

武器装备

地面装备红外辐射测量不确定度分析研究

刘增灿¹, 张群兴², 罗中华¹, 邓爱明¹, 张天才¹

(1.西南技术工程技术研究所, 重庆 400039; 2.驻重庆地区第七军代室, 重庆 400070)

摘要: **目的** 分析评价复杂背景环境下地面装备红外辐射成像特性的测量精度。**方法** 基于红外辐射成像测量与定标原理, 全面分析复杂环境下地面目标动态红外辐射成像测量中由设备性能、环境干扰、操作参数设置及相对运动等所引入的 8 项误差因素。采用校准黑体与被测目标等距离同视场同步标定测量方法, 基于试验方法评定各测量不确定度因子, 构建地面装备红外辐射表观温度测量不确定度评定模型。**结果** 在置信概率为 95% 的条件下, 典型地面车辆目标在静态和动态红外辐射表观温度测量不确定度分别为 1.54 °C 和 2.60 °C。**结论** 形成的基于红外热像仪的复杂背景环境下地面车辆目标红外辐射成像精确度的表征与评价方法, 对于地面装备红外辐射特性精确测量与红外隐身伪装性能准确评估研究具有重要参考意义。

关键词: 红外辐射; 测量不确定度; 热像仪; 表观温度; 地面装备; 动态

中图分类号: TJ81+0; TN129

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)07-0001-06

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2021.07.001

Research on Uncertainty Analysis of Ground Equipment Infrared Radiation Measurement

LIU Zeng-can¹, ZHANG Qun-xing², LUO Zhong-hua¹, DENG Ai-ming¹, ZHANG Tian-cai¹

(1.Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China;

2.Military Representative Office in Chongqing, Chongqing 400060, China)

ABSTRACT: This paper is aimed at analyzing and evaluating the measurement accuracy of infrared radiation imaging characteristics of ground targets in a complex background environment based on the principle of infrared radiation imaging measurement and calibration. In this paper, eight error factors in dynamic infrared radiation imaging measurement of ground target in complex environment are analyzed, which result from equipment performance, environmental interference, operation parameter setting and relative motion. The error factors of ground target dynamic infrared radiation imaging measurement in complex environment are analyzed. The calibration blackbody and the measured target are simultaneously calibrated at the same distance and field of view. The measurement uncertainty factors are evaluated based on the test method, and the uncertainty evaluation model of infrared radiation apparent temperature measurement for ground equipment is established. Through the analysis, under the condition of 95% confidence probability, the measurement uncertainty of static and dynamic infrared radiation apparent

收稿日期: 2021-03-10; 修订日期: 2021-04-22

Received: 2021-03-10; Revised: 2021-04-22

基金项目: 兵器装备集团开发基金 (EJ20-9043)

Fund: Development fund of China South Industries Group (EJ20-9043)

作者简介: 刘增灿 (1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为复杂环境下的装备目标检测识别。

Biography: LIU Zeng-can (1979—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: detection and recognition of ground equipment in complex environment.

引文格式: 刘增灿, 张群兴, 罗中华, 等. 地面装备红外辐射测量不确定度分析研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(7): 001-006.

LIU Zeng-can, ZHANG Qun-xing, LUO Zhong-hua, et al. Research on uncertainty analysis of ground equipment infrared radiation measurement [J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(7): 001-006.

temperature of typical ground vehicle target is 1.60 °C and 2.64 °C respectively. The characterization and evaluation method of infrared radiation imaging accuracy of ground vehicle target in a complex background environment based on infrared thermal imager is formed. It has an reference significance for accurate measurement of infrared radiation characteristics of ground equipment and accurate evaluation of infrared camouflage performance.

KEY WORDS: infrared radiation; measurement uncertainty; thermal imager; apparent temperature; ground equipment; dynamic

红外辐射是武器装备的重要目标特征之一,是探测识别及制导打击目标所采用的重要模式之一。红外辐射特性的精确测量是装备红外隐身伪装性能评价的重要前提。地面装备红外辐射特性的测试评估主要采用红外热像仪采集目标的红外热像,通过提取红外图像中目标与背景辐射温度、辐射亮度、辐射强度等特征参量,统计目标与背景辐射温差、温度对比度等特征数据,评价其红外隐身效果,分析不同伪装措施优劣。由于受大气衰减、设备性能、目标运动等各种因素的影响,不可避免地对红外辐射特性的准确测量带来误差,使得目标红外成像质量下降,反演的红外辐射强度/温度数值不准确,严重影响地面装备红外隐身伪装效果的可靠评价^[1-2]。

张伟等^[3-4]分析了用红外热像仪进行精确测温的条件,探讨了环境、大气和热像仪本身对测量精度的影响,提出了目标发射率与大气影响修正及热像仪自身辐射补偿措施。王建军^[5]等提出了内、外标定相结合的标定方法,区别于传统的标定方法,不再把测量系统当作“黑盒子”,而是对其内部分解进行分步标定,通过理论推导给出了内外标定方法计算公式。杨国庆等^[6]提出了一种提高远距离目标红外辐射测量精度的非线性大气修正(NLAC)方法,该方法利用近距离标准,参考源测量(NRSRM)来计算实时环境中不同位置的实际大气透过率和程辐射,相应条件下的理论大气透过率和程辐射也可以从大气辐射传输软件中获得。郭立红^[7]提出了利用大气修正因子修正大气透过率来提高测量目标红外辐射特性精度的方法。目前很多作者从不同特定角度分析了影响红外辐射测量精度的重点关注因素,提出了相应的提高辐射测量精度的措施方法,很少对红外辐射测量不确定度进行系统、全面的分析计算研究,尤其缺乏复杂环境下的动态红外辐射测量不确定度研究。

本文基于热像仪辐射特性测量与定标原理,分析了地面装备动静态红外辐射特性测量不确定度影响因素,采用校准黑体与被测目标等距离同视场同步标定测量方法,实现了对室外场热像仪示值的标定,系统建立了辐射温度误差与不确定度因子分析方法,为地面装备红外辐射特性精确测量与红外隐身伪装性能的准确评估提供了一种技术途径。

1 原理与模型

1.1 红外辐射测量原理

红外辐射特性测量研究一般采用红外热像仪采集目标红外热像,基于图像处理软件及辅助测量参数,并经理论换算获取目标的红外辐射亮度、辐射温度等特性数据。红外热像仪的探测器是光电转换器件,一般由碲化铟或碲镉汞材料制成,用于将接收到的红外热辐射能量转换为电信号,经过放大、整形、模数转换后,成为数字信号,在显示器上通过图像显示出来。图像中每一个点的灰度值与被测物体上该点发出并到达光电转换器件的辐射能量相对应,从红外热像仪的图像上读出被测物体表面上每一个点的辐射温度值。红外热像仪测温根据接收被测物体表面发射的辐射以及提供的目标、环境、设备参数等信息,通过建立的数学模型及标定结果来确定其温度值。

红外辐射原理如图1所示。图1中 ε 为地物的发射率; τ_a 为大气的透射率; T_{obj} 为被测物体温度; T_{sur} 为环境温度; T_{atm} 为大气温度;被测物体的辐射能为 $\varepsilon\tau_a W_{obj}$;地物环境的反射辐射能为 $(1-\varepsilon)\tau_a W_{sur}$;大气辐射能为 $(1-\tau_a)W_{atm}$ 。作用于热像仪的辐照度为^[8-9]:

$$E_\lambda = A_0 R^{-2} [\tau_{a\lambda} \varepsilon_\lambda L_{b\lambda}(T_0) + \tau_{a\lambda} (1 - \varepsilon_\lambda) L_{b\lambda}(T_u) + \varepsilon_{a\lambda} L_{b\lambda}(T_a)] \quad (1)$$

式中: T_0 为被测目标表面的温度, K; ε_λ 为外界辐射的光谱吸收率; T_u 为环境大气温度, K; ε_a 为大气的光谱发射率; T_a 为测量的大气温度, K。

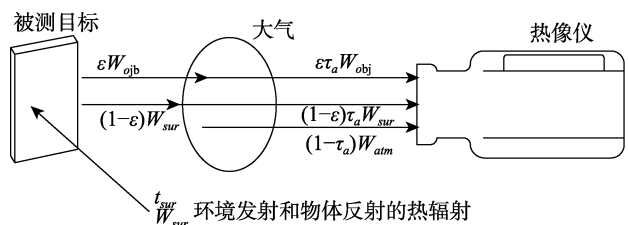


图1 红外辐射原理

Fig.1 Schematic diagram of infrared radiation principle

根据热像仪的接收能量与响应电压的关系,依据普朗克辐射定律,经理论推导得到基于热像仪获得的目标红外辐射表观温度值为:

$$T_r = \{\tau_a k' [\varepsilon T_0^n + (1-\varepsilon) T_u^n] + k' (1-\tau_a) T_a^n\}^{1/n} \quad (2)$$

式中： n 、 k' 为与热像仪工作波段相关的常数。一般根据传感器工作波段、系统响应系数等参数，经过实验室标定确定。对于 HgCdTe(8~13) μm 探测器， n 值为 4.09；对于 HgCdTe(6~9) μm 探测器， n 值为 5.33；对于 InSb(2~5) μm 探测器， n 值为 8.68。

一般基于红外热像测量进行红外伪装隐身性能评价，主要途径是根据热像仪呈现的热像图中目标轮廓、与周围环境的图像对比度或者是被测目标与背景环境的表观温度、表观温度差的不同，用于定性或者定量评估目标的红外伪装性能优劣。红外辐射特性参数的准确性直接影响目标红外隐身伪装性能的评估。

在室外开展红外目标特性测试过程中，能够比较容易地获取目标测试距离、大气温度、环境温度、大气湿度等参数。目标表面的发射率可以参考被测目标表面红外隐身材料的实验室数据获取，但不同试验环境下的大气透过率参数难以通过常规手段获得，且该数据与测试距离、大气湿度均相关，并与测试距离呈非线性关系。为了尽可能降低大气透过率参数准确性对温度测试的影响，常采用等距离同视场同步定标方式，即将面源黑体与被测目标放置在相同距离和方位处，在完成热像仪其他参数设置的基础上，通过调整热像仪内部的大气透过率参数，使热像图中黑体的表观温度尽可能与面源黑体的实际温度一致，从而实现对外场热像仪示值的标定^[10]。

1.2 红外辐射测量不确定度模型

由热像仪测温测量和定标原理可知，影响动态目标红外辐射特性测量不确定度的因素很多，包括大气透过率误差引入的不确定度、被测目标表面发射率误差引入的不确定度、环境温度测量误差引入的不确定度、大气温度误差引入的不确定度、测试距离误差引入的不确定度、热像仪稳定性引入的不确定度、标定黑体不确定度引入的不确定度和动目标运动散焦图像混叠所引入的不确定度等。以上因素的相关参数不

准确时，均会影响红外辐射温度的测量精度，在不同的波段，影响程度不一致^[11-16]。

红外热像仪示值误差校准的数学模型如式(3)所示：

$$\Delta t = t - t_0 \tag{3}$$

式中： Δt_i 为在第 i 个校准点，被校红外热像仪的示值误差， $^{\circ}\text{C}$ ； t_{ri} 为在第 i 个校准点，被校红外热像仪的示值， $^{\circ}\text{C}$ ； t_{oi} 为在第 i 个校准点，黑体辐射源的温度示值， $^{\circ}\text{C}$ 。

对红外热像仪校准结果不确定度有影响的量为被校红外热像仪的示值 t_{ri} 和黑体辐射源的示值 t_{oi} ，这 2 个量彼此独立。因此，其合成不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_{t_{ri}}^2 + u_{r_{ei}}^2 + u_{r_{ui}}^2 + u_{r_{Li}}^2 + u_{r_{ai}}^2 + u_{r_{vi}}^2 + u_{t_{oi}}^2 + u_{M_{oi}}^2} \tag{4}$$

式中： $u_{t_{ri}}$ 为由大气透过率误差引入的温度示值标准不确定度分量； $u_{r_{ei}}$ 为由目标发射率误差引入的温度示值标准不确定度分量； $u_{r_{ui}}$ 为由环境温度误差引入的温度示值标准不确定度分量； $u_{r_{Li}}$ 为由测试距离误差引入的温度示值标准不确定度分量； $u_{r_{ai}}$ 为由大气温度误差引入的温度示值标准不确定度分量； $u_{r_{vi}}$ 为由热像仪稳定性引入的温度示值标准不确定度分量； $u_{t_{oi}}$ 为由校准用面源黑体温度不确定度引入的温度示值标准不确定度分量； $u_{M_{oi}}$ 为由于目标与测量仪器的相对运动使得红外辐射图像散焦混叠而引入的温度示值标准不确定度分量。

2 结果及分析

1) 大气透过率误差引入的不确定度^[17-18]。设置黑体面源温度为 50°C ，热像仪测试距离为 97 m，根据气象参数设置热像仪工作参数，发射率设置为黑体的参数值 0.97。将大气透过率调整为 0.74 时，使热像图显示温度与黑体温度一致，如图 2 所示。

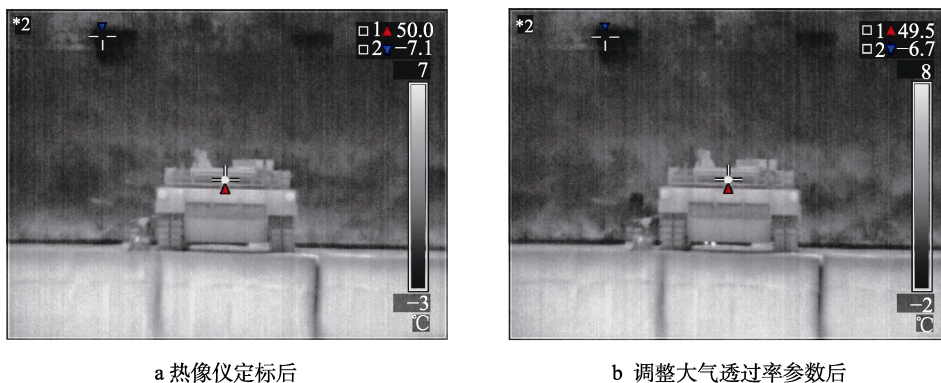


图 2 面源黑体在 50°C 下热像仪定标后和调整大气透过率参数后的热像图

Fig.2 Thermal images of (a) surface source blackbody at 50°C and (b) adjusted atmospheric transmittance parameters

在保持其他参数不变的情况下，仅改变大气透过率参数，其参数调整的分辨率为 0.01，将大气透过率参数

由 0.74 逐渐变换到 0.80，分别采集热像图。读取面源黑体及热像图中黑体的温度示值，温度统计结果见表 1。

表 1 大气透过率参数误差对温度示值的影响
Tab.1 Influence of atmospheric transmittance parameter error on temperature indication

影响因素	名称	温度采集序列						均值	差值	
大气	面源黑体示值温度/℃	50.0	49.9	49.9	49.9	50.1	49.9	50.1	49.97	0.27
透过率	热像仪示值温度/℃	49.8	49.5	49.5	49.6	49.7	49.8	50.0	49.70	
目标表面	面源黑体示值温度/℃	60.0	60.2	60.1	60.2	60.2	60.1	60.1	60.13	0.78
发射率	热像仪示值温度/℃	60.8	60.7	60.9	61.1	61.0	60.9	61.0	60.91	
环境温度	面源黑体示值温度/℃	60.0	60.1	60.0	60.1	60.1	60.0	60.1	60.06	0.13
	热像仪示值温度/℃	60.4	60.2	59.7	60.2	60.3	60.3	60.2	60.19	
大气温度	面源黑体示值温度/℃	50.1	50.0	50.1	50.1	50.0	49.9	49.9	50.01	0.41
	热像仪示值温度/℃	49.5	49.7	49.9	49.7	49.6	49.5	49.4	49.61	
测试距离	面源黑体示值温度/℃	20.0	20.1	19.9	20.0	20.0	20.1	20.0	20.01	0.43
	热像仪示值温度/℃	19.7	19.6	19.4	19.8	19.6	19.8	19.8	19.67	
热像仪	面源黑体示值温度/℃	50.0	49.8	49.8	49.9	49.8	49.8	50.0	49.87	0.50
稳定性	热像仪示值温度/℃	49.8	49.7	49.3	49.4	49.1	48.8	49.5	49.37	

由表 1 可知,大气透过率误差引入的温度示值误差为 0.27℃。由于该热像仪温度示值与黑体源温度互为独立变量,参照 GJB 3756—1999 测量不确定度的表示及评定 B 类不确定度的评定^[19],取包含因子为 $C_p = \sqrt{3}$,则由大气透过率参数误差引入的不确定度分量 u_{ra} 为 0.16℃。

2)被测目标表面发射率误差引入的不确定度^[20-21]。同理,在保持其他参数不变的情况下,仅改变目标的发射率参数,其参数调整的分辨率为 0.01,将发射率由 0.97 修改为 0.91,采集热像图,读取面源黑体及热像图中黑体的温度示值,温度统计结果见表 1。

3)目标发射率误差引入的温度示值误差为 0.78℃,由发射率参数误差引入的 B 类不确定度分量为 0.45℃。环境温度测量误差引入的不确定度为 0.08℃;测试距离变化 5 m 引入的不确定度分量为 0.24℃;大气温度误差引入的不确定度分量 0.25℃;热像仪的稳定性误差引入的不确定度分量为 0.29℃。

根据面源黑体的计量检测报告给出的检测结果^[22],其在 50、100℃温度下,当 $k=2$ 时的扩展不确定度为 0.8℃,则面源黑体在 100℃范围内的标准不确定度为 0.40℃。计算得到静态红外辐射表观温度测量合成标准不确定度为 0.77℃,静态红外辐射表观温度测量扩展不确定度为 1.54℃(95%置信概率)。

动态跟踪测量主要是目标运动特性适配性的影响。若热像仪系统在全分辨率情况下的帧频为 50 Hz,则每幅图像间的时间间隔约为 0.02 s。假设装备以 60 km/h 速度,相对于距离 200 m 的测试系统做横向运动,则目标相对于测试系统的横向移动速度约为 16.67 m/s。在 0.02 s 时间内,目标的横向距离差为 0.33 m。对于空间分辨率为 0.08 mrad 的红外测试系统,对无跟踪转台的测试设备,热像仪图像中将导致约 20 个像素点的图像混叠,从而出现图像拖尾现象,无法获取清晰可靠的红外热像图。由于目标图像出现混叠,将导致提取的表面辐射温度数据出现较大误差。

以辐射面积为 400 mm×400 mm 的面源黑体作为测试对象,黑体温度设置为 80℃,将热像仪架设在距离热像仪 80 m 处的移动车辆平台上。通过分别在热像仪稳定架设状态和热像仪运动状态下采集黑体的红外视频图像,以模拟在对运动目标进行红外隐身特性测试过程中可能由于跟踪转台晃动、运动目标加速、跟踪延迟等因素导致目标图像混叠或偏移对红外特性的影响。从录制的红外视频中抽取的典型状态下的热像图见图 3,对图像中面源黑体区域最高温度示值进行统计,其统计结果见表 2。



a 黑体



b 定标图

图 3 动态红外试验用黑体和定标图
Fig.3 (a) Blackbody and (b) calibration for dynamic infrared test

表 2 动态红外影响试验统计
Tab.2 Statistics of dynamic infrared influence test

图像帧号	采集状态	图像影响描述	最大位移 像素/个	框选区域 最高温度/°C	黑体面源区 平均温度/°C	与黑体 温差/°C
32	静止状态	清晰	0	80.1	79.5	-0.1
51	运动状态	清晰、小位移	10	80.1	79.5	-0.5
144	运动状态	清晰、小位移	4	80.1	79.4	-0.6
183	运动状态	清晰、较大位移	8	80.1	79.3	-0.7
279	运动状态	散焦、小位移	14	80.1	78.4	-1.6
335	运动状态	清晰、较大位移	4	80.1	79.5	-0.5
375	运动状态	散焦、大位移	27	80.1	76.9	-3.1
448	运动状态	散焦、较大位移	28	80.1	76.6	-3.4
516	运动状态	散焦、大位移	19	80.1	77.8	-2.2
541	运动状态	散焦、大位移	25	80.2	77.2	-2.8
647	运动状态	散焦、大位移	29	80.0	75.2	-4.8

在模拟运动状态下, 当目标像元偏且发生混叠、散焦现象时, 与黑体的设定温度差值在 $-0.5 \sim -4.8$ °C 之间波动, 取 11 次均值误差为 -1.84 °C, 置信度概率为 68%, 则动态测试试验过程中的温度测量不确定度因子为 -1.05 °C。计算得到动态红外辐射表观温度测量合成标准不确定度为 1.30 °C, 动态红外辐射表观温度测量扩展不确定度为 2.60 °C (95%置信概率)。

3 结论

1) 在复杂地面背景下, 对装备红外辐射测量影响较大的因素主要是大气传输衰减、大气环境温度、目标表面发射率和目标与热像仪的相对运动等, 其中目标表面发射率、热像仪稳定性和相对运动对辐射温度测量反演影响相对较大。

2) 采用校准黑体与被测目标等距离同视场同步标定测量方法构建的地面装备红外辐射表观温度测量不确定度分析评定模型, 可有效表征热像仪的测量精度, 其中静态和动态测量不确定度分别为 1.54 °C 和 2.60 °C, 置信概率为 95%。

参考文献:

- [1] 秦娜. 装甲车辆在红外隐身措施下的仿真评估[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
QIN Na. Simulation evaluation of armored vehicles under infrared stealth measures[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2015.
- [2] 林益. 不同隐身措施下的目标红外辐射特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
LIN Yi. Research on infrared radiation characteristics of target under different stealth measures[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013.
- [3] 张伟. 红外热像仪精确测温技术探讨[J]. 军民两用技

术与产品, 2016(4): 155-155.

ZHANG Wei. Discussion on accurate temperature measurement technology of infrared thermal imager[J]. Dual use technologies & products, 2016(4): 155-155.

- [4] 汪向阳, 陈佐龙, 白华彩. 目标红外辐射特性测量方法探讨[J]. 兵器试验, 2013(4): 41-44.

WANG Xiang-yang, CHENG Zuo-long, BAI Hua-cai. Discussion on measurement method of target infrared radiation characteristics[J]. Weapon test, 2013(4): 41-44.

- [5] 王建军, 黄晨, 李舰艇. 红外辐射测量系统内外标定技术[J]. 红外与激光工程, 2014(6): 1767-1771.

WANG Jian-jun, HUANG Chen, LI Jian-ting. Internal and external calibration technology of infrared radiation measurement system[J]. Infrared and laser engineering, 2014(6): 1767-1771.

- [6] 杨国庆, 李周, 何锋赞. 基于神经网络的非线性大气修正实现红外目标辐射测量[J]. 红外与激光工程, 2020(5): 177-184.

YANG Guo-qing, LI Zhou, HE Feng-yun. Infrared target radiation measurement based on nonlinear atmospheric correction of neural network[J]. Infrared and laser engineering, 2020(5): 177-184.

- [7] 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(8): 1871-1877.

GUO Li-hong, GUO Han-zhou, YANG Ci-yin, et al. Improvement of radiation measurement precision for target using atmosphere corrected coefficients[J]. Optics and precision engineering, 2016(8): 1871-1877.

- [8] 罗中华, 陈亮, 刘增灿, 等. 地面动目标红外辐射特性测量标定方法[C]//第一届试验鉴定与目标特性学术论坛论文集. 北京, 2020.

LUO Zhong-hua, CHENG Liang, LIU Zeng-can, et al. Calibration method of ground moving target infrared radiation characteristics measurement[C]//Proceedings of the first academic forum on test identification and target characteristics. Beijing: [s. n.], 2020.

- [9] 杨词银, 张建萍, 曹立华. 基于实时标校的目标红外辐射测量新方法[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(3): 284-288.
YANG Ci-yin, ZHANG Jian-ping, CAO Li-hua. Infrared radiation measurement based on real-time correction[J]. J infrared millim waves, 2011, 30(3): 284-288.
- [10] 王飞翔, 郭杰, 赵志军, 等. 不同海拔地区红外大气透率的计算和测量[J]. 中国光学, 2019(4): 843-852.
WANG Fei-xiang, GUO Jie, ZHAO Zhi-jun, et al. Calculation and measurement of infrared atmospheric transmittance at different altitudes[J]. China optics, 2019(4): 843-852.
- [11] 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.
LI Yun-hong, SUN Xiao-gang, YUAN Gui-bin. Accurate measuring temperature with infrared thermal imager[J]. Optics and precision engineerin, 2007, 15(9): 1336-1341.
- [12] 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.
ZHANG Jian, YANG Li, LIU Hui-kai. Effect of environmental object on infrared temperature measurement[J]. Infrared technology, 2005, 27(5): 419-422.
- [13] 寇蔚, 杨立. 热测量中误差的影响因素分析[J]. 红外技术, 2001, 23(3): 32-34.
KOU Wei, YANG Li. Infrared thermograph testing and heat transfer analysis complex material of contained delaminf tion[J]. Infrared technology, 2001, 23(3): 32-34.
- [14] 刘慧开, 杨立. 太阳辐射对红外热像仪测温误差的影响[J]. 红外技术, 2002, 24(1): 34-37.
LIU Hui-Kai, YANG Li. Effect of radiation of the sun on infrared temperature measurement[J]. Infrared technology, 2002, 24(1): 34-37.
- [15] 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, 32(1): 43-45.
YANG Li, KOU Wei, LIU Hui-kai, etal. Surface emissivity measurement and error analysis using infrared thermograph[J]. Laser& infrared, 2002, 32(1): 43-45.
- [16] 杨立. 红外热像仪测温计算与误差分析[J]. 红外技术, 1999, 21(4): 20-24.
YANG Li. Calculation and error analysis of temperature measurement using thermal imager[J]. Infrared technology, 1999, 21(4): 20-24.
- [17] 贾光亮, 宋雨宸. 基于 MODTRAN 的红外大气透过率计算方法研究[J]. 电子世界, 2018(1): 71-72.
JIA Guang-Liang, SONG Yu-chen. Research on calculation method of infrared atmospheric transmittance based on MODTRAN[J]. Electronics world, 2018(1): 71-72.
- [18] 赵志军, 许方宇, 杨昆. 红外整层大气透过率测量方法研究[J]. 红外技术, 2018(7): 718-722.
ZHAO Zhi-jun, XU Fang-yu, YANG Kun. Study on measurement method of infrared whole layer atmospheric transmittance[J]. Infrared technology, 2018(7): 718-722.
- [19] 刘增灿, 邓爱明, 高海波. RCS 校准及测量不确定度分析研究[J]. 隐身技术, 2012(2): 28-31.
LIU Zeng-can, DENG Ai-ming, GAO Hai-bo. RCS calibration and measurement uncertainty analysis[J]. Stealth technology, 2012(2): 28-31.
- [20] 刘波, 郑伟, 李海洋. 材料表面发射率测量技术研究进展[J]. 红外技术, 2018(8): 725-732
LIU Bo, ZHENG Wei, LI Hai-yang. Research progress of measurement technology of material surface emissivity[J]. Infrared technology, 2018(8): 725-732.
- [21] 刘占一, 许婷, 胡锦涛. 热防护材料表面发射率测试研究[J]. 火箭推进, 2019(4): 79-84.
LIU Zhan-yi, XU Ting, HU Jing-hua. Measurement study on surface emissivity of thermal protection material[J]. Journal of rocket propulsion, 2019(4): 79-84.
- [22] 包翱翔, 曹盘勋. 高精度低温面源黑体的研究[J]. 激光与红外, 2018(8): 1023-1026.
BAO Ao-ao, CAO Pan-xu. Research of high-precision low temperature extended surface blackbod[J]. Laser & infrared, 2018(8): 1023-1026.