

文章编号 1004-924X(2016)07-1607-08

基于点源透过率测试系统的杂散光标定

徐亮^{1,2*}, 高立民¹, 赵建科¹, 刘峰¹, 周艳¹, 李朝辉^{1,2}, 杨菲³, 赵青^{1,2}

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国一航西安飞机工业(集团)有限责任公司, 陕西西安 710089)

摘要: 为了提高点源透过率(PST)测试系统的杂散光测试能力及测试精度, 提出并设计了一种标准镜头, 用于在大离轴角范围内对系统的杂散光测试范围及测试精度进行标定。利用简单的物理模型设计了一种在实验室内对点源透过率测试系统杂散光测试精度定标的标准镜头; 测量了标准镜头的表面物理参数, 并将其带入 TracePro 软件计算出了不同离轴角对应的 PST。对设计分析的 PST 值与实测的 PST 值进行比较, 从而计算得到了该测试系统的测量精度。验证实验表明, 该标准镜头的 PST 分析值与实测值之差优于 $1g/0.5$, 满足实验室内对点源透过率测试系统杂散光测量精度进行标定的要求, 是 PST 绝对测量的可靠方法。该项技术为国内 PST 测试系统的精度校准问题提供了技术保障。

关键词: 点源透过率测量; 杂散光测量; 标准镜头; 标定; 双向反射分布函数

中图分类号: TH703; TH743 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162407.1607

Calibration of stray light based on point source transmittance measurement system

XU Liang^{1,2*}, GAO Li-min¹, ZHAO Jian-ke¹, LIU Feng¹,
ZHOU Yan¹, LI Zhao-hui^{1,2}, YANG Fei³, ZHAO Qing^{1,2}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company LTD., Xi'an 710089, China)

* Corresponding author, E-mail: xuliang757@163.com

Abstract: To improve the stray light testing ability and calibration accuracy of the stray light equipment used in test of the Point Source Transmittance (PST), a calibration lens was proposed to calibrate the testing range and testing accuracy of the equipment in a large off-axial angle. By using a simple physical model, the calibration lens was designed in a laboratory. The physical parameters of the calibration lens were measured, then these parameters were taken into the TracePro to calculate the PSTs in different off-axial angles. Finally, the calculated result and the tested result of PSTs were compared, and the test accuracy of the equipment were obtained. The experimental results indicate that the difference between calculate results and testing results of the calibration lens is better than

收稿日期: 2016-03-02; 修订日期: 2016-04-11.

基金项目: 国防科工局专项资金资助项目

lg/0.5, meeting the need of testing accuracy calibration of the stray light equipment in testing PSTs and providing a reliable reference for the absolute measurement of PSTs. This technology solves the problem in testing accuracy calibration of PST measuring systems.

Key words: point source transmittance measurement; stray light measurement; standard lens; calibration; bidirectional reflectance distribution function

1 引言

随着我国航天事业的发展,深空探测、火星计划、探月工程等重点工程已迈入一个新的时代,人们对光电设备的杂散光抑制能力也提出了新的要求,视场外杂散光的抑制能力终将成为评价光电设备探测与成像能力的关键指标。航天用光学系统的杂散光主要来源于视场外明亮物体(尤其是太阳)的强烈辐射,这些辐射经光学系统后发生散射、衍射,并以杂散光形式分布于光学系统的探测器上,从而影响光学系统的探测能力^[1]。

针对杂散光的抑制问题,本课题组研制了一种点源透过率(Point Source Transmittance, PST)测试系统。该系统可精确测试光学系统的杂散光抑制能力,并根据实测杂散光对光学系统进行优化设计,通过改进遮光罩来实现消除杂散光的目标。这就要求 PST 测试系统必须具有高精度,否则不能准确指导光学系统的优化设计^[2-3]。PST 测试系统的标定是保证测量精度的一个关键技术问题,因此,光学系统 PST 的测试将转换成系统测量精度的标定。

本文提出了一种基于 PST 测试系统精确标定的标准镜头。利用该标准镜头的关键表面特性,通过建模分析得出了标准镜头的相对真值 PST,并将实测 PST 与理论 PST 作比较,以此评价该系统 PST 的测试精度。

2 点源透过率测试系统介绍

杂散光测量技术在国外已经比较成熟,Utah State University 的 Space Dynamics Laboratory 在 20 世纪 70 年代就建立了 PST 测试装置 Black Hole,其 PSRR 测试水平可达到 10^{-15} 。但国内起步较晚。目前,国内关于 PST 测试技术的研究单位主要有西安光机所、成都光电所、哈工大等。其中,西安光机所研制的点源透过率测试系统可用

于测量不同波段、不同视场角下的 PST,其原理如图 1 所示。

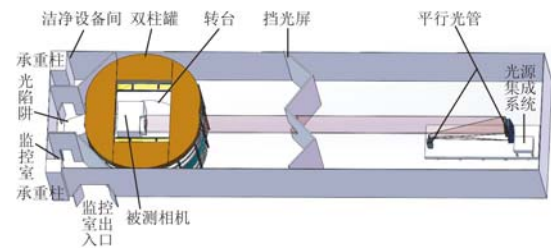


图 1 点源透过率测试系统原理图

Fig. 1 Schematic principle of PST measurement system

图 1 中,由光源出射的均匀点源经平行光管耦合扩束后,形成口径为 $\Phi 1$ m 的均匀面光源(用于模拟无穷远处的强光目标源),穿过黑色双柱罐照亮被测相机光学系统的遮光罩及玻璃表面,形成强杂散光源。在光学系统后焦面放置高灵敏度探测器,用于测量不同离轴角的杂散光光照度。PST 定义为光学系统视场外视场角为 θ 的点源目标的辐射,经光学系统后在像面产生的辐照度 $E_i(\theta, \lambda)$ 与其在光学系统入瞳处的辐照度 $E_0(\theta, \lambda)$ 的比值^[4],即:

$$PST_i(\theta, \lambda) = \frac{E_i(\theta, \lambda)}{E_0(\theta, \lambda)}. \quad (1)$$

从而可推算出被测相机在不同离轴角下的 PST。然而该系统的测试精度标定问题一直是困惑业界的难题。本文设计了一种标准镜头,放置在测试系统待测光路中,实测其 PST 值,并将标准镜头的 PST 理论计算值与其比较来验证系统的测试精度。其精度为:

$$\lg(\text{测量值}/\text{理论值}) \leq 0.5. \quad (2)$$

(文中简写 lg/0.5)

3 点源透过率测试系统标准镜头设计

标准镜头主要应用于点源透过率测试系统的实验室标定,用于验证整个测试系统的测量精度

及长期稳定性。因此,标准镜头主要有以下设计要求:第一,光机系统结构简单,对杂散光分析容易,重复性测量精度高;第二,镜头的 PST 曲线较平缓,便于提高系统的校准精度。

3.1 标准镜头的主要技术指标

本文设计的标准镜头的主要性能指标如表 1 所示。

表 1 标准镜头的主要性能指标

Tab.1 Chief parameters of standard lens

参数	值
工作波长/ μm	0.65
视场角/ $^\circ$	± 2.5
F 数	4
遮光罩长度/mm	≤ 250
PST 设计范围	$10^{-2} \sim 10^{-7} (\pm 5^\circ \sim \pm 80^\circ)$
PST 测试精度	$\leq \lg/0.5 (10^{-5} \text{ 以内})$

3.2 标准镜头设计

标准镜头的设计主要分为光学系统设计和遮光罩设计。光学系统设计时除考虑相关光学参数满足任务要求外,光学结构形式要简单,便于杂散光的建模分析。遮光罩的设计采用简单的挡光环模型,对其材料表面涂层的特性进行深入分析,利用不同模型计算其表面双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)的散射特性。

3.2.1 光学系统设计

标准镜头的光学系统采用简单的三分离式光路结构,如图 2 所示。由于被校准测试系统采用激光光源,因此标准镜头采用波长为 $0.65 \mu\text{m}$ 的单色光设计,这种设计也有利于后期标准镜头杂散光的定量建模分析。最终 3 块玻璃全采用 H-Lak3,其设计结果如图 3 和图 4 所示,该系统成像质量优良,接近衍射极限,且便于后期的光学装配。

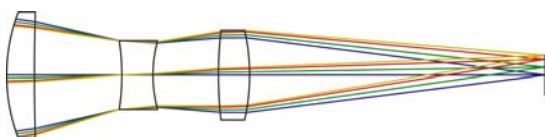


图 2 标准镜头的光学系统

Fig.2 Layout of optical system of standard lens

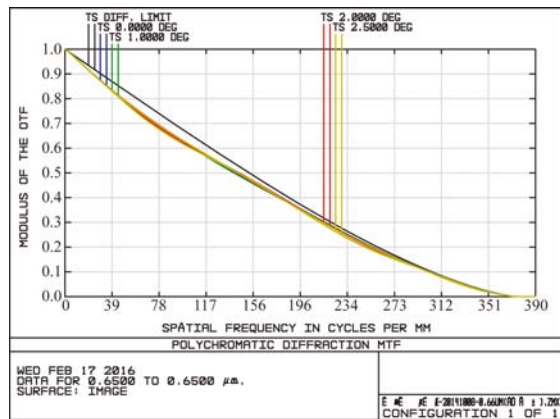


图 3 标准镜头传递函数

Fig.3 MTF of standard lens

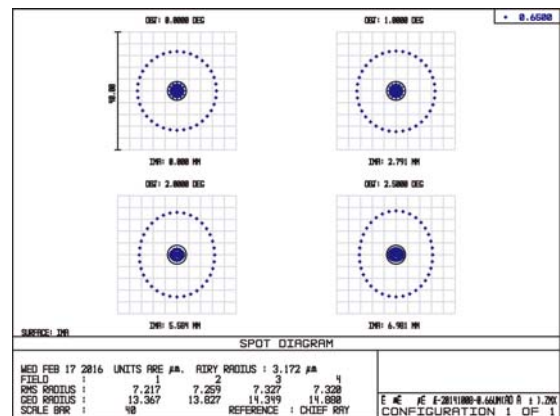


图 4 标准镜头弥散斑

Fig.4 Spot diagram of standard lens

3.2.2 遮光罩设计

为了避免背景强辐射源的杂散辐射直接入射到光学系统,本文设置系统遮光罩来阻挡强辐射源的杂散辐射直接通过光学系统入射到探测器焦面,此外到达探测器焦面的强辐射源的杂散辐射能量不能过大,这就要求遮光罩及挡光环表面要尽可能多地吸收杂散辐射。传统的遮光罩不可避免地存在长度过长、重量重、体积大等缺点,更有甚者还会阻挡边缘视场光的传播。一般来说遮光罩的设计原则如下:

(1)避免非成像光线直接到达像面;

(2)取强杂散辐射源的特定关注入射角度 16° 为规避角。大于规避角的人射强杂散辐射至少经过两次及以上的散射后才允许进入光学系统,即以光学系统第一表面为二次散射控制面。

(3)边缘视场的正常光线不能被遮光罩遮拦。首先进行了遮光罩的结构设计。为了简化结

构形式,这里采用挡光环梯度布置的遮光罩。挡光环设计最主要的一个原则为:光线从遮光罩外端内壁入射,经过一个挡光环的顶点入射到遮光罩内壁后,由于连接的下一个挡光环的遮拦,使向任意方向散射的光线不能直接到达光学系统的第一表面。

遮光罩对杂散光的抑制主要由内壁表面涂黑漆和自身结构保证,其结构设计原理如图 5 所示。

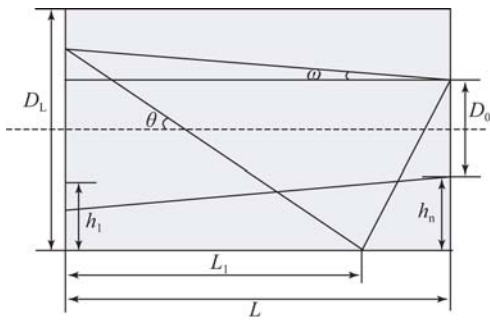


图 5 遮光罩设计原理

Fig. 5 Design principle of glare shield

遮光罩的具体参数计算^[5-7]如下:

$$L = (D_L - h_1) \tan \theta + (D_0 + h_n) \tan \left[\frac{\pi}{2} - \theta \right], \quad (3)$$

$$\tan \omega = \frac{h_n - h_1}{L}, \quad (4)$$

$$D_L = D_0 + 2h_n, \quad (5)$$

其中: h_1 为遮光罩前端设置的挡光环高度; h_n 为遮光罩同光学系统端的挡光环高度; θ 为规避角; D_0 为光学系统第一片透镜的口径; D_L 为遮光罩口径; ω 为半视场角; L 为遮光罩总长。已知: $D_0 = 62 \text{ mm}$, $\omega = 2.5^\circ$, $\theta = 20^\circ$, $h_1 = 5 \text{ mm}$, 通过计算可得: $h_n = 15.73 \text{ mm}$, $D_L = 93.46 \text{ mm}$, $L = 245.76 \text{ mm}$ 。通过在 CAD 中建模, 确定出各级挡光环在外遮光罩上的位置和内径, 共需 10 级挡光环, 挡光环厚度均为 0.5 mm , 如图 6 所示。

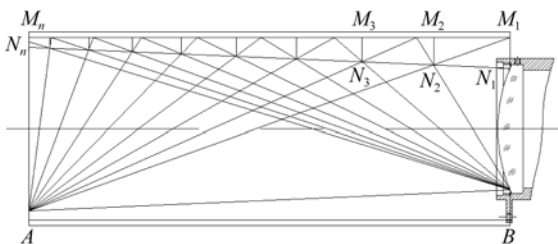


图 6 遮光罩设计模型

Fig. 6 Design model of glare shield

在标准镜头系统设计完成后, 利用 Tracepro 软件分析其杂散光, 并对遮光罩涂层、透镜材料及表面的属性进行设置。遮光罩的表面属性由双向散射分布函数(Bidirectional Scattering Distribution Function, BSDF)来定义, 由于透镜元件表面为光滑透明表面, 适合使用 ABg 模型来分析。根据 Harvey-Shack 模型, 当表面粗糙度小于等于波长, 即 $\sigma \ll \lambda$ 时, 材料表面的 BSDF 为^[8-12]:

$$BSDF(|\sin \theta_s - \sin \theta_i|) = b_0 \left[1 + \left(\frac{|\sin \theta_s - \sin \theta_i|}{l} \right)^2 \right]^{s/2}, \quad (6)$$

$$b_0 = \frac{4\pi^2 \Delta n^2 QM}{\lambda^4}, \quad (7)$$

$$l = \frac{\lambda}{N}, \quad (8)$$

$$s = -C. \quad (9)$$

其中, ABg 模型中的三个参数可以通过 Harvey-Shack 模型系数进行换算, 换算公式如下:

$$A = b_0 N, \quad (10)$$

$$B = l^{-s}, \quad (11)$$

$$g = -s. \quad (12)$$

则玻璃表面在 Tracepro 中设置的 BRDF 参量为 $A = 7.246 \times 10^{-5}$, $B = 0.001$, $g = 2$, BTDF 参量为 $A = 6.35 \times 10^{-5}$, $B = 0.001$, $g = 2$ 。透镜表面镀增透膜, 透射率为 0.98 , 非通光面涂黑, 吸收率为 0.005 。

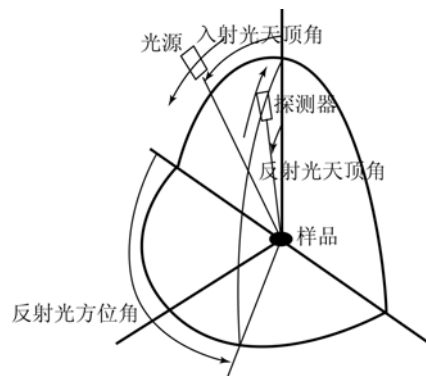


图 7 遮光罩涂层样品测试示意图

Fig. 7 Sketch of glare shield coating test

遮光罩表面涂层是影响其杂散光抑制能力的另外一个重要因素, 本文选用 AeroglazeZ-306 黑漆作为遮光罩涂层。为了将材料的表面特性准确建模, 这里利用法国 Reflect BRDF 测试仪测量此遮光罩样品, 测试原理如图 7 所示, 可见光由

RGB 三色光组成,样品粗糙度满足 $\sigma/\lambda \geq 1$ 。取光源入射面的方位角为零,探测器对不同方位角 (0° 到 180° 每间隔 10° 扫描一次),从天顶角为 -85° 位置扫描到 85° 位置(每间隔 5° 扫描一次),如图 8 所示,从而得到整个半球空间的 BRDF 分布,如图 9 所示。



(a) 样品(正面) (b) 样品(背面)
(a) Specimen(front) (b) Specimen(back)

图 8 反射方位角 0° 位置

Fig. 8 Position at reflected azimuthal angle of 0°

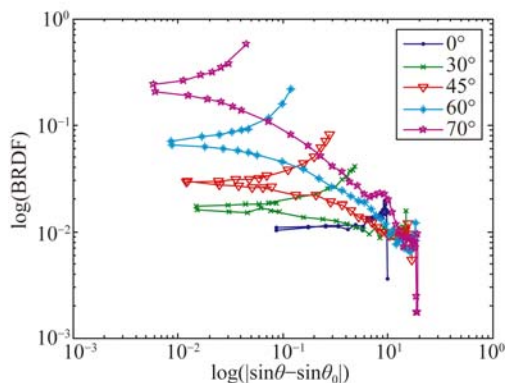


图 9 不同入射角度下 Z306 黑漆测量数据的双对数图
Fig. 9 Double logarithmic graph of testing data of Z306 under different incident angles

3.2.3 标准镜头设计结果仿真分析

由图 9 可以看出,Z306 黑漆散射在小角度近似为朗伯体,随着入射角度的增大,其前向散射特性较为明显。这与以往近似的特征表面后向散射是完全不同的,而 ABg 模型仅能拟合后向散射特性,故 ABg 模型不再适用,因此,在 Tracepro 软件中采用 Asymmetric Table 模型设置材料属性。用表格积分的形式可准确地评价不同入射角材料表面的散射情况,最终的建模结果如图 10 所示。

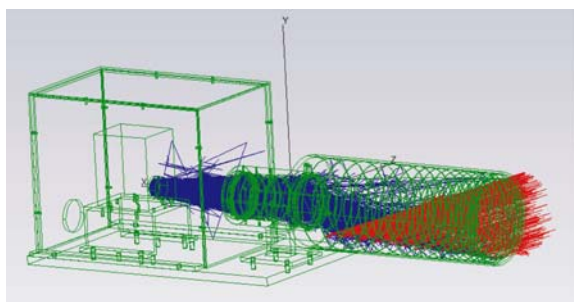


图 10 标准镜头 PST 分析建模图

Fig. 10 PST analysis model of standard lens

本文将上述玻璃材料属性及结构表面特性分别建模,带入标准镜头模型中进行分析,最终该标准镜头的 PST 计算曲线如图 11 所示。

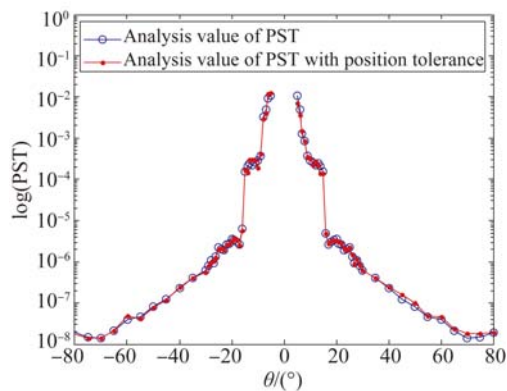


图 11 校准镜头 PST 分析值及引入位置公差后 PST 分析值

Fig. 11 Analysis values of PST without and with position tolerance for standard lens

由图 11 可以看出,标准镜头在离轴角为 $\pm 5^\circ \sim \pm 80^\circ$ 时 PST 设计值从 10^{-2} 降至 10^{-7} ,完全满足技术指标要求。在规避角为 $\pm 16^\circ$ 附近,PST 迅速下降至 10^{-5} ,与标准镜头遮光罩消杂散光的设计原则一致,可充分说明该遮光罩设计的有效性。另外,该设计曲线除规避角附近较为陡峭外,其余大角度范围 PST 曲线均保持平缓,这对于标校整个 PST 测试系统的测量精度来说是有利的,因为这种设计可大大降低由于光轴对准误差而产生的 PST 测量误差。

4 标准镜头的杂散光测试与系统校准

作为校准 PST 测试系统的标准来说,经过准

确、详细的理论模型推算,标准镜头的 PST 设计值可作为理论真值来评价测试系统的准确性及可靠性。这种评价标准也是根据传递函数测试仪的标准镜头评价原则来定义的,即采用标准镜头的理论设计结果作为理论真值,通过多台设备比对的方式来验证标准镜头的准确性。目前,本文的杂散光标准镜头在国内属于第一套,且由于可测试用的 PST 设备不多,经调研只有西安光机所和上海技物所有两套高精度 PST 测试系统,最终采用这两套系统进行比对测试。

标准镜头的杂散光设计精度是由光机系统的模型精度及表面属性精度来决定的。其中光机系统的模型精度可通过严格的工艺手段保证,这里将结构的挡光环位置公差(± 0.1 mm)和厚度公差(± 0.1 mm)带入模型进行建模分析。经分析这部分对系统杂散光产生的误差主要来源于小角度误差,其杂散光的最大分析误差为 35%;而喷漆材料表面属性是通过法国 Reflect BRDF 测试仪精确测试的,其测试精度为 0.001%,换算成积分总散射后的合成误差对系统 PST 的误差总贡献最大为 50%。将上述两个分析误差合成后,设计误差最大不超过 61%,作为鉴定测试系统 PST 测试精度,这个设计分析误差远远优于 $\lg/0.5$,因此,可将标准镜头分析结果作为标准来验证系统的测试精度。

因此,可根据上述对标准镜头的设计分析结果来验证 PST 测试系统的测量精度。具体思路是:将标准镜头安装在 PST 测试系统转台上,测试离轴角为 $\pm 5^\circ \sim \pm 80^\circ$ 的 PST,将测试结果与理论计算结果进行比较,利用式(2)可计算出 PST 测试系统的测量精度,测试现场如图 12 所示。

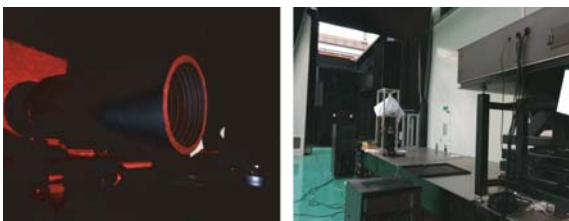


图 12 标准镜头的现场测试图

Fig. 12 Photo of standard lens test

图 13 中给出了标准镜头 3 次测量的 PST 曲线。从测试结果来看,其不同角度对应的最大

PST 测量误差为 8%,完全满足 PST 测试系统稳定性的校准要求。从整个测试曲线结果来看,在离轴角为 $\pm 5^\circ \sim \pm 80^\circ$ 时 PST 测试值从 10^{-2} 降至 10^{-7} ,在规避角 $\pm 16^\circ$ 附近, PST 测试值也迅速下降至 10^{-5} ,与标准镜头设计曲线的趋势一致,完全符合设计要求。且该曲线在左视场小角度 PST 测试值比右视场小角度 PST 测试值略大一些,这主要是由于镜头光轴对准误差而产生的测试校准误差,然而此误差远远小于系统的 PST 校准误差($\lg/0.5$),不影响最终的系统校准,这也足以说明遮光罩设计的合理性。

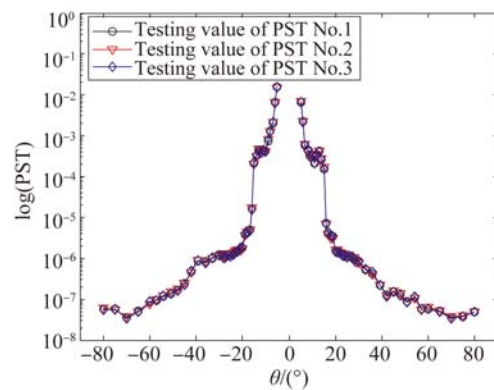


图 13 标准镜头 PST 测试值

Fig. 13 PST testing data of standard lens

5 标准镜头对系统校准结果分析

5.1 标准镜头的杂散光测试结果

标准镜头先后在西安光机所和上海技物所的 PST 设备上进行了比对性测试,测试曲线如图 14 所示。其中两种设备的测试结果比较接近,最大偏离误差为 50%,这里将其平均值作为相对真值与设计值进行比较,可判断该标准镜头设计的合理性。从总体上来看,设计结果与实测结果基本一致,完全满足设计与校准要求。

从比对数据来看,测试值略大于设计值,这主要是由于环境的空气散射产生的杂散光造成本底噪声叠加而产生的测量误差。要降低这种误差,只能将环境空气的洁净度提高至千级。

另外, PST 在 $10^{-2} \sim 10^{-6}$ 时, $\lg(\text{测量值}/\text{理论值})$ 最大值为 0.43,完全满足指标要求; PST 在 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 时,测量值稍大于设计值,表明系统在大角度 PST 测试时,双柱罐内大量的散射、反射杂

散光直接进入被测镜头视场,产生光污染造成其测量结果偏大,角度越大这种现象越明显。根据此现象测量了环境的 PST,发现环境 PST 大约为 10^{-8} ,这足以说明环境保障对整个测试精度的影响。

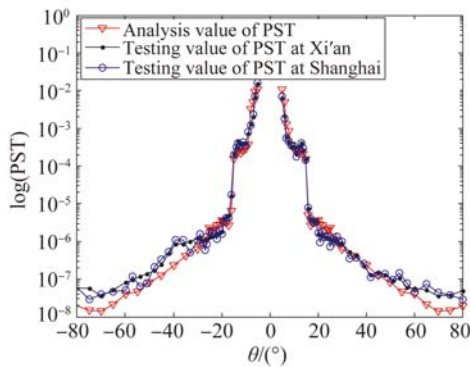


图 14 标准镜头 PST 校准数据比对

Fig. 14 Comparison between analysis and testing values of standard lens

与此同时,左右视场在 $\pm 14^\circ$ 的位置均出现了曲线“回拐”现象,虽然这不影响系统的校准精度,但是这种现象有待于进一步的研究和分析。目前,初步研究认为这种现象有可能由于遮光罩表面材料属性模型分析误差和系统结构加工、装配与理论模型有偏差而产生的,这些对精度的影响及如何控制,将在以后的工作中做深入研究。

5.2 系统校准结果分析

标准镜头的研究主要是为了验证 PST 测试系统的测试精度,并考核该测试系统的稳定性。根据上述测试结果可知,虽然 PST 在 $10^{-2} \sim 10^{-6}$ 时,标准镜头的设计值与测试值吻合度较高,可完全应用于系统的校准;但 PST 在 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 时,设计值与实测值相差较大,同时全视场范围实测值整体偏大,这些是以后研究的重点,以进一步提高系统的校准精度及校准范围。

根据设计与实测结果可知,该标准镜头的 PST 校准精度主要受环境光和自体辐射、双柱罐内壁、空气灰尘和定标不确定度等因素的影响,表中百分比是干扰量相对于 PST 为 10^{-7} 的比值,具体分析如表 2 所示。

综上所述,由表 2 可以看出,在大离轴角测试时,PST 测试精度受双柱罐内壁散射、反射的影响较大,如图 15 所示。在被测镜头转过离轴角 $30^\circ \sim 80^\circ$ 的过程中,大部分的杂散光将直接进入

被测镜头入瞳,产生一次杂散光,这将直接导致 PST 测量精度降低。若要减小这部分测量误差,应加大双柱罐尺寸,同时降低双柱罐内壁的反射率和散射率。

表 2 PST 测试精度分析表

Tab. 2 Analysis of PST testing accuracy

影响因素	误差值
环境光和自体辐射	可忽略
双柱罐内壁散射、反射	280%
空气灰尘散射	255%
挡光屏散射、反射	35%
杂散光均匀性定标不确定度	10%
光源稳定性定标不确定度	5%
探测器灵敏度定标不确定度	30%
标准镜头的分析误差	61%
合成	387%
对数值	0.59

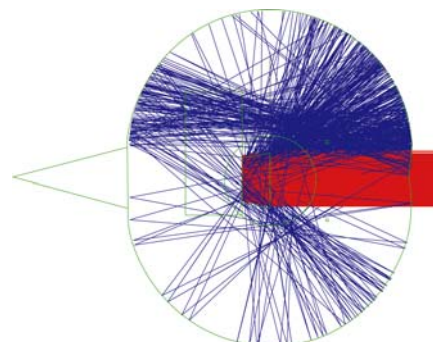


图 15 双柱罐杂光分析示意图

Fig. 15 Analysis of stray light in double cylindrical chamber

另外,标准镜头 PST 的测试精度受空气灰尘散射的影响也较大。由于本次试验是在十万级环境中进行的,若将以后的工作环境改善至千级,将大大降低空气散射而产生的杂散光污染,从而有利于提高标准镜头的校准精度。

6 结 论

为了标定 PST 测试系统的测试精度,本文研究并设计了一种标准镜头,通过对标准镜头光学元件表面属性的计算以及结构件表面属性的测试和建模分析,利用 Tracepro 软件对标准镜头的

PST 理论值进行了分析计算,最后通过 PST 测试系统对标准镜头进行了测试。根据公式计算出标准镜头的测试精度,即得到该测试系统的校准误差。试验结果表明:该标准镜头的 PST 分析值与实测值之差优于 $1g/0.5$, 完全满足该测试系统的校准要求。这为国内 PST 测试系统的精度校准

问题提供了技术保障。

另外,测试结果还表明点源透过率测试系统的测量精度受双柱罐及空气洁净度的影响较大。在以后的研究工作中,若改进双柱罐的设计,并提高环境空气的洁净度,PST 测试精度有望提高至新的量级。

参考文献:

- [1] 李婷,杨建峰,阮萍,等. 月基天文光学望远镜 (LOT) 的杂散光分析[J]. 光子学报,2007,36(增刊):136-141.
LI T, YANG J F, RUAN P, et al.. Stray light analysis of the lunar-based optical telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*,2007,36(Suppl.):136-141. (in Chinese)
- [2] 杨林,李达,崔天刚,等. 空间太阳望远镜在紫外波段成像检测中的杂散光测量和消除[J]. 光学精密工程,2011,19(7):1456-1463.
YANG L, LI D, CUI T G, et al.. Measurement and elimination of stray light from space solar telescopes for imaging test at UV band [J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(7):1456-1463. (in Chinese)
- [3] 徐亮,赵建科,薛勋,等. 月基望远镜杂散光 PST 研究与测试[J]. 红外与激光工程,2014,43(4):1289-1294.
XU L, ZHAO J K, XUE X, et al.. PST research and measurement of lunar-based optical telescope stray light[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2014,43(4):1289-1294. (in Chinese)
- [4] 廖胜,沈忙作. 红外光学系统杂光 PST 的研究与测试[J]. 红外与毫米波学报,1996,15(5):375-378.
LIAO SH, SHEN M Z. Point source transmittance of stray light of infrared optical systems and its measurements[J]. *J. Infrared Millim. Waves*,1996,15(5):375-378. (in Chinese)
- [5] JOHN F, FRANK G, TIM F, et al.. New stray light test facility and initial results [J]. *SPIE*,

- 2008,7069:1-5.
- [6] 钟兴,贾继强. 空间相机消杂光设计及仿真[J]. 光学精密工程,2009,17(3):621-625.
ZHONG X, JIA J Q. Stray light removing design and simulation of spaceborne camera[J]. *Opt. Precision Eng.*,2009,17(3):621-625. (in Chinese)
- [7] 闫佩佩,樊学武. R-C 光学系统设计及杂散光分析[J]. 红外技术,2011,33(4):214-217.
YAN P P, FAN X W. Optical design and stray light analysis of R-C system[J]. *Infrared Technology*,2011,33(4):214-217. (in Chinese)
- [8] FRANK G, JOHN F. Stray light testing of the OLI telescope [J]. *SPIE*,2010,7794:7794W-1-7794W-13.
- [9] STEPHEN M P, RICHARD R P, JEFFREY M M. A stray light analysis of apache point observatory 3.5 meter telescope system [J]. *SPIE*,2003,4842:128-138.
- [10] ERIC C F. Stray light analysis and control [J]. *SPIE*,2013,62-75.
- [11] 颜昌翔,许杰,彭岩. 离轴三反空间光学望远系统的杂散光抑制[J]. 光学精密工程,2010,18(2):289-293.
YAN CH X, XU J, PENG Y. Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*,2010,18(2):289-293. (in Chinese)
- [12] GARY L P. Stray light test station for measuring point source transmission and thermal background of visible and infrared sensors [J]. *SPIE*,2008,7069:7069M-1-7069M-9.

作者简介:



徐亮(1984—),男,陕西西安人,博士研究生,工程师,2006年于西安工业大学获得学士学位,2009年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事光学设计与弱光测试技术的研究。E-mail: xuliang757@163.com

导师简介:



高立民(1965—),男,陕西西安人,博士,研究员,博士生导师,1991年、2004年于西安光机所分别获得硕士、博士学位,主要从事光学工程领域的研究。E-mail:glm@opt.ac.cn

(本栏目编辑:曹金)

(版权所有 未经许可 不得转载)