

文章编号: 1672-8785(2015)07-0006-04

基于傅里叶变换红外光谱仪的光谱发射率估计

席剑辉 徐振方 傅 莉 王 琦

(沈阳航空航天大学自动化学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘 要: 基于傅里叶变换红外 (Fourier Transform Infrared, FTIR) 光谱仪等先进测试手段, 建立了一种估计目标光谱发射率的方法框架。首先, 通过双温度测量标定获得 FTIR 光谱仪关于波长的背景辐射亮度函数和响应度函数, 提高了测量的准确性; 其次, 基于大气窗口的辐射亮度数据进行高阶多项式拟合, 进一步抑制了杂散辐射的影响; 然后通过对大气吸收波长的辐射特性进行估计, 获得了所测波段的红外亮度曲线; 最后估计了目标的光谱发射率, 其相对误差均在 1% 以内。测试结果表明, 本文方法行之有效。

关键词: 光谱发射率; FTIR 光谱仪; 标定

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.07.002

Estimation of Spectral Emissivity Based on Fourier Transform Infrared Spectrometer

Xi Jian-hui, XU Zhen-fang, FU Li, WANG Qi

(School of Automation, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: A method framework for estimating the spectral emissivity of a target is established on the basis of a Fourier Transform Infrared (FTIR) spectrometer. First, a double-temperature calibration method is used to obtain the background radiance function and responsibility function of the FTIR spectrometer, so as to improve the measurement accuracy. Secondly, high order polynomial fitting is carried out on the basis of the radiance data of the atmospheric window, so as to further suppress the interference from stray radiation. Then, by estimating the radiation characteristics at atmospheric absorption wavelengths, the infrared radiance curves in the measured wavebands are obtained. Finally, the spectral emissivity of the target is estimated. The relative error is within 1%. The measurement results show that the proposed method is effective.

Key words: spectral emissivity; FTIR spectrometer; calibration

0 引言

物体发射率是指该物体在指定温度 T 下的

辐射量与同温度标准黑体的相应辐射量之间的比值, 是描述物体红外辐射特性的基本参数之一。根据波长范围的不同, 物体发射率可分为光

收稿日期: 2015-06-11

基金项目: 沈阳市科技创新团队项目 (src201204); 中航创新基金项目 (cxy2012SH); 辽宁省科学技术基金联合项目

作者简介: 席剑辉 (1975-), 女, 辽宁沈阳人, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为复杂系统模型辨识、故障检测与诊断、混沌信号分析等。E-mail: xihui_01@163.com

谱(或单色)发射率和全波发射率两种。其中, 光谱发射率能够更为具体地表征材料表面热辐射随波长变化的光谱特性, 它是红外侦察与隐身、红外制导、红外测温等应用的关键参数, 因此在航空航天、军事国防、遥测遥感和工农业生产中具有重要作用^[1-2]。

常用的发射率测量方法有量热法、反射率法、辐射能量法等^[3-4]。其中, 量热法只能测试全波发射率; 反射率法通过测量光谱反射率进而计算光谱发射率, 其对材料样品表面的制作要求较高; 能量比较法应用广泛, 但样品表面温度的准确测量是其中的关键因素。自 20 世纪 90 年代以来, FTIR 光谱仪得到了迅速发展^[5-6], 为利用宽波长范围内的物体辐射亮度信息估计光谱发射率提供了有利条件。本文建立一种快速估计目标光谱发射率的方法框架, 即通过高低温标定提高测量数据的准确性, 然后基于大气窗口光谱数据进行高阶拟合, 建立红外辐射亮度模型, 进而计算光谱发射率。

1 光谱发射率测量原理

FTIR 光谱辐射计的主要构件是迈克尔逊干涉仪。光源发出的光经迈克尔逊干涉仪调制后变成干涉光, 其照射样品后的各种频率的光信号经干涉作用被调制为干涉图函数, 然后由计算机进行傅里叶变换, 从而一次性地得到宽波长范围内的光谱信息。本文采用加拿大 ABB Bomen



图 1 FTIR 光谱仪

公司生产的 MR170 型光谱辐射计(见图 1), 其采用液氮制冷, 光谱范围为 $2.0 \sim 15.0 \mu\text{m}$, 光谱分辨率为 $1 \sim 32 \text{ cm}^{-1}$ 。

一般目标与朗伯体接近, 其光谱发射率 $\varepsilon(\lambda, T)$ 与方向无关:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{M_\lambda(T)}{M_{\lambda bb}(T)} = \frac{L_\lambda(T)}{L_{\lambda bb}(T)} \quad (1)$$

式中, λ 为波长; T 为目标温度; $M_\lambda(T)$ 和 $L_\lambda(T)$ 分别为目标在温度 T 下的光谱辐出度和光谱辐射亮度; $M_{\lambda bb}(T)$ 和 $L_{\lambda bb}(T)$ 分别为相同条件下标准黑体的光谱辐出度和光谱辐射亮度。标准黑体的辐射亮度 $L_{\lambda bb}(T)$ 可由普朗克公式得出:

$$L_{\lambda bb}(T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\pi (e^{c_2/(\lambda T)} - 1)} \quad (2)$$

式中, c_1 和 c_2 分别对应第一和第二辐射常数。

光谱仪测量的能量除了目标的自身辐射之外, 还会受到周围环境辐射和大气辐射的影响, 但由室温引起的非线性误差在 0.5% 以内^[7]。一般假设光谱辐射计对入射辐射能量呈线性响应, 其表达式为

$$L_{m\lambda} = R_\lambda \cdot [L_\lambda(T) + L_{0\lambda}] \quad (3)$$

式中, $L_{m\lambda}(T)$ 为光谱仪的测量输出值; R_λ 为光谱响应函数; $L_{0\lambda}$ 为环境背景的辐射亮度。

结合式 (1), 目标的红外光谱发射率为

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{L_{m\lambda}(T) - R_\lambda L_{0\lambda}}{R_\lambda L_{\lambda bb}(T)} \quad (4)$$

因此, 计算某温度 T 下的目标光谱发射率 $\varepsilon(\lambda, T)$, 需要通过标定光谱仪获得 R_λ 和 $L_{0\lambda}$, 并采用数据处理方法获得准确的 $L_{m\lambda}(T)$ 值。

2 光谱发射率估计

光谱仪标定是测量的第一步。黄烨等人^[8]研究了一种基于不同温度补偿的多点定标方法。王宗伟等人^[9]则提出了一种超高温 FTIR 光谱发射率测量与标定方法, 建立了包含辐射传交换、固体热传导、辐射测温在内的发射率标定模型。本文采用一种简单的双温标定法^[10], 并将其应用于光谱仪的光谱参数标定。

2.1 双温度测量标定

对标准黑体温度进行两次设置：一次比目标表面温度高，设为 T_1 ；另一次比目标表面温度低，设为 T_2 。经测量，有

$$L_{m\lambda}(T_1) = R_\lambda \cdot [L_{\lambda bb}(T_1) + L_{0\lambda}] \quad (5)$$

$$L_{m\lambda}(T_2) = R_\lambda \cdot [L_{\lambda bb}(T_2) + L_{0\lambda}] \quad (6)$$

由推导可得

$$R_\lambda = \frac{L_{m\lambda}(T_1) - L_{m\lambda}(T_2)}{L_{\lambda bb}(T_1) - L_{\lambda bb}(T_2)} \quad (7)$$

$$L_{0\lambda} = \frac{L_{\lambda bb}(T_1)L_{m\lambda}(T_2) - L_{\lambda bb}(T_2)L_{m\lambda}(T_1)}{L_{m\lambda}(T_1) - L_{m\lambda}(T_2)} \quad (8)$$

2.2 目标辐射亮度的递推最小二乘法建模及估计

假设在温度 T 下，光谱仪的测量亮度与波长的一般关系表达式为 n 次多项式：

$$L_{m\lambda}(T) = a_n(T)\lambda^n + \cdots + a_1(T)\lambda + a_0(T) \quad (9)$$

式中， $a_i(T)$ ($i = 1, \cdots, n$) 对应于辐射亮度波长多项式模型的各次参数。当温度一定时，可认为参数不变。令 $L_{\lambda_1}(T), \cdots, L_{\lambda_M}(T)$ 为大气窗口中 FTIR 辐射计的测量亮度曲线上的任意 M 个点， $\lambda_1, \cdots, \lambda_M$ 为对应的波长，将其代入式 (9) 可得：

$$\begin{bmatrix} L_{m\lambda_1}(T) \\ L_{m\lambda_2}(T) \\ \vdots \\ L_{m\lambda_M}(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1^n & \lambda_1^{n-1} & \cdots & 1 \\ \lambda_2^n & \lambda_2^{n-1} & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda_M^n & \lambda_M^{n-1} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_n(T) \\ a_{n-1}(T) \\ \vdots \\ a_0(T) \end{bmatrix} \quad (10)$$

对应的矩阵形式为

$$\vec{L}_{m\lambda}(T) = H \cdot \vec{a} \quad (11)$$

为提高参数估计精度，采用递推最小二乘法对式 (10) 进行辨识。设亮度参数向量 $\vec{a}$ 的第 k 次估计值为 $\hat{\vec{a}}_k$ ，再取第 $k+1$ 个点，波长为 λ_{k+1} ，对应的测量亮度为 $L_{m\lambda_{k+1}}(T)$ ，令

$$\vec{h}_{k+1} = [\lambda_{k+1}^n \quad \lambda_{k+1}^{n-1} \quad \cdots \quad 1]^T \quad (12)$$

式中， T 表示转置，则 $\vec{a}$ 的第 $k+1$ 步估计值为

$$\hat{\vec{a}}_{k+1} = \hat{\vec{a}}_k + K_{k+1} (L_{m\lambda_{k+1}}(T) - \vec{h}_{k+1}^T \cdot \hat{\vec{a}}_k) \quad (13)$$

$$K_{k+1} = P_k \vec{h}_{k+1} [I + \vec{h}_{k+1}^T P_k \vec{h}_{k+1}]^{-1} \quad (14)$$

$$P_{k+1} = [I - K_{k+1} \vec{h}_{k+1}^T] \cdot P_k \quad (15)$$

令 $k = 1, \cdots, M$ ，循环以上辨识过程，并计算估计误差评价函数：

$$E = \frac{1}{M} \left[(\vec{L}_{m\lambda}(T) - H \hat{\vec{a}}_M)^T (\vec{L}_{m\lambda}(T) - H \hat{\vec{a}}_M) \right] \quad (16)$$

当 E 足够小时，说明当前的估计参数有效；若 E 未达到预期，可令 $n = n+1$ ，重复以上步骤。将最终估计的参数 $\hat{\vec{a}}$ 代入式 (9)，可计算出对应波长的光谱仪所测量的辐射亮度。

2.3 目标光谱发射率估计

光谱发射率估计的基本步骤如下：

(1) 基于 FTIR 光谱仪，采用双温标定法对标准黑体进行测量，并通过式 (7) 和式 (8) 计算得到 R_λ 和 $L_{0\lambda}$ ；

(2) 在相同的测量条件下，利用 FTIR 光谱仪对目标进行测量，得到 $L_{m\lambda}(T)$ ；

(3) 基于递推最小二乘法建立亮度光谱模型，得到 $\vec{a}$ 的辨识值 $\hat{\vec{a}}$ ；

(4) 通过式 (8) 计算所测波段内的亮度值，并将其代入式 (4)，得到光谱发射率。

3 实例

为了验证所用 FTIR 光谱仪的性能以及本文方法的有效性，我们采用发射率为 0.97 的目标黑体作为试验样品。该试验在室内进行，室温为 293 K，空气的相对湿度为 60%。为了减小环境影响，将目标黑体与辐射计之间的距离定为 0.2 m，进行满视场测量。

3.1 423K 黑体测试实例

采用本文方法分别测量温度为 403 K 和 443 K 的参考黑体，并对其进行双温标定。然后测量 423 K 下目标黑体的亮度光谱曲线 (见图 2)。

可以看出，在 4.3 μm 和 5 ~ 7.8 μm 处，辐射光谱曲线出现了较多的吸收峰。4.19 ~ 4.45 μm 波段为二氧化碳的主要吸收区，其中在 4.3 μm 处吸收明显；在 5 ~ 7.8 μm 波段，水蒸汽吸收占主要作用，其中在 5.5 ~ 6.9 μm 范围内，水蒸汽的影响较为明显；8 ~ 14 μm 波段为“大气窗口”，大气影响最小。测量曲线符合红外传输特性，因此该曲线有效。

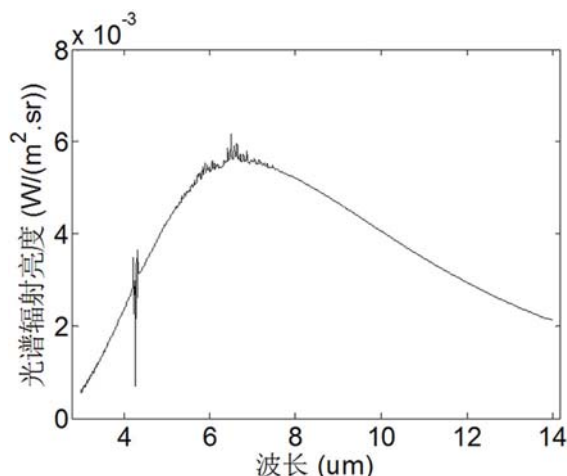


图 2 423 K 辐射亮度光谱测量曲线

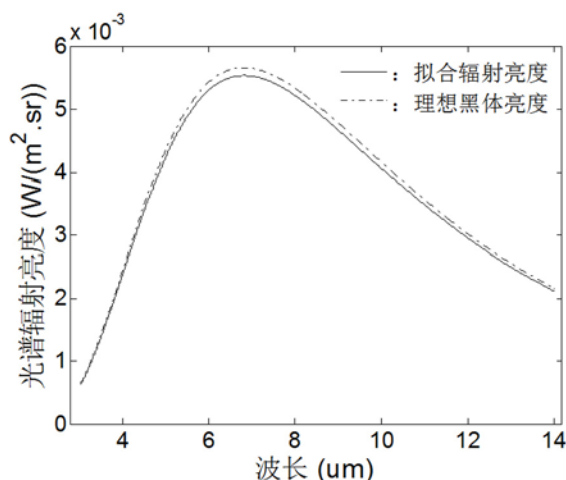


图 3 423 K 光谱辐射亮度估计

表 1 光谱发射率

波长 (μm)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
光谱发射率	0.9727	0.9740	0.9770	0.9783	0.9780	0.9769	0.9761	0.9772	0.9780	0.9767

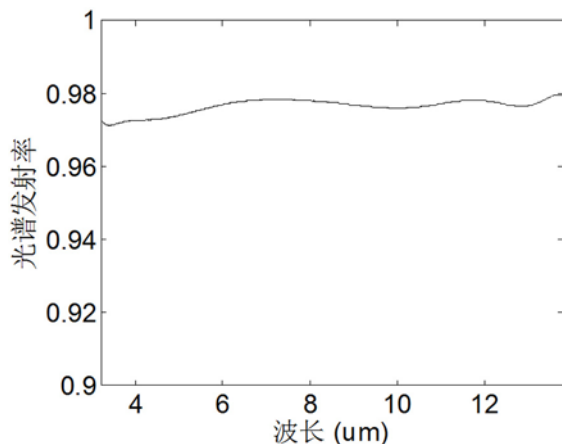


图 4 423 K 光谱发射率曲线

在图 3 中, 实线为目标黑体亮度光谱拟合曲线, 虚线为根据普朗克定律得到的理想黑体亮度光谱曲线。图 4 所示为经计算得到的 423 K 下目标黑体的光谱发射率。表 1 列出了部分光谱发射率的具体数值。

灰体的光谱发射率是个常数^[11]。本文测试所用目标黑体的发射率的出厂理论值已知为 0.97, 可将其视为灰体。由图 4 计算可知, 所测光谱发射率的最大误差为 $\lambda=7 \mu\text{m}$, 光谱发射率的估计值为 0.9783, 相对误差为 0.86%。可以看出, 该计算结果具有较高精度, 说明本文方法行之有效。

4 结束语

FTIR 光谱仪具有信噪比高、测量速度快、分辨率高以及使用方便等特点。对于高精度光谱测量, FTIR 光谱仪现已成为最佳之选。本文建立了一种测试与估计目标光谱发射率的方法框架。我们主要通过双温标定法、递推最小二乘法建模等步骤完成了亮度光谱曲线拟合以及光谱发射率估计。主要结论如下:

(1) 与理论发射率 0.97 相比, 基于建模测得的目标黑体的光谱发射率精度高, 误差小, 说明本文方法行之有效。

(2) 黑体光谱发射率的测量可以为黑体性能测试与评估等提供依据。与全发射率相比, 利用光谱发射率描述目标的红外辐射特性显得更为具体、有效。

参考文献

- [1] 吕建伟, 王强. 飞行器表面温度和发射率分布对红外辐射特征的影响 [J]. 光电工程, 2009, 36(2): 50-54.
- [2] 黄伟, 吉洪湖, 斯仁, 等. 降低表面温度和发射率抑制排气系统红外辐射的研究 [J]. 推进技术, 2011, 32(4): 550-556.
- [3] 戴景民, 宋扬, 王宗伟. 光谱发射率测量技术 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 710-715.

(下转第 15 页)