

文章编号 1004-924X(2017)增-0039-06

## 高精度点源透过率杂光测试系统

陈钦芳<sup>1\*</sup>, 马 臻<sup>1</sup>, 王 虎<sup>1</sup>, 李欣耀<sup>2</sup>, 庞志海<sup>1</sup>

- (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 上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:**空间光学对深空暗弱目标探测的迫切需求以及低探测阈值探测器的快速发展,对光学系统杂散光的抑制能力及测试验证水平提出了更高的要求。本文研制了一套点源透过率杂光测试系统,测试系统口径达 1 m,测试波段覆盖可见到长波红外,转台方位角为 $\pm 110^\circ$ ,俯仰角为 $\pm 15^\circ$ ;整个测试系统空间为全封闭的暗室,尺寸达到 28 m $\times$ 8 m $\times$ 9 m。为有效抑制测试系统的光污染,采用表面粗糙度低于 2 nm 的主镜来降低镜面散射引入的光污染;采用双柱罐形状的测试腔引导内壁反射光将其进行衰减;采用高洁净度测试环境抑制空气中的颗粒散射。试验和分析结果表明,该系统在可见光波段的 PST 测试阈值达到 $10^{-7}$ ,红外波段的 PST 测试阈值可达到 $10^{-6}$ ,系统测试精度达到 $|\lg(\text{测试值}/\text{真实值})| \leq 0.5$ 。

**关键词:**空间光学;杂散光;光污染;点源透过率

**中图分类号:**TH74 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172514.0039

## High-precision test station for stray light based on point source transmittance

CHEN Qin-fang<sup>1\*</sup>, MA Zhen<sup>1</sup>, WANG Hu<sup>1</sup>, LI Xin-yao<sup>2</sup>, PANG Zhi-hai<sup>1</sup>

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

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

\* Corresponding author, E-mail: cqf2009@opt.ac.cn

**Abstract:** The increased demand for detection of dim targets in deep space and the rapid development of low threshold space-based sensors have required greater suppression performance of stray light and higher test accuracy. A stray light test station based on Point Source Transmittance (PST) is built. The station allows a measuring aperture up to 1 m and waveband from the visible to the infrared. In the station, the turntable instrument is allowed to scan  $\pm 110^\circ$  in azimuth, and  $\pm 15^\circ$  in pitch. The test station is all black with dimensions of 28 m $\times$ 8 m $\times$ 9 m. In order to control light scattered from the collimator, the primary mirror with less than 2 nm RMS roughness is manufactured. A double cylindrical chamber is employed to direct and attenuate the scattered light from the system. In addition, a clean room in 1 000 class is utilized to filter air to reduce light scattered from particles in the air. Analysis and measurements show that the test station can measure point PST as low as  $10^{-7}$  at visible

收稿日期:2017-10-10;修订日期:2017-10-30.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 51402351)

wavelengths, and  $10^{-6}$  at infrared wavelengths. Its test accuracy  $|\lg(\text{measurement value} / \text{true value})|$  is less than 0.5.

**Key words:** space optics; stray light; light pollution; point source transmittance

## 1 引言

杂光是指到达光学系统像面的非成像光线,在探测器上形成背景噪声。杂光会降低图像的对比度、清晰度、影响图像色彩的还原,严重时目标图像会被杂散辐射噪声湮没,导致光学仪器无法正常工作<sup>[1-2]</sup>。

近年来,随着光学技术以及光电探测器件技术的高速发展,高分辨率、多光谱、低探测阈值的遥感系统在航空领域的应用越来越广泛,对空间光学系统的杂光抑制能力要求越来越严苛,这就要求杂光测量系统有更高的精度<sup>[3-4]</sup>。

杂散光的测试方法主要有黑斑法和点源法,黑斑法是在均匀亮度的扩展视场中放置一个黑斑,经待测光机系统后,其像中心区域上的光照度与移去黑斑放上白斑后在像面上同一处的光照度之比,用杂光系数 VGI 表示。该方法容易实现、成本较低,适用于中小口径的光机系统,其工作环境为均匀亮背景,如地面摄影系统、照相镜头等,但其测量误差比较多,测量精度比较低,一般低于  $10^{-3}$ <sup>[5]</sup>。点源法定义为视场外离轴角  $\theta$  的点源目标辐射,经光学系统后在像面产生的辐射照度  $E_d(\theta)$  与其入口处辐照度  $E_0$  的比值,由点源透过率(Point Source Transmittance, PST)表示。该方法适合于工作环境中杂光主要来自小光源的光机系统,如空间遥感相机、星敏感器等,其杂光主要来自太阳、月亮、星星等。点源法对待测量系统口径的限制不大,但是高精度点源法测试系统对测试环境的洁净度、空间要求很高,系统研制成本高。

目前,国外只有美国和法国拥有高精度、低阈值点源透过率杂光测试系统,杂光测试系统低阈值通常是指 PST 阈值  $\leq 10^{-7}$  水平(可见光波段),研究机构代表如美国 Breault Research Organization<sup>[6]</sup>和法国的 European Space Agency<sup>[7]</sup>。美国犹他州立大学的 Space Dynamics Laboratory<sup>[8]</sup>和 Ball Aerospace & Technology Corp.<sup>[9]</sup>研制的高精度点源透过率杂光测试系统阈值  $\leq 10^{-9}$  水平

(可见光波段),代表了目前国际上 PST 测试的最高水平。国内中科院西安光机所、成都光电所和哈工大研制了点源透过率杂光测试系统<sup>[10]</sup>。其中,西安光机所于 2014 年研制了一套点源透过率杂光测试系统,其测试口径为 0.55 m,测试波长为 0.4~0.9  $\mu\text{m}$ ,PST 测试阈值达到  $10^{-6}$ 。本文研制了三波段点源透过率杂光测试系统,系统占用空间为 28 m $\times$ 8 m $\times$ 9 m,测试口径达到 1 m,测试波段为可见光 0.66  $\mu\text{m}$ ,红外波段覆盖中波和长波红外,测试方位角为  $0 \sim \pm 110^\circ$ ,俯仰角为  $0 \sim \pm 15^\circ$ ,其可见光波段的 PST 测试阈值达到  $10^{-7}$  水平,红外波段 PST 测试阈值达到  $10^{-6}$ 。该测试系统具有测试口径大、测试波段全、动态范围大、精度高等优点。

## 2 点源透过率杂光测试系统工作原理

点源透过率杂光测试系统按照功能主要分为 3 个模块:(1)杂光光源模拟系统,模拟待测光机系统的工作环境中视场外强烈辐射源;(2)探测系统,分别测量待测光机系统入口和像面处的杂光辐照特性,评估光机系统对杂光的衰减水平;(3)环境保障系统,降低地面实验室环境光污染对杂光测试精度的影响,如建立暗室,测试腔等。待测光机系统工作的空间环境无环境内壁、大气散射等影响,因此地面实验室必须尽可能降低地面实验室环境光污染,更真实地模拟系统在轨运行的空间环境。

本文研制的三波段点源透过率杂光测试系统如图 1 所示,其工作原理为:光源出射的光经过平行光管系统准直后出射平行光模拟空间环境中无穷远杂光光源,平行光进入被测光学系统后由光学元件、机械结构件表面散射或孔径衍射等方式到达像面,由探测系统分别测量待测光机系统像面处辐射照度  $E_d(\theta)$  与其入口处辐照度  $E_0$ ,二者之比即得到 PST( $\theta$ ),转台提供被测光学系统方位角和俯仰角的运动实现对被测光学系统不同视场角的 PST 测试。

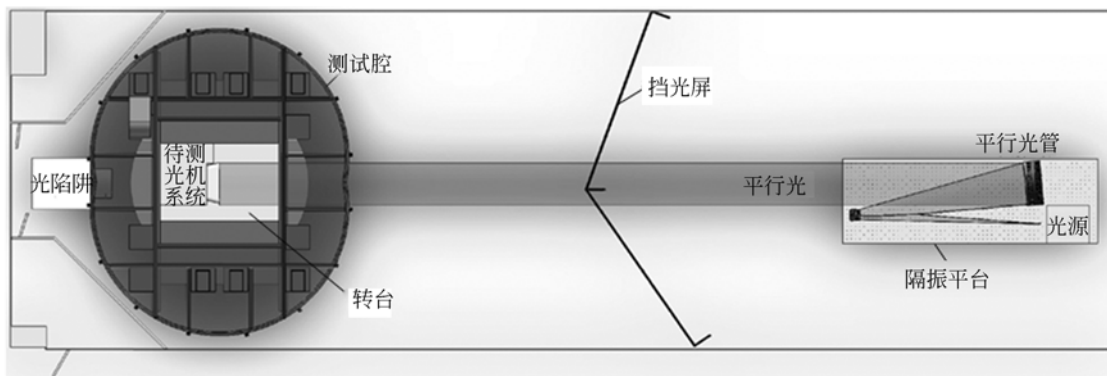


图 1 三波段点源透过率杂光测试系统

Fig.1 Overview of stray light test facility

### 3 光污染抑制

高精度点源透过率杂光测试系统的关键技术在于光污染的控制。根据 Gary L. Peterson<sup>[5]</sup>对杂光测试系统光污染的定义,测试系统本身和测试系统与待测仪器引起的杂散光都被计入测试指标 PST 部分。

点源透过率杂光测试系统的杂光污染源、影响形式及杂光防治措施见表 1。该测试系统主要的杂光来源是平行光管主镜表面散射引入的光污染源、测试系统与待测光机系统引入的光污染和空气中颗粒散射引入的光污染。主镜的表面散射可通过降低主镜面的表面粗糙度来抑制。如图 2 所示,三波段点源透过率杂光测试系统平行光管主镜的镜面全口径为 1 010 mm,表面粗糙度优于 2 nm RMS(Root Mean Square)。



图 2 主镜加工现场

Fig.2 Polishing of primary mirror

表 1 杂光测试系统的光污染源分析及相应防治措施

Tab.1 Sources of effective PST and their prevention approaches

序号	光污染源	影响形式	防治措施
1	测试系统与待测光机系统引入的光污染	信号光照亮待测光系统表面后,经环境内壁反射进入待测光机系统	测试腔:设计合理的测试腔形状,将散射光导入无影响方向并迅速衰减
2	空气颗粒散射	空气灰尘被照亮引起散射形成杂光	提高测试空间的空气洁净度
3	外界环境光	墙壁、地板被太阳、照明光、等照亮后散射进入被测光学系统或环境自体辐射	暗室:切断环境光源
4	残余平行光照明墙壁	残余平行光穿过被测系统后照明被测系统后的墙壁,散射到被环境内壁,二次散射后进入被测系统	光陷阱:将残余平行光引入光陷阱进行衰减
5	平行光管主镜表面散射	主反射镜及其他镜面被照亮后散射光进入被测光学系统	降低镜面散射:提高镜面表面质量和表面洁净度
6	平行光管结构表面散射杂光	机械表面被照亮后散射光进入被测光学系统	①机械表面染黑;②限制光源出射的相对孔径角度

为了抑制测试系统与待测光机系统引入的光污染,本文借鉴犹他州立大学 Space Dynamics Laboratory 杂光测试系统的成功经验,采用双柱罐形状的测试腔。如图 3 所示,双柱罐截面内两圆圆心  $C_1$  和  $C_2$  分开一定距离,待测光机系统入口中心置于两圆心中间。平行光(信号光)入射到待测光机系统表面,经其表面散射后照亮双柱罐内壁,内壁将反射光引导至双柱罐后半部分,而其中仅有不到 0.1% 的光被内壁散。双柱罐内壁引入的光污染分析:设待测产品为口径 1 m,典型相机相对  $F$  数取 4,测试条件为水平转角  $30^\circ$ ,产品表面覆盖黑色吸光布,在可见光和短波红外波段吸收率大于 0.97,表面可近似为朗伯体散射。相机开口完全朝向黑罐内壁,分析可见光波段的双柱罐等效 PST,设入射平行光照度为  $1 \text{ W/m}^2$ ,到达双柱罐内壁的辐照度  $E = 6.08 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ ,内壁表面的总散射积分  $TIS(\lambda = 0.66 \mu\text{m}) < 0.001$ ,则内壁的辐出射度  $E = 6.36 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$ ,内壁散射光的亮度  $L = 2.045 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}$ ,散射光进入相机后在像面上的照度为:

$$E = \frac{\pi}{4} L \times \left(\frac{D}{f}\right)^2 = 1.0 \times 10^{-8}.$$

则双柱罐内壁引入的等效  $PST_{\text{eff}} < 1.0 \times 10^{-8}$ 。同时,这里提高双柱罐内部的空气洁净度至 1000 级(FED-STD-209E)来抑制大气散射对杂光测试精度的影响。

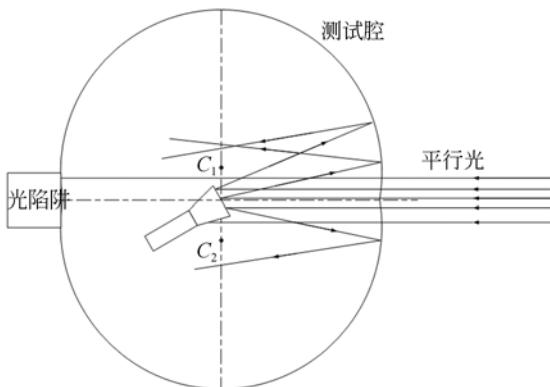


图 3 双柱罐光路示意图

Fig. 3 Ray trace of circular specular chamber

上述典型相机的杂光测试精度将受杂光模拟光源稳定性、均匀性、双柱罐内壁散射、大气散射

等因素的影响。表 2 列出了测试系统各部分引入的测试误差对测试结果的影响。

表 2 PST 测试精度分析

Tab. 2 Analysis of PST test accuracy

影响因素	误差/%
双柱罐内壁	10
大气散射	191
挡光屏	7.8
杂散光均匀性	10
光源稳定性	5
探测器灵敏度标定不确定度	3
总计	191.8

表 2 中列出百分比误差都是相对相机测试角度为  $30^\circ$ , PST 真实值为  $10^{-7}$  水平下测试误差对真实值的影响。随着离轴角度的增大、PST 阈值降低,内壁散射和大气散射引入的误差将成为影响 PST 测试的主要因素。根据试验结果和理论分析可知,本套点源透过率杂光测试系统的 PST 测试阈值可达到  $10^{-7}$  水平时,若要继续延伸测试系统的下探阈值,可以提高测试环境洁净度。当测试环境洁净度优于 100 级时,空气散射主要是大气分子散射,其散射特性相对稳定,因此可通过计算的方法将大气散射从测试结果中剔除,从而提高系统的测试精度。

## 4 试 验

本文利用“三波段点源透过率杂光测试系统”对一光机系统的杂光抑制水平进行实测,测试波段为可见光波段,待测系统的入瞳口径为 40 mm,相对孔径为 1:4。这里分别对待测系统中光学元件、遮光罩等关键表面的散射特性进行实测,角度分辨率为  $0.01^\circ$ , BRDF 测试精度达到  $10^{-5} \text{ sr}^{-1}$ 。将各元件表面散射特性代入 TracePro 软件进行分析。

最终系统的 PST 测试结果与分析软件的仿真结果比对如图 4 所示,虚线代表实测结果,实线代表仿真结果。分析表明,系统测试结果与仿真

分析结果的差异小于 3 倍,即系统测试精度  $\lg(\text{测量值}/\text{真实值})$  小于  $\pm 0.5$ , 满足使用要求。

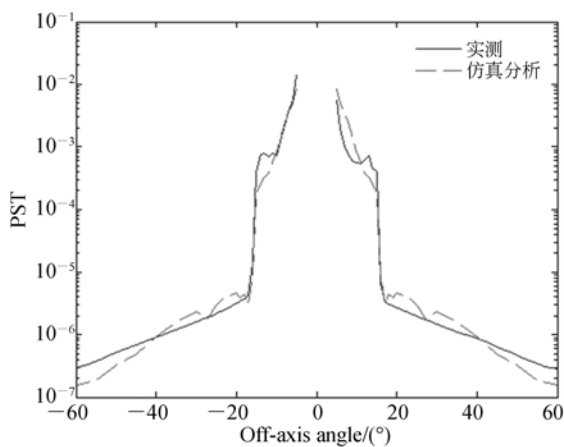


图 4 可见光波段点源透过率 PST 测试结果与仿真结果对比

Fig. 4 Comparison between measured and modeled PST data in visible waveband

#### 参考文献:

- [1] 王一凡, 李零印. 白天观测空间目标的恒星光电探测系统的杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2854-2861.  
WANG Y F, LI L Y. Stray light suppression of star photoelectric detection system for space target in daytime[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2854-2861. (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] JOHN L S. *Stray Light Comparison of Off-axis and On-axis Telescopes*[D]. UT: Utah State University, 2000.
- [4] 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)
- [5] 李晓平, 王钢, 胡亭亮. 高精度杂散光测量系统分析[J]. 红外技术, 2011, 33(9): 521-524.  
LI X P, WANG G, HU T L. High-precision stray light measurement system analysis[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(9): 521-524. (in Chinese)
- [6] PETERSON G L. Stray light test station for measuring point source transmission and thermal background of visible and infrared sensors[J]. *SPIE*, 2008, 7069: 70690M.
- [7] MAZY E, STOCKMAN Y, HELLIN M L. Design and modelisation of a straylight facility for space optical instrument[J]. *SPIE*, 2012, 8550: 855007.
- [8] KEMP J C, STAUDER J L, TURCOTTE S B, *et al.*. Terrestrial black hole for measuring high-rejection off-axis response[J]. *SPIE*, 1997, 3122: 45-46.
- [9] GROCHOCKI F, FLEMING J. Stray light testing of the OLI telescope [J]. *SPIE*, 2010, 7794:

77940W.

- [10] 王治乐, 龚仲强, 张伟, 等. 基于点源透过率的空间光学系统杂光测量[J]. 光学技术, 2011, 37(4): 401-405.

WANG ZH L, GONG ZH Q, ZHANG W, *et al.*. Measurement of stray light based on point-source transmittance in space optical system[J]. *Optical Technique*, 2011, 37(4): 401-405. (in Chinese)

作者简介:



陈钦芳(1982—),女,福建闽侯人,博士,副研究员,2008于西安工业大学获得硕士学位,2012年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得博士学位,主要从杂散光测试、非球面加工和检测等方面的研究。E-mail:cqf2009@opt.ac.cn