,利用上述方法进行数值计算,还可得出如下结论:(1)嵌入的热导线温度越高,计算出的结果与实际越符合;(2)介质圆柱体外壁面半径越小,计算出的结果与实际越符合。因此利用红外测温技术结合本文的导热反问题求解,可对嵌入在截面半径较小的介质圆柱体中心轴线处的热导线的温度进行成功的推算,依据这一参数,可及时在线了解同类设备当前的使用状态,从而为此类热设备的正常运行提供了可靠的依据,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] 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 - 4608.
- [4] 程尚模. 传热学 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 1988.
- [5] 李景田,赵廷元. 设备与管道保温 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1984.
- [6] 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.