

doi:10.3788/gzxb20174610.1011003

空间光学遥感器在轨照明环境模拟系统设计

杜志强^{1,2}, 张黎明¹, 陈洪耀¹, 司孝龙¹, 徐伟伟¹, 刘辉^{1,2}, 黄文薪¹, 朱雪梅¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学, 合肥 230031)

摘 要:针对复杂空间环境下光学遥感器的成像性能模拟测试需求,设计了一种大动态辐照、高对比度的空间环境模拟系统,包括太阳模拟器和暗目标模拟器.根据空间太阳光及地表反射光的辐照特性,采用氙灯电流调节及增加多孔衰减屏法实现太阳模拟器的大范围辐照度可调.通过对材料表面进行散射特性分析,设计了具有光陷阱结构的暗目标模拟器,以模拟相机视场内的暗弱观测目标.实验结果表明:该系统可以出射光斑尺寸为 1 000 mm×1 000 mm,辐照度范围为 0.4~1 260 W/m²,辐照不均匀性可达±4.82%,暗目标模拟器的消光比可达 1×10⁻⁷.该装置解决了空间强干扰光背景下暗目标成像性能的定量化测试难题,为光学遥感器的成像性能检测提供了一个可靠的平台.

关键词:空间环境;太阳模拟器;暗目标模拟器;杂散光测试;消光比

中图分类号:O434

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)10-1011003-8

Design of Space Illumination Environment Simulation System for Optical Remote Sensors

DU Zhi-qiang^{1,2}, ZHANG Li-ming¹, CHEN Hong-yao¹, SI Xiao-long¹,
XU Wei-wei¹, LIU Hui^{1,2}, HUANG Wen-xin¹, ZHU Xue-mei¹

(1 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(2 University of Science and Technology of China, Hefei 310027, China)

Abstract: In order to test imaging performance of an optical remote sensor in complex space environment, a space environment simulation system with a wide range irradiation and high contrast is designed, including a solar simulator and a dark target simulator. According to the radiation characteristics of sunlight and earth reflection light, a wide range of solar simulation irradiance is achieved by adjusting xenon lamp current regulation and using attenuation chips. A dark target simulator is designed to simulate the weak observation target, based on the analysis of the scattering characteristics of the material and the design of the reasonable structure. The experimental results show that the irradiance range can reach 0.4~1 260 W/m² in the 1 000 mm×1 000 mm irradiation area, and the irradiation uniformity can reach ±4.82%. The extinction ratio of the dark target simulator can reach 1×10⁻⁷. The device can solve the problem of the quantitative test of imaging performance for the dark target in the space with strong background light, which provides a reliable platform for the performance test of remote sensor.

Key words: Space environment; Solar simulator; Dark target simulation; Stray light test; Extinction ratio

OCIS Codes: 110.4234; 230.1150; 220.4830; 120.4640; 290.5880

基金项目:中科院创新基金(No.CXJJ-17-M101)和国家自然科学基金青年基金(No.23003108B1716)资助

第一作者:杜志强(1989-),男,博士研究生,主要研究方向为光学系统设计及光辐射测量.Email:duzhiqiang666@qq.com

导师(通讯作者):张黎明(1958-),男,研究员,博导,主要研究方向为光学遥感器辐射定标与标准传递等.Email:lmzhang@aiofm.ac.cn

收稿日期:2017-04-17;录用日期:2017-06-15

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

0 引言

随着航天遥感技术的飞速发展,高性能光学遥感器在气象、环境、资源及宇宙探索等领域发挥着越来越重要的作用^[1].由于光学遥感器的早期设计大都建立在理想化设计参数基础上,实际工程中由于加工制造、材料属性及载荷与边界条件存在一些不确定因素,以及设计计算模型的简化和计算误差等使设计结果与实际光学遥感器的性能存在差距^[2].为此,在光学遥感器投入使用之前必须通过模拟环境试验进行实验室检测与定标,验证其光学性能以及复杂空间环境的适应性,以保障空间光学遥感器可靠性.

目前,国内外对于空间环境下光学遥感器成像性能的验证开展了广泛研究,针对不同类型的遥感器研制了相应的目标模拟装置,如星模拟器^[3]、场景模拟器^[4]、视景模拟器^[5]等.在空间光学遥感器对暗弱目标探测及量化遥感应应用中,极易受到来自太阳直射、地表反射光和地气辐射等视场外杂散光的干扰,其辐射强度常常比被测目标高出几个数量级,在特定轨道、姿态或时间的光照条件下可能经过卫星表面包裹材料或天线等结构散射进入光学系统内,使相机成像质量明显退化,甚至可能造成光学载荷严重饱和,从而丧失成像能力^[6].美国 GOES-I/M^[7]、欧盟 Meteosat-5/7 系列卫星上的成像仪^[8]在卫星本地时间的午夜,都会受到太阳直射的杂散光影响,前者曾因此而暂时关机;而我国 FY-2 卫星的 VISSR 通道,空间杂散光的干扰也限制了其量化的应用水平^[9].文献^[10]根据理论计算及计算机仿真研究杂散光辐射的具体空间分布和强度以及随时间变化的规律,通过对仪器自身设计特定的杂光抑制系统来消除杂光带来的影响,但并不能完全真实地反映卫星在轨状态下的复杂光照环境.目前,国内还没有针对光学遥感器进行系统级杂散光抑制能力验证的空间环境模拟设备,因此有必要深入研究空间光辐照环境模拟技术,以满足光学遥感器光学性能检测与辐射定标的试验需求^[10].

本文针对光学遥感器的成像性能检测提出了一种空间光辐照环境模拟系统,采用太阳模拟器实现大范围辐照度可调,并基于光陷阱结构设计了高消光比的暗目标模拟器,通过模拟光学遥感器在强光背景干扰下对暗弱目标成像的过程,实现光学遥感器对低照度目标成像性能的量化测试,完成空间光学遥感器的杂散光抑制性能的有效性评估,保证了光学载荷在轨运行期间的可靠性.

1 系统原理及构成

光学遥感器在轨运行期间通常会受到来自太阳、地表反射光等杂散光的干扰,而且不同成像条件下卫星关键表面受到的光照情况也不同,载荷视场内低照度目标的探测常会受高亮目标的串扰影响^[11].因此,空间环境场景模拟测试设备不仅需要模拟大面积、高亮度的空间太阳光辐照,同时还要实现暗弱目标的成像模拟.

为了尽可能真实地模拟在轨空间光辐照环境,本文设计了一种空间光照环境模拟系统,主要由太阳模拟系统和暗目标模拟器两部分组成,布局见图 1.采用大口径太阳模拟器模拟入射太阳光,并通过两片平面反射镜协同运动模拟不同俯仰及方位角度的照明,暗目标模拟器的旋转中心与测试平台的旋转中心重合,通过测试在不同照明角度下光学遥感器对暗目标模拟器成像时响应值的大小,进而评估空间照明下光学遥感器的杂散光抑制性能.

2 关键技术

2.1 太阳模拟系统

太阳模拟系统主要用于模拟可见光波段内的太阳直接辐射和地球表面的反照光,太阳模拟系统结构如

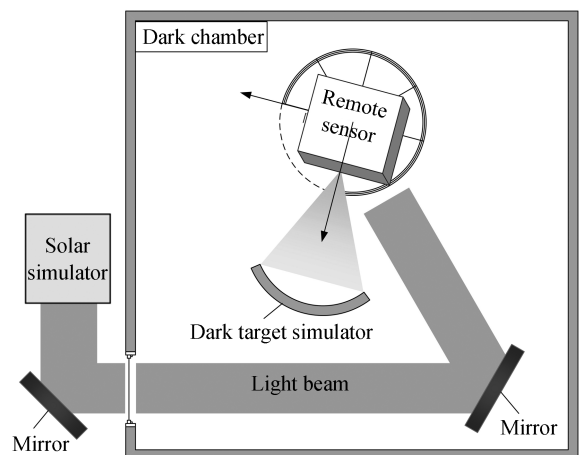


图 1 空间环境模拟系统

Fig.1 Layout of space environment simulation system

图 2 所示,主要包括灯室、光学积分器组件、投影系统(聚光镜、中继透镜和投影镜)及扫描系统(指向镜和扫描镜)等.灯室主要由氙灯光源及椭球形反光镜组成,氙灯光线经椭球反光镜的第一焦点后反射汇聚于第二焦点位置,获得较高的能量利用率.光学积分器组件将光源系统发出的光束分割和叠加形成一个均匀的空间分布,同时起到调整光斑形状的作用.投影系统则是将匀光系统的出射光投射到辐照面上,形成一定尺寸和发散角的照明光束,模拟空间太阳光辐照特征.最后,通过两片平面反射镜的姿态调整实现多角度照明,模拟在轨卫星的辐照状态.

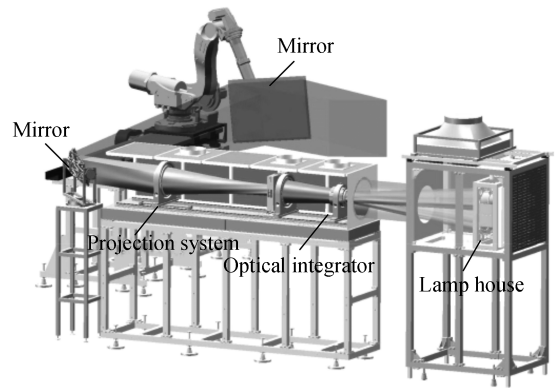


图 2 太阳模拟器结构

Fig.2 Structure of solar simulator

太阳光是影响空间光学仪器性能最大的背景杂散辐射源,遥感器在轨运行期间,卫星表面任意面源接受到太阳直射光能量的光谱照度为

$$E(\lambda) = E_{\text{sun}}(\lambda) \cos(\theta_1) \quad (1)$$

式中, $E_{\text{sun}}(\lambda)$ 为太阳到地球的光谱照度, θ_1 为太阳入射角.

大气和地表物质对太阳辐射光线的散射和反射也是一个不可忽略的辐射源,在可见光和近红外波段主要以地球表面的反射为主.根据地气光传递理论^[12],地表面元的表面散射特性按朗伯散射模型设置,则地表面元在光学遥感器入瞳处产生的辐照度可以表示为

$$E_{\text{earth}} = \iint_{0 < \alpha, \epsilon, \gamma < \frac{\pi}{2}} \frac{\sigma \cdot E_{\text{sun}} \cdot \cos \gamma \cdot \cos \alpha \cdot \cos \epsilon}{\pi h^2} dS \quad (2)$$

由式(2)可以看出,地表反射光对光学传感器的辐照度大小与地球大气和地表反射物等有关,在太阳对地表的辐射值 E_{sun} 一定的情况下,地表反射率 σ (即地球表观反射率)将会直接影响光学传感器入瞳处接收的辐照度.此外,随着飞行姿态及时间和空间的变化,光照角 γ 、出射角 ϵ 、离轴角 α 以及距离 h 的变化也是影响地球反射光的重要因素.由于飞行器、太阳、地球三者的关系比较复杂,难以给出明确规律.由典型轨道的工况分析可知,地表反射光到达系统入口的能量比太阳光的辐照度小 3 个数量级^[13].

根据空间光照特征的分析,太阳模拟器的出射辐照度要求实现 1.5 个太阳常数和低照度 0.001 个太阳常数的大范围可调.1 个太阳常数的辐照度 E_0 取为 $1\,366\text{ W/m}^2$,可见近红外(400~1 000 nm)波段内积分辐照度为 842 W/m^2 ,则太阳模拟器的 $1\,000\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm}$ 辐照面上该波段内的辐射通量 Φ' 的最大值为

$$\Phi' = 1.5 \cdot E_0 \cdot A_{\text{image}} \approx 1263(\text{W}) \quad (3)$$

光源的能量依次通过椭球聚光镜、光学积分器组件及投影系统的各个元件,总的传递效率为 $\eta \approx 0.16$,则光源的总光通量 Φ 为

$$\Phi = \Phi' / \eta \approx 7894(\text{W}) \quad (4)$$

短弧氙灯的光谱能量在可见光区域与大气层外太阳光谱能量分布接近,并且具有工作状态稳定、亮度高、发光效率高等优点,是模拟太阳光照的理想光源^[14].考虑到氙灯光源的工作寿命及使用环境等因素,选择 4 个功率为 7 kW 的短弧氙灯组合使用,其光电转换效率取 45%,可见近红外光谱能量占 71%,可以满足系统的总光通量的要求.同时采用调节氙灯工作电流的方法以及在增加多孔衰减屏的方法相结合来实现出射辐照度大范围变化.太阳模拟系统的主要技术指标如表 1.

表 1 主要技术指标

Table 1 Main technical index

Item	Parameter
Irradiance	0.001~1.5 solar constant
Illumination Area	1 000 mm×1 000 mm
Non-uniformity	<6.5%
Spectrum Range	400 nm~1 000 nm

太阳模拟系统不仅要求满足模拟辐照面积、辐照强度及辐照不均匀度等指标要求,同时要求模拟太阳光是动态的,其出射光的俯仰角或方位角可随时间变化,模拟太阳、地球与光学遥感器三者的空间位置变化所产生的不同角度照明.综合考虑太阳模拟器体积、安全和精密测量等因素,本文采用调整反射镜姿态来建立动态模拟太阳光照环境的方法,即太阳模拟器位置固定不变,放置在水平面上,通过调整两个平面镜(指向镜和扫描镜)的倾角和水平位移,来改变模拟太阳光照明方向.为了保证镜面的平整,指向镜和扫描镜均采用光学级浮法玻璃,玻璃表面平整光滑、厚度均匀、光学畸变小,镜面反射率 ≥ 0.85 .指向镜放置在一个二维旋转机构上,可以改变太阳模拟系统出射光束的方位角和俯仰角.扫描镜固定在六轴串联式机械臂上,通过程序控制六轴串联式机械臂和电动平移台底座来调整扫描镜的位置与姿态,将指向镜反射的光束进一步投射到测试表面,实现大角度范围的扫描照明.最终,太阳模拟系统通过指向镜的旋转机构、六轴串联式机械臂以及测试平台的水平一维转动的协调配合,可以实现俯仰方向扫描角度范围为 $-29^\circ \sim +42.5^\circ$,方位方向扫描角度范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$,有效地模拟了光学遥感器在轨状态下的大动态范围、多角度空间光辐照环境.

2.2 暗目标模拟器

暗目标模拟器的主要作用是在成像模拟测试中提供低照度的黑斑目标,通过对黑斑目标的成像可以验证相机不同象元的杂散光抑制能力.传统的“牛角消光器”的消光效率在 10^{-3} 左右,极大的制约了实验测试的精度,无法满足高性能相机的杂散光测试和成像仿真的要求.因此,本文从光辐射传递的原理出发,通过对材料表面的散射特性分析及光陷阱结构设计,实现了一种高消光比的暗目标模拟装置.

2.2.1 光辐射传递原理

在光辐射能量的传输路径上,单位辐射面元和接收面元两者之间的辐射通量关系为^[15]

$$d\varphi_c = L_s(\theta_0, \varphi_0) \cdot dA_s \cdot \frac{\cos(\theta_s) \cdot dA_c \cdot \cos(\theta_c)}{r_{sc}^2} \quad (5)$$

式中, $d\varphi_c$ 为传递到单位接受面的辐射能量; $L_s(\theta_0, \varphi_0)$ 为单位辐射面元的辐亮度; dA_s 和 dA_c 分别为单位辐射面元和接收面元; θ_s 和 θ_c 分别表示辐射面元和接收面元的法线与其中心连线的夹角; r_{sc} 为辐射面元和接收面元的中心距离.

对式(5)进行变换,可写成三个因子的乘积形式

$$d\varphi_c = f(\theta_{in}, \varphi_{in}, \theta_{re}, \varphi_{re}, \lambda) \cdot d\varphi_s(\theta_i, \varphi_i) \cdot \text{GCF}(\theta_s, \theta_c, r) \quad (6)$$

式中, $f(\theta_{in}, \varphi_{in}, \theta_{re}, \varphi_{re}, \lambda)$ 是反映表面散射特性的双向反射比分布函数(BRDF),它是表面反射辐亮度和入射辐照度的比值; $d\varphi_s(\theta_i, \varphi_i)$ 为辐射面元的辐射通量; $\text{GCF}(\theta_s, \theta_c, r)$ 为几何构成因子,是辐射面元对接收面元的投影立体角.

根据基本能量传输方程可以看出,接受表面所接收的辐射通量是表面BRDF和几何构成因子GCF和辐射面元发出的辐射通量这三个的乘积.

光陷阱的消光比可以表示为出射的光通量与入射角度 θ 的总光通量之比,即

$$V(\theta) = \frac{d\varphi_c}{d\varphi_s(\theta_i, \varphi_i)} = f(\theta_{in}, \varphi_{in}, \theta_{re}, \varphi_{re}, \lambda) \cdot \text{GCF}(\theta_s, \theta_c, r) \quad (7)$$

由式(7)可知,光陷阱的表面散射特性、各散射面的几何构成因子是决定目标模拟器的消光比的主要因素.因此,暗目标模拟器的设计围绕这两个方面展开,即降低各表面的BRDF散射特性或减小几何构成因子GCF.

2.2.2 材料的散射特性

材料的表面散射特性直接影响暗目标模拟器的消光效果.本文选用高吸收的黑色玻璃作为表面材料,该材料在全光谱吸收率较高,主要散射路径集中在较小的空间立体角内.对于表面光滑的材料,其表面粗糙度是影响散射率的主要因素.对于良好抛光的表面,在表面粗糙度 δ 远小于波长 λ 的条件下,洁净镜面上由表面粗糙度引起的半球空间内的散射量(TIS)可表示为^[16]

$$\text{TIS} = 1 - R_s/R_0 = 1 - \exp\{- (4\pi\cos\theta_i\delta/\lambda)^2\} \approx (4\pi\cos\theta_i\delta/\lambda)^2 \quad (8)$$

式中, R_s 是镜向反射率, R_0 是的总反射率, δ 为表面均方粗糙度, λ 为入射光的波长, θ_i 是入射角;

在 $\lambda = 550 \text{ nm}$ 波长的光垂直入射的情况下,选取粗糙度为 0.1 nm 到 20 nm 的区间分析,半球空间的散射量TIS和镜向反射量 R_s/R_0 的关系如图3.

由图 3 可见,材料表面的粗糙度越大,则全积分散射 TIS 值也越大,意味着镜向反射率越小;相反,材料表面越光滑,其 TIS 值越小,则镜向反射率越大.在光陷阱的设计中,在降低后向散射的同时,还需要对镜向的反射率进行吸收.选择消光黑布作为光吸收材料,在整个太阳光光谱范围内具有较低反射率和较好的朗伯性,其光学特性如图 4 和图 5,可见方向半球反射率小于 3%.

2.2.3 光学结构设计

由光辐射传递原理可知,减小几何构成因子 GCF 需要增大距离 r_{sc} 以及角度 θ_s 和 θ_c 或减小接受面元的面积 dA_c 距离.然而,由于实际测试空间的

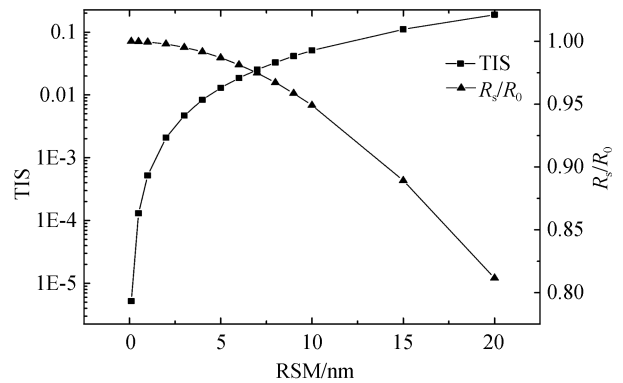


图 3 TIS 和 R_s/R_0 与不同表面粗糙度的关系

Fig.3 Parametric curves of TIS and R_s/R_0 versus different roughness

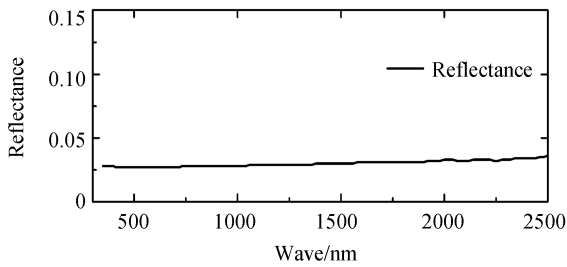


图 4 消光黑布的方向半球反射率

Fig.4 Directional Hemisphere Reflectance of black cloth

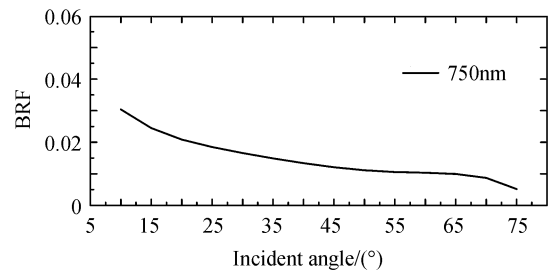


图 5 消光黑布材料的双向反射比因子

Fig.5 Bidirectional Reflectance Factor of black cloth

体积不可能过大,暗目标模拟器应对入射光线有较小的遮挡,因此,暗目标模拟器的结构设计主要考虑增加夹角 θ_s 和 θ_c 来减小几何构成因子.结构如图 6 所示,主要由黑色玻璃、消光光阑和外罩组成.光阑的主要作用是对外部入射的杂散光进行限制,使其不能直接散射进入载荷相机的视场内部;黑色玻璃则对相机视场内杂散光进行抑制.外罩的内壁粘贴高吸收率消光黑布材料,减少进入光学系统的散射光.

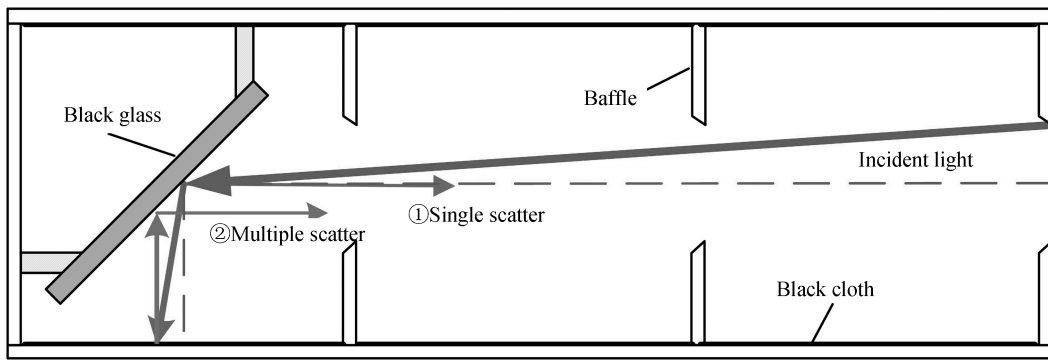


图 6 暗目标模拟器光学原理

Fig.6 Optical principle of dark target simulator

由图 6 可见,外场的杂散光主要由两种途径进入探测器视场内,因而,分别对各路径的消光比进行计算.

1) 单次散射

外场辐射直接射到黑色玻璃上,然后散射入光学系统的视场内.入射光辐亮度为 L_{in} ,入射光面积为 S ,开口距离黑色玻璃表面距离为 D ,则单次散射的消光比表示为

$$V_1 = \frac{L_{diff-out}}{L_{in}} = \frac{S}{D^2} \times f_{blackglass}(\theta_{in}, \varphi_{in}, \theta_{re}, \varphi_{re}, \lambda) \times \cos \theta_i \quad (9)$$

式中, $BRDF_{blackglass}$ 为黑色玻璃表面的双向反射分布函数.

2) 多次散射

外场辐射入射到黑玻璃,经过黑色玻璃的直接反射到消光器内壁发生散射,再由黑玻璃反射回光学系统

内部,则多次散射的消光比表示为

$$V_2 = \frac{L_{\text{multi-out}}}{L_{\text{in}}} = \frac{S}{D^2} \times \rho_{\text{blackglass-mirr}}^2 \times f_{\text{blackcloth}}(\theta_{\text{in}}, \varphi_{\text{in}}, \theta_{\text{re}}, \varphi_{\text{re}}, \lambda) \quad (10)$$

式中, $\rho_{\text{blackglass-mirr}}$ 为黑色玻璃的镜向反射率, $f_{\text{blackcloth}}(\theta_{\text{in}}, \varphi_{\text{in}}, \theta_{\text{re}}, \varphi_{\text{re}}, \lambda)$ 为消光黑布材料的双向反射分布函数;则暗目标模拟器的总消光比 V_{sum} 可以表示为

$$V_{\text{sum}} = V_1 + V_2 \quad (11)$$

暗目标模拟器的入口直径取 50 mm,长度 D 为 800 mm,黑色玻璃的表面经抛光处理后,其镜向反射率为 4%,后向散射率约为 10^{-5} .根据式(9)和式(10),单次散射后的消光比 $V_1 = 1.38 \times 10^{-8}$,多次散射后消光比 $V_2 = 4.69 \times 10^{-8}$,因此,暗目标模拟器的总消光比 V_{sum} 约为 6.07×10^{-8} .

3 系统性能检测与分析

采用辐照度计和大动态范围辐亮度对空间场景模拟系统的光学性能进行测试,测试项目主要有太阳模拟光源的辐照度、稳定性和辐照面均匀性及暗目标模拟器的消光特性,进一步验证环境模拟系统设计的正确性.

3.1 光照性能检测

采用安徽光学精密机械研究所的研制的大动态范围辐照度计,动态范围为 1.0×10^7 ,最小可测辐照度为 $4 \times 10^{-5} \text{ W/cm}^2$.

开启氙灯电源,待其稳定后,将辐照度计固定在垂直于入射光束方向放置的二维平移台上,使其在 $1200 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$ 辐照平面内分别沿水平方向(X 轴)和竖直方向(Y 轴)平移运动,划分为 24×24 个网格,扫描测试辐照面上的各网格的辐照度,如图 7.同时采用辐照度监视光源的输出光功率的变化.

在整个辐照面内,辐照度均匀分布的范围只是其中一部分,称为有效辐照面.在有效辐照面的整个范围内,辐照度随位置变化的最大相对偏差用辐照不均匀度表示,按式(12)计算^[17-18]

$$E = \pm \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} + E_{\text{min}}} \times 100\% \quad (12)$$

式中, E 为辐照不均匀度; E_{max} 为辐照面上的辐照度最大值; E_{min} 为辐照面上的辐照度最小值.

实验结果表明,该系统太阳模拟光源的有效光斑面积可达 $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$.当光源系统处于高辐照状态时,电源输出功率最大,计算得 $E_1 = 1260 \text{ W/m}^2$,此时辐照面不均匀度为 $\pm 4.82\%$;当光源系统处于低辐照状态时,电源输出功率最小,且在光源灯室中加入 2 片 10% 透过率的衰减片,此时辐照度为 $E_2 = 0.4 \text{ W/m}^2$,辐照面不均匀性为 $\pm 6.5\%$.

实验中,太阳模拟装置非均匀性测量结果的可靠性依赖于不确定性的评估,影响测量不确定度的因素包括:光源的稳定性、探测器的稳定性、探测器的非线性以及其他的因素,如表 2 所示.光源的稳定性是由同步监视光源的探测器的测量得到,在高辐照度状态下,光源的稳定性为 1.23%,在低辐照状态下,光源的不稳定性为 2.41%;根据探测器的实验室定标检测报告,探测器稳定性的不确定度为 0.5%;探测器非线性不确定度在高辐照状态下为 0.2%,低辐照状态下为 0.1%;考虑到环境的杂散光、系统的装调误差等其他因素,通过多次重复测量,其不确定度优于 0.5%.分析可知,在置信水平 95% ($k=2$) 的情况下,高辐照状态和低辐照状态辐照面不均匀性测量的合成不确定度分别为 1.43% 和 2.51%,太阳模拟系统在高辐照状态下辐照均匀性和测量精度都优于低辐照状态,其主要原因是由于调节降低氙灯工作电流时会使电弧发生抖动,大大降低了光源输出的稳定性.

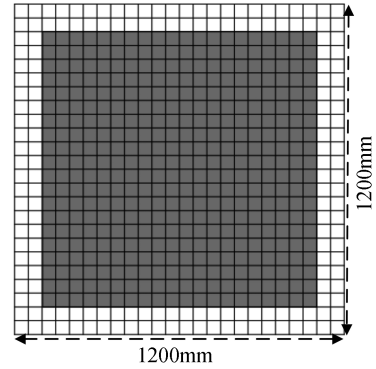


图 7 辐照不均匀度的测试示意图
Fig.7 Test of the irradiance non-uniformity

表 2 测量系统合成不确定度
Table 2 Combined uncertainty of measurement system

Sources	Uncertainty ($k=2$)/%	
	High-level irradiance	Low-level irradiance
Source stability	1.23	2.41
Detector stability	0.5	0.5
Detector nonlinearity	0.2	0.1
Other uncertainty	0.5	0.5
Combined uncertainty	1.43	2.51

3.2 暗目标模拟器检测

对光学传感器的光学成像性能进行模拟测试实验,暗目标模拟器的消光性能直接影响测试的精度.暗目标模拟器的消光比是指在测试角度下暗目标模拟器出射的等效辐亮度 L_{out} 与入射等效辐亮度 L_{in} 之比,由式(13)计算获得

$$V_e = (L_{out} - \Delta) / (L_{in} - \Delta) \quad (13)$$

式中, Δ 表示暗电流.

在实际测试过程中,将大动态范围辐亮度计正对暗目标模拟器放置,其视场范围被黑玻璃所覆盖,在测试照明角度下,可以直接测得暗目标模拟器的出射辐亮度.然而,由于暗目标模拟器的入射辐亮度无法直接测得,因此,在暗目标模拟器的入光口位置加入漫反射参考板,通过测量漫反射参考板的反射辐亮度来得到暗目标模拟器的入射辐亮度,进而可获得暗目标模拟装置的实际消光比,测量原理如图8.

调整太阳模拟器输出,使得太阳模拟器的输出辐照度为 1.5 个太阳常数,此时消光器的入射辐亮度

为 $4.01 \times 10^{-2} \text{ W/cm}^2/\text{Sr}$,测得的消光器出射平均辐亮度值为 $3.98 \times 10^{-9} \text{ W/cm}^2/\text{Sr}$,则消光比为 1×10^{-7} .由于实际测试过程中存在杂散光及镜面的颗粒污染等因素,使得实验测试结果比数值计算的略微偏大.

4 结论

空间杂光干扰是影响光学传感器在轨成像质量的重要因素之一.本文研究了一种高对比度的空间照明环境模拟系统,并对其主要的光学性能进行检测,辐照光斑有效尺寸为 $1\,000 \text{ mm} \times 1\,000 \text{ mm}$,最大辐照度达 $1\,260 \text{ W/m}^2$,最小辐照度达 0.4 W/m^2 ,辐照面不均匀度为 $\pm 4.82\%$,暗目标模拟器的消光比为 1×10^{-7} .该装置可以模拟大范围空间光照的变化及低照度成像目标,满足了光学传感器的成像性能验证测试,为我国空间环境模拟提供了新的思路和方法,对下一代高灵敏度光学传感器的光学性能检测验证和评估具有重要意义.

参考文献

- [1] HU Xiao-hua, LIU Song-tao, PAN Zhen-dong, *et al.* Progress in space borne shimmer detector and data application[J]. *Chinese Optics*, 2015, **8**(3): 350-359.
胡晓华,刘松涛,潘振东,等.星载微光探测仪器的发展及其数据应用[J]. *中国光学*, 2015, **8**(3):350-359.
- [2] LU E, YAN Chang-xiang, WU Qing-wen, *et al.* Research on adapt ability of optical remote sensors in mechanical and space thermal environments[J]. *Chinese Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(5): 365-376.
卢铿,颜昌翔,吴清文,等.空间光学传感器环境适应性设计与试验研究[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, **2**(5):365-376.
- [3] LI Xiao-ni, WU Cui-gang, ZHAO Xin, *et al.* The research of light source for star simulator with automatic calibration and adjustable spectrum[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(5): 173-178.
李晓妮,吴隼罡,赵昕,等.自动标定型光谱可调星模拟器光源系统[J]. *光子学报*, 2015, **44**(5):173-178.
- [4] ZHANG Kai, SUN Si-liang. Design of infrared dynamic scene target simulator system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(1): 12-16.

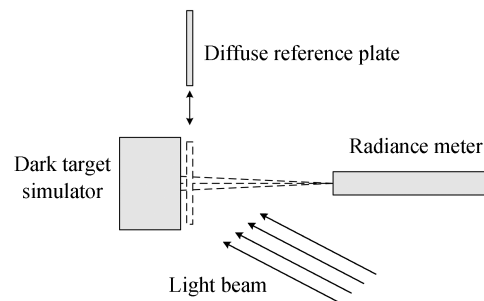


图 8 暗目标模拟器测试示意图
Fig.8 Test of dark target simulator

- 张凯, 孙嗣良. 红外动态场景目标模拟器系统设计[J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(1):12-16.
- [5] LU Hai-ping. Study on spatial target visual simulator technology[D]. Changchun: Changchun Institute of optics, Fine Mechanics and Physics, 2012: 1-2.
卢海平. 空间目标视景模拟技术的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012:1-2.
- [6] ZHAO Chun-hui, GONG De-zhu, LIU Lu, *et al.* Analysis on influence of space stray light on vision sensor for autonomous rendezvous and docking[J]. *Aerospace Control and Application*, 2016, **38**(3): 1-5.
赵春晖, 龚德铸, 刘鲁, 等. 空间杂光对交会对接光学成像传感器影响分析[J]. 空间控制技术与应用, 2016, **38**(3):1-5.
- [7] ELLROD G P, ACHUTUNI R V, DANIELS J M, *et al.* An assessment of GOES-8 imager data quality[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, **79**(1998): 2509-2526.
- [8] KOPKEN C. Solar stray light effects in meteosat radiances observed and quantified using operational data monitoring at ECMWF[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2010, **43**(43): 28-37.
- [9] YUAN Yu-kai. Stray light suppressing measure of optical system[J]. *Journal of Atmospheric and Environment Optics*, 2007, **2**(1): 6-10.
原育凯. 光学系统杂散光的消除方法[J]. 大气与环境光学学报, 2007, **2**(1):6-10.
- [10] MAZY E, STOCKMAN Y. Design and modelisation of a straylight facility for space optical instrument[C]. SPIE, 2012: 855007.
- [11] MA Xiao-shan, GUO Xiao-yong, MENG Xin, *et al.* Simulation and analysis of the adjacency effect in earth-imaging process of the optical remote sensing [J]. *Journal of Infrared Millim Waves*, 2015, **34**(2): 250-256.
马晓珊, 郭晓勇, 孟新, 等. 光学遥感对地成像过程中的邻近效应模拟分析[J]. 红外与毫米波学报, 2015, **34**(2):250-256.
- [12] YANG Yang, WANG Hong-li, LU Jing-hui, *et al.* Analysis of impact of earth and atmosphere radiation on star extraction accuracy of the star sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(4): 9-14.
杨阳, 王宏力, 陆敬辉, 等. 地气光对星敏传感器星提取精度影响分析[J]. 光电工程, 2016, **43**(4):9-14.
- [13] LI Qiang, HONG Tao, LIN Le-tian, *et al.* Earth albedo coefficient estimation for dawn-dusk orbit satellite[J]. *Journal of Astronautics*, 2016, **37**(1): 69-73.
李强, 洪涛, 林乐天, 等. 一种晨昏轨道卫星地球反照系数估计方法[J]. 宇航学报, 2016, **37**(1):69-73.
- [14] LI Qian, WANG Cheng, ZHA Jun, *et al.* Spectral characteristic of short-arc xenon lamp and application in solar simulators[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(6): 1447-1450.
李倩, 王城, 查俊等. 短弧氙灯光谱特性及其在太阳模拟器中应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, **32**(6):1447-1450.
- [15] CAO Zhi-rui, FU Yue-gang. Research on high performance light trap technology for PST test[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(1): 1-7.
曹智睿, 付跃刚. 点源透射比测试的高性能光陷阱技术研究[J]. 红外与激光工程, 2017, **46**(1):1-7.
- [16] HARVEY J E, SCHRÖDER S, CHOI N, *et al.* Total integrated scatter from surfaces with arbitrary roughness, correlation widths, and incident angles[J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(1): 013402-1.
- [17] GAO Yue, ZHANG Guo-yu, ZHENG Ru, *et al.* Solar simulator irradiation uniformity based on optical integrator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0623003.
高越, 张国玉, 郑茹, 等. 光学积分器对太阳模拟器辐照均匀性的影响[J]. 光学学报, 2012, **32**(6):0623003.
- [18] YANG Dong-jun, FANG Wei, YE Xin, *et al.* Program-controlled sun-tracking precision of spaceborne solar irradiance monitor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(7): 1813-1821.
杨东军, 方伟, 叶新, 等. 星载太阳辐射监测仪的太阳程控跟踪精度[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(7): 1813-1821.