

文章编号: 1001-5078 (2006)增刊 -0781-04

红外热诊断技术在电力系统中的应用

曹春梅, 张晓宏

(华北电力大学应用物理系, 河北 保定 071003)

摘要: 文章概述了红外热诊断的基本原理、技术特点, 着重总结评述了红外热诊断技术基础理论的核心问题——导热反问题, 文章最后简述了红外热诊断技术应用中存在的问题, 同时展望了将来的研究热点。

关键词: 红外热诊断; 导热反问题; 电力系统
中图分类号: TN24 **文献标识码:** A

The Application of Infrared Thermodiagnosis Technology in Electric System

CAO Chun-mei, ZHANG Xiao-hong

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

Abstract: In the paper, fundamental theory and technology traits of infrared thermodiagnosis have been introduced briefly, with focus mainly on inverse heat conduction method. Finally, the problems in infrared thermodiagnosis application are accounted and current situation and progress in future are expected.

Key words: infrared thermodiagnosis; inverse heat conduction; electric system

1 前言

自然界一切温度高于绝对零度的物体都在不断地、自发地辐射出红外线。红外辐射是一种波长在 $0.76 \sim 1000 \mu\text{m}$ 之间的电磁波^[1]。红外辐射的物理本质是热辐射, 其热效应较可见光强的多, 但人的眼睛对红外线不敏感, 所以必须用对红外线敏感的红外探测器接收。将工业热设备的红外辐射作为探测对象, 通过对其温度场分布的测量, 检测设备的运行状态和指标的红外热诊断技术, 具有非接触性、在线检测安全性能高、响应快、操作方便、判断准确等传统常规检测方法无法比拟的优点, 在检测设备运行状态和提高检测效率等方面具有明显优势, 因而在电力、电子、石化、冶金等工业部门得到了广泛的应用。本文在概述红外热诊断的基本原理、技术特点的基础上, 着重总结评述了红外热诊断技术中的基础理论核心问题——导热反问题的求解方法的研究现状和进展, 并对红外热诊断技术应用存在的问题

进行了论述, 展望了今后的进一步研究开发方向。

2 红外热诊断原理

2.1 实际物体红外热辐射的基本规律和红外热像仪探测原理^[2]

根据物体红外热辐射的基本规律, 实际物体在 $T(K)$ 时的光谱辐射度和全辐射度分别为:

$$M_{\lambda}(T) = \varepsilon_{\lambda}(T) C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]^{-1} \quad (1)$$

$$M(T) = \varepsilon(T) \sigma T^4 \quad (2)$$

物体发射的所有波长的总辐射功率为:

$$P(T) = \varepsilon(T) A \sigma T^4 \quad (3)$$

而红外热像仪在任一瞬时从被扫描热物体表面接收

基金项目: 河北保定华北电力大学青年教师基金 (93210028)。

作者简介: 曹春梅 (1965 -), 女, 教授, 河北保定华北电力大学动力工程系在读博士, 从事物理教学工作, 主要科研方向为红外热诊断在工程实际上的应用, 已发表红外热诊断相关论文多篇。E-mail: caochunmei@sohu.com

收稿日期: 2006-06-30

的红外辐射功率为:

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

以上各式中,

C_1 为第一辐射常数; C_2 为第二辐射常数; $\varepsilon_\lambda(T)$ 为光谱发射率; $\varepsilon(T)$ 为全发射率; σ 为斯芬 - 玻尔兹曼常数; A 为辐射体表面积; dA 为热像仪瞬时视场观察到的被扫描物体表面积; $F(\lambda T)$ 为黑体辐射函数。

式 (1) ~ (3) 表明, 物体红外辐射的本质是热辐射, 热辐射的强度及光谱成分取决于辐射体的温度, 亦即温度这个物理量对热辐射现象起着决定性的作用; 而式 (4) 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描表面温度的四次方成正比。因此, 经红外探测器将该红外辐射信号功率转换成电信号, 电信号的大小与接收到的辐射功率成正比, 即电信号与物体表面温度的四次方成正比, 因而, 热像仪的输出信号可以完全对应地模拟扫描物体表面的空间分布。且当物体表面有微小的温度变化时, 探测器输出的电信号有较大变化, 这十分有利于用热像仪测量物体表面温度。

2.2 电力设备故障红外热诊断的基本原理

在电力系统中, 许多电气设备和热动力设备故障都是以设备相关部位的温度或热状态变化为征兆表现出来的, 与其相应的红外辐射能量可由红外热像仪进行检测, 由于不同的温度及温度变化, 物体发射的红外辐射能量有很大的差异, 二者之间存在着一个对应关系, 而根据热传导规律, 物体表面温度完全取决于物体内部的结构, 物体材料的热物理性能, 内部的热扩散以及表面与外界环境的热交换。因此分析处理红外热像仪的记录结果, 结合一定的数学处理和计算, 就可以“透视”物体内部温度场, 从而获得与此相关的其他信息, 以对各种热设备是否正常工作, 是否存在事故隐患以及程度如何作出定性分析和定量诊断。这就是电力设备故障红外热诊断的基本原理。

2.3 电力设备故障红外热诊断基本步骤

利用红外热像仪采集热设备外表面温度数据是实现热设备运行状况信息热诊断的第一步工作; 第二步工作是根据热设备的结构原理建立被诊断设备的几何模型, 根据热设备的运行状态建立相应的物理模型和数学模型 (一般为导热反问题); 第三步工作, 用适当的物理和数学方法求解, 并对结果进行分析, 以确诊设备热异常发生的部位、性质和严重程度; 第四步工作, 根据求解的结果预测热异常的发展

趋势, 评估设备的寿命, 实现安全生产。

3 红外热诊断技术在电力系统中的应用

红外热诊断是一种利用红外技术了解和掌握设备的工作状态、早期发现热缺陷并能预报热缺陷发展趋势的技术。电力设备的热缺陷一般可分为外部缺陷和内部缺陷两种^[3]。外部缺陷是指“凡致热效应部位裸露, 能用红外检测直接检测出的缺陷”。内部缺陷是指“凡致热效应部位被封闭, 不能用红外检测仪器直接检测, 只能通过对设备表面的温度场进行比较、分析和计算才能确定的缺陷”。

对于外部缺陷, 一般是以局部过热的形态向其周围辐射红外线, 其红外热像为以热缺陷点为中心的热场分布^[4]。因此从设备的热图像中可直观地判断是否存在热缺陷, 根据温度分布可准确地确定缺陷的部位。如对大型发电机或电动机铁芯定子、绕组及冷却系统故障的定性诊断^[5-6], 对输变电系统中高压电气设备热故障的诊断^[7-8], 对输电线路和各种裸露接头、连接件的检测^[9]等, 均通过红外热像可以直接给出判断。

内部缺陷发热过程发生在设备内部, 与缺陷部位接触的固体、液体和气体, 都将发生热传导、对流和辐射, 并将热量不断地传导到外壳, 改变设备外表面的热场分布。因此, 从设备外部对其相关部位进行红外热像检测分析, 可以诊断出大量设备的内部缺陷。由于内部缺陷涉及由外而内、由表及里的热传导反问题, 因此, 红外热诊断实际上是现代红外检测技术与计算传热学中的导热反问题研究相结合的产物, 红外热成像检测采集到的物体表面温度场数据, 为导热反问题的求解提供了至关重要的第一类强加边界条件, 这一强加边界条件, 由于限定了设备外表面边界上的温度值, 对区域内部具有强烈的影响, 因而对确定设备内部及内部边界上的温度分布提供了最大限度的信息。一旦热设备的运行状态或故障隐患以温度特征表现出来, 则通过检测设备的红外辐射, 就可以获得有关设备运行状态的信息, 从而实现运行状态的在线监测及内部信息的红外热诊断。

4 红外热诊断理论核心问题——导热反问题的求解

红外热诊断的基础理论核心问题是导热反问题的求解。反问题的一个特别重要的属性是, 它通常是不适定的数学问题, 因此使得它无论在进行理论分析还是在进行数值计算时都有特定的困难。目前比较成熟的求解方法有“正则化方法”、“脉冲谱方

法”、“扰动方法”等^[10]。但由于红外热诊断中问题的提法、数据的获得有其独特的方式,各种具体的热传导反问题的求解方法也应运而生。各种方法的适用性和有效性通常都是用数值实验的方法进行验证。即对同一个导热系统,各计算一个导热正问题和导热反问题,它们应互为定解条件和解,若对照相等,则说明所述方法是可行的。

4.1 部分几何形状未知的热传导反问题求解^[11,15]

对于设备内部具有任意形状的缺陷(未知边界)红外热诊断时,对平板、球壳和圆筒形热设备,在不同边界条件下的导热反问题处理,Hsieh C. K等给出了一个成熟的普遍解法。其方法是,对于给定的稳态导热问题,建立相应数学模型,给出在外表面具有对流换热条件下的通用解析级数解,再利用外表面的红外扫描测温结果(这一强加边界条件)确定解析解中各级数项系数,从而可获得内部边界满足不同边界条件的曲面方程,即可分析内部边界的形状,对内部破损情况的位置、严重程度给出定量的结论。数值模拟结果表明,即使考虑到红外测温产生的测量误差,所得结果也能满足工程需要。该方法的特点是对稳态导热问题,通用性好,适用范围广。

基于Hsieh C. K等提出的计算方法,本文作者将其应用范围加以推广,针对方形热设备的内部温度和筒形热设备的壁厚,在其内部为第一类边界条件的情况下,提出了红外热诊断的方案。数值模拟结果表明了该方案的可行性和适用性^[16-17]。

对稳态导热管道的壁厚减薄问题,范春利等提出了另一种红外热诊断方法^[18],该方法考虑管内为强迫对流换热条件,管外壁与环境对流换热,同时考虑到外壁面红外测温误差可能带来的影响,引进安全系数的概念。经数值计算,所得结果与实际相符合。Jin-Hong Liu等建立了二维圆筒热设备的稳态导热模型^[19],为接近实际问题,考虑了外壁面流体为不同流动特征时,进行了内部温度的计算。其方法是将导热方程及其边界条件离散,给出各节点差分方程,建立矩阵形式,通过重排矩阵,并结合最小二乘法,计算出雷诺数分别为140000、170000和219000时的结果,结果表明即使考虑测温误差为5%时,也能很好地预测内部各点温度。

考虑设备材料物性为非线性时,白博峰等针对内部为热流密度边界条件,提出了一种迭代关系式——逐步逼近修正法,通过比较计算结果与实际结果的逼近程度作为迭代结束的条件,给出了确定内部换热系数的一种方法,并通过数值实验对算法

的稳定性进行了分析,结果表明完全满足科研和工程应用的要求。这一方法也同时拓宽了红外热诊断的应用范围。

4.2 瞬态热传导反问题求解^[21-22]

一般热设备在启动过程中,发生的是瞬态热传导问题。此时红外热诊断是要根据外壁温度随时间的变化规律,推算出内部温度的变化规律或其他条件。对于瞬态热传导反问题,由于在热传导过程中,温度变化幅度在反推过程中沿径向减小,当由外壁温度推算内部温度或内边界条件时,温度变化幅度将会被放大,如果外壁温度数据有一定的误差,这些误差也会被同时放大,使求出的内部条件严重失真。而误差在实际测量中是不可避免的,因此控制误差所产生的影响,保证解的稳定性是瞬态红外热诊断问题的关键。张辉等以动力工程中常见的双层圆筒为研究对象,给出一种以傅立叶变换技术为核心的由外而内的温度推算方法,并用数值实验加以验证,对结果进行了讨论,对薄壁设备有一定的适用性。而白博峰等以螺旋管为例,为求解管内流动传热系数,采用最小二乘原理,给出了导热反问题的一种求解方法,通过数值实验表明,该方法具有较好的稳定性和较好的精度。

5 问题与展望

尽管红外热诊断具有传统检测不可比拟的优点和适用范围,但也存在着一些亟待解决的问题。目前,虽然研究了一些类型设备在一定条件下的红外热诊断方法,但对于红外热诊断的基础理论核心问题——导热反问题的研究仍然远不能满足红外热诊断的需求,这是制约红外热诊断技术发展的一个主要问题。其次,红外热诊断内部缺陷主要还处于理论研究和实验室研究阶段。从红外热诊断的发展过程可以看出,红外热诊断已经从简易的外部诊断向难度大的内部诊断进行过渡,随着导热反问题研究的深入和高速、大内存计算机与数值计算方法的进一步发展,红外热诊断技术必将更加成熟、更加广泛适用。

参考文献:

- [1] R 万兹蒂. 红外技术的实际应用 [M]. 北京:科学出版社,1981,1-7.
- [2] 陈衡. 红外物理学 [M]. 北京:国防工业出版社,1985.
- [3] 赵墨林. DL/664-1999《带电设备红外诊断技术应用导则》修订建议的探讨 [A]. 中国科协 2004 年学术年会电力分会场暨中国电机工程学术年会论文集 [C].

- 606 - 611.
- [4] 程玉兰. 红外诊断技术与应用 [J]. 设备管理与维修, 2004, (1): 48 - 50.
- [5] 陈衡. 我国红外诊断技术的现状与展望 [J]. 激光与红外, 1998, 28(5): 292 - 296.
- [6] 陈衡, 侯善敬. 电力设备故障红外诊断 [M]. 中国电力出版社.
- [7] 曾庆立. 红外热像仪在电力系统中的应用 [J]. 激光与红外, 1994, 24(3): 20 - 22.
- [8] 叶风, 张晓宁. 红外技术在电力设备外部故障检测中的应用 [J]. 辽宁工学院学报, 22(5): 13 - 15.
- [9] 叶建泗. 红外技术在电力设备发热诊断中的应用 [J]. 江苏电机工程, 2001, 20(2): 32 - 34.
- [10] 李世雄, 刘家绮. 小波变换和数学反演基础 [M]. 地质出版社, 123 - 168.
- [11] Hsieh C K, et al. A general method for the solution of inverse heat geometries [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1986, 29(1): 47 - 58.
- [12] 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.
- [13] 关荣华, 曹春梅, 陈衡. 工业设备内部缺陷的红外热诊断研究 [J]. 激光与红外, 2001, 31(4): 228 - 229.
- [14] 曹春梅, 关荣华, 陈衡. 三维球壳内壁缺陷的红外诊断方案 [J]. 华北电力大学学报, 2002, 29(4): 98 - 100.
- [15] 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.
- [16] 曹春梅, 张晓宏. 基于红外测温的方形热设备内壁温度的推算 [J]. 激光与红外, 2004, 34(1): 30 - 31.
- [17] 曹春梅. 基于红外测温技术的圆筒壁厚测量 [J]. 激光与红外, 2005, 34(11).
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 白博峰, 郭烈锦, 陈学俊. 非线性二维稳态导热反问题的一种新解法 [J]. 工程热物理学报, 1997, 18(2): 201 - 204.
- [21] 张辉, 陈善年, 徐益谦. 圆筒内壁温度的推算方法 [J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(4): 8 - 13.
- [22] 白博峰, 郭烈锦, 陈学俊. 最小二乘原理求解多维瞬态导热反问题 [J]. 计算物理, 1997, 14(4, 5): 201 - 204.

迎所庆 鼓干劲 促光电技术发展

2006年9月15日,将迎来十一所建所50周年华诞,这是我所建设和发展史上的一件大事。从今年年初开始,所党政工团紧紧围绕庆祝建所50周年开展了系列主题活动,不断把所庆的热烈氛围推向高潮。通过形式多样的活动,进一步展示全所职工团结拼搏、健康向上的精神风貌,激发出了全所干部职工的工作热情和干劲。

所党委以建所50周年为契机,开展了“回顾历史、展望未来,激发职工爱所、爱岗敬业”的主题宣传教育活动。出版了《华北光电》所庆专刊,分期介绍我所创业发展史,宣传几代十一所人艰苦奋斗、无私奉献、献身国防的光荣传统,大力弘扬“团结实干、创新奉献,攀登光电技术高峰”的十一所精神。老所长老领导罗沛霖、刘大明、张连华特为专刊写了文章,回顾了十一所的创业发展历程,表达了他们对十一所的深厚感情和寄予的无限期望。各党总支和党支部将深入学习党的十六届五中全会精神、落实我所“十一五”发展规划以及全面完成2006年度各项任务同庆祝建所50周年有机结合起来,积极开展了有针对性的主题教育活动,同时对各分工会和团支部组织的各项活动给予了有力的指导和支持。所工会组织开展了“以实际行动向建所50周年献礼”的劳动竞赛活动,各分工会积极响应,在部门党政领导的指导下,结合实际,确定了部门的竞赛活动主题和目标,并认真组织落实,在职工中掀起了比干劲、比成绩、比奉献的高潮,有效地促进了各部门年度科研生产任务的完成。共青团组织开展了“我与十一所共发展”演讲比赛和所史知识竞赛,吸引了青年职工的踊跃参与。通过比赛,使青年职工进一步了解十一所的创业发展史,增强了自豪感和责任感,激励了青年职工积极融入到十一所改革发展中,立足本职岗位,为国家光电技术科研和光电产业发展,为十一所的发展贡献力量。

(党群工作部供稿)