

文章编号 1004-924X(2007)09-1336-06

红外热像仪精确测温技术

李云红^{1,2}, 孙晓刚¹, 原桂彬¹

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 西安工程大学, 陕西 西安 710048)

摘要:为实现红外热像仪对温度的精确测量,根据热辐射理论和红外热像仪的测温原理,推导了计算被测物体表面真实温度的通用计算公式;讨论了发射率对测温精度的影响,分析了用红外热像仪进行精确测温的条件,探讨了环境、大气和热像仪本身对测量精度的影响,并绘制了各种因素对测温精度影响的理论曲线。结果表明:发射率为0.7时,真实温度为50℃,发射率偏离0.1时,对于3~5 μm热像仪来说,测温结果偏离真实温度0.76~0.89℃;对于8~14 μm热像仪来说,测温结果偏离真实温度1.56~1.87℃。本研究结果对提高热像仪测量温度和表面发射率的准确性,减小不必要的测量误差具有实际意义。

关键词:红外热像仪;温度测量;误差分析;发射率

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A

Accurate measuring temperature with infrared thermal imager

LI Yun-hong^{1,2}, SUN Xiao-gang¹, YUAN Gui-bin¹

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to measure the temperature accurately using infrared thermal imager the interpolation of true surface temperature and the influence factors were studied. Based on the principles of thermal radiation and temperature measurement with infrared thermal imager, a general formula for computing the true surface temperature of objects was given. The influence of emissivity on accurate temperature measurement was discussed mainly, the conditions of accurate temperature measurement with infrared thermal imager were analyzed, and the influence factors from the surroundings, the atmosphere and the thermal imager were investigated too. Finally, the theoretical curves of the various factors influencing on the accuracy of measuring temperature were given. The results show that when emissivity is 0.7, the true temperature is 50℃, as deflected emissivity is 0.1, the measuring result of true temperature fluctuating is 0.76~0.89℃ for a 3~5 μm thermal imager; and 1.56~1.87℃ for a 8~14 μm thermal imager. It is shown that proposed method can provide a feasibility for improving the accuracy of measuring temperature and surface emissivity and reducing measuring errors.

Key words: infrared thermal imager; temperature measurement; error analysis; emissivity

1 引言

红外热像仪为实时表面温度测量提供了有效、快速的方法。与其他测温方法相比,热像仪在以下两种情况下具有明显的优势:(1)温度分布不均匀的大面积目标的表面温度场的测量;(2)在有限的区域内快速确定过热点或过热区域的测量。

被测表面的发射率、反射率、环境温度、大气温度、测量距离和大气衰减等因素,直接影响红外热像仪测温的准确性,也影响热像仪在一些领域的应用。例如,在进行PCB电路板的温度测量^[1]时,由于发射率变化很大,非常需要可以在热图中每个像素运用不同发射率值的分析软件。杨立等考虑了被测表面的发射率、反射率(或吸收率)、环境温度、大气温度、大气衰减等因素,总结了这些因素的测量误差对红外测温误差的影响^[2-5]。张健等着重分析了环境高温物体对红外测温误差的影响^[6]。

在实验研究方面,红外热像仪亦显示出其在测试物体温度场方面的优势。例如,王喜世等人利用红外热像仪测量火焰温度^[7],侯成刚等人利用其精确测试物体的发射率^[8],都取得了较好的效果。目前,最先进的红外热成像仪,其温度灵敏度可达到 0.01°C 。仪器的测量精度^[9]、响应速度、稳定性、分辨率都达到了相当高的水平,测温范围亦从以往的中高温延伸到室温或更低温度。

本文基于红外热像仪测温理论计算公式,探讨了环境、大气和热像仪本身的影响因素,得出了各种因素对测温精度影响的理论仿真曲线,进一步减小了物体表面的测温误差。给出了在热像仪内部使用以温度为参考的钳位系统^[10-11],进行了温度补偿。

2 红外热像仪测温原理和计算公式

红外热像仪测温存在的主要问题是温度并不是直接测量的。红外探测器接收的辐射包括目标自身的辐射和目标对周围环境辐射的反射辐射。上述辐射经过大气衰减,最后到达探测器,另外大气本身的透射辐射以及热像仪内部的辐射都会参与其中,如图1所示。

图1中, ϵ 为物体的发射率; τ 为大气的透射

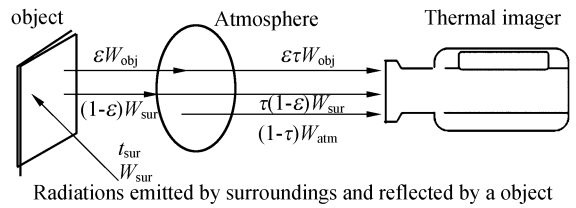


图1 热辐射原理图

Fig.1 Heat radiation principle

率; t_{obj} 为被测物体温度; t_{sur} 为环境温度; t_{atm} 为大气温度;被测物体的辐射能为 $\epsilon\tau W_{obj}$;周围环境的反射辐射能为 $(1-\epsilon)\tau W_{sur}$;大气辐射能为 $(1-\tau)W_{atm}$ 。

红外热成像过程要经过大气传输、光学系统成像等,而辐射量转化为温度之前要经过修正,即校准。热像仪校准有两个原因,一是要把被测目标的辐射能量转化为温度,二是要补偿热像仪的内部辐射。最实用的校准方法是在固定的较短距离下使用黑体。黑体发射的辐射能量与温度之间的关系是非线性的,可以由普朗克辐射定律和热像仪光谱响应计算。通过黑体建立辐射量和温度之间的关系,对处于不同温度的黑体进行测量,并将测量值与黑体的精确温度值拟合,可得到校准曲线。在不同的精度及测量条件下得到不同的校准曲线,校准数据储存在存储器里。进行温度测量时,通过查找相应的修正曲线表,即可得到温度值。图2给出了黑体目标在不同温度下,不同辐射源^[12-13]对辐射贡献的比率关系。(测试条件:测试距离为10 m,大气温度为 20°C ,环境温度为 20°C 。)

因为干扰越大,目标发射率越小,显然目标温度越低,测量越困难。

红外热像仪的探测器是光电转换器件,一般由碲化铟或碲镉汞材料制成,用于将接收到的红外热辐射能量转换为电信号,经过放大、整形、模数转换后成为数字信号,在显示器上通过图像显示出来。图像中每一个点的灰度值与被测物体上该点发出并到达光电转换器件的辐射能量相对应。经过运算,可以从红外热像仪的图像上读出被测物体表面上每一个点的辐射温度值。红外热像仪测温是靠接收被测物体表面发射的辐射来确定其温度的。

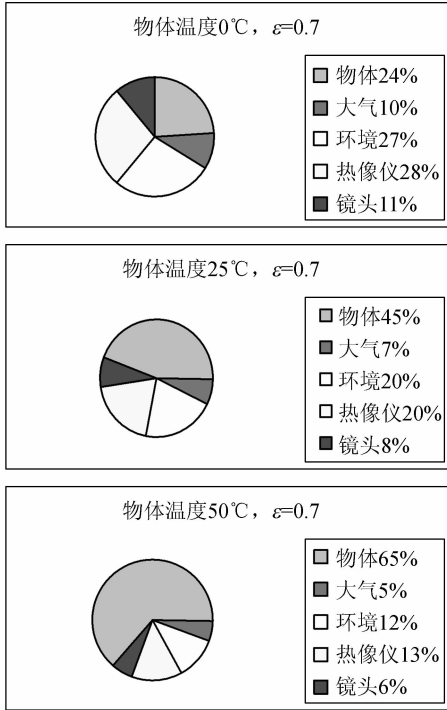


图 2 由探测器接收到的不同物体温度的辐射来源
Fig. 2 Radiation sources received by detector for different object temperatures

作用于热像仪的辐射照度为:

$$E_{\lambda} = A_0 d^{-2} [\tau_{\text{at}} \epsilon_{\lambda} L_{\text{bl}}(t_o) + \tau_{\text{at}} (1 - \alpha_{\lambda}) L_{\text{bl}}(t_u) + \epsilon_{\text{at}} L_{\text{bl}}(t_a)], \quad (1)$$

其中, t_o 为被测物体表面温度; t_u 为环境温度; t_a 为大气温度; ϵ_{λ} 为表面发射率; α_{λ} 为表面吸收率; τ_{at} 为大气的光谱透射率; ϵ_{at} 为大气发射率; A_0 为热像仪最小空间张角所对应的目标可视面积; d 为该目标到测量仪器之间的距离, 通常在一定条件下, $A_0 d^{-2}$ 为一常数。

热像仪通常工作在某一个很窄的波段, $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 或 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 之间, ϵ_{λ} 、 α_{λ} 、 τ_{at} 通常可认为与 λ 无关。得到热像仪的响应电压为:

$$V_S = A_R A_0 d^{-2} \left\{ \tau_{\text{at}} \left[\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} L_{\text{bl}}(t_o) d\lambda + (1 - \alpha) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} L_{\text{bl}}(t_u) d\lambda \right] + \epsilon_{\text{at}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} L_{\text{bl}}(t_a) d\lambda \right\}, \quad (2)$$

其中, A_R 为热像仪透镜的面积, 令

$$K = A_R A_0 d^{-2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} L_{\text{bl}}(t) d\lambda = f(t), \quad \text{则式(2)变}$$

为:

$$V_S = K \{ \tau_{\text{at}} [\epsilon f(t_o) + (1 - \alpha) f(t_u)] + \epsilon_{\text{at}} f(t_a) \}, \quad (3)$$

依据普朗克辐射定律, 得到:

$$t_r^n = \tau_{\text{at}} [\epsilon t_o^n + (1 - \alpha) t_u^n] + \epsilon_{\text{at}} t_a^n, \quad (4)$$

被测表面真实温度的计算公式为:

$$t_o = \left\{ \frac{1}{\epsilon} \left[\frac{1}{\tau_{\text{at}}} t_r^n - (1 - \alpha) t_u^n - \frac{\epsilon_{\text{at}}}{\tau_{\text{at}}} t_a^n \right] \right\}^{1/n}. \quad (5)$$

当使用不同波段的热像仪时, n 的取值不同, 对 HgCdTe ($8 \sim 13 \mu\text{m}$) 探测器, n 值为 4.09; 对 HgCdTe ($6 \sim 9 \mu\text{m}$) 探测器, n 值为 5.33; 对 InSb ($2 \sim 5 \mu\text{m}$) 探测器, n 值为 8.68。

当被测表面满足灰体时, 即 $\epsilon = \alpha$, 对大气认为 $\epsilon_{\text{at}} = \alpha_{\text{at}} = 1 - \tau_{\text{at}}$, 则式(3)变为:

$$V_S = K \{ \tau_{\text{at}} [\epsilon f(t_o) + (1 - \epsilon) f(t_u)] + (1 - \tau_{\text{at}}) f(t_a) \}, \quad (6)$$

式(4)变为:

$$t_r^n = \tau_{\text{at}} [\epsilon t_o^n + (1 - \epsilon) t_u^n + (\frac{1}{\tau_{\text{at}}} - 1) t_a^n], \quad (7)$$

式(5)变为

$$t_o = \left\{ \frac{1}{\epsilon} \left[\frac{1}{\tau_{\text{at}}} t_r^n - (1 - \alpha) t_u^n - (\frac{1}{\tau_{\text{at}}} - 1) t_a^n \right] \right\}^{1/n}, \quad (8)$$

这就是计算灰体表面真实温度的计算公式。

当近距测温时, $\tau_{\text{at}} = 1$, 则式(7)、(8)变为:

$$t_r = t_o \{ \epsilon [1 - (t_u/t_o)^n] + (t_u/t_o)^n \}^{1/n}, \quad (9)$$

$$t_o = \{ (1/\epsilon) [t_r^n - (1 - \epsilon) t_u^n] \}^{1/n}, \quad (10)$$

这是人们经常用到的公式。

当被测表面温度较高时, t_u/t_o 很小, 则式(9)、(10)变为:

$$t_r = \epsilon^{1/n} t_o, \quad (11)$$

$$t_o = t_r / \sqrt[n]{\epsilon}. \quad (12)$$

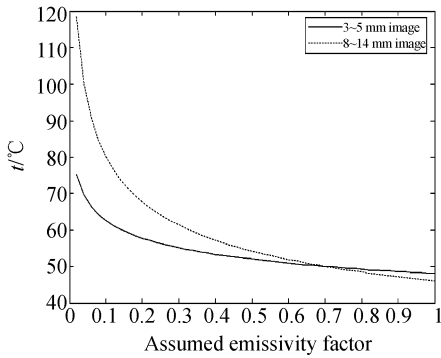
3 物体发射率影响和大气影响的修正

由于实际物体并不是黑体, 表面发射率不等于 1, 所以有时辐射温度与真实温度相差较大, 物体表面的辐射温度分布并不能反映真实温度分布。

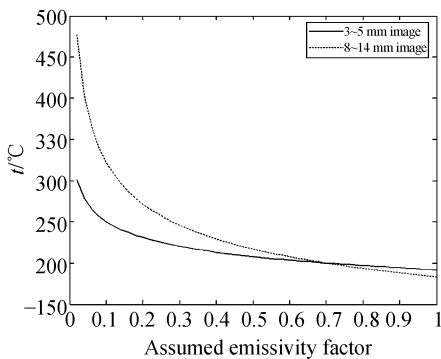
$$I_{\text{measured}} = I(t_{\text{obj}}) \times \tau \times \epsilon + \tau \times (1 - \epsilon) \times I(t_{\text{sur}}) + (1 - \tau) \times I(t_{\text{atm}}) + i_{\text{img}}, \quad (13)$$

式(13)是辐射测量公式。其中, $I(t)$ 为温度为 t 的黑体辐射的热值; I_{measured} 为测量总辐射的热值 (辐射的仪器读数); i_{img} 为扫描器内部的热辐射。当物体的温度较低时, 为了达到准确测量的目的,

必须从总辐射能量中扣除环境、大气和扫描器的热辐射,而扫描器的热辐射 i_{img} 在其内部已被补偿,因此在式(13)中可以略去 i_{img} 项。图 3 是由于错误假定发射率引起的温度误差—发射率图,图 3(a)、(b)分别是物体温度 50℃、200℃时的温度误差—发射率图。可以看出,3~5 μm 的热像仪对发射率误差敏感性较低,特别在目标温度较高时。图示结果与理论分析基本一致。



(a)物体温度 50℃
(a)Object temperature 50℃



(b)物体温度 200℃
(b)Object temperature 200℃

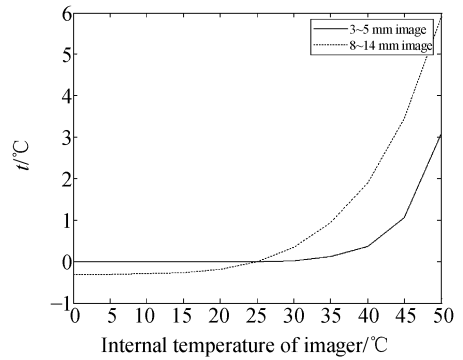
图 3 温度读数与假定发射率的函数关系

Fig. 3 Temperature read-out as a function of the assumed emissivity factor

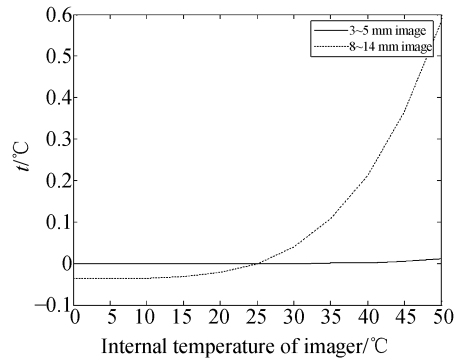
4 对热像仪本身所发出辐射的补偿

一个设计完好的热像仪能够自动补偿来自热像仪本身及其光学元件的辐射,但是,很少有热像仪能够补偿恰当,因为被测目标的温度依赖于热像仪的温度。来自于热像仪本身的辐射是由于光学元件(如平面镜、透镜)对辐射的衰减,由于

非 100%反射或透射而发出辐射。为了强调精确补偿的重要性,图 4 给出没有内部辐射补偿的系统的温度漂移误差图。图 4(a)、(b)分别是物体温度 50℃、100℃时的温度漂移误差图。



(a)物体温度 50℃
(a)Object temperature 50℃



(b)物体温度 100℃
(b)Object temperature 100℃

图 4 温度漂移误差与热像仪的内部温度关系图
Fig. 4 Temperature drift error versus internal temperature of thermal imager.

由图 4 可以看出,内部辐射补偿不充分的热像仪会在除标定环境外,其它环境使用时都产生误差。因为热像仪将由自身功率消耗而加热,被测温度是开始工作后时间的函数。

设置这种补偿的最常见的方式是在热像仪内部使用以温度为参考的钳位系统^[14-16],如图 5 所示。虚线左边是用温度传感器微处理系统补偿光学镜片所发出的辐射,虚线右边是用钳位温度参考系统补偿光学镜片所发出的辐射。参考温度可以通过若干断路器阵列被校验或被转换到光学通道中。由于增益或偏移量随内部温度而变化,通常在不同温度下最好有两个参考温度,这可以

同时补偿增益和偏移。温度参考和探测器之间光学元件的辐射,不同背景对探测器的辐射,探测器和电子器件老化,光学通道中滤波器和光圈因透

镜温度变化引起的传输差异等,都需要正确的补偿。

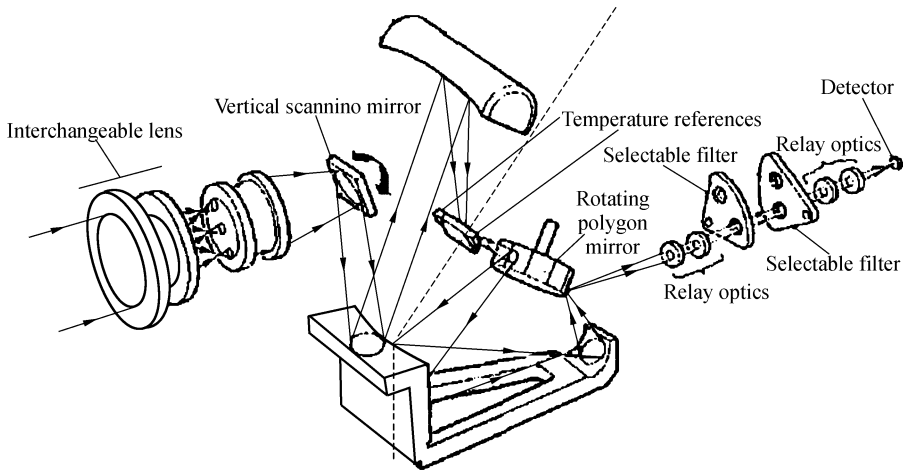


图 5 热像仪的光学通道

Fig. 5 Optical path of a thermal imager

图 5 的系统补偿了从温度参考至探测器之间的光学元件辐射。由于温度参考必须放在热像仪内部,温度参考前的光学元件辐射必须由另一种方式来补偿。一种有效的方式是用温度传感器测量温度参考前所有光学元件的真实温度,这对探测器上的入射辐射的贡献是可以微处理器计算并消除的。

为了让这个系统可以对外部光学元件(望远镜透镜、热屏蔽、显微镜等)进行补偿,所有的透镜必须装配温度传感器。

这种补偿所用的式(14)与第 3 部分测量公式相似,并由各光学元件组成。

$$I_{\text{det}} = \tau_1 \times \tau_2 \times \tau_3 \cdots \tau_n \times I(t_{\text{obj}}) + \tau_2 \times \tau_3 \cdots \tau_n \times (1 - \tau_1) \times I(t_1) + \tau_3 \cdots \tau_n \times (1 - \tau_2) \times I(t_2) + \cdots + (1 - \tau_n) \times I(t_n) . \quad (14)$$

5 结 论

本文在分析红外热像仪测温原理的基础上,得出了影响红外热像仪测温精度的主要因素,给出了提高测温精度的系统。并以黑体为例,绘制了各种因素对测温精度影响的理论曲线,发射率为 0.7 时,真实温度为 50℃,发射率偏离 0.1 时,对于 3~5 μm 热像仪来说,测温结果偏离真实温度 0.76~0.89℃;对于 8~14 μm 热像仪来说,测温结果偏离真实温度 1.56~1.87℃。精确温度测量因素的分析结果对提高热像仪的测温精度及降低测温误差都具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 朱德忠,顾毓沁,晋宏师,等. 电子器件真实温度和发射率分布的红外测量[J]. 红外技术, 2000, 22(1): 45-48. ZHU D ZH, GU Y Q, JIN H SH, *et al.*. Measurement of true temperature and emissivity distribution of electronic devices with infrared thermal imaging system [J]. *Infrared Technology*, 2000, 22(1): 45-48. (in Chinese)
- [2] 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)
- [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 thermo-

- graph [J]. *Laser & Infrared*, 2002, 32(1):43-45. (in Chinese)
- [4] 寇蔚,杨立.热测量中误差的影响因素分析[J].*红外技术*,2001, 23(3): 32-34.
KOU W, YANG L. Infrared thermograph testing and heat transfer analysis complex material of contained delamination [J]. *Infrared Technology*, 2001, 23(3): 32-34. (in Chinese)
- [5] 刘慧开,杨立.太阳辐射对红外热像仪测温误差的影响[J].*红外技术*,2002, 24(1): 34-37.
LIU H K, YANG L. Effect of radiation of the sun on infrared temperature measurement [J]. *Infrared Technology*, 2002, 24(1): 34-37. (in Chinese)
- [6] 张健,杨立,刘慧开.环境高温物体对红外热像仪测温误差的影响[J].*红外技术*,2005,27(5):419-422.
ZHANG J, YANG L, LIU H K. Effect of environmental object on infrared temperature measurement [J]. *Infrared Technology*, 2005, 27(5): 419-422. (in Chinese)
- [7] 王喜世,伍小平.用红外热成像方法测量火焰温度的实验研究[J].*激光与红外*,2001,31(3):169-173.
WANG X SH, WU X P. Experimental study on flame temperature measurement by infrared thermography [J]. *Laser & Infrared*, 2001, 31(3): 169-173. (in Chinese)
- [8] 侯成刚,张广明.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. Accurate measurement of object emissivity using infraed imaging technique [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 1997, 16(3): 193-198. (in Chinese)
- [9] 高春甫,邹敏.粗糙表面精度测量系统的研究[J].*光学精密工程*,2005,13(6):697-702.
GAO CH F, WU M. Study of measurement system for rough surface accuracy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 697-702. (in Chinese)
- [10] 郑玉权.小型 Offner 光谱成像系统的设计[J].*光学精密工程*,2005,13(6):650-657.
ZHENG Y Q. Design of compact Offner spectral imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 650-657. (in Chinese)
- [11] 李幼平,禹秉熙,韩昌元,等.成像光谱仪工程权衡优化设计的光学结构[J].*光学精密工程*,2006,14(6):974-980.
LI Y P, YU B X, HAN CH Y, et al. Tradeoff optimization design of optical configuration on imaging spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 974-980. (in Chinese)
- [12] 田裕鹏.红外检测与诊断技术[M].北京:化学工业出版社,2006.
TIAN Y P. *Infrared Tesing and Diagnose Technology* [M]. Beijing: Chemical Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [13] 张建奇,方小平.红外物理[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004.
ZHANG J Q, FANG X P. *Infrared Physics* [M]. Xi'an: Xi dian Press, 2004. (in Chinese)
- [14] HAMRELIUS T. Accurate temperature measurement in thermograph an overview of relevant features parameters and definitions [J]. *SPIE*, 1991: 448-457.
- [15] BARRY J R. On the validity and techniques of temperature and emissivity measurements [C]. *SPIE*, 1988, 1: 934.
- [16] ELMAHDY A H, DEVINE F. Laboratory infrared thermography technique for window surface temperature measurement [J]. *ASHRAE Transactions*, 2005, 111(1): 561-571.

作者简介:李云红(1974—),女,满族,辽宁锦州人,哈尔滨工业大学在读博士研究生,西安工程大学讲师,主要从事红外热成像技术、红外热像仪的温度测量技术研究。E-mail:hitliyuhong@163.com

孙晓刚(1967—),男,汉族,黑龙江哈尔滨人,博士后,哈尔滨工业大学教授,博士生导师。主要从事辐射测温、热物性测试、智能仪表的研究。E-mail: sxx@hit.edu.cn