

球壳热设备内部积垢的红外诊断

康文秀¹, 吴兆奇²

(1. 华北电力大学数理系, 河北 保定 071003; 2. 承德广播电视大学计算机系, 河北 承德 067000)

摘要: 输热设备运行一段时间后, 内壁面会积起一层污垢, 本文利用红外测温技术获得球壳形热设备外表面的温度分布, 首次计算出热设备和内壁污垢两层介质中的温度场, 进而得出污垢层的厚度分布, 从而实现此类热设备运行状态的实时监测。

关键词: 红外测温; 内壁污垢; 对流换热

中图分类号: TN219

文献标识码: A

Infrared Therm-diagnosis to Internal Dirt of the Hollow Spheroid-shaped Heat Equipment

KANG Wen-xiu¹, WU Zhao-qi²

(1. Department of Mathematics and Physics, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Department of Computer, Chengde Radio and TV University, Chengde 067000, China)

Abstract: The temperature field of heat equipment and internal dirt can be given based on the outer surface temperature distribution obtained by scanning for the hollow spheroid-shaped heat equipment, then the thickness of internal dirt can be given. So the internal condition of heat equipment can be test.

Key words: infrared temperature measurement; internal dirt; convective heat transfer

1 引言

红外测温技术由于测温速度快、面积大、非接触、无损伤、可靠性高等独特的优势, 在运行状态监测和故障诊断领域取得了广泛的应用。利用红外热像仪获得热设备外壁温度, 结合材料的物性参数及传热反问题方法可反推设备内壁温度或得到内壁缺陷信息^[1-4], 但都限于对热设备一层介质的计算。输热设备运行一段时间后, 内壁面必积起一层污垢, 污垢层太厚将严重影响热设备的正常运行, 因此对设备内部污垢的及时监测具有重要的现实意义。

设备内部污垢层无法直接测量, 但污垢层的厚度分布必然会通过热传导影响其外部温度场的分布, 本文利用红外测温技术获得球壳形热设备外表面的温度分布, 结合传热反问题方法计算了热设备和污垢层两层介质中的温度场, 得出了内壁污垢层的分布。

2 稳定传热的球壳形设备温度场的计算

设球壳的内外半径分别为 a 和 b , 污垢层内表面为未知的曲面 S , 如图 1 所示。用 $u(r, \theta, \varphi)$ 表示在球坐标系下系统达到稳态时的温度分布 $T(r, \theta,$

$\varphi)$ 与环境温度 T_∞ 之差, 即:

$$u(r, \theta, \varphi) = T(r, \theta, \varphi) - T_\infty$$

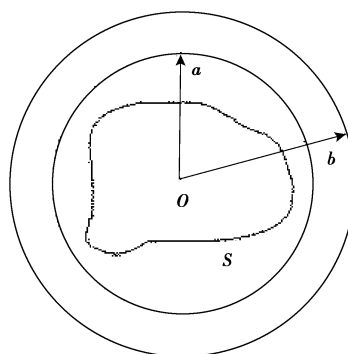


图1 球壳形热设备

Fig. 1 the hollow spheroid-shaped heat equipment

污垢层内 ($r < a$) 的 $u^I(r, \theta, \varphi)$ 和设备内 ($a < r < b$) 的 $u^{II}(r, \theta, \varphi)$ 满足下列传热定解问题:

$$\nabla^2 u^I = 0 \quad (1)$$

$$\nabla^2 u^{II} = 0 \quad (2)$$

作者简介: 康文秀(1964-), 女, 硕士, 副教授, 从事物理教学及应用物理的研究。E-mail: wxkangkang@sina.com

收稿日期: 2007-10-09

$$(k_2 u_r^{\text{II}} + h u^{\text{II}})|_{r=b} = 0 \quad (3)$$

$$u^{\text{II}}|_{r=b} = f(\theta, \varphi) \quad (4)$$

$$u^{\text{I}}|_{r=a} = u^{\text{II}}|_{r=a} \quad (5)$$

$$k_1 u_r^{\text{I}}|_{r=a} = k_2 u_r^{\text{II}}|_{r=a} \quad (6)$$

控制方程式(1)和式(2)为拉普拉斯方程^[5],外壁面与环境 T_∞ 对流传热表示为式(3),其中, k_2 是热设备的热传导系数, h 是热设备与环境的对流换热系数,由红外扫描仪获得外壁表面温度分布拟合为 $f(\theta, \varphi) + T_\infty$,表示为式(4),半径 $r = a$ 的球面是设备与污垢层的分界面,在此满足衔接条件式(5)和式(6),其中 k_1 是污垢的热传导系数。

拉普拉斯方程式(1)和式(2)在球坐标系下的通解^[5]为:

$$u^{\text{I}} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=m}^{\infty} r^l [(A_l^m \cos m\varphi + B_l^m \sin m\varphi) p_l^m(\cos\theta)] + \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=m}^{\infty} \frac{1}{r^{l+1}} [(C_l^m \cos m\varphi + D_l^m \sin m\varphi) p_l^m(\cos\theta)] \quad (7)$$

$$u^{\text{II}} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=m}^{\infty} r^l [(A_l^m \cos m\varphi + B_l^m \sin m\varphi) p_l^m(\cos\theta)] + \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=m}^{\infty} \frac{1}{r^{l+1}} [(C_l^m \cos m\varphi + D_l^m \sin m\varphi) p_l^m(\cos\theta)] \quad (8)$$

式中, $p_l^m(\cos\theta)$ 为连带勒让得多项式, $A_l^m, B_l^m, C_l^m, D_l^m, A_l^m, B_l^m, C_l^m$ 和 D_l^m 为待确定的组合系数。

把 $f(\theta, \varphi)$ 在球面上以球函数为基展开广义傅氏级数^[5]:

$$f(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=m}^{\infty} (f_l^m \cos m\varphi + g_l^m \sin m\varphi) p_l^m(\cos\theta) \quad (9)$$

将式(8)代入式(3)比较球函数的系数可得:

$$k_2 (lb^{l-1} A_l^m - \frac{l+1}{b^{l+2}} C_l^m) + h (b^l A_l^m + \frac{1}{b^{l+1}} C_l^m) = 0 \quad (10)$$

$$k_2 (lb^{l-1} B_l^m - \frac{l+1}{b^{l+2}} D_l^m) + h (b^l B_l^m + \frac{1}{b^{l+1}} D_l^m) = 0 \quad (11)$$

将式(8)和式(9)代入式(4)比较球函数系数可得:

$$b^l A_l^m + \frac{1}{b^{l+1}} C_l^m = f_l^m \quad (12)$$

$$b^l B_l^m + \frac{1}{b^{l+1}} D_l^m = g_l^m \quad (13)$$

将式(7)和式(8)代入式(5)比较球函数系数可得:

$$a^l A_l^m + \frac{1}{a^{l+1}} C_l^m = a^l A_l^m + \frac{1}{a^{l+1}} C_l^m \quad (14)$$

$$a^l B_l^m + \frac{1}{a^{l+1}} D_l^m = a^l B_l^m + \frac{1}{a^{l+1}} D_l^m \quad (15)$$

将式(7)和式(8)代入式(6)比较球函数系数可得:

$$k_1 (la^{l-1} A_l^m - \frac{l+1}{a^{l+2}} C_l^m) = k_2 (la^{l-1} A_l^m - \frac{l+1}{a^{l+2}} C_l^m) \quad (16)$$

$$k_1 (la^{l-1} B_l^m - \frac{l+1}{a^{l+2}} D_l^m) = k_2 (la^{l-1} B_l^m - \frac{l+1}{a^{l+2}} D_l^m) \quad (17)$$

式(10) - (17)联立得出 $A_l^m, B_l^m, C_l^m, D_l^m, A_l^m, B_l^m, C_l^m$ 和 D_l^m 8 个系数,代入式(7)和式(8),即得污垢层内($r < a$)和设备内($a < r < b$)的温度场 $u^{\text{I}}(r, \theta, \varphi)$ 和 $u^{\text{II}}(r, \theta, \varphi)$ 。

3 球壳形设备内部积垢的计算及应用

污垢层内表面 S 上可能为第一、第二或第三类边界条件,将式(7)解出的 $u^{\text{I}}(r, \theta, \varphi)$ 代入 S 上给定的边界条件即为污垢层内表面 S 的隐式曲面方程,把一组角位置坐标 (θ, φ) 代入隐式曲面方程,可计算出该处的 r 值,而 $(a - r)$ 即为该位置的污垢层厚度。例如若已知球壳形设备内热物质温度为 T_0 ,且 S 上满足第一类边界条件,则 $u^{\text{I}} = T_0 - T_\infty$ 即为 S 的隐式曲面方程。

特例:若内壁污垢层厚度均匀,则污垢层内表面 S 为球面,温度场为球对称分布,红外扫描仪获得的外壁表面温度是不随角位置坐标 θ 和 φ 变化的常数,以 T_c (相当于上面的 $f(\theta, \varphi) + T_\infty$) 表示,温度场式(7)和式(8)中只含 $m = 0$ 且 $l = 0$ 的项,污垢层内的解简化为:

$$u^{\text{I}} = (1 + \frac{hb^2}{k_2 a} - \frac{hb^2}{k_1 a} - \frac{hb}{k_2}) (T_c - T_\infty) + \frac{1}{r} \frac{hb^2}{k_1} (T_c - T_\infty) \quad (18)$$

污垢层内表面 S 上可能为第一、第二或第三类边界条件,将式(18)的 $u^{\text{I}}(r, \theta, \varphi)$ 代入 S 上的边界条件即可得污垢层厚度。例如内壁为第一类边界条件, S 上温度为 T_0 ,即 $u^{\text{I}} = T_0 - T_\infty$,可从中解出 $r = \left(\frac{k_1}{hb^2} \frac{T_0 - T_c}{T_c - T_\infty} - \frac{k_1}{k_2 a} + \frac{1}{a} + \frac{k_1}{k_2 b} \right)^{-1}$,而 $(a - r)$ 即为内壁面污垢层的厚度。

本文利用红外测温技术获得球壳形热设备外表面的温度分布,给出了热设备内部污垢层内表面曲面方程无穷级数形式的解析解,可根据实际问题的精度要求,取级数的前若干项,对壁面离散化做数值计算,得出污垢层的分布,该方法准确度高、使用方便,为此类热设备内壁积垢的实时监测提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 康文秀. 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.
- [2] 范春利. 缺陷表面温度分布及空腔自然对流对红外检测的影响[J]. 激光与红外, 2005, 35(7): 504 - 507.
- [3] 关荣华. 用红外定量诊断法监测热设备内部状态[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(2): 129 - 131.
- [4] 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.
- [5] 梁昆森. 数学物理方法[M]. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 1998.