

文章编号: 1672-8785(2017)04-0012-05

## 基于双柱罐结构的三波段 杂散光 PST 测试装置

曾 瑾<sup>1,2</sup> 王战虎<sup>1,2</sup> 李欣耀<sup>1,2</sup> 靳 莉<sup>1,2</sup> 周双喜<sup>1,2</sup> 马 臻<sup>3</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083 ;

2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

3. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

**摘 要:** 为了评估由太阳、云层和地表等物体辐射或反射的非成像光线对空间光学系统性能的影响, 通过在地面模拟空间环境, 建立了一套 1 m 口径的杂光测试装置。借鉴国外先进杂光测试装置的研制经验, 该装置采用双柱罐结构, 可以有效地抑制测试环境中的反射、散射和衍射等光污染, 使点源透过率 (Point Source Transmission, PST) 的测试精度  $\lg(\text{测量值}/\text{真实值})$  小于  $\pm 0.5$ 。介绍了该装置的工作原理、组成和功能, 并用该装置对某空间相机在东西方向和南北方向可见光谱段的 PST 曲线进行了测试。测得该相机的杂光抑制水平可到  $10^{-6}$  量级, 测试曲线和理论仿真曲线符合良好, 表明该杂光测试装置具有较高的精度和可靠性, 能满足空间光学系统对杂光性能测试的需求。

**关键词:** 杂光测试; 双柱罐; 点源透过率

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.04.003

## Three-band Stray-light Test Facility for Point Source Transmission Based on Double Cylindrical Chamber

ZENG Jin<sup>1,2</sup>, WANG Zhan-hu<sup>1,2</sup>, LI Xin-yao<sup>1,2</sup>, JIN Li<sup>1,2</sup>, ZHOU Shuang-xi<sup>1,2</sup>, MA Zhen<sup>3</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai 200083, China;

3. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** To assess the influences of non-imaging light radiated or reflected by sun, cloud and earth surface on space optical systems, a set of stray light test equipment with a 1-meter aperture is established by simulating the space environment on the ground. According to the development experience of advanced stray light test equipment of foreign countries, a double cylindrical chamber is used in the equipment. So, it can reduce the light pollution such as the reflection, scattering and diffraction in the test environment and make the test accuracy  $\lg(\text{measurement value}/\text{true value})$  of Point Source Transmission (PST) to be less than  $\pm 0.5$ . The operation principle, components and function of the equipment are presented. The equipment is used to test the PST curves in the visible spectral band both in the west-east direction and in the north-south direction. The stray light suppression of the camera can be up to  $10^{-6}$  order of magnitude. The measured curve is in good accordance with the theoretical simulation curve. This shows that the stray light test equipment has high accuracy and reliability and can meet the stray light test re-

**收稿日期:** 2017-02-23

**作者简介:** 曾瑾(1985-), 女, 山东济宁人, 博士, 主要研究方向为红外光学系统设计。

E-mail: zeng20031985@163.com

quirements of space optical systems.

**Key words:** stray light test; double cylindrical chamber; point source transmission

## 0 引言

由太阳、云层和地表等物体辐射或反射的非成像光线会以杂光的形式进入空间光学系统,在探测器的焦平面上形成背景噪声,降低图像的对比度,从而影响光学系统的性能<sup>[1-4]</sup>。对这些杂光的影响进行精确分析和测试,是准确评价空间光学系统性能的关键。目前,人们大多通过模拟软件 TracePro、Light Tools 等对空间光学系统的杂光抑制水平进行分析。使用这些软件时,可以设置杂光光源、光学镜面和机械表面的属性参数。但这些参数是理论数值,没有考虑各种工艺误差、污染和涂层散射特性误差等因素的影响,这使得理论分析结果和光学系统的实际杂光抑制能力之间存在一定的差异。因此,只有通过建立高精度的杂光测试系统来测试空间光学系统的真实杂光抑制能力,使测试结果与分析结果互为验证,才能准确评价空间光学系统的杂光抑制能力。

目前,测试杂光的方法主要有黑斑法和点源透过率法<sup>[5-7]</sup>。在黑斑法中,目标物是一个亮度均匀的小面源黑体,用黑体在像面的辐照度与移去黑体后像面的辐照度之比评价光学系统的杂光抑制能力。因难以获得亮度均匀的大尺寸面源黑体,该方法不适用于大口径光学系统的杂光测试。PST 法的定义是,离轴角为  $\theta$  的目标经光学系统后在像面产生的辐照度与该目标在光学系统入瞳处的辐照度之比,该方法受目标尺寸和目标辐射强度的影响较弱,是一种客观的杂光评价方法。

美国犹他州立大学和波尔航空航天技术公司都对 PST 测试设备进行了深入研究。前者建立了测试设备“Black Hole”<sup>[8]</sup>,其轴上视场杂光的测试能力可达  $10^{-12}$  量级。后者沿用了“Black Hole”的设计思想,建立了一套能测试更大范围离轴角的杂光测试装置<sup>[9]</sup>,其测试水平优于

$10^{-9}$  量级。相比国外而言,国内对杂散光测试设备的研究起步较晚,目前仅有中国科学院成都光电所和中国科学院西安光机所研制过 PST 测试装置,但这些装置在应用方面具有一定的局限性,如背景环境光污染大、测试系统的口径小或测试波段单一,难以满足国内对空间相机杂光测试的需求。鉴于此,2015 年,中国科学院上海技术物理研究所建立了一套 1 m 口径的三波段杂光测试装置。该装置可对  $0.66 \mu\text{m}$  可见光、 $2.2 \mu\text{m}$  短波红外和  $10.6 \mu\text{m}$  长波红外三个波长的杂光进行测试,测试精度  $\lg(\text{测量值} / \text{真实值})$  小于  $\pm 0.5$ 。下面对该装置的原理、组成和功能进行介绍,并用该装置对某空间相机在南北方向和东西方向的可见光杂光抑制能力进行测试,给出杂光抑制理论分析曲线与实际测试曲线,验证该套装置的可靠性和实用性。

## 1 测试原理

PST 的测试原理如图 1 所示。将待测相机置于转台上,目标模拟光源发出的平行光入射到待测相机的入瞳处,令相机光轴与平行光光轴夹角为  $0^\circ$  的位置为相机的初始位置。测试时,先用标准探测器测量待测相机入瞳处的辐照度  $E_i$ ,然后,转台带动相机转动  $\theta$  角度,打开待测相机的数据采集系统,测量相机在离轴角为  $\theta$  状态下像面的辐射照度  $E_d(\theta)$ 。相机在离轴角为  $\theta$  状态下的  $PST(\theta)$  可表示为

$$PST(\theta) = \frac{E_d(\theta)}{E_i} \quad (1)$$

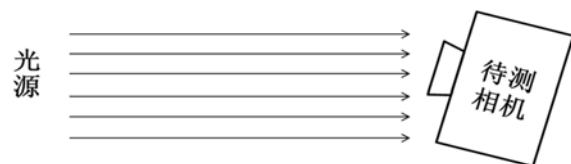


图 1 PST 测试原理示意图

本方案中，转台和相机都位于双柱罐内，如图 2 所示。双柱罐结构由两个截面圆圆心为  $C_1$  和  $C_2$  的圆柱组成， $C_1$  和  $C_2$  不重合。测试时，将待测相机的入瞳置于两圆柱的中心位置附近。如果一束杂散光经过或靠近其中一个球心  $C_1$ ，经  $C_1$  圆柱内壁反射后，到达对面的  $C_2$  圆柱内壁上，由于  $C_1$  和  $C_2$  不重合，根据镜面反射原理，被反射的光线不会沿原路返回，只能到达待测相机的侧面和背面，从而避免了该束杂光对测试结果的影响。

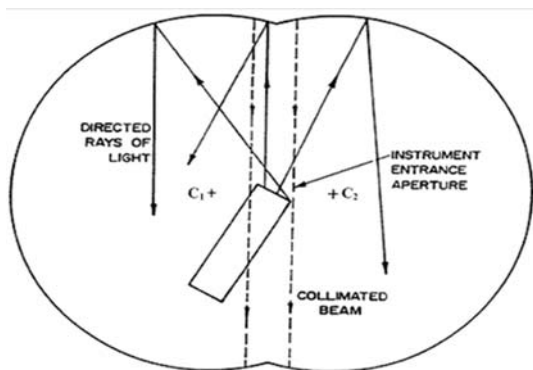


图 2 双柱罐抑制光污染的原理示意图

## 2 组成和功能

本方案中，PST 测试装置的布局模型如图 3 所示。该装置主要由光源集成系统、平行光管、挡光屏、转台、双柱罐和监控室等部分组成。测试时，由平行光管发出的平行光经挡光屏和双柱罐的开口后，入射到待测相机的入瞳处；将待测相机放置在转台上，由监控室内的控制系统驱动转台运动，实现不同离轴角 PST 的测试。根据功能不同，该装置可分为光源模拟系统、转台、环境保障系统和电子学系统四个部分。下面

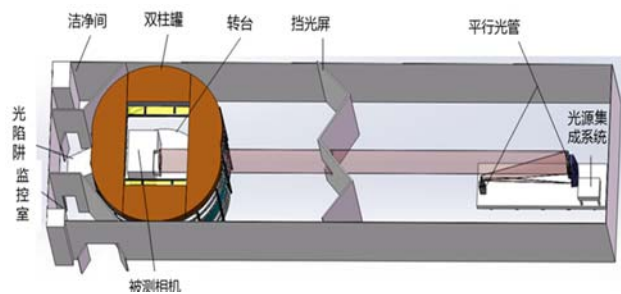


图 3 PST 测试装置整体的布局模型图

对这四个部分进行介绍。

### 2.1 光源模拟系统

光源模拟系统用来模拟空间相机遭遇的太阳光、地球漫反射或辐射等杂光，实物如图 4 所示。该系统主要由一台平行光管和一台集成激光光源组成。其中，平行光管采用离轴两反光学结构，通光口径为 1 m，焦距为 19 m，准直性小于  $10''$ ，出射光束的均匀性大于 80%。

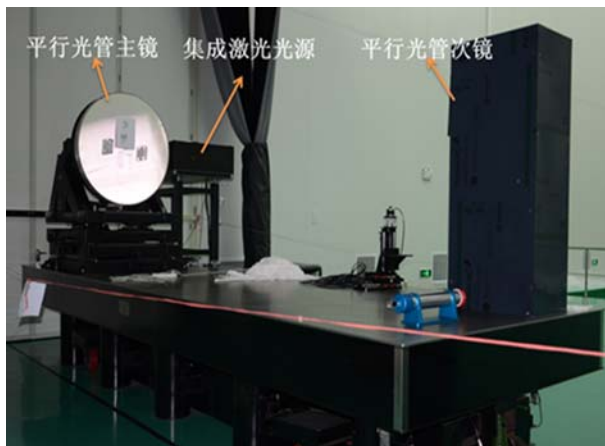


图 4 PST 光源模拟系统的实物图

集成激光光源主要由三台激光器（波长分别为  $0.66 \mu\text{m}$ 、 $2.2 \mu\text{m}$  和  $10.6 \mu\text{m}$ ）及其扩束与整形镜头、滑轨、电控位移台和斩波器等组成，内部结构如图 5 所示。其中， $0.66 \mu\text{m}$  激光器的功率为 500 mW， $2.2 \mu\text{m}$  激光器的功率为 450 mW， $10.6 \mu\text{m}$  激光器的功率为 20 W。 $0.66 \mu\text{m}$  和  $2.2 \mu\text{m}$  的激光器分别通过导管传输光纤与各自的扩束、整形镜头连接。因没有合适的光纤进行导光

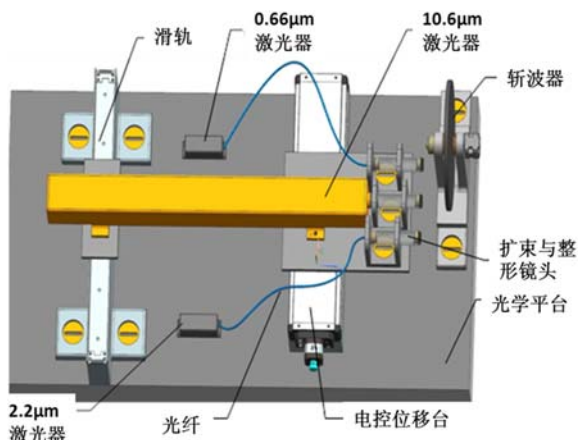


图 5 光源集成系统内部模装图

传输, 10.6  $\mu\text{m}$  激光器的扩束与整形镜头直接被安装在激光器的机械接口上。不同测试波长可通过控制电控平移台完成激光器切换。为滤除外界环境的干扰, 在集成光源的出光口处附加了一台斩波器, 可以对出射光束进行周期性调制。

## 2.2 转台

转台主要用来实现方位、俯仰、横滚、位移和升降运动, 如图 6 所示。转台台体采用立式结构, 主要由一个单轴转台、六只可实现伸缩和轴线回转运动的电动缸和一个可以六维自由运动的平台组成。其中, 单轴转台的直径为 3 m, 安装在地面的固定基座上, 可以实现方位  $\pm 100^\circ$  的旋转。平台的直径为 4.2 m, 由计算机控制系统驱动电动缸实现六维度自由运动。整个转台的最大负载质量为 2000 kg, 最大倾覆力矩为 3000 kg·m, 负载重心高度距离安装面小于 1 m, 可实现俯仰  $\pm 15^\circ$ 、横滚  $\pm 15^\circ$ 、方位  $\pm 100^\circ$ 、水平面左右和前后平移  $\pm 200$  mm、升降  $\pm 200$  mm 范围内任意位置处的杂光测试。

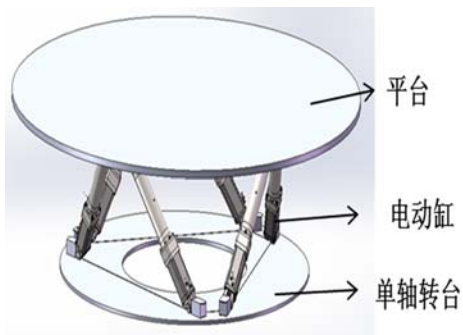


图 6 转台模型简图

## 2.3 环境保障系统

为了抑制测试环境中的空气散射、气溶胶散射、墙壁反射和热辐射等对测试系统的光污染, 建立了环境保障系统。该系统主要由黑布帘、双柱罐、光陷阱、滤风系统和挡光屏等设施组成。其中, 黑布帘和双柱罐的实物如图 7 所示。将黑布帘做成双层形式, 挂在测试间四周的墙壁上, 其对 0.66  $\mu\text{m}$  和 2.2  $\mu\text{m}$  的吸收率大于 97%, 对 10.6  $\mu\text{m}$  的吸收率大于 95%。双柱罐由亚克力板拼接粘贴而成, 高度为 4 m, 内腔长为 7.2 m,

宽为 6 m, 中心开孔为  $\phi 1.05$  m。亚克力板的表面呈镜面反射, 对 0.66  $\mu\text{m}$ 、2.2  $\mu\text{m}$  和 10.6  $\mu\text{m}$  波长的反射率为 4%~5%, 吸收率大于 95%, 散射率小于 1%。待测相机的口径小于 1 m 时, 光陷阱残余的平行光直接照射双柱罐内壁, 由此产生的强背景光在多次散射后衰减。滤风系统通过两台加压过滤风柜送风和回风, 使双柱罐内的洁净度提升到千级。将挡光屏放置在双柱罐入光口前端的平行光路中, 以抑制测试环境周围其他设施反射的一些杂光, 挡光屏的材料为黑色亚克力板, 其属性与双柱罐采用的亚克力板一致。

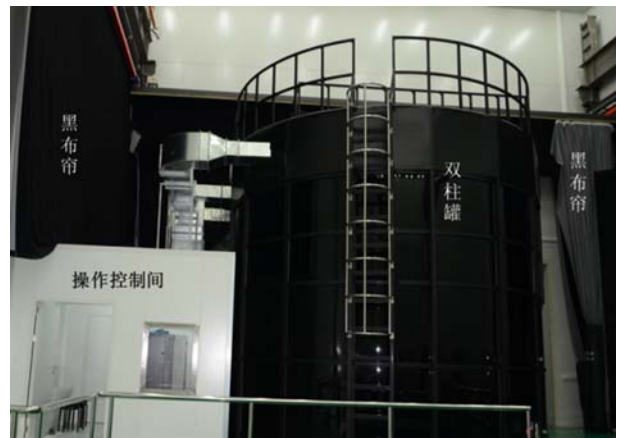


图 7 黑布帘和双柱罐实物图

## 2.4 电子学系统

如图 8 所示, 电子学系统主要由弱光探测与信号提取单元、运动部件控制单元、信号采集与处理终端三大部分组成。其中, 弱光探测与信号提取单元对到达探测器的弱光信号进行探测, 锁相放大器在提取探测器输出的微弱信号后将信号通过 RS422 接口传输至数据采集与处理终端, 以进行存储和运算。运动部件控制单元对光源导轨、斩波器、探测器三维调整机构等运动部件进行驱动和运动控制, 这些控制信号均通过 RS422 接口与数据采集与处理终端进行指令通讯和数据传输。将数据采集与处理终端放置在操作控制间内, 主要用来发送、接收各种指令以及对锁相放大器输出的数据进行采集和处理。



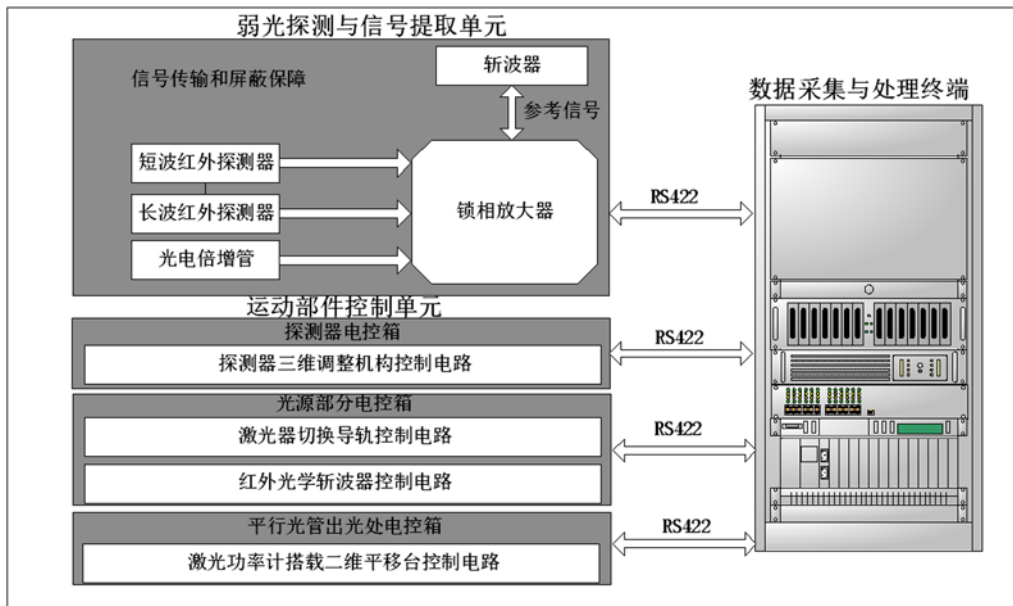


图 8 PST 电子学系统的组成示意图

### 3 试验验证

为了验证该 PST 测试装置的测试精度和可靠性，用该装置对某空间相机在南北方向和东西方向的 PST 曲线进行了测试。测试波长为  $0.66 \mu\text{m}$ ，测试离轴角的范围为  $\pm 1^\circ \sim \pm 35^\circ$ 。由测试结果可知，当离轴角为  $\pm 35^\circ$  时，PST 测试值可到  $10^{-6}$  量级。在图 9 中，将测试曲线与理论仿真曲线对比后发现，东西方向的 PST 测试曲线与理论曲线基本一致，但在  $-10^\circ$  附近测试值比理论值约低了 1 个量级，可能原因是在这角度附近，相机内部的机械结构对东西方向杂光的散射或反射次数增多了。在  $\pm 1^\circ \sim \pm 20^\circ$  范围内，南北方向的 PST 实测曲线和理论曲线比较接近，但在  $\pm 20^\circ \sim \pm 35^\circ$  范围内，实测曲线高于理论曲线约 1 个量级，这可能是由双柱罐内部残余的反射、散射等光污染在探测器上产生的本底噪声叠加引起的。由此可见，除了少数点外，该套设备的测试精度  $\lg(\text{测量值} / \text{真实值})$  小于  $\pm 0.5$ ，且测试曲线与理论曲线符合良好，足以证明该套设备的测试精度和可靠性均较高，能够满足类似空间相机杂光测试的需求。

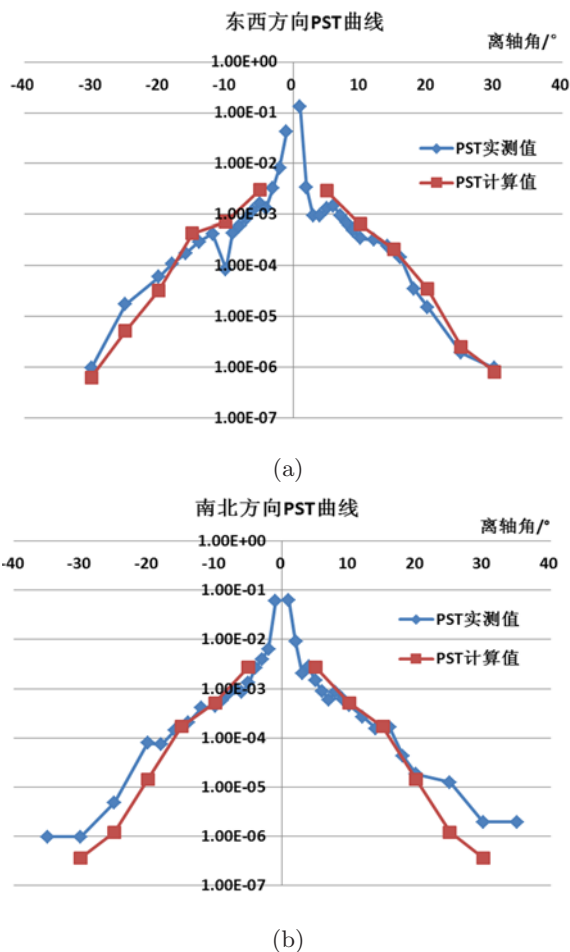


图 9 某空间相机的 PST 测试曲线

(下转第 22 页)