

解析延拓在设备红外热诊断中的应用

康文秀

(华北电力大学应用物理系, 河北 保定 071003)

摘要:对半球壳热设备和无限长半圆柱壳热设备,根据界面的边界条件把红外扫描的外表面温度分布函数解析延拓至整个球面和柱面,利用红外测温技术诊断球壳热设备和长圆柱壳热设备内部运行状态的方法就可推广到半球壳和无限长半圆柱壳热设备,为此类设备内部温度分布及内壁缺陷的实时监测提供了理论依据。

关键词:解析延拓;温度分布;红外诊断;内壁缺陷

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.02.011

Infrared thermal diagnosis of internal condition for three-dimensional semi-hollow spheroid

KANG Wen-xiu

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

Abstract: For semi-hollow spheroid heat equipment and infinite half-cylinder heat equipment, according to the boundary conditions of the interface, the outer surface temperature distribution function by the infrared scanning is extended to the whole spherical and cylindrical surface by the analytical continuation. The method that the internal state of spheroid heat equipment and cylinder heat equipment is diagnosed by the infrared temperature measurement is popularized to semi-hollow spheroid heat equipment and infinite half-cylinder heat equipment, which provides the theoretical basis for testing internal temperature distribution and inner defect.

Key words: analytic continuation; surface temperature distribution; infrared diagnosis; defects of inner wall

1 引言

很多工业热设备长期在高温、高压、介质腐蚀等恶劣环境下运行,必然导致内壁破损,内壁缺陷的破损程度及设备内部的温度分布是标志生产状态的重要参量,在设备不停运的状态进行实时监测,对保证生产安全具有重要的现实意义。红外检测是由红外扫描设备外表面温度分布来诊断内部状态,由于其非接触、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^[1-3]。此类热传导问题满足的都是偏微分方程,研究此类导热反问题在理论上就要把函数做广义傅里叶级数展开,但函数必须与本征函数族有相同的定义区间,如果设备形状不是本征函数族的定义区间,就需要把扫描的外表面温度分布函数的定义区间做解

析延拓为本征函数族的定义区间^[4]。文献[5]针对半球壳形设备讨论了底面为第一类和第二类边界条件时经过解析延拓使得对其内部的热诊断得以实现,严格的说,界面都应该为第三类边界条件,而第一类和第二类边界条件可以看做是第三类边界条件的特例,所以解决不完整的球壳形设备和长圆柱壳形设备的热诊断问题的根本是解决第三类边界条件下的解析延拓。

2 半球壳形设备底面第三类边界条件的解析延拓

内外半径为 R_1 和 R_2 的三维半球壳热设备如图1所示,以球心为原点建立球坐标系,系统达到稳态

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:2013-06-17; **修订日期:**2013-07-11

时的温度分布 $T(r, \theta, \varphi)$, 外表面温度分布可由红外扫描仪获得, 拟合为 $T_0(\theta, \varphi)$ 。设备在半球壳底面 ($\theta = \frac{\pi}{2}$) 满足第三类边界条件:

$$\left(T - \frac{k}{h} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} = T_{\infty} \quad (1)$$

其中, k 是设备热传导系数; h 是设备与外界的对流换热系数; T_{∞} 是外界环境温度。

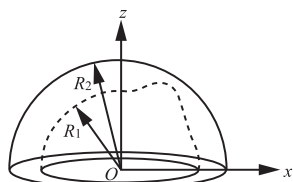


图1 内壁破损的三维半球壳热设备

因为 $\frac{\partial T}{\partial z} = \cos\theta \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{\sin\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta}$, 所以式(1)在球坐标系改写为:

$$\left(T + \frac{k}{h} \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = T_{\infty} \quad (2)$$

作无量纲化变量替换 $\rho = \frac{r}{R_2}$ 和 $u(\rho, \theta, \varphi) = \frac{T(\rho, \theta, \varphi) - T_{\infty}}{T_0(\theta, \varphi) - T_{\infty}}$, $u_0(\theta, \varphi) = \frac{T_0(\theta, \varphi) - T_{\infty}}{T_{\infty}}$, $B_i = \frac{hR_2}{k}$ 为毕渥数, 式(2)成为齐次:

$$\left(u + \frac{k}{h R_2 \rho} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = 0 \quad (3)$$

稳态温度场满足拉普拉斯方程式(4), 外壁与环境对流换热满足式(5), 所以半球壳形热设备稳定温度场的定解问题, 由下列四式组成:

$$\Delta u = 0 \quad (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}) \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial \rho} + B_i u \right) \Big|_{\rho=1} = 0 \quad (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}) \quad (5)$$

$$\left(u + \frac{k}{h R_2 \rho} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = 0 \quad (6)$$

$$u(r, \theta, \varphi) \Big|_{\rho=1} = u_0(\theta, \varphi) \quad (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}) \quad (7)$$

在半球壳底面 ($\theta = \frac{\pi}{2}$) 上满足第三类齐次边界条件(3)的前提下, 把红外扫描的外表面无量纲温度分布 $u_0(\theta, \varphi)$ 做如下的解析延拓, 使之定义于整个球面:

$$U_0(\theta, \varphi) = \begin{cases} u_0(\theta, \varphi) & (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}) \\ u_0(\pi - \theta, \varphi) - 2u_0(\frac{\pi}{2}, \varphi) & (\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi) \end{cases} \quad (8)$$

解析延拓到整个球面后定解问题由下列三式组成:

$$\Delta u = 0 \quad (0 \leq \theta \leq \pi) \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial \rho} + B_i u \right) \Big|_{\rho=1} = 0 \quad (0 \leq \theta \leq \pi) \quad (10)$$

$$u(r, \theta, \varphi) \Big|_{\rho=1} = U_0(\theta, \varphi)$$

$$= \begin{cases} u_0(\theta, \varphi) & (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}) \\ u_0(\pi - \theta, \varphi) - 2u_0(\frac{\pi}{2}, \varphi) & (\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi) \end{cases} \quad (11)$$

由式(9)、(10)、(11)组成的定解问题的解可由拉普拉斯方程在球坐标系中分离变量形式的通解代入边界条件(10)、(11)解出所有展开系数^[6], 从而得到半球形设备的温度分布 $T(r, \theta, \varphi)$ 。

3 无限长半圆柱壳设备第三类边界条件的解析延拓

内外半径为 R_1 和 R_2 的无限长半圆柱壳热设备如图2所示, 以柱轴为 z 轴建立柱坐标系, 考虑与 z 无关的二维简单情况, 设系统达到稳态时的温度分布 $T(r, \varphi)$, 外表面温度分布可由红外扫描仪获得, 拟合为 $T_0(\varphi)$ 。设备在半柱底面 ($y = 0$) 满足第三类边界条件:

$$\left(T - \frac{k}{h} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} = T_{\infty} \quad (12)$$

其中, k, h, T_{∞} 的意义同上。

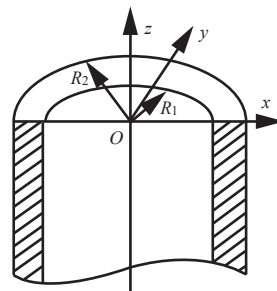


图2 半圆柱形热设备

因为 $\frac{\partial T}{\partial y} = \sin\varphi \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\cos\varphi}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi}$, 所以上式在柱坐标系改写为:

$$\left(T - \frac{k \cos\varphi}{h r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) \Big|_{\varphi=0, \pi} = T_{\infty} \quad (13)$$

作类似的无量纲化变量替换 $\rho = \frac{r}{R_2}$ 和 $u(r, \varphi) = \frac{T(r, \varphi) - T_{\infty}}{T_0(\varphi) - T_{\infty}}$, $u_0(\varphi) = \frac{T_0(\varphi) - T_{\infty}}{T_{\infty}}$, $B_i = \frac{\alpha R_2}{k}$ 为毕渥数, 式(13)成为齐次:

$$\left(u - \frac{k \cos\varphi}{h R_2 \rho} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right) \Big|_{\varphi=0, \pi} = 0 \quad (14)$$

为了满足半柱底面($\varphi = 0, \pi$)上的第三类齐次边界条件(14),把红外扫描的外表面无量纲温度分布 $u_0(\varphi)$ 解析延拓到整个柱面:

$$U_0(\varphi) = \begin{cases} u_0(\varphi) & (0 \leq \theta \leq \pi) \\ u_0(2\pi - \varphi) - 2u_0(\pi) & (\pi \leq \theta \leq \frac{3\pi}{2}) \\ u_0(2\pi - \varphi) - 2u_0(0) & (\frac{3\pi}{2} \leq \theta \leq 2\pi) \end{cases} \quad (15)$$

无限长半圆柱壳热设备稳定温度分布的定解问题由下列四式组成:

$$\Delta u = 0 \quad (0 \leq \varphi \leq \pi) \quad (16)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial \rho} + B_i u \right) \Big|_{\rho=1} = 0 \quad (0 \leq \varphi \leq \pi) \quad (17)$$

$$u(\varphi) \Big|_{\rho=1} = u_0(\varphi) \quad (0 \leq \varphi \leq \pi) \quad (18)$$

$$\left(u - \frac{k \cos \varphi}{h R_2 \rho} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right) \Big|_{\theta=0, \pi} = 0 \quad (19)$$

解析延拓到整个柱面后定解问题由下列三式组成:

$$\Delta u = 0 \quad (0 \leq \varphi \leq 2\pi) \quad (20)$$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial \rho} + B_i u \right) \Big|_{\rho=1} = 0 \quad (0 \leq \varphi \leq 2\pi) \quad (21)$$

$$u(\varphi) \Big|_{\rho=1} = U_0(\varphi) = \begin{cases} u_0(\varphi) & (0 \leq \theta \leq \pi) \\ u_0(2\pi - \varphi) - 2u_0(\pi) & (\pi \leq \theta \leq \frac{3\pi}{2}) \\ u_0(2\pi - \varphi) - 2u_0(0) & (\frac{3\pi}{2} \leq \theta \leq 2\pi) \end{cases} \quad (22)$$

由式(20)、(21)、(22)组成的定解问题的解可由拉普拉斯方程在柱坐标系中分离变量形式的通解代入边界条件,(21)、(22)解出所有展开系数^[2],从而得到半柱壳设备的温度分布 $T(r, \varphi)$ 。

4 应用与结论

以上给出半球壳和无限长半圆柱壳设备底面满足第三类边界条件的情况下,把红外扫描的外表面温度分布解析延拓到整个球面和柱面,从而求得半球形和无限长半圆柱形设备的温度分布。对于新投入使用的设备,已知其内壁没有缺陷,代入一点的位置坐标值,可得设备内部的温度,代入 $\rho = R_1/R_2$ 即 $r = R_1$ 可得设备内壁温度分布;对于较陈旧的设备,内壁可能有缺陷,在解中代入设备内表面的边界条件(第一、第二或第三类),可得破损内壁面的隐式

曲面方程^[7],从而为三维半球壳热设备运行状态的实时诊断提供了可靠的理论依据。

参考文献:

- [1] Guan Ronghua. Internal condition testing of heat equipment by infrared quantitative diagnosis[J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(2): 129 - 131. (in Chinese)
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.
- [2] Kang Wenxiu. Infrared therm-diagnosis to internal condition of the double-layer hollow cylinder-shaped heat equipment[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(10): 1068 - 1069. (in Chinese)
康文秀. 两层介质圆筒热设备运行状态的红外监测[J]. 激光与红外, 2009, 39(10): 1068 - 1069.
- [3] Guan Ronghua. Quantitative diagnosis to internal operating condition of industrial heat equipment by using infrared technique[J]. Infrared Technology, 2002, 24(2): 46 - 48. (in Chinese)
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.
- [4] Liang Kunmiao. Method of mathematical physics[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 1998: 261 - 271. (in Chinese)
梁昆淼. 数学物理方法[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 1998: 261 - 271.
- [5] Kang Wenxiu, Guan Ronghua. Infrared thermal diagnosis of internal condition for three-dimensional semi-hollow spheroid[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(7): 571 - 572. (in Chinese)
康文秀, 关荣华. 三维半球壳热设备运行状态的红外诊断[J]. 激光与红外, 2006, 36(7): 571 - 572.
- [6] Kang Wenxiu, Guan Ronghua, Wu Zhaoqi. Infrared therm-diagnosis to internal dirt of the hollow spheroid-shaped heat equipment[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(9): 897 - 898. (in Chinese)
康文秀, 关荣华, 吴兆奇. 球壳热设备内部积垢的红外诊断[J]. 激光与红外, 2008, 38(9): 897 - 898.
- [7] Cao chunmei, Zhang Xiaohong. Infrared thermal diagnosis of inner defect in three-dimensional equipment with Neumann condition[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(1): 29 - 30. (in Chinese)
曹春梅, 张晓宏. Neumann 条件下三维内壁缺陷的红外热诊断[J]. 激光与红外, 2005, 35(1): 29 - 30.