

弥散介质条件下辐射测温方法 (特邀)

孙红胜^{1,2}, 梁新刚¹, 马维刚¹, 郭靖², 王加朋², 邱超², 黄亮^{2*}

- (1. 清华大学 航天航空学院, 北京 100093;
2. 北京振兴计量测试研究所, 北京 100074)

摘要: 在航空航天、冶金铸造等各种工业现场高温热试验过程中, 需要在高浓度弥散介质遮蔽物件表面的条件下, 快速、准确地获取试验件表面的高温温度。传统的辐射测温方法包括波段辐射法、亮度法、比色测温法、多波长测温法等, 是实现高温测量的一种主要测量方法。弥散介质由于介质粒子的作用会产生各种光谱散射、吸收和发射效应, 给高温的准确测量带来了很大的干扰, 导致测量结果产生偏差, 必须要改进经典辐射测温方法。论述了弥散介质条件下几种主要的辐射测温方法, 包括试验数据反推法、热辐射计算法、多通道分裂窗法、信息复原计算法、神经网络计算法等, 分析了各种方法的优点和不足, 总结了弥散介质条件下辐射测温方法面临的挑战和发展趋势。

关键词: 弥散介质; 辐射测温; 高温; 测量

中图分类号: O432 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210985

Radiation thermometry method under diffuse medium conditions (*Invited*)

Sun Hongsheng^{1,2}, Liang Xingang¹, Ma Weigang¹, Guo Jing², Wang Jiapeng², Qiu Chao², Huang Liang^{2*}

- (1. School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100093, China;
2. Beijing Zhenxing Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100074, China)

Abstract: In the process of high temperature thermal experiment in aerospace, metallurgical casting and other industrial fields, it is necessary to obtain the high temperature on the shelter surface of the test piece quickly and accurately under the condition of high concentration of diffuse medium. The traditional radiation temperature measurement methods include band radiation method, brightness method, colorimetric temperature measurement method, multi-wavelength temperature measurement method and so on, which is the main measurement method to realize high temperature measurement. Due to the effect of medium particles, diffuse medium will produce various spectral scattering, absorption and emission effects, which will bring great interference to the accurate measurement of high temperature and lead to deviation of measurement results. It is necessary to improve classical radiation thermometry. Several main radiation thermometry methods under the condition of diffuse medium were discussed, including experimental data inversion method, thermal radiation calculation method, multi-channel split window method, information recovery calculation method, and neural network calculation method. The advantages and disadvantages of various methods were analyzed, and the challenges and development trends of radiation thermometry methods under the condition of diffuse medium were summarized.

Key words: diffuse medium; radiation thermometry; high temperature; measurement

收稿日期: 2021-12-18; 修订日期: 2022-03-05

基金项目: 国防技术基础科研项目 (J042011B001)

作者简介: 孙红胜, 男, 研究员, 硕士, 主要从事光学计量测试、辐射测温等方面的研究。

通讯作者: 黄亮, 男, 硕士生, 主要从事光学计量测试、辐射测温等方面的研究。

0 引言

近年来,随着航空航天和发电铸造技术的发展,关键部件的温度适应性要求越来越高。在高温热试验过程中,需要对物件的表面温场进行准确测量,以准确获知材料和结构的热性能^[1-2]。工业现场测量仪器所处的环境较为复杂,环境介质包括气体、液体、固体颗粒及混合物等多种弥散成分,典型的包括水雾、烟气、尾焰等^[3]。

工业测温技术一般分为接触式和非接触式,辐射测温方法是非接触式测温中重要的一种方法,在工业场合被大量应用。国内外学者研究了各种辐射测温方法并取得了很好的研究成果,主要包括波段辐射和亮度法、比色法、多波长法等,测温准确度主要受被测件材料发射率数据或模型的影响^[4-16]。

传统的辐射测温技术主要应用在纯净背景条件下,即辐射测温光路中无高浓度弥散介质或者辐射测温的探测波段与弥散介质的选择性发射吸收光谱区域不重叠,应用上受到一定的限制。当辐射测温光路中介质影响较大时,辐射测温结果会存在较大误差^[17],需要针对弥散介质的光谱特性研究各种典型弥散介质条件下的辐射测温新方法。

1 典型弥散介质条件下的辐射测温

在工业现场环境条件下,典型的高温温场测量热试验场景包括锅炉加热、发动机热试验、结构件热试验等。

发动机热试车过程中需要对发动机喷管关键的内壁和进气道的高温温场进行测量,以考核验证发动机热防护系统的性能。为了测量发动机内壁的温场,辐射测温仪必须要穿过气流或尾焰对内壁目标区域进行高温温场测量,如图 1 所示。尾焰的自身发射和吸收会对辐射测温结果有较大的影响。

在热发电厂,需对高温锅炉过热器表面温场进行测量,传统的热电偶测量方法受到现场高温恶劣环境的影响,存在腐蚀或量程不够的问题,采用辐射测温仪对过热器表面温场进行测量时,需穿过锅炉表面的高温烟气对过热器壁面温度进行测量,如图 2 所示。

在航空航天研究过程中,需要对结构件进行热考核试验,试验过程中结构件表面快速升温,同时喷射

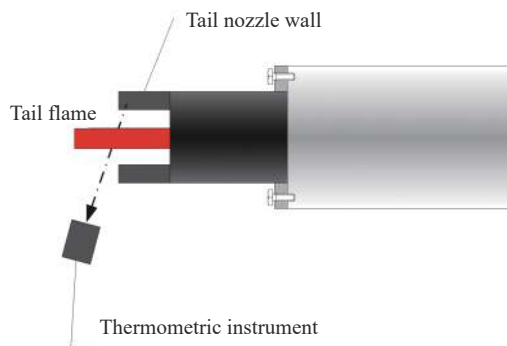


图 1 发动机试验过程中高温测量场景

Fig.1 High temperature measurement scene during engine test

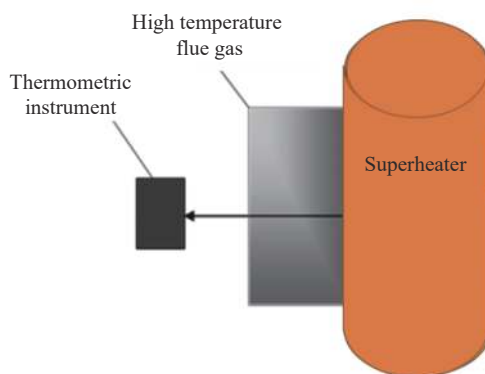


图 2 电厂锅炉过热器高温测量场景

Fig.2 High temperature measurement scene of boiler superheater in power plant

大量水雾以降温,会在高温结构件表面形成高浓度水雾场,如图 3 所示。

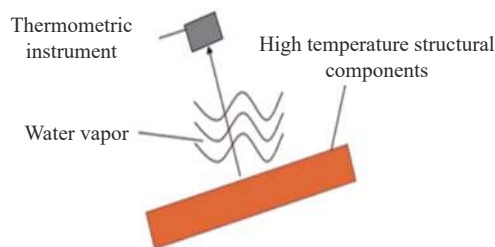


图 3 高温结构件热试验高温测量场景

Fig.3 High temperature measurement scene for thermal test of high temperature structures

由于试验环境的影响,在各种高温热试验的过程中,物件表面温度测量需穿过弥散介质进行温场测量;同时物件周围有时会有较强的高温背景源存在,典型弥散介质条件下表面高温测量的场景一般都可抽象为如图 4 所表示的辐射传输过程^[18]。

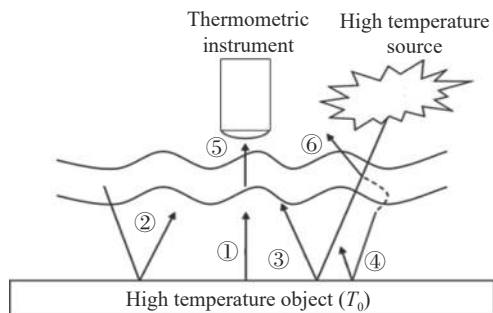


图 4 弥散介质条件下高温表面温度测量示意图

Fig.4 Measurement of high temperature surface temperature under diffuse medium conditions

图 4 中: 路径①表示高温物件自身发射的高温辐射; 路径②表示流场下行辐射经过表面之后的反射辐射; 路径③表示高温背景源辐射透过流场经过表面之后的反射辐射; 路径④表示高温背景源被流场散射下行的辐射经物件表面的反射辐射; 路径⑤表示流场的上行辐射; 路径⑥表示高温背景源经流场散射后的上行辐射。

根据图 4 建立弥散介质条件下辐射测温的数学模型。辐射测温仪探测的辐射亮度设为 R_i , 则:

$$R_i = \tau[\varepsilon R_1 + (1 - \varepsilon)R_2 + E_0\rho + (1 - \varepsilon)R_4] + R_5 + R_6 \quad (1)$$

式中: τ 为弥散介质流场的透过率; ε 为高温物件的发射率; ρ 为高温物件表面的半球方向反射系数; R_1 为高温物件的等效黑体辐射亮度; R_2 为流场的下行等效黑体辐射亮度; E_0 为背景源透过流场后在流场表面形成的等效黑体辐射照度; R_4 为背景源被流场散射后的下行等效黑体辐射亮度; R_5 为流场的上行等效黑体辐射亮度; R_6 为背景源被流场散射后的上行等效黑体辐射亮度。

总的来说, 在复杂弥散介质流场环境下进行高温物件表面温度的准确测量是一个较难解决的问题, 涉及到辐射测温理论、流场光谱特征分析、背景高温辐射干扰等方面。弥散介质条件下的辐射测温过程中, 介质的光谱辐射特性对辐射测温的结果影响很大, 需要根据不同类型介质的光谱特性研究相对应的辐射测温方法。

2 典型弥散介质流场的光谱特性

2.1 典型尾焰介质流场的光谱辐射特性

燃烧充分的航空发动机尾焰中, 气体成分主要包

括 H_2O 、 CO_2 、 CO 、 N_2 , 影响尾焰光谱特性的主要是 H_2O 、 CO_2 、 CO 这三种非对称极性的分子气体。基于分子红外光谱学理论^[19-21] 计算出 H_2O 、 CO_2 、 CO 三种气体在标准条件下的红外谱线浓度强度, 如图 5 所示。可以看出, CO_2 、 CO 气体在对应的中波波段都有选择性的光谱吸收和发射谱带, 长波波段的光谱辐射和吸收很小; H_2O 气体在中波和长波波段都有相应的光谱吸收和发射谱带, 3~5 μm 、8~12 μm 波段为 H_2O 气体的低吸收、高透过的光学谱段窗口带。

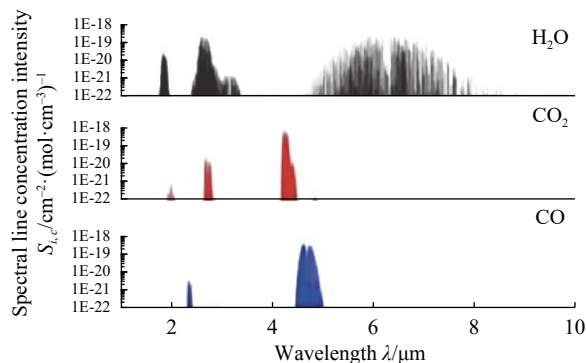


图 5 尾焰介质中主要气体成分的光谱吸收特性

Fig.5 Spectral absorption characteristics of main gas components in the tail flame medium

尾焰的温度对尾焰的光谱特性也有影响, 以对尾焰辐射特性影响较大的 H_2O 气体为例, 根据 HIRTAN 数据库中的高温模块, 计算出不同高温条件下 H_2O 气体的光谱透过率, 如图 6 所示。可以看出, H_2O 气体在 3.6~4.0 μm 谱段, 光谱透过率基本不随温度变化; 在 8~12 μm 谱段, 光谱透过率随着尾焰温度的升高而增大。可以利用尾焰不同波段内的差分吸收发射特性选择两个测量通道, 通过相应的差分吸收测量模

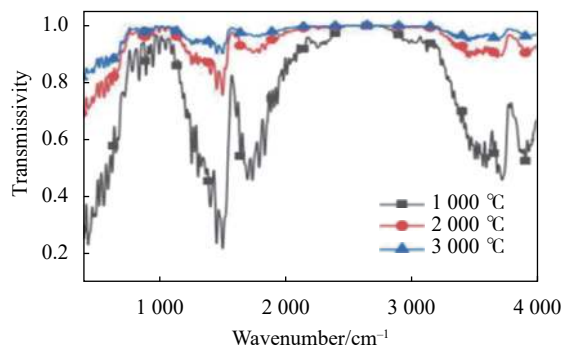


图 6 H_2O 气体在不同温度下的光谱透过率

Fig.6 Spectral transmittance of H_2O gas at different temperatures

型, 结合内壁材料光谱发射率特性数据, 得到透过尾焰的内壁面准确温度。

2.2 典型水雾介质流场的光谱辐射特性

水雾介质流场的光谱散射和吸收能力与流场中水雾粒子的粒径密切相关, 确定水雾的粒径分布状态对于其散射能力的计算具有十分重要的意义。根据参考文献调研结果, 目前雾滴谱分布中使用最多的是广义 Gamma 分布^[22-23], 其粒径密度表达式为:

$$n(r) = ar^{\alpha}e^{-br^{\beta}} \quad (2)$$

式中: $n(r)$ 表示单位体积内半径为 r 的水雾颗粒的概率密度; 系数 a 、 b 与能见度 V 有关。根据参考文献结果, 平流雾粒径集中在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$, 而辐射雾粒径集中在 $0.1\sim 1\ \mu\text{m}$ 。

假设水雾粒径为 Gamma 分布、平均值为 $3.6\ \mu\text{m}$ 、水雾厚度 L 为 $1\ \text{m}$ 、峰值数密度在 $(6\times 10^8\sim 3\times 10^9)\ \text{m}^{-3}\ \mu\text{m}^{-1}$ 范围内变化时, 则可以根据下式计算的水雾的透过率:

$$\tau_0 = e^{-L\int \pi r^2 n(r) Q_e(r) dr} \quad (3)$$

式中: $Q_e(r)$ 为粒子的衰减因子。上述条件下水雾光谱透过率的计算结果如图 7 所示, 可以看出, 随着数密度增大, 透过率降低。

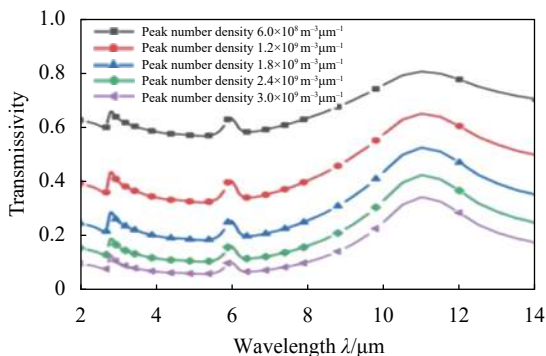


图 7 不同数密度条件下水雾的光谱透过率

Fig.7 Spectral transmittance of water vapor at different number densities

保持水雾液滴总体积不变, 改变水雾的平均粒径, 光谱透过率变化情况如图 8 所示。可以看出, 当平均粒径从 $4.8\ \mu\text{m}$ 逐渐缩小至 $2.4\ \mu\text{m}$ 时, 红外整体透过率增大, 然而长波红外区域透过率增大的速度更快, 同时长波红外区透过率峰位置从 $11\ \mu\text{m}$ 蓝移至 $10.5\ \mu\text{m}$, 光谱透过率波形也发生了微小变化。

从计算结果可看出, 典型水雾流场条件下, 中波红外透过率非常低, 长波红外波段的光谱透过率较

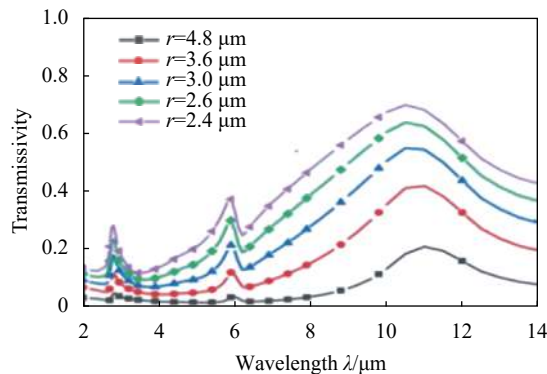


图 8 不同平均粒径情况下水雾的光谱透过率

Fig.8 Spectral transmittance of water vapor under different average particle sizes

高; 在长波不同波段内具有不同的散射能力和透过率。因此, 通过多个波段的透过率差异, 理论上可以对水雾的散射能力、浓度等参数进行计算, 从而实现温度辐射测量的修正。

2.3 典型弥散介质流场的分类和特性

通过以上典型介质流场光谱辐射特性的计算分析, 可以对弥散介质流场进行分类研究。弥散介质按照光谱特性进行分类, 一般包括三种类型: 第一种是纯吸收发射型, 以气体为主, 典型的如燃烧充分的航空煤油发动机尾焰, 光谱辐射特性为非连续选择性光谱吸收和发射; 第二种是纯散射吸收型, 以气溶胶为主, 典型的如高浓度水雾, 光谱辐射特性以连续的光谱散射和吸收导致的衰减为主, 自身发射很小; 第三种是多相混合型, 既包括非连续的光谱选择性吸收和发射, 也有强烈的光谱连续吸收和发射, 同时还有强烈的光谱散射, 典型的如燃烧未充分的固体火箭发动机尾焰中, 既包含有气体, 又包含有固体颗粒和的气溶胶成分, 光谱特性十分复杂。针对这三种介质, 需要有针对性地研究相应的辐射测温新方法和理论。

3 弥散介质条件下的辐射测温方法

3.1 实验数据反推法

在工高温物体表面介质遮蔽时会产生吸收、散射和透射等多种效应, 模型较为复杂。针对典型的介质场分布参数, 在实验室内建立相应的介质模拟场, 基于模拟实验数据进行反推, 得到不同类型测温仪测温结果和介质浓度的关系, 是一种较为可行的克服弥散介质干扰的研究方法。

重庆大学的谭锴等人开展了水雾对高温铸坯表面辐射测温影响的实验研究^[24],建立了相应的试验装

置,得到了与辐射测温仪测温结果、水雾厚度和水量等参数的关系,如图 9 所示。

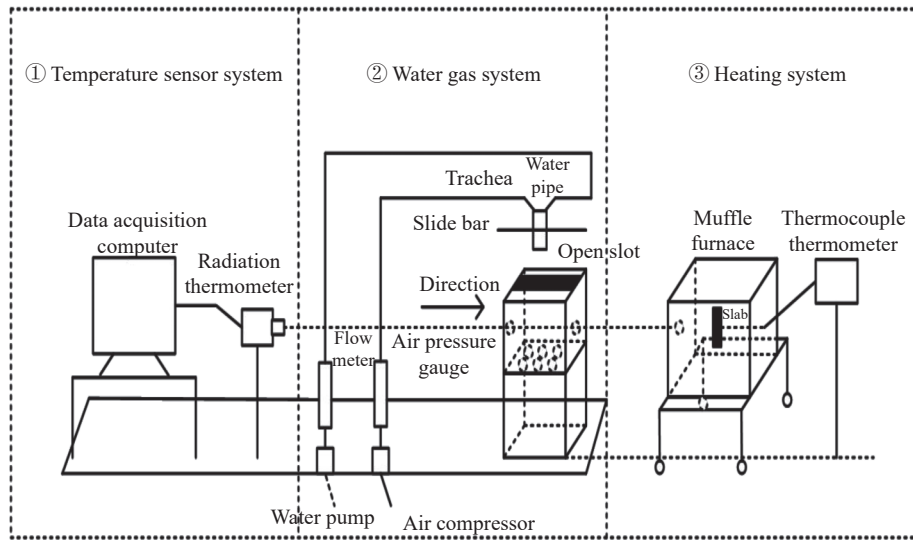


图 9 研究水雾对高温铸坯表面温度测量影响的装置^[24]

Fig.9 Device to study the effect of water vapor on surface temperature measurement of high temperature billet^[24]

刘永翔^[25]等人利用 DPIV 粒子测量系统首先测量出介质场参数,得到了弥散介质条件下表面测温结果与粒子场参数和红外热像仪测量值之间的关系,前提条件是在现场能准备测量出介质场分布的特性。

针对烟气覆盖表面的红外温度测量问题,钟万里等人在实验室条件下设计搭建了模拟烟气覆盖表面的红外测温实验系统,得到了烟气参数与测温结果修正值之间的关系,并提出了利用反演方法修正红外测温的设想^[26]。

3.2 热辐射传输计算法

由于弥散介质的模型较为复杂^[27],基于试验数据反推的反演方法具有一定局限性,为了得到介质场的分布信息,必须要用辐射传输计算方法研究得到相应的介质温场反演模型。基于辐射传输模型的介质作用条件下温场反演计算的方法主要有有限体积法 (Finite Volume Method, FVM)、蒙特卡罗法 (Monte-Carlo Method, MCM)、离散坐标法 (Discrete Transfer Method, DOM) 等。采用以上辐射传热计算模型计算参与性介质影响的辐射传递问题,反演得到最终的温度。

Liu Yuying 等建立了有参与性介质影响时辐射测温问题的物理与数学模型^[28-29],基于辐射换热理论研

究了水雾对红外辐射测温仪的影响。假设壁面温度为均匀分布,辐射测温仪为点测温仪,基本模型为:

$$\mu \frac{\partial I_{\lambda}(x, \mu)}{\partial x} = k_{a,\lambda} I_{b,\lambda} - k_{a,\lambda} I_{\lambda}(x, \mu) \quad (4)$$

$$I_{\lambda}(0, \mu) = \varepsilon_1 \frac{n^2 \sigma T_1^4}{\pi} + 2\rho_1 \int_{-1}^0 I_{\lambda}(0, \mu') \mu' d\mu' \quad (5)$$

$$I_{\lambda}(L, \mu) = \varepsilon_2 \frac{n^2 \sigma T_2^4}{\pi} + 2\rho_2 \int_0^1 I_{\lambda}(L, \mu') \mu' d\mu' \quad (6)$$

式中:下标 λ 和 b 分别代表波长和黑体; k_a 为水雾的吸收系数; I 为光学辐射亮度; $x=0$ 和 $x=L$ 分别对应壁面 S_1 和 S_2 ; θ 为热辐射发射方向和法线方向的夹角; μ 为 θ 的方向余弦; n 为折射率; σ 为玻耳兹曼常数。基于以上模型对水雾遮蔽条件下的热辐射传输进行计算,过程如图 10 所示。基于计算结果分析了水雾对单色、比色辐射点测温的影响。上述模型假设壁面温度场为均匀分布,在壁面温度场为非均匀分布时,上述测温模型不再成立。

东南大学的任建新等人利用广义源项有限体积法结合红外温场测量技术得到了电站锅炉过热器壁面在烟气覆盖条件下的温度,在实验室进行了试验验证^[30],并在电厂进行了实际应用,广义源项有限体积法假设特征方向上的一定范围内的所有辐射强度都相同,同时同一控制体内在特征方向上所有点的

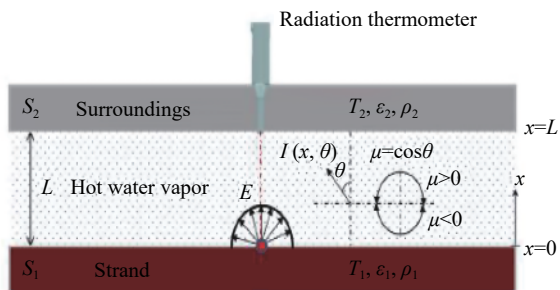


图 10 基于热辐射传输理论计算水雾对辐射测温的影响^[28]

Fig.10 Calculation of the effect of water vapor on thermometry measurement based on thermal radiation transfer theory^[28]

广义源项也相同。根据这些假设,观测点处的辐射强度可以简化为边界辐射强度与各广义源项的组合。这种算法优化了计算所需参数个数,降低了计算的难度,因此在复杂介质高温温场反演中具有非常大的优势。

也有学者采用蒙特卡洛法对辐射传递方程求解并重构被测空间的温度场,包括正向蒙特卡洛法和逆向蒙特卡洛法。在介质场的多个方位布置光学相机,通过光学层析成像的方法可以对介质的三维温度和浓度分布进行重构。Hossain 等^[31-32]利用传统 CCD 相机结合双色测温法以及层析成像技术,同时测量出 8 个方向火焰的辐射图像,重建得到火焰温度和发射率的三维分布。但蒙特卡洛法和光学层析成像法大多是对弥散介质场本身的温度分布进行重构,对弥散介质遮蔽的固体表面温场反演技术研究较少。

辐射传输计算模型研究方法从理论上来说较试验数据反推法更为完备,但需要获得介质场的特性参数,在某些试验场合,介质的场分布变化速度较快,介质参数不确定,无法获得准确的空间参与性介质场分布特性参数,且计算收敛时间长,因而需要介质场的特性数据且测量的实时性较差。

3.3 多通道分裂窗法

分裂窗算法被广泛应用于地面温度的卫星遥感。其基本原理是介质在预先设定的两个通道内具有不同的吸收特性,因而可以通过这两个通道辐射亮度的某种组合来消除温度反演时介质的影响。根据组合方式,分裂窗算法可以分为线性分裂窗算法和非线性分裂窗算法。线性分裂窗算法使用两个通道辐射温度/亮度的线性组合来反演目标温度^[33]。

当被测目标温度与室温偏离不大时,温度与探测器输出灰度之间的存在线性关系,利用非线性分裂窗算法,被测目标可以用两个通道辐射温度的非线性组合表示:

$$T_0 = c_0 + c_1 T_1 + c_2 (T_1 - T_2) + c_3 (T_1 - T_2)^2 + \Delta T \quad (7)$$

式中: T_0 为被测目标的温度; T_1 、 T_2 为两个通道内的辐射温度; ΔT 为温度误差项。

当被测目标的温度远高于室温时,温度与探测器输出灰度之间的线性关系不再成立,被测目标的辐射亮度可以表示为两个通道辐射亮度的非线性组合:

$$L(T_0) = c_0 + c_1 L(T_1) + c_2 [L(T_1) - L(T_2)] + c_3 [L(T_1) - L(T_2)]^2 + \Delta T \quad (8)$$

式中: $L(T_0)$ 为被测目标的辐射亮度; $L(T_1)$ 、 $L(T_2)$ 为两个通道内的辐射亮度; ΔT 为亮度误差项。

公式 (8) 中,系数 $c_i (i=0, 1, 2, 3)$ 与两个通道的响应函数、两个通道内被测目标的发射率以及介质在两个通道内的吸收特性有关(影响因素包括介质的组成情况、温度和压力等参数),它们的数值可以通过模拟仿真、温度数据回归和一些经验公式获得;而误差项 ΔT 和 ΔL 为可以按照情况进行改变的修正项,通过合理的误差项分析方法可以进一步提高温度反演的精度。分裂窗的通道可以是双通道、三通道或更多通道。

李如仁等人使用分裂窗算法反演了内蒙古乌达矿区的地表温度^[34],提取了煤火信息。结合内蒙古乌达市环境监测中心站提供的数据和实地考察,发现分裂窗算法反演结果与实测温度值的差值较小,约为 0.5 °C,且高温异常区范围明显,在地下煤火反演中具有一定的适用性。

分裂窗算法目前主要针对的是地面常温场景进行温度反演,同时介质(大气、云层)的温度都在一个中低温范围内,介质产生的临近效应不强,在进行高温、高浓度介质条件下的高温目标温度反演时,通用的算法不适应,需要研究相应的改进算法。

3.4 信息复原算法

在介质浓度较强而产生较强的临近效应时,需要考虑临近效应对辐射测量引入的干扰,此时信息复原算法具有很好的抗临近效应干扰效果。

信息复原算法的原理是基于信息传递理论,将

弥散介质条件下的辐射测温过程分解为各种辐射信息传递的过程,通过各种方法得到各个过程中的信号传递函数,即弥散介质的点扩散函数和透过率函数信息,通过数学上反卷积的方法求得目标的温度信息。

浙江大学的林光、西北工业大学的何人杰等人基于大气介质的 McCartney 多次散射模型^[35-37],针对图 11 中的场景建立了雾天场景图像的信息传输模型:

$$I(x) = (J(x)t(x) \otimes h(x) + A(1 - t(x)) \otimes h_a(x) \quad (9)$$

式中: $I(x)$ 为通过大气介质后接收到的场景图像灰度信息; $J(x)$ 为场景的原始图像灰度信息; $t(x)$ 为大气介质的透过率信息; $h(x)$ 为大气介质的点扩散函数; A 为背景光辐射信息; $h_a(x)$ 为背景光对应的点扩散函数。通过先验信息得到大气介质的光学厚度和前向散射因子,根据大气介质中辐射传输理论估算出 A 、 $t(x)$ 、 $h(x)$ 和 $h_a(x)$,得到 $J(x)$,由光学探测系统的辐射标定曲线得到原始场景的辐亮度和温度信息。

李海巍等人基于多幅典型特征图像的信息估算出大气介质的点扩散函数 PSF,再由退化图像的灰度信息得到原始图像的灰度和温度信息。提出的复原

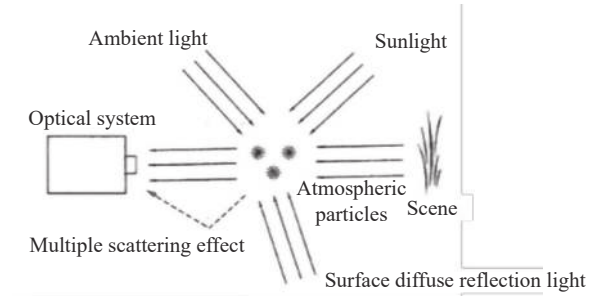


图 11 基于散射模型和信息复原的场景辐射信息反演^[35]

Fig.11 Scene radiation information retrieval based on scattering model and information restoration^[35]

算法不依赖于先验信息和在线测量的大气介质信息,具有较好的实用性^[38];但是需要具有一些典型特征的多幅图像,如带有锐利边界的图像和图像灰度梯度较大的图像。文中针对高浓度水雾条件下的高温目标温度测量,建立了基于多通道探测信息复原的高温目标测量方法,研制了适用于水雾条件下的三通道测温仪,无需已知水雾场的浓度和粒径分布信息,进行了相关的实验测试,如图 12 所示,结果表明反演测量的误差在目标温度 1200 °C 时小于 9%。

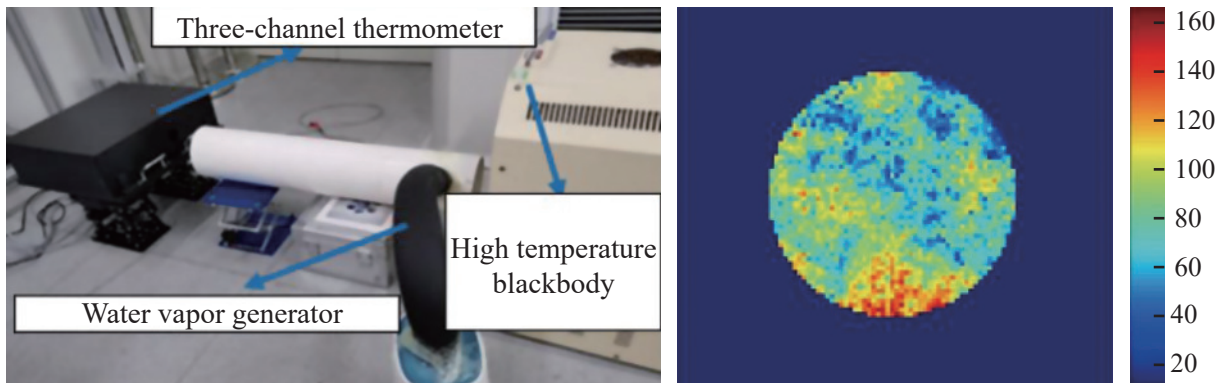


图 12 水雾介质条件下基于三通道探测的辐射测温

Fig.12 Radiation thermometry based on three-channel detection in water vapor medium

3.5 神经网络法

神经网络算法是一种模仿生物神经网络结构和功能的算法,通过一系列的神经元联结而成进行计算,能够在外界信息的基础上改变结构,是一种自适应系统。神经网络的搭建可以不依靠具体的物理原理,因此在处理高度复杂问题方面有着众多应用。一个典型的神经网络包含数据输入层、隐含层和输出层。神经网络的搭建和训练就是通过预设合理的隐

含层神经节点,并通过大量的数据输入,不断调整神经节点的权重,使之收敛至最优结构。

由于被测目标发射率通常未知,且辐射传输过程受介质的影响非常复杂,因此使用传统的反演方法面临未知参数过多、模型复杂等问题,难以获得可靠的反演结果。目前,已经有很多学者使用神经网络的方法对高温物体的温度进行了反演,如图 13 所示。大连理工的孙鹏等人基于小波神经网络算法开展了无

人机遥测领域透过大气介质的地表温度反演, 温度拟合误差控制在 0.4 °C 以内^[39-40]。

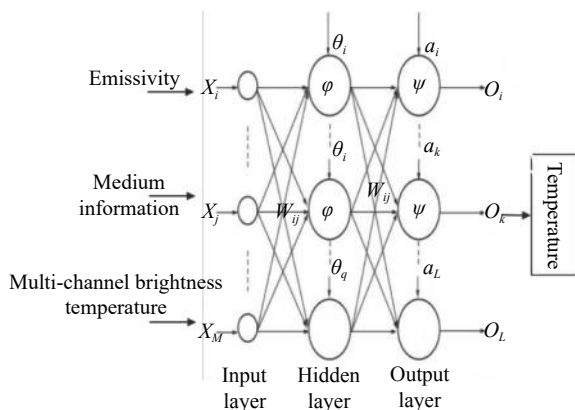


图 13 基于神经网络的目标温度反演

Fig.13 Retrieval of target temperature based on neural network

Wu 等利用卷积神经网络模型, 结合多尺度特征连接, 填充区域缺失的地表温度, 并将该模型应用于风云 2 号地球静止卫星的地面温度反演, 取得了较好的效果^[41]。毛克彪等利用 MODIS 载荷三个红外波段和水汽波段白天的数据, 将 160 种地物类型的发射率数据输入辐射传输模型中, 得到多个波段的辐射亮温, 采用神经网络方法进行训练, 反演地表温度, 可得到较好的温度反演精度^[42]。

神经网络算法作为一种探索性质的辐射测温反演算法, 具有很好的应用前景, 但一般需要较多的先验信息和数据。由于输入量的多变及不确定性, 基于神经网络的弥散介质条件下辐射测温结果在误差控制上存在较大的不确定性。

4 结束语

弥散介质条件下的辐射测温在国内外的研究较少, 可以借鉴的方法有限, 面临着介质类型及光谱特性复杂、介质流场光谱信息与高温物件光谱发射率信息耦合干扰、辐射测温现场环境恶劣等众多难题和挑战, 主要需要解决弥散介质光谱特性识别、介质流场光谱参数与目标材料光谱发射率参数耦合求解、弥散介质流场自发辐射滤除等科学问题。分析国内外的研究现状, 主要的研究方法总结如下:

(1) 基于实验数据的反推法——只能适用于固定特性参数的介质场, 且需要经过大量的模拟实验数据积累; 若工业现场介质流场的特性发生变化, 与实验

室模拟条件下的介质流场特性不同时, 该方法不能适用, 故该方法只能在介质流场特性参数稳定且可复现的工业场合应用。

(2) 热辐射传输算法——需要预先已知介质流场的光谱特性参数, 且参数在测量过程中稳定不变化, 同时需假设目标的温度场和介质流场为均匀分布, 当介质流场的光谱特性参数与模型中的参数不不同时, 计算出的温度结果会出现较大偏差。

(3) 多通道分裂窗法——主要针对吸收型或吸收散射型但临近效应不强烈的介质, 需要已知的先验信息较少, 算法较为简洁且直观, 但目前的算法主要针对的是大气介质条件, 反演测量的目标温度主要是常温, 针对工业现场的水雾、烟气等特定介质流场以及高温目标, 需改进优化相应的多通道分裂窗方法。

(4) 信息复原算法——主要针对纯散射吸收型介质, 且在弥散介质临近效应强烈时算法也能适应, 具有较强的适应性, 但目前的算法需要介质场的关键特性参数, 如光学厚度和前向散射因子的先验信息, 在某些情况下这些信息无法获取或获取的准确度不高, 需进一步研究无需介质流场关键信息参数、基于信息复原计算的辐射测温新方法。

(5) 神经网络算法——具有很好的应用前景和适应性, 但是需要获得场景的高光谱成像辐射信息, 硬件装置较为复杂, 同时相应的反演测量结果存在一定的随机性, 若介质参数不在神经网络训练集范围内, 此时的反演测量结果可能会存在较大的误差。

以上弥散介质条件下的辐射测温方法很好地发展了辐射测温经典理论, 在科研和工业领域取得了较好的应用成果。但针对多相混合型的弥散介质, 目前的各种算法尚不完备, 还需要针对复杂的吸收发射散射混合型介质, 在非连续吸收发射和连续散射吸收介质条件下辐射测温方法研究的基础上研究新的辐射测温方法, 主要的思路是利用非连续吸收发射的高频特性和连续散射吸收散射的低频特性, 采用相应的信号带滤波方法, 得到介质本身全波段的光谱特性, 从而在目标辐射传输模型计算的基础上得到目标的真温温场。该领域的研究具有较大的挑战和难度。

参考文献:

[1] Wang Chao, Gou Xueke. A review of aero-engine turbine blade

- temperature measurement [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 38(4): 502-512. (in Chinese)
- [2] Sun Zhiqin. Technology and application of infrared thermal imaging temperature measurement in tubular furnace [J]. *Petrochemical Equipment Technology*, 2017, 38(5): 54-57. (in Chinese)
- [3] Zhang Lei, Chen Shaowu, Zhao Haichuan, et al. Multi-spectral temperature measuring system based on photoelectric detection [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 290-293.
- [4] Zhang Fucai, Sun Xiaogang, Xing Jian, et al. Research on reconstruction algorithm of two dimensional radiation temperature field using infrared multi-spectral line [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0704003. (in Chinese)
- [5] Huang Mengwei, Zhuo Feng, Zhan Lulu. The application of infrared camera in surface temperature measurement for aero engine's static component [J]. *Modern Information Technology*, 2019, 3(11): 32-36. (in Chinese)
- [6] Sutter G, Faure L, Molinari A, et al. An experimental technique for the measurement of temperature fields for the orthogonal cutting in high speed machining [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43(7): 277-297. (in Chinese)
- [7] Yuan Zhongqiang. Research on the key technologies of two-color infrared imaging system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)
- [8] Liu Yunqi. Space target dual-band IR imaging thermometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(7): 845-848. (in Chinese)
- [9] Bandara S, Gunapala S. Multiple waveband temperature sensor [C]/Directed Energy Test & Evaluation Conference, 2006, 37(7): 2128-2132.
- [10] Cheng Xiaofang. Principle of spectral color temperature measurement [J]. *Science in China*, 2004, 34(6): 639-647. (in Chinese)
- [11] Wang Ping, Yang Li. Three-band infrared thermal imaging temperature measurement method for sea surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 061205. (in Chinese)
- [12] Kaplinsky M B, Li J. Recent advances in the development of a multi-wavelength imaging pyrometer [J]. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 1997, 36: 3176.
- [13] Zhang Fucai, Sun Xiaogang. Research on reconstruction method of two-dimensional temperature field of CCD based on multi-spectral multi-point calibration [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(7): 2283-2287. (in Chinese)
- [14] Li Yao, Dai Changjian. Image spectrum technology to achieve accurate temperature measurement [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(1): 38-41. (in Chinese)
- [15] Yang Yifan. Spectral emissivity inversion based on emissivity slow variation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(3): 702-707. (in Chinese)
- [16] Gao Wenxing. Influence of water vapor medium on surface temperature measurement of continuous casting slab and research on temperature measurement method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008. (in Chinese)
- [17] Wang Zixuan, Wu Jan, Dai Changjian. The influence of environment and medium on temperature measurement results [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(7): 2128-2132. (in Chinese)
- [18] Price J C. Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 advanced very high resolution radiometer [J]. *J Geophys Res*, 2000, 89(D5): 7231-7237.
- [19] Tennyson J. Recommended isolated-line profile for representing high-resolution spectroscopic transitions (IUPAC Technical Report) [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2014, 86(12): 1931-1943.
- [20] Ngo N H, Lisak D, Tran H, et al. An isolated line-shape model to go beyond the Voigt profile in spectroscopic databases and radiative transfer codes [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 129: 89-100.
- [21] Kochanov R V, Gordona I E, Rothmana L S, et al. Infrared absorption cross-sections in HITRAN2016 and beyond: Expansion for climate, environment, and atmospheric applications [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 230: 172-221.
- [22] Modest M F. Radiative Heat Transfer [M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1993.
- [23] Zhen Chuguang, Liu Chaohui. Optical Properties and Radiative Heat Transfer of Diffuse Medium [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996. (in Chinese)
- [24] Tan Kai, Zhao Jingjun. Experimental study on influence of water spray on radiative temperature measurement of slab surface [J]. *Continuous Casting*, 2019, 44(1): 35-39. (in Chinese)
- [25] Liu Yongxiang, Zhang Jian, Du Yongcheng. Infrared imaging temperature measurement for a shielded surface by diffuse medium [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(9): 091201. (in Chinese)
- [26] Zhong Wangli, Wang Wei. Experimental analysis of infrared temperature measurement on flue gas covered surface [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(2): 219-223. (in Chinese)
- [27] Qi Hong. Theoretical and experimental study on the inverse

- radiation problem of disperse particles [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [28] Liu Yuying, Zhang Xinxin. Influence of participating media on the radiation thermometry for surface temperature measurement [J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2005, 14(4): 368. (in Chinese)
- [29] Liu Yuying, Zhang Xinxin. Investigation on the effects of water fog on infrared radiation pyrometer based on the radiation heat transfer theory [J]. *Infrared Technology*, 2008(10): 602-606. (in Chinese)
- [30] Ren Jianxin. Study of temperature measurement system for boiler superheater wall based on the inferred imaging technology [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [31] Hossain M M, Gang Lu, Duo Sun, et al. Three-dimensional reconstruction of flame temperature and emissivity distribution using optical tomographic and two-colour pyrometric techniques [J]. *Meas Sci Technol*, 2013, 24(7): 074010.
- [32] Hossain M M. Tomographic characterisation of burner flames through digital imaging and image processing [D]. Canterbury: University of Kent, 2014.
- [33] Price J C. Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 advanced very high resolution radiometer [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1984, 89(D5): 7231-7237.
- [34] Li Ruren, Ben Zhongqi, Li Pin, et al. Study on the method of coal fire monitoring based on Landsat-8 data [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(7): 1735-1740. (in Chinese)
- [35] Lin Guang, Feng Huajun, Xu Zhihai, et al. Recovering of images degraded by atmosphere [J]. *Optical Review*, 2017, 24(4): 471-482. (in Chinese)
- [36] He R, Wang Z, Fan Y, et al. Combined constraint for single image dehazing [J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(22): 1776-1778. (in Chinese)
- [37] He R J, Fan Y, Wang Z, et al. Atmospheric turbulence mitigation based on turbulence extraction [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2016: 1442-1446.
- [38] Li Haiwei, Zhang Hao, Chen Zhengchao, et al. MTF computing method of remote sensing image after removing the effects of atmospheric adjacency effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0328002. (in Chinese)
- [39] Barducci A, Pippi I. Analysis and rejection of systematic disturbances in hyperspectral remotely sensed images of the Earth [J]. *Appl Opt*, 2001, 40(9): 1464-1477.
- [40] Yuan Ye, Zhong Chongquan, Yu Songyu, et al. Method of temperature measurement using image color based on neural network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(5): 527-530. (in Chinese)
- [41] Wu P, Yin Z, Yang H, et al. Reconstructing geostationary satellite land surface temperature imagery based on a multiscale feature connected convolutional neural network [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): 300. (in Chinese)
- [42] Mao Kebiao, Yang Jun, Han Xiuzhen, et al. Surface temperature inversion algorithm based on deep dynamic learning neural network and radiative transfer model [J]. *China Agricultural Informatics*, 2018, 30(5): 51-61. (in Chinese)