

## 一种简易红外标定系统的设计

李 斌, 吴海英, 王文涛, 刘 鹏

(中国华阴兵器试验中心, 陕西 华阴 714200)

**摘 要:** 针对目前红外辐射特性测量系统标定方法中实验室标定和工程实践标定中存在的问题, 设计了一种适合野外实际应用的简易红外标定系统, 建立了一种非线性红外标定响应模型, 深入分析了标准辐射源等关键指标, 并设计了其相应的标定辅助系统。采用该标定方法搭建了相应的红外辐射标定系统进行了实验, 将获取结果与实验室标定结果进行了对比, 结果表明: 设计的红外标定系统具有较高精度, 且简便、易行, 适用于目标红外辐射特性测量和标定。

**关键词:** 红外系统; 标定; 黑体; 特性测量

中图分类号: TN21 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)02-0458-06

## Design of a simple infrared calibration system

Li Bin, Wu Haiying, Wang Wentao, Liu Peng

(China Huayin Ordnance Test Center, Huayin 714200, China)

**Abstract:** In order to solve problem of the existing infrared calibration system as laboratory calibration and engineering calibration, a simple infrared calibration system was designed for practical applications in the fields. Its response model was established. Key parameters such as the standard radiation source were also analyzed in detail. In addition, an assistant system was designed and performed in practical measurements. A infrared radiation calibration system was built up and the corresponding experiment was performed. Compared with the laboratory calibration results, it was shown that the designed setup could be employed in infrared calibration and radiation measurement with attractive precision and useful simplicity.

**Key words:** infrared system; calibration; blackbody; characteristics measurement

## 0 引言

目标红外辐射特性测量在军事、工程领域具有广泛的应用。利用红外系统进行目标辐射特性测量,需要首先对系统进行标定,以确定系统响应与入瞳辐射的关系。目前,采用的标定方法有实验室标定法、在线标定法等<sup>[1]</sup>。实验室标定方法精度较高,是野外测量的基础,而在辐射测量设备使用时,由于实际工作环境(湿度、温度等)的变化,实验室所完成的标定关系可能发生较大的变化,需应用工程标定方案进行校准,如野外黑体或校正场标定等。与常用的标定方法相对应,在工程实践中实现方案主要有三种:

(一) 利用实验室平行光管进行高精度标定,具有易控制、精度高的优势;(二) 利用辐射源在野外进行标校,辐射标定通常以黑体作为标准辐射源,该类标定在连续、高精度观测中是有效手段;(三) 利用自然场景辐射特性进行标校,该类方案在遥感、大气物理、星载设备运用较多,比如国内的青海湖、美国的白沙靶场在实际中作为自然场景辐射源进行应用<sup>[2]</sup>。

文中设计完成了一种适合野外实际应用的简易红外标定系统,建立了一种非线性标定响应模型,并设计了其相应的标定辅助系统。实验结果表明,该简易标定系统可在实际应用中完成红外系统的快速、准确标定。

## 1 红外标定系统非线性响应模型的建立

### 1.1 标定原理

红外测量系统在进行辐射特性测量时,通过辐射标定,使其能够较准确地反映辐射测量系统本身的响应特性,从而实现目标准确的辐射测量<sup>[3-4]</sup>。对以红外焦平面探测器为传感器的辐射特性测量系统,其标定方案的关键是确定入射信号与输出信号(一般为电压、数字图像灰度等)之间的关系<sup>[5]</sup>。假设照射在焦平面上某一个探测像元的能量  $E_{ij}$ , 而该探测元的输出数值为  $V_{ij}$ , 则红外探测器线性响应模型如下

$$V_{ij} = E_{ij}k_{ij} + b_{ij} \quad (1)$$

式中:  $k_{ij}$  和  $b_{ij}$  分别为该探测元的增益和偏移。在理想情况下,各探测元的  $k_{ij}$ 、 $b_{ij}$  都相同,  $V_{ij}$  反映输出电压是一致的。在实际情况下,红外探测器像元响应应具有非均匀性,主要表现在各探测元的增益与偏移参

数不一致,即各点的  $k_{ij}$  和  $b_{ij}$  都不相同。

### 1.2 红外探测器非均匀性分析

红外探测器的非均匀性,源于系统中出现的噪声。红外系统噪声主要来自三个方面:探测器噪声、辐射背景和环境噪声、电子线路噪声。

#### (1) 探测器噪声

探测器噪声包含热噪声、散粒噪声、产生-复合噪声等。

热噪声:由载流子无规则的热运动引起的噪声。

散粒噪声:阴极电子到达阳极速率无规则起伏引起的噪声。

产生-复合噪声:由产生-复合速率随机起伏引起的噪声。

HgCdTe 探测器的噪声源中产生-复合噪声很小,其主要的噪声为热噪声和散粒噪声,因而噪声均方电流可表示为:

$$\overline{i_n^2} = \left( 2eI + \frac{4kT}{R_d} \right) \Delta f \quad (2)$$

#### (2) 背景噪声和环境噪声

背景辐射有两方面作用:首先,作为恒定入射,增大了成像响应;其次,背景辐射存在随机起伏,引起了光子噪声:

$$\overline{\Delta N_B^2} = G_N \Delta f \quad (3)$$

#### (3) 电子线路噪声

电子线路噪声源于探测器内部线路。红外探测系统中存在的探测器外部线路噪声,形成背景噪声,同时存在一定的噪声起伏。

### 1.3 一种非线性响应模型的建立

根据对探测系统响应、探测系统噪声分析可知,在精度要求不高时,系统满足线性模型。为提高系统标定精度,在分析非均匀性原理的基础上,提出了一种非线性响应模型。考虑探测器噪声、背景噪声、电子线路噪声,分析红外测量系统成像响应(文中为图像灰度)的因素主要有:目标辐射、背景辐射、探测噪声和曝光时间。建立响应模型时,综合归纳如下。

存在目标线性响应,与目标辐射、曝光时间线性相关;存在目标非线性响应,与目标辐射、曝光时间非线性相关;存在噪声常量,分别与曝光相关、无关两部分。根据非均匀性分析中噪声的分析表达式,建立如下响应模型:

$$H = t_{\text{曝光}}(AM + \sqrt{t_{\text{曝光}} BM} + C) + D \quad (4)$$

在该模型中, 分别以  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  表征目标线性响应、目标非线性响应、与曝光时间相关的噪声量、与曝光无关的噪声量,  $H$  为系统图像灰度,  $M$  为目标辐出度。

## 2 简易红外标定系统设计

论文涉及的红外测量系统参数如表 1 所示。

表 1 红外系统测量参数

Tab.1 Measurement parameters of infrared system

Physical quantity	Performance parameters
Wave band/ $\mu\text{m}$	3-5
Detector	MCT(HgCdTe) IRFPA
Pixel number	320×240
Pixel spacing/ $\mu\text{m}$	30
Size of photosensitive surface/ $\text{mm}^2$	9.6×7.2
Focal length/mm	711
Clear aperture/mm	185.2

### 2.1 辐射源最小成像尺寸分析

红外测量系统观测红外目标, 目标经过光学系统到达热像仪靶面, 影响光学传播能量的因素主要有: 光学直线传播的衰减效应(大气透过率、光学系统透率)、光学衍射、像差(对于像差问题, 高精度测量要求像差校正, 这里不做研究), 这里着重研究光学衍射效应。

利用红外标定系统实现辐射标定, 需考虑并尽量避免衍射效应造成的标定误差。直观而言, 只有选取辐射源成像尺寸尽可能大的黑体辐射源, 才能很好克服衍射造成的问题<sup>[6]</sup>。要提高系统辐射测量精度, 需要消除成像形成的扩散影响, 则如图 1 所示。

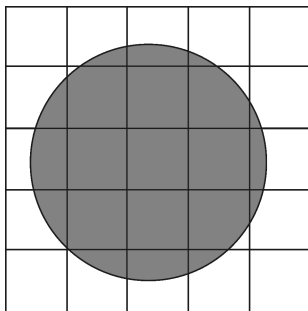


图 1 靶面成像与所需尺寸关系图

Fig.1 Target imaging and the needed size

对于红外光学系统, 由于衍射效应, 任意点目标在成像时会形成艾里斑。其衍射斑可表示为:

$$d = 2.44\lambda \left( \frac{D}{f'} \right)^{-1} \quad (5)$$

式中:  $d$  为衍射斑直径;  $\lambda$  为截止波长;  $D/f'$  为相对孔径;  $D/f' = 1/3.5$ 。当  $\lambda = 3 \mu\text{m}$ ,  $d = 25.6 \mu\text{m}$ ; 当  $\lambda = 5 \mu\text{m}$ ,  $d = 42.7 \mu\text{m}$ 。

如果黑体较大, 在靶面成像时充满视场或占据较多像素, 则靠近目标中心的区域与某一或某几像素形成映射关系; 如果黑体较小, 以致于目标成像时, 衍射效应产生严重影响, 则难以确定映射关系。

根据分析可知, 在黑体满足一定尺寸时, 能够产生避免衍射影响的区域, 如图 2 所示。

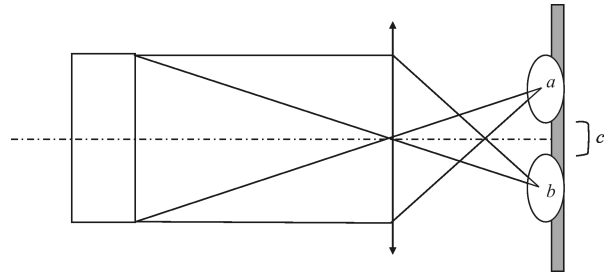


图 2 靶面成像衍射示意图

Fig.2 Diffraction introduced in target imaging

黑体辐射经光学系统后, 在靶面产生若干衍射斑, 其中  $a$ 、 $b$  为靶面上目标边缘成像的衍射斑, 在  $a$ 、 $b$  之间, 衍射斑交互叠加。当黑体尺寸最小时, 存在区域  $c$ , 该区域与黑体成像对应, 且不因衍射而发生能量改变。考虑黑体辐射在任意像元成像, 均具有完整像元的辐射关系, 则区域  $c$  满足  $c \geq 2a_0$  ( $a_0$  为单像元尺寸)。

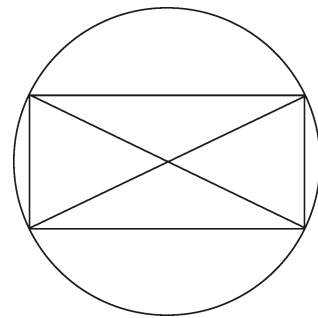


图 3 黑体直径计算图

Fig.3 Diameter of the black body

此时, 目标成像大小为:

$$2 * (d/2) + c \quad (6)$$

取  $d$  为  $42.7 \mu\text{m}$ ,  $c$  为  $60 \mu\text{m}$ , 则成像为 3.42 像元。

由图 3 可知, 黑体成像直径最小为:

$$\Phi = \sqrt{3.42^2 + 0.5^2} = 3.46 \text{ 像元}$$

2.2 辐射源尺寸计算

根据视场观测尺度的方法计算辐射源尺寸。如图 4 所示，在距离红外测量设备  $L$  处放置一直径为  $D$  的黑体时：

$$D/2=L*\text{Tan}(\theta/2)$$

$$D=2*L*\text{Tan}(\theta/2)$$

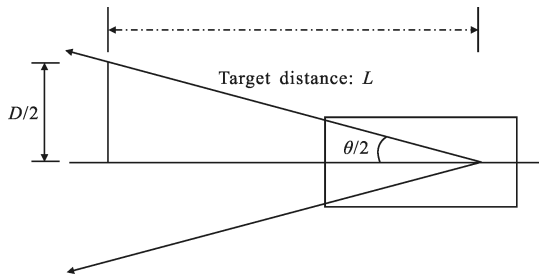


图 4 野外成像标定示意图

Fig.4 Outdoor calibration

在 1 km 处：

$$D=2*1\ 000*\text{Tan}(\theta/2) \tag{7}$$

表 2 中，每个像元对应角度为  $8.4''$ ，则每个像元对应视场范围与距离的关系为：

$$A=2*L*\text{Tan}(\theta_{\text{像元}}/2) \tag{8}$$

表 2 黑体观测距离与成像范围表

Tab.2 Detecting distance and field of view

Detecting distance /km	Field of view/cm			
	1 pixel	3 pixel	3.46 pixel	5 pixel
0.5	2.036	6.109	7.045	10.18
1	4.072	12.22	14.09	20.36
2	8.145	24.43	28.18	40.72
3	12.22	36.65	42.27	61.09
4	16.29	48.87	56.36	81.45
5	20.36	61.09	70.45	101.8
6	24.43	73.3	84.54	122.2
7	28.51	85.52	98.63	142.5
8	32.58	97.74	112.7	162.9
9	36.65	110	126.8	183.3
10	40.72	122.2	140.9	203.6

2.3 标准辐射源选型与计量检测

根据以上分析计算，对于远距离标定，要在横向或纵向向上达到 3 个以上的成像像元，则需要在 5 km 处具有 60.1 cm 的视场，在 10 km 处具有 122.2 cm 的视场。如此大尺寸的黑体，实现难度大且经费高。对于近距离标定，在 500 m 处，具有 6.01 cm，是可以实现的。

根据标定所需辐射尺寸，选取 0.5 km 为最小标定距离时，7 cm 以上的黑体满足需求。根据当前国内黑体研制情况及简易标定需要，选用面元黑体在精度允许的范围内完成简易标定。面元黑体由有效辐射面和附罩组成，有效辐射面和附罩均加工成同心 V 型槽，产品参数如表 3 所示。

表 3 黑体选型与主要技术指标表

Tab.3 Selected black body and specifications

Specifications of HFY-300A(5-400 °C)	
Temperature range/°C	+5-400
Effective radiation plane /cm	12.8
Temperature resolution/°C	0.1
Temperature stability /°C·mins <sup>-1</sup>	±0.1/30
Detection precision of temperature	±0.15%
Effective emissivity	0.95
Sensor	PT100
Size/mm	230×325×230 (W×H×L)
Weight/kg	4.5



HFY-300A 型黑体经计量检测关键指标符达到设计指标。

直径为 12.8cm 黑体，经计算，适用距离  $\leq 908.4\text{m}$ ，即在该距离内，均可用于辐射标定。在实际操作中，如表 4 所示，约 300~550 m 范围，成像像素数较多，均具有较好的标定效果。

表 4 黑体适用距离计算表

Tab.4 Corresponding distance for black body

Distance	Pixel number of diameter	Effective pixel number	Pixel number without diffraction	Pixel number deducted deviation	Integral pixel number
300	10.48	10.46	9.04	8.04	8
350	8.98	8.97	7.55	6.55	6
400	7.86	7.84	6.42	5.42	5
450	6.98	6.97	5.55	4.55	4
500	6.29	6.27	4.85	3.85	3
550	5.71	5.69	4.27	3.27	3
600	5.24	5.21	3.79	2.79	2
650	4.84	4.81	3.39	2.39	2
700	4.49	4.46	3.04	2.04	2
750	4.19	4.16	2.74	1.74	1
800	3.93	3.9	2.48	1.48	1
850	3.7	3.66	2.24	1.24	1
900	3.49	3.46	2.04	1.04	1
908.4	3.46	3.42	2	1	1

### 3 标定系统设计

标定系统包括三脚架、托盘、逆变器、瞄准具、手持 GPS、指北针定向器等,如图 5 所示,实现的功能主要为:

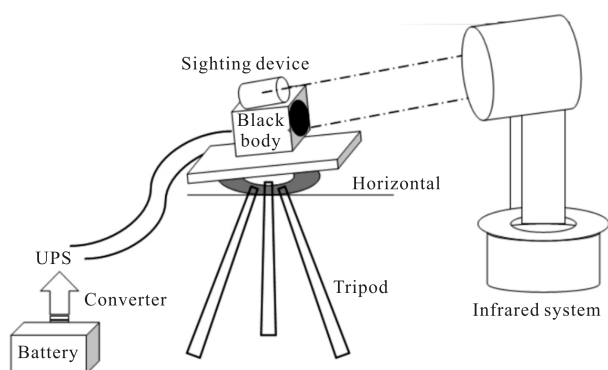


图 5 标定系统图

Fig.5 Calibration system

(1) 三脚架实现黑体固定,便于瞄准或设置各种观测角度;(2) 托盘用于连接及固定黑体、三脚架;(3) 逆变器用于野外供电,为黑体提供不少于 2 h 用

电;(4) 瞄准具辅助黑体与观测系统的对准;(5) 手持 GPS、指北针定向器用于确定位置、观测角度。

标定系统中,瞄准具是主要部件,主要用于对距离黑体一定距离的被标定红外系统进行观测对准,目瞄系统主要技术指标:

主要功能为 18~70 变倍;口径为 60 mm;放大倍率为 18~70 X;望远口径为 60 mm;出射口径为 3.3~0.86 mm;目镜口径为 10.3~9.3 mm;视场角为 1.5°~0.75°;成像范围为 10m~∞。

通过瞄准对准,可使目标落于视场中央 $\pm 1/10$ ,观测角与瞄准镜中心误差角度为 $\pm 1/10$ ,能够保证入瞳辐射的均匀一致性,见图 6。

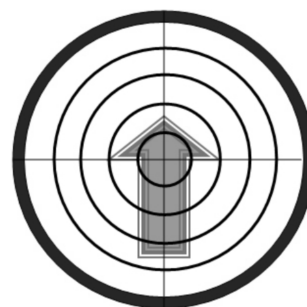


图 6 瞄准镜观测分划图

Fig.6 View by sighting telescope

### 4 系统验证

采用文中研究方法,设计完成一简易红外标定系统,在野外进行实际标定,如图 7 所示。



图 7 红外标定系统野外应用图

Fig.7 Field application of infrared calibration system

利用文中研究的标定系统进行辐射标定,获取的标定结果及精度如表 5 所示,根据标定结果完成的误差分布如图 8 所示。由误差统计结果,并与实验室标定结果(实验室所得辐射出射度响应系数为 19.76)



比较,该标定结果具有较高精度,能够应用于实际标定中。

表5 标定结果及误差计算表

Tab.5 Calibration results and error

Calibration results	$H=(18.49M\tau+\sqrt{3.02t_{\text{Exposure/ms}}M\tau}+3\ 777.34)$ $t_{\text{Exposure/ms}}+146.05$ Gray scale $H\leq 7\ 800$		
Data	Actual gray scale	Calculated gray scale	Square distance
	2108.6	2111.1	6.23
Calibrated point 1	2785.7	2910.2	15489.90
	4028.0	4102.8	5601.02
Calibrated point 2	4078.0	4077.6	0.17
	5784.2	5679.2	11024.37
Calibrated	6042.0	6045.0	9.14
	Root-mean-square error of gray scale		73.20
Precision	Relative error of gray scale		2.11%
	Relative error of radiation exitance		6.65%

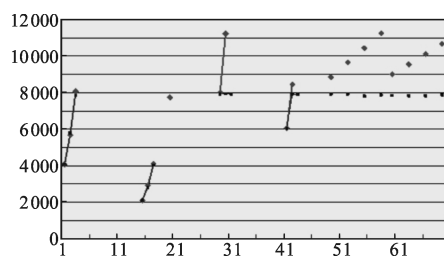


图8 标定误差分布图

Fig.8 Calibrated error distribution

## 5 结论

文中针对红外辐射标定的实际应用问题,研究了红外标定响应模型,设计完成了一种简易红外标定系统,该标定系统黑体直径满足了标定要求,标定简便、易行,具备较高精度;通过标定数据处理,获得

了红外系统响应参数,可用于目标红外特性测量。在实际目标红外特性测试中,该系统已应用于现场测试中,既能满足现场标定需求,也能作为比对分析,提高目标红外特性测量的精度。

## 参考文献:

- [1] Xu Nanrong, Bian Nanhua. Infrared Radiation and Guidance [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997. (in Chinese) 徐南荣, 卞南华. 红外辐射与制导 [M]. 北京: 国防工业出版社.1997.
- [2] Tang Jia, Gao Xin. Calibration method for infrared radiation characteristics measuring system of test range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S1): 266-270. (in Chinese) 唐嘉, 高昕. 靶场红外辐射特性测量系统标定方法研究 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S1): 266-270.
- [3] Cao Lihua, Lin Ning, Yang Ciyin, et al. Radiance calibration for 3-5 $\mu\text{m}$  infrared detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 858-864. (in Chinese) 曹立华, 李宁, 杨词银, 等. 红外探测器的辐射定标[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 858-864.
- [4] Luo Maojie, Zhou Jinmei, Fu Jingneng, et al. Integration time as variable for radiometric calibration of infrared system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (1): 36-40. (in Chinese) 罗茂捷, 周金梅, 傅景能, 等. 考虑积分时间变量的红外系统辐射响应定标[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 36-40.
- [5] Xing Qianglin. Calibration for FPA infrared radiation measuring system [J]. *Journal of spacecraft TT & C technology*, 2007, 26(4): 68-71. (in Chinese) 邢强林. 红外焦平面成像探测辐射特性测量定标方法研究 [J]. 飞行器测控学报, 2007, 26(4): 68-71.
- [6] Li Xiansheng, Ren Jianwei, Zhang Liguo, et al. Research on a radiometric calibration device for a large aperture infrared opto-electric system on spot [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2006, 17(2): 175-178. (in Chinese)