

文章编号: 1002-2082(2006)SO-0028-05

红外热像仪测试系统校准

胡铁力¹, 韩 军², 郑克哲¹, 薛战理¹, 李旭东¹

(1. 西安应用光学研究所, 西安 710065; 2. 西安工业大学 光电学院, 西安 710011)

摘要: 针对如何建立红外热像仪测试系统的校准和量值溯源这一困扰当今红外计量领域的技术难题, 通过精密测温扫描辐射计测量红外热像仪测试系统的差分温度传输比, 实现红外热像仪测试系统校准方案及量值溯源。从差分温度和差分温度传输比出发, 分析了黑体和高发射率靶标产生的差分温度传输比模型, 介绍了 2 个面源黑体产生的差分温度传输比模型的复杂性。指出红外热像仪测试系统温差传输比对红外热像仪信号传递函数、最小可分辨温差及最小可探测温差等参数测量的影响, 验证了采用精密测温扫描辐射计测量差分温度传输比实现红外热像仪测试系统校准的科学性。

关键词: 红外热像仪; 差分温度; 传输比; 面源黑体; 信号传递函数

中图分类号: TN216

文献标志码: A

Calibration facility of infrared imaging systems

HU Tie-li¹, HAN Jun², ZHENG Ke-zhe¹, XUE Zhan-li¹, LI Xu-dong¹

(1. Optical Metrology Laboratory, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

2. Photoelectricity Institute, Xi'an Industrial University, Xi'an 710011, china)

Abstract: Aiming at the technical problems appearing in the field of infrared metrology, that is, how to build up a testing facility to calibrate infrared imaging systems and to trace back to the quantity value, a calibration facility of the testing subsystems in infrared imaging systems to measure the differential temperature transmittance with a precision temperature measurement scanning radiometer was achieved. Proceeding from the differential temperature and its transfer ratio, the model of differential temperature transfer ratio produced by blackbody and high-resolution target is analyzed. The complexity of the model resulted from two large-area blackbodies is introduced. The effect of temperature difference transmittance of the testing system for infrared imaging systems on SiTF, MRTD and MDTD of infrared imaging systems is pointed out in this paper. The scientificness of the scheme for the calibration of the testing facility is verified.

Key words: infrared imager; differential temperature; transmittance; large-area blackbody; SiTF

引言

随着光电子技术的迅猛发展, 红外热像仪已经在陆海空各军兵种的武器系统和民用领域得到了广泛的应用。在 20 世纪末期和 21 世纪初期, 我国国

防军事工业先后建立起了多种类型的红外热像仪测试系统, 开展了许多红外热像仪测量工作。但到目前为止, 大量红外热像仪测试系统本身的差分温度传输比(即仪器常数)一直缺乏准确的校准, 以及

收稿日期: 2006-07-28; 修回日期: 2006-08-20

作者简介: 胡铁力(1965—), 男, 黑龙江铁力市人, 西安应用光学研究所高级工程师, 主要从事红外计量研究工作。E-mail: hu_tieli@hotmail.com

测量量值无法进行准确的量值溯源,从而制约着我国红外热像仪技术的进一步发展。针对目前存在的红外热像仪测量系统仪器常数、校准方法、测量量值溯源方面的问题,本文分析了经典的由一个面源黑体和高发射率靶标组成的温差辐射源的差分温度传输比模型,以及2个面源黑体和反射式靶标组成的温差辐射源的差分温度传输比模型的复杂性,给出差分温度传输比对红外热像仪的信号传递函数SiTF、最小可分辨温差MRTD、最小可探测温差MDTD等参数的影响程度及红外热像仪测量系统校准方法,提出了将红外热像仪测量量值溯源到常温凝固点黑体的技术路线。

1 传输比

在红外热像仪测试中,被测试红外热像仪的输入信号是指红外热像仪测试系统在其光学准直系统的出射口向被测试红外热像仪提供的辐射温差(又称差分辐射温度)。被测试红外热像仪的输出信号往往是视频差分电压,通过对被测试红外热像仪输出信号和输入信号的运算,可得到被测试红外热像仪的许多性能参数。但在具体测试计算红外热像仪技术性能参数时,测试人员首先应该理解2个温差(即差分温度):第1个温差是红外热像仪测试系统中面源黑体温度测控仪器的显示温差,它是面源黑体和红外靶标向红外热像仪测试系统提供的输入温差;第2个温差是红外热像仪测试系统的输出温差,即红外热像仪测试系统在其光学准直系统的出射口向被测试红外热像仪提供的实际辐射温差。将红外热像仪测试系统的仪表显示温差乘以红外热像仪测试系统的传输比,就可以得到红外热像仪测试系统在其光学准直系统出射口向被测试红外热像仪提供的辐射温差。通过推导被测试红外热像仪得到的输入差分辐射温度与其输出视频电压信号间的信号传递函数,便可分析测试系统的差分温度传输比与哪些因素有关。

1.1 双黑体测试系统温差传输比

红外热像仪双黑体测试系统如图1所示。2个面源黑体产生的差分温度应该等于目标黑体仪表显示温度与背景黑体仪表显示温度之差,被测试红外热像仪的输入量指准直光管出射口处的差分辐射温度,产生的输出信号为差分视频电压 ΔU_{UUT} ,

其表达式为

$$\Delta U_{\text{UUT}} = G \frac{\pi A_d}{4F_{\text{UUT}}^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) [\varepsilon_T L(\lambda, T_T) - \rho_{TB}(\lambda) \varepsilon_B L(\lambda, T_B)] Tr_{\text{UUT}}(\lambda) \times Tr_{\text{Test}}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中: G 为被测试红外热像仪的电子增益; A_d 为被测试红外热像仪中单元探测器的光敏面面积; F_{UUT} 为被测试红外热像仪的 F 数; λ_1 和 λ_2 分别为被测试红外热像仪光谱响应带宽的上下限; $R(\lambda)$ 为被测试红外热像仪探测器光谱响应度; ε_T 为目标黑体的有效发射比; ε_B 为背景黑体的有效发射比; $\rho_{TB}(\lambda)$ 为反射式靶标的光谱反射比; $L(\lambda, T_T)$ 为目标黑体的光谱辐射亮度; $L(\lambda, T_B)$ 为背景黑体的光谱辐射亮度; $Tr_{\text{UUT}}(\lambda)$ 为被测试红外热像仪的光谱传输比; $Tr_{\text{Test}}(\lambda)$ 为测试系统中主镜、次镜及大气的光谱传输比。

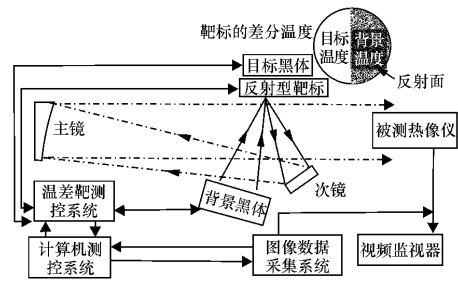


图1 红外热像仪双黑体测试系统

Fig. 1 Double-blackbody testing system of IR imager

运用中值定理并作近似处理,可以将(1)式化简为

$$\Delta V_{\text{SYS}} = \text{SiTF} \cdot \varphi(\varepsilon_T, \rho_{TB}, \varepsilon_B, T_{\text{Test}}) \cdot \Delta T \quad (2)$$

式中: SiTF 为被测红外热像仪的信号传递函数; $\varphi(\varepsilon_T, \rho_{TB}, \varepsilon_B, T_{\text{Test}})$ 为红外热像仪测试系统的温差传输比; ΔT 为辐射黑体与背景黑体仪表显示的温差。

从(2)式可以看出,用于红外热像仪测试的双黑体型测试系统,其差分温度传输比不能简单地通过将测试系统中的面源黑体发射率、反射式靶标的反射比、光学元件综合反射比以及大气透过率相乘来获得。尤其是长期使用的测试装置,往往会出现光学元件微小移位、表面蒙灰甚至污染及氧化,面源黑体与靶标离焦、面源黑体温度漂移、发射比改变等情况。因此,对于红外热像仪的双黑体型测试系统,其差分温度传输比必须通过定期的校准。

1.2 单黑体测试系统温差传输比

对于由一个面源黑体和高发射率靶标提供差分温度的红外热像仪单黑体测试系统,将面源黑体和高发射率靶标产生的差分温度辐射经准直光管投射到准直光管出射口(其值作为被测试红外热像仪的输入量),将面源黑体和辐射背景的高发射率靶标表面近似看作 Lambert 体,并近似认为两者的有效发射率相等,则被测试红外热像仪产生的相应视频差分电压信号输出 ΔU_{UUT} 为

$$\Delta U_{\text{UUT}} = G \frac{A_d}{4F_{\text{UUT}}^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda} R(\lambda) [M(\lambda, T_T) - M(\lambda, T_B)] \epsilon T r_{\text{Test}}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

将 $M(\lambda, T_T) - M(\lambda, T_B)$ 中的 T_T 表示为 $T_T = T_B + \Delta T$, 则根据泰勒公式, 可得到

$$M(\lambda, T_B + \Delta T) - M(\lambda, T_B) = \left[\frac{\partial M(\lambda, T_B)}{\partial T_B} \right] \times \Delta T + \left[\frac{\partial^2 M(\lambda, T_B)}{\partial^2 T_B} \right] \frac{\Delta T^2}{2} + \dots \quad (4)$$

通过分析计算可以知道, 对于常温区域, 在 $8 \mu\text{m} \sim 14 \mu\text{m}$ 的 LMIR 光谱范围内, 当 $\Delta T \leq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 时和在 $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 的 MWIR 光谱范围内, 当 $\Delta T \leq 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, (4) 式的第一项产生的误差小于 0.1%, 可忽略。由此可认为差分辐射出射度与温度的偏导数成正比, 即

$$M(\lambda, T_B + \Delta T) - M(\lambda, T_B) = \left[\frac{\partial M(\lambda, T_B)}{\partial T_B} \right] \Delta T \quad (5)$$

将(5)式代入(3)式, 化简后得到

$$\Delta U_{\text{UUT}} = \text{SiTF}_{\text{UUT}} \cdot [\epsilon T r_{\text{Test}}(\lambda) \cdot \Delta T] \quad (6)$$

式中 SiTF_{UUT} 为被测试红外热像仪的信号传递函数, 可简写为 SiTF。

在近似情况下, (6) 式中的 $\epsilon \cdot T r_{\text{Test}} \cdot \Delta T$ 被认为是准直光管出射口差分辐射温度, 其值等于红外热像仪测试系统的仪表显示温差值 ΔT 乘以 $\epsilon \cdot T r_{\text{Test}}$, 此时 $\epsilon \cdot T r_{\text{Test}}$ 可被近似地认为是红外热像仪测试系统的差分温度传输比(即红外热像仪测试系统的仪器常数)。

(6) 式是在接近理想情况下得到的近似结果。这时我们认为红外热像仪测试系统的光机结构已调试到理想状态, 比如靶标、面源黑体均已准确调试到主镜的焦面上, 背景黑体以最适合角度入射到准直光管的主镜上, 次镜空间位置已完全调整到位, 面源黑体和靶标的发射比及光学元件反射比保

持不变等。但长期处于工作状态的红外热像仪测试装置往往并不是处于理想工作状态。如果我们在计算红外热像仪测试系统的传输比时按照理想状况来近似, 以(6)式来计算红外热像仪测试系统的差分温度传输比, 则会出现较大的误差。例如, 许多红外热像仪测试系统差分温度传输比的标称值大于 0.95, 其真实的差分温度传输比一般都低于此值, 经长期使用后, 红外热像仪测试系统的差分温度传输比往往低于 0.92。因此, 由一个面源黑体和高发射率靶标提供差分温度的红外热像仪单黑体测试系统, 其差分温度传输比同样需经过实际测量得到, 且在使用过程中需作定期的校准。

2 传输比对红外热像仪测试的影响

如果测试系统的差分温度传输比误差较大, 那么这个误差将进一步影响到被测试红外热像仪参数测试的准确度, 从而导致被测试红外热像仪的信号传递函数(SiTF)、最小可分辨温差(MRTD)和最小可探测温差(MDTD)等参数测试结果出现较大误差。

2.1 传输比对 SiTF 的影响

信号传递函数 SiTF 可以准确地反映红外热像仪的增益及电平对热像仪视频图像的控制作用和红外热像仪的线性响应区域、动态范围及饱和趋势。通过信号传递函数可以进一步测量得到红外热像仪的时域噪声等效电压、空域噪声等效电压及 3D 噪声等其他重要参数。

实际测量红外热像仪的信号传递函数 SiTF 时, 国际上通用的计算公式为

$$\text{SiTF} = \frac{\Delta U_{\text{UUT}}}{\varphi \cdot \Delta T} \quad (7)$$

式中: ΔU_{UUT} 为被测试红外热像仪的视频差分电压; φ 为红外热像仪测试系统的传输比, 又称仪器常数; ΔT 为红外热像仪测试系统对被测试红外热像仪提供的物理温差, 即面源黑体温度测控仪器显示的差分温度值。(7) 式中的 $\varphi \cdot \Delta T$ 为被测试红外热像仪测试装置出射口的实际辐射温差。

在测试红外热像仪的空间噪声等效温差、时域噪声等效温差和 3D 噪声等参数之前, 往往要先测出被测红外热像仪的 SiTF, 然后通过 SiTF 分析计算来得到所需参数。一般意义下的红外热像仪噪声等效温差 NETD 的计算公式为

$$\text{NETD} = \frac{\Delta U_{\text{UUT}}}{\text{SiTF}} \quad (8)$$

式中: ΔU_{UUT} 是被测试红外热像仪在输入差分温度为零时对应的视频噪声电压; SiTF 为测试红外热像仪的信号传递函数。

2.2 传输比对 MRTD 测试的影响

在测试红外热像仪的 MRTD 时,应在 4 个以上的空间频率上进行,方可较全面地反映不同空间频率下红外热像仪对温差的最小分辨能力。首先选用较低空间频率的标准 4 杆靶靶标,并将其置于红外热像仪测试系统准直光管的焦面上,调节红外热像仪测试系统中的差分温度到正的较大值,并调节被测红外热像仪的增益、电平和红外热像仪显示器的亮度、对比度等,使观察者以最佳观察距离和角度来观察被测红外热像仪显示器上所显示的标准 4 杆靶图像。降低差分温度,观察黑白图像由清晰到模糊临界状态;继续降低差分温度,又会出现黑白图像由模糊到清晰的过程,分别记录下这两次出现图像临界状态时的温差值。换用其他空间频率标准 4 杆靶靶标重复上述测试步骤。在差分温度降低过程中,将第一次出现图像临界状态时的差分温度设为 ΔT_1 , 第二次出现图像临界状态时的差分温度设为 ΔT_2 。一般情况下, $\Delta T_1 > 0$ (此时称为正温差), 通常将此值称为热杆温差或白杆温差; ΔT_2 通常小于零(此时称为负温差), 亦称作冷杆温差或黑杆温差。

对于一个面源黑体和高发射率靶标提供差分温度的红外热像仪测试系统,面源黑体的温度为目标温度,它可以随意改变;高发射率靶标的温度为环境温度,该温度值不可控,此时的差分温度等于面源黑体的温度减去高发射率靶标的温度。对于由 2 个面源黑体和高反射比靶标提供差分温度的红外热像仪测试系统,以目标面源黑体的温度作为目标温度,背景面源黑体的温度作为背景温度,此时目标温度、背景温度及差分温度均可精确控制和准确复现。

计算被测试红外热像仪在某一空间频率 f 下的最小可分辨温差 MRTD(f) 的公式如下:

$$\text{MRTD}(f) = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{2} \cdot \varphi \quad (9)$$

式中 φ 为红外热像仪测试系统的仪器常数或传输比。

最小可分辨温差是空间频率的函数,其曲线是

一条渐近线,包含了观察者的视觉阈值,它实际衡量的是红外热像仪、红外热像仪显示器及观察者组成的系统对远距离红外目标的分辨能力。换用一组针孔型靶标,按照以上类似的方法测量出红外热像仪在不同空间角度下的最小可探测温差,用类似于(9)式的公式进行计算。

由以上对红外热像仪信号传递函数 SiTF、最小可分辨温差 MRTD 及最小可探测温差 MDTD 的分析可以看出,红外热像仪测试系统的仪器常数或传输比在红外热像仪参数测试中的重要性。

3 红外热像仪测试系统的校准

红外热像仪测试系统的差分温度传输比是通过专用的红外测温扫描辐射计测量得到的。图 2 所示的红外测温扫描辐射计主要包括:1 组聚焦透镜(用于 $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的硅材料透镜和 $8 \mu\text{m} \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的锗材料透镜)、内部测试黑体、具有反射面的高稳定度斩波器、滤光片组、平面反射镜、视场光阑、高精度参考黑体、一组红外探测器(用于 $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的 InSb 和 $8 \mu\text{m} \sim 14 \mu\text{m}$ 波段的 CdHgTe 探测器);其他部分包括:前置放大器及锁相放大或选频放大电子单元、校准红外测温扫描辐射计数据库及相关软件、校准红外系统传输比较件、一维与二维可编程精密扫描单元。

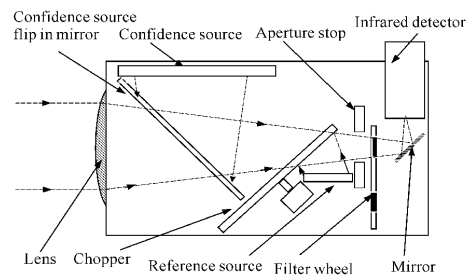


图 2 红外测温扫描辐射计示意图

Fig. 2 Schematic diagram of infrared scanning radiometer for temperature measurement

高精度参考黑体为红外测温扫描辐射计提供稳定、准确的参考辐射,为准确测量红外热像仪测试系统出口处的输出差分辐射温度或差分辐射量等提供辐射基准。红外测温扫描辐射计内部测试黑体下方的平面反射镜列入光路时,可用内部测试黑体来验证红外测温扫描辐射计是否处于正常工作

状态。滤光片组具有 $3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$ 、 $8\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$ 、某些特定的带通、某些特定波长的红外滤光片,通过与聚焦透镜、红外探测器相配合可测量红外热像仪参数测试系统不同红外波段的传输比。在测量红外热像仪参数测试系统的差分温度传输比之前,先用辐射口径大于红外测温扫描辐射计入射口径的精密面源黑体来准确校准红外测温扫描辐射计,要求此面源黑体的发射率在0.992以上,温度准确度优于 $0.025\ \text{C}$,工作温度范围可达到 $-30\ \text{C}\sim 100\ \text{C}$ 且温度稳定性优于 $0.003\ \text{C}/\text{min}$ 。条件满足后,将常温面源黑体(用于校准红外测温扫描辐射计)放置于红外测温扫描辐射计入射口之前,分别测试不同温度下的辐射量值,建立红外测温扫描辐射计在不同增益和不同红外波段下的黑体辐射响应数据库,以此得到辐射量值对应黑体温度的数据表。然后用校准后的红外测温扫描辐射计,通过预设编程的空间扫描来测量红外热像仪参数测试系统出口处的输出差分辐射温度;通过大冗余量的数据准确拟合出红外热像仪参数测试系统在不同红外波段的辐射量传输比和差分温度传输比;通过一维与二维可编程精密扫描单元实现红外热像仪测试系统准直单元焦面上的温度均匀性和差分温度准确测量,从而完成红外热像仪测试系统差分温度准直辐射单元的评估和校准。

4 红外热像仪参数测试量值溯源体系

在红外计量领域,通过红外测温扫描辐射计可以准确测量各种红外热像仪测试系统的传输比,实现红外热像仪测试系统的定期校准,并进一步实现红外热像仪参数的量值溯源。为此,提出以下辐射量值标准溯源方案。

建立 $-30\ \text{C}\sim 75\ \text{C}$ 面源黑体辐射特性校准装置,通过该校准装置中的常温精密测温仪实现红外测温扫描辐射计配套的常温面源黑体的高精度校准、常温金属凝固点黑体的辐射量值比对、常温面源黑体发射率的准确校准及常温面源黑体的量值溯源。然后用校准过的常温面源黑体实现红外测温扫描辐射计的校准和红外热像仪测试系统的差

分温度传输比的校准。因红外热像仪中交流耦合压制大的均匀背景,使得相对于背景的微小差分温度能被红外热成像系统探测和放大。因此,通过图3所示的红外热像仪参数测试量值溯源技术方案,可以实现红外热像仪参数测试的量值溯源。

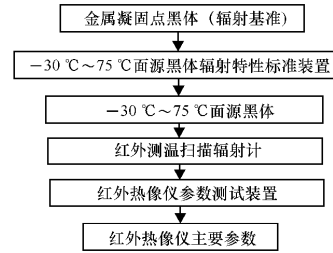


图3 红外热像仪参数测试量值溯源图

Fig. 3 Schematic diagram of tracing to the source for quantity value of parameters testing of infrared thermal imaging systems

5 结 论

本文通过对两种典型的红外热像仪测试系统差分温度传输比模型进行分析,发现简单地将红外热像仪测试系统中各单元的光学反射比相乘得到差分温度传输比将产生较大的误差,严重影响红外热像仪的SiTF, MRTD, MDTD, NETD等参数测试的准确度。通过红外温差扫描辐射计可以准确地实现红外热像仪测试系统中的差分温度传输比的校准,进一步建立起红外热像仪参数测试的量值溯源路线,为国防科技工业红外热像仪参数测量的量值准确和统一提供可靠的技术保障。

参考文献:

- [1] 张敬贤. 微光与红外成像技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,1991.
- [2] MEHUGH S W. High performance FLIR testing using reflective target technologies [J]. Photonics Spectra, 1991, 25(7):112-114.
- [3] 胡铁力,李旭东,傅建明,等. 红外热像仪参数的双黑体测量装置[J]. 应用光学,2006,27(3):247-248.