

doi:10.3788/gzxb20164501.0112002

空气洁净度对点源透射比测试准确度的影响

曹智睿^{1,2}, 付跃刚¹, 田浩²

(1 长春理工大学, 长春 130021)

(2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要: 为了进一步提高点源透射比测试准确度, 明确点源透射比测试环境需求, 提出了一种定量分析空气洁净度对点源透射比测试准确度影响的方法. 该方法以 Mie 散射理论为基础, 采用蒙特卡洛模拟方法, 对空气中尘埃的尺寸和数量进行随机模拟, 得到不同空气洁净度等级下空气中尘埃对点源透射比测试准确度的影响. 以直径为 800 mm、点源透射比设计值为 10^{-9} 量级的某太空望远镜为例进行定量分析, 结果表明: 为了满足该空间光学系统的点源透射比测试需求, 空气洁净度等级应优于 ISO class 6, 此时空气中尘埃引起的点源透射比测试误差约为 10^{-10} 量级; ISO class 每升高一级, 测试误差约增大 10 倍.

关键词: 光学测量; 点源透射比; 蒙特卡洛模拟; Mie 散射; 洁净度

中图分类号: TN206; TH751

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)01-0112002-6

The Impact for the Air Cleanliness to the Precision of PST Test

CAO Zhi-rui^{1,2}, FU Yue-gang¹, TIAN Hao²

(1 Changchun University of Science and Technology, Changchun 130033, China)

(2 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to further improve the precision and quantify the environmental requirement for Point Source Transmittance (PST) test, a method was proposed to quantitatively analyze the impact of air cleanliness on the precision of PST test. This method is based on Mie scatter theory, and uses Monte Carlo simulation to perform a random and large simulation on dust quantity and size for different air cleanliness. A case study was performed to find out the actual environmental requirement for PST test, which used a space telescope of 800mm diameter with the designed PST of 10^{-9} . The analysis indicates a minimum air cleanliness of ISO class 6 and the PST test error of 10^{-10} caused by dust, with each additional level of air cleanliness, the PST test error will increase ten times.

Key words: Optical measurement; Point Source Transmittance (PST); Monte Carlo simulation; Mie scattering; Cleanliness

OCIS Codes: 120.4800; 120.5820; 290.1310; 290.582

0 引言

杂散光抑制能力是太空望远镜的重要技术指标, 高准确度的杂散光测试技术是此类空间光学系统研制的关键技术之一. 自 20 纪 90 年代起, 研究机构多以点源透射比 (Point Source Transmittance, PST) 的概念评价太空望远镜的杂散光抑制能力.

2000 年, 文献[1]介绍了 XMM Telescope 的杂散光测试信息, XMM 的点源透射比测试在设计值 class 100, 实测值 class 5 的洁净室内进行, 准确度达到了 10^{-11} 量级. 2008 年, 美国 Ball Aerospace & Technologies Corp. 研制一种新型杂散光测量设备, 该设备置于高洁净的实验室环境中, 点源透射比测量准确度优于 10^{-9} [2-3]. 2008 年, 美国 Breault Research

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61307114) 资助

第一作者: 曹智睿 (1983—), 男, 助理研究员, 博士研究生, 主要研究方向为光学测试技术. Email: caozhirui_0503@163.com

导师 (通讯作者): 付跃刚 (1972—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电技术. Email: Fuyg@cust.edu.cn

收稿日期: 2015-07-07; 录用日期: 2015-10-14

<http://www.photon.ac.cn>

Organization 研制杂散光测试站,在真空环境下能实现不同离轴角时的点源透射比测量,但是该测试装置的具体测试准确度不详^[4].

国内对于已知的典型点源透射比测试装置及其测试能力也进行了大量研究.1996年,中国科学院光电技术研究所廖胜等介绍了一套红外光学系统杂光点源透射比的测试装置,首次成功获得光学系统 PST 的可靠测试数据,测试装置使用了数字锁相放大技术,使 PST 的测试结果达到了 10^{-5} 量级^[5].1998年,该团队介绍了一套 R-C 光学系统可见光杂光 PST 测试装置,测试结果达到了 10^{-5} 量级^[6].2011年,哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心的王治乐等介绍了一种基于点源透射比的杂散光测量装置,应用该测量系统实际测得的最佳 PST 数值约为 10^{-6} 量级^[7].2011年,中国科学院长春光机所的杨林介绍了极紫外太阳望远镜杂散光 PST 测试装置,该装置实测得到的 PST 数据约为 10^{-6} 量级^[8].2014年,中国科学院西安光机所的徐亮等介绍了月基望远镜杂散光 PST 的测试装置,在 ISO class 8 的常压洁净室内,满足了指标 PST 测试值 10^{-7} 的要求^[9].然而这些研究普遍没有充分重视空气洁净度对 PST 测试准确度的影响,这是国内外的 PST 测试能力存在差距的因素之一^[10-11].

在国内外公开发表的资料中,尚没有一种定量地分析空气洁净度对 PST 测试准确度影响的方法,这使得 PST 测试环境的建立具有一定的盲目性.部分实验室的空气洁净度与 PST 测试准确度的需求之间存在严重的不匹配现象,从而导致了测试的失败,并将提高 PST 测试准确度的努力引向错误的方向.本文提出一种定量分析空气洁净度对 PST 测试准确度影响的方法,为 PST 测试环境的建立提供了理论依据.

1 PST 测试原理及误差来源

在某测试波段下,光学系统轴外视场角 θ 处点源目标的辐射,经光学系统后在像面产生的辐射照度 $E_d(\theta)$ 与其在光学系统入瞳处辐照度 E_i 的比值称为点源透射比,其表达式为^[12]

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

点源透射比测试系统主要由无穷远点目标发生装置、旋转平台、辐照度探测器件和光陷阱等组成,典型的实验室布局如图 1.

由 PST 测试原理及方法可知,PST 测试的主要误差来源如图 2.

在 PST 测试过程中,实验室尘埃都将对测试光产生散射效应,一部分散射光线进入被测光学系统的成像视场并直接到达像面,当这部分散射光在像面处的辐照度水平超过待测杂散光信号辐照度水平的十分之

一时,测试误差已不可忽略.降低该测试误差的主要途径是明确实验室洁净度等级与 PST 测试准确度之间的定量关系,并依此严格控制实验室洁净度等级.

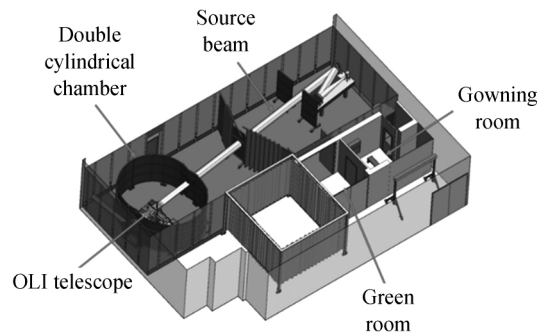


图 1 PST 测试实验室示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PST testing lab

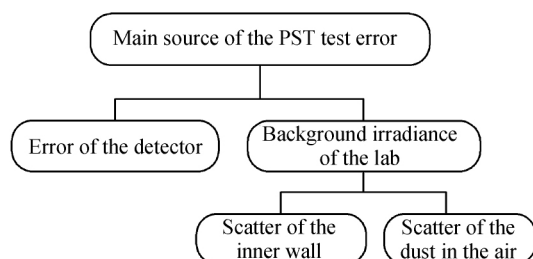


图 2 PST 测试的主要误差来源

Fig. 2 The main error source of PST test

2 定量分析的理论基础与数学模型

研究空气洁净度对 PST 测试准确度的影响,实质是研究空气中尘埃在特定光照条件下,对特定参考平面的散射效果.在不同的散射理论模型中,Mie 散射理论适用于各向同性的球形散射体在单色平行光入射时的散射行为,当把实验室中的尘埃近似看做各向同性的球形散射体时,可以用 Mie 散射理论近似地分析 PST 测试过程中实验室尘埃的散射效应^[13-14].

2.1 Mie 散射理论基础

各向同性的球形散射体在完全偏振光入射下的 Mie 散射如图 3. 图中坐标原点代表散射体的中心位

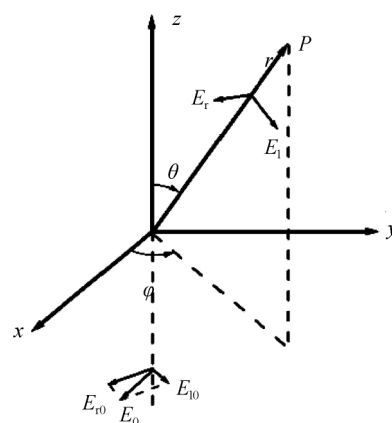


图 3 Mie 散射示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Mie scatter

置, Z 轴方向代表光线入射方向, X 轴方向代表入射光的偏振方向, P 点为散射光观测点, r 为散射光观测点到散射体的距离, θ 为散射角, φ 为偏振光的偏振角, E_{r0} 和 E_{i0} 分别为入射光电矢量在垂直散射面和平行散射面方向的分量, E_r 和 E_i 分别为散射光电矢量在垂直散射面和平行散射面方向的分量。

当入射光为完全偏振光时, 散射光强为

$$I_r = |E_r|^2 = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} |S_1(\theta)|^2 I_{r0} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_1(\theta) I_{r0} \quad (2)$$

$$I_i = |E_i|^2 = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} |S_2(\theta)|^2 I_{i0} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_2(\theta) I_{i0} \quad (3)$$

$$I = I_r + I_i = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} [i_1(\theta) I_{r0} + i_2(\theta) I_{i0}] \quad (4)$$

式中 I_r 、 I_i 和 I 分别为垂直散射面的散射光强、平行散射面的散射光强和总散射光强。当入射光为自然光时, 散射光为部分偏振光, $I_{r0} = I_{i0} = 0.5 I_0$, I_0 为入射光总光强, $i_1(\theta)$ 和 $i_2(\theta)$ 为散射强度函数, $S_1(\theta)$ 和 $S_2(\theta)$ 为散射振幅函数, 其表达式为

$$S_1(\theta) = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2l+1}{l(l+1)} (a_l \pi_l + b_l \tau_l) \quad (5)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2l+1}{l(l+1)} (a_l \tau_l + b_l \pi_l) \quad (6)$$

a_l 和 b_l 称为 Mie 系数, 它们与入射光波长 λ 、散射体等效直径 D 、散射体相对周围介质的折射率 m 有关, 其表达式为

$$a_l = \frac{\Psi_l(\alpha) \Psi'_l(\beta) - m \Psi'_l(\alpha) \Psi_l(\beta)}{\xi_l(\alpha) \Psi'_l(\beta) - m \xi_l(\alpha) \Psi_l(\beta)} \quad (7)$$

$$b_l = \frac{m \Psi_l(\alpha) \Psi'_l(\beta) - \Psi'_l(\alpha) \Psi_l(\beta)}{m \xi_l(\alpha) \Psi'_l(\beta) - \xi_l(\alpha) \Psi_l(\beta)} \quad (8)$$

$$\Psi_l = \left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)^{1/2} J_{l+1/2}(\alpha) \quad (9)$$

$$\xi_l = \left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)^{1/2} \begin{pmatrix} H_{l+1/2}^{(1)}(\alpha) \\ H_{l+1/2}^{(2)}(\alpha) \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\alpha = \pi D / \lambda \quad (11)$$

$$\beta = m\alpha \quad (12)$$

π_l 和 τ_l 是与散射角有关的函数, 即

$$\pi_l(\theta) = \frac{P_l^{(1)}(\cos \theta)}{\sin \theta} = \frac{dP_l(\cos \theta)}{d(\cos \theta)} \quad (13)$$

$$\tau_l(\theta) = \frac{d}{d\theta} P_l^{(1)}(\cos \theta) = -P_l^{(1)'}(\cos \theta) \sin \theta \quad (14)$$

通过式(2)~(14)可以求得单个散射体的散射光强, 而散射光在某特定平面上的辐照度 E 为

$$E = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} I \sin \theta r^2 d\theta d\varphi \quad (15)$$

2.2 空气洁净度对 PST 测试准确度影响的蒙特卡洛模拟

由 Mie 散射理论可知, 在已知入射光光强 I_0 、入射光波长 λ 、散射体等效直径 D 、散射体相对周围介质的折射率 m 、考察的散射角度范围 (θ_1, θ_2) 、考察的方位角度范围 (φ_1, φ_2) 的情况下, 可以计算单个散射体在被测光学系统像面处产生的辐照度, 而所有散射体在被测光学系统像面处产生辐照度的累计效果就是空气洁净度导致的 PST 测试误差。为了计算这一误差, 需要知道特定空气洁净度等级下, 一定体积的空气中散射体的尺寸和数量分布。

由空气洁净度等级的 ISO 划分标准可知, 空气洁净度等级与散射体尺寸和数量的对应关系见表 1。表中数据的含义是: 特定空气洁净度等级下, 每立方米空气中, 大于某一尺寸的散射体的最大允许数量。

表 1 空气洁净度等级划分标准

Table 1 Standard of air cleanliness class

ISO classification number(N)	Maximum concentration limits(pc/m ³ of air) for particles equal to and larger than the considered sizes shown below					
	0.1 μm	0.2 μm	0.3 μm	0.5 μm	1 μm	5 μm
ISO class 1	10	2				
ISO class 2	100	24	10	4		
ISO class 3	1000	237	102	35	8	
ISO class 4	10000	2370	1020	352	83	
ISO class 5	100000	23700	10200	3520	832	29
ISO class 6	1000000	237000	102000	35200	8320	293
ISO class 7				352000	83200	2930
ISO class 8				3520000	832000	29300

如果直接应用表中的数据(最大值)计算空气洁净度对 PST 测试准确度的影响, 那么计算结果偏大。为了提高定量分析的准确性, 采用蒙特卡洛模拟法对特定空气洁净度等级下的散射体尺寸和数量进行了随机处理:

1) 约束条件。大量研究表明, 空气中不同尺寸的尘

埃粒子的数量近似的分布规律为^[15]

$$\frac{N_{d_1}}{N_{d_2}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-n} \quad (16)$$

式中, N_{d_1} 为粒径 $\geq d_1$ 的粒子总数, N_{d_2} 为粒径 $\geq d_2$ 的粒子总数, n 为分布指数, 一般在 2.0 ~ 2.3 变化。在整个模拟过程中, 始终以式(16)和表 1 内容作为模拟

的约束条件;

2) 随机变量. 首先设定一个一维等差递增数组 a 表示散射体可能的尺寸, 该数组首元素为 $0.01\ \mu\text{m}$, 末元素为 $10\ \mu\text{m}$, 递增值为 $0.01\ \mu\text{m}$, 然后定义一个一维随机整数数组 b 表示不同尺寸散射体的统计个数, a 和 b 的元素存在一一对应的关系; 定义式(16)中的分布指数 n 为随机变量, 以 0.01 为分辨率, 在 $2.0\sim 2.3$ 之间随机取值;

3) 模拟方法. 首先随机生成数组 b 中的任意一个元素, 然后按照式(16)计算数组的其他元素, 在每一个元素的计算过程中, 分布指数 n 随机取值;

4) 设定随机模拟的次数. 蒙特卡洛模拟的计算准确度与样本量的平方根成正比, 选取随机模拟次数 $N=100000$; 若 b_m 代表数组 b 的第 m 个元素, 则取 N 个 b_m 的算数平均值作为数组 b 第 m 个元素的最终结果参与后续运算;

5) 将数组 a 、 b 与式(2)~(15)结合, 可得到空气洁净度等级与 PST 测试准确度的定量关系;

6) 所有数学模型通过 MATLAB 实现.

3 定量分析结果

以某通光口径为 $\Phi 800\ \text{mm}$, 视场角为 1.5° , PST 设计值为 1.3×10^{-9} (测试视场角 $\theta\geq 30^\circ$) 的空间光学系统为例, 定量分析与计算空气洁净度对 PST 测试准确度的影响. 在 PST 测试过程中, 对测试准确度产生影响的尘埃散射如图 4. 图中网格区域为光学系统视场与测试光束的交叠范围, 角度 θ 既代表了 PST 测试视场角度, 也代表了沿光轴方向观察时散射体的散射角度, 当网格区域内散射体的散射角度范围 (θ_1, θ_2) 为 $(\theta-0.75^\circ, \theta+0.75^\circ)$ 时, 散射光直接进入光学系统的成像视场, 这部分散射光对测试准确度产生的影响不可忽略.

在分析空气洁净度对 PST 测试准确度的影响之前, 首先分析单个散射体对 PST 测试的影响. 利用式(2)~式(15), 明确各参量的赋值原则和具体赋值情况. 在分析单个散射体对 PST 测试的影响时, 只需要关注入射光强和散射光强的比值, 因此 I_0 的赋值情况不影响最终的分析结果, 取 $I_0=1\ \text{lux}$. 入射光波长依据测试光源而定, 本文所选用的 $\lambda=550\ \text{nm}$.

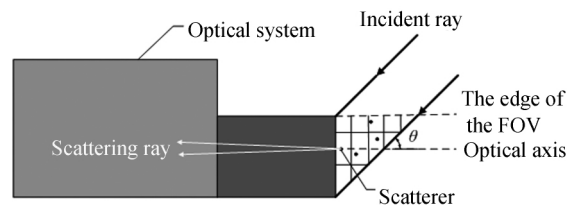


图 4 对测试准确度产生影响的尘埃散射示意图

Fig. 4 Schematic diagram of dust scatter which impacts the testing precision

散射体特征直径的选取可参照 ISO 空气洁净度等级划分标准中给出的特征尺寸, 即 $D=0.1\ \mu\text{m}, 0.2\ \mu\text{m}, 0.3\ \mu\text{m}, 0.5\ \mu\text{m}, 1\ \mu\text{m}, 5\ \mu\text{m}$. 空气中散射体的组成成分复杂, 不同材料散射体的相对折射率各不相同, 并且难以确定. 由于洁净度级别中采用的是“等效直径”的概念, 即无论被测粒子的折射率、形状和表面情况如何, 只要产生的散射光强度与洁净度监测仪器标定时所采用的标准粒子相同, 则认为被测粒子的直径与标准粒子相当. 因此在分析时可以选取与洁净度监测仪器标定时选用的标准粒子相对折射率相同的散射体相对折射率, 本文选取的标准粒子为聚苯乙烯粒子, 相对折射率 $m=1.585$. 依据被测光学系统的杂光抑制技术指标, 测试视场角度取 $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$. 考察的方位角度范围由被测光学系统的视场角度决定, 取 $(\varphi_1, \varphi_2)=(-0.75^\circ, 0.75^\circ)$.

基于各参量赋值情况, 计算得出不同测试视场角下单个散射体在像面处产生的辐照度值见表 2.

表 2 单个散射体在像面处产生的辐照度

Table 2 Irradiance on image surface caused by single scatterer

Diameter of scatterer/ μm		0.1	0.2	0.3	0.5	1	5
Irradiance on image surface ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	$\theta=30^\circ$	4.5×10^{-19}	3.1×10^{-17}	4.3×10^{-16}	5.5×10^{-15}	1.2×10^{-14}	2.6×10^{-13}
	$\theta=45^\circ$	3.8×10^{-19}	2.9×10^{-17}	2.9×10^{-16}	2.2×10^{-15}	8.3×10^{-14}	1.5×10^{-13}
	$\theta=60^\circ$	3.2×10^{-19}	2.2×10^{-17}	1.6×10^{-16}	7.3×10^{-15}	3.0×10^{-14}	7.1×10^{-13}
	$\theta=90^\circ$	2.5×10^{-19}	1.2×10^{-17}	5.8×10^{-17}	1.6×10^{-16}	1.2×10^{-15}	1.3×10^{-13}

计算结果表明: 在相同的 PST 测试视场角 θ 下, 散射体的直径越大散射效果越强; 在相同的散射体直径下, PST 测试视场角 θ 越小散射效果越强. 因此只计算 $\theta=30^\circ$ (散射效果最强的视场角度) 时空气洁净度等级

对 PST 测试准确度的影响.

$\theta=30^\circ$ 时, 图 4 网格区域的体积 $V\approx 0.35\ \text{m}^3$, 基于 Mie 散射原理, 采用蒙特卡洛模拟方法可得到空气洁净度等级与 PST 测试准确度的定量关系如表 3.

表 3 网格区域内散射体在像面处产生的总辐照度
Table 3 Irradiance on image surface caused by all the scatterer in the grid area

ISO classification number/N	ISO class 1	ISO class 2	ISO class 3	ISO class 4	ISO class 5	ISO class 6	ISO class 7	ISO class 8
Irradiance on image surface/(W · m ⁻²)	0.24 × 10 ⁻¹⁶	0.9 × 10 ⁻¹³	1.2 × 10 ⁻¹³	1.2 × 10 ⁻¹²	1.5 × 10 ⁻¹¹	1.5 × 10 ⁻¹⁰	1.5 × 10 ⁻⁹	1.5 × 10 ⁻⁸

表 3 结果是基于入射光强 $I_0 = 1 \text{ lux}$ 、入射光辐照度为 1 W/m^2 时计算得出,因此在数值上完全等于不同空气洁净度等级下尘埃散射引入的 PST 测试误差.由该计算结果可知,当实验室空气洁净度等级为 ISO class 3 时,尘埃散射引入的 PST 测试误差约为 10^{-13} 量

级,当实验室空气洁净度等级为 ISO class 8 时,尘埃散射引入的 PST 测试误差约为 10^{-8} 量级.

4 实测验证

设计了图 5 所示的验证光路.

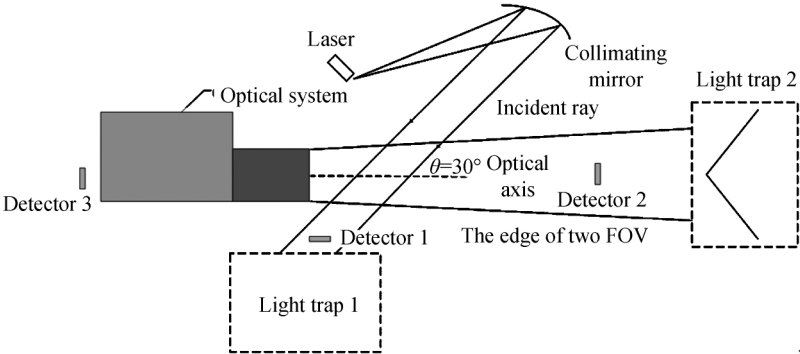


图 5 验证光路示意图
Fig. 5 Schematic diagram of the proving light path

实测验证同样以某通光口径为 $\Phi 800 \text{ mm}$ 、视场角为 1.5° 、PST 设计值为 1.3×10^{-9} (测试视场角 $\theta \geq 30^\circ$ 时)的空间光学系统为例,采用可调谐脉冲激光器作为平行光管的照明光源,该照明系统可提供 $\Phi 800 \text{ mm}$ 口径内辐照度高达 $10^7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的平行光束.验证光路中设有两个高性能光陷阱,后向散射率均低于 0.001% ,光陷阱 1 的作用是减小测试光束的后向散射,光陷阱 2 的作用是进一步降低可能进入被测光学系统成像视场的散射光辐照度,从而最大限度地减小实验室内壁散射对实测结果的影响.三个辐照度探测器分别用来测试平行光管出射光的辐照度、光陷阱 2 的后向散射辐照度和被测光学系统像面处辐照度,测量结果分别用 E_1 、 E_2 和 E_3 表示,需要指出的是,三个辐照度探测器可以具有不同的测量范围,但是必须通过标校使其具有一致的线性响应.空气尘埃引入的 PST 测试误差为

$$\Delta \text{PST} = (E_3 - E_2) / E_1 \quad (17)$$

在保持验证光路完全相同的情况下,将验证光路分别置于 ISO class 7 和 ISO class 8 的洁净环境中,洁净装置采用垂直流向;实验室内壁均采用相同的黑丝绒布覆盖,黑丝绒布表面反射率低于 2% .在两种实验室环境下分别测得空气尘埃引入的 PST 测试误差见表 4.

实测验证的结果与定量分析计算的结果基本吻合,证明了定量分析方法的正确性.

表 4 实测结果
Table 4 The measured results

	$E_1 / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$E_2 / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$E_3 / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	ΔPST
ISO class 7	1.5×10^7	1.2×10^{-3}	4.1×10^{-2}	2.7×10^{-9}
ISO class 8	1.5×10^7	2.6×10^{-3}	5.9×10^{-1}	3.9×10^{-8}

5 结论

本文提出了一种定量分析空气洁净度对 PST 测试准确度影响的方法,分析结果与实测验证的结果相符.应用该方法定量分析了空气洁净度对某口径 $\Phi 800 \text{ mm}$ 、PST 设计值为 10^{-9} 量级的空间光学系统 PST 测试准确度的影响,分析结果表明:为了满足该空间光学系统的 PST 测试需求,空气洁净度等级应优于 ISO class 6,此时空气中尘埃引起的 PST 测试误差约为 10^{-10} 量级;空气洁净度等级每降低一级,测试误差约增大 10 倍.

参考文献

[1] WUHRER C, BIRKL R, DEZOETEN P, et al. PST measurements and wide angle straylight analyses of the XMM (X-Ray Multi Mirror) telescope[C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2000, 4012: 113-122.
[2] FLEMING J, GROCHOCKI F, FINCH T, et al. New stray light test facility and initial results[C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2008, 7069: 70690O.

- [3] PETERSON G L. Stray light test station for measuring point source transmission and thermal background of visible and infrared sensors[C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2008, **7069**: 70690M.
- [4] GROCHOCKI F, FLEMING J. Stray light testing of the OLI telescope [C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2010, **7794**: 77940W.
- [5] LIAO Sheng, SHEN Mang-zuo. PST research and measurement of infrared optical system stray light[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1996, **15**(5): 375-378.
廖胜, 沈忙作. 红外光学系统杂散光 PST 的研究与测试[J]. 红外与毫米波学报, 1996, **15**(5): 375-378.
- [6] LIAO Sheng, SHEN Mang-zuo. PST research and measurement of R-C optical system stray light [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, **25**(S): 17-20.
廖胜, 沈忙作. R-C 光学系统可见光杂光 PST 的研究与测试[J]. 光电工程, 1998, **25**(S): 17-20.
- [7] WANG Zhi-le, GONG Zhong-qiang, ZHANG Wei, *et al.* Measurement of stray light based on point-source transmittance in space optical system[J]. *Optical Technique*, 2011, **37**(4): 401-45.
王治乐, 龚仲强, 张伟, 等. 基于点源透射率的空间光学系统杂光测量[J]. 光学技术, 2011, **37**(4): 401-45.
- [8] YANG Lin, LI Da, CUI Tiangang, *et al.* Measurement and elimination of stray light from space solar telescopes for imaging test at UV band [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(7): 1456-1463.
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.
- [9] XU Liang, ZHAO Jian-ke, XUE Xun. PST research and measurement of lunar-based optical telescope stray light[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(4): 1289-1295.
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): 1289-1295.
- [10] ZHANG Xian-liang, LIU Ruo-fan, SU Hong-yu, *et al.* Stray light measurement equipment for infrared optical system[J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(12): 960-963.
张宪亮, 刘若凡, 苏红雨, 等. 红外系统杂散光测量装置[J]. 红外技术, 2014, **36**(12): 960-963.
- [11] LI Xiao-ping, WANG Gang, HU Ting-liang. High precision stray light measurement system analysis [J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(9): 521-524.
李晓平, 王钢, 胡亭亮. 高准确度杂散光测量系统分析[J]. 红外技术, 2011, **33**(9): 521-524.
- [12] FRENIERE E R, STERN R D, HOWARD J W. SOAR: a program for rapid calculation of stray light on the IBM PC [C]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1990, **1331**: 107-108.
- [13] DU Wei-wei. Design and implementation of air borne particle counter based on light scattering theory [D]. Soochow: Soochow University, 2011: 8-15.
杜伟巍. 基于光散射的尘埃粒子计数器设计与实现[D]. 苏州: 苏州大学, 2011: 8-15.
- [14] REN Zhi-bin, LU Zhen-wu, LIU Yu-ling, *et al.* Study of Mie normalized scattered intensity distributions[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2003, **14**(1): 83-85.
任智斌, 卢振武, 刘玉玲, 等. Mie 理论归一化散射光强的研究[J]. 光电子. 激光, 2003, **14**(1): 83-85.
- [15] HUANG Hui-jie, ZHAO Yong-kai, REN Bing-qiang, *et al.* Aerosol particle measurement by laser diode light scattering [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **29**(12): 1117-1121.
黄惠杰, 赵永凯, 任冰强, 等. 尘埃粒子的半导体激光散射测量[J]. 中国激光, 2002, **29**(12): 1117-1121.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(No. 61307114)