

光学遥感卫星杂散光扫描测试系统

李俊麟¹, 张黎明¹, 司孝龙¹, 黄文薪¹, 杜志强¹, 徐伟伟¹, 王戟翔¹, 许永平¹, 杨宝云¹, 朱雪梅¹
汪少林², 马文佳², 杨春燕², 李 阳²

- (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, 安徽 合肥 230031;
2. 上海卫星工程研究所, 上海 200240)

摘要: 为了实际测量、验证光学遥感卫星的杂散光抑制能力, 分析某些特殊卫星的成像轨道和时间特点, 研制了一套基于 7 维大型机器人的光学遥感卫星杂散光扫描测试系统。根据卫星全年太阳照明几何条件, 通过建立的光束扫描子系统各机构的控制方程构建照明光束的扫描位置、方位角 ($-90^\circ \sim +90^\circ$) 和俯仰角 ($-29^\circ \sim +42.5^\circ$), 精度分别达到 10 mm、 0.2° 和 0.1° 。消光子系统采用反射率低于 1.5% (400~1 600 nm) 的材料和大消光比结构, 极黑目标模拟器消光比可达 9.9×10^{-7} 。研制的光学遥感卫星杂散光扫描测试系统能够满足目前大部分光学遥感相机的杂散光测试、分析和验证要求。

关键词: 杂散光; 光学相机; 太阳模拟器; 机器人; 暗室

中图分类号: TN125 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0913001

Scanning measuring system of stray light for optical remote sensing satellite

Li Junlin¹, Zhang Liming¹, Si Xiaolong¹, Huang Wenxin¹, Du Zhiqiang¹, Xu Weiwei¹, Wang Jixiang¹,
Xu Yongping¹, Yang Baoyun¹, Zhu Xuemei¹, Wang Shaolin², Ma Wenjia², Yang Chunyan², Li Yang²

- (1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Shanghai Satellite Engineering Research Institute, Shanghai 200240, China)

Abstract: For measuring the stray light level and verifying the ability of stray light suppression of optical remote satellite, the imaging time and orbital characteristic of some satellite were analyzed, a scanning system of stray light measuring for optical remote satellite was developed, which was based on a large 7-dimension robot. According to the annual lighting condition of satellite in orbit, the controlling formulae were deduced for all the kinematic mechanism, with the scanning azimuth angle $-90^\circ \sim +90^\circ$, pitch angle $-29^\circ \sim +42.5^\circ$, and their angular accuracy were up to 0.2° and 0.1° separately, the position accuracy was better than 10 mm. Otherwise, an extinction subsystem, which was made was low reflectance material (lower than 1.5% between 400~1 600 nm) and large extinction structure and extinction

收稿日期: 2017-01-05; 修订日期: 2017-02-03

基金项目: 中国科学院重点实验室基金 (CXJJ-16S007)

作者简介: 李俊麟 (1985-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事遥感相机辐射和几何综合定标方面的研究。

Email: lijunlin628@foxmail.com

coefficient could reach 9.9×10^{-7} , was used to simulate extreme dark target and deep space room. The scanning system of stray light measuring for optical remote satellite can satisfy most optical payload at present for stray light measurement, analysis and verification.

Key words: stray light; optical camera; solar simulator; robot; dark room

0 引言

杂散光指到达光学系统像面上的非成像光线^[1-2],引起像面的对比度和调制传递函数下降,使整个像面的层次减少、清晰度变坏、能量分布混乱甚至湮没目标信号^[3-4]。随着航天遥感技术的快速发展,对地观测相机多样化发展,特别是微光相机、晨昏轨道相机等高灵敏度相机的涌现,杂散光的影响更为显著。遥感相机与卫星平台互联整体在轨运行,对遥感相机在轨受太阳杂散光的分析、测量不能脱离卫星平台。为此,国内外广泛开展了空间环境模拟器的研究和建设,例如太阳模拟器等^[5-10]。

为了分析遥感相机整星在轨全年的杂散光情况,文中综合考虑光学遥感卫星和太阳模拟器体积、安全和精密测量等,采用太阳模拟器固定照明,以 2 维光束指向镜、7 维机器人光束扫描、1 维卫星简单转动的光束扫描系统,模拟卫星在轨全年的被照情况。与此同时,结合极黑目标模拟器和太空模拟暗室对光学遥感卫星进行相机装星条件下,模拟相机在轨运行的被照情况,分析、验证、优化相机不同照明条件的杂散光抑制能力,预估光学遥感卫星全年的成像轨道和时间特点。

1 杂散光测试系统设计

1.1 运动设计

卫星在轨运行期间太阳照明几何条件按年周期变化,为了分析光学遥感卫星全年的杂散光情况,必须使卫星与照明光束之间的相对几何关系与在轨情况一致。考虑到卫星复杂运动危险性、强电设备运动的安全隐患,结合参考文献[11-12]使用机器人辅助光学测量的成功案例,使卫星仅进行 1 维简单水平转动,采用 2 维转动指向镜折反、7 维机器人夹持扫描镜扫描,共 10 维运动机构构成光束扫描子系统,扫描太阳模拟器光束,仿真太阳光斑在卫星上的移动,并改变光束的照明方位角和俯仰角。

为了模拟、分析、验证光学遥感卫星受杂散光的影响情况,研制了由极黑模拟目标和太空模拟暗室组成的消光子系统。极黑模拟目标和太空模拟暗室采用低反射率材料、大消光比结构实现消光。光学相机杂散光测试过程中光束扫描子系统扫描太阳模拟器光束,相机对极黑目标成像,而太空模拟暗室则最大程度减弱环境对杂散光测量的影响。光学遥感卫星杂散光测试系统的组成如图 1 所示。

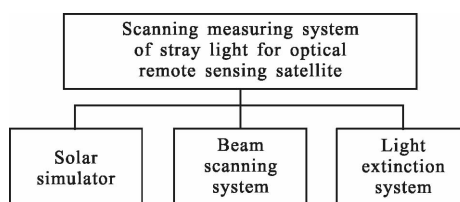


图 1 光学遥感卫星杂散光扫描测试系统组成

Fig.1 Scanning measuring system of stray light for optical remote sensing satellite

1.2 太阳模拟器

太阳模拟器主要由氙灯光源、椭球聚光镜、辅镜(消色差)、匀光积分器(场镜和投影镜,元素镜为方形)、可调光阑、准直镜,以及辅助散热和装调等机构组成,如图 2 所示。

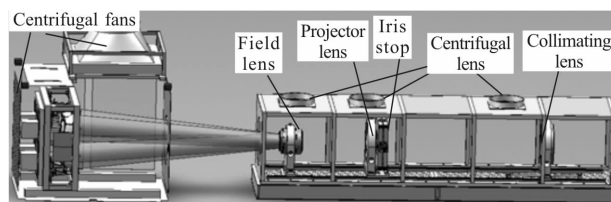


图 2 氙灯太阳模拟器

Fig.2 Xenon lamp solar simulator

光束经过多个透镜的衰减,光源利用率较低。为了确保卫星被照明处的太阳照度和均匀性,太阳模拟器光源采用了 4 只 7kW 短弧氙灯方阵排布、水平点燃的照明方式。由于各透镜存在高热损坏的风险,氙灯深椭球聚光镜进行镀红外透射膜的处理,反射可见近红外光,保护太阳模拟器元、组件,提高使用寿命。太阳模拟器的主要性能指标如表 1 所示。

表 1 太阳模拟器主要性能指标

Tab.1 Main performance indexes of solar simulator

#	Items	Parameters
1	Exposure area	1 050 mm×1 050 mm
2	Spot size	100-1 400 mm
3	Irradiance	1-3 solar constant
4	Collimating angle	±3.2°
5	Non-uniformity	6.06%
6	Non-stability	2.41%/h
7	Spectrum	400-1 000 nm

氙灯和深椭球反射镜分别设计了可调绝缘基座、辅镜、匀光积分器、准直镜等元件,设计了专门的安装导轨和位姿微调机构,容易进行氙灯离焦和匀光积分器、准直镜位姿调节,使氙灯太阳模拟器具有较高的性能。

1.3 消光设计

光学遥感卫星特别是高灵敏度光学遥感卫星对光十分敏感,而杂散光主要有直接反射、二次反射和耦合反射等 3 种形式。通过研制反射率低于 1.5% 的消光材料(反射率如图 3 所示),太空模拟暗室全空间布设这种材料,极黑目标模拟器采用布设该材料的消光结构,最终极黑目标模拟器消光比可达到 10^7 。

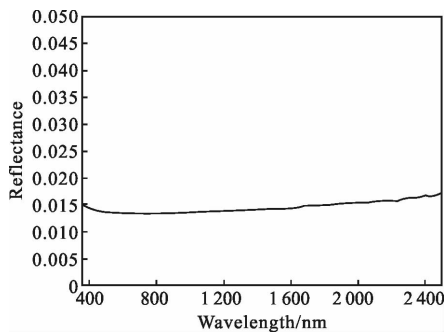


图 3 消光材料反射率

Fig.3 Reflectance of extinction material

经过太空模拟暗室和极黑目标消光,极大地减弱了光学遥感卫星杂散光测试环境中的杂散光,测量结果能够可靠地评价光学遥感卫星全年的杂散光情况,预测在轨成像特点。

1.4 控制方程

光学遥感卫星光束扫描子系统采用 2 维指向镜折反、7 维机器人夹持扫描镜扫描和卫星 1 维简单转动的光束扫描方式。10 维运动机构超出了模拟卫星照明几何条件需要的运动维数,通过对 7 维机器

人扫描中心的平面约束来保证运动控制的唯一性。建立图 4 所示的坐标系联系光束扫描相关的设备和运动机构。

图 4 中未画出的 y 、 z 轴由右手定则确定,所有坐标系的原点均位于机器人 J2 轴所在高度的水平面内,也是太阳模拟器主光轴所在的水平面。由于相机都是通过卫星对地面进行观测,所以模拟光束只需模拟对地面的全年被照情况即可。

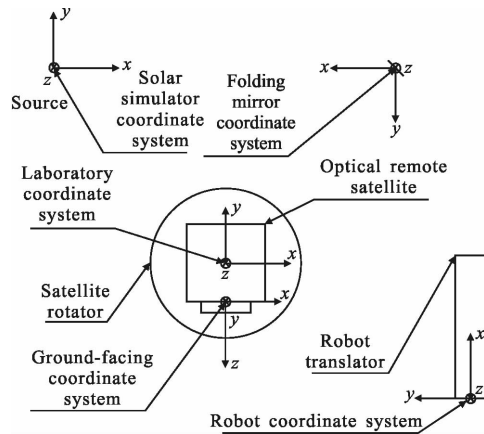


图 4 光学遥感卫星杂散光扫描测试坐标系

Fig.4 Coordinate system of stray light scanning measuring for optical remote sensing satellite

由于设计、加工、安装等方面的原因,各个设备、机构坐标系之间坐标轴严格地垂直或平行关系不复存在。为了准确模拟卫星在轨全年的被照情况,必须精确测量各坐标系之间的关系,修正位姿误差。

某被测卫星对地面与卫星转动半径不垂直,同时与竖直面不平行,如图 5 所示(其中 η 表示对地面与转动半径垂直的弦的夹角, ε 表示对地面与竖直面的夹角)。照明光束的方位、俯仰角都是基于对地面,而卫星转动是基于竖直转轴,所以需要校正对地面,通过统一的基准实验室坐标系描述扫描光束。

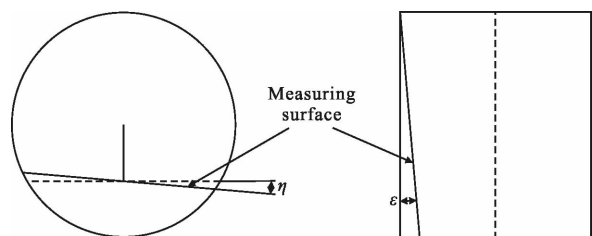


图 5 非理想被测面

Fig.5 Non-ideal measuring surface

基于对地面坐标系扫描中心为 (x_{sc}, y_{sc}, z_{sc}) , 方位、俯仰角为 (φ, θ) 的扫描光束, 光束单位矢量表示如公式(1)所示。

$$r_m = -(\cos\theta\cos\varphi, \cos\theta\sin\varphi, \sin\theta)^T \quad (1)$$

规定卫星的 1 维简单转动辅助构建太阳模拟器扫描光束的方位角, 其控制方程写为公式(2)。

$$\delta = \varphi \quad (2) \quad \text{其中,}$$

$$\begin{cases} a = (\cos\delta\sin\eta - \sin\delta\cos\epsilon\cos\eta)\sin\theta - (\cos\delta\cos\eta + \sin\delta\cos\epsilon\sin\eta)\cos\theta\cos\varphi - \sin\delta\sin\epsilon\cos\theta\sin\varphi \\ b = (\sin\delta\sin\eta + \cos\delta\cos\epsilon\cos\eta)\sin\theta - (\sin\delta\cos\eta - \cos\delta\cos\epsilon\sin\eta)\cos\theta\cos\varphi + \cos\delta\sin\epsilon\cos\theta\sin\varphi \\ c = \sin\epsilon\sin\eta\cos\theta\cos\varphi - \cos\epsilon\cos\theta\sin\varphi - \sin\epsilon\cos\eta\sin\theta \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(\cos\delta\cos\eta + \sin\delta\cos\epsilon\sin\eta) + y\sin\delta\sin\epsilon - z(\cos\delta\sin\eta - \sin\delta\cos\epsilon\cos\eta) \\ x(\sin\delta\cos\eta - \cos\delta\cos\epsilon\sin\eta) - y\cos\delta\sin\epsilon - z(\sin\delta\sin\eta + \cos\delta\cos\epsilon\cos\eta) \\ -x\sin\epsilon\sin\eta + y\cos\epsilon + z\sin\epsilon\cos\eta \end{bmatrix} - \frac{w}{2} \begin{bmatrix} \cos\delta\sin\eta - \sin\delta\cos\epsilon\cos\eta \\ \sin\delta\sin\eta + \cos\delta\cos\epsilon\cos\eta \\ \sin\epsilon\cos\eta \end{bmatrix} + \frac{h}{2} \begin{bmatrix} \sin\delta\sin\epsilon \\ -\cos\delta\sin\epsilon \\ \cos\epsilon - 1 \end{bmatrix}$$

令 2 维指向镜转动中心为 (x_{fm}, y_{fm}, z_{fm}) , 则指向镜 2 维转动控制方程表示为:

$$\begin{cases} \alpha_{fm} = a \tan\left(\frac{b_{fm}}{a_{fm}}\right) \\ \beta_{fm} = a \sin(-c_{fm}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: α_{fm} 和 β_{fm} 表示 2 维指向镜的控制角度, $N_{fm} = (a_{fm}, b_{fm}, c_{fm})$ 表示指向镜法向单位向量, 通过归一化三角关系公式(5)获得。

$$N_{fm} = \text{Norm}(R_{fm} - I_{fm}) \quad (5)$$

式中: $I_{fm}, R_{fm} = (x_{sm} - x_{fm}, y_{sm} - y_{fm}, z_{sm} - z_{fm})$ 分别表示指向镜入射、反射光线矢量。同理, 扫描镜的单位法向量 N_{sm} 由公式(6)求得。

$$N_{sm} = \text{Norm}(R_{sm} - I_{sm}) \quad (6)$$

式中: $I_{sm} = R_{fm}, R_{sm} = (x_{sc} - x_{sm}, y_{sc} - y_{sm}, z_{sc} - z_{sm})$ 表示扫描镜的入射、反射光线矢量。令 $a(a_x, a_y, a_z) = N_{sm}$ 为扫描镜镜面坐标系的 z 轴, 并设其 x 轴始终处于水平面内, 由右手定则确定扫描镜坐标系 y 轴。

综上, 通过 2 维指向镜、7 维扫描镜和 1 维卫星的控制方程即可将太阳模拟器的光束扫描照射至卫星对地面, 模拟卫星全年的被照情况, 结合太空模拟暗室和极黑模拟目标对卫星全年的杂散光情况进行测量、分析, 扫描测试情况如图 6 所示。

实验室坐标系下对地面上的扫描点和光束矢量随着卫星的转动而转动, 设 7 维扫描镜的扫描中心位于 $x=l$ 上, 修正非理想被测面, 则 7 维机器人实验室坐标系下的位置控制方程可写为:

$$\begin{cases} x_{sm} = l \\ y_{sm} = b(l - x_0)/a + y_0 \\ z_{sm} = c(l - x_0)/a + z_0 \end{cases} \quad (3)$$

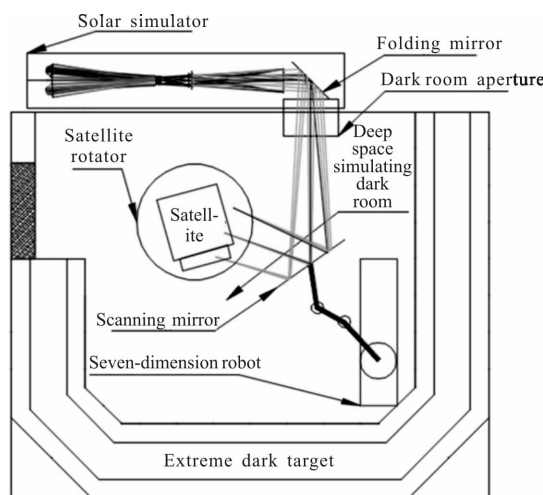


图 6 光学遥感卫星杂散光测试示意图

Fig.6 Sketch of stray light measuring of optical remote sensing satellite

2 系统性能测试

2.1 扫描角精度

光学遥感卫星杂散光测试系统的一个重要特点在于可以在地面模拟卫星全年的被(太阳)照明情况。因此, 其扫描角度范围和角精度是十分关键的。

为了检测太阳模拟器光束扫描系统的角精度,在太阳模拟器投影镜中心处设置了×形标志,在卫星测试位置安置了一台精度 5"的全站仪,使太阳模拟器光束按设定方位俯仰角进行扫描,通过全站仪观测×的像,观测光束的实际方位俯仰角。目标值和观测结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 俯仰角观测结果

Tab.2 Measuring results of pitch angle

#	True value	Measured value	Error
1	-17.5	-17.596	0.096
2	-12.5	-12.419	-0.081
3	-7.5	-7.539	0.039
4	-2.5	-2.503	0.003
5	7.5	7.55	-0.05
6	12.5	12.551	-0.051
7	17.5	17.435	0.065
8	22.5	22.431	0.069
9	27.5	27.422	0.078
10	32.5	32.398	0.102

表 3 方位角测试结果

Tab.3 Measuring results of azimuth angle

#	True value	Measured value	Error
1	-90	-89.809	-0.191
2	-75	-74.829	-0.171
3	-60	-59.888	-0.112
4	-45	-44.83	-0.17
5	-30	-29.88	-0.12
6	-15	-14.906	-0.094
7	15	14.911	0.089
8	30	30.161	-0.161
9	45	44.838	0.162
10	60	60.208	-0.208
11	75	75.174	-0.174
12	90	90.208	-0.208

从表 2 和表 3 的结果看出,方位角和俯仰角扫描精度分别可达到 0.2°和 0.1°。通过对光学遥感卫星杂散光测试系统光束扫描子系统极限扫描角度的测试,方位角扫描范围为-90°~+90°,俯仰角扫描范围为-29°~+42.5°,可对 W1 700(可更大)×H2 700 mm 表面进行扫描。此外,使用细光束激光进行扫描位置确认时发现存在<10 mm 的固定偏差。

2.2 极黑模拟目标消光比测试

光学遥感卫星杂散光测试过程中相机对极黑模

拟目标成像,所以极黑目标的消光比对于杂散光测试结果的有效性至关重要。在卫星测试位置安置一台低照度大动态范围辐射计对卫星对地面和极黑目标进行照度测量,测量结果转换为辐亮度值,使用公式(7)计算消光比。

$$\xi = \frac{L_{xsg} - \Delta_{xsg}}{L_{dgm} - \Delta_{dgm}} \quad (7)$$

式中:Δ 表示暗电流。测试过程,调整太阳模拟器输出,使卫星对地面处辐照度为 1.5 个太阳常数,此时测得的消光器辐亮度值为 $3.98 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{Sr})$,消光比为 9.9×10^{-7} 。

2.3 讨论

光学遥感卫星光束扫描子系统的扫描角度和位置精度一方面受扫描机构自身的精度影响,另一方面受实验室坐标系、扫描镜坐标系和折反镜坐标系之间位置、姿态关系测量精度的影响。由于使用的扫描执行机构都具有较高的位姿精度,因此,太阳模拟器扫描角度和位置误差主要是由于各机构坐标系之间关系参数量测误差引起。

极黑模拟目标 9.9×10^{-7} 的消光比,可以满足目前大部分光学遥感卫星的杂散光测量。测试过程中太空模拟暗室和极黑模拟目标受卫星表面反射较强光,以及指向镜、扫描镜等直接散射光等的影响。所以,通过提高指向镜和扫描镜的光洁度、降低光圈,以及降低太空模拟暗室的反射率可以进一步提高极黑目标的消光比。

3 结论

光学遥感卫星杂散光扫描测试系统约 18 m×15 m×8 m,采用 1 050×1 050 mm 光斑的太阳模拟器,结合基于 7 维大型机器人的光束扫描子系统模拟光学遥感卫星在轨全年的光照条件,可对 W1 700 mm×H2 700 mm 的卫星对地面进行扫描,方位角-90°~+90°,俯仰角-29°~+42.5°,扫描角精度分别为 0.2°和 0.1°,位置精度优于 10 mm。此外,通过采用反射率低于 1.5%(400~1 600 nm) 的消光材料和消光结构,光学相机极黑目标的消光比可达 9.9×10^{-7} ,能够满足目前大部分光学遥感相机的杂散光测试、分析和验证要求。

参考文献:

[1] Tim Johnson. Stray light, scatter, and black coatings [C]//

- OPTI 521-Optomechanical Engineering, 2012: 11.
- [2] Mark A Goforth. General algorithm for stray light measurements of remote sensing imagery [C]//SPIE, 2006, 6291: 6291B.
- [3] Du Shusong, Wang Yongmei, Du Guojun. Stray light analysis of Fabry-Perot interference imaging spectrometer [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(2): 246-251. (in Chinese)
杜述松, 王咏梅, 杜国军. 干涉成像仪的杂散光分析[J]. *应用光学*, 2009, 30(2): 246-251.
- [4] Yuan Yukai. Stray light suppressing measure of optical system [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(1): 6-10. (in Chinese)
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.
- [5] Eddy R. Design and construction of JPL SSL5B solar simulator [R]. US: JPL Internal Document, 1968.
- [6] Brinkman P W. Main characteristics of the large space simulator (lss) at ESA/ESTEC, LLS (II) [C]//13th SSC, 1984: 19840026401.
- [7] Huang Bencheng, Pang Hewei, Zang Youzhu. The conception and the development of KM6 solar simulator [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2003, 20(1): 1-4. (in Chinese)
黄本诚, 庞贺伟, 藏友竹. KM6 太阳模拟器的研制方案与进展[J]. *航天器环境工程*, 2003, 20(1): 1-4.
- [8] Huang Bencheng. Space environment test facility for manned spacecraft[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2002, 3: 1-6. (in Chinese)
黄本诚. KM6 载人航天器空间环境实验设备[J]. *中国空间科学技术*, 2002, 3: 1-6.
- [9] Zhang Rong, Li Hongsong, Xiang Yanhong. Development of KFTA solar simulator [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2009, 26(6): 548-554. (in Chinese)
张容, 李弘松, 向艳红. KFTA 太阳模拟器研制[J]. *航天器环境工程*, 2009, 26(6): 548-554.
- [10] Yang Linhua, Fan Ning, Shi Ruiliang. Adjustment method for collimating mirror of KM6 solar simulator [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2005, 22(6): 342-346. (in Chinese)
杨林华, 范宁, 史瑞良. KM6 太阳模拟器拼接式准直镜的装校技术[J]. *航天器环境工程*, 2005, 22(6): 342-346.
- [11] Li Junlin, Zhang Liming, Si Xiaolong. BRDF device based on six-axis robot [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(11): 2983-2989. (in Chinese)
李俊麟, 张黎明, 司孝龙. 基于六轴串联机械手的双向反射分布函数测量装置 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(11): 2983-2989.
- [12] Li Junlin, Zhang Liming, Si Xiaolong. Development of BRDF absolute measuring device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0528002. (in Chinese)
李俊麟, 张黎明, 司孝龙. 双向反射分布函数绝对测量装置研制[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0528002.