

目标距离和视场角变化对红外热像仪 测温精度影响的理论分析

郭帮辉^{1,2}, 黄剑波¹, 王志¹, 吴宏圣¹

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2.中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 红外热像仪进行测温时, 目标距离和视场角变化, 会大大降低测温精度。根据几何光学和红外目标辐射理论, 推导出温度测量误差与目标距离和视场角之间的关系式, 并结合研制的一套红外热像仪系统参数, 计算了温度测量误差。提出了提高测温精度的方法, 采用此方法, 对相同条件下的物体测温, 测量误差仅为-0.22, 在很大程度上减小了目标距离和视场角变化对红外热像仪测温精度的影响。

关键词: 红外热像仪; 测温精度; 目标距离; 视场角; 温度修正

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1672-9870(2011)01-0016-04

Analysis of Effections on the Precision of Temperature Measurement Using Infrared Thermal Imaging System with the Change of Object Distance and Field

GUO Banghui^{1,2}, HUANG Jianbo¹, WANG Zhi¹, WU Hongsheng¹

(1.Changchun Institute of Optic, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: The change of object distance and field would enormously decrease the precision of temperature measurement using infrared thermal imaging system. In the paper, on the basis of theories of geometry optics and infrared object radiation, formulas of tolerance of temperature measurement relations with object distance and field were given. Tolerance of temperature measurement was calculated using the parameters of a designed infrared thermal imaging system. If temperature compensation would not be done, tolerance of temperature measurement would get to -3, which is too big to satisfy the precision of temperature measurement, when the temperature of the object is 300K, the distance is 3m, and the field is 4°. Basing on the analysis, a method of improving the precision of temperature measurement was given, the tolerance would be just -0.22 to the same situation if the method was taken, which could reduce the effect on the precision of temperature measurement using infrared thermal imaging system with the change of object distance and field.

Key words: infrared thermal imaging system; precision of temperature measurement; object distance; field; temperature correcting

红外热像仪既可以得到目标的红外图像, 同时也能测量目标的温度。其测温原理是: 被测目标辐射的红外线被光学系统聚焦在红外探测器靶面上, 将光信号转化为电信号, 在显示器上显示目标图像, 图像的灰度值就可以反映电信号的大小, 也反

映了目标辐射的红外线能量, 根据普朗克公式, 可以计算出目标的辐射温度^[1]。一般情况下, 在红外热像仪测温之前, 需要通过大量的黑体定标实验, 得到图像灰度值与黑体辐射温度之间的拟合公式。在测温时, 利用拟合公式, 由灰度值来计算目标辐

收稿日期: 2010-07-28

作者简介: 郭帮辉(1983-), 男, 博士研究生, 研究实习员, 主要从事光学系统设计方面的研究工作, E-mail: gbhxl@163.com。

射温度值。

红外热像仪测温具有以下优点:非接触、可以在图像中选取被测目标、可以远距离测量、灵敏度高、速度快、测温范围广等^[2-3]。目前,该技术已经广泛应用于国防军事和工业生产中,例如:夜间军事目标的辨别、变电站中的电气设备状态监测、炼钢厂的炉温测量等。

虽然红外热像仪测温技术与传统的测温技术相比有很多优点,但是有许多因素影响红外测温的精度。其中的一些主要因素有:目标辐射率、大气传输损耗、环境辐射、目标距离和视场角等^[4-6]。本文以几何光学和红外目标辐射理论为基础,结合设计的一套红外热像仪参数,分析了目标距离和视场角变化对红外热像仪测温精度的影响,提出了减小目标距离和视场角变化对测温精度影响的方法。

1 探测器输出与目标距离和视场角关系

由几何光学和红外目标辐射理论,推导出红外热像仪探测器输出与目标距离和视场角之间的关系式,由此关系式便可得到测温误差的表达式。

1.1 轴上点光照度

假设目标为朗伯体,物平面轴上目标物点 A,在波长 λ 处、温度为 T 时的辐亮度为 $L(T, \lambda)$,且在各方向上的光亮度相同,如图 1 所示,可以得到光轴周围微小面积范围内的像面光照度^[7]

$$E'_0(\lambda) = \pi\tau(\lambda)L(T, \lambda)\left(\frac{n'}{n}\right)^2 \sin^2 u'_m \quad (1)$$

式中: $\tau(\lambda)$ 为光学系统透过率, n 为物空间折射率, n' 为像空间折射率, u'_m 为像方孔径角。

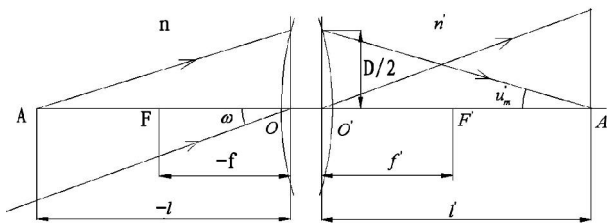


图 1 光学系统基本参数示意图

Fig.1 Basic parameters of optical system

在物空间和像空间折射率相等的情况下, $n' = n$,得

$$E'_0(\lambda) = \pi\tau(\lambda)L(T, \lambda)\sin^2 u'_m \quad (2)$$

由图 1 可以得到

$$\sin^2 u'_m = \frac{D^2}{D^2 + 4l^2} \quad (3)$$

由几何光学的牛顿公式可得

$$l' = f' + \frac{f'^2}{f-l} \quad (4)$$

式中, D 为光学系统入瞳直径, l 为物距, f 为物方焦距, l' 为像距, f' 为像方焦距。

将式(3)和(4)代入(2)中得

$$E'_0(\lambda) = \pi\tau(\lambda)L(T, \lambda) \frac{D^2}{D^2 + 4\left(f' + \frac{f'^2}{f-l}\right)^2} \quad (5)$$

从式(5)可以看出,当光学系统加工完成之后,系统透过率 $\tau(\lambda)$ 是定值,对于相同条件下的目标,辐亮度 $L(T, \lambda)$ 也是定值,在不改变光学系统光圈和焦距的情况下,像面轴上点照度由物距决定。

1.2 轴外点光照度

当光学系统不存在斜光束渐晕时,视场角为 ω 的轴外点对应的像面照度为^[7]

$$E' = E'_0 \cos^4 \omega \quad (6)$$

由以上分析和式(6),说明像面轴外点照度与物距和视场角都有关系。

1.3 探测器输出信号

由普朗克公式可知,黑体的辐射出射度为^[8]

$$W(T, \lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (7)$$

式中, $c_1 = 3.472 \times 10^{-16} \text{W} \cdot \text{m}^2$, $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$ 。

由朗伯体的辐射特性可得,被测目标的辐亮度 $L(T, \lambda)$ 为

$$L(T, \lambda) = \frac{\rho \cdot W(T, \lambda)}{\pi} \quad (8)$$

式中, ρ 为目标辐射率。

探测器的输出可以表示为

$$V(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\max} s(\lambda) A_d E'(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

式中, R_{\max} 是探测器的最大灵敏度, $s(\lambda)$ 是探测器的相对灵敏度, A_d 是单个探测元面积, λ_1, λ_2 是探测器工作波段。

将式(5)、(7)、(8)代入式(9)可得探测器轴上点输出

$$V_0(T) = \pi R_{\max} A_d c_1 \rho \sin^2 u'_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau(\lambda) s(\lambda)}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)} d\lambda \quad (10)$$

式中, A_d 是单个探测元面积, R_{\max} 是探测器的最大灵敏度, $s(\lambda)$ 是探测器的相对灵敏度, λ_1, λ_2 是探测

器探测的波段范围。

将式(5)-(8)代入式(9)可得探测器视场角为 ω 的轴外点输出

$$V_{\omega}(T) = \pi R_{\max} A_d c_1 \rho \sin^2 u'_m \cos^4 \omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\tau(\lambda) s(\lambda)}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} d\lambda \quad (11)$$

根据式(3)、(4)、(10)和(11),探测元面积、相对灵敏度、最大灵敏度、探测器带宽、系统焦距和入瞳直径都是由红外系统确定的。而对于相同条件下的同一目标,测试距离变化时,探测器的输出信号只与目标距离和视场角相关。

2 温度测量误差

结合设计的一套红外热像仪参数,根据以上推导的公式,从数值上计算目标距离和视场角变化对测温精度的影响。

当目标距离为1时,相对于目标距离,由式(10)可以得到像面轴上点输出信号的相对差值为

$$\xi_V = \frac{V_l - V_{\infty}}{V_{\infty}} = \frac{4f^e + D^2}{4[\frac{f^e}{f-l} + f^{\prime 2}] + D^2} - 1 \quad (12)$$

像面轴外点输出信号为轴上点输出信号的 $\cos^4 \omega$ 倍。

由斯提芬-玻尔兹曼定律,普朗克公式的波长从0到 $+$ 积分,得到黑体的辐射出射度^[8]

$$W = \sigma T^4 \quad (13)$$

式中, σ 是斯提芬-玻尔兹曼常数。

黑体对应最大辐射波长的最大辐射出射度与温度的五次方成正比,因此,目标波长从 λ_1 到 λ_2 积分,得到的辐射出射度为

$$W = \alpha T^x \quad (14)$$

式中, α 是与波段范围有关的常数,幂级数 x 的范围为:4 x 5。为估算由于物距和视场变化导致的最大温度测量误差,取 $x=4$ 。

温度相对误差为:

$$\xi_T = \frac{T_l - T_{\infty}}{T_{\infty}} = \left(\frac{V_l}{V_{\infty}} \cos^4 \omega \right)^{\frac{1}{4}} - 1 = \left(\frac{4f^e + D^2}{4[\frac{f^e}{f-l} + f^{\prime 2}] + D^2} \cos^4 \omega \right)^{\frac{1}{4}} - 1 \quad (15)$$

式中, T_l 是物距为1,视场角为 ω 的被测目标温度, T_{∞} 为物距为 ∞ ,视场角为 0° 的被测目标温度。

设计的红外热像仪参数。工作波长:8 μ m~12 μ m,像方焦距: $f^{\prime}=50$ mm,入瞳直径: $D=25$ mm,视场角: $\pm 7^\circ$,物距范围:3m ~ ∞ ,对100 K黑体测

温误差小于2%。

将红外热像仪参数代入式(12)和(15),可以得到不同物距和不同视场条件下,相对于物距的轴上点信号相对差值,如表1所示,相对温度测量误差,如表2所示。

表1 不同物距和视场条件下的输出信号误差 ξ_V

Tab.1 Relative tolerance of exported signal in different object distances and fields

-1	ω				
	0°	$\pm 2^\circ$	$\pm 4^\circ$	$\pm 6^\circ$	$\pm 7^\circ$
3m	-3.12%	-3.35%	-4.06%	-5.22%	-5.97%
6m	-1.56%	-1.80%	-2.52%	-3.70%	-4.47%
12m	-0.78%	-1.02%	-1.75%	-2.94%	-3.71%
100m	-0.09%	-0.34%	-1.06%	-2.27%	-3.04%
1000m	-0.01%	-0.25%	-0.98%	-2.18%	-2.96%

表2 不同物距和视场条件下的相对测量温差 ξ_T

Tab.2 Relative tolerance of temperature measurement in different object distances and fields

-1	ω				
	0°	$\pm 2^\circ$	$\pm 4^\circ$	$\pm 6^\circ$	$\pm 7^\circ$
3m	-0.77%	-0.83%	-1.00%	-1.28%	-1.46%
6m	-0.39%	-0.45%	-0.62%	-0.91%	-1.10%
12m	-0.19%	-0.25%	-0.43%	-0.73%	-0.91%
100m	-0.02%	-0.08%	-0.26%	-0.56%	-0.75%
1000m	-0.002%	-0.06%	-0.24%	-0.54%	-0.73%

从表1和表2可以看出,物距越小,相对信号差值越大,同时,测量的温度误差越大;视场角越大,相对信号差值越大,测量的温度误差越大。例如,用此系统测量温度分别为300K和373K的物体,当物距为3m,视场角为 4° 时,测量误差分别为-3%和-3.73%,测量绝对误差是非常大的,无法达到测温精度要求。

在红外热像仪定标时,一般是把黑体放在近距离,得到灰度与温度的拟合方程,在实际测温时,用此方程来测量目标的温度,如果不加以修正,则会产生表2所示的温度测量误差。

因此,用红外热像仪进行测温时,为了提高测温精度,必须对定标方程得到的温度值进行适当修正。

3 提高测温精度的方法

由以上分析,可以得到目标距离和视场角变化对测温精度的影响。为了提高红外热像仪的温度测量精度,在对目标进行测温时,可以对温度测量值进行适当的修正。修正的方法如下:

(1) 将红外探测器放在机械滑台上,在物距

改变时,通过滑台的移动量,读出像面的位置,由式(3)可以计算出像方孔径角 u'_m ;

(2) 由被测目标在探测器上的像点坐标位置 (x', y') , 机械滑台得到的像面位置 l' , 计算目标视场角 $\omega = \arctan(r'/l')$, $r' = \sqrt{x'^2 + y'^2}$;

(3) 由 u'_m 和 ω , 通过式(15)计算温度相对误差值;

(4) 将计算得到的温度相对误差值作为修正值,对定标方程得到的温度值进行修正,可以减小目标距离和视场角变化对测温精度的影响。

利用以上方法,对温度测量值进行补偿,由于像面位置和成像点位置存在一定的读取误差,从而无法完全消除目标距离和视场角变化引起的温度测温误差。对式(15)求偏倒数,可以得到温度补偿的残余误差

$$\xi_r = \left(\frac{4f^2 + D^2}{4l'^2 + D^2} \frac{l'^4}{(r'^2 + l'^2)^2} \right)^{\frac{1}{4}} - 1 \quad (16)$$

$$\Delta \xi_r = \left| \frac{\partial \xi_r}{\partial l'} \Delta l' \right| + \left| \frac{\partial \xi_r}{\partial r'} \Delta r' \right| \quad (17)$$

表 3 温度补偿之后的相对测量温差 $\Delta \xi_r$

Tab.3 Relative tolerance of temperature measurement after temperature correcting

-l	ω				
	0°	±2°	±4°	±6°	±7°
3m	0.049%	0.052%	0.055%	0.058%	0.059%
6m	0.048%	0.051%	0.054%	0.057%	0.058%
12m	0.048%	0.051%	0.054%	0.056%	0.058%
100m	0.047%	0.050%	0.053%	0.056%	0.057%
1000m	0.047%	0.050%	0.053%	0.056%	0.057%

在本系统中,使用的机械滑台的位置读取误差是 $\Delta l' = 50 \mu\text{m}$, 红外探测器像点位置读取误差为 2 个像素, $\Delta r' = 50 \mu\text{m}$, 代入式(17), 可以得到温度补偿之后的残余误差如表 3 所示。

从表 3 可以看出,进行温度补偿之后,在系统

使用的物距和视场角范围内,温度残余误差不超过 0.06%,对于 100 黑体的测温绝对误差不超过 0.22,采用此温度补偿方法,在很大程度上降低了目标距离和视场角变化导致的测温误差。

4 结束语

本文从理论上推导出红外热像仪测温精度与目标距离和视场角之间的关系式,如果不进行温度补偿,对于某型号红外热像仪,使用 100 黑体,当物距为 3m,视场角为 4°时,测量绝对误差为 -3.73,无法满足测温精度要求。在理论分析的基础上,提出了温度补偿方案,结果表明:在相同条件下,测温绝对误差不超过 0.22,在很大程度上提高了测温精度。而且此方案在工程应用中比较容易实现,对于提高红外热像仪测温精度有很大的作用。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 许中胜.红外探测系统参数关系及实际应用[J].光学精密工程,1999,7(24):81-85.
- [3] 张先明.红外热像仪测温功能分析[J].激光与红外工程,2007,37(7):647-649.
- [4] 孙丽,宦克为,邱旭,等.距离对红外热像仪测温精度的影响及校正方法研究[J].长春理工大学学报:自然科学版,2008,31(1):33-35.
- [5] 许猛,李恩普,张晓娟.红外测温中环境辐射影响的分析[J].计测技术,2007,27(3):4-6.
- [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.
- [7] 安连生.应用光学[M].北京:北京理工大学出版社,2002:103-117.
- [8] 田裕鹏.红外检测与诊断技术[M].北京:化学工业出版社,2006:5-23.