

文章编号: 1672-8785(2019)02-0019-06

## 红外辐射测量设备外场标定精度鉴定方法

禄晓飞 赵 慧

(中国酒泉卫星发射中心, 甘肃酒泉 732750)

**摘 要:** 红外辐射特性是武器装备的一项重要指标。目前, 通过理论计算对其进行设计, 并基于风洞进行静态试验, 最后通过外场实际动态试验进行验证。与设计及风洞试验相比, 外场试验具有很多复杂因素, 因此对外场设备的精度进行检验是十分必要的。阐述了在外场对红外辐射测量标定精度进行验证的方法流程, 并给出了实际测量结果。

**关键词:** 红外; 外场; 精度

**中图分类号:** TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.02.004

### Identification Method of Outdoor Calibration Accuracy of Infrared Radiation Measuring Equipment

LU Xiao-fei, ZHAO Hui

(Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan 732750, China)

**Abstract:** Infrared radiation characteristics are the important indexes of weaponry. Nowadays, the characteristics of weaponry are usually designed through theoretical calculation. Then, the static experiment is made on them in a wind tunnel. Finally, they are verified in the outdoor dynamic experiment. Compared with the design and the experiment made in a wind tunnel, the outdoor experiment may meet many complicated factors. Therefore, it is necessary to identify the accuracy of infrared measuring equipment used outdoors. The identification method of the outdoor calibration accuracy of infrared measuring equipment is described and the practical measurement results are given.

**Key words:** infrared; outdoor; accuracy

## 0 引言

武器装备的红外辐射特性测量与分析一直是国内研究的重点<sup>[1-5]</sup>。该测量一般分为静态室内测量和动态外场测量两种。室内测量时, 环境(温度、湿度、杂散辐射)是受控的; 外场测量时, 环境是非受控的。测量前, 需要对红

外辐射测量设备<sup>[6]</sup>(见图1)进行标定。一般使用标准黑体和平行光管生成远场平行光; 红外焦平面探测器接收到能量后产生灰度输出; 根据灰度输出和标准黑体温度计算红外辐射测量设备的定标参数<sup>[7-8]</sup>。由于外场环境不可控, 且红外标定参数受外部环境影响较大, 因此需

收稿日期: 2019-01-07

作者简介: 禄晓飞(1981-), 男, 河南许昌人, 博士, 主要从事红外数据处理研究。

E-mail: luxf08@163.com

要对定标参数进行复核并对精度进行检验<sup>[9-13]</sup>。

### 1 外场成像精度鉴定试验方案

为了在相同的试验条件下对红外辐射测量设备的外场测量精度进行检验,可将黑体设置在距离红外辐射测量设备几公里处,然后调整黑体温度,并用红外辐射测量设备对其进行测量。由地面自动化气象站、太阳辐射计和激光雷达采集气象参数,再由大气透过率软件计算大气透过率,接着对测量目标进行反演,进而检验红外测量精度。

图 2 为外场车载黑体的长波红外和中波红外图像。车辆布设在离红外测量设备 2.22 km 处,随车带 3 kW 油机给黑体供电,面源黑体放在车顶或车外等不被遮挡的地方。为减少外界干扰,试验一般在夜间进行。试验人员给黑体设置温度,等温度稳定后通知红外设备操作人员进行测量。设置的温度范围一般为从常温到面源黑体最高温度,间隔为 10 °C。由于黑体稳定需要较长时间,整个外场黑体标定的用时约为 2~3 h。

在稳定的外场环境中,黑体与红外辐射测量系统的距离为  $d$ ,黑体清晰成像时红外辐射测量系统的焦距为  $f_d$ ,设定黑体的多个温度点  $T_i$ ,红外系统测得灰度  $G_i$ 。灰度  $G_i$  与黑体温度  $T_i$  之间的关系为

$$\begin{cases} G_1 = kA_d \frac{A_o}{f_d^2} \tau_d \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T_1) \cdot \alpha(\lambda) d\lambda + B_d \\ G_2 = kA_d \frac{A_o}{f_d^2} \tau_d \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T_2) \cdot \alpha(\lambda) d\lambda + B_d \\ G_n = kA_d \frac{A_o}{f_d^2} \tau_d \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T_n) \cdot \alpha(\lambda) d\lambda + B_d \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $k$  和  $B_d$  分别为用平行光管进行标定时算得的响应度和底电平;  $A_d$  为单个探测像元的面积;  $A_o$  为光学系统的入瞳面积;  $\alpha(\lambda)$  为红外辐射测量系统的光谱响应度。红外系统与黑体的距离为  $d$ ,其间的大气会辐射能量,因此  $B_d$  值不但包括相机固有的红外辐射,而且

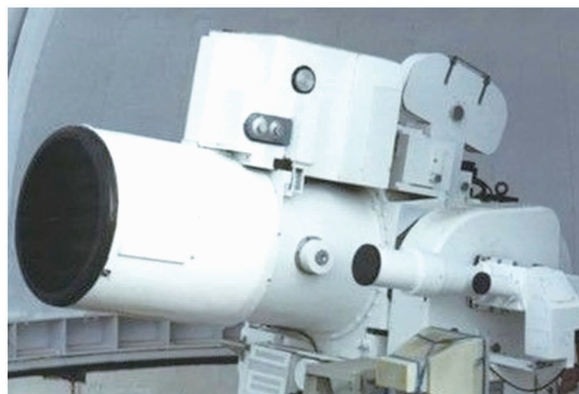


图 1 外场地基红外辐射测量设备



(a) 长波红外图像(2.22 km)



(b) 中波红外图像(2.22 km)

图 2 外场车载黑体成像精度验证试验

还应包括大气程辐射、地面热辐射和太阳反射能量。 $\tau_d$  为黑体与红外系统之间大气的透过率。地基红外辐射测量设备都配有大气透过率计算软件。根据自动化气象站和水平能见度仪得到的大气参数,该软件可以计算出水平距离  $d$  内的大气透过率  $\tau_d$ 。外场测量的  $\tau_d$  可近似为  $\bar{\tau}_d$ 。

根据式(1)可得:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T_n) \cdot \alpha(\lambda) d\lambda = \frac{G_n - B_d}{kA_d \frac{A_o}{f_d^2} \tau_d} \quad (2)$$

红外辐射测量设备的光谱响应度  $\alpha(\lambda)$  和波长范围  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  是固定的, 所以对于任一温度  $T_i$ ,  $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T_n) \cdot \alpha(\lambda) d\lambda$  是有确定的计算结果的。因此可建立温度  $T_i$  与  $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T_n) \cdot \alpha(\lambda) d\lambda$  的对应查询表, 进而根据  $\frac{G_n - B_d}{kA_d \frac{A_o}{f_d^2} \tau_d}$  来反演出黑体温度。

## 2 试验数据分析

### 2.1 第一次试验结果

地面黑体辐射测量试验的具体时间为 8 月 28 日 17:50~19:30。我们将面源黑体放置在地面距设备 2.22 km 处, 然后用相机对准该黑体进行拍摄。同时, 大气辐射特性测量系统同步采集大气参数。大气透过率由设备配套软件计算得到。一般是基于 Lowtran 和 Modtran 模型进行计算。利用拍摄的黑体图像以及大气参数反演黑体温度与辐射亮度, 并将其与实际的黑体温度和辐射亮度(黑体温度可设定)进行对比, 以验证设备的测量精度。

表 1 列出了面源黑体的具体参数。表 2 和表 3 分别列出了测量时刻的天气情况和大气参数。表 4 和表 5 列出了反演结果与实际数据的对比情况。

表 1 黑体参数

黑体	参数
型号	ISDC IR150
类型	面源
尺寸	300 mm×300 mm
发射率	0.96
温度精度	0.1 °C

表 2 各时刻的近地面大气参数

时间	温度/ °C	湿度/ %	气压/ hPa	能见度/ km
17:50	26.2	12.3	845.1	65.0
18:05	26.8	12.7	845.1	65.0
18:22	26.6	12.5	845.1	56.1
18:39	26.8	12.9	845.0	65.0
18:59	26.5	12.9	845.0	65.0
19:14	26.9	11.7	845.0	47.9
19:29	26.2	11.7	844.9	65.0

表 3 各时刻的大气透过率及热辐射

时间	透过率		热辐射	
	中波红外	长波红外	中波红外	长波红外
17:50	0.6658	0.5002	0.9237	9.3926
18:05	0.6620	0.4939	0.9544	9.6533
18:22	0.6444	0.4821	0.9793	9.9423
18:39	0.6611	0.4926	0.9594	9.6852
18:59	0.6621	0.4943	0.9458	9.5859
19:14	0.6358	0.4765	0.9973	10.001
19:29	0.6685	0.5046	0.9147	9.2939

表 4 长波红外辐射测量结果

黑体温度/ °C	黑体辐亮度/ (W·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup> )	反演辐亮度/ (W·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup> )	反演温度/ °C	辐亮度误差/ %
80	52.88	50.46	76.8	4.6
100	69.23	66.60	97.0	3.8
120	88.27	89.90	121.6	1.8
140	110.03	111.81	141.6	1.6
160	134.50	138.14	162.8	2.7
180	161.68	179.01	191.9	10.7
200	191.50	203.42	207.6	6.2

表 5 中波红外辐射测量结果

黑体 温度/°C	黑体辐亮度/ (W·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup> )	反演辐亮度/ (W·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup> )	反演 温度/°C	辐亮度 误差/%
100	16.75	11.81	85.0	29.5
120	26.12	19.11	105.8	26.8
140	39.10	29.73	126.3	24.0
160	56.50	44.14	146.5	21.9
180	79.14	67.3	170.2	15.0
200	107.89	91.28	189.0	15.4

## 2.2 第二次试验结果

第二次试验时间为 8 月 28 日 20:40~22:30。我们将面源黑体放置在地面距设备 2.73 km 处,然后用相机对准该黑体进行拍摄。同时,大气辐射特性测量系统同步采集大气参数。利用拍摄的黑体图像以及大气参数反演黑

体温度与辐射亮度,并将其与实际的黑体温度和辐射亮度(黑体温度可设定)进行比对,以验证设备的测量精度。表 6 列出了测量时刻的天气情况和大气参数。表 7 列出了大气透过率的计算结果。表 8 和表 9 分别列出了长波红外和中波红外反演结果。

表 6 各测量时刻的近地面天气参数

时间	温度/°C	湿度/%	气压/hPa	能见度/km
20:40	17.7	29.2	847.6	65.0
20:54	17.2	31.3	847.6	65.0
21:18	16.1	34.7	847.8	64.4
21:33	15.5	36.6	847.9	56.5
21:54	15.2	37.1	848.0	65.0
22:13	14.4	38.8	848.0	64.4
22:27	14.2	38.7	848.0	64.0

表 7 各测量时刻的大气透过率及热辐射

时间	透过率		热辐射(W·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup> )		相对程辐射/%	
	中波红外	长波红外	中波红外	长波红外	中波红外	长波红外
20:40	0.6157	0.4397	0.8772	9.0299	52.03	49.05
20:54	0.6130	0.4356	0.7788	9.0150	52.45	49.46
21:18	0.6101	0.4316	0.7531	8.8883	52.87	49.83
21:33	0.5886	0.4155	0.7616	9.1167	54.67	51.33
21:54	0.6110	0.4311	0.7285	8.7153	52.93	49.84
22:13	0.6097	0.4313	0.7065	8.5608	52.92	49.78
22:27	0.6102	0.4326	0.6994	8.4990	52.79	49.62

表 8 长波红外辐射测量结果

实际值		反演值		误差	
温度/°C	辐亮度/ (W · m <sup>-2</sup> · sr <sup>-1</sup> )	温度/°C	辐亮度/ (W · m <sup>-2</sup> · sr <sup>-1</sup> )	温度差	辐亮度 相对误差/%
80.00	55.21	81.70	56.56	1.70	2.44
100.00	72.27	103.00	75.07	3.00	3.87
120.00	92.12	127.20	99.97	7.20	8.52
140.00	114.82	144.60	120.44	4.60	4.89
160.00	140.34	167.00	149.94	7.00	6.84
180.00	168.67	187.50	180.01	7.50	6.72
80.00	55.21	74.00	50.64	-6.00	-8.29
100.00	72.27	96.00	68.63	-4.00	-5.03
120.00	92.12	118.50	90.54	-1.50	-1.72
140.00	114.82	138.00	112.42	-2.00	-2.09
160.00	140.34	160.00	140.34	0.00	0.00
180.00	168.67	179.30	167.63	-0.70	-0.62

表 9 中波红外辐射测量结果

实际值		反演值		误差	
温度/°C	辐亮度/ (W · m <sup>-2</sup> · sr <sup>-1</sup> )	温度/°C	辐亮度/ (W · m <sup>-2</sup> · sr <sup>-1</sup> )	温度差	辐亮度 相对误差/%
80.00	10.72	63.90	6.93	-16.10	-35.35
100.00	17.52	84.80	12.11	-15.20	-30.85
120.00	27.31	107.70	20.89	-12.30	-23.49
140.00	40.87	127.40	31.85	-12.60	-22.08
160.00	59.03	148.30	47.80	-11.70	-19.03
180.00	82.67	169.10	69.05	-10.90	-16.47
80.00	10.72	66.20	7.39	-13.80	-31.03
100.00	17.52	87.20	12.87	-12.80	-26.56
120.00	27.31	109.50	21.75	-10.50	-20.35
140.00	40.87	128.90	32.83	-11.10	-19.67
80.00	10.72	66.00	7.35	-14.00	-31.42
100.00	17.52	87.10	12.83	-12.90	-26.74
120.00	27.31	109.30	21.65	-10.70	-20.71

### 2.3 试验数据分析

对长波红外和中波红外波段的辐亮度相对误差求平均, 得出设备的长波红外测量误差为 4.3%, 中波红外测量误差为 24.9%。通过分析发现, 误差主要来源于大气透过率计算结果。在第三次试验中, 用实测大气透过率进行了反算(结果见表 10)。结果表明, 中波红外

辐亮度误差的平均值只有 7.9%。

### 3 结束语

本文阐述了在外场对红外辐射测量精度进行验证的方法流程, 并给出了实际测量结果。根据反演辐射亮度和辐射温度计算结果, 可得出以下结论: (1) 本项外场红外辐射精度验证

表 10 中波红外辐射反演结果

黑体温度	黑体辐亮度/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ )	反演辐亮度/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ )	反演 温度	辐亮度 误差/%	温度 误差/K
90	13.08	11.07	83.4	15.4	6.6
100	16.65	14.69	94.7	11.8	5.3
110	20.95	19.31	106.4	7.8	3.6
120	26.07	24.41	117.0	6.4	3
130	32.10	30.41	127.4	5.3	2.6
140	39.16	37.50	137.8	4.2	2.2
150	47.35	45.84	148.3	3.2	1.7
160	56.78	53.68	156.9	5.5	3.1
170	67.56	61.88	164.9	8.4	5.1
180	79.81	72.90	174.5	8.6	5.5
190	93.63	85.32	184.2	8.9	5.8
200	109.15	99.26	193.8	9.1	6.2

试验简单可行,可以对红外辐射测量设备的精度进行鉴定;(2)基于 Lowtran 和 Modtran 模型的大气透过率计算软件在计算短程水平大气透过率时存在一定误差。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 张建奇, 方小平. 红外物理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [3] 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.
- [4] 徐顶国, 桑建华, 罗明东. 背景辐射下的无人机红外辐射特征仿真研究 [J]. 激光与红外, 2013, 43(6): 649-653.
- [5] 樊宏杰, 刘连伟, 许振领, 等. 空中目标反射辐射特性工程算法 [J]. 红外技术, 2013, 35(5): 289-294.
- [6] 航天测控站 [EB/OL]. <http://www.ck365.cn/baike/1/540.html>, 2018.
- [7] 高惠璇. 应用多元统计分析 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [8] 陆子凤. 红外热像仪的辐射定标和测温误差分析 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.
- [9] 李云红. 基于红外热像仪的温度测量技术及其应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [10] 王文革. 辐射测温技术综述 [J]. 宇航计测技术, 2005, 25(4): 20-32.
- [11] 徐南荣, 卞南华. 红外辐射与制导 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [12] 陆段军, 王模昌, 郁蕴健, 等. 凝视型地球辐射探测仪的辐射标定技术研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(1): 42-45.
- [13] 杨词银, 曹立华. 大口径红外光电系统辐射定标及误差分析 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1624-1628.