

文章编号 1004-924X(2012)09-2014-07

大型空间反射镜发射率测量及误差分析

孔 林^{1,2*}, 王 栋¹, 金 光¹, 李宗轩^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了准确测定空间相机主镜毛坯件的表面发射率以便定量分析相机热控效果, 本文在分析热像仪测温原理的基础上, 利用现有测量条件, 提出一种利用两种已知发射率材料作为参考的发射率测量方法。根据测量试验, 得到主镜表面发射率为 0.565。为定量反映各因素对测量精度的影响, 对测量公式进行了误差分析。分析结果表明, 与被测件表面发射率接近的材料的热像仪测温误差及发射率标称误差对测量精度有较大影响, 同时得到本次试验因热像仪测温误差及参考材料发射率标称误差带来的测量误差为 ± 0.028 。最后, 结合相机热平衡试验的数据对测量结果进行了验证, 结果表明测量得到的主反射镜的发射率基本反映了热平衡试验的主镜表面状态, 证明本文的方法对主反射镜发射率的测量是适用有效的。

关键词: 空间相机; 反射镜; 热像仪; 双参考体; 发射率; 误差分析; 敏感度分析

中图分类号: V447; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122009.2014

Emissivity measurement and error analysis of large space reflector

Kong Lin^{1,2*}, Wang Dong¹, Jin Guang¹, Li Zong-xuan^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: konglin@mail.ustc.edu.cn

Abstract: To determine the emissivity of the primary mirror in a space camera and to analyze the thermal control effort for a subsystem, a method for measuring emissivity by using two kinds of materials with known emissivity as references was proposed based on the analysis of temperature measurement principle of a thermal imager. According to the emissivity measurement experiment, the primary mirror emissivity was calculated to be 0.565. To determine the influence of different measuring factors on the measurement accuracy, an error analysis was carried out. Analysis results prove that when the materials to be measured have almost the same emissivity with the objects, the temperature measurement errors of the thermal imager and emissivity standard error of the material will have greater impacts on the measurement accuracy. The measurement error caused by temperature measurement error and emissivity error is ± 0.028 in the proposed experiment. Finally, the thermal model of the camera

收稿日期: 2012-04-05; 修订日期: 2012-06-24.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2010AA702103)

was modified by using a thermal equilibrium test, the results demonstrate that the emissivity measured by proposed method reflects the actual state of the primary mirror, and the method is useful and feasibility for measuring the emissivity of primary mirrors.

Key words: space camera; reflector; thermal imager; double reference objects; emissivity; error analysis; sensitivity analysis

1 引言

某空间相机主反射镜为碳化硅材料,在相机初次热平衡实验中,采用相同材料的毛坯件代替真实主镜进行热试验。该毛坯件表面状态为精抛表面,未镀反射膜,与真实主镜表面状态存在较大差异。由于毛坯件的表面发射率未知,为定量分析相机热控效果,需要对试验毛坯反射镜(下文简称主反射镜或主镜)表面发射率进行准确测定。

物质表面的发射率是表征物质表面辐射本领的物理量,是一项重要的热物性参数。自上世纪30年代以来,随着热辐射理论和黑体空腔理论研究的进展,对于材料发射率测量提出了各种各样的方法。本文需要测量的主反射镜,由于尺寸较大且无法获得与被测件表面状态相同的测试样本,所以必须采用一种非接触、快速、安全的测试方法来获得其表面发射率。目前,对于满足灰体特性的非金属材料,基于热像仪的物体表面发射率的测量方法和误差分析已经有多篇文献。如Okamoto等在1993年就对热像仪的基本工作原理进行了理论描述^[1];杨立等结合国外文献介绍了热像仪的原理推演过程,并探讨了表面发射率测量及误差分析等基本问题^[2-4];曹义等利用恒温水浴槽对试件进行加热,同时用热像仪测量试件表面的辐射温度,计算出试件表面发射率^[5];徐军等将热像仪和热板仪结合,通过建立传热方程,计算得到试件表面真实温度,进而求得试件表面发射率^[6];黄龙祥等利用黑体作为已知发射率的参考物体,使用热像仪测量物体的表面发射率^[7];吴国忠等试验了在被测件表面贴上已知发射率的薄膜来提高测温精度的方法^[8]。

本文在对热像仪测温原理进行分析后,结合相机热控系统的硬件条件,提出了一种利用两种已知发射率的材料作为参考的发射率测量方法,并对影响该测量方法精度的各因素进行了敏感度

分析,指出了影响测量精度的主要因素。最后,结合相机热平衡试验的数据,对测量结果进行了验证。

2 主镜表面发射率测量原理

2.1 辐射亮度

辐射源在某一方向上的辐射亮度是指在该方向上的单位投影面积向单位立体角中发射的辐射通量,用 $L(T)$ 表示^[9]。对表面温度为 T 的理想黑体,根据普朗克黑体辐射公式,垂直于黑体表面的辐射亮度为:

$$L(T) = \int_{\Delta\lambda} \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \left[\exp\left\{\frac{C_2}{\lambda T}\right\} - 1 \right]^{-1} d\lambda, \quad (1)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为光谱范围, λ 为波长, C_1 、 C_2 为辐射常数。

2.2 热像仪测温原理

红外热像仪是靠接收被测表面的辐射来确定其温度的。对于非透明物体,被测表面的辐射亮度为:

$$L_\lambda = \epsilon L(T_o) + \rho L(T_u) = \epsilon L(T_o) + (1 - \alpha) L(T_u), \quad (2)$$

式中: T_o 为被测物体表面温度, T_u 为环境温度, ϵ 为被测物体表面发射率, α 为被测物体表面吸收率, ρ 为被测物体表面反射率。式中第一项表示被测物体表面发射的光谱辐射亮度,第二项表示被测物体表面反射的环境光谱辐射亮度。

实际测量中,热像仪接收的辐射主要包括被测物体自身辐射、反射环境辐射和大气辐射等三部分^[2]。对于满足灰体特性的一些非金属材料,热像仪的测温公式可近似为^[3]:

$$f(T_r) = \tau_a [\epsilon f(T_o) + (1 - \epsilon) f(T_u)] + (1 - \tau_a) f(T_a), \quad (3)$$

式中: T_r 为热像仪接收的辐射温度, τ_a 为大气透

射率。

由式(3)可知,热像仪接收的辐射温度与大气透射率、被测物体表面发射率、环境温度等多个因素有关。在实验室近距离测试环境中,大气透射率可近似为 1^[2],从而式(3)可以简化为:

$$f(T_r) = \epsilon f(T_o) + (1 - \epsilon) f(T_u), \quad (4)$$

热像仪接收辐射能量,转化成电信号,电信号转换成指示的辐射温度,其映射关系如下:

$$f(T) = \int_{\Delta\lambda} R_\lambda \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda, \quad (5)$$

式中: R_λ 为热像仪光谱响应度。

热像仪的光谱响应度 R_λ 是波长为 λ 的函数,表示热像仪探测器将辐射能量转化成电信号的能力,其映射关系因热像仪探测器的不同而各异。本试验中使用的 FLIR SC3000 红外热像仪,其探测器光谱响应度 R_λ 随波长 λ 的变化曲线如图 1 所示。

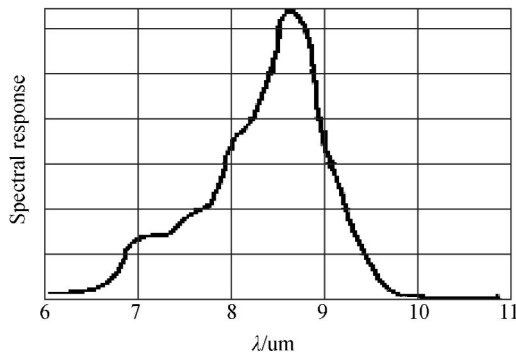


图 1 SC3000 探测器光谱响应度曲线

Fig. 1 Curve of SC3000 spectral response

根据 FLIR SC3000 探测器的光谱响应度对式(5)进行积分,可得^[2]:

$$f(T) \approx CT^n, \quad (6)$$

式中: $n=4$, $C=1.9675 \times 10^{-8}$ 。

联立式(4)、(6),可得:

$$T_r^n = \epsilon T_o^n + (1 - \epsilon) T_u^n. \quad (7)$$

对于实验室近距离测量,需要设定热像仪相关参数,热像仪会根据设定的参数,经过换算,显示被测表面的辐射温度,其原理如下式:

$$T_r^n = \epsilon_d T_d^n + (1 - \epsilon_d) T_{ud}^n, \quad (8)$$

式中: T_d 为热像仪显示的辐射温度, ϵ_d 为热像仪设定的发射率, T_{ud} 为热像仪设定的环境温度。

由式(8)可知,若将热像仪的发射率 ϵ_d 设定为 1,则:

$$T_r^n = T_d^n, \quad (9)$$

说明热像仪接收的辐射温度即是热像仪显示的辐射温度。

2.3 主镜表面发射率测量原理

根据式(7)可得:

$$\epsilon = \frac{T_r^n - T_u^n}{T_o^n - T_u^n}. \quad (10)$$

在利用热像仪对未知物体表面发射率进行测量时,为简化计算,可将热像仪中其发射率参数设置为 1,由式(9)知, T_r 即为此时被测件表面指示的辐射温度。

由式(10)可知,对于未知发射率的可测物体,为测定发射率,还需要测量被测物体表面真实温度 T_o 和环境温度 T_u 。

当采用直接方法进行测量时,测量精度会受到测温传感器标定误差、测温误差及背景干扰等多种因素影响。为了提高测量精度以及简化测量步骤,本文提出一种利用两种已知发射率的材料作为参考的间接测量方法,主要原理如下。

假设两种材料的发射率分别为 ϵ_1 、 ϵ_2 ,两种材料和被测件表面温度 T_o 相同,同时测试环境温度 T_u 也相同。利用热像仪分别测定两种材料、被测件表面指示的辐射温度 T_{r1} 、 T_{r2} 和 T_r ,将 T_{r1} 、 T_{r2} 、 ϵ_1 、 ϵ_2 分别带入式(10),联立方程解得:

$$T_u^n = \frac{\epsilon_1 T_{r2}^n - \epsilon_2 T_{r1}^n}{\epsilon_1 - \epsilon_2}, \quad (11)$$

$$T_o^n = \frac{(1 - \epsilon_1) T_{r2}^n - (1 - \epsilon_2) T_{r1}^n}{\epsilon_2 - \epsilon_1}, \quad (12)$$

再将 T_u^n 、 T_o^n 、 T_r 带入式(10),可得:

$$\epsilon = \frac{T_r^n - T_u^n}{T_o^n - T_u^n} = \frac{\epsilon_2 (T_r^n - T_{r1}^n) - \epsilon_1 (T_r^n - T_{r2}^n)}{T_{r2}^n - T_{r1}^n}. \quad (13)$$

式(13)即为本次主反射镜表面发射率测量试验的原理公式。

3 主反射镜表面发射率测量试验

主反射镜发射率测量试验在恒温实验室中进行。在主反射镜表面,分别粘贴 0.25 μm 厚单面聚酰亚胺薄膜单面压敏胶带 S_1 和 0.25 μm 厚单面镀铝单面压敏胶带 S_2 ,其表面发射率参数如表 1 所示,整个测量系统如图 2 所示。

表 1 两种材料的发射率参数
Tab.1 Emissivities of two materials

材料代号	发射率	发射率误差
S ₁	0.62	±0.02
S ₂	0.04	+0.02 -0.01

根据前文推导的测量原理,试验过程如下:

(1)按照图 2 所示,在被测物体表面分别粘贴材料 S₁、S₂。将热像仪置于距离被测表面 1 m 左右的位置,同时调整热像仪使其对焦于被测表面。

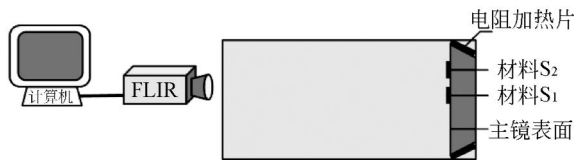


图 2 主反射镜发射率测量系统

Fig. 2 Emissivity measurement system of primary mirror

(2)设置热像仪参数。将发射率设置为 1,大气透射率设置为 1。

(3)设定电阻加热片加热功率,对主反射镜加热。

(4)观察热像仪输出图像,记录稳态热像仪指示的辐射温度。

(5)调整加热功率,重复步骤(3)、(4),记录多组试验数据,如表 2 所示。

在某加热功率稳态时,热像仪输出如图 3 所示。

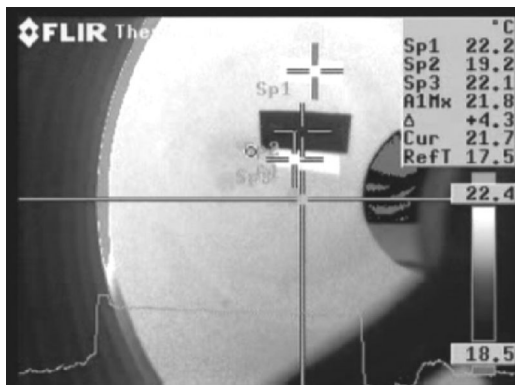


图 3 某时刻热像仪读数

Fig. 3 Reading of thermal imager in moment

将表 1、2 的数据带入公式(13),得到不同加热功率下主反射镜的表面发射率如表 3 所示。

根据表 3 计算出主反射镜表面发射率 ϵ 的均值 $\epsilon_0 = \frac{1}{n} \sum \epsilon = 0.565$ 。

表 2 不同功率下热像仪读数

Tab.2 Readings of thermal imager with different powers

序号	T _{r1}	T _{r2}	T _{r3}
1	294.85	292.25	294.55
2	294.95	292.25	294.65
3	295.05	292.25	294.75
4	295.15	292.35	294.85
5	295.25	292.35	294.95
6	295.35	292.45	295.05
7	296.75	293.65	296.55
8	296.85	293.65	296.65
9	296.95	293.65	296.75

表 3 不同加热功率下主反射镜的表面发射率

Tab.3 Emissivities of primary mirror with different powers

序号	发射率
1	0.552
2	0.555
3	0.557
4	0.557
5	0.559
6	0.559
7	0.582
8	0.583
9	0.584

4 主镜发射率测量误差分析

为定量反映各因素对测量精度的影响,为以后相关试验的开展提供选材依据,需要对本次测量方法进行误差分析。根据主反射镜表面发射率的测量公式可知,主反射镜表面发射率的测量精

度受热像仪测温精度、参考材料的发射率标称精度影响,对式(13)求导可得:

$$d\epsilon = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{T_{r2}^n - T_{r1}^n} nT_r^{n-1} dT_r + \frac{T_r^n - T_{r1}^n}{T_{r2}^n - T_{r1}^n} d\epsilon_2 + \frac{T_{r2}^n - T_r^n}{T_{r2}^n - T_{r1}^n} d\epsilon_1 + \frac{(T_r^n - T_{r1}^n)(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{(T_{r2}^n - T_{r1}^n)^2} nT_{r2}^{n-1} dT_{r2} + \frac{(T_r^n - T_{r2}^n)(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{(T_{r2}^n - T_{r1}^n)^2} nT_{r1}^{n-1} dT_{r1} \quad (14)$$

从式(14)可以看出: $d\epsilon$ 与 T_r 、 T_{r1} 、 T_{r2} 、 ϵ_1 、 ϵ_2 有关,对式(14)进行归一化可得:

$$\frac{d\epsilon}{\epsilon} = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{T_{r2}^n - T_{r1}^n} nT_r^{n-1} \frac{dT_r}{T_r} + \frac{T_r^n - T_{r1}^n}{T_{r2}^n - T_{r1}^n} \frac{d\epsilon_2}{\epsilon_2} + \frac{T_{r2}^n - T_r^n}{T_{r2}^n - T_{r1}^n} \frac{d\epsilon_1}{\epsilon_1} + \frac{(T_r^n - T_{r1}^n)(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{(T_{r2}^n - T_{r1}^n)^2} nT_{r2}^{n-1} \frac{dT_{r2}}{T_{r2}} + \frac{(T_r^n - T_{r2}^n)(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{(T_{r2}^n - T_{r1}^n)^2} nT_{r1}^{n-1} \frac{dT_{r1}}{T_{r1}} \quad (15)$$

对于特定的测量环境,可以计算出各变量对 $d\epsilon$ 影响系数的大小,从而对于估计测量误差及提高测量精度有重要意义。根据式(14),得到主反射镜发射率测量误差随各因素变化曲线如图4~6所示。

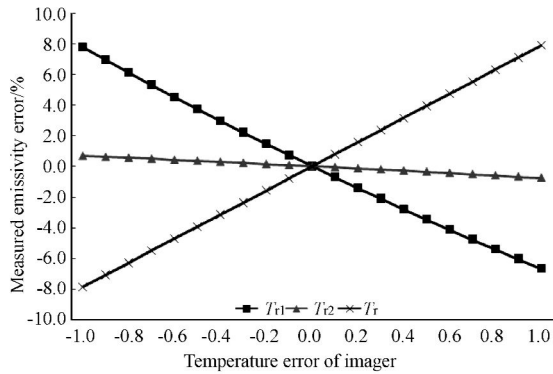


图4 发射率误差随测温误差变化曲线

Fig. 4 Emissivity error vs temperature measurement error

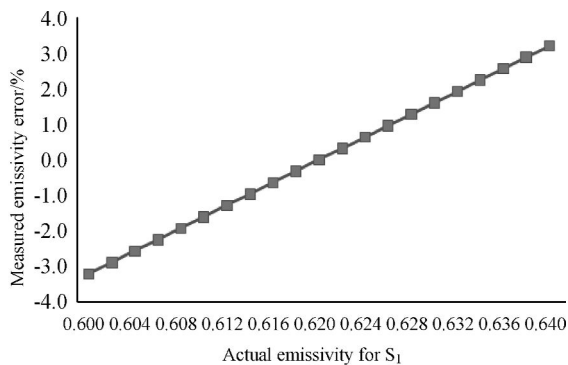


图5 发射率误差随 S_1 发射率实际值变化曲线

Fig. 5 Emissivity error vs emissivity of S_1

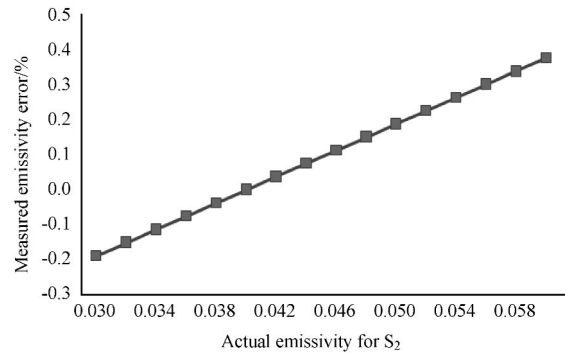


图6 发射率误差随 S_2 发射率实际值变化曲线

Fig. 6 Emissivity error vs emissivity of S_2

根据图4~图6,发射率测量误差对温度 T_{r1} 的误差最敏感,其次是 T_r 的误差,对 T_{r2} 敏感度最小,发射率测量误差对材料 S_1 的发射率标称误差的敏感度远大于对材料 S_2 发射率的标称误差的敏感度,即与被测表面发射率相近材料的热像仪测温误差以及发射率标称误差对测量有较大影响,而与被测表面发射率相差较大的材料的热像仪测温误差及发射率标称误差对测量的影响较小。

给定红外热像仪测温误差为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,带入式(14),得到因温度测量误差带来的主镜发射率的测量误差 $\Delta_1 = \pm 0.021$ 。给定 S_1 、 S_2 的发射率误差分别如表1所示,带来的主镜发射率的测量误差为 $\Delta_2 = \pm 0.018$,所以总的发射率测量误差为 $\Delta = \pm \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2} = \pm 0.028$ 。

5 主镜发射率测量结果的试验验证

为验证主反射镜发射率测量结果的正确性,需要对测量结果进行校核。本文利用相机热模型仿真和热平衡试验结果对测量结果进行校核。假设不考虑热模型误差,如果主反射镜表面发射率测量结果正确,热模型仿真结果应与热平衡试验结果一致。在相机热平衡试验中,主反射镜温度变化曲线如图7所示。由图可知,主反射镜稳态温度为 11.7°C 。

在相机热模型中,设定主镜发射率参数为 $\epsilon = 0.565$,热分析软件 Thermal Desktop 仿真得到主反射镜稳态温度云图如图8所示。

由图8可知,主反射镜表面发射率 $\epsilon = 0.565$

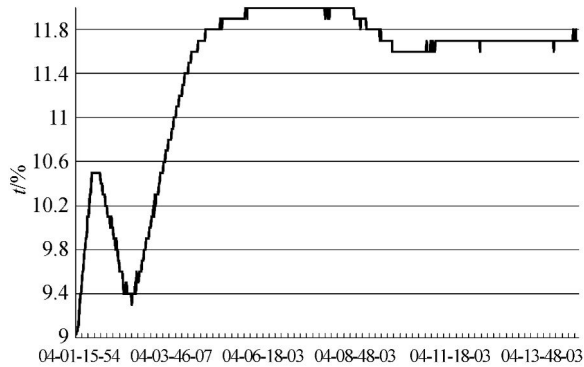
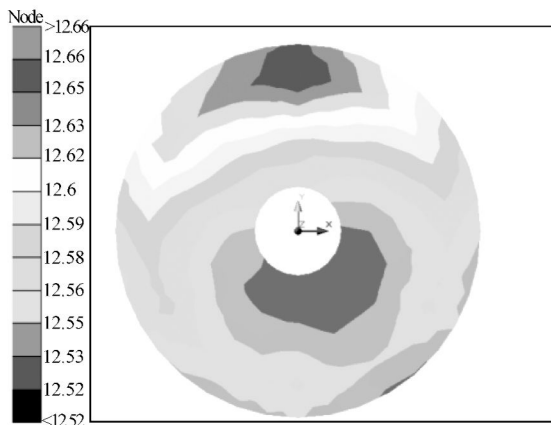


图7 热平衡试验中主镜温度变化曲线

Fig. 7 Temperature curve of primary mirror in thermal experiment

图8 $\epsilon=0.565$ 时主镜温度云图Fig. 8 Temperature contour of primary mirror with $\epsilon=0.565$

时,稳态温度约为 12.55°C 。通过对比,根据测量结果设定主镜发射率参数的热模型计算结果和热平衡试验中主镜稳态温度相差小于 1°C ,考虑到热模型中其他方面不可避免的误差,可以认为主反射镜的测量结果基本反映了试验主反射镜的表面状态。

6 结 论

对红外热像仪的测温原理进行了理论分析,并结合试验中所使用的 FLIR SC3000 热像仪的仪器参数以及试验环境对测温公式进行了简化。在此基础上,提出了利用两种已知发射率的材料作为参考的发射率测量方法。该方法可以有效避免直接测量方法中因温度传感器测温标定误差、测温误差及背景干扰等因素的影响,且试验方法简单可行。根据该方法测得的主反射镜表面发射率 $\epsilon=0.565$,通过对测量公式进行误差分析,得到因热像仪测温误差及参考材料的发射率标称误差带来的测量误差为 ± 0.028 。最后,结合相机热平衡试验的数据,对测量结果进行了校核。结果表明主反射镜表面发射率基本反映了试验主镜的表面状态,即所提出的测量方法有效可行。

参考文献:

- [1] OKAMOTO Y, INAGAKI T, SEKIYA M. Surface temperature measurement using infrared radiometer (1st report, radiosity coefficient and radiation temperature) [J]. *Trans Jpn Soc Mech Eng Ser B*, 1993 (59): 232-237.
- [2] 杨立,寇蔚,刘慧开,等.热像仪测量物体表面辐射率及误差分析[J].*激光与红外*,2002,32(1):43-45. YANG L, KOU W, LIU H K, et al.. Surface emissivity measurement and error analysis using infrared thermograph [J]. *Laser & Infrared*, 2002, 32 (1):43-45. (in Chinese)
- [3] 杨立.红外热像仪测温计算与误差分析[J].*红外技术*,1999,21(4): 20-24. YANG L. Calculation and error analysis of temperature measurement using thermal imager [J]. *Infrared Technology*, 1999, 21(4): 20-24. (in Chinese)
- [4] 侯成刚,张广明,等.用红外热成像技术精确测定物体发射率[J].*红外与毫米波学报*,1997,16(3): 193-198. HOU CH G, ZHANG G M, et al.. Accurate measurement of object emissivity using infrared imaging technique [J]. *Infrared Millim. Waves*, 1997, 16(3): 193-198. (in Chinese)
- [5] 曹义,程海峰,郑文伟,等.基于红外热像仪的涂层波段发射率测量[J].*红外技术*,2007,29(6): 316-319. CAO Y, CHENG H F, ZHENG W W, et al.. Measure wideband emissivity of coatings with thermal imager [J]. *Infrared Technology*, 2007, 29

- (6): 316-319. (in Chinese)
- [6] 徐军, 陈益松, 甄慧英, 等. 基于红外热像技术的织物红外发射率测量方法[J]. 纺织学报, 2009, 30(9): 41-44.
XU J, CHEN Y S, ZHEN H Y, *et al.*. Fabric IR emissivity as measured by IR thermal-imaging technology[J]. *Journal of Textile Research*. 2009, 30(9): 41-44. (in Chinese)
- [7] 黄龙祥, 沈湘衡, 宋江涛. 基于热像仪的物体波段发射率的测量[J]. 激光与红外, 2009, 39(2): 159-161.
HUANG L X, SHEN X H, SONG J T. Measure target wideband emissivity with thermal imager[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(2): 159-161. (in Chinese)
- [8] 吴国忠, 张海玲, 齐晗兵, 等. 采用参考发射率法提高红外点温仪测温精度研究[J]. 计量学报, 2007, 28(3A): 165-168.
WU G ZH, ZHANG H L, QI H B, *et al.*. The improvement of measurement precision of infrared non temperature instrument with reference emissivity[J]. *Acta Metrological Sinica*, 2007, 28(3A): 165-168. (in Chinese)
- [9] 英克鲁佩勒. 传热和传质基本原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007, 4.
INCROPERA. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007, 4. (in Chinese)
- [10] 李云红, 孙晓刚, 原桂彬. 红外热像仪精确测温技术[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1336-1341.
LI Y H, SUN X G, YUAN G B. Accurate measuring temperature with infrared thermal imager[J]. *Opt. precision Eng.*, 2007, 15(9): 1336-1341. (in Chinese)
- [11] BARRY J R. On the validity and techniques of temperature and emissivity measurements [C]. SPIE, 1988, 1: 934.
- [12] ROBERT P M. Emissivity measurement and temperature correction accuracy [J]. SPIE, 1999, 3700: 393-401.

作者简介:



孔林(1986—),男,安徽舒城人,博士研究生,2009年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事航天器热控制、空间薄膜反射镜等方面的研究。E-mail: konglin@mail.ustc.edu.cn



李宗轩(1986—),男,河北衡水人,博士研究生,2009年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事空间光学遥感器光机结构设计及分析、空间大口径反射镜柔性支撑等方面的研究。E-mail: lizx@mail.ustc.edu.cn

导师简介:



王栋(1982—),男,山东聊城人,副研究员,硕士生导师,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事航天器热控制、空间相机结构设计等方面的研究。E-mail: simest@163.com



金光(1958—),男,研究员,博士生导师,1982年于长春光学精密机械学院获学士学位,主要从事空间光学遥感器总体研究工作。E-mail: jing@ciomp.ac.cn