

大口径光学系统杂散光测试技术

李朝辉, 赵建科

(中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要: 随着航天航空技术的高速发展, 高灵敏度相机对杂散光抑制能力要求逐渐升高。受限于杂散光测试仪器的口径及焦距, 以往大口径高灵敏度相机的杂散光抑制能力主要依据工程经验或计算分析来保证, 分析结果与实际应用结果往往差距较大。针对大口径杂散光系数与高精度点源透过率无法测量的技术难题, 建立了离轴反射式杂散光系数测量技术与高精度点源透过率测试技术。可实现口径不小于 $\Phi 800\text{mm}$ 光学系统的杂散光系数测量。基于杂散光精确建模仿真和高效环境杂散光抑制技术, 在国内首次建立了双圆柱消光腔, 测试系统测量范围达到 $10^{-3}\sim 10^{-10}$ 。基于高精度杂散光散射模型提出一种杂散光测量系统的校准镜头。

关键词 杂散光测量;大口径光学系统;散射;双圆柱消光腔;

Large-aperture optical system stray light testing technology

Li Zhaohui, Zhao Jianke,

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

Abstract : With the rapid development of aerospace technology, the requirements of high-sensitivity cameras for stray light suppression capabilities have gradually increased. Limited by the caliber and focal length of stray light test instruments, the stray light suppression ability of large-diameter high-sensitivity cameras in the past is mainly based on engineering experience or computational analysis to ensure that the analysis results and practical application results are often far apart. Aiming at the technical problem that the stray light coefficient of large aperture and the transmissivity of high-precision point source cannot be measured, the off-axis reflection stray light coefficient measurement technology and high-precision point source transmissivity measurement technology are established. This technology enables stray light coefficient measurement of optical systems with a diameter of not less than $\Phi 800\text{mm}$. Based on the accurate modeling and simulation of stray light and the efficient environmental stray light suppression technology, a double cylindrical extinction cavity has been established for the first time in China, which effectively suppresses strong background scattering in space, and the measurement range of the test system

reaches $10^{-3}\sim 10^{-10}$. Based on the scattering effect, a calibration lens for stray light measurement system is proposed.

Keywords: Stray light measurement; Large-aperture optical system; scatter; Double cylindrical extinction chamber

1 引言

随着航天航空技术的发展,高灵敏度相机首要解决的是杂散光抑制问题,杂光会影响系统的探测能力,严重时会导致任务失败。

对于杂散光的抑制根本上应解决杂散光的测试问题,以往大口径高灵敏度相机研制过程中,由于杂散光测试仪口径小(国内最大测量口径为 $\Phi 200\text{mm}$)、焦距短,无法满足口径 $\Phi 500\text{mm}$ 以上光学系统杂散光系数测试的需求,仅仅根据工程经验或者计算分析来保证,而分析结果与实际应用结果往往差距较大。另外,随着高灵敏探测、观测类相机的出现,对光学系统视场外杂散光抑制能力有了新的要求,一般要求相机规避角以外点源透过率(Point Source Transmittance, PST)达到 10^{-10} 甚至更低,这个量级的PST用一般设备是无法准确测量的。为适应我国高灵敏度空间的相机发展,开展高精度PST研究工作是必要的。

2 机理分析及建模

双向反射分布函数(BRDF)作为描述材料表面散射特性的一个重要参数,是杂光分析仿真中必不可少的参数。本文提出了改进型杂散光散射模型,并建立了航天航空用消光材料表面双向反射分布函数(BRDF)数据库,精确描述了光在粗糙材料表面的散射效应,BRDF原理如图2-1所示。图2-2给出了消光材料模型精度及普适性的对比图。

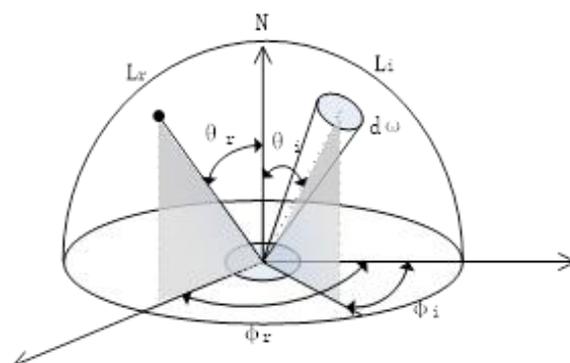


图 2-1 双向反射分布函数原理图

大口径准直物镜加工困难，采用离轴反射镜替代传统的透射式准直镜，可实现 $\Phi 400\text{mm}$ 以上准直光的模拟（离轴反射镜无色差），从而满足大口径光学系统杂散光系数测量的要求。

2.2 大口径高精度 PST 测试系统机理及建模

大口径高精度 PST 测试系统由大口径平行光管、高亮度均匀光源、多自由度转台、探测系统、双圆柱消光腔（环境保障系统）及标定系统组成，如图 2.2-1 所示。

高亮度均匀光源出光口置于大口径平行光管焦面处，斩波器置于光源集成系统出光口，使得平行光管出口产生被斩波调制的均匀准直光束，被测相机置于双圆柱消光腔（环境保障系统）内且入瞳正对平行光束，探测器置于被测相机像面位置，锁相放大器通过对探测器输入信号和斩波器信号作卷积，完成对微弱目标信号的提取，通过多自由度转台调节被测相机姿态，在终端计算机上采集锁相放大器输出信号，经过软件计算最终得到 PST。

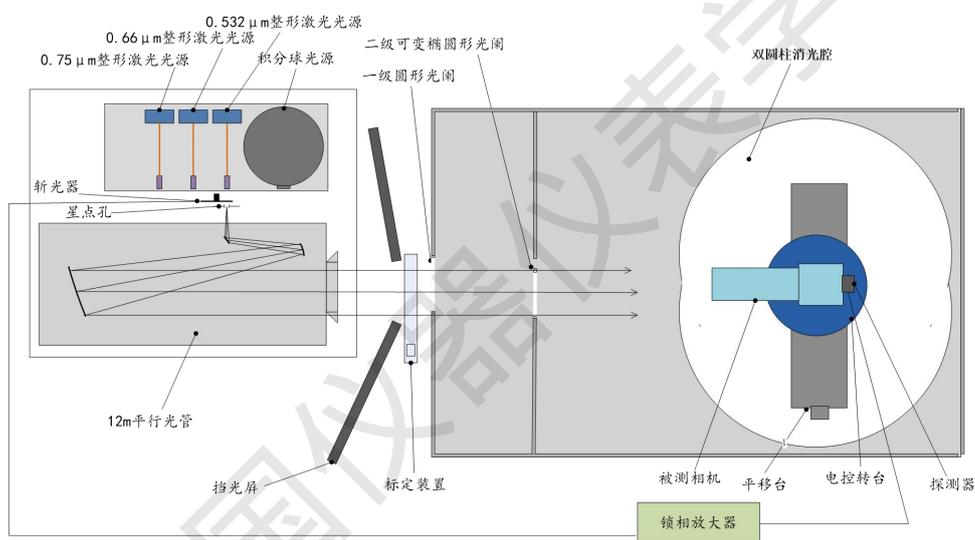


图 2.2-1 大口径高精度 PST 测试系统工作原理图

3 测试技术工程应用

基于本文所提出的杂散光测试技术，搭建了 $\Phi 800\text{mm}$ 离轴反射式杂散光系数测量设备及大口径高精度 PST 测试设备，如图 3-1 与 3-2 所示。所搭建测试设备已先后应用于“创新三号”、“风云卫星”、“921 工程”等国家在轨航天重大任务。

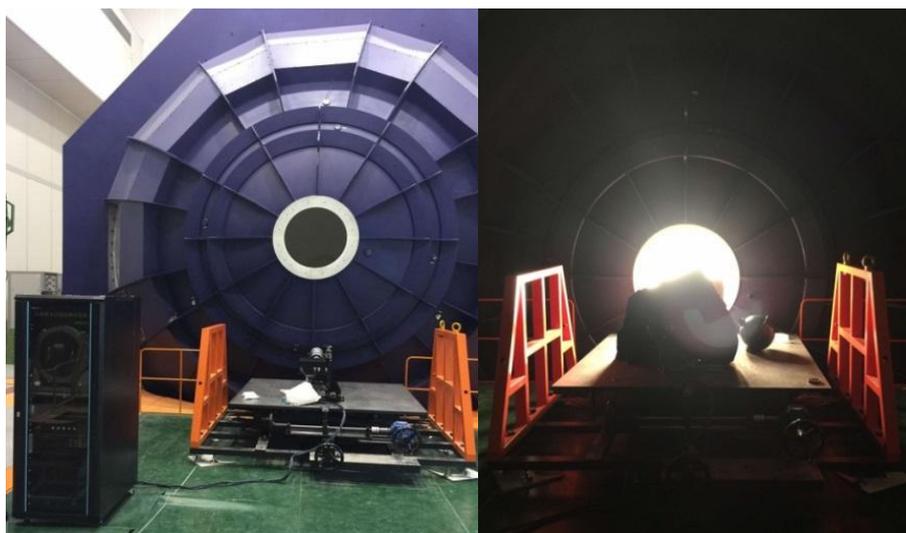


图 3-1 $\Phi 800\text{mm}$ 离轴反射式杂散光系数测量设备实物图

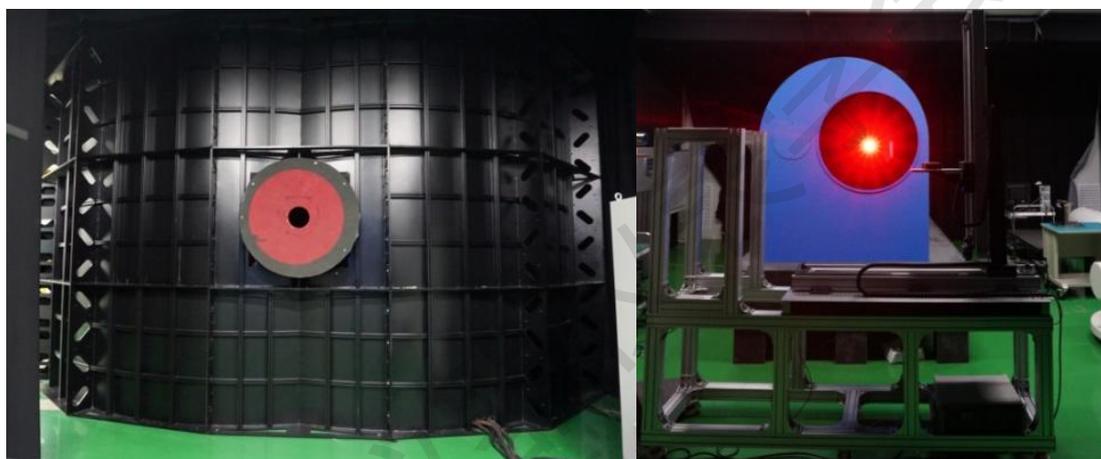


图 3-2 大口径高精度 PST 测试系统实物图

4 结论

针对长焦距、大口径光学系统杂散光系数无法测量的难题，发明了一种离轴反射式杂散光系数测量技术，可实现口径 $\geq\Phi 800\text{mm}$ 的光学系统的杂散光系数测量；针对 PST 无法测量的难题，建立了大口径高精度 PST 测试系统，基于杂散光精确建模仿真和高效环境杂散光抑制技术，在国内首次建立了双圆柱消光腔，可有效抑制空间强背景散射，使得 PST 测试系统测量范围达到 $10^{-3}\sim 10^{-10}$ ，测量精度优于 0.5。本文提出了改进型杂散光散射模型，并建立了航天航空用消光材料表面 BRDF 数据库，精确描述了光在粗糙材料表面的散射效应。

参考文献

- [1] Kemp J C, Wyatt C L 1977 Opt. Eng. 16 164412
- [2] Fleming J, Grochocki F, Finch T, Willis S, Kaptchen P 2008 Proc. SPIE 7069 706900

- [3] Peterson G L 2008 Proc. SPIE 7069 70690M
- [4] Liao S, Shen M Z 1996 J. Infra. Milli. Wave. 15 375 (in Chinese) [廖胜, 沈忙作 1996 红外与毫米波学报 15 375]
- [5] Wang Z L, Gong Z Q, Zhang W, Wang F G 2011 Opt. Tech. 37 401 (in Chinese) [王治乐, 龚仲强, 张伟, 王付刚 2011 光学技术 37 401]
- [6] Yuan Y, Sun C M, Zhang X B 2010 Acta Phys. Sin. 59 2097 (in Chinese) [袁艳, 孙成明, 张修宝 2010 物理学报 59 2097]
- [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] 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.