

文章编号 1004-924X(2017)02-0358-09

扫描式氙灯太阳模拟器十维扫描系统

李俊麟^{1,2*}, 张黎明^{1,2}, 司孝龙^{1,2}, 李鑫^{1,2}, 刘辉^{1,2}, 王戟翔^{1,2}, 施家定^{1,2},
陈洪耀^{1,2}, 朱雪梅^{1,2}, 韩慧达^{1,2}, 汪少林³, 马文佳³, 杨春燕³, 李阳³

- (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. 中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽合肥 230031;
3. 上海卫星工程研究所, 上海 200240)

摘要:为了模拟卫星在轨全年的太阳辐照情况, 检验、优化整星的杂散光抑制能力, 分析了光学载荷的在轨成像条件, 设计了一种基于 7 维扫描镜+2 维折反镜+1 维被测样件共计 10 维运动机构的扫描式氙灯太阳模拟器, 并建立了它们关于照明姿态和位置的控制方程, 完成了被测样件的空间环境模拟照明。实验表明, 对 1 700 mm×2 700 mm 的被测样件可实现方位角为 $-90^{\circ}\sim+90^{\circ}$ 、俯仰角为 $-29^{\circ}\sim+42.5^{\circ}$ 的模拟照明, 角精度分别可达 0.2°和 0.1°, 位置精度优于 10 mm。该扫描式太阳模拟器可较精确地为部分卫星提供全年太阳照明空间环境模拟实验。

关键词:扫描太阳模拟器; 杂散光测试; 氙灯; 扫描系统

中图分类号: TH703 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20172402.0358

Ten-dimensional scanning system of scanning xenon lamp solar simulator

LI Jun-lin^{1,2*}, ZHANG Li-ming^{1,2}, SI Xiao-long^{1,2}, LI Xin^{1,2}, LIU Hui^{1,2},
WANG Ji-xiang^{1,2}, SI Jia-ding^{1,2}, CHEN Hong-yao^{1,2}, ZHU Xue-mei^{1,2},
HAN Hui-da^{1,2}, WANG Shao-lin³, MA Wen-jia³, YANG Chun-yan³, LI Yang³

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

* Corresponding author, E-mail: lijunlin@aiofm.ac.cn

Abstract: In order to simulate the annual solar irradiation of a satellite in orbit, thus verifying and optimizing the ability of entire satellite to stray light suppression, the paper analyzes on-orbit imaging condition of optical payload and designs a scanning xenon lamp solar simulator, which has a ten dimensional scanning system including 7-dimension scanning mirror and 2-dimension folding mirror and 1-dimension sample. The controlling formula of all the mechanisms in terms of attitude and location are deduced. Then the simulation of irradiation in space environment is completed. The results show

收稿日期: 2016-09-22; 修订日期: 2016-11-14.

基金项目: 中国科学院重点实验室基金资助项目 (No. CXJJ-16S007)

that the solar simulator scans an area of $1\ 700\ \text{mm} \times 2\ 700\ \text{mm}$ with the azimuth angle from -90° to $+90^\circ$ and the pitch angle from -29° to 42.5° . Their angular accuracies are up to 0.2° and 0.1° separately, and the position accuracy is better than $10\ \text{mm}$. Thus the scanning solar simulator can be applied to the accurate simulation of year-round solar irradiation condition for some satellite in orbit.

Key words: scanning solar simulator; stray light measurement; xenon lamp; scanning system

1 引言

自 20 世纪 60 年代美国 JPL 率先开展太阳模拟器研究以来^[1-2],经过半个多世纪的蓬勃发展,太阳模拟器的应用已由最初的空间飞行器环境模拟实验发展到航天、太阳能、材料、医疗等多种领域^[3]。随着科学技术的进步以及应用领域的扩展,太阳模拟器的光学结构和实现形式呈现出多样化的发展特点^[4]。目前,具有代表性的有 LED 太阳模拟器^[5-6]、多光源太阳模拟器^[7-8]、匀光棒太阳模拟器、积分球太阳模拟器、光纤传输太阳模拟器、运动式太阳模拟器^[9-10]等。

太阳模拟器的设计一般包括辐照光谱、辐照范围、辐照均匀性、辐照非稳性、准直角、辐照度等主要技术指标^[11],其光学系统通常由光源、椭球聚光镜、折反镜、匀光积分器(场镜和投影镜)、光阑、准直镜等组件组成^[12]。太阳模拟器虽然有众多的评价技术指标,但针对具体的应用场合,可只关注与应用最相关的指标,例如辐照度和辐照面积,大型太阳模拟器设计关注的焦点在于提高辐照均匀性和光能利用率^[13-14],而不把消除系统像差、提高成像质量作为主要目的。

航天器空间环境模拟实验通常要求太阳模拟器具有较大的辐照面积和辐照度,例如美国 SS15B 太阳模拟器的辐照面积可达 $\Phi 6\ 000\ \text{mm}$,欧空局 ESTEC 太阳模拟器可达 $\Phi 7\ 000\ \text{mm}$,日本 NASDA 太阳模拟器可达 $\Phi 6\ 000\ \text{mm}$ 。大型太阳模拟器通常采用灯阵或灯群作为光源,结合准直镜拼接技术设计而成^[15-16]。然而,太阳模拟器难以满足空间模拟实验对变换照明姿态(方位角和俯仰角)的要求,例如评价高灵敏度晨昏轨道、微光、海洋等有效载荷杂的散光抑制能力,分析其成像时间特点等。本文提出了以 2 维转动折反镜折反、7 维大型机器人夹持折反扫描镜扫描、以及 1 维测试样件辅助转动的 10 维太阳模拟器扫

描系统,在太阳模拟器照明光束的方位角和俯仰角变化的条件下实现了太阳模拟器光束的扫描。

2 扫描原理

在进行航天大测试样件的模拟测试时,太阳模拟器照明方位角和俯仰角的改变可以通过多种方式来实,例如大型太阳模拟器进行空间 2 维转动,或者航天大测试样件绕大型太阳模拟器进行 2 维转动^[17]等。然而,大型太阳模拟器和航天大测试样件由于自身体积庞大,同时还包含许多精密组件和大量的带电设备,其运动不仅十分困难,而且容易损坏设备,具有重大的安全隐患。因此,通过航天大测试样件或大型太阳模拟器进行 2 维转动来实现光束方位角和俯仰角变化的途径既不现实也不安全,需要简化这种复杂运动,或者采取原地转动和单轴平移等简单运动。根据文献^[18]、^[19]使用机器人辅助光学测量的成功经验,本文通过采用 2 维转动折反镜折反、7 维大型机器人夹持折反扫描镜扫描,并结合测试样件的 1 维原地转动构成了 10 维扫描系统,以太阳模拟器光束运动的扫描方式来变换光束相对于测试样件表面的方位角和俯仰角。

2.1 扫描式太阳模拟器概述

扫描式太阳模拟器主要由太阳模拟器和光束扫描系统组成。前者产生小发散角、高均匀性的方形面光源,后者通过运动机构使得光束基于测试面按设定的方位、俯仰角精确扫描。

如图 1 所示,氙灯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。

装调机构包括氙灯和椭球反射镜可调绝缘基座,匀光积分器、辅镜、准直镜等的安装导轨以及位置、姿态微调组件等,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。

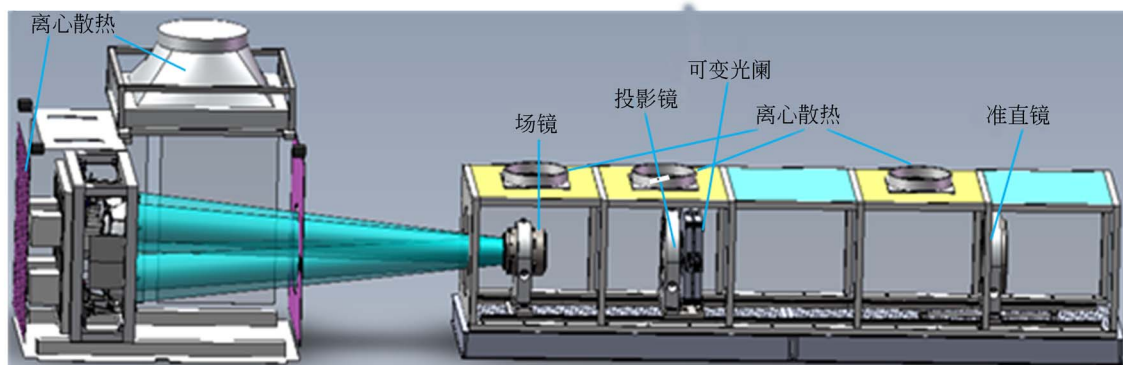


图 1 氙灯太阳模拟器光学系统

Fig. 1 Optical system of xenon lamp solar simulator

氙灯光源使用 4 只 5 kW 或 7 kW 的短弧氙灯,采用方阵排布、水平点燃的方式,光学系统采用透射式准直光路。氙灯太阳模拟器的测量范围是可见短波红外谱段,通过镀膜处理使得椭球聚光镜对长波透过而对可见短波红外汇聚。光束通过洁净光室进行传输,整个光学系统采用风冷和水冷结合的冷却方式。氙灯太阳模拟器的主要性能指标如表 1 所示。

表 1 扫描式太阳模拟器的主要性能指标

Tab. 1 Main performance of scanning solar simulator

序号	项目	性能指标
1	辐照面积	1 050 mm×1 050 mm
2	可调光斑	100~1 400 mm
3	辐照度	3 太阳常数
4	准直角	±3.2°
5	非均匀性	6.06%
6	非稳性	2.41%/h
7	光谱范围	400~1 000 nm
8	占地面积	18 m×15 m×8 m

2.2 光束扫描系统

扫描式太阳模拟器的光束扫描系统主要包括:2 维折反镜,用于定向投射太阳模拟器光束;7 维大型机器人,通过位姿的变化对被测面按设定方位、俯仰角进行扫描;1 维被测样件转动机构,用于扫描方位角辅助构建。

2.2.1 2 维折反镜

2 维转动折反镜如图 2 所示,其作用是将氙灯太阳模拟器准直镜投射的光束进行折反,并投射到根据扫描算法确定的方向,与 7 维机器人夹持的扫描镜配合,最终形成被测面指定位置、设定

方位角和俯仰角的照明光束。

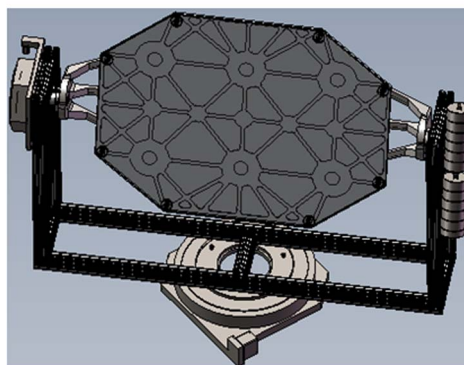


图 2 2 维转动折反镜

Fig. 2 Two-dimensional rotation folding mirror

2 维转动折反镜的转动由 2 个步进电机驱动 2 维转台实现,其设计、加工、装配的关键在于使 2 维转台的转轴垂直相交于镜面中心;否则,虽然不会改变光束指向,但是 2 维折反镜在投射太阳模拟器光束的过程中主光轴与折反镜的交点发生变化,导致最终被测面的扫描中心发生平移。此外,由于折反镜的俯仰角最大可达±16°,且扫描过程中长期、频繁地进行俯仰运动,所以折反镜的动、静力学平衡设计十分关键。

折反镜采用光圈、光洁度较好的镜面,以减小杂散光,反射率约为 85%。虽然太阳模拟器光束传输至此处时热量已经大为降低,然而,由于其尺寸为 1 100 mm×1 000 mm,且镜面与基板采用机械固定的安装方式,所以必须采取特殊工艺消除或最小化安装应力,防止太阳模拟器长时间照射导致镜面因折反镜残留热量的累积而破坏。

2.2.2 7 维大型机器人

为了确保安全性、提高可行性,太阳模拟器光

束方位角和俯仰角的变化采用光束扫描和被测试样件的简单转动来完成。太阳模拟器的辐照面积为 1 000 mm×1000 mm,扫描镜尺寸为 1 100 mm×1 400 mm。扫描镜使用航空铝 7075 作基板材料,进行超精密加工,镀镍后再进行抛光研磨形成镜面,最后镀铝和铝保护膜满足光圈 $N \leq 5$,局部光圈 $\Delta N \leq 1$ 的光学性能。

由于折反镜以较大俯仰角变化折反光束,而且被测样件表面可能大于 1 000 mm,所以扫描过程不仅有基于被测面光线方位、俯仰角的变化,还包含扫描位置的变化。此外,尺寸为 1 100 mm×1 400 mm 的扫描镜及其基座约为 100 kg,所以需要大型机器人,兼顾扫描范围,使用 6 轴 ABB 大型机器人 IRB6650S-125/3.5。该型机器人可负载 125 kg 的工件,最大工作范围可达 3 500 mm。为了进一步扩展扫描范围,为 6 轴机器人配置了一台型号为 IRBT6004 的平移台,其行程为 1 700 mm。IRB6650S-125/3.5 各轴的参数和运动范围分别如图 3 和表 2 所示,自下而上依次为机器人的 $J_1 \sim J_6$ 关节。

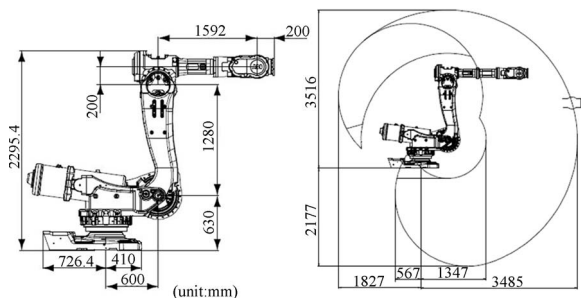


图 3 ABB IRB6650S-125/3.5 臂长及竖直运动范围
Fig. 3 Arm lengths and motion range of ABB IRB6650S-125/3.5

表 2 IRB6650S-125/3.5 机器人的转动范围

Tab.2 Rotation range of robot IRB6650S-125/3.5

轴序号	转动范围/(°)
1	-180~+180
2	-40~+160
3	-180~+70
4	-300~+300
5	-120~+120
6	-360~+360

如图 3 所示,机器人在安装底座以下有很大一部分运动空间,因此对太阳模拟器、光束扫描机

构和被测样件进行架高安装,充分利用机器人的运动范围进行扫描。

2.3 扫描算法

2.3.1 扫描坐标系

氙灯太阳模拟器扫描算法的设计是指通过统一的基准坐标系,对太阳模拟器坐标系、2 维折反镜转动控制坐标系、7 维扫描镜控制坐标系及 1 维被测样件非坐标轴转动控制坐标系进行有机综合,形成有序的运动及测试流程,模拟航天器在轨全年被(太阳)照的情况。

扫描式太阳模拟器的光束扫描以实验室坐标系作为基准进行综合控制,以长方体测试样件为例,如图 4 所示。在长方体测试样件的竖直中心转轴上建立 Z 轴,与扫描机构相对的方向建立 X 轴,右手法则确定 Y 轴,以机器人 J_2 轴所在高度(太阳模拟器主光轴所在水平面)与水平面的交点为原点,建立基准实验室坐标系。由于被测样件本身具有一定的体积,被测位置在其表面上,而扫描光束的方位、俯仰角都是基于该表面,所以在测试面上建立测试面坐标系。

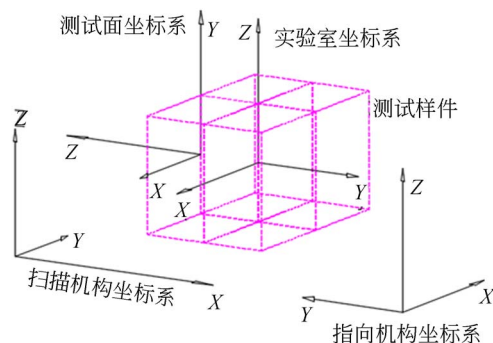


图 4 扫描式太阳模拟器坐标系

Fig. 4 Coordinate systems of scanning solar simulator

扫描镜运动控制采用 7 维机器人全局坐标系,即平移台正向为 x 轴(垂直于实验室坐标系 OXZ 平面), z 轴竖直向上,右手定制确定 y 轴,原点位于平移台始点。折反镜运动控制坐标系的 x 轴平行太阳模拟器的主光轴指向太阳模拟器, z 轴竖直向上,右手定制确定 y 轴,原点与基准实验室坐标系在同一水平面。

如图 4 所示,理想情况下前述定义的扫描太阳模拟器运动控制坐标系的坐标轴存在严格的垂直或平行关系。然而,由于设备加工、安装等问题,或者设计原因,扫描式太阳模拟器的最终状态

与设计存在偏差,例如数吨重的太阳模拟器和光束扫描系统及其安装基座难以达到安装精度,被测表面很可能与竖直轴不平行。由于太阳模拟器本身处于静止状态,因此这里仅仅在实验室坐标系下对其主光轴进行描述,参与光束方位、俯仰角和位置的扫描运动计算。

另外,如果 2 维折反镜的转动中心并不位于折反镜中心,在光束扫描运动过程中将导致中心点发生平移但不会影响扫描方位的俯仰角。对于大面阵光束太阳模拟器,折反镜转动中心毫米量级的偏差并不会产生较大的影响,因此可以忽略。不过,对于被测表面与竖直轴并不平行的情况,该偏差必须加以修正,以确保高精度模拟太阳光照的几何条件。

2.3.2 扫描控制方程

扫描控制方程指根据扫描中心和光束方位角、俯仰角确定光束扫描系统 2 维运动折反镜、7 维运动扫描镜、1 维被测样件简单转动机构总计 10 维运动机构的位置和姿态。首先根据扫描中心和光束的方位、俯仰角确定折反镜、扫描镜的位置和姿态,然后根据折反镜、扫描镜的位置和姿态分别确定折反镜 2 维转台的角度、机器人各关节的角度和平移台的位置。

理论上只需 5 维运动便可完成太阳模拟器光束在被测面上的扫描位置和扫描方位、俯仰角的确定。然而,扫描式太阳模拟器加上被测样件的 1 维简单转动共计使用了 10 维运动组件,存在冗余运动维。冗余转动维既增加了运动控制的灵活性,同时也增加了唯一控制的复杂性。为了确保扫描控制的唯一性,须对一些运动形式进行约束。7 维扫描镜运动机构机器人的运动最为复杂,通常对扫描镜中心点进行约束,使其始终在某个面内运动,例如平面、球面或抛物面等,这里使用平

面进行约束,并规定测试样件 1 维转动辅助完成方位角构建。

如前所述,在实际安装或设计中可能导致被测面与转动半径不垂直,被测面与竖直面不平行等情况,如图 5 所示。其中, η 表示被测面与转动半径垂直的弦的夹角, ϵ 表示被测面与竖直面的夹角。由于扫描位置和扫描光束方位、俯仰角都基于被测面,而被测样件转动则基于竖直转轴,所以非理想被测面需要进行相应的校正,通过基准实验室坐标系统一控制扫描光束。

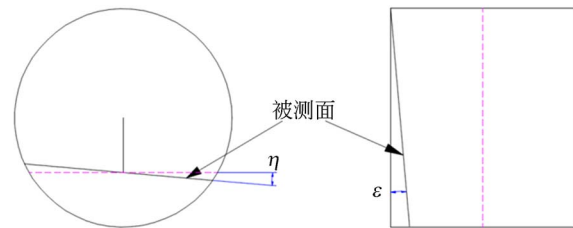


图 5 非理想被测面

Fig. 5 Non-ideal measuring surface

基于被测面坐标系的扫描中心为 (x_c, y_c, z_c) ,方位、俯仰角为 (φ, θ) 的扫描光束,光束单位矢量为:

$$\mathbf{r}_m = -(\cos \theta \cos \varphi, \cos \theta \sin \varphi, \sin \theta)^T. \quad (1)$$

规定被测样件的 1 维简单转动辅助构建太阳模拟器扫描光束的方位角,其控制方程为:

$$\delta = \varphi. \quad (2)$$

实验室坐标系下被测面上的扫描点和光束矢量随着被测样件的转动而转动,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:

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

其中:

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

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

令 2 维折反镜的转动中心为 (x_{fm}, y_{fm}, z_{fm}) , 则折反镜 2 维转动控制方程为:

$$\begin{cases} \alpha_{fm} = \text{atan} \left(\frac{b_{fm}}{a_{fm}} \right), \\ \beta_{fm} = \text{asin}(-c_{fm}) \end{cases}, \quad (4)$$

其中: α_{fm} 和 β_{fm} 表示 2 维折反镜的控制角度; $\mathbf{N}_{fm} = (a_{fm}, b_{fm}, c_{fm})$, 表示折反镜的法向单位向量, 通过归一化三角关系式获得:

$$\mathbf{N}_{fm} = \text{Norm}(\mathbf{R}_{fm} - \mathbf{I}_{fm}), \quad (5)$$

$\mathbf{I}_{fm}, \mathbf{R}_{fm} = (x_{sm} - x_{fm}, y_{sm} - y_{fm}, z_{sm} - z_{fm})$ 分别表示基于折反镜的入射、反射光线矢量。同理, 扫描镜的单位法向量 \mathbf{N}_{sm} 为:

$$\mathbf{N}_{sm} = \text{Norm}(\mathbf{R}_{sm} - \mathbf{I}_{sm}), \quad (6)$$

其中: $\mathbf{I}_{sm} = \mathbf{R}_{sm}, \mathbf{R}_{sm} = (x_{sc} - x_{sm}, y_{sc} - y_{sm}, z_{sc} - z_{sm})$, 表示基于扫描镜的入射、反射光线矢量。令 $\mathbf{a}(a_x, a_y, a_z) = \mathbf{N}_{sm}$ 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, 则扫描镜 x 轴通过式(7)确定:

$$\mathbf{n}(n_x, n_y, n_z) = \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & 1 \\ a_x & a_y & a_z \end{vmatrix}. \quad (7)$$

根据右手坐标系原则确定扫描镜镜面坐标系的 y 轴 $\mathbf{o}(o_x, o_y, o_z)$ 。如果 7 维机器人的姿态采用四元数表示, 则 7 维机器人的姿态控制方程为:

$$\begin{cases} q_1 = \frac{\sqrt{n_x + o_y + a_z + 1}}{2} \\ q_2 = \frac{\sqrt{n_x - o_y - a_z + 1}}{2} (\text{sign}(q_2) = \text{sign}(o_z - a_y)) \\ q_3 = \frac{\sqrt{o_y - n_x - a_z + 1}}{2} (\text{sign}(q_3) = \text{sign}(a_x - n_z)) \\ q_4 = \frac{\sqrt{a_z - n_x - o_y + 1}}{2} (\text{sign}(q_4) = \text{sign}(n_y - o_x)) \end{cases}, \quad (8)$$

其中, $\text{sign}(q_i)$ 表示元素的符号。

综上所述, 通过式(4)确定 2 维折反镜的姿态, 通过式(7)和式(8)确定 7 维机器人的位置和姿态, 通过式(2)确定 1 维被测样件的简单转动角度, 即所有运动部件的控制方程都已确定。在扫描式太阳模拟器的扫描范围内, 可以通过上述 10 维运动机构构建指定位置、设定方向的太阳光模拟照明几何。模拟卫星在轨的太阳照明情况, 如图 6 所示。图 6 中扫描式太阳模拟器各个组件之间的相对几何关系在安装完毕后使用全站仪进行

测量, 与实验室基准坐标系关联, 完成各组件的本地控制。

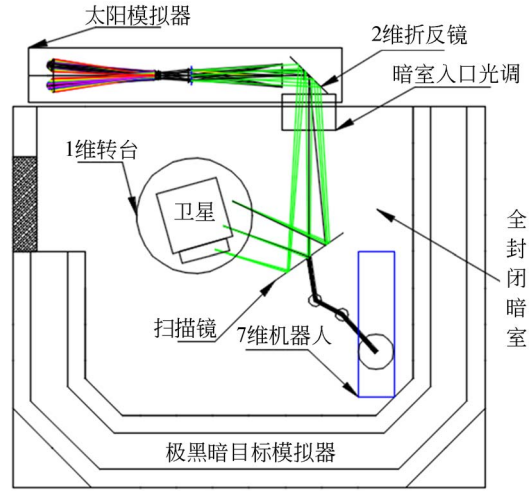


图 6 模拟卫星在轨太阳照明示意图

Fig. 6 Simulation of on-board illumination of satellite

3 扫描精度测试

扫描式太阳模拟器的一个重要作用在于模拟航天被测样件在轨运行期间的(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的角精度, 在太阳模拟器投影镜处设置了 \times 形标志, 在测试位置安置了一台精度为 $5''$ 的全站仪, 如图 7 所示, 使太阳模拟器光束按设定的方位、俯仰角进行扫描, 通

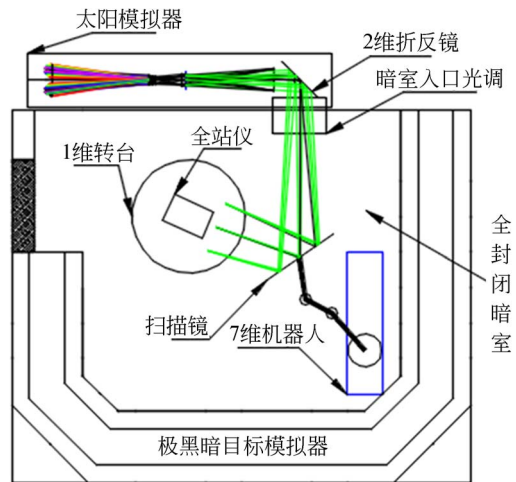


图 7 扫描式太阳模拟器扫描精度测试装置

Fig. 7 Measuring devices of angular accuracy of scanning solar simulator

过全站仪观测 \times 的像,确定光束实际的方位角和俯仰角。目标值和观测结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 俯仰角观测结果

Tab. 3 Results of pitch angle measurement (°)

序号	目标值	实测值	偏差	序号	目标值	实测值	偏差
1	-17.5	-17.596	0.096	11	10	10.056	-0.056
2	-15	-15.084	0.084	12	12.5	12.551	-0.051
3	-12.5	-12.419	-0.081	13	15	15.085	-0.085
4	-10	-10.052	0.052	14	17.5	17.435	0.065
5	-7.5	-7.539	0.039	15	20	19.939	0.061
6	-5	-5.023	0.023	16	22.5	22.431	0.069
7	-2.5	-2.503	0.003	17	25	24.926	0.074
8	2.5	2.521	-0.021	18	27.5	27.422	0.078
9	5	5.041	-0.041	19	30	29.91	0.090
10	7.5	7.55	-0.050	20	32.5	32.398	0.102

表 4 方位角测试结果

Tab. 4 Results of azimuth angle measurement (°)

序号	目标值	实测值	偏差
1	-90	-89.809	-0.191
2	-75	-74.829	-0.171
3	-60	-59.888	-0.112
4	-45	-44.830	-0.170
5	-30	-29.880	-0.120
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

由表 3 和表 4 可知,方位角和俯仰角的扫描精度分别可达 0.2° 和 0.1° 。通过对扫描式太阳模拟器极限扫描角度的测试,太阳模拟器方位角的扫描范围为 $-90^\circ \sim +90^\circ$,俯仰角的扫描范围为 $-29^\circ \sim +42.5^\circ$,可对 $W1700 \text{ mm}$ (可更大) $\times H2700 \text{ mm}$ 的表面进行扫描。此外,使用细光束激光进行扫描位置确认时发现固定偏差 $< 10 \text{ mm}$ 。

太阳模拟器的扫描角度和位置精度一方面受扫描机构自身精度的影响,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均具有较高的控制精度,因此,太阳模拟器的扫描角度和位置误差主要来源于各机构坐标系之间

关系参数的测量误差。

根据扫描式太阳模拟器极限角度测量的情况,受 7 维机器人手臂及其平移台长度的限制,以及被测样件与扫描镜之间的距离约束,扫描的俯仰角度为 $-29^\circ \sim +42.5^\circ$ 。如果增大 7 维机器人手臂和平台的长度,缩短被测样件之间的距离,可以扩大扫描角度范围。升高被测样件的安装高度可以使得扫描俯仰角范围正负均衡,但缩短被测样件和 7 维机器人之间的安装距离会增加被测样件测试时的杂散光。

对于扫描位置精度要求特别高的情况,需要更加精密测量各个运动机构之间的位置和姿态关系,并修正其运动引起的误差,例如折反镜转动中心与反射面不重合时折反镜转动将导致反射中心的改变。

扫描式太阳模拟器投射出的光为方形光斑,由于折反镜和扫描镜的反射导致被测面的光斑为菱形,即产生了像旋。不过,模拟航天被测样件在轨运行全年被照情况仅关注照明光线的指向和被测样件上的照明位置,所以,像旋并不影响航天被测样件的空间环境模拟测试。

4 结 论

扫描式太阳模拟器采用 2 维转动折反镜、7 维大型机器人夹持扫描镜 ($1\ 100 \text{ mm} \times 1\ 400 \text{ mm}$) 和被测样件的简单 1 维辅助转动共计 10 维转动机构,本文根据设定的照明条件和照明位置

由控制方程解算构建各个机构相应的位置和几何姿态,完成了被测样件的空间环境模拟照明。扫描式太阳模拟器可对 1 700 mm×2 700 mm 的区

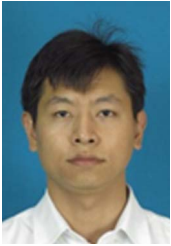
域完成方位角 $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ 、俯仰角 $-29^{\circ} \sim +42.5^{\circ}$ 的光束扫描,方位角和俯仰角的扫描角精度分别可达 0.2° 和 0.1° ,位置精度可达 10 mm。

参考文献:

- [1] 高雁,刘洪波,王丽. 太阳模拟技术[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2):104-111.
GAO Y, LIU H B, WANG L. Solar simulation technology [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(2):104-111. (in Chinese)
- [2] 杨林华, 李斌松. 国外大型太阳模拟器研制技术概述[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(2):162-167.
YANG L H, LI H S. The development of large solar simulators in the world[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2009, 26(2):162-167. (in Chinese)
- [3] 杜景龙, 唐大伟, 黄湘. 太阳模拟器的研究概况及发展趋势[J]. 太阳能学报, 2012, 33(S1):70-76.
DU J L, TANG D W, HUANG X. Research status and future development of solar simulator[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2012, 33(S1): 70-76. (in Chinese)
- [4] 苏拾, 张国玉, 付芸, 等. 太阳模拟器的新发展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(7):070003.
SHU SH, ZHANG G Y, FU Y, *et al.*. New development of solar simulator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7):070003. (in Chinese)
- [5] KOHRAKU S, KUROKAWA K. New methods for solar cells measurement by LED solar simulator [C]. *The 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, IEEE*, 2003:1977-1980.
- [6] 高亮, 李果华, 孟昭渊. LED 太阳模拟器的设计 [C]. 第十届中国太阳能光伏会议, 2008:751-756.
GAO L, LI G H, MENG ZH Y. The design of LED solar simulator [C]. *The Symposium of the 10th Chinese Conference on Solar Photovoltaic*, 2008:751-756. (in Chinese)
- [7] AMOH H. Design for a multi solar simulator [J]. SPIE, 2004, 5520:192-199.
- [8] BENNETT M, PODLESNY R. Two-source simulator for improved solar simulation [C]. *Conference Record of the 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, IEEE*, 1990:1438-1442.
- [9] 苏拾, 徐熙平, 张国玉, 等. 太阳模拟器回转运动系统研究[J]. 长春理工大学学报:自然科学版, 2011, 34(2):24-27.
SU SH, XU X P, ZHANG G Y, *et al.*. The research of slewing mechanism system for solar simulator[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2011, 34(2): 24-27. (in Chinese)
- [10] 王帅会, 陈家奇, 高雁. 运动式太阳模拟器控制系统设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(11):6-9.
WANG SH H, CHEN J Q, GAO Y. Design of control system for moving solar simulator [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2015, 38(11): 6-9. (in Chinese)
- [11] 张容, 李斌松, 向艳红, 等. KFTA 太阳模拟器研制[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(6):548-553.
ZHANG R, LI H S, XIANG Y H, *et al.*. Development of KFTA solar simulator[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2009, 26(6):548-553. (in Chinese)
- [12] 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.
GAO Y, ZHANG G Y, ZHENG R, *et al.*. Solar simulator irradiation uniformity based on optical integrator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0623003. (in Chinese)
- [13] 张国玉, 吕文华, 贺晓雷, 等. 太阳模拟器辐照均匀性分析[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(1):41-45.
ZHANG G Y, LÜ W H, HE X L, *et al.*. Analysis on irradiation uniformity of sun simulator [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(1): 41-45. (in Chinese)
- [14] 杨林华. 大型太阳模拟器研制技术综述[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(2):173-178.
YANG L H. Large solar simulator development technologies[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2012, 29(2):173-178. (in Chinese)
- [15] 张容, 韩建军, 减友竹, 等. 大型太阳模拟器拼接准直镜技术[J]. 航天器环境工程, 2005, 22(1):50-56.
ZHANG R, HAN J J, JIAN Y Z, *et al.*. Technology of segmented collimating mirror in a large solar simulator[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2005, 22(1):50-56. (in Chinese)
- [16] 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): 342-246.
- YANG L H, FAN N, SHI R L. Adjustment method for collimating mirror of KM6 solar simulator[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2005, 22(6): 342-246. (in Chinese)
- [17] 李俊麟. 紫外-可见-短波红外高精度 BRDF 绝对测量系统研究[D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院, 2014.
- LI J L. *Research of UV-VIS-SWIR High Precision Absolute BRDF Measuring System* [D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [18] 李俊麟, 张黎明, 司孝龙, 等. 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.
- LI J L, ZHANG L M, SI X L, *et al.*. BRDF device based on six-axis robot [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2983-2989. (in Chinese)
- [19] 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.
- LI J L, ZHANG L M, SI X L. Development of BRDF absolute measuring device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0528002. (in Chinese)

作者简介:



李俊麟(1985—),男,四川中江人,博士,助理研究员,2009年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2014年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事光学遥感器辐射与几何综合定标方面的研究。E-mail:lijunlin@aiofm.ac.cn

(本栏目编辑:曹 金)