

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.05.02

目标距离变化对热像仪测温精度影响分析

孙禹, 蔡静

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 热像仪测温时, 测量距离的变化会降低测温精度。本文根据红外辐射理论及光学系统中辐射传输理论计算推导出测量误差与测温距离之间的关系。同时结合一套热像仪计算测量误差, 提出一种通过 Matlab 修正距离影响的方法。在不同距离下测量黑体辐射源温度时, 测温误差在 0.09% 以内, 与没有做距离修正的测量值相比有很大程度的提升。

关键词: 红外热像仪; 测温精度; 目标距离; 温度修正; 红外测温

中图分类号: TN21; TB942

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2016)05-0005-04

Analysis of Influence of Distance on Temperature Measurement Accuracy of Infrared Thermal Imagers

SUN Yu, CAI Jing

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The change of object distance would enormously decrease the precision of temperature measurement using infrared thermal imaging system. In this paper, on the basis of theories of infrared object radiation and translation of radiation in geometry optics, formulas of tolerance of temperature measurement relations with object distance were derived. Tolerance of temperature measurement was calculated by using the parameters of a designed infrared thermal imaging system. Basing on the analysis, a method of improving the precision of temperature measurement by Matlab was given. The tolerance would be just 0.09% 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.

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

0 引言

红外热像仪测温技术是一种非接触式测温方法, 是当今精确测温技术的重要发展方向之一^[1-2]。该技术是通过光学系统, 将物体辐射接收到红外焦平面阵列探测器上来确定其温度^[3-4]。被红外热像仪系统接收的红外辐射, 由于受到测试距离、瞬时视场角、大气损耗、光学系统内杂散光等因素的影响^[5-6], 而与物体表面的辐射不同, 进而导致热像仪所测温度与物体的真温不一致。

本文以几何光学和红外目标辐射理论为基础, 结合一套红外热像仪系统, 重点分析热像仪实际测温距离与标定距离不一致所带来的测量误差, 并提出减小此影响的方法。

1 待测像面照度与目标距离的关系

红外热像仪, 即辐射测温法的理论基础, 是普朗克定律: 单位面积黑体在半球面方向、单位时间的光谱辐射能量。是波长 λ 和黑体温度 T 的函数, 其具体公式如(1)所示^[7]。

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

式中: $W(T, \lambda)$ 为黑体光谱辐射出射度, $W/(\mu\text{m} \cdot \text{m}^2)$; c_1 为第一辐射常数, $c_1 = 3.741 \times 10^{-16} \text{W} \cdot \text{cm}^2$; c_2 为第二辐射常数, $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{W} \cdot \text{K}$; λ 为光谱辐射的波长。

假设被测物体为朗伯体。由朗伯体的辐射特性可得, 被测目标的辐亮度 $L(T, \lambda)$ 为

$$L(T, \lambda) = \frac{\rho W(T, \lambda)}{\pi} \quad (2)$$

式中: ρ 为目标辐射率。

收稿日期: 2016-07-20

作者简介: 孙禹 (1992-), 男, 天津人, 硕士研究生, 主要从事红外测温方面的研究。

假设辐射能量经过理想的光学透射系统,如图1所示,设发光物体是与透镜主光轴垂直的矩形面元 $dS = dx dy$, 辐亮度 $L(T, \lambda)$; 它的像 dS' 也为一矩形面元, 并且垂直于主光轴, 设光学系统遵循阿贝正弦条件。

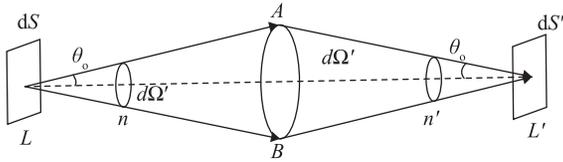


图1 透射式热像仪系统

由 dS 辐射到光学系统入射光瞳处的辐射功率为

$$dP = L(\theta, \varphi) dx dy \sin \theta_0 \cos \theta_0 d\theta_0 d\varphi \quad (3)$$

其中辐射立体角为 $\sin \theta_0 d\theta_0 d\varphi = d\Omega_0$ 。若该系统无损耗, 则此辐射功率必从立体角元 $d\Omega' = \sin \theta'_0 d\theta'_0 d\varphi'$ 通过像空间的面积元 $dS' = dx' dy'^{[8]}$ 。此时像的辐射亮度 $L'(T, \lambda)$, 则

$$dP' = L'(\theta', \varphi') dx' dy' \sin \theta'_0 \cos \theta'_0 d\theta'_0 d\varphi' \quad (4)$$

根据正弦条件

$$\begin{aligned} n dx \sin \theta_0 &= n' dx' \sin \theta'_0, \\ n dy \sin \theta_0 &= n' dy' \sin \theta'_0, \quad d\varphi' = d\varphi \end{aligned}$$

由以上各式可以得到

$$\frac{L(\theta', \varphi')}{n^2} = \frac{L(\theta, \varphi)}{n'^2} \quad (5)$$

在实际使用中, $n = n'$, 同时考虑到光学系统吸收反射等因素, 设其透过率为 τ 。

$$L'(\theta', \varphi') = \tau L(\theta, \varphi) \quad (6)$$

此时, 像的辐射照度为

$$E' = \pi \tau L \sin^2 \theta'_0 \quad (7)$$

再由几何光学高斯公式, $\frac{f}{l} + \frac{f'}{l'} = 1$ 推导出

$$\sin^2 \theta'_0 = \frac{r^2}{r^2 + l'^2} = \frac{r^2}{r^2 + (f' + \frac{ff'}{l-f})^2} \quad (8)$$

式中: r 为光瞳半径, f 为物方焦距, l 为物距, 皆为负值; f' 为像方焦距, 正值。将(8)带入(7), 同时将 f 与 l 变为正值, 即距离绝对值, 则

$$E' = \pi \tau L \frac{r^2}{r^2 + (f' + \frac{ff'}{f-l})^2} \quad (9)$$

由式(9)可见, 在不改变光学系统光圈和焦距的情况下, 像面近轴点照度由物距决定。

2 测温准确度与目标距离关系的理论分析

红外热像仪通过使被测物体成像于 CCD 上, 将像的辐射照度转化为电信号, 其响应与单个像元上的辐射照度成线性相关。由式(9)得, 辐射照度在光学系统一定的情况下, 只与距离有关。所以, 热像仪所测图像灰度值随距离变化相对于标定距离所测灰度值, 比值为

$$\Delta = \frac{H_L}{H_0} = \frac{r^2 + (f' + \frac{ff'}{f-l})^2}{r^2 + (f' + \frac{ff'}{f-x})^2} \quad (10)$$

式中: l 为标定距离; x 为测量距离。

结合设计的一套红外热像仪光学系统, 为了得到合适的相对孔径以及视场, 物镜采用了双高斯结构进行优化, 物镜部分如图2所示。

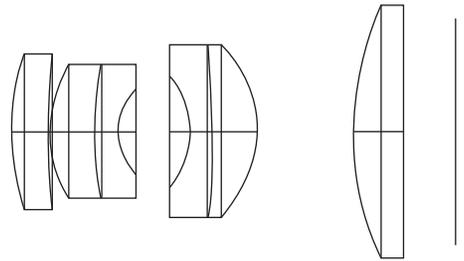
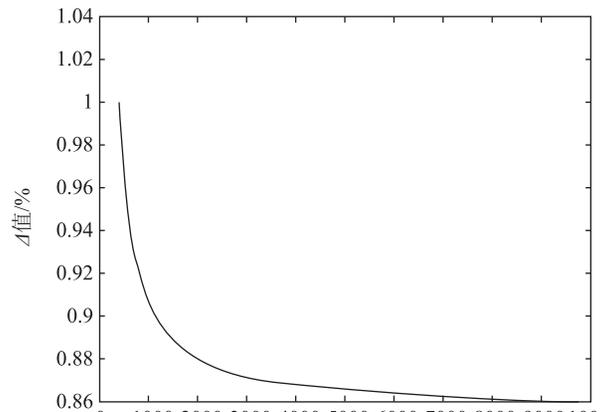


图2 红外热像仪物镜系统

系统参数: 光圈数 $F=2$, 入瞳半径 $r=7.4 \text{ mm}$, 等效焦距 $f=f'=29.6 \text{ mm}$, 设标定距离为 400 mm , 带入可得

$$\Delta = \frac{H_L}{H_0} = \frac{796.5}{54.76 + (29.6 + \frac{876.16}{29.6-x})^2} \quad (11)$$

实际测量时, 目标距离大于 400 mm 。依照此公示, 将具体测量距离带入计算, 可得理论值如图3所示



可以看出,理论上讲,随着距离增大,同一像元所成图像灰度值是呈减小趋势的,并且随着距离不断增大,变化趋势逐渐减小。灰度值的减小,最终导致了测温准确性的降低。

3 测量误差实验及其修正

3.1 实验设计

由上述分析可知,距离变化引起的测温误差,直接体现在图像的灰度值大小上。所以设计实验中,选择了积分球作为辐射源,结合实验设计的一套热像仪系统,记录图像灰度值随距离变化的数据,观测其与上述推断结论是否吻合。

实验装置示意图如图 4 所示。

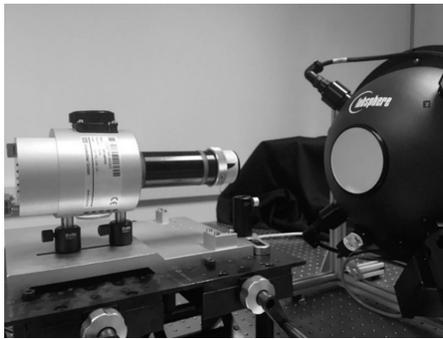
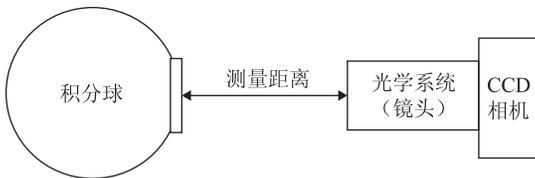


图 4 实验装置图

实验选取 labsphere 公司的 MC-1000 积分球、VDS 公司的 NIR-300FPGE 近红外 CCD, 以及自行设计的红外热像仪镜头。

实验中,将热像仪系统瞄准积分球窗口,镜头前表面至积分球 400 mm,步进为 50 mm,逐渐增大至 900 mm,在各个距离下捕捉图像。得到各个距离下对同一辐射物体拍摄的图像灰度值,绘制灰度值随距离变化的曲线。

由于随着距离的增大,积分球窗口无法完全充满视场,同时基于积分球良好的均匀性,在处理数据时选用各图像中心 11×11 像元灰度的平均值。得到实际测量时灰度值随距离变化的曲线,并且分析其与理论推导值之间的差异以及差异的成因。曲线如图 5 所示。

由图 5 可见,实际测量值曲线趋势大体吻合于理论值:整体呈下降趋势,下降趋势随着距离增加逐渐

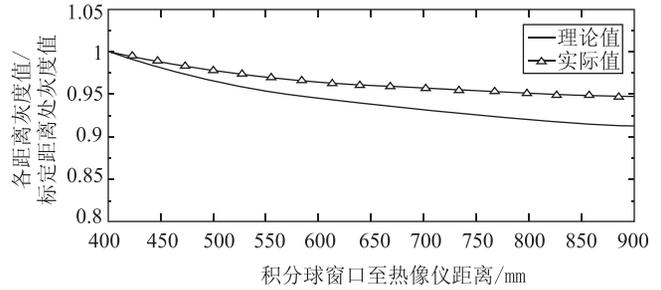


图 5 图像灰度值随距离变化理论趋势与实测趋势对比

趋于平稳。但实测值整体略高于理论值,分析认为是由于镜头加工精度以及进入系统的杂散光造成了实际测量值略大于理论推导值。

3.2 距离引起测量误差的修正

本实验使用黑体辐射源结合红外热像仪系统,对修正测量距离所引起的误差进行了实验分析。由前文可知:测温误差的直接原因,是接受图像灰度值随距离变化引起的。因此,本文提出的修正方法,是直接针对于图像灰度值,而并非针对于温度的。

测温时,首先对整套系统进行标定,本实验标定距离为 450 mm,即参考矩阵皆为 450 mm 处所拍图像的灰度值矩阵。

进行修正时,确定待测图片的距离,使用本文上部分拟合出的曲线,输入真实的测温距离,通过 Matlab 对灰度值矩阵进行整体修正。之后,再对已经进行过距离修正的待测图片灰度值矩阵进行温度计算。

本实验分别对 600, 620, 650℃ 黑体炉, 450, 550, 650, 750mm 距离条件下进行了测温,同时提供了距离因素修正前后的对比数据,实验数据如表 1 所示。

表 1 不同距离不同温度时修正距离影响前后测温数据

		影响前后测温数据				℃
		测量距离	450mm	550mm	650mm	750mm
600℃	修正前温度	600	599.0096	597.5801	596.5857	
	修正后温度	600	600.5876	599.7358	599.7069	
620℃	修正前温度	620	619.2866	617.3873	615.6392	
	修正后温度	620	620.2969	619.6913	619.6073	
650℃	修正前温度	650	648.8684	646.9720	645.3403	
	修正后温度	650	649.9259	649.3842	649.4958	

从表 1 中可以看出,矫正之前测温误差明显,经校正之后红外热像仪所测得的温度值虽然与理论值还存在一定的误差,但可以得到较为精确的数据,误差基本控制在 0.09% 以内,满足了实验的需求。可见采

用此温度补偿方法,在很大程度上降低了目标距离变化导致的测温误差。

4 结论

本文从理论上推导出红外热像仪测温精度与目标距离之间的关系式,如果不进行温度补偿,对于实验搭建的红外热像仪系统,无法满足测温精度要求。在理论分析的基础上,结合本系统提出了温度补偿方案。结果表明:对于提高红外热像仪测温精度有很大的作用,在650℃时测温精度控制在了0.5%以内。同时根据理论推导发现,在光学系统设计时,提高入瞳直径或者减小焦距,即减小F值,可以减小距离影响,实际设计中应与具体应用结合。

参 考 文 献

[1] 张勇,王新赛,贺明. 距离对红外热像仪测温精度的影响及误差修正[J]. 红外, 2011, 32(2): 24-27.

[2] 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.

[3] Christian. K. Infrared Thermal Imaging to Measure Local Temperature Rises Caused by Handhold Mobile Phones [J]. Science, 2005, 54(4): 1513-1519.

[4] 苏佳伟,石俊生,汪炜韬. 距离对红外热像仪测温精度影响及提高精度的实验研究[J]. 红外技术, 2013, 35(9): 587-590.

[5] 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.

[6] Jonathan T. C., Gregory B. R., Jay B., et al. Near - infrared Diode Laser Absorption Diagnostic for Temperature and Water Vapor in a Scramjet Combustor[J]. Applied Optics, 2005, 44(31): 6701-6711.

[7] 郭邦辉,黄剑波,王志,等. 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[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2011, (34)1: 16-20.

[8] 杨风暴. 红外物理与技术[M]. 1版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 97-102.

(上接第4页)

左右,这说明改变静压的方式来提高恢复系数效果并不明显。

5 结论

本文通过建立三维定常流热耦合数值模拟模型,对K型温度传感器进行了超音速条件下的数值模拟研究,为传感器实验和设计提供了理论基础。在超音速条件下,对影响温度传感器恢复系数的几个关键影响量做了定量分析。研究表明:单屏蔽式结构、总温和马赫数对于传感器恢复系数的提升帮助很大;传感器外径尺寸、静压对于温度传感器的恢复系数影响很小。

参 考 文 献

[1] Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. A New k-ε Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows [J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227-238.

[2] 任志安,郝点,谢红杰. 几种湍流模型及其在FLUENT中

的应用[J]. 化工装备技术, 2009, 30(2): 38-40.

[3] 赵飞,张延玲,朱荣,等. 超音速射流流场中湍流模型[J]. 北京科技大学学报, 2014(3): 366-372.

[4] 赵静,魏英杰,张嘉钟,等. 不同湍流模型对空化流动模拟结果影响的研究[J]. 工程力学, 2009, 26(8): 233-238.

[5] 周凌九,胡德义,王正伟. 可实现性k-ε模型在水轮机流场计算中的应用[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(1): 68-72.

[6] Habibi A, Merci B, Heynderickx G J. Impact of radiation models in CFD simulations of steam cracking furnaces [J]. Computers & Chemical Engineering, 2007, 31(11): 1389-1406.

[7] 李铁,李伟力,袁竹林. 用不同辐射模型研究下降管内传热质特性[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(2): 92-98.

[8] 薛大文,陈志华,韩珺礼. 三维圆柱和方柱的高超声速绕流特性比较研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2013, 37(2): 269-274.