

# 红外热诊断与导热反问题计算\*

關榮華<sup>1,2</sup>

(1. 华北电力大学,河北 保定 071003; 2. 河北工业大学,天津 300130)

**摘要:** 阐述了新兴学科红外热诊断学的科学含义,并对其理论基础应用范围及发展状况进行了讨论。

**关键词:** 红外诊断; 红外热诊断; 导热反问题

**中图分类号:** TN219    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-8891(2002)05-0049-03

## 1 引言

实际生产中,工业设备内部不可避免地出现各种各样的故障,对出现的故障及时准确地加以诊断具有重要的现实意义。红外热诊断学是在现代红外检测技术与计算机科学及传热反问题研究相互结合基础上,新近发展起来的一门设备故障诊断科学。由于这门新兴学科尚处在形成和发展阶段,所以受到越来越多的学者的关注,本文给出这一学科的科学概念,并对其理论基础、研究方法及进展状况进行阐述。

## 2 红外热诊断学的提出与基本概念<sup>[1]</sup>

红外扫描成像仪的研制成功,使得以辐射探测为基础的红外扫描测温技术在许多领域得到广泛应用。特别是随着高温度分辨率和空间分辨率的快速扫描红外热像仪的日益完善,以红外扫描测温为基础的设备内部故障的红外诊断技术得到了迅速发展和广泛应用,并取得了良好的技术效益和经济效益。但严格来说,在大多数情况下,这些探测和诊断方法,都是通过探测设备表面的红外辐射,并依据所获取的设备外表面温度分布进行诊断。由于红外辐射在固体中穿透能力很低(透过深度只有1 mm),因此单纯探测物体的表面信息,还不能准确地掌握物体内部的温度场及其所反映的故障信息。这种诊断还都停留在只解决“有”或“无”故障(或缺陷)的定性探测水平上,难以对故障或缺陷的属性、位置、几何尺寸与故障的严重程度做出定量论断。这种定性诊断不仅往往带有明显的经验性(或人为性),而且,在工程实践中,即使发现了内部故障或缺陷,也不容易科学地对故障定位,或对故障严重程度分等定级或提出判与检修建议的充分依据。

然而,众所周知,物体表面的温度场完全取决于物体内部的结构、材料的热物性、内部的热扩散以及表面与外界环境的热交换。因此,只有通过实验上采集物

体表面温度场数据,并充分利用这一信息与相关的热过程及热物性之间内在联系的基础上,才能对物体内部的故障做出科学的定位、定性和定量诊断。这种诊断方法始终以物体内部和表面的热物性、热扩散、热交换及热分布为基础,所以,我们称之为“热诊断学”。在热诊断学中,温度场始终作为物体内部“病变”信息的载体来加以研究,而且,通过探测和求解这个信息载体,也就获得了物体内部故障的信息,并且最终做出科学的定量诊断。

由上可知,在设备故障热诊断过程中采集物体表面红外热像图是至关重要的一步,而红外热像仪对温度的采集具有很高的分辨率,是完成温度采集的可靠方法,我们可以把红外成像监测到的物体表面温度分布作为实验基础,将之与热诊断学有机地结合起来,实现对设备内部故障的诊断,并把由此形成的学科称为“红外热诊断学”。应当指出,近年来应用红外成像测温技术对某些设备内部故障作出初步定性判定,应属于简易诊断的范畴,而不属于上述真正意义上的红外热诊断学。利用红外成像技术探测物体表面温度场,只能算作完成了红外热诊断的第一步——信息探测,而真正意义上的红外热诊断学需要完成的核心任务,应是在第一步的基础上借助电子计算机,通过求解导热反问题,获取物体内部温度场,给出内部故障的属性、位置、几何尺寸与严重程度的定量诊断。

## 3 红外热诊断学的理论基础与导热反问题

红外热诊断学是红外测温技术与导热反问题计算的结合,因此,其理论基础包含以下两个方面。

### 3.1 表面温度场的辐射理论

自然界中存在着一种客观现象,这就是任何物体都具有一定的温度,而只要物体具有温度,它就以热辐射的形式将其能量传递出去。热辐射的辐射能量绝大

部分集中在波长为 0.76~1.00 毫米的红外部分,因此热辐射又被称为红外辐射。物体红外辐射的峰值波长  $\lambda_m$  与其自身的绝对温度  $T$  有关,两者之间服从维恩定律<sup>[2]</sup>

$$\lambda_m T = C$$

式中:  $C$  为常量 ( $2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ )。维恩定律告诉我们,热物体辐射光谱线中波长的峰值与其具有的绝对温度存在着一一对应的关系。当工业设备内部出现缺陷时,因缺陷引起的温度变化,将导致设备表面红外辐射的变化,我们通过对光谱位置的分析便可得知这一变化,进而分析内部缺陷。

### 3.2 表面温度场采集的理论基础

根据红外辐射理论<sup>[2]</sup>,红外扫描仪在任一时刻从被测物体表面接收的红外辐射功率为

$$dp = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda) M_{\lambda} dA d\lambda \quad (1)$$

式中:  $dA$  为热像仪瞬时视场被扫描物体表面面积,  $\epsilon(\lambda)$  为被扫描物体表面的光谱发射率,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为热像仪接收到的辐射波长范围,  $M_{\lambda}$  为普朗克辐射函数。当物体被视作灰体时  $\epsilon(\lambda)$  为一常数,上式可用黑体辐射函数表<sup>[1]</sup>  $F(\lambda T)$  表示为

$$dp = [F(\lambda_2 T) - F(\lambda_1 T)] \sigma T^4 dA \quad (2)$$

$\sigma$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数。上式表明,热像仪在任意瞬时扫描接收到的红外辐射功率与被扫物体表面温度的四次方成正比。当物体发射辐射能时,经红外探测器将该辐射信号转换成电信号,并进一步放大,最后以数字或热图像的形式,给出设备表面温度的空间分布。

### 3.3 计算物体内部故障的导热反问题理论

我们知道,物体内故障的出现将改变其内的温度场及热物性,这种变化会因热传导反映到物体的外部,我们可利用红外热像仪探测到这一变化,而得知这一变化,并利用相应的热物性参数、边界条件和初始条件,通过求解导热问题,就应该能够得到物体内的变化情况,从而确定出物体内部的缺陷或故障。与传统导热问题的求解不同,这类导热问题的求解,是在利用实验测得的物体内部或边界上温度变化的基础上,通过解导热微分方程,或获得物体的边界条件(包括几何形状)、或初始条件、或内热源、或热物性参数等。即传统的导热问题中原来某些已知量,现在变成了待求量,而与这些待求量相关联的信息却可以获得。我们称这类问题为导热反问题。

可见,在红外热诊断中,利用红外扫描成像检测到的物体表面温度场数据,来诊断其内部故障的理论基

础,就是导热反问题的研究理论。从红外热诊断学的角度及工程的实际需要出发,通常把导热反问题的求解分为三大类,相应地也可把红外热诊断学分为以下三种类型。

1) 第一类红外热诊断学问题:设备内部热故障的诊断。这类问题是已知设备外部温度分布及其它参数分布,求解设备内部温度场或边界参数分布。如,电厂高压断路器内部动静触头温度的高低,是判断其好坏的基础,但由于此触头在盛有油的箱体内,所以,要想在带电运行状态下在线诊断这种故障,就可借助红外热诊断的方法,利用红外成像检测到的箱体外部温度场数据,并通过求解导热反问题,求出触头温度,从而据此作出科学的诊断结论。这类问题便属于第一类问题。

2) 第二类红外热诊断学问题:设备内热源的诊断。这类问题是在已知参数分布,物体的几何形状情况下,求导热微分方程或内热源。如,石油化工系统或生物系统内进行的一些热过程,总伴有吸热或放热现象,我们常常需要求出这些热源的位置及强度而对其内进行的热过程作出判断。

3) 第三类红外热诊断学问题:设备内部缺陷的诊断。这类问题是已知参数分布和控制方程,求解边界几何形状的问题。如,工业上的一些加热设备或反应设备,由于长期运行在高温高压及化学腐蚀条件下,导致内部损坏或脱落,形成内部缺陷。为了对这些内部缺陷进行红外热诊断,我们可利用红外扫描得到的边界温度场(Dirichlet 条件)、给定的边界热流密度条件(Neumann 条件)、或边界与外界环境的换热条件(Robin 条件),通过求解满足上述条件的导热微分方程式,求得设备内部的温度场,并由此获得设备内部缺陷的位置、形状和几何尺寸。

应当指出,求解导热反问题要比求解导热正问题困难得多,这是因为反问题的求解结果对物体表面测量误差敏感得多,有时较小的测量误差也会带来可观的影响;其次,导热是一种热扩散过程,内部温度及热流变化对表面温度场影响是经过衰减的,而且,表面温度场变化与内部温度场及热流相比在时间上是有一个滞后,所以,求解导热反问题时,必然会遇到这种阻尼效应和滞后效应;还有,从数学上讲,导热反问题是一种不适当问题,它不像一般适当问题那样,在解的存在、唯一和稳定方面具有良好的性质。因此,导热反问题的研究不仅是红外热诊断学的重要基础,而且,至今仍是导热研究中的一个重要课题。

## 4 红外热诊断学研究的发展

红外热诊断学的概念虽然是近期提出的新概念,

但这方面的工作早在 60 年代就已陆续开展,只是进展缓慢,而且没有一个规范的科学含义。最早涉及这一领域研究的是美国的一些科学工作者,他们在 60 年代中期先后在美国《应用光学》及《热传导机械工程》期刊上发表若干篇文章,这些早期的研究涉及了广泛的论题,包括温度和表面辐射测量、液晶和扫描系统的应用、缺陷和裂缝的探测、医疗诊断和生物环境的遥感等,但分析这些文章可以看出,这些早期研究均为定性研究,定量分析只是近期才发展起来的。首先由美国 Florida 大学的 C. K. Hsieh 教授和 Bell 实验室的 C. K. Su 博士等人提出,在美国国家科学基金会(NSF)的支持下,他们对红外无损检测的定量分析,进行了长达十多年的理论及实验研究,把红外无损检测和求解传热反问题结合起来,为红外无损检测的定量分析开辟了一条新路,也为红外热诊断的建立提供了必要的准备。

C. K. Hsieh 和 C. K. Su 等人的工作主要是定量分析材料内部的缺陷,到目前为止,已有几十篇该方面的文章发表,其中具有代表性的是 C. K. Hsieh 教授的系列工作:1980 年和 1981 年间,C. K. Hsieh 和 C. K. Su 给出了材料内表面存在矩形缺陷,但内表面温度和热流分别一定的情况下,基于外表面扫描温度计算缺陷几何形状的两种数值方法<sup>[3,4]</sup>;1982 年,C. K. Hsieh, X. A. Wang 和 S. L. Yang 又利用红外扫描测温,定量计算

了矩形平板和直角柱体内的缺陷<sup>[5]</sup>;1986 年和 1987 年间,J. Kassab 和 C. K. Hsieh 又给出了内表面为 Neumann 或 Robin 条件下,用红外扫描方法重建求解内边界几何形状的通用解析方法<sup>[6,7]</sup>。以上工作解决了单层材料的算法问题。近年来,国内一些科研单位和院校也开展了红外热诊断方面的研究,东北大学宋利明等人分别给出了双层、二维平板及圆柱内壁(在内壁温度一定情况下)缺陷的定量红外热诊断方法<sup>[8,9]</sup>,我们也对二维的情况进行了研究<sup>[10,11]</sup>并且进一步的研究工作正在继续之中。

## 5 结束语

红外热诊断学是红外技术与多学科结合的产物,它已由从最初的表面状态发展到系统体内深层状态的定量评价,但不能不承认该领域的基础理论研究仍比较落后,还有许多课题需要人们进一步深入研究和开发,但可以相信,随着工程热物理学、计算数学、计算传热学及其反问题的深入研究,以及高速度、大内存微型计算机与软件技术的进一步发展,不久的将来,不仅能够使现有的设备故障红外诊断技术发展成为更加成熟的专业技术,而且也会使现有的红外诊断技术发展成为一门更广泛适用的红外热诊断学。

## 参 考 文 献

- [1] 陈衡,侯善敬. 电力设备故障红外诊断 [M],第一版. 北京:中国电力出版社,1999.
- [2] 陈衡. 红外物理学 [M],第一版. 北京:国防工业出版社,1985.
- [3] Hsieh C K, Su K C. Transactions of the ASME[C], MAY 1980. **102**:324~329.
- [4] Hsieh C K, Su K C. Transactions of the ASME[C], FEBRUARY, 1981. **103**:422~426.
- [5] Hsieh C K, Wang X A, and Yang S L. Journal Of Nondestructive Evaluation, 1982. **3**(2):99~109.
- [6] Hsieh C K, Kassab A J. Int. J. Heat Mass Transfer, 1986. **29**:47~58.
- [7] A J Kassab, Hesish C K. Rev. Sci. Instrum, 1987. **58**(1):89~95.
- [8] 王英,宋利明等. 中国机械工程学会第四届工业锅炉专业学会年会论文集[C]. 1992:224~228.
- [9] 宋利明,王红等. 红外技术,1993. **15**(3):23~26.
- [10] 关荣华等. 激光与红外,2001. **31**(4): 228~229.
- [11] 关荣华等. 激光与红外,2002(1).

作者简介: 关荣华,女,1964 生,硕士,副教授,现于天津河北工业大学攻读博士。主要从事物理教学和红外应用研究,发表论文多篇。

## Study of Infrared Thermal Diagnosis for the Internal Conditions

GUAN Rong-hua<sup>[1,2]</sup>

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** Scientific conception of infrared thermal diagnosis is presented. The basics of its theory and the range of its application and the situation of its development are discussed.

**Key words:** Infrared diagnosis, Infrared thermal diagnosis, inverse heat conduction