

·测试、试验与仿真·

红外热像仪测温精度分析

官上洪,王毕艺,赵万利,闫秀生

(光电信息控制与安全技术重点实验室,河北 三河 065201)

摘要:介绍了红外热像仪的工作原理和测温原理,分析了影响红外热像仪测温精度的各种因素,从理论上推导了各因素的误差对测温精度影响的数学表达式,计算了不同温度条件下不同发射率材料的测温误差曲线,比较了中、长波红外热像仪在不同温度范围内的测温精度。

关键词:红外热像仪;发射率;测温精度

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2012)03-0085-04

Study of Temperature Measurement Precision Base on Infrared Thermal Imager

GUAN Shang-hong, WANG Bi-yi, ZHAO Wan-li, YAN Xiu-sheng

(Science and Technology Electro-optical Information Security Control Laboratory, Sanhe 065201, China)

Abstract: The principles of the working and temperature measurement for the infrared thermal imager are introduced. The factors that influence the measurement precision of the infrared thermal imager are analyzed. The mathematical expression that the error factors influence the temperature measurement is derived in theory, and the error curve under different temperature conditions for the materials with different emissivity are calculated. The temperature measurement precisions of middle infrared (MIR) and long infrared (LIR) thermal imager are compared.

Key words: infrared thermal imager; emissivity; temperature measurement precision

19世纪初英国物理学家赫谢尔发现了红外线,从此开辟了人类应用红外技术的广阔道路。直到20世纪五六十年代,由于红外探测器的改进和快速灵敏的光子探测器问世,才导致了实验性、原理性热成像系统的诞生。由于物体红外辐射满足Plank定律,物体的红外辐射在一定程度上反映了其温度特性,因此利用物体的红外辐射特性的红外成像技术在国防、航空航天、工业检测、医疗等领域具有巨大的应用价值^[1-7]。热成像测温技术具有测温速度快、测温面积大、测温分辨率高和非接触、不干扰被测表面温度场、相关技术完备、数据处理灵活等优点,是非接触式测温中常用的技术手段^[1-6,8,9]。

文中从红外热像仪的工作原理及测温原理入

手,分析影响红外热像仪测温精度的相关因素,从理论上推导了各个因素误差对目标测温精度的影响,并进行了相关计算分析。

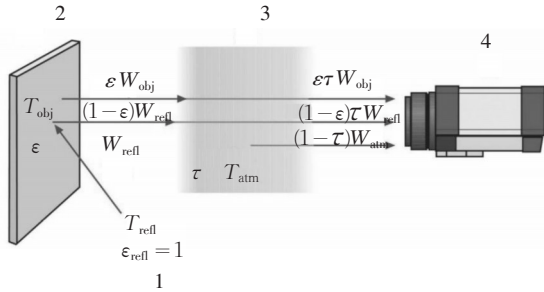
1 红外成像工作原理及测温原理

红外热像仪在观察或测量目标时,其接收到的辐射主要包括:目标场景辐射、反射环境辐射、大气辐射等三部分构成^[3-9],其过程如图1所示。

$$W_{\text{tot}} = \varepsilon\tau W(T_{\text{obj}}) + (1 - \varepsilon)\tau W(T_{\text{refl}}) + (1 - \tau)W(T_{\text{atm}}) \quad (1)$$

式中, T_{obj} 、 T_{refl} 、 T_{atm} 分别为目标真实温度、环境等效辐射温度、大气温度; ε 为目标场景的发射率; τ 为该波段的大气透过率。在均匀环境中,环境温度为等效

辐射温度,在有高温辐射源存在的环境中,与环境、高温辐射源在被测目标处所产生的总辐射照度相当的黑体辐射温度为等效辐射温度。其值与辐射源温度、面积大小、以及与被测目标的距离等参数有关。



1—反射辐射;2—目标辐射;3—大气辐射;4—红外热像仪

图1 红外热像仪接收到红外辐射通量示意图

当辐射源尺寸比成像探测器单元尺寸在物方空间的投影大得多时,被称为可分辨的或者说系统正在观察一个扩展源^[2]。则目标场景对该成像单元上的辐射通量可以用式(2)表示^[2]

$$\Phi = \frac{\pi}{4} \frac{L_{\text{tot}} A_d}{(f/\#)^2 (1+M)^2} \tau_{\text{sys}} \quad (2)$$

$$L_{\text{tot}} = \varepsilon \tau L_{bb}(T_{\text{obj}}) + (1-\varepsilon)\tau L_{bb}(T_{\text{sur}}) + (1-\tau)L_{bb}(T_{\text{atm}}) \quad (3)$$

式中, M 为成像系统对物体的放大率 $\frac{f'}{l}$,通常在正常成像距离情况下可以取0; L_{tot} 为目标场景辐射亮度,由发射辐射、反射辐射和大气辐射等三部分组成,可以用式(3)表示,式中, L_{bb} 为黑体辐射亮度; A_d 为探测器单元的面积。

对于红外热像仪观测扩展目标,红外焦平面探测器上某个像元的输出灰度信号 V_s 满足

$$V_s = G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda + b \quad (4)$$

式中, $R(\lambda)$ 为该红外探测器像元量子效率; G 为系统光电转换系数; b 为信号偏移量。

同时,式(2)、式(4)中的辐射通量为红外热像仪工作波段范围内的辐射,按照普朗克定律,同时扣除自身偏移量,式(4)可以表示为

$$\Delta V_s = \frac{GA_d}{4(f/\#)^2} \tau_{\text{sys}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\varepsilon \tau M(T_{\text{obj}}) + (1-\varepsilon)\tau M(T_{\text{sur}}) + (1-\tau)M(T_{\text{atm}})) R(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

$$\text{令 } f(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(T) R(\lambda) d\lambda, \quad k = \frac{GA_d}{4(f/\#)^2} \tau_{\text{sys}}, \text{ 则式}$$

(5)可以表述为

$$\Delta V_s = k(\varepsilon \tau f(T_{\text{obj}}) + (1-\varepsilon)\tau f(T_{\text{sur}}) + (1-\tau)f(T_{\text{atm}})) \quad (6)$$

热像仪接收到辐射通量所产生的那部分电信号,按照普朗克辐射定律可以推算得出被测物体等效黑体辐射温度,称为表观温度^[2]或视在温度,用 T_{IR} 表示,则式(6)可以化为

$$f(T_{\text{IR}}) = \varepsilon \tau f(T_{\text{obj}}) + (1-\varepsilon)\tau f(T_{\text{sur}}) + (1-\tau)f(T_{\text{atm}}) \quad (7)$$

在一定温度范围内,可将热像仪对黑体的响应曲线按照幂函数形式进行拟合,即 $f(T) \approx CT^n$,其中, C 、 n 均是与探测器响应波段相关的常数,可以通过多个温度的黑体辐射进行标定获得。因此可以获得目标的真实温度的表达式为

$$T_{\text{obj}} = \left(\frac{T_{\text{IR}}^n - (1-\varepsilon)\tau T_{\text{sur}}^n - (1-\tau)T_{\text{atm}}^n}{\varepsilon \tau} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

图2为环境等效辐射温度300 K、大气温度300 K、大气透过率为0.98条件下,中波、长波红外热像仪测得的等效黑体辐射温度分别为313 K、343 K、373 K时,不同目标发射率与目标真实温度的关系曲线。

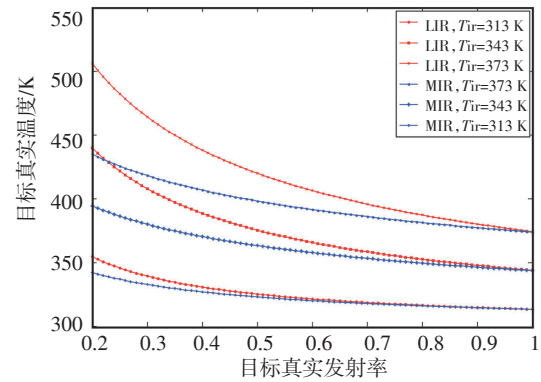


图2 发射率与目标真实温度的关系曲线

2 影响测温精度参数分析

将式(8)中目标真实温度 T_{obj} 看作一个多元函数 $T_{\text{obj}}(\varepsilon, \tau, T_{\text{sur}}, T_{\text{atm}})$,对其微分后可以得到相对温差式如下

$$\text{err}(T_{\text{obj}}) = \frac{dT_{\text{obj}}}{T_{\text{obj}}} = \frac{\varepsilon \tau (A d \tau + B d \varepsilon + C d T_{\text{sur}} + D d T_{\text{atm}})}{n(T_{\text{IR}}^n - (1-\varepsilon)\tau T_{\text{sur}}^n - (1-\tau)T_{\text{atm}}^n)} \quad (9)$$

$$A = \frac{T_{\text{atm}}^n - T_{\text{IR}}^n}{\varepsilon \tau^2} \quad (10)$$

$$B = \frac{T_{sur}^n + (1-\tau)\tau T_{atm}^n - \tau T_{IR}^n}{(\epsilon\tau)^2} \quad (11)$$

$$C = \frac{(1-\epsilon)\tau n T_{sur}^{n-1}}{\epsilon\tau} \quad (12)$$

$$D = \frac{(1-\tau)n T_{atm}^{n-1}}{\epsilon\tau} \quad (13)$$

从式(9)可以看出:目标发射率 ϵ 、大气透过率 τ 、环境等效辐射温度 T_{sur} 、大气温度 T_{atm} 和它们的误差、以及探测器参数 n 等都会影响目标真实温度的测量。

下面对测温精度与各个因素之间的关系进行计算分析。

2.1 发射率及其误差对测温的影响

从图3中可以看出:在相同的发射率误差条件下,中波红外优于长波红外测温精度;发射率越小,测量获得的测温误差越大。在发射率为0.6,相对误差为10%时,中波、长波红外测温误差分别小于1%和1.4%。

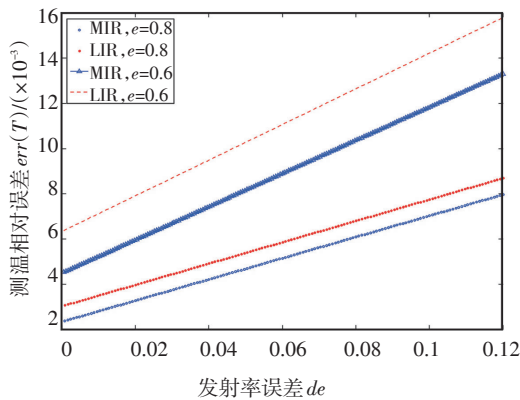


图3 发射率误差与测温误差的关系

2.2 环境等效辐射温度及其误差对测温的影响

在含有高温辐射源的背景环境中,环境等效辐射温度很难准确测量,因此其误差值相对较大,对测温精度的影响较大。图4为中波、长波红外热像仪测温误差与环境等效辐射误差的关系曲线,可以看出:中波红外测温精度优于长波红外测温精度。测温误差与环境等效辐射误差关系曲线的斜率与红外成像系统的参数 n 相关, n 值越大则测温精度越高。

2.3 大气透过率、大气温度及其误差对测温的影响

对近距离目标进行测温时,大气吸收可以忽略不计,但对较远目标测温时,大气透过率不可忽略且很难进行准确测量或估算,其误差对测温精度同样

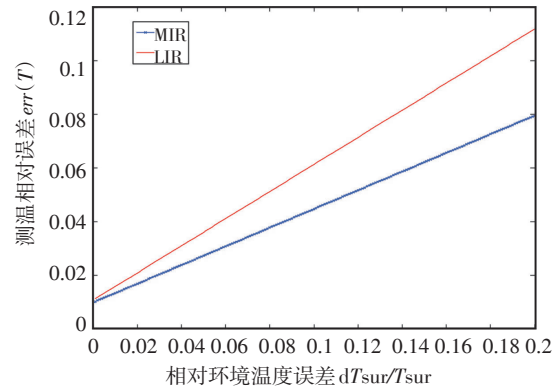


图4 环境等效辐射温度误差与测温误差的关系

有较大的影响,而大气温度的测量相对较为准确,因此,主要研究大气透过率对远处目标测温精度的影响。图5为不同大气温度误差与测温精度的关系曲线,可以看出:在相同条件下,中波红外比长波红外成像系统测温精度高,而大气温度的测量误差对测量精度的影响较小。

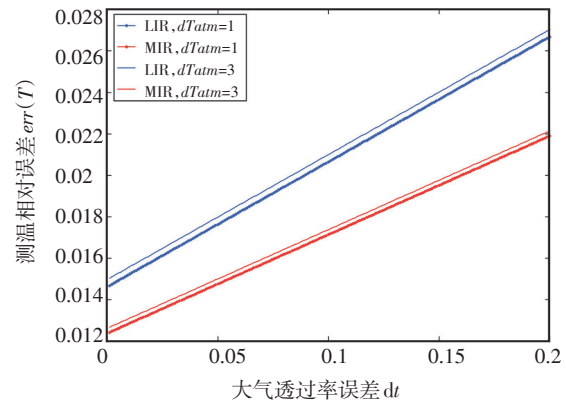


图5 大气透过率误差与测温相对误差的关系

2.4 所有参数及其误差对测温的影响

由于测温误差与多个参数相关,因此,需要对所有参数对整个测温误差进行整体分析,将式(9)进行变换,便可获得测温的最大相对温差公式

$$\begin{aligned} err(T_{obj}) &\leq \left| \frac{\epsilon\tau(Ad\tau + Bd\epsilon + CdT_{sur} + DdT_{atm})}{n(T_{IR}^n - (1-\epsilon)\tau T_{sur}^n - (1-\tau)T_{atm}^n)} \right| \\ &\leq \frac{\epsilon\tau(|Ad\tau| + |Bd\epsilon| + |CdT_{sur}| + |DdT_{atm}|)}{|n(T_{IR}^n - (1-\epsilon)\tau T_{sur}^n - (1-\tau)T_{atm}^n)|} \end{aligned} \quad (14)$$

图6中的计算数据真实环境辐射温度 $300\text{ K} \pm 3\text{ K}$,大气温度 $300\text{ K} \pm 0.5\text{ K}$,大气透过率 0.98 ± 0.1 ,目标

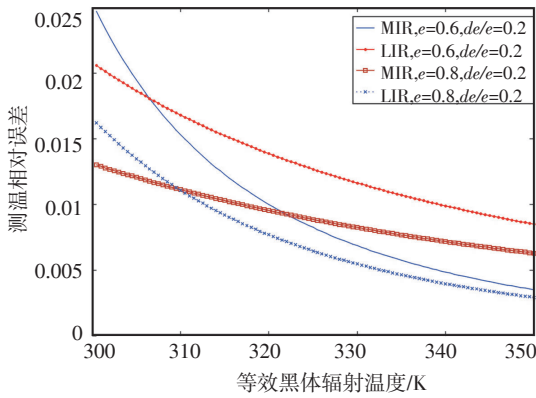


图6 中波红外热像仪测温最大误差与目标等效黑体温度之间的关系曲线

发射率分别为 $0.6 \pm 20\%$ 、 $0.8 \pm 20\%$ 的条件下获得的。可以看到：当所测目标等效黑体辐射增强（目标等效黑体辐射温度），则测温精度升高；目标发射率增大，测温精度提高；且目标等效辐射温度高于 310 K 后，中波红外测温精度高于长波红外测温精度。以上计算所使用的参数分别如表 1 所示。

表1 计算参数

| | | | | | |
|------------------|--------------|------------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------|
| $\epsilon=0.6$ | $\tau=0.98$ | $T_{sur}=300\text{ K}$ | $T_{atm}=300\text{ K}$ | $n_{MIR3.7-4.8}=10$ | $T_{ir}=313.15\text{ K}$ |
| $d\epsilon=0.12$ | $d\tau=-0.2$ | $dT_{sur}=3\text{ K}$ | $dT_{atm}=0.5\text{ K}$ | $n_{LIR7.7-9.3}=4$ | -- |

3 结 论

从上述分析可以看出：采用红外热像仪对目标

(上接第 76 页)

[7] 岑峰,戚飞虎,陈茂林.长期视频监控系统的分布模型差方法[J].红外与毫米波学报,2002,21(1):59-63.
 [8] 侯志张,韩崇昭.基于像素灰度归类的背景重构算法[J].软件学报,2005,16(9):1568-1576.
 [9] 胡敏,石美,汪荣贵.一种具有抗噪性的图像分割方法[J].计算机工程,2011,37(8):231-232.

(上接第 84 页)

[7] 姚连兴,仇维礼,王福恒.目标和环境的光学特性[M].北京:宇航出版社,1995:274.
 [8] 巨养锋,薛建国,张乐,等.激光隐身效果评估方法研究[J].

场景进行测温精度主要受到目标发射率 ϵ 、大气透过率 τ 、环境等效辐射温度 T_{sur} 、大气温度 T_{atm} 和它们的误差、以及探测器响应参数等因素相关。在保证以上参数精度的情况下,能保证系统的测温精度优于2%。对于存在高温辐射源的环境等效辐射温度很难准确测量,其测量误差对系统的测温精度影响最大。在其他条件相同时,中波红外成像系统测温精度比长波红外测温精度高。

参考文献

[1] 刘慧开,杨立.红外热像仪的最大测温误差分析[J].热科学与技术,2002(12):170-172.
 [2] 张建奇,方小平.红外物理[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004:2-5.
 [3] Gerald C Holst.红外成像系统测试与评价[M].张正辉,魏宇飞.昆明:《红外与激光工程》编辑部,2006:80-85.
 [4] 李旭东,胡铁力.红外热像仪SiTF的测试研究[J].应用光学,2005(10):22-24.
 [5] 杨立.红外热像仪测温计算与误差分析[J].红外技术,1999(7):21-23.
 [6] 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(9):1337-1339.
 [7] 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(9):420-422.
 [8] 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(2):43-45.
 [9] 胡剑虹,宁飞,沈湘衡,等.目标表面发射率对红外热像仪测温精度的影响[J].中国光学与应用光学,2010(4):152-155.

[10] 文志强,蔡自信.目标跟踪中巴氏系数误差的分析及其消除方法[J].计算机学报,2008,31(7):1165-1174.
 [11] 于雪莲,宋洋,刘晓红.运动目标检测和目标区域的估算[J].通讯技术,2011,44(5):119-120.
 [12] 陶文兵,金海.一种新的基于图谱理论的图像阈值分割方法[J].计算机学报,2007,30(1):110-119.

半导体光电,2011,32(3):436-438.
 [9] 韩意,孙华燕,李迎春,等.空间目标激光雷达散射截面仿真分析[J].红外与激光工程,2010,39(5):819-823.