

文章编号: 1672-8785(2015)07-0010-06

高精度刃边法测量红外相机 MTF 的研究

胡 涛^{1,2} 张冬冬¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083 ;

2. 中国科学院大学, 北京, 100049)

摘 要: 在航空遥感图像复原过程中, 系统调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 测量是非常重要的一步。刀刃法因具有很多优点而成为测量 MTF 中较常见的方法。利用刀刃法测量红外相机 MTF 时, 边缘扩散函数 (Edge Spread Function, ESF) 的提取和拟合非常关键, 这直接决定了后续 MTF 计算效果的好坏。实验设计了一种新的提取边缘数据点的方法。该方法通过移动刃边来直接观察单个像元灰度值的变化, 比利用遥感图像获得 ESF 的传统方法要简单、直观。同时, 对比了线性拟合、高斯拟合与费米拟合三种 ESF 曲线拟合方法的效果。结果表明, 费米拟合很好地平滑了 ESF 两端的噪声, 效果最好。

关键词: 调制传递函数; 刀刃法; 边缘扩散函数曲线; 拟合

中图分类号: TN911.73 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.07.003

Measurement of MTF of Infrared Camera Using High-precision Edge Method

HU Tao^{1,2}, ZHANG Dong-dong¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In the process of aviation remote sensing image restoration, the measurement of Modulation Transfer Function (MTF) of a system is very important. Because of many advantages, a knife-edge method becomes a relatively common method for measuring MTF. When using the knife-edge method to measure MTF of an infrared camera, the extraction and fitting of Edge Spread Function (ESF) are critical, which directly determines the effectiveness of subsequent MTF calculation. A new method for extracting edge data points is designed in an experiment. Since the method directly observes the gray-scale variation of a single pixel by moving the knife-edge, it is simpler and more intuitive than the traditional method which obtains ESF from remote sensing images. At the same time, the effectiveness of three fitting methods including linear fitting, Guassian fitting and Fermi fitting is compared. The results show that the Fermi fitting smoothes the noise at each end of ESF nicely and obtains the best result.

Key words: modulation transfer function; knife-edge method; edge spread function ; fitting

收稿日期: 2015-06-16

作者简介: 胡涛(1989-), 男, 贵州松桃人, 硕士, 主要从事红外图像处理方面的研究工作。

E-mail: sitp6497@126.com

0 引言

在航空遥感图像复原过程中, 成像系统 MTF 的测量是非常重要的一步。MTF 是评价遥感光学系统成像性能的重要指标。目前, MTF 的测量方法主要有点光源法、脉冲法、刀刃法和条纹标靶检测法^[1-3]。刀刃法对光源和目标要求不高, 图像容易获取, 能得到全频段 MTF 曲线^[4]。该法由于具有这些优点被广泛采用。用刃边法测量 MTF 曲线的关键是要得到精确的 ESF 曲线。在实际应用中, 主要通过人工标靶或颜色反差较大的自然地理景物^[5](如河流与陆地边界)来获取具有刃边区域的图像和 ESF 曲线。

但是, 用刃边法测量 MTF 要经过很多程序和步骤, 先要找到刃边位置, 对其进行边缘提取、边缘配准, 然后通过数据拟合得到 ESF 曲线, 再对边缘扩散函数曲线微分得到线扩散函数 (Line Spread Function, LSF) 曲线, 最后对其进行离散傅里叶变换, 得到 MTF 曲线^[6]。因此, ESF 的测量精度对后续的 MTF 计算有很大的影响。如果 ESF 拟合效果不好或是不准确, 得出的 MTF 曲线就会有很大误差。现有的方法主要是从遥感图像中找到人工标靶倾斜刃边区域或图像灰度反差明显的自然景物边界来作为刃边图像, 然后把倾斜刃边附近灰度值沿着刃边方向进行投影, 从而拟合出 ESF 曲线。国际上有一个计算 MTF 的 ISO 12233 标准^[7], 该方法是利用刃边位置与图像扫描行间微小夹角存在的一个小的相移特性, 将每行边缘位置在同一个相移周期内沿着竖直方向进行投影, 把得到的数值进行叠加, 取其平均值, 然后拟合出 ESF 曲线。目前的方法都是直接从相机拍摄的遥感图像的截取刃边区域来计算 MTF 曲线, 这样做存在着一些问题, 比如图像边缘位置难以确定, 这会使沿刃边方向进行位置配准时出错^[8]; 像素点可能不够多, 从而导致插值后拟合造成误差^[9]; 刃边倾斜角大小的变动会造成计算结果不同等^[10]。针对可能出现的这些问题, 本文使用了一种获取系统 ESF 曲线的新型技术, 在实验室通过直接移动刀口位置来观察一个像素点的灰度

值变换情况, 从而得到刀口两边的灰度值点数据, 然后通过拟合这些数据得到 ESF 曲线。此方法省去了边缘探测和边缘配准等步骤, 可直接从实验中读出刀口两边的灰度值变换情况, 具有直观明了、操作简单等优点。

1 用刃边法测量系统 MTF 的原理

对于一个理想的刃边图像, 其二维刀口函数为 $f(x, y)$, 假设成像系统为线性移不变系统, 其系统响应函数为 $h(x, y)$, 刃边图像经过成像系统后会变得模糊, 则其输出函数 $g(x, y)$ 为 $f(x, y)$ 与 $h(x, y)$ 的卷积, 即

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y) \quad (1)$$

一般情况下, 成像系统二维响应函数满足可分离性, $h(x, y)$ 又表示为

$$h(x, y) = h(x)h(y) \quad (2)$$

$h(x)$ 为垂直于刃边方向的响应函数, $h(y)$ 为平行于刃边方向的响应函数, 由于是一维, 也叫做 LSF, 求得成像系统在这两个方向的一维响应函数后就可以得到二维响应函数。

在垂直于刃边方向上, 其输出为

$$g(x) = f(x) * h(x) \quad (3)$$

$g(x)$ 就是 ESF, 对上式两边求导, 有

$$\frac{d(g(x))}{dx} = \frac{d[f(x) * h(x)]}{dx} = \frac{df(x)}{dx} * h(x) \quad (4)$$

由于刃边位置两边的灰度值发生突变, 可看成是阶函数跃, 因此

$$\frac{d(g(x))}{dx} = \frac{df(x)}{dx} * h(x) = \delta(x) * h(x) = h(x) \quad (5)$$

LSF 的离散傅里叶变换取模值后再归一化即为此方向的 MTF:

$$MTF(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) \exp(-2\pi i f x) dx \quad (6)$$

同理, 对另一个垂直方向求取 MTF 后就能得到系统的二维 MTF 曲面。计算 MTF 曲线的过程如图 1 所示。

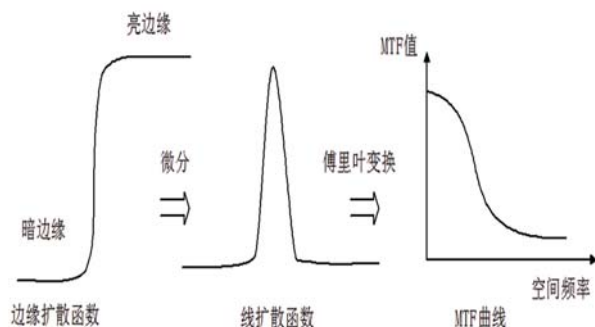


图1 MTF 计算过程

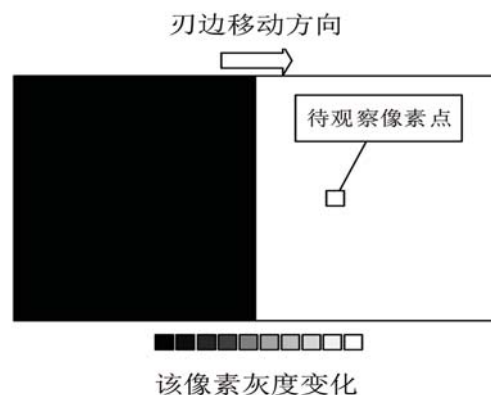


图2 实验过程示意图

2 实验室提取 ESF 测量数据

在实验中,把探测器像元固定在刃边位置附近,而刃边图像沿着一个方向按照相同的移动距离进行移动,每移动一次,就记录当前的图像数据。在设计时,定义刀口的移动距离为 x ,此时像面上刀口移动距离为 y ,它们的关系为

$$y = \frac{x \times 0.412}{4.996} \quad (7)$$

实际操作时,刀口从 5 mm 的位置移动到 7 mm 的位置,每次移动 0.02 mm,总共移动了 2 mm。根据上述公式可计算出,像面上刀口移动了约 165 μm ,而此实验中的每个像元大小为 28 μm ,因此,当刃边图像从一边完全移动到另一边时,大约移动了六个像元的距离,这保证了待观察像素点在刀口边缘两边亮暗区域经过足够的距离。只要找到图像中待观察像素点的位置,记录其灰度值及相应的移动位置,再把所有数值点在坐标系中表示出来(横坐标表示移动距离,纵坐标表示待观察像素点的灰度值),再用一定拟合方法进行拟合后,就能得到 ESF 曲线。其实验过程如图 2 所示。图 3 为拍摄的放大图像,选了同一区域五个不同的移动位置的放大图作为对比。

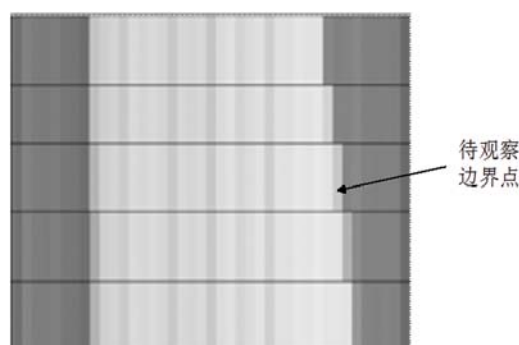


图3 同一区域放大图像

在图 3 中,从上到下分别是刀口在移动位置 5.0 mm、5.5 mm、6.0 mm、6.5 mm 和 7.0 mm 处的放大图像。从图中可以发现,图像右边黑白交界的位置在发生变化,因此,可以判定待观察像素点就在这个地方。找到待观察像素点后,在每个对应的移动位置读取其灰度值数据,并把它们的数值在坐标系中表示出来,如图 4 所示。从图中可以看出,这些灰度值数据基本反映了从暗区域到亮区域的变换情况,符合 ESF 曲线特征,而且数据点也较紧密,弥补了从遥感图像提取 ESF 时数据点较少、较稀疏的缺点。不过,在图形两端也就是暗区域和亮区域位置,数据点的毛刺较多,这是由探测器的噪声造成的。因此,在进行拟合时要注意噪声平滑问题,拟合效果的好坏会对后续的 MTF 曲线计算产生直接影响。

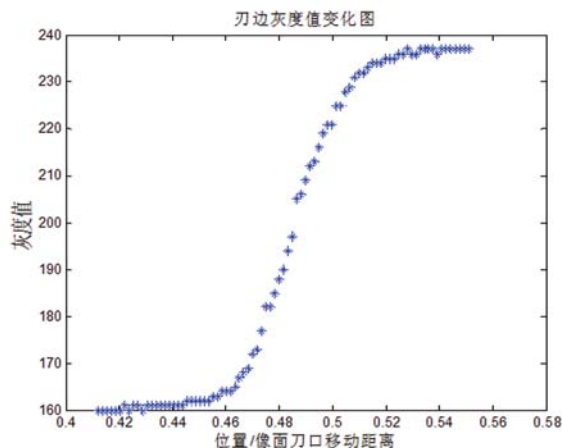


图 4 边缘数据点

3 ESF 拟合及 LSF 的计算

分别用线性函数拟合、高斯函数拟合与费米函数拟合三种方法进行 ESF 拟合。以下是三种拟合方法的计算。

3.1 线性函数拟合

经过反复尝试, 发现 8 次线性拟合效果较好, 拟合结果如图 5 所示。对拟合的曲线进行微分可以得到 LSF。为了减小噪声影响, 可对 LSF 进行归一化, 每个像元大小为 $28\text{ }\mu\text{m}$, 把 LSF 纵坐标最大值归一化为 1, 其对应的横坐标值设为零点, 横坐标换算为像素尺寸, 即把横坐标值除以 $28\text{ }\mu\text{m}$, 得到如图 6 所示的 LSF。可以发现, 两端有波动, 抖动很厉害, 误差非常大。

$$y = \sum_{i=0}^8 a_i x^i \quad (8)$$

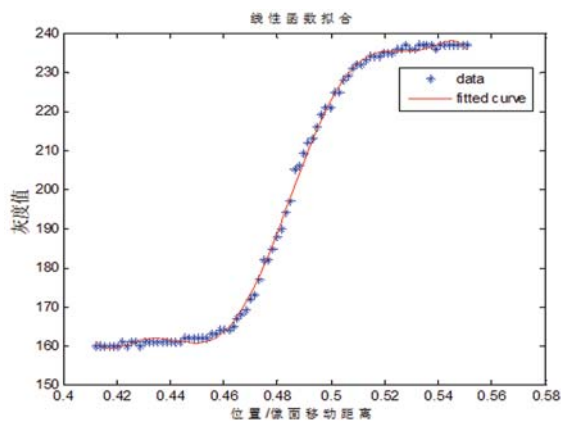


图 5 线性函数拟合 ESF

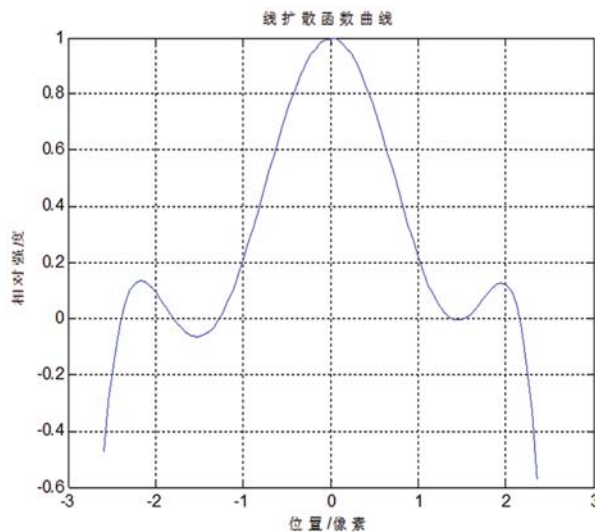


图 6 微分后对应的 LSF

3.2 高斯函数拟合

同样, 经过计算, 发现高斯三次拟合效果较好, 得到的 ESF 和 LSF 分别如图 7 和图 8 所示。不过, 微分后得到的 LSF 两端也有波动, 但波动没有线性拟合那么厉害, 比线性拟合结果要好些, 可以看出仍然有较大误差。

$$y = \sum_{i=1}^3 a_i \exp\left[-\left(\frac{x - b_i}{c_i}\right)^2\right] \quad (9)$$

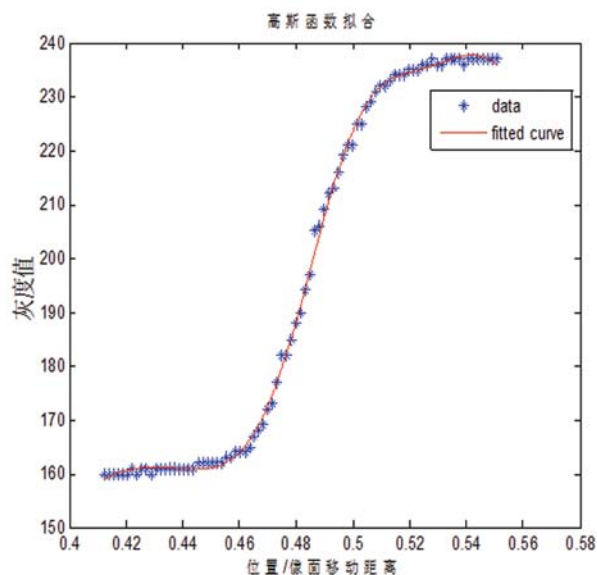


图 7 高斯函数拟合 ESF

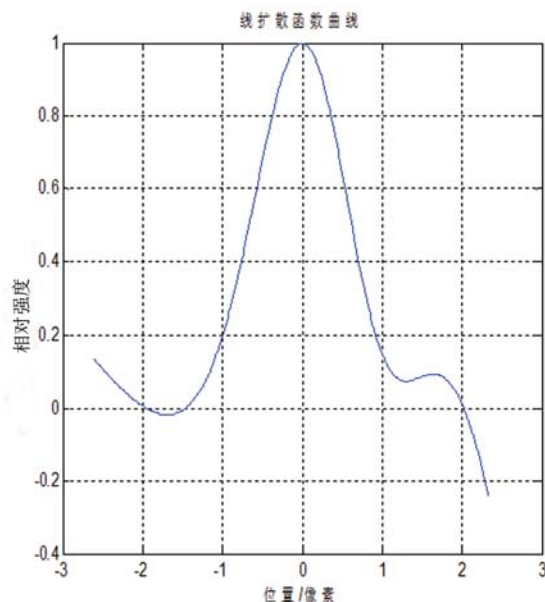


图 8 微分后对应的 LSF

3.3 费米函数拟合

相比于线性拟合与高斯拟合, 费米三次拟合的效果最好。其 ESF 和 LSF 的计算结果如图 9 和图 10 所示。可以发现, 费米拟合很好地解决了微分后 LSF 两端出现波动的情况。

$$y = D + \sum_{i=1}^3 \frac{a_i}{1 + \exp\left(\frac{x-b_i}{c_i}\right)} \quad (10)$$

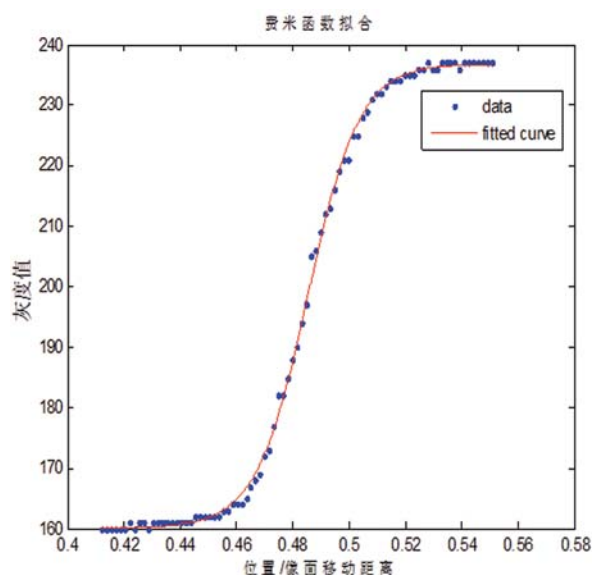


图 9 费米函数拟合 ESF

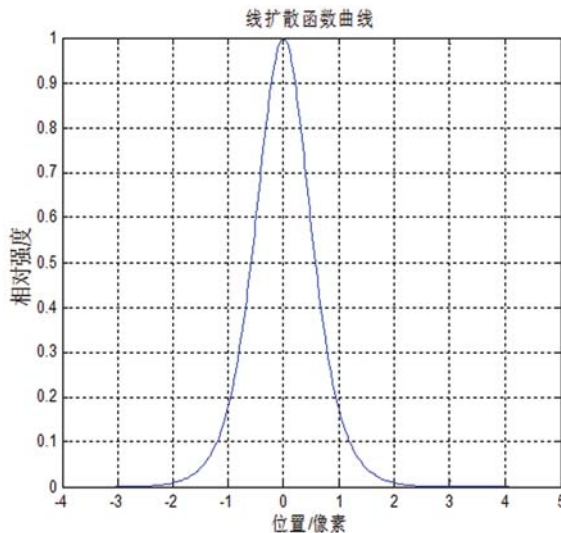


图 10 微分后对应的 LSF

4 MTF 曲线的计算

采用费米拟合的结果进行计算, 并对归一化后的 LSF(见图 10) 进行离散傅里叶变换。为了便于计算, 采用快速傅里叶变换方法。系统在进行图像采样时, 一幅完整图像的采样频率是 $1/a=36$ lp/mm(a 为像元大小), 所以, 采样频率 $f_s=36$ Hz, 奈奎斯特 (Nyquist) 频率为 18 Hz, 数据点数设为 100。对上述 LSF 进行离散傅里叶变换, 采样间隔为 $1/f_s$, 则对应在频域图上的周期为 f_s 。变换后, 取各分量的模, 并以 0 频率处的值作为基准进行归一化处理, 并对 MTF 进行三次样条插值, 以得到较为平滑的曲线。经过计算, 得到 $MTF_{Nyquist}=0.2545$, 如图 11 所示。

三种方法的拟合效果大体上都能满足需要, 其中, 线性拟合与高斯拟合会在曲线的两端会产生波动, 而这种波动经过微分以后就会被放大, 导致得到的 LSF 在两端出现很大误差。费米拟合的效果较好, 在两端也很好地平滑了噪声, 没有出现波动情况, 微分以后也能得到较理想的 LSF。因此, 最终 MTF 计算选择用费米拟合的结果。

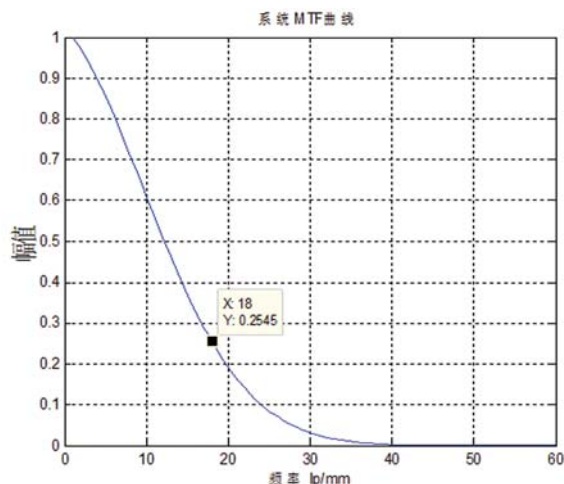


图 11 MTF 曲线

5 结论

ESF 曲线是计算 MTF 过程中非常关键的一步, 本文的创新点是设计了新的获取系统 ESF 曲线实验装置。该装置通过直接移动刃边图像来观察边缘位置两边的灰度值变换情况, 记录数据点进行拟合, 得到 ESF 曲线。同时, 在 ESF 曲线拟合时对比了线性函数拟合、高斯函数拟合以及费米函数拟合, 指出了用前两者拟合时出现的问题以及原因, 并表明费米函数拟合是较好的选择方案。最后, 利用费米函数拟合的 ESF 曲线进行计算, 得到了 MTF 曲线。

参考文献

- [1] 许妙忠, 丛铭, 付晓梅, 等. 国产卫星传感器在轨 MTF 检测方法的评价与研究 [J]. 测绘科学, 2014, 39(4): 8-12.
- [2] Dennis L, Helder, aeyoung Choi. IKONOS Satellite in Orbit Modulation Transfer Function(MTF) Measurement using Edge and Pulse Method[D]. Electrical Engineering Department, South Dakota State University, August, 2002.
- [3] 徐伟伟, 张黎明, 沈政国, 等. 高分辨光学卫星传感器在轨 MTF 检测 [J]. 大气与环境光学学报, 2014, 9(2): 97-111.
- [4] 徐航, 李传荣, 李晓辉, 等. 一种优化的刃边法 MTF 在轨评估算法 [J]. 遥感信息, 2012, 27(6): 10-16.
- [5] 戴奇燕, 夏德深. 刃边法在轨 MTF 测量性能分析 [J]. 航天返回与遥感, 2006, 27(3): 22-27.
- [6] 黄海乐, 朱雷鸣, 彭宇, 等. 刃边法检测空间相机 MTF 的方法研究 [J]. 光学与光电技术, 2013, 11(2): 71-73.
- [7] H Hwang, Y Choi, S Kwak, et al.. MTF Assessment of High Resolution Satellite Images Using ISO 12233 Slanted-edge Method[C]. SPIE, 2008, 7109: 710905.
- [8] 张冬英, 易维宁, 王先华, 等. 空基遥感图像的 MTF 试验研究 [J]. 安徽大学学报 (自然科学版), 2007, 31(6): 55-58.
- [9] 刘亮, 李显彬, 姜小光, 等. 刃边法的 MTF 评价精度分析 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2012, 29(6): 786-792.
- [10] 李进, 邢飞, 王梨. 空间 CCD 相机高精度在轨调制传递函数估算 [J]. 光学学报, 2015, 35(2): 142-151.

(上接第 9 页)

- [4] 吴燕燕, 罗铁苟, 黄杰, 等. 基于红外热像仪测温原理的物体表面发射率计算 [J]. 直升机技术, 2011, 15(4): 25-29.
- [5] 罗明东, 吉洪湖, 黄伟, 等. 用 FTIR 光谱仪测量排气系统中红外光谱辐射强度的方法 [J]. 航空动力学报, 2007, 22(9): 1423-1429.
- [6] 刘志明, 高闽光, 刘文清, 等. 傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 非线性多点定标方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(9): 2077-2080.
- [7] Ishii J, Ono A. Uncertainty Estimation for Emissivity Measurements near Room Temperature with a Fourier Transform Spectrometer [J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12: 2103-2112.

- [8] 黄烨, 方勇化, 荀毓龙, 等. 红外光谱多点定标方法及环境温度校正 [J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(2): 131-134.
- [9] 王宗伟, 戴景民, 何小瓦, 等. 超高温 FTIR 光谱发射率测量系统标定方法 [J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(5): 367-388.
- [10] Wang Xia, Gao Zhiyun, Zhang Jianyong, et al. Research on Calibration Method of Three Band Infrared Integrated Radiometer [C]. SPIE, 2002, 4927: 133-138.
- [11] 张建奇. 红外物理 (第二版) [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2013.