

文章编号: 1672-8785(2016)03-0036-05

基于辐射定标的某型红外光纤传像束 双波段透过率测定

张 帆 陈海燕 赵松庆 吴根水

(中国空空导弹研究院, 河南洛阳 471009)

摘 要: 由于目前国内尚没有针对红外光纤传像束的波段透过率测试的规范标准和设备。提出了一种考虑光纤孔径角和光纤芯径的热像仪定标方法和某型光纤传像束的双波段透过率测试方法。通过在冷屏两端分别设置直径为 8 mm 和 62 μm 的两个光阑孔, 确保定标条件和所测光纤的孔径角和光纤芯径相同; 再通过在光路中插入波段滤光片来选择需要定标的波段。建立了基于最小二乘的红外热像仪定标模型, 并采用该方法进行了定标实验。根据定标结果, 测量了某型光纤传像束的红外光纤在 2.0 μm ~2.6 μm 波段和 3.4 μm ~4.8 μm 波段的透过率, 其平均透过率大于 70%。

关键词: 热像仪定标; 光纤传像束; 透过率; 辐射测量

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.03.008

Dual-band Transmittance Measurement of a Certain Type Infrared Fiber Image Bundle Based on Radiation Calibration

ZHANG Fan, CHEN Hai-yang, ZHAO Song-qing, WU Gen-shui

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Since there are not test standards and equipment for the waveband transmittance of infrared fiber image bundle in China at present, both a thermal camera calibration method which takes fiber aperture angle and fiber diameter into account and a dual-band transmittance measurement method for a certain type fiber image bundle are proposed. To ensure the calibration condition and the aperture angle and diameter of optical fibers to be consistent, two apertures of 8 mm and 62 μm in diameter are set at both ends of a cold shield respectively. Then, the waveband to be calibrated is selected by inserting a band filter in the optical path. An infrared thermal camera calibration model based on least squares is established and is used in the calibration experiment. According to the calibration results, the transmittance values of a certain type optical fiber image bundle in the wavebands of 2.0-2.6 μm and 3.4-4.8 μm are measured. The average transmittance is greater than 70%.

Key words: calibration of infrared thermal camera; optical fiber image bundle; transmittance; radiation measurement

收稿日期: 2016-01-13

作者简介: 张帆(1990-), 男, 河南洛阳人, 硕士, 主要从事红外特性和半实物仿真技术研究。

E-mail: zfly1990@163.com

0 引言

红外光纤传像束是一种柔软性能好、可以精确地将红外图像从输入端传递到输出端的无源器件^[1]。该器件由一定数量的细小均匀的红外疏系光纤按照一定要求紧密排列。每一根光纤就是一个像元素,当像元素的数量足够多时,可以实现红外图像的传递。因此,红外光纤传像束在军事、工业探测和医疗等领域有重要应用^[2]。波段透过率是红外光纤传像束的重要参数,然而国内尚没有规范的测试标准和设备^[3]。

目标红外辐射特性的测量是目标识别和探测的基础技术。由于自然界中的物体、背景或常见目标的发射率都不为 1,它们都不是理想的黑体辐射源。热像仪探测器接受辐射所产生的响应并不能表示所测目标的真实辐射特性,所以需要通过辐射定标来确定热像仪探测器上每个探测单元的响应与其所接受的红外辐射量之间的关系^[4]。因此,在红外辐射特性测量中,辐射定标是一项必做的工作。

1 热像仪的辐射定标

1.1 辐射特性测量的数学模型

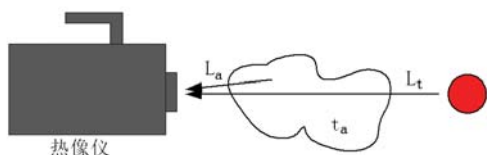


图 1 热像仪辐射测量示意图

热像仪辐射测量的原理如图 1 所示。远处目标发射的红外辐射经过大气的衰减,传输到热像仪光学系统的入瞳处,再经过光学系统,照射到焦平面探测器上。实验中热像仪所用的探测器为 InSb 红外探测器,它在 2.0 μm 到 5.7 μm 波段内的响应趋于线性^[4],其数学模型可表示为

$$DN = R(\tau_a L_t + L_a) + DN_0 = R\tau_a L_t + (RL_a + DN_0) \quad (1)$$

式中, DN 为热像仪的输出响应, R 为探测器的线性响应系数, τ_a 为大气的吸收系数, L_t 为测

量目标的辐射亮度, L_a 为目标到探测器之间的程辐射, $RL_a + DN_0$ 为背景辐射、探测器暗电流等造成的偏移量。 L_t 可由普朗克公式计算得到:

$$L_t = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\varepsilon}{\pi} c_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} \quad (2)$$

式中, ε 为黑体发射率, c_1 , c_2 分别为第一辐射常数和第二辐射常数, λ_1 和 λ_2 为黑体辐射的波段范围。

在确定的定标环境下,根据所测目标的温度范围,选择几个合适的温度点,采用最小二乘法进行曲线拟合^[5],得出辐射源实际辐射和热像仪响应之间的关系。在同样的测试条件下,热像仪测得的目标响应就可根据拟合的公式确定目标的辐射亮度。

1.2 热像仪镜头的定标

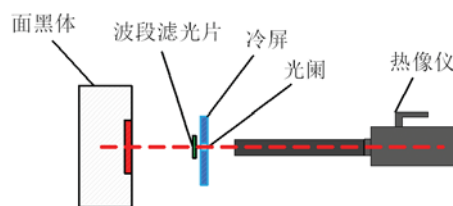


图 2 热像仪的标定光路

定标实验装置如图 2 所示。定标所用的面源黑体型号为 HGH ECN100, 温度范围为 50 $^{\circ}\text{C}$ 到 550 $^{\circ}\text{C}$, 尺寸为 150 mm $\times$ 169 mm, 发射率为 0.98。面源黑体的前面放置一个水冷的冷屏,以防止烤热光阑和减少背景辐射。冷屏本身带有直径为 20 mm 的固定光阑孔。热像仪定标的是焦距为 50 mm 的放大镜头,定标所用小孔光阑的直径与光纤芯径相同,为 62 μm ,将其放置在冷屏中心处。冷屏厚 15 mm,在冷屏前表面贴上直径为 8 mm 的光阑片。光阑片和直径为 62 μm 的小孔光阑所成的立体角等于光纤的孔径角。定标波段为 2.0 μm ~2.6 μm 和 3.4 μm ~4.8 μm 。这两个波段是飞机尾气流的重要辐射波段,在军事上有重要应用^[6]。在冷屏前面加上所标波段的滤光片。2.0 μm ~2.6 μm 波段滤光片的透过率为 0.745, 3.4 μm ~4.8 μm 波段滤光片的透过

率为 0.877。采用远距离小源法^[7]，面源黑体距离冷屏 200 mm，忽略面黑体和冷屏之间大气对黑体辐射的吸收。小孔光阑在热像仪镜头的视场中心，但并未充满视场，通过对焦使得小孔光阑成像变清楚，同时保证在焦平面所成像的大小大于 12 个探测器像元，则小孔光阑可认为是扩展源^[8]。在采集温度点的过程中，保证像都成在相同的几个像元上，以减少由不同像元素的非均匀性所导致的误差^[9]。由于光路中插入了

滤光片，热像仪冷窗发射的冷光线会被滤光片反射，照射到探测器上成像，在定标过程中保持冷反射成像的位置不变，减少定标误差^[10]。然后，根据普朗克公式计算出辐射亮度，再乘以波段滤光片的衰减，得出最后拟合使用的辐射亮度。采用最小二乘拟合，得到小孔光阑处辐射亮度与热像仪响应的数字值之间的曲线关系，如图 3 和图 4 所示。表 1 和表 2 列出了定标所用的数据。

表 1 2.0 μm ~2.6 μm 波段定标数据

黑体温度 ($^{\circ}\text{C}$)	黑体辐射亮度 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$)	滤光片损耗后的辐射亮度 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$)	数字值
360	0.00582	0.00434	18618.73
380	0.00783	0.00583	18630.95
420	0.0135	0.01	18670.35
440	0.0173	0.029	18705.85
450	0.0195	0.0145	18724.94

表 2 3.4 μm ~4.8 μm 波段定标数据

黑体温度 ($^{\circ}\text{C}$)	黑体辐射亮度 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$)	滤光片损耗后的辐射亮度 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$)	数字值
130	0.00213	0.00187	18632.25
170	0.00451	0.00395	18742.86
210	0.00845	0.00741	18905.67
250	0.0144	0.0126	19177.26
270	0.0183	0.016	19317.15
290	0.0228	0.02	19476.56
310	0.0281	0.0246	19686.2
330	0.0341	0.0299	19945.74

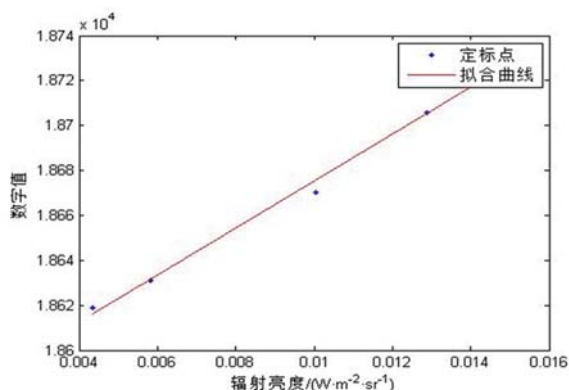


图 3 2.0 μm ~2.6 μm 波段滤光片损耗后的辐射亮度与数字值的拟合曲线

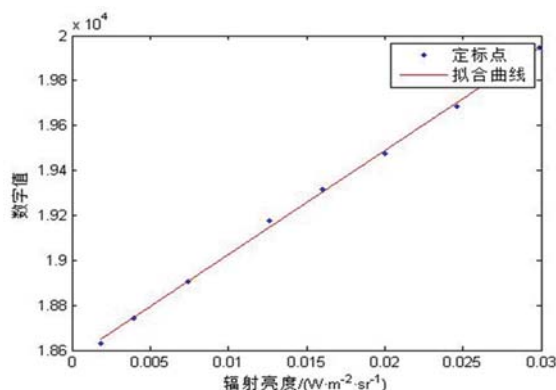


图 4 3.4 μm ~4.8 μm 波段滤光片损耗后的辐射亮度与数字值的拟合曲线

在 $2.0\ \mu\text{m}\sim 2.6\ \mu\text{m}$ 波段的拟合公式为

$$f(x) = 10460x + 18570$$

在 $3.4\ \mu\text{m}\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 波段的拟合公式为

$$f(x) = 46260x + 18560$$

2 单丝红外光纤透过率测试

试验所用的红外光纤传像束的基质材料为 As_2S_3 。该材料在 $2.0\ \mu\text{m}\sim 2.6\ \mu\text{m}$ 波段和 $3.4\ \mu\text{m}\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 波段都有较高的透过率。该异型传像束的输入端面 and 输出端面的光纤排布不同, 输出端面的光纤排布为 16×16 矩阵式排列, 孔径角为 30° , 光纤间距约为 $2000\ \mu\text{m}$, 输入端面紧密

排布成 64×4 矩阵式, 光纤间距约为 $73\ \mu\text{m}$, 光纤芯径约为 $62\ \mu\text{m}$, 光纤束长度约为 $150\ \text{mm}$ 。

任选几根单丝光纤进行测试。单丝红外光纤出射亮度的测试装置如图 5 所示, 所用的面源黑体型号为 HGH ECN100, 黑体温度为 $450\ ^\circ\text{C}$ 。热像仪安装的镜头为之前定标过的放大镜头, 根据测试波段选择相应的波段滤光片, 并且保证滤光片产生的冷反射与标定时的情况一样。调整光纤传像束的位置, 使所测的单丝光纤的输出端成像清晰且位于热像仪视场中心。测得热像仪响应的数字值 $DN_{\Delta\lambda}$, 代入定标所得的拟合公式, 得到经滤光片衰减后的辐射亮度 $L'_{\Delta\lambda}$, 将该值除以滤光片的透过率 τ , 得到未经滤光片损耗的辐射亮度 $L''_{\Delta\lambda}$ 。

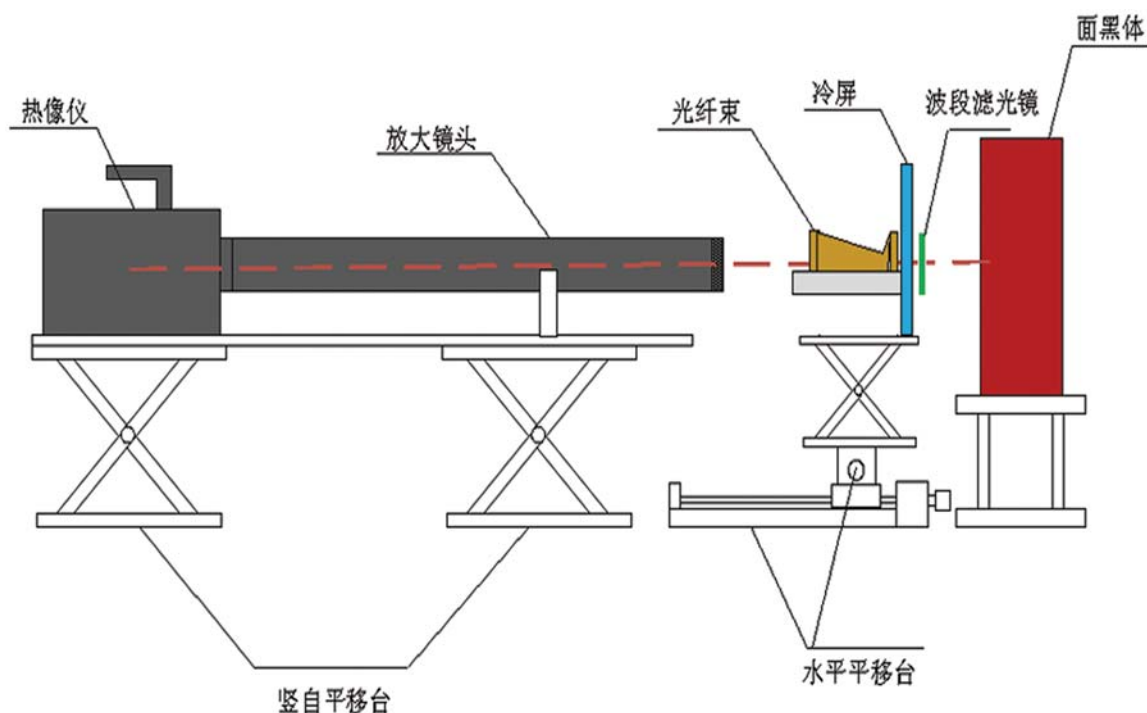


图 5 单丝红外光纤出射亮度测试示意图

取下光纤传像束和波段滤光片, 换上热像仪出厂原配的标准镜头。该镜头经生产厂家的校正, 测的温度值是准确的。调整镜头的焦距, 使光纤束入射端面所在位置的物面在热像仪上清晰成像, 记录热像仪显示的温度 T , 根据普朗

克公式算出在该波段范围内的辐射亮度 $L_{\Delta\lambda}$, 则 $L_{\Delta\lambda}$ 为光纤束入射端面的辐射亮度。根据公式 $\tau_{\Delta\lambda} = \frac{L'_{\Delta\lambda}}{L_{\Delta\lambda}}$ 计算出单丝红外光纤在响应波段内的透过率。数据见表 3。

表 3 光纤入射端面辐射测量数据

设定黑体温度 (℃)	入射端面测量温度 (℃)	入射端面辐射亮度 ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)	
		2.0 μm ~2.6 μm	3.4 μm ~4.8 μm
450	422.51	1.39×10^{-2}	7.23×10^{-2}

单丝红外光纤出射亮度数据见表 4。

表 4 黑体温度 450 ℃ 时实验测量的计算数据

波段 (μm)	单丝光纤编号	入射端面辐射亮度 ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)	传像束出射端面数字值	传像束出射端面亮度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$)	单丝透过率 (%)
2.0~2.6	1#	1.39×10^{-2}	18673	9.88×10^{-3}	71
	2#		18677	1.02×10^{-2}	74
	3#		18671	9.69×10^{-3}	70
3.4~4.8	1#	7.23×10^{-2}	20979	5.23×10^{-2}	72
	2#		21104	5.50×10^{-2}	76
	3#		21081	5.45×10^{-2}	75

3 结论

在国内首先提出了一种异型红外光纤传像束波段透过率的测试方法。首先根据光纤孔径角和光纤芯径设置相应的光阑,再使用波段滤光片选择测试波段,进行了热像仪定标,得出了辐射亮度和热像仪响应之间的关系曲线。根据定标结果测量了某型光纤传像束的红外光纤在 2.0 μm ~2.6 μm 波段和 3.4 μm ~4.8 μm 波段的透过率。在黑体温度为 450 ℃ 时,测试了任意选取的 3 根单丝光纤的双波段透过率,双波段的平均透过率大于 70%。

参考文献

- [1] 李桂菊,王延杰. 光学系统中的光纤传像束 [J]. 光机电信息, 2010, 27(12): 28-32.
- [2] 祝清德,王训四,聂秋华,等. 红外疏系光纤传像束研发进展 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(11): 2873-2880.
- [3] 徐明泉,张振远. 光纤束透过率的测试研究 [J]. 玻璃纤维, 2007: 10-14.
- [4] 宋晓梅,周康康. 基于加权最小二乘的红外热像仪的标定 [J]. 红外, 2015, 36(5): 25-29.
- [5] 樊宏杰,刘艳芳. 目标红外辐射特性测量定标方法研究 [J]. 激光与红外, 2014, 44(5): 516-521.
- [6] 卢建,辛玉林,陈曾平. 飞机目标红外成像建模与仿真 [J]. 电子测量技术, 2010, 33(7): 65-86.
- [7] 王明波,刘颖. 复杂环境下的红外目标特性测量方法研究 [J]. 红外, 2013, 34(6): 29-33.
- [8] 常松涛,张尧禹,孙志远,等. 红外小目标辐射测量方法 [J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0504001-1-0504001-6.
- [9] 王建军,黄晨,高昕,等. 红外辐射测量系统内外标定 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1767-1771.
- [10] 张鹏,罗长江,熊钟秀,等. 制冷型红外光学系统冷反射的逆光路分析 [J]. 电光与控制, 2013, 20(6): 66-69.