

离轴反射式平行光管在红外性能测试中的应用

吴楠

(中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所,河南 洛阳 471000)

摘要: 离轴反射式平行光管已广泛应用于红外成像系统的性能测试中,测试方法种类繁多,并且还在不断地推陈出新。基于工程实践,介绍了以离轴反射式平行光管为主要组成的测试环境;分析计算了红外靶标的特征频率和角直径,通过红外性能指标的理论定义引出具体的测试方法,并依据测试方法得出测试结果;评价了测试结果反映出的红外热像仪的特性。

关键词: 红外成像系统; 离轴反射式平行光管; 红外靶标; 红外性能测试

中图分类号: V271.4 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2014)10-0089-05

Application of Off-Axis Reflective Collimator in Infrared Capability Testing

WU Nan

(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: Off-axis reflective collimator has been used widely in capability testing of infrared imaging system. There are a lot of testing methods, and new methods are also appearing. Based on engineering experience, the testing environment composed of an off-axis reflective collimator is introduced at first. Then, characteristic frequency and angular diameter of the infrared target are analyzed. A test method is presented based on the definition of infrared performance indicators, and the test result is obtained through the method. The characteristics of the thermal infrared imager reflected by the test result are evaluated in the end.

Key words: infrared imaging system; off-axis reflective collimator; infrared target; infrared capability testing

0 引言

红外热像仪的性能指标与其探测灵敏度、成像质量、作用距离等工作能力紧密相联。平行光管是红外性能指标测试的重要工具,由于平行光管的相对孔径和视场较小,一般采用二反射镜系统结构设计,二反射镜的主镜为抛物面反射镜,次镜为平面反射镜。因为主次镜离轴的系统像质优于主次镜同轴的系统像质^[1],所以,本文选用离轴反射式平行光管^[2]为主要组成的红外性能评价系统对红外热像仪信号传递函数(SiTF)、红外噪声等效温差(NETD)、红外最小可分辨温差(MRTD)、红外最小可探测温差(MDT)、调制传递函数(MTF)等性能指标进行评价研究。

1 红外性能评价系统的组成和工作原理

1.1 系统组成

本红外性能评价系统由离轴反射式平行光管、黑

体、靶标、光学平台、计算机控制及图像采集分析系统和精密转台组成,如图1所示。

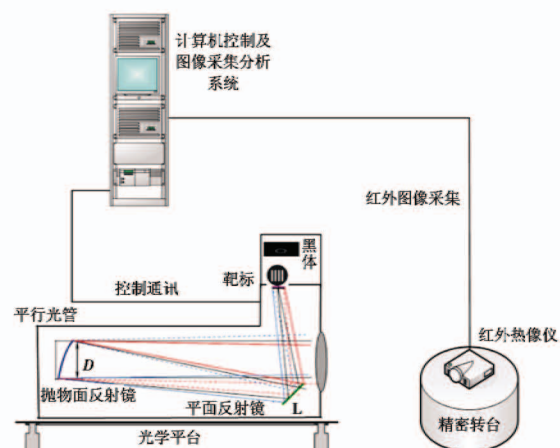


图1 红外性能评价系统组成图

Fig. 1 Infrared capability evaluation system

离轴反射式平行光管包含了抛物面反射镜和平面反射镜;差分面源黑体^[3]、靶轮与平行光管集成于一体,平行光管固定在光学平台上;计算机控制及图像采集分析系统是由监视器、键盘、鼠标、主机服务器等集成的机柜;平行光管的前方放置一个精密单轴转台。

1.2 系统工作原理

差分面源黑体为红外靶标提供高精度的温控辐射源,靶标位于离轴抛物面反射镜的焦点处,靶标发射出的光线先经过一个与水平轴成45°角的平面反射镜L,再入射到离轴抛物面反射镜上,在平行光管的出瞳口形成平行光。红外热像仪安装在精密转台上,红外热像仪的光轴要与平行光管光轴保持一致,计算机控制及图像采集分析系统通过视频采集卡采集到红外热像仪的输出图像,并进行分析计算,评估出红外热像仪的SiTF、NETD、MRTD、MDTD、MTF等性能指标。

2 靶标的分析和计算

红外性能指标的评估需要借助专业的红外测试靶标,见图2。方形靶用于红外信号传递函数(SiTF)的测试;半月靶和实心靶用于红外噪声等效温差(NETD)和调制传递函数(MTF)的测试;四杆靶用于红外最小可分辨温差(MRTD)的测试,圆孔靶用于红外最小可探测温差^[4](MDTD)的测试,后两种靶标镂空处的尺寸需要依据红外热像仪的空间分辨率^[5]计算分析得到。

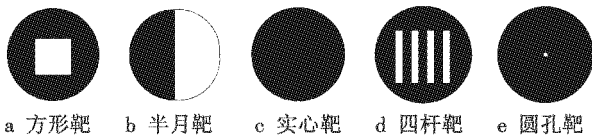


图2 红外测试靶标图

Fig.2 Infrared testing targets

2.1 四杆靶频率计算

实验采用的红外热像仪探测器的分辨率为320×256,光学视场角为10°×8°,MRTD试验的靶标为一组高、宽和间隔比为7:1:1的四杆图案,如图3所示。

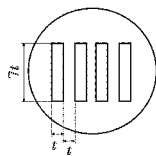


图3 四杆靶的高、宽和间隔关系图

Fig.3 The relation of 4-pole target's height, width and space

测量MRTD曲线时最少要测4个空间频率,实验选用的空间频率 f_i 靶标如下:1) $f_{i1} = 0.3f_T$;2) $f_{i2} = 0.7f_T$;3) $f_{i3} = 1.0f_T$;4) $f_{i4} = 1.5f_T$ 。 f_T 表示四杆靶的特征频率,根据奈奎斯特定理,其数学表达式为

$$f_T = 1/2a_{DAS} \tag{1}$$

式中, a_{DAS} 为探测器像元对热像仪物镜的张角,即热像仪的空间分辨率(单位为mrad), $a_{DAS} = \frac{\text{水平视场角}}{\text{水平像素数}} \times$

17.45 = 0.55 mrad。

四杆靶的特征频率 f_T 为: $f_T = \frac{1}{2 \times a_{DAS}} = 0.9$ (cy/mrad)。因此,应选择空间频率为0.27 cy/mrad、0.63 cy/mrad、0.9 cy/mrad、1.35 cy/mrad的四杆靶进行试验。

2.2 圆孔靶角直径计算

MDTD试验的靶标为一组圆孔靶,其角直径 β 设定如下:1) $\beta_1 = 0.1/f_T = 0.2a_{DAS}$;2) $\beta_2 = 0.5/f_T = 1.0a_{DAS}$;3) $\beta_3 = 2.5/f_T = 5.0a_{DAS}$ 。因此,应选择角直径分别为0.11 mrad、0.55 mrad、2.75 mrad的圆孔靶进行试验。

3 测试方法介绍

3.1 信号传递函数(SiTF)

信号传递函数是响应度函数^[6](Responsibility Function)曲线线性段的斜率,表示系统输入信号到输出信号的转换。SiTF定义为

$$G_{SiTF} = \frac{\Delta V}{\Delta T} \tag{2}$$

式中: ΔV 为靶标电压与背景电压之差; ΔT 为靶标和背景的温差。

测试方法如下所述。

1) 选取方形靶,设定初始温度、测试点数、靶标和背景温差 ΔT 等参数。

2) 红外热像仪进行非均匀校正后,将自动增益关闭。

3) 等黑体温度稳定后,按照图4在方形靶的信号和背景区域分别采样。

SiTF测试数据采样如图4所示。

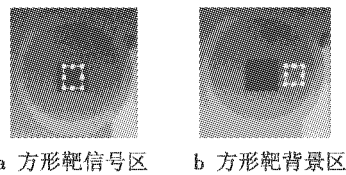


图4 SiTF测试数据采样图

Fig.4 SiTF testing data sampling

4) 逐步改变黑体温差,在多个不同的温差点上重复采集图像测试。

5) 计算机控制及图像采集分析系统记录采样结果,并计算分析得出响应度函数曲线,如图5所示,斜率为SiTF。 X 轴表示温度变化量 ΔT , Y 轴表示电压变化量 ΔV 。

由图5可分析得出,红外热像仪的线性响应区间为-0.5~2.5℃,并且该热像仪对正温差和负温差的响应度并不对称,对正温差的响应度是负温差响应度的4倍左右。

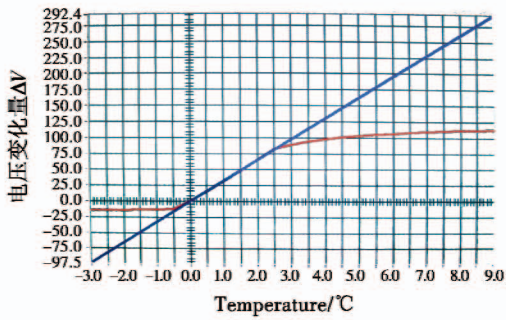


图 5 响应度函数曲线

Fig. 5 Responsibility function curve

3.2 噪声等效温差 (NETD)

噪声等效温差^[7]是在视场中产生的输出信号值等于噪声均方根值时的目标和背景之间的温度差,也就是系统能够识别的最小信号值。

测试方法如下所述。

1) NETD 测试采用的是半月靶和实心靶,半月靶镂空处的尺寸应不小于热像仪探测器像元瞬时视场角 (IFOV) 的 5 倍以上。

2) 在响应度函数的线性区内设定一个温差 ΔT 。

3) 观察监视器中的半月靶,测试前,要调到清晰状态,如图 6 所示。

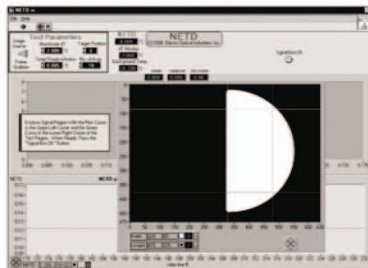


图 6 清晰状态的半月靶

Fig. 6 Clear step-target

4) 选择框在半月靶信号区采样后,靶轮将自动转动到实心靶位置,选择框对背景噪声进行采样。

5) 计算机控制及图像采集分析系统记录采样信号电压、噪声电压及温差等结果,进行 NETD 计算,测得不同温度差 ΔT 下的 NETD 值,如表 1 所示。

表 1 NETD 测试结果

Table 1 NETD testing results

$\Delta T/^\circ\text{C}$	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	NETD(均值)
3	30	30	30	30	30	30
2	27	25	25	24	24	25
0.3	21	25	25	24	24	23.8
-0.3	36	32	34	36	34	34.4

由表 1 的数据可知,同一部热像仪的 NETD 测试结果与目标和背景之间的温度差 ΔT 紧密相关,当 ΔT 在响应度函数的线性区中部取值,NETD 的测试值较

低;当 ΔT 在响应度函数的线性区外或者线性区边缘附近取值,NETD 的测试值就会偏高。

3.3 最小可分辨温差 (MRTD)

最小可分辨温差是综合评价红外系统温度分辨力和空间分辨力的重要参数。当观察者眼睛感觉到的图像信噪比等于视觉阈值信噪比时,对应的目标与背景的温差就是 MRTD。

红外系统 MRTD 这个性能参数体现了系统的空间分辨率、热灵敏度和系统传递函数之间的关系。

测试方法如下所述。

1) 在靶轮上选择与 2.1 节计算得到的特征频率相吻合的四杆靶。

2) 计算机控制和图像采集分析系统设置较高目标背景温差和温差调整步长。

3) 观察图像中的四杆靶,按照步长逐渐降低目标背景温差。

4) 当观察不到四杆靶长度的 3/4 时,记录此时的温差 ΔT_+ 。

5) 继续缓慢降低目标背景温差,这时四杆靶又会再次出现,记录刚好能分辨四杆靶长度 3/4 时的温差 ΔT_- 。

6) 按式(3)计算被测红外系统的 MRTD。

$$T_{\text{MRTD}}(f) = \frac{|\Delta T_+| + |\Delta T_-|}{2} \phi \quad (3)$$

式中, ϕ 为仪器常数,与仪器本身的调制传递函数、透射比及目标发生器的发射率有关。

计算得到不同空间频率下的 MRTD 值,如表 2 所示。

表 2 MRTD 测试结果

Table 2 MRTD testing results

四杆靶空间频率/ ($\text{cy} \cdot \text{mrad}^{-1}$)	MRTD 测量值/ $^\circ\text{C}$	MRTD 预期值/ $^\circ\text{C}$
0.27	0.068	0.25
0.63	0.107	0.25
0.9	0.18	0.3
1.35	0.299	0.5

生成的 MRTD 曲线如图 7 所示。

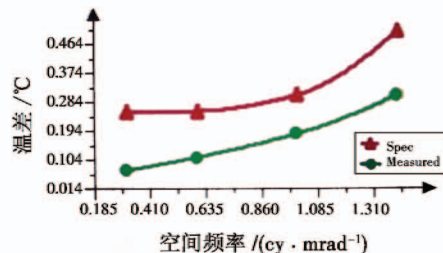


图 7 MRTD 曲线

Fig. 7 MRTD curve

由图 7 可知,红外系统 MRTD 曲线^[8]是随着靶标

空间频率 f_s 增加而升高的。绿线代表 MRTD 测量值,红线代表 MRTD 的预期值,预期值是根据选用的红外热像仪的探测能力理论计算得到的。绿线的值均低于红线的值,说明实际测试结果优于预期;MRTD 曲线受截止频率(即靶标的特征频率 f_T)的限制,到了极限温差时,红外系统将分辨不清四杆靶标了。

3.4 最小可探测温差(MDTD)

当观察者的观察时间不受限制,在计算机控制和图像采集分析系统显示屏上恰好能分辨出一定尺寸的圆形目标及其所在位置时,对应的目标与背景的温差称为最小可探测温差,即 MDTD。

测试方法如下所述。

- 1) 在靶轮上选择与 2.2 节计算得到的角直径相吻合的圆孔靶。
- 2) 计算机控制和图像采集分析系统设置较高目标背景温差和温差调整步长。
- 3) 观察图像中的圆孔靶,按照步长逐渐降低目标背景温差。
- 4) 当观察不到圆孔靶面积的 3/4 时,记录此时的温差 ΔT_+ 。
- 5) 继续降低温差,直到冷圆孔靶标刚出现时,记录温差 ΔT_- 。
- 6) 按式(4)计算被测红外系统的 MDTD 为

$$T_{\text{MDTD}} = \frac{|\Delta T_+| + |\Delta T_-|}{2} \phi \quad (4)$$

由上述步骤可知,MDTD 测试方法和 MRTD 测试方法类似,测试结果分析也可以借鉴 MRTD 测试结果的分析方法,这里就不再赘述。

3.5 调制传递函数(MTF)

调制传递函数是输出信号与输入信号的比值。红外热像仪的调制传递函数^[9]主要由光学系统、探测器、电路和显示器等 4 个组成部分决定,算式为

$$G_{\text{MTF}}(f) = G_{\text{MTFo}}(f) * G_{\text{MTFp}}(f) * G_{\text{MTFep}}(f) * G_{\text{MTFm}}(f) \quad (5)$$

式中: $G_{\text{MTFo}}(f)$ 为光学系统传递函数; $G_{\text{MTFp}}(f)$ 为探测器传递函数; $G_{\text{MTFep}}(f)$ 为成像电路传递函数; $G_{\text{MTFm}}(f)$ 为显示器传递函数。

测试方法如下所述。

- 1) 选取半月靶测试,在 SiTF 的线性区间内设定一个约为高饱和 90% 的差分温度值。
- 2) 观察监视器中的半月靶,测试前,要调到清晰状态。
- 3) 如图 8 所示,使选择框在目标与背景的结合处采样。

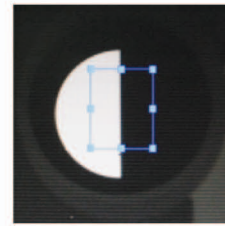


图 8 MTF 采样框选取

Fig. 8 MTF sampling frame

- 4) 计算机控制和图像采集分析系统计算出 MTF 测试结果,如表 3 所示。

表 3 MTF 测试结果

Table 3 MTF testing results

采样的空间频率/(cy · mrad ⁻¹)	MTF 值
0.3	0.66
0.5	0.45
0.8	0.39
1	0.38
1.4	0.03

- 5) 生成的 MTF 曲线如图 9 所示。

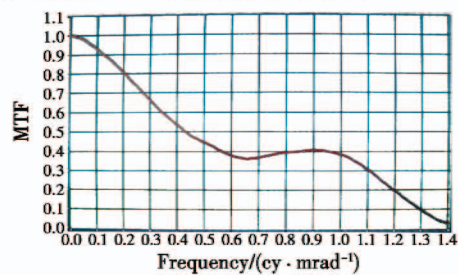


图 9 MTF 曲线

Fig. 9 MTF curve

由图 9 可知,随着空间频率的升高,MTF 曲线逐渐降低,这反映了红外热成像系统对不同空间频率响应的区别;图中空间频率在 0.6 ~ 1 cy/mrad 的 MTF 值趋于平缓,所以,该 MTF 曲线是系统多个 MTF 曲线最终叠加的效果。

4 结论

目前,离轴反射式平行光管在红外系统性能测试中发挥着越来越重要的作用。本文基于离轴反射式平行光管为主要组成的红外性能评价系统,介绍了红外系统性能指标的理论定义和详细的测试方法,并对红外系统性能指标的测试结果加以分析和阐述。本文介绍的红外性能测试方法已经过工程实践的验证,具有可借鉴性。

参考文献

- [1] 车驰骋,李英才,樊学武,等. 离轴二镜平行光管的光学设计[J]. 光子学报,2008,37(9): 1793-1796.

- CHE C C, LI Y C, FAN X W, et al. Optical design for off-axis two mirror collimator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(9):1793-1796.
- [2] 田海雷,汪岳峰,张伟. 离轴抛物面反射式红外平行光管设计[J]. *红外技术*, 2007, 29(12):701-703,707.
TIAN H L, WANG Y F, ZHANG W. Design of the off-axis parabolic reflective infrared collimator[J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(12):701-703,707.
- [3] 杨建斌,张文瑞,柏树,等. 面源红外定标黑体控温热分析[J]. *真空与低温*, 2011, 17(1):23-27.
YANG J B, ZHANG W R, BAI S, et al. Temperature analysis for infrared radiation calibration plane blackbody[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2011, 17(1):23-27.
- [4] 姜贵彬,蓝天,倪国强,等. 红外热成像系统评价的重要参数及测试方法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(s):470-473.
JIANG G B, LAN T, NI G Q, et al. Important parameters and testing methods of performance evaluation of thermal infrared imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(s):470-473.
- [5] 隋修宝,陈钱,陆红红. 红外图像空间分辨率提高方法研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(5):377-379, 385.
SUI X B, CHEN Q, LU H H. Research on improving spatial resolution of infrared image[J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2007, 26(5):377-379,385.
- [6] 权清科,仇振安,崔志新. 红外热成像系统噪声等效温差数字图像测试方法[J]. *电光与控制*, 2013, 20(9):102-104.
QUAN Q K, QIU Z A, CUI Z X. A method for testing IR imaging system NETD based on digital image[J]. *Electronics Optics & Control*, 2013, 20(9):102-104.
- [7] HOLST G C. *Testing and evaluation of infrared imaging systems* [M]. Winter Park, FL: JCD Pub. Bellingham, WA:SPIE Optical Engineer Press, 1998.
- [8] KOSTRZEWA J, LONG J, GRAFF J H, et al. TOD versus MRT when evaluating thermal imagers that exhibit dynamic performance[C]//*Proceedings of SPIE*, 2003, 5076:220-232.
- [9] 杨乐,孙强,郭邦辉. 离轴三反红外双波段景象模拟器光学系统设计[J]. *应用光学*, 2011, 32(6):1212-1216.
YANG L, SUN Q, GUO B H. Optical design of off-axis three-mirror system for infrared dual-band scene simulator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(6):1212-1216.

(上接第84页)

- [7] TANAKA K, OHTAKE H, WANG H O. Guaranteed cost control of polynomial fuzzy systems via a sum of squares approach[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics*, 2009, 39(2):561-567.
- [8] TANAKA K, OHTAKE H, SEO T, et al. An SOS-based observer design for polynomial fuzzy systems[C]//*Proceedings of the American Control Conference*, San Francisco, 2011:4953-4958.
- [9] PARRILO P A. *Structured semi-definite programs and semi-algebraic geometry method in robustness and optimization*[D]. Pasadena: California Institute of Technology, 2000.
- [10] 马清亮,杨海燕,岳瑞华,等. 空间飞行器大角度姿态机动优化控制[J]. *空间控制技术与应用*, 2013, 39(3):8-13.
MA Q L, YANG H Y, YUE R H, et al. Optimization control of spacecraft large angle attitude maneuvers[J]. *Aerospace Control and Application*, 2013, 39(3):8-13.
- [11] PRAJNA S, PAPACHRISTODOULOU A, WU F. Nonlinear control synthesis by sum of squares optimization: A Lyapunov-based approach[C]//*Proceedings of the Asian Control Conference (ASCC)*, Melbourne, 2004:157-165.
- [12] LEE K P, JEUNG E T, PARK H B. Robust fuzzy H_∞ control for uncertain nonlinear systems via state feedback: An LMI approach[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 120:123-134.
- [13] PRAJNA S, PAPACHRISTODOULOU A, PARRILO P A. Introducing SOSTOOLS: A general purpose sum of squares programming solver[C]//*Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, Las Vegas, 2002:741-746.



请扫描二维码
关注我刊

