

非制冷热像仪内部温升对测温精度的影响修正

张艳超, 高策*, 刘建卓, 王博, 杨帅

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 随着非制冷型热像仪工作时间的增长, 其内部器件、机械结构所积累的热量越来越多, 其温升所导致的热辐射势必会对热像仪的测温精度产生严重影响。因此, 要实现热像仪的准确测温, 必须对其内部的各温升影响因素进行相应的修正。本文通过对影响测温精度的镜筒辐射温度、探测器靶面温度以及热像仪工作累积时间三个因素进行评估和建模, 并对其相互关系进行评价, 根据数据模型对热像仪辐射测温值进行修正。结果表明, 在实验室条件下, 经过修正, 非制冷型红外热像仪测温精度可控制在 ± 1 °C 以内, 其稳定性可控制在 ± 0.5 °C 以内。修正后的温度结果基本不受内部温升的影响, 有效的提高了非制冷测温型热像仪的稳定性、可重复性以及测温精度。

关键词: 红外热像仪; 非制冷; 辐射测温

中图分类号: TN219 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20181104.0669

Correction of temperature measurement accuracy affected by internal temperature rise in uncooled thermal imager

ZHANG Yan-chao, GAO Ce*, LIU Jian-zhuo, WANG Bo, YANG Shuai

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: 50616636@qq.com

Abstract: With the increase of the operating time of uncooled infrared thermal imager, the internal devices and mechanical structures accumulate more and more heat, and the thermal radiation caused by the temperature rise is bound to have serious effects on the accuracy of the thermal imager. Therefore, in order to achieve accurate temperature measurement of the thermal imager, it is necessary to correct the internal temperature influencing factors. This paper evaluates and models the three factors that affect the accuracy of temperature measurement: the barrel radiation temperature, the temperature of the target surface of the detector, and the cumulative working time of the thermal imager, and evaluates the relationship among them. Finally, the temperature measurement of the thermal imager is corrected according to the data model. The results show that un-

收稿日期: 2017-11-21; 修订日期: 2018-01-20

基金项目: 国家仪器重大专项(No. 2013YQ140517)

Supported by National Major Instrument Project of China(No. 2013YQ140517)

der the laboratory conditions , the temperature accuracy of the uncooled infrared camera can be controlled within $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, and its stability can be controlled within $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. The corrected temperature is basically independent of the internal temperature rise , thus effectively improves the stability , repeatability , and accuracy of the temperature measurement of the uncooled thermal imager.

Key words: infrared thermal imager; uncooled; radiation temperature measurement

1 引言

在利用红外热像仪进行红外辐射测温过程中,受到红外辐射特性的限制以及本身电特性的影响。外部环境参数以及探测器本身热特性将发生改变,这些都对测温精度造成较大影响。因此,要实现高精度的红外辐射测温,需要分别对影响测温精度的各主要因素进行逐一建模和系统研究,以进一步提高红外成像测温系统的测温精度和环境适应性。影响红外测温精度的因素较多,大体上可分为外部影响因素和内部影响因素。

外部影响因素包括目标发射率,大气透射率,环境温度、测试角度等。对于外部因素的影响,可通过相应的测算软件或数据库获得相应数据后,带入被测表面真实温度计算公式对热像仪测试结果进行修正^[1-2]。

内部影响因素包括工作温度、镜筒辐射温度、探测器半导体器件温升作用、开始时间等。各个影响因素互相关联、互相影响,严重影响了红外测温设备的测量精度。要对各个影响因素逐一建模,去除其他因素的影响,难以实现。因此,必须选取一个或几个有代表性的因素作为探测器灰度随温度变化的衡量尺度。然后,通过采取一定标定和修正方法,来予以消除。

综上所述,内部影响因素是影响热像仪实现高精度测温 and 标定的主要问题。此外内部影响因素对测温结果还具有时间累积性,对于同一温度下的面源黑体,当热像仪处于不同热状态时,往往导致测温结果差异较大。如果不对内部各影响因素进行修正,将会使标定结果失去意义。因此,对各内部影响因素的综合建模和修正,对于测温型热像仪测温精度的提高具有十分重要的意义。

热像仪的内部温升影响因素的修正方法多为

对单独一个或其中部分因素进行独立研究^[3-41]。现有研究一方面没有对各主要内部影响因素进行全面评估,存在测温精度修正“短板”,另一方面没有对各内部影响因素间的相互关系进行评价,导致修正方法条理不够清晰。鉴于上述情况,本文对影响热像仪测温精度的各个关键因素进行了分析和综合评价,并通过分析其相互关系的影响,给出了相应的修正模型和标定方法。对于测温型热像仪测温精度和性能的提高,具有一定的工程意义。此外,文中所述的修正方法对于辐射特性的准确测量也具有一定的借鉴意义^[12-44]。

2 热像仪组成及探测器的选型

测温型热像仪一般由红外光学系统,红外图像探测器,采集处理电路以及显示控制模块等部分组成。组成框图如图 1 所示。红外光学系统的作用是收集辐射,将辐射汇聚到探测器靶面上。红外图像探测器是将红外辐射转换为电信号的元件。采集处理电路是对图像探测器转换的电信号进行采集和处理,并将数据转换为具有温度信息的红外图像数据,其具有一定的图像处理能力。显示控制模块用于红外图像数据的显示、分析与热像仪控制。

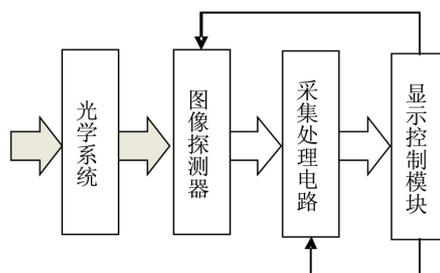


图 1 热像仪组成框图

Fig. 1 Block diagram of thermal imager

对于测温型红外热像仪,清晰成像与获得准确稳定的测温数据是首要前提。红外图像探测器是整个系统的核心器件,其性能参数对于系统的整体指标以及热像仪内部其它组件的选型、光学/结构设计都起着决定性的作用。因此,相对于普通的成像热像仪,测温型红外热像仪在图像探测器选型过程中,应从以下几个方面考虑:

(a) 测温型红外探测器的首要选型标准是应具有有良好的重复性。若重复性较差,那么温度标定就变得没有任何意义,无基准可循,测温过程也就无法实现。

(b) 红外探测器的数据位深决定了系统的测温精度,也就是最小温差的分辨能力,数据位深越大,系统对于温度变化的区分能力也就越高。

(c) 测温型热像仪多为便携式设备,功耗与成本问题也是需要考虑的一个十分重要因素。制冷型红外探测器虽然测温精度高,但需要加入制冷装置,不但成本高、重量大、其高额的功耗更严重限制了其使用范围。

目前,市场上比较容易获得的可用于测温的面阵非制冷型长波红外探测器主要是美国 FLIR 公司的 TAU 系列探测器。其光谱响应波长为 $8 \sim 13 \mu\text{m}$,最大有效像元分辨率为 640×480 ,像元尺寸为 $17 \mu\text{m}$,最大数据位深是 14 位,帧频为 9 帧/秒,相同条件下重复性好,且应用范围广。本文所展开的一系列讨论与研究均是以该款探测器为基础的。

3 内部影响因素分析

3.1 镜筒辐射温度对测试结果的影响评估

红外热像仪是通过接收被测物体表面发射的辐射来测定其温度的。实际测量时,热像仪接收到的有效辐射包括目标自身辐射、环境反射辐射、大气辐射以及镜筒辐射 4 部分。在检测环境稳定的情况下,前 3 部分所产生的辐射量基本恒定。而镜筒辐射随着热像仪工作时间的增长,所累积的热量将逐渐增多,进而导致辐射增强,其对测温结果的影响随之增大。

为了实现镜筒辐射对测温结果影响的定量分

析,在镜筒内部安装了精度为 $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的温度传感器。通过实时读取镜筒温度以及该值所对应的热像仪工作时间、固定温度下的面源黑体灰度,得到如下分析结果。此外为了便于对比分析,还引入了探测器靶面温度值(简称为 FPA 温度)这一概念。

图 2 为 FPA 温度、镜筒温度与热像仪工作时间的关系曲线,其中蓝色为 FPA 温度随时间的变化曲线,紫色为镜筒温度随时间的变化曲线。从图 2 可以看出,开机后的前 10 min 内,FPA 温度与镜筒温度存在一定的差异,之后二者温度基本趋于重合(此差异存在时长恰与前 10 min 的测温值具有较大波动时间相吻合,初步推测此过程与探测器内部非均匀校正处理算法有关,此处不做深入论证)。

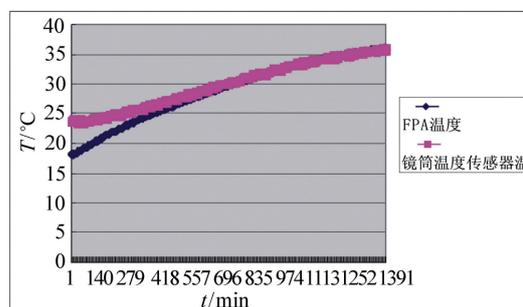


图 2 FPA、镜筒温度—时间曲线

Fig. 2 Temperatures of FPA and lens vary with tube-time

图 3 为镜筒温度与 FPA 温度随黑体灰度变

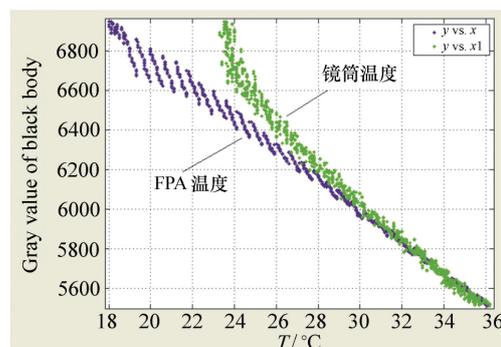


图 3 灰度-FPA、镜筒温度曲线

Fig. 3 Gray level-temperatures of FPA and lens tube curves

化图。从图 3 可以看出,与镜筒温度相比,FPA 随黑体目标灰度变化具有更好的线性关系。且从其他温度的大量拟合曲线得出,FPA 与黑体灰度关系曲线具有更好的斜率一致性和更低的拟合误差。因而,镜筒温度以及其他设备内部结构因素的影响完全可以由 FPA 进行整体表征,不用额外对镜筒温度进行测定和建模。

3.2 探测器靶面温度对测试结果的影响评估

探测器吸收红外辐射后会导致靶面温度升高,因此探测器靶面的温度将对测温结果产生一定的影响。探测器温度对测温结果的影响是通过探测器的响应度来体现的。根据参考文献 [15] 知其响应度为:

$$R_v = V_b \frac{RR_L \alpha}{(R + R_L)^2} \frac{1}{g} \frac{1}{1 + \beta \frac{R - R_L}{R + R_L}}, \quad (1)$$

式中, V_b 为偏置电压, R_L 为负载电阻, g 为探测器的热导, α 为电阻温度系数, β 为热电参数, $\beta = \alpha dT/dT$ 为探测器温度的增加值, R 为探测器的电阻,与探测器的温度有关,记为 $R(T)$ 。

由于 α 、 β 、 $R(T)$ 是温度的函数,故探测器温度的变化会引起 α 、 β 、 $R(T)$ 的变化,进而使响应度 R_v 发生改变。因此,必须对探测器靶面温度(即 FPA 温度)变化所带来的影响进行修正。

根据上节数据分析结果,在本节中选取 FPA 温度的变化作为目标灰度变化的衡量指标。通过改变探测器外部环境温度和目标温度,得到若干组不同黑体温度下的 FPA 温度随黑体目标灰度变化关系曲线。从得到的测试数据可以看出,在

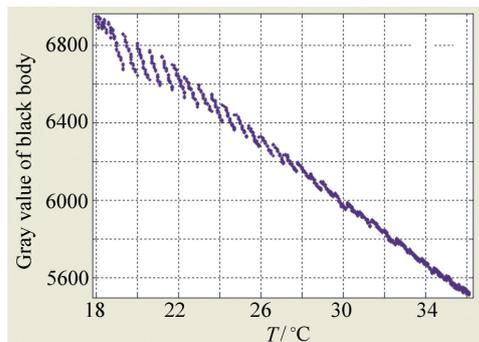


图 4 FPA 校正前

Fig. 4 Before the correction of FPA temperature

指定的黑体温度下,FPA 与黑体目标灰度变化呈较好的线性,其中一条曲线如图 4 所示。

通过曲线拟合和误差剔除,对该线性关系进行反向修正,以使不同环境温度和不同工作状态下,测得的黑体目标值保持基本恒定。图 5 为修正后的测温曲线。由图 5 可以看出,随着 FPA 温度的变化,修正后目标温度能够基本保持恒定。

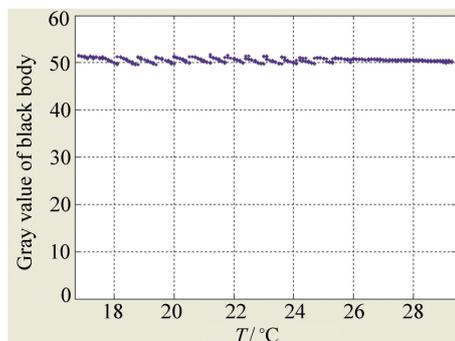


图 5 FPA 校正后

Fig. 5 After the correction of FPA temperature

3.3 热像仪工作累积时间对测试结果的影响评估

热像仪在通电工作后的一段时间内,由于半导体器件、图像探测器等受到瞬间电流的影响,以及热像仪内部热平衡的破坏,采集到的温度数据会经历一个短时间的温度波动。因此,应该对该过程进行评估。

为了验证开始时间对测温结果的影响,在进行了 FPA 修正后,在黑体温度分别为 30、50、80 °C 下进行了开机时间对测温结果的影响评估。从实验结果可以看到,设备开机前 5 min,由于探测器内部半导体器件温升调整较快,实测温度变化(不稳定性)相对较大,变化范围优于 ± 1.5 °C;设备开机 5 ~ 10 min,实测温度变化优于 ± 1 °C;开机 10 min 后,实测温度变化优于 ± 0.5 °C。因此,在实际使用过程中,可选择在开机几分钟之后再进行测试,可以进一步提高测试精度。图 6、图 7 是黑体温度为 30 °C 时开机时间对测温结果的影响走势图。在黑体温度为 50 °C 与 80 °C 时,测试结果与 30 °C 情况基本相同,限于篇幅考虑此处不再赘述。

此外,大量的实验验证结果表明,在其他温度

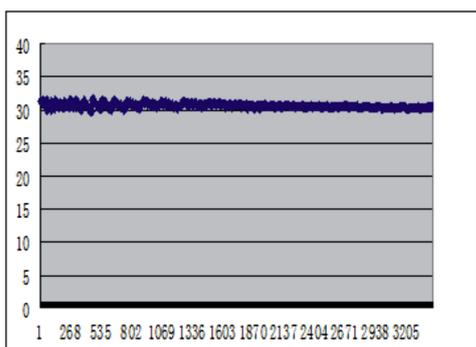


图6 黑体温度为 30 °C 时整体温度走势

Fig. 6 Temperature trend curve when temperature of black body is set to 30 °C

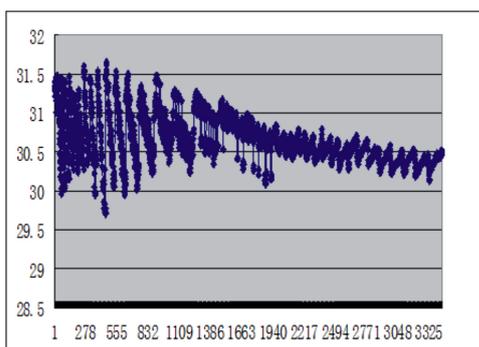


图7 黑体温度为 30 °C 时放大温度走势

Fig. 7 Amplified temperature trend curve when temperature of black body is set to 30 °C

下,其整体温度趋势与 30 °C 情况下基本相同。

3.4 修正过程实现

通过上述影响因素的建模与分析结论可知,镜筒温度以及其他设备内部结构因素的影响完全可以由 FPA 进行整体表征,不用额外对镜筒温度进行测定和建模。具体修正过程如下:

(1) 在热像仪处于热平衡状态下(即 FPA 温度基本趋于稳定状态 T_0),将黑体设置为不同温度,进行黑体温度标定。通过拟合得到黑体灰度值 G_1 与温度设定值 T_1 的关系曲线:

$$T_1 = f(G_1), \quad (2)$$

(2) 实测过程中,将 T_x 温度下的灰度实测值 G_x 带入 3.2 节的黑体灰度值 G 与 FPA 温度 T 的拟合关系曲线,即可以反演出 FPA 温度在 T_0 时,对应的灰度值 G_0 ;

(3) 将 G_1 带入式(2),即可计算出修正后的目标温度 T_1 。

4 实验结果与评价

4.1 红外测试系统搭建

红外测温测试系统由标准面源黑体、长波非制冷红外探测器、红外镜头、图像采集卡、主控计算机、环境模拟箱,室内空调等部分组成。其中,环境模拟箱是一款自研的温控箱,标定过程中可将红外探测器置于其内部,用以控制探测器工作环境,模拟探测器工作温度的变化。测试系统组成示意图和实物图分别如图 8、图 9 所示。

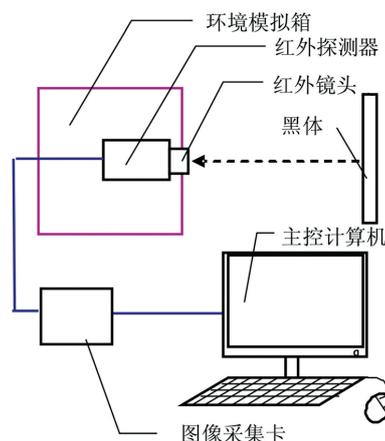


图8 测试系统示意图

Fig. 8 Diagram of the testing system



图9 测试系统实物图

Fig. 9 Actual picture of the testing system

4.2 测温性能评价

4.2.1 准确性

测试过程中的环境温度为 20 °C,测试距离为

2 m,热像仪工作状态为开机后 2 h(基本处理稳定状态),每个黑体温度下采样数为 200。测试结果如表 1 所示。

表 1 20 ℃至 90 ℃范围内测量结果(单位: ℃)

Tab.1 Measurement results in the range of 20 ℃ to 90 ℃(unit: ℃)

设定值	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0
均值	19.9	25.3	30.0	34.9	40.2
最小	19.5	25.1	29.8	34.7	40.1
最大	20.2	25.4	30.3	35.4	40.4
设定值	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0
均值	44.7	50.2	55.0	60.0	64.7
最小	44.6	50.1	54.8	59.6	64.6
最大	44.9	50.2	55.2	60.1	64.9
设定值	70.0	75.0	80.0	85.0	90.0
均值	70.1	75.0	80.2	85.0	90.2
最小	69.9	74.9	80.1	84.9	90.1
最大	70.2	75.1	80.4	85.1	90.3

结果显示:实验室测试条件下,相对于绝对温度,实测测温精度基本可控制在 ± 1 ℃ 以内。能够满足(± 2 ℃ 或 $\pm 2\%$ FS 较大者)国家标准,且实测精度优于国家标准。

4.2.2 稳定性

测试条件同 4.2.1。由表 1 统计结果可以得到热像仪在不同设定黑体温度下的稳定性,如表 2 所示。

表 2 20 ℃至 90 ℃范围内稳定性结果(单位: ℃)

Tab.2 Stabilization in the range of 20 ℃ to 90 ℃(unit: ℃)

设定值	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0
稳定性	± 0.35	± 0.15	± 0.25	± 0.35	± 0.15
设定值	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0
稳定性	± 0.15	± 0.05	± 0.2	± 0.25	± 0.15
设定值	70.0	75.0	80.0	85.0	90.0
稳定性	± 0.15	± 0.1	± 0.15	± 0.1	± 0.1

结果显示:实验室测试条件下,热像仪处于稳定状态时,相对于实测温度,温度偏差基本可以控制在 ± 0.5 ℃ 以内,具有良好的稳定性。

5 结 论

经过大量的红外理论研究以及工程实践验证工作,可以得到如下结论:若要实现测温型热像仪

的准确定标,需要首先对红外图像探测器进行一定的性能评估。其除了应具备探测器基本电子学性能和辐射性能以外,还应考虑是否能够找出一个红外探测器内部信息值,该值能够代表其内部多个温升状态变化以更好地表征探测器目标灰度随工作状态的变化规律。若存在此信息值,则可以进一步进行红外定标和温度测量工作,若不存在则表明该类探测器暂不具备红外测温条件或以

目前的红外测温定标方法难以实现红外测温工作。

本文通过多次实验验证比较发现, FPA 温度值与目标灰度变化曲线具有更低的拟合误差、更好的线性以及更好的重复性。因此, 选用该值作为热像仪内部的温升衡量尺度, 能够更好地反映

出热像仪的热状态和对测温精度的影响情况。实验结果表明, 在实验室条件下, 经过修正, 非制冷型红外热像仪测温精度可控制在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 其稳定性可控制在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。修正后的温度结果基本不受内部温升的影响, 有效提高了非制冷测温型热像仪的稳定性、可重复性以及测温精度。

参考文献:

- [1] 杨词银, 曹立华, 张建萍. 基于大气实时修正的飞机辐射特性测量[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1751-1759.
YANG C Y, CAO L H, ZHANG J P. Measurement of infrared radiation for target airplane based on real-time atmospheric correction[J]. *Opt. Precision Eng.* 2014, 22(7): 1751-1759. (in Chinese)
- [2] 魏合理, 戴聪明. 辐射特性测量大气传输修正研究: 大气辐射传输模式和关键大气参数分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 884-890.
WEI H L, DAI C M. Research of atmospheric transfer correction in radiance measurement: atmospheric radiative transfer model and the analysis of key atmospheric parameters[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 884-890. (in Chinese)
- [3] 廖盼盼, 张佳民. 红外测温精度的影响因素及补偿方法的研究[J]. 红外技术, 2017, 39(2): 173-177.
LIAO P P, ZHANG J M. Research on influence factors for measuring and method of correction in infrared thermometer[J]. *Infrared Technology* 2017, 39(2): 173-177. (in Chinese)
- [4] 孙志远, 朱玮, 乔彦峰. 红外测温过程中灰度值漂移的修正[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(4): 391-395.
SUN ZH Y, ZHU W, QIAO Y F. Amendment of gray drift in infrared temperature measurement[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics* 2010, 3(4): 391-395. (in Chinese)
- [5] 石东平, 吴超, 李孜军, 等. 基于反射温度补偿及入射温度补偿的红外测温影响分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2321-2326.
SHI D P, WU CH, LI Z J *et al.*. Analysis of the influence of infrared temperature measurement based on reflected temperature compensation and incidence temperature compensation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2321-2326. (in Chinese)
- [6] 周康康, 黄波利, 崔敬巍, 等. 基于红外热图像灰度修正的辐射测温[J]. 激光与红外, 2016, 46(1): 58-61.
ZHOU K K, HUANG B L, CUI J W *et al.*. Radiation thermometry based on infrared thermal image gray correction[J]. *Laser & Infrared* 2016, 46(1): 58-61. (in Chinese)
- [7] 陆子凤, 潘玉龙, 王学进, 等. 目标到测试系统距离对红外测温精度的影响[J]. 红外技术, 2008, 30(5): 271-274, 278.
LU Z F, PAN Y L, WANG X J *et al.*. Influence of object-system distance on accuracy of temperature measurement with IR system[J]. *Infrared Technology* 2008, 30(5): 271-274, 278. (in Chinese)
- [8] 孙志远, 王晶, 乔彦峰. 环境中波红外探测器测温精度的影响[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(6): 659-664.
SUN ZH Y, WANG J, QIAO Y F. Influence of environment on temperature measurement precision based on middle-wave IRFPA[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics* 2010, 3(6): 659-664. (in Chinese)
- [9] 王超群, 崔昊杨, 许永鹏, 等. 视场超出目标的红外测温误差修正方法研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(10): 1211-1215.
WANG CH Q, CUI H Y, XU Y P *et al.*. Error correction of infrared temperature measurement as FOV larger than target[J]. *Laser & Infrared* 2015, 45(10): 1211-1215. (in Chinese)
- [10] 张晓龙, 刘英, 孙强. 高精度非制冷长波红外热像仪的辐射标定[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 235-241.
ZHANG X L, LIU Y, SUN Q. Radiometric calibration of uncooled long-wave infrared thermal imager with high-precision

- [J]. *Chinese Optics* 2012 5(3): 235-241. (in Chinese)
- [11] 王飞, 戢运峰, 冯刚, 等. 红外焦平面阵列非线性校正曲线测量方法[J]. 中国光学 2014 7(1): 144-149.
WANG F, JI Y F, FENG G *et al.*. Method for measuring nonlinear calibrated curve of infrared focal plane arrays [J]. *Chinese Optics* 2014 7(1): 144-149. (in Chinese)
- [12] 李宁, 张云峰, 刘春香, 等. 1 m 口径红外测量系统的辐射定标[J]. 光学 精密工程 2014 22(8): 2054-2060.
LI N, ZHANG Y F, LIU CH X *et al.*. Calibration of 1 m aperture infrared theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.* 2014 22(8): 2054-2060. (in Chinese)
- [13] 常松涛, 孙志远, 张尧禹, 等. 基于点扩散函数的小目标辐射测量[J]. 光学 精密工程 2014 22(11): 2879-2887.
CHANG S T, SUN ZH Y, ZHANG Y Y *et al.*. Radiation measurement of small targets based on PSF [J]. *Opt. Precision Eng.* 2014 22(11): 2879-2887. (in Chinese)
- [14] 郭立红, 郭汉洲, 杨词银, 等. 利用大气修正因子提高目标红外辐射特性测量精度[J]. 光学 精密工程 2016 24(8): 1871-1877.
GUO L H, GUO H ZH, YANG C Y *et al.*. Improvement of radiation measurement precision for target by using atmosphere-corrected coefficients [J]. *Opt. Precision Eng.* 2016 24(8): 1871-1877. (in Chinese)
- [15] 常本康, 蔡毅. 红外成像阵列与系统[M]. 北京: 科学出版社 2006.
CHANG B K, CAI Y. *Infrared Imaging Array and System* [M]. Beijing: Science Press 2006. (in Chinese)

作者简介:



张艳超(1985—),女,吉林长春人,博士,副研究员,2007年、2009年于天津大学分别获得学士、硕士学位,2015年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事红外辐射测温及数字图像处理方面的研究。
E-mail: zhangyanchaomn@126.com