

大口径 PST 测试系统

李伊凡, 吕昊哲, 薛勋

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西西安 710119)

摘要: 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, 人们对光机系统的杂散光抑制能力也提出了新的要求, 为了有效评估目前大口径、高灵敏度光学系统对杂散光的抑制能力, 建立了一套 1.6m 口径, 527nm 波段的大口径 PST 测试系统。该系统以高功率脉冲激光作为光源, 应用锁相放大器进行弱光信号的采集与提取, 采用黑色双柱罐结合覆有核孔膜超黑材料的光陷阱、高效洁净暗室等环境杂光抑制方法, 消除了杂光对系统的影响至 10^{-11} 。使用该系统对标准镜头和光学系统样机进行了 PST 测试, 测试结果与理论设计值吻合较好, 测试灵敏度可至 10^{-10} 量级, 测试精度达 0.4。此系统可以为大口径高灵敏探测能力的光机系统提供杂散光抑制能力的有效评估和充分验证。

关键词: 点源透过率; 大口径光学系统; 双柱罐消光腔; 杂散光测试

large-aperture Point Source Transmittance test system

LI Yifan, LV Haozhe, XUE Xun

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

Abstract: With the development of China's space industry, key projects such as deep space exploration, Mars missions, and lunar exploration have entered a new era. New demands have been placed on the stray light suppression capabilities of optical-mechanical systems. To effectively assess the current large-aperture, high-sensitivity optical systems' ability to suppress stray light, a large-aperture PST (Point Source Transmittance) testing system with an aperture of 1.6 meters and operating in the 527 nm band has been developed. This system utilizes high-power pulsed lasers as the light source, employs lock-in amplifiers for the collection and extraction of weak light signals, and adopts stray light suppression methods such as black double-column cans combined with ultra-black material light traps covered by nuclear pore membranes and highly efficient clean darkrooms, reducing the influence of stray light on the system to the level of 10^{-11} . Using this system, PST tests were performed on standard lenses and prototypes of optical systems, with test results showing good agreement with theoretical design values. The sensitivity of the

tests can reach the order of magnitude of 10^{-10} , and the precision is up to 0.4. This system can provide effective evaluation and thorough validation of the stray light suppression capabilities for large-aperture, high-sensitivity detection optical-mechanical systems.

Keywords: Point Source Transmittance; Large-aperture optical system; Double cylindrical extinction chamber; Stray light testing

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,人们对光机系统的杂散光抑制能力也提出了新的要求^[1]。对于极限探测能力达到 14 等星及以上,口径大于 1m 以上的高灵敏度探测相机而言,视场外高亮的杂散光源更易影响其正常观测,进而导致在探测器的不同区域出现难以消除的杂散光。在这些光机系统的研制过程中,仅靠仿真分析或者工程经验来保证光机系统的杂散光抑制能力,往往与实际应用结果差距较大。因此,建立杂散光地面测量系统对装配完成后的整机系统进行测量,获得产品的实际杂光抑制能力是非常重要的。

当前,大部分光机系统都具有高分辨率、低阈值的特点,对杂光抑制水平和评价指标的要求也越来越高,一般要求相机规避角以外点源透过率(Point Source Transmittance, PST)达到 10^{-9} 甚至更低,迫切需要更高测试能力的 PST 实验室测试系统,以实现系统杂光抑制水平的定量评定,鉴于此研制出一套 10^{-10} 量级、最大测试口径为 1.6 m、测试波长为 527 nm 的大口径 PST 测试系统。

2 测试系统工作原理及构成

2.1 工作原理

在杂散光测试前,先将被测相机光学系统放置于双柱罐内,选用激光光源为点光源,设置在准直镜组件焦面处,准直为一均匀的大口径光束,完全充满被测相机的入瞳。将相机安置在单轴转台上,在光学系统像面处安装探测器,从被测相机光学系统临界视场向外每隔固定角度转动转台,使用锁相放大器对接收信号进行锁相放大并采集,采集不同位置光辐照的响应度,该响应度与被测相机光学系统入瞳处的响应度的比值即为其视场外对应视场角 PST 值^[2-3]。标准镜头用于对点源透过率测试系统进行周期性校准。

2.2 测试系统构成

大口径 PST 测试系统组成如图 2-1、图 2-2 所示，包括光束准直系统、激光光源组件、单轴转台、杂光抑制系统、弱光信号探测系统、标定系统等。

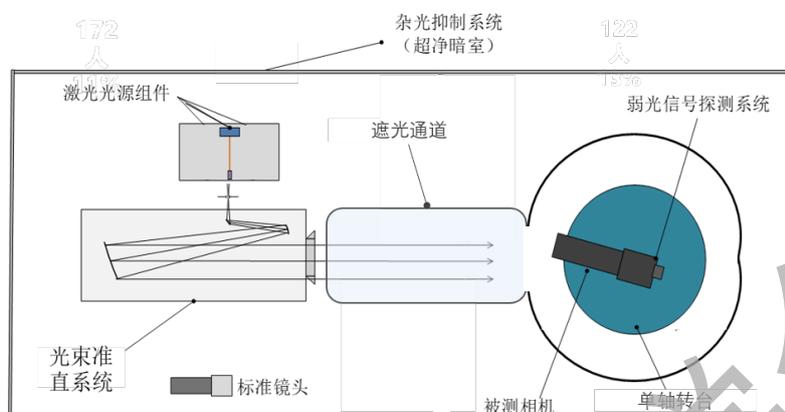


图 2-1 大口径 PST 测试系统构成图



图 2-2 大口径 PST 测试系统实物图

光束准直系统采用格里高利型离轴两反结构型式，通光口径达 1.6m，主要用来模拟相机遭遇到的太阳光、地气散射光等杂光光源，可满足口径 1.6m 以内光学系统的测试需求。

测试光源为中心波长 527nm 的脉冲激光器，出射激光通过光束准直系统被扩束为大口径平行光束入射到双柱罐中。从 PST 测试原理可知，提高入瞳处的辐射照度是提升测试能力的关键途径之一。脉冲激光具有能量高功率大的优势，并且其良好的准直性和均匀性更有利于测试^[4]，然而大功率激光必然会引入更多的环境杂光，强脉冲光源引起的散射问题也是系统在实际应用时需考虑的因素，此外过大功率的脉冲激光在实验室内使用会存在安全问题。因此，本系统采用的激光光源其平均功率、单脉冲能量、重复频率等参数均可进行一定范围的调节，以满足系统测试的需要。

PST 测试中，环境杂散光是影响测试系统精度的首要因素。系统中杂光抑制部分为 PST 测试提供了洁净暗环境，保障测试结果准确可靠，为 PST 的极限测试提供了基础，其包括黑色双柱罐、遮光通道、覆有核孔膜超黑材料的光陷阱及高效洁净暗室，如图 2-3 所示。双柱罐整体由黑色亚克力板组成，其对光辐射的吸收率很高（一般可达 95%以上）^[5]，并且散射率很低，因此光线进入双柱罐中很大一部分被亚克力板吸收掉，而剩下未被吸收的光线则通过双柱罐的镜面反射原理反射出光路，又由于双柱罐的两个圆心不重合，一次散射光线经过双柱罐内壁反射后不会原路返回到被测相机，故可以起到二次消光的作用^[6-7]。如图 2-5 所示，结合实际测试工况以及被测相机尺寸，对双柱罐进行了详细设计并进行杂散光抑制能力分析，经仿真计算，离轴角大于 20°以后，双柱罐的杂散光抑制能力优于 6.3×10^{-11} ，满足背景 10^{-10} 量级的要求。

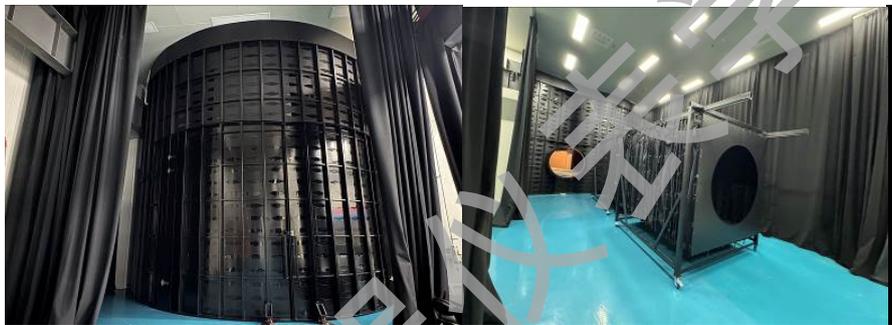


图 2-3 杂光抑制系统实物图

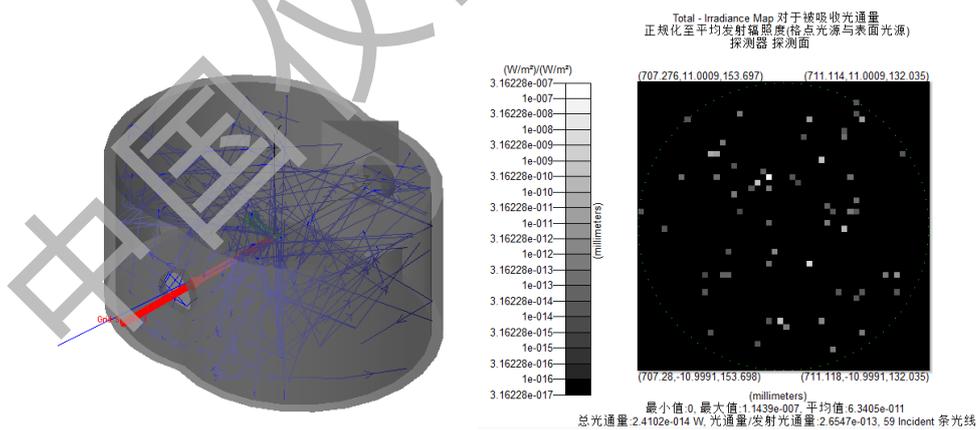


图 2-5 双柱罐 PST 测试仿真图

弱光信号探测系统作为整个 PST 测试系统的后端处理部分，可以完成对双柱罐内微弱光脉冲信号的探测，对最终的测量结果和整个系统的探测能力有着重要影响。该系统中弱光信号探测及处理模块主要由光电倍增管、锁相放大器和任意函数信号发生器组成^[8]。

信号探测提取的核心是锁相放大技术，锁相放大器的基本原理是将输入信号与参考信号相乘（也称下混频或外差/零差检测），再通过可调低通滤波器进行滤波。此方法可有效地将期望频率的信号从所有其他频率分量中分离出来，最终获得被测信号的强度和相位信息，如图 2-7 所示为锁相放大的原理示意图。

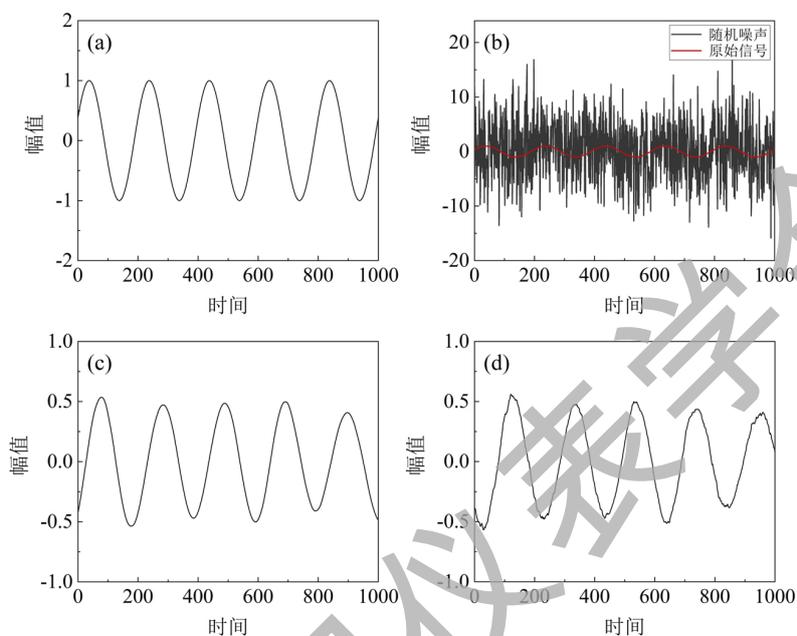


图 2-6 信号锁相放大探测仿真结果图

对应锁相放大技术，以正弦波信号作为原始信号的仿真结果如图 2-6 所示，图 2-6(a)为原始信号的时间波形，图 2-6(b)表示将随机幅度和相位的噪声加载到原始信号上，随后将正弦波信号和余弦波信号分别作为参考信号与噪声信号做互相关计算，参考信号频率与原始信号频率相同，提取到的信号波形如图 2-6(c)和(d)所示。锁相放大器利用信号的时间相关性可有效地从嘈杂背景中提取出信号，此外，从仿真结果得出参考信号与被测信号的相位越接近则提取出的信号更加完整。

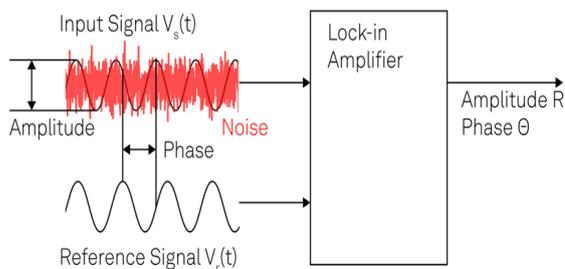


图 2-7 锁相放大原理示意图

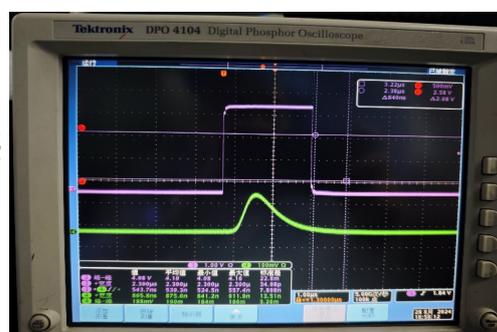


图 2-8 同步信号调试波形图

为了达到更好的信号输出效果，系统中采用任意函数信号发生器进行信号的同步与调节，信号发生器产生一路 TTL 信号用于触发激光器出射激光，另一路输出信号则作为相同频率的参考信号输入锁相放大器，该设计使参考信号的延时可控、相位可调，有利于脉冲信号的高质量提取。如图 2-8 所示为同步信号的调试波形图，图中紫色曲线为信号发生器输出的参考信号，绿色曲线为探测器获取的脉冲波形，通过调节参考信号的上升沿可与脉冲上升沿平齐，且信号宽度可完全覆盖整个脉冲的时域范围。

3 系统标定及技术工程应用

针对 PST 测试系统的标定要求，利用标准镜头对此系统进行标定，测试现场如图 3-1 所示。图 3-2 为测试结果，可以看出标准镜头测试曲线与设计值曲线趋势基本一致，吻合度较高，但在 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 大角度范围内，实测曲线高于理论曲线约 2-3 倍，这可能是双柱罐内壁反射、散射以及空气灰尘散射等光污染进入探测器产生的噪声叠加引起的。总体来说，除个别测试角度外，整体测试的最大误差为 0.40（对数值@PST 测试值），满足测试精度 $\lg(\text{测量值}/\text{真实值})\leq\pm 0.5$ 的要求^[9]，证明此测试系统的测试精度和可靠性较高。

此外，在标准镜头测试中，当镜头的测试角度转至 90° 以上时系统继续进行测量，来验证此系统的测试灵敏度。通过图 3-3 可得， 90° 度以上的 PST 测试值已经达到 10^{-10} 量级，而标准镜头的理论设计值最小为 10^{-9} 量级，此时几乎没有光直接进入遮光罩内再到探测器靶面上，只有罐内残余的散射、反射等光污染产生的环境杂光，说明该系统的测试灵敏度可达 10^{-10} 量级。



图 3-1 标准镜头测试现场图

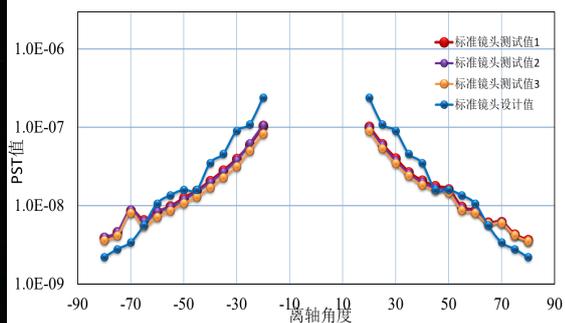


图 3-2 标准镜头 PST 测试曲线图

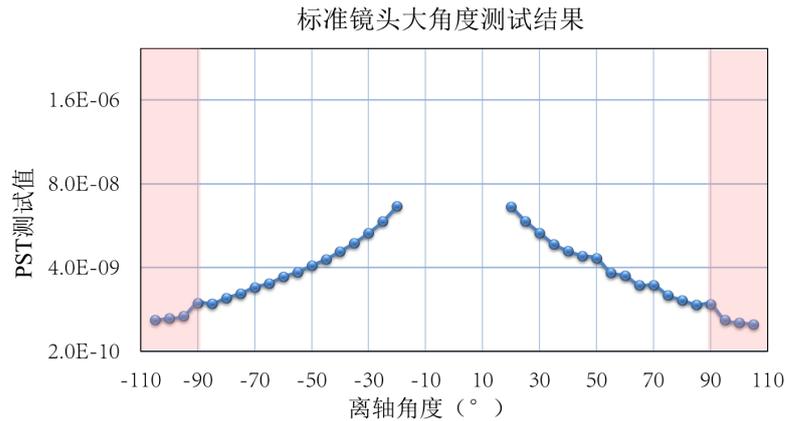


图 3-3 标准镜头大角度 (>90°) PST 测试曲线图

应用此系统对一套四台 300 mm 口径的空间光学相机开展测试工作，测试结果如图 3-4 所示。PST 测试的范围为 $\pm 85^\circ \sim \pm 25^\circ$ ，其中相机的设计指标要求 80° 的 PST 应优于 1×10^{-6} ，从测量曲线可看出相机 PST 的实测结果与理论设计值高度吻合，同系列相机趋势也基本保持一致。因此，可以证明该套测试系统能够满足类似空间相机杂散光测试的需求，可为高灵敏度相机的杂散光抑制能力的评估提供有力手段，也为此类相机的研制提供有效保障。

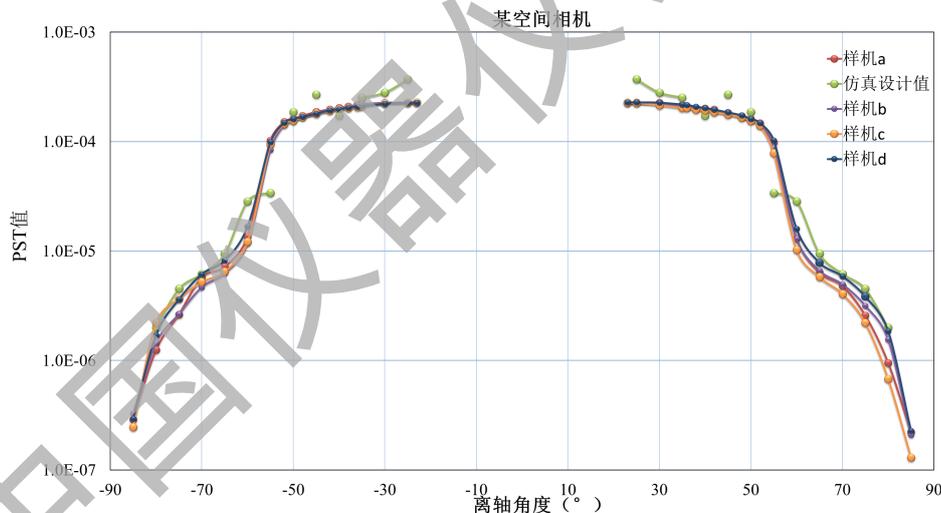


图 3-4 某空间相机的 PST 测试曲线

4 结论

研制了一套可见光波段大口径的 PST 测试系统。该系统最大测试口径为 1600mm，测试波长为 527 nm，测试灵敏度达到 10^{-10} 量级。该系统采用了高能量脉冲激光器作为光源，信号发生器、光电倍增管结合锁相放大器实现弱光信号的探测，通过建造黑色双柱罐、覆有核孔膜超黑材料的光陷阱、高效洁净暗室，等措施消除环境杂光可至 10^{-11} ，PST 测试能力大大提升。结合标准镜头的标定以及一套光学系统的实际测试，此系统的测试灵敏度可至

10^{-10} , 测试误差 $\lg(\text{测量值}/\text{真实值})=0.4$, 具有较高的精度和可靠性。该测试系统可以为更大口径更高探测能力的光电产品提供杂光抑制性能的有效评估, 保证其对杂散光抑制能力得到充分的测试和验证及在轨性能良好, 提升我国的空域监视能力和空间态势感知能力。

参考文献:

- [1]黄强. 空间光学系统的杂散光分析[J]. 红外, 2006, 27 (1): 26-33
- [2] Kemp J C, Wyatt C L 1977 *Opt. Eng.* **16** 164412
- [3] Fleming J, Grochocki F, Finch T, Willis S, Kaptchen P 2008 *Proc. SPIE* 7069 70690O.
- [4] 王维, 陆琳, 张天一, 等. 10^{-9} 量级高灵敏度点源透射比测试设备研究[J]. 中国光学 (中英文), 2021, 14(2): 390-396.
- [5]赵青, 赵建科, 徐亮, 等. 航天消光黑漆双向反射分布函数的测量与应用[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2627-2635.
- [6]薛勋, 赵建科, 刘尚阔, 等. PST 测试与极弱目标模拟系统及 PST, 探测能力的测试方法[J]. 2018.
- [7]李朝辉, 赵建科, 徐亮, 等. 点源透过率测试系统精度标定与分析[J]. 物理学报, 2016, 65(11): 114206.
- [8]陈钦芳, 马臻, 王虎, 等. 高精度点源透过率杂光测试系统[J]. 2017 年空间机电与空间光学学术研讨会论文集, 2017.
- [9]徐亮, 高立民, 赵建科, 等. 基于点源透过率测试系统的杂散光标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(7): 1607-1614.