

# 目标表面发射率对红外热像仪测温精度的影响

胡剑虹<sup>1,2</sup>, 宁飞<sup>1</sup>, 沈湘衡<sup>1</sup>, 贺庚贤<sup>1</sup>

(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:**介绍了红外热像仪测温原理,分析了影响红外热像仪测温精度的因素,计算了不同表面发射率下红外热像仪的测温误差曲线。理论分析表明,目标表面发射率越高,红外热像仪测温精度越高。实验改变表面发射率的设置,计算了不同表面发射率对应的总辐射亮度,得到 TP8 型长波红外热像仪能够精确测温时,目标表面发射率必须大于 0.5 的结果。最后,对表面发射率分别为 0.96、0.93 和 0.3 的 3 种材料进行实际测温,结果表明,材料表面发射率较高时,红外热像仪具有较好的测温精度。

**关键词:**表面发射率;红外热像仪;红外测温;测温精度

**中图分类号:**TN216 **文献标识码:**A

## Influence of surface emissivity of objects on measuring accuracy of infrared thermal imagers

HU Jian-hong<sup>1,2</sup>, NING Fei<sup>1</sup>, SHEN Xiang-heng<sup>1</sup>, HE Geng-xian<sup>1</sup>

(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)

**Abstract:** The theory of temperature measurement by infrared imagers is introduced and the factors that influence the accuracy of infrared temperature measurement are analyzed. The error curves of temperature measurement at different surface emissivities are given. Using theoretical analysis, it is shown that the higher the surface emissivity of an object is, the more accurate the measuring accuracy of imager is. By changing the setting of surface emissivity, the corresponding total radiance luminance to surface emissivity is calculated. Analysing the results, the conclusion indicates that TP8 long wave thermal infrared imager can measure the temperature accurately when the surface emissivity is above 0.5. Finally, three materials whose surface emissivity is 0.96, 0.93 or 0.3 are measured, respectively, and the result shows that a higher surface emissivity leads to a better temperature measuring accuracy.

**Key words:** surface emissivity; infrared thermal imager; infrared temperature measurement; temperature measuring accuracy

## 1 引言

目前,红外成像技术已经广泛应用于军事领域,成为现代武器装备的重要技术。红外成像系统的研制,离不开靶场实验,因此,研究能够模拟各种军事目标红外辐射特性的红外靶标有着极其重要的现实意义。红外靶标系统中,红外热像仪负责实时监测红外靶标各区域的温度,红外靶标系统根据红外热像仪测量的温度,调整各区域的温度,使红外靶标系统的红外辐射特性接近被模拟目标。在红外靶标系统研制过程中,红外靶标系统的表面发射率对红外热像仪测温精度影响很大,由此直接影响红外靶标系统的精度。为了提高红外热像仪的测温精度,本文详细分析了红外靶标系统的表面发射率对红外热像仪测温精度的影响,旨在为红外靶标系统表面材料的选择提供依据。

## 2 红外热像仪测温原理

本文的实验均采用 TP8 型长波红外热像仪。对于近距离探测而言,不考虑大气衰减,当目标表面满足灰体模型,到达红外热像仪镜头前的总能量应为目标红外辐射的能量与目标反射的环境辐射能量,故有下式成立<sup>[1~5]</sup>:

$$L_m = \varepsilon L_t + (1 - \varepsilon) L_b, \quad (1)$$

式中  $L_m$  为到达镜头前的总辐射亮度,  $L_t$  为目标的辐射亮度,  $L_b$  为环境的辐射亮度,  $\varepsilon$  为目标表面发射率。

由于灰体的反射和发射均是漫反射的,因此辐射亮度  $L$  与辐射出射度  $M$  存在如下关系<sup>[6,7]</sup>:

$$L = \frac{M}{\pi}, \quad (2)$$

TP8 型长波红外热像仪的波长范围为  $8 \sim 14 \mu\text{m}$ , 由普朗克辐射定律,有下式成立<sup>[6~8]</sup>:

$$M_t = \int_8^{14} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T_t} - 1} d\lambda, \quad (3)$$

$$M_b = \int_8^{14} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T_b} - 1} d\lambda, \quad (4)$$

式中  $M_t$  为目标的辐射出射度,  $M_b$  为环境的辐射出射度,  $T_t$  为目标绝对温度,  $T_b$  为环境绝对温度,  $\lambda$

为波长,  $c_1$  为第一辐射常数 ( $3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ),  $c_2$  为第二辐射常数 ( $1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ )。

将式(2)、(3)、(4)代入式(1)得:

$$L_m = \frac{\varepsilon}{\pi} \int_8^{14} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T_t} - 1} d\lambda + \frac{1 - \varepsilon}{\pi} \int_8^{14} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T_b} - 1} d\lambda. \quad (5)$$

TP8 型长波红外热像仪根据设置的目标表面发射率和采集的环境温度,结合测得的辐射亮度,由式(5)得出目标的温度。

## 3 目标表面发射率对测温精度的影响

由普朗克辐射定律,可以认为  $L_t$  是  $T_t$  为自变量的函数,记作:

$$L_t = f(T_t) = \frac{1}{\pi} \int_8^{14} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T_t} - 1} d\lambda, \quad (6)$$

则有:

$$T_t = f^{-1}(L_t). \quad (7)$$

为便于分析和数值计算,将影响红外热像仪测温精度的因素用差分形式表示:

$$\Delta T_t = f^{-1}(L_t + \Delta L_t) - f^{-1}(L_t), \quad (8)$$

由式(1)可得:

$$\Delta L_t = \frac{L_b - L_m}{\varepsilon^2} \cdot \Delta \varepsilon - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \Delta L_b, \quad (9)$$

其中:

$$\Delta L_b = f(T_b + \Delta T_b) - f(T_b), \quad (10)$$

根据式(8)、(9)、(10),可以计算红外热像仪测温误差。

从上述分析可以看到,红外热像仪的测温误差  $\Delta T_t$  取决于  $\Delta \varepsilon$ 、 $\varepsilon$ 、 $\Delta T_b$ 、 $T_b$  和  $L_m$ 。为了说明目标表面发射率对红外热像仪测温精度的影响,本文假定环境温度 293.15 K,目标温度 308.15 K,对目标表面发射率为 0.95、0.7、0.5、0.3 时分别进行理论计算,其结果如图 1 所示。

分析图 1 可知,红外热像仪在测量目标表面真实温度时,目标表面发射率越小,红外热像仪测温误差越大;目标表面发射率越大,红外热像仪测温误差越小。此外,红外热像仪设置的目标表面发射率误差和采集的环境温度误差也对红外热像仪测温误差有着很大的影响。根据以上分析,红

外热像仪应当避免测量目标表面发射率很小的目标温度。

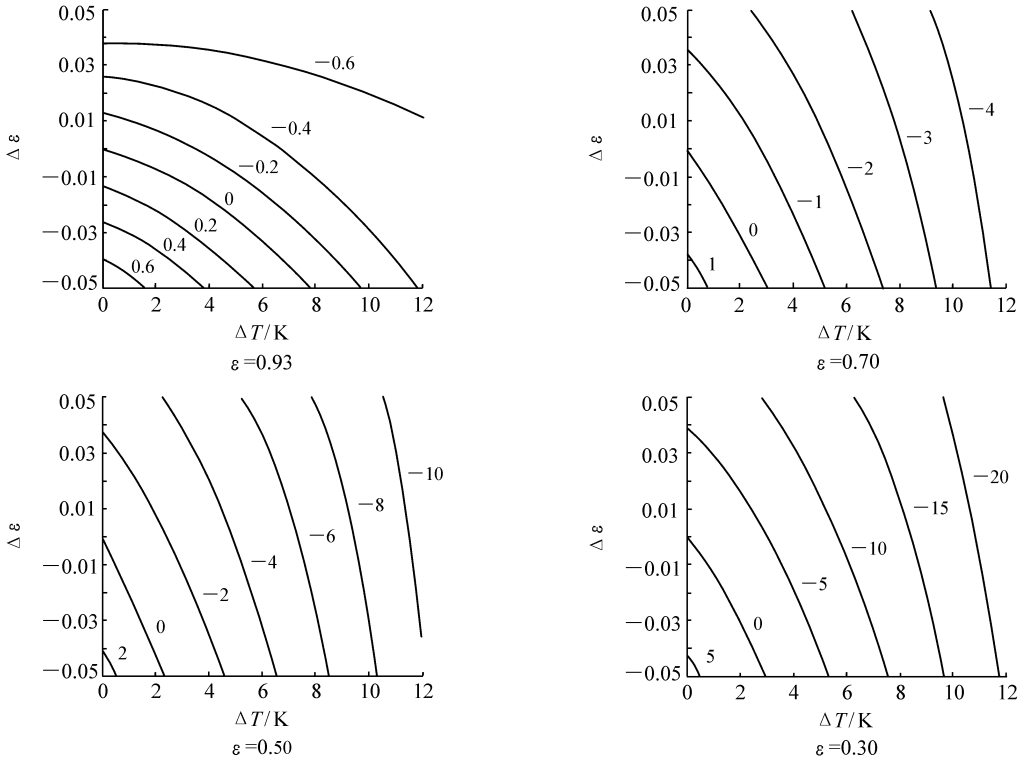


图1 热像仪测量温度误差曲线图

Fig.1 Error curves of thermal infrared imager in measuring temperature

### 4 红外靶标表面发射率范围的确定

为了确定 TP8 型长波红外热像仪能够精确测温的目标表面发射率的范围,为红外靶标系统设计提供依据,本文对红外热像仪采集的图像的某一点(图像中温度最高点),通过设置不同的目标表面发射率,获得不同的温度值。

实验时,红外热像仪记录的环境温度为 299.95 K,根据式(5),可以计算  $L_m$  的值。由于红外热像仪在相同环境下测温同一目标,  $L_m$  应为固定值。若计算的  $L_m$  偏离这个固定值,则可认为设置的目标表面发射率超出红外热像仪能够精确测温的目标表面发射率的范围。

本文设置的目标表面发射率从 0.2 ~ 0.97,对应的测量温度和  $L_m$  如表 1 所示。

表 1 目标表面发射率与总辐射亮度关系表

Table 1 Relation between surface emissivity and total radiance luminance

$\epsilon$	$T_t/K$	$L_m/(W/(sr \cdot m^2))$	$\epsilon$	$T_t/K$	$L_m/(W/(sr \cdot m^2))$
0.97	317.75	70.52	0.60	327.55	70.51
0.96	317.85	70.45	0.58	328.35	70.48
0.95	318.05	70.48	0.56	337.35	70.48
0.94	320.05	70.50	0.54	338.35	70.49
0.93	322.05	70.52	0.52	339.35	70.48
0.92	324.05	70.53	0.50	340.45	70.47
0.91	325.05	70.45	0.48	341.55	70.42
0.90	328.05	70.54	0.46	342.85	70.44

续表1

$\varepsilon$	$T_l/K$	$L_m/(W/(sr \cdot m^2))$	$\varepsilon$	$T_l/K$	$L_m/(W/(sr \cdot m^2))$
0.88	319.45	70.54	0.44	336.05	70.39
0.86	319.85	70.52	0.42	337.55	70.39
0.84	320.25	70.50	0.40	339.15	70.38
0.82	320.75	70.53	0.38	340.95	70.39
0.80	321.25	70.55	0.36	343.15	70.50
0.78	321.75	70.55	0.34	346.15	70.83
0.76	322.25	70.53	0.32	350.15	71.44
0.74	322.75	70.50	0.30	352.85	71.41
0.72	323.35	70.51	0.28	355.75	71.33
0.70	323.95	70.51	0.26	359.05	71.25
0.68	324.65	70.55	0.24	362.85	71.18
0.66	325.25	70.49	0.22	367.15	71.09
0.64	325.95	70.48	0.20	372.15	70.99
0.62	326.75	70.51			

从表1可以看到,当目标表面发射率 $>0.5$ 时, $L_m$ 的值基本在 $70.5 W/(sr \cdot m^2)$ 左右;当目标表面发射率 $<0.5$ 时,特别是目标表面发射率 $<0.36$ 时, $L_m$ 的值偏离固定值很大。这个特性是根据发射率选择红外靶标表面材料的依据。



图2 不同表面发射率材料的红外图像

Fig. 2 Infrared picture of different materials with different surface emissivities

## 5 实验结果

为了直观地反映材料表面发射率对测温精度的影响,本文在环境温度为 $302.65 K$ 时,用TP8型长波红外热像仪对表面发射率为 $0.96(R3)$ 、 $0.93(R1)$ 和 $0.3(R2)$ 的3种材料进行测温,其结果如图2所示。

本文采用测温精度为 $0.2 K$ 的手持式测温仪测温,材料温度约为 $303.15 K$ 。结果表明,红外热像仪对低表面发射率材料的测温精度很低。

## 6 结论

本文分析了目标表面发射率对红外热像仪测温精度的影响,并通过实验验证了只有较高的表面发射率才能保证红外热像仪测温点的结论。根据这个结论,红外靶标系统选择表面发射率为 $0.94$ 的碳纤维布作为红外靶标的表面材料,保证了红外靶标系统的精度。

## 参考文献:

- [1] 宋江涛,沈湘衡,黄龙祥. 建筑物目标红外辐射特征的外场模拟[J]. 光电子技术,2008,28(3):189-192.  
SONG J T, SHEN X H, HUANG L X. Outdoors simulation of infrared image feature of buildings[J]. *Optoelectronic Technol.*, 2008, 28(3):189-192. (in Chinese)

- [2] 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)
- [3] 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 thermography[J]. *Laser Infrared*, 2002, 32(1):43-45. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 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 Technol.*, 1999, 21(4):20-24. (in Chinese)
- [6] 皮茨,西索姆.传热学[M].北京:科学出版社,2004.  
DONALD P, LEIGHTON S. *Heat Transfer*[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [7] 杨世铭.传热学[M].2版.北京:高等教育出版社,1980.  
YANG SH M. *Heat Transfer*[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 1980. (in Chinese)
- [8] 胡家升.光学工程导论[M].2版.大连:大连理工大学出版社,2005.  
HU J SH. *Introduction to Optical Engineering*[M]. 2nd ed. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2005. (in Chinese)

作者简介:胡剑虹(1984—),男,浙江宁波人,硕士研究生,主要从事红外目标模拟的研究。E-mail: zjuhjh@126.com