

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904712

太阳敏感器测试用运动式 LED 太阳模拟器研究*

苏 拾^{1,2,3}, 王逸文¹, 张国玉^{1,2,3}, 张 宇⁴, 刘 石^{1,2,3}

(1. 长春理工大学光电工程学院 长春 130022; 2. 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心 长春 130022;
3. 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室 长春 130022; 4. 北京控制工程研究所 北京 100190)

摘要:为了解决装星后的编码式太阳敏感器的测试问题,提出了一种具有运动功能的 LED 太阳模拟器,利用白光 LED 模拟太阳光信号,利用运动装置模拟太阳光矢量信号。介绍了太阳模拟器结构组成与工作原理,着重研究了太阳光和太阳光矢量的模拟方法。由辐射功率计算确定所需 LED 数量,根据斯派洛判据确定 LED 线性阵列间距,利用矩阵法计算了柱面镜的光学参数,借助 Lighttools 软件进行仿真分析。根据敏感器结构和功能要求确定了由超声电机、双摇杆机构、安装支架、编码器组成的运动装置,并对装置的矢量调整精度进行了分析。实验结果表明,研制的太阳模拟器工作距离 50 mm 处的辐照光斑 50×10 mm、辐照度高于 393 W/m²、辐照不均匀度优于±7.3%,能够模拟实现-13°、0°、38° 3 种太阳矢量角,模拟精度优于±0.008 3°,满足太阳敏感器测试要求。

关键词: 太阳敏感器测试; 太阳模拟器; LED 光源; 运动式

中图分类号: V249.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Research on mobile LED solar simulator for solar sensor testing

Su Shi^{1,2,3}, Wang Yiwen¹, Zhang Guoyu^{1,2,3}, Zhang Yu⁴, Liu Shi^{1,2,3}

(1. College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Optical Measurement and Control Instrumentation, Jilin Province Engineering Research Center, Changchun 130022, China;
3. Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, Changchun 130022, China; 4. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: The in-situ test of coded solar sensors is difficult to carry out. To solve this problem, one kind of LED solar simulator with motion function is proposed. The white LED is applied to simulate the solar light signal, and the motion equipment is employed to simulate the solar light vector signal. The paper introduces the structural composition and the working principle of the solar simulator. The simulation method of solar light and solar light vectors is studied very carefully. The required number of LEDs is determined by the radiant power. The linear array space of the LEDs is determined by the Sparrow criterion. The optical parameters of the cylindrical mirror are calculated by the matrix method, and the simulation analysis is performed by using Lighttools software. According to the structure and functional requirements of the sensor, the elements of motion equipment are confirmed, including ultrasonic motor, double rocker mechanism, mounting bracket and encoder. The vector adjustment accuracy of the device is analyzed. Experimental results show that the irradiation spot is 50×10 mm for the radiation simulator with a working distance of 50 mm. The irradiance is higher than 393 W/m² and the irradiation non-uniformity is better than ±7.3%. It can simulate three solar vector angles of -13°, 0°, and 38°. The simulation accuracy is better than ±0.008 3°, which meets the requirements of solar sensor testing. This method provides a powerful tool to ensure the quality of aerospace products.

Keywords: testing of solar sensor; solar simulator; LED light source; mobility

收稿日期:2019-01-30; Received Date:2019-01-30

* 基金项目:国家自然科学基金(61603061)、吉林省科技计划项目(20150204048C)、吉林省产业创新专项资金(2016C084)、吉林省教育厅“十三五”科技项目(JJKH20181131KJ)资助

0 引 言

太阳敏感器作为卫星上重要的姿态控制部件,被广泛用于三轴稳定卫星上,通过感知太阳光线矢量与卫星某坐标平面之间的夹角来调整卫星姿态^[1]。

太阳敏感器研制过程中利用中小型太阳模拟器进行试验与标定。此类太阳模拟器国外商业化发展迅速,如德国的 ATLAS、美国的 Newport 和 Abert Technology、日本的 WACOM 和 SAN-EI 等,性能较高,达到 3 A 级水平。美国还利用 1.8 kW 镝灯作为太阳模拟器光源对航天器设备进行测试^[2],设备安装有调整支架实现 360° 旋转,精度优于 10'。Soetedjo 等^[3]研制的卤钨灯太阳模拟器辐照度 60~1 005 W/m² 可调,光源能够实现 15°~165° 的摆动。近年来我国也进行了相关研究,如中科院长春光机所研制的 TM-3 000 A 型太阳模拟器,Φ200 光斑内辐照度 1.5 个太阳常数,辐照不均匀度优于 ±3%,达到国外同类仪器的先进水平^[4]。为了满足太阳敏感器测试需要,长春理工大学研制了移动式太阳模拟器、自主导航实验用太阳模拟器、发散式太阳模拟器等多种具有运动功能的太阳模拟器。如移动式太阳模拟器,利用水平移动和方位俯仰运动来改变模拟太阳光的照射方向,Φ300 nm 光斑内辐照不均匀度优于 ±5%,运动精度优于 ±0.02°^[5];发散式太阳模拟器能够完成方位与俯仰运动,20 000 mm 处的光斑直径 Φ1 540 mm,辐照度 1 370 W/m²,辐照不均匀度 ±8.8%,运动精度 ±0.04°^[6-7]。这些太阳模拟器虽然解决了太阳敏感器测试需要,但由于采用氙灯作为光源,结构复杂、体积庞大,只能用在特定的实验室内,不利于敏感器安装卫星后的现场使用。随着新型半导体发光器件 LED 出现,以其节能高效、绿色环保等优点被用作太阳模拟器的新型光源^[8-10]。

为此,根据编码式太阳敏感器具有探测太阳出现和测量太阳光入射角的功能,研究一种具有运动功能的 LED 太阳模拟器,利用 LED 模拟太阳光,利用运动装置模拟不同的太阳光入射角,为装星后的敏感器测试,提供模拟的太阳光信号和太阳光矢量信号。

1 运动式 LED 太阳模拟器组成与总体结构

运动式 LED 太阳模拟器主要由 LED 光源、柱面镜组成的双路太阳光模拟单元和由双摇杆机构、超声电机、编码器组成的运动装置,以及由光源与矢量控制器组成的控制系统组成,如图 1 所示。

太阳是非常明亮的天体,表面温度 5 000 K 以上。太阳敏感器工作在可见光波段,采用太阳电池为探测器。由于日地距离遥远,太阳光认为较小视场张角的平行光,

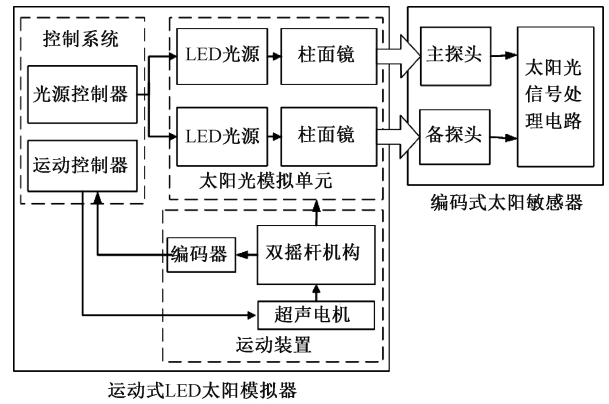


图 1 太阳模拟器总体结构与工作原理

Fig.1 Overall structure and working principle of solar simulator

且辐照均匀。敏感器装星后试验中,考虑星上其它设备安全,采用低功耗 LED 为光源,经柱面镜准直处理模拟双路的太阳光,为太阳敏感器的主、备探头提供测试信号。太阳敏感器通过测量本身与太阳光的矢量关系来确定卫星姿态^[11],为此通过超声电机驱动双摇杆摆动、编码器精密测角,调整“太阳光”入射敏感器探头的角度,提供了模拟的太阳光矢信号。运动式 LED 太阳模拟器需要满足的技术要求如表 1 所示。

表 1 太阳模拟器主要技术要求

Table 1 Main design technical requirements of solar simulator

参数名称	技术要求
工作距离	50 mm
辐照面积	50×10 mm
最低辐照度	<0.2 个太阳常数
色温	5 000~5 500 K 白光
出射张角	<1°±2'
辐照不均匀度	优于±10%
模拟太阳矢量角	-13°、0°、38°
矢量模拟精度	优于±0.01°

2 太阳光模拟方法

2.1 光源选取与功率计算

敏感器以硅太阳能光电池作为探测器,根据其光谱响应范围,选取主波长为 575 nm 的正白色 LED 进行线性阵列作为太阳光的模拟光源,单个 LED 色温 5 288 K,发散角 50°,光功率为 288.9 mW。根据辐照度要求由式(1)确定光源所需总功率 P 为^[12]:

$$P = \frac{E \cdot S}{\tau_{LED} \cdot \tau_c^n} \quad (1)$$

式中: E 为辐照度; S 为辐照面积; τ_{LED} 为 LED 光能利用率, $\tau_{\text{LED}} = 0.7$; τ_{C} 柱面镜透过率, $\tau_{\text{C}} = 0.8$; n 为透过面数, $n = 2$ 。计算出总光功率为 $P = 302.16 \text{ mW}$, 考虑冗余设计, 由 4 颗 LED 组成的线性阵列作为光源。

2.2 LED 阵列间距计算

LED 光强近似于高斯分布, 阵列光源的光强等于每个 LED 光强线性叠加。取任意 2 个 LED 研究辐照均匀性, LED 间距过大, 中间照度低于两边, 间距过小, 中间照度高于两边, 为此利用 LED 辐照面辐射分布模型对 LED 线性阵列间距 d 进行分析, 寻找使均匀性最优的值。

垂直于 LED 照射方向的光强分布 E_{θ} 表示为:

$$E_{\theta} = E_0 \cos^m \theta \quad (2)$$

式中: E_0 为 LED 在 $\theta = 0^\circ$ 时辐照面上的光强分布; θ 为 LED 边缘光线与光轴的夹角; m 为与光源半强角 $\theta/2$ 有关的参数, 关系式为,

$$m = -\ln 2 / \ln(\cos \theta_{1/2}) \quad (3)$$

在空间范围中, 设 2 个 LED 坐标分别为 $(-d/2, 0, 0)$ 、 $(d/2, 0, 0)$, 光源距接收面距离为 $z = 50 \text{ mm}$ 。此时辐照面光强分布 E 为:

$$E(x, y, z) = \frac{z^m I}{[(x - d/2)^2 + y^2 + z^2]^{(m+2)/m}} + \frac{z^m I}{[(x + d/2)^2 + y^2 + z^2]^{(m+2)/m}} \quad (4)$$

式中: I 为 LED 发光强度。根据斯派洛判据^[13], 当式(4)满足 $\partial x^2 / \partial y^2 = 0$, 且 $x = 0, y = 0$ 时, 辐照面均匀性最佳, 求得间距 d 为:

$$d = z \sqrt{4/(m+3)} \quad (5)$$

由发散角得半强角 $\theta_{1/2} \approx 10^\circ$, 求得 $m = 45$, 代入式(5), 求得 $d \approx 14.4 \text{ mm}$ 。

2.3 柱面镜参数计算

根据边缘光线距离光轴 h , 以及与光轴夹角 θ 构成光线矢量特征传递矩阵进行参数计算^[14]。

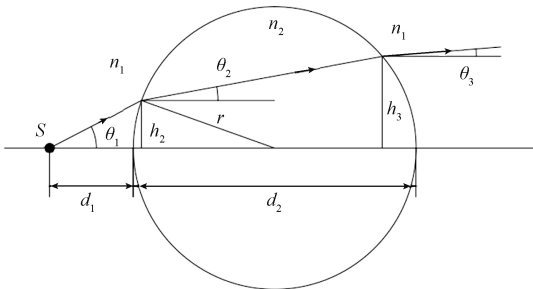


图2 柱面镜光路

Fig.2 Light path of cylindrical mirror

如图2所示, n_1 为空气折射率; n_2 为柱面镜折射率; r 为柱面镜半径; S 为光源; d_1 为光源与柱面镜顶点距离;

d_2 为柱面镜直径; θ_1 为边缘光线与光轴夹 e 角, 令 $\theta_1 = 30^\circ$; h_2 为柱面镜入射点与光轴距离; θ_2 为柱面镜入射点与平行光轴方向的夹角; h_3 为出射点与光轴距离, θ_3 为柱面镜出射点与平行光轴方向的夹角。设 h_1 为起始点离光轴距离, $h_1 = 0$ 。光源 S 矩阵为:

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \theta_1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

出射准直光线的矩阵表达式为:

$$\begin{pmatrix} h_3 \\ \theta_3 \end{pmatrix} \quad (7)$$

起始光线与出射光线的关系用矩阵可表示为,

$$\begin{pmatrix} h_3 \\ \theta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1 - n_2}{rn_1} & \frac{n_2}{n_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2 - n_1}{rn_2} & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \theta_1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中: d_2 约等于柱面镜直径; $n_1 = 1$; 柱面镜材料为 K9 玻璃, 折射率 $n_2 = 1.516$ 。根据辐照面尺寸确定 $h_3 = 5 \text{ mm}$, 出射光线为准直光线, 因此 $\theta_3 = 0^\circ$ 。根据式(8)计算得柱面镜半径 $r = 6.5 \text{ mm}$, 光源与柱面镜距离 $d_1 = 3.05 \text{ mm}$ 。

2.4 光学系统仿真

利用 lighttools 软件建立 LED 光源模型, 追迹光线 1 000 万条, $50 \times 10 \text{ mm}$ 辐照面划分 2×10 个网格, 以 $-13^\circ, 0^\circ, 38^\circ$ 3 个角度入射到工作面的辐照分布如图3所示。

对仿真的辐照分布进行数据分析, 如表2所示。

表2 辐照不均匀性仿真结果

Table 2 Simulation results of irradiation non-uniformity

Incidence angle	-13°	0°	38°
Max/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	788.89	815.48	615.59
Min/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	721.92	746.53	565.02
non-uniformity/%	4.4	4.4	4.3

3 种入射角下辐照面内辐照度大于 565.02 W/m^2 , 辐照不均匀度优于 $\pm 4.4\%$ 。

3 太阳光矢量模拟方法

利用由超声电机、双摇杆机构、安装支架、编码器组成的运动装置, 调整太阳光模拟系统的照射角度, 同时为敏感器主、备探头提供 $-13^\circ, 0^\circ, 38^\circ$ 3 种太阳光矢量测试信号, 如图4所示。

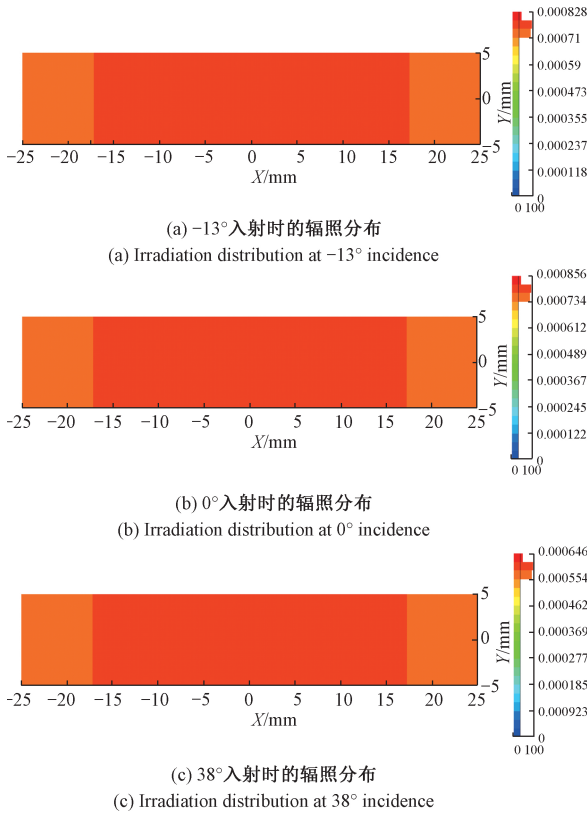


图 3 3 种入射角下的辐照分布仿真

Fig.3 Simulation of irradiation distribution at three incident angles

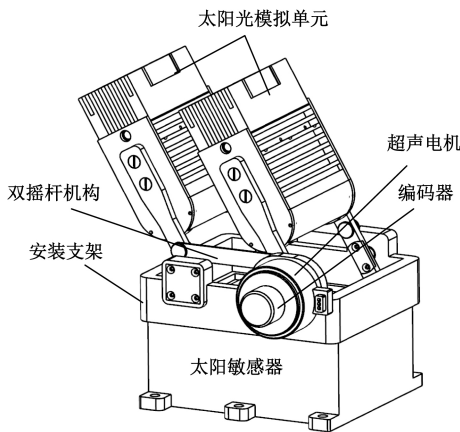


图 4 太阳模拟器运动装置

Fig.4 Solar simulator motion equipment

3.1 双摇杆机构设计与分析

根据敏感器结构,双摇杆机构采取平行四边形机构,如图 5 所示。

AB、CD 为摇杆,BC 为连杆,A、D 为安装支架上的铰链,分别与主、备探头焦平面共面。根据探头间距确定铰链 A、D 距离和连杆 BC 长度,AD=BC=53 mm。摇杆 AB

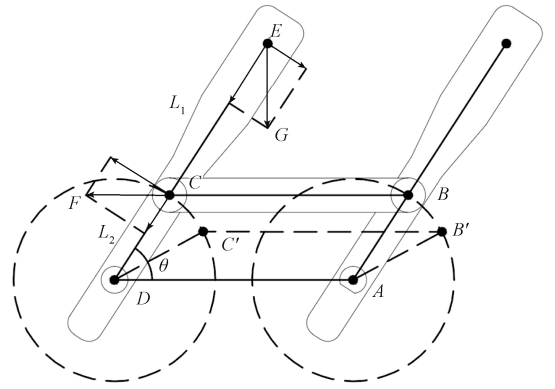


图 5 双摇杆机构运动

Fig.5 Motion of double rocker mechanism

为主动件,CD 为从动件,E 为光源模块重心,令 CE = L₁, AB = CD = L₂,θ 为摇杆转过的角度。C 点受到负载重力 G 和连杆 BC 力 F,在匀速运动条件下,对 C 点进行受力分析得到:

$$FL_2 \cos \theta = G(L_1 + L_2) \cos \theta \quad (9)$$

铰链 B、C 点的最佳位置为力 F 最小时的点,由式 (9) 得到:

$$F = \frac{G(L_1 + L_2)}{L_2} \quad (10)$$

由于光源模块自身尺寸与工作距离 50 mm 均确定,此时, L₂ 的值越大, F 越小。B、C 点位置应尽可能地靠近负载重心。考虑光源模块结构的安装干涉问题,确定摇杆长度 AB = CD = 50 mm。

3.2 矢量模拟精度分析

为了实现模拟太阳光信号的矢量调整精度优于 ±0.01°,对矢量调整装置进行了误差分配,预留机械部分误差 0.008°,电控部分误差 0.002°。

通过分析,调整精度主要取决于摇杆的传动精度和编码器分辨率。运动装置的零部件制造、安装误差决定了传动精度,主要的因素包括摇杆尺寸误差、连杆尺寸误差、支架变形量导致的铰链位置误差、铰链配合间隙等,根据设计公差,利用转换机构法^[15]经计算得传动精度 Δ₁ ≈ 0.006 7°。18 bit 编码器测角分辨率 Δ₂ = 360°/2¹⁸ ≈ 0.001 4°,由于与电机同轴安装,安装误差忽略不计。则装置调整精度 Δ 可根据误差独立作用原则得 Δ = √(Δ₁² + Δ₂²) = 0.006 8°,满足设计要求。

4 测试与结果分析

研制的运动式 LED 太阳模拟器实物如图 6 所示,分别对光学和机械性能进行测试。

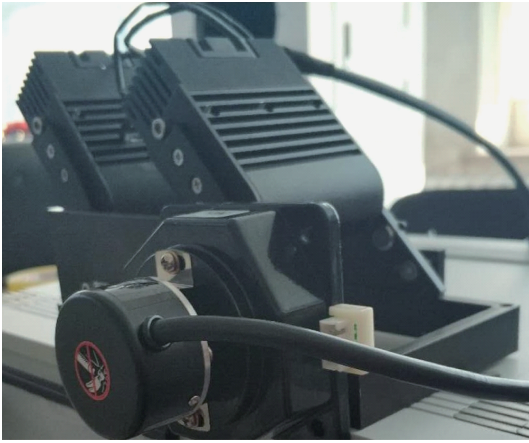


图6 运动式LED太阳模拟器实物

Fig.6 Physical object of mobile LED solar simulator

4.1 光学性能测试

保证光源垂直入射接收面且工作距离为 50 mm,待太阳模拟器工作稳定后,利用卡尺测量得到光斑面积大于 10×50 mm。

点亮并调节光源功率至最大,将条形辐照面平均划分为 5 个区域,控制 LED 光源模块入射角度。测得 -13° 、 0° 、 38° 3 种情况下的辐照度最大值和最小值,由式(11)计算辐照不均匀度^[16]:

$$N = \pm \left(\frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \right) \times 100\% \quad (11)$$

式中: N 为辐照不均匀度; E_{\max} 为辐照面上最大辐照度; E_{\min} 为辐照面上最小辐照度。每种入射角下测试 3 组数据,测得结果如表 3 所示,辐照度最低为 393 W/m^2 ,大于 0.2 个太阳常数;辐照不均匀度最大 $\pm 7.3\%$,优于 $\pm 10\%$ 。

表3 辐照不均匀度测试数据

Table 3 Test results of irradiation non-uniformity

模拟矢量角	-13°			0°			38°		
测试次数(n)	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$E_{\max}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	550	551	548	567	564	561	456	453	455
$E_{\min}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	489	488	485	507	506	503	395	393	393
$N/\%$	± 5.9	± 6.1	± 6.1	± 5.6	± 5.4	± 5.5	± 7.2	± 7.1	± 7.3

4.2 机械性能测试

采用自准直经纬仪和多面棱体对光线矢量调整装置的矢量模拟精度进行测试,如图 7 所示。

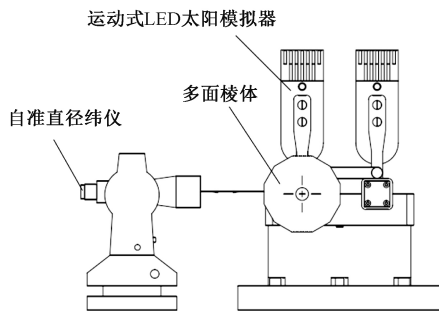


图7 矢量模拟精度测试方法

Fig.7 Test method of vector simulation accuracy

使矢量调整装置处于 0 位,即光源模块处于竖直状态,将多面棱体安装在主动轴上的电机对侧,自准直经纬仪架设在多面棱体对面,对准多面棱体工作面,使自准直像与经纬仪目镜中的十字刻线重合,驱动电机以每 5° 为间隔,微调经纬仪俯仰角使自准直像与十字刻

线重新重合,经纬仪微调量即为矢量调整装置的调整偏转角误差,测试 $-15^\circ \sim 40^\circ$ 范围的矢量模拟精度如图 8 所示。实验结果显示,偏转角误差最大为 0.0083° ,优于 $\pm 0.01^\circ$ 。

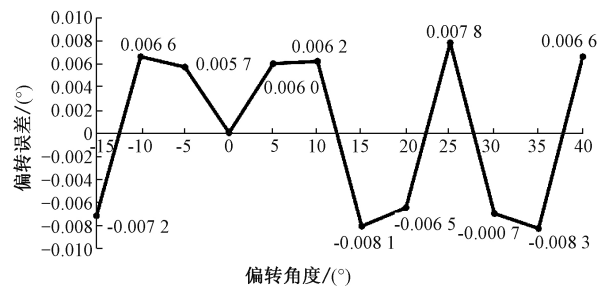


图8 矢量模拟精度测试数据

Fig.8 Test data of vector simulation accuracy

5 结论

选用白光 LED 解决太阳光模拟问题,采取双摇杆机构实现模拟太阳光照射方向的调整,由此研制运动

式LED太阳模拟器。测试结果表明,工作距离50 mm处形成10×50 mm的辐射光斑,辐照度高于393 W/m²,辐照不均匀度优于±7.3%;能够模拟-13°、0°、38°3种太阳光矢量角,矢量模拟精度优于±0.008 3°,满足使用要求,能够为装星后的编码式太阳敏感器进行功能性验证试验提供模拟的太阳光信号和太阳光矢量信号,对提升航天产品质量,确保航天任务顺利完成具有一定的现实意义。

参考文献

- [1] 王红睿,李会端,方伟.航天太阳敏感器的应用与发展[J].中国光学,2013,6(4):481-489.
WANG H R, LI H D, FANG W, et al. Application and development of space sun sensors [J]. Chinese Optics, 2013, 6(4): 481-489.
- [2] FORGIONE J B, KOJIMA G, HANEL R, et al. Low-cost, risk-reduction testing of class D spacecraft photovoltaic systems[C]. IEEE Aerospace Conference. IEEE, 2014.
- [3] SOETEDJO A, NAKHODA Y I, LOMI A, et al. Solar simulator using halogen lamp for PV research [M]. Proceedings of Second International Conference on Electrical Systems, Technology and Information 2015 (ICESTI 2015). Springer Singapore, 2016: 239-245.
- [4] 赵吉林,仲跻功,陈兴.TM-3000A1太阳模拟器的研究[J].太阳能学报,1981,2(4):417-424.
ZHAO J L, ZHONG J G, CHEN X. Research on TM-3000A1 solar simulator [J]. Journal of Solar Energy, 1981, 2(4): 417-424.
- [5] 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,2011,34(2):24-27,11.
SU SH, XU X P, ZHANG G Y, et al. Research on solar simulator gyro motion system [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 34(2): 24-27, 11.
- [6] 胡冰,王凌云,张国玉,等.太阳模拟器两轴回转控制系统研究[J].空间科学学报,2018,38(1):94-100.
HU B, WANG L Y, ZHANG G Y, et al. Study on two-axis rotary control system of solar simulator [J]. Journal of Space Science, 2018, 38(1): 94-100.
- [7] 张燃,张国玉,杨俊杰,等.大辐照面积发散太阳模拟器光轴调整方法[J].仪器仪表学报,2018,39(6):18-25.
ZHANG R, ZHANG G Y, YANG J J, et al. Optical axis adjustment method of a divergent solar simulator with large irradiation area [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(6): 18-25.
- [8] 苏拾,张国玉,王凌云,等.基于发光二极管的太阳模拟器的研究现状[J].激光与光电子学进展,2018,55(7):40-51.
SU SH, ZHANG G Y, WANG L Y, et al. Solar simulators based on light emitting diodes [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 40-51.
- [9] SCHUBERT F, SPINNER D. Solar simulator spectrum and measurement uncertainties [J]. Energy Procedia, 2016, 92: 205-210.
- [10] ALGIRDAS N, ARTURAS B, MEKYS A, et al. Compact light-emitting diode-based AAA class solar simulator: Design and application peculiarities [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2015, 5(4): 1137-1142.
- [11] 赵媛,莫亚男,吕政欣.新型编码式太阳敏感器误差分析与修正方法研究[J].空间控制技术与应用,2016,42(2):38-42.
ZHAO Y, MO Y N, LV Z X. Error analysis and modify method of the new coded sun sensor [J]. Space Control Technology and Application, 2016, 42(2): 38-42.
- [12] 苏拾,张国玉,王凌云,等.基于LED阵列光源的太阳模拟器[J].光学精密工程,2018,26(2):307-315.
SU SH, ZHANG G Y, WANG L Y, et al. Solar simulator based on LED array light source [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(2): 307-315.
- [13] 张宁.LED面光源均匀化设计[D].南京:南京信息工程大学,2012.
ZHANG N. Design of the LED surface light source for uniform illumination [D]. Nanjing: Nanjing University of

Information Science & Technology, 2012.

- [14] 石顺祥, 张海兴, 刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2000.

SHI SHX, ZHANG H X, LIU J S. Physical optics and applied optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000.

- [15] 马宏, 王金波. 仪器精度理论[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2009.

MA H, WANG J B. Theory of instrument accuracy[M]. Beijing:Beihang University Press, 2009.

- [16] 杨俊杰, 张国玉, 孙高飞, 等. 光电式日照计定标系统与校准方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(11):2805-2812.

YANG J J, ZHANG G Y, SUN G F, et al. Research on the calibration system and calibration method of photoelectric sunshine duration recorder [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38 (11): 2805-2812.

作者简介



苏拾 (通信作者), 2012 年于长春理工大学获得博士学位, 现为长春理工大学博士。主要从事太阳模拟技术与 LED 应用技术等方面的研究工作。

Email: sushi@cust.edu.cn

Su Shi (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Changchun University of Science and Technology in 2012. He is currently an associate professor at Changchun University of Science and Technology. His research interests include solar simulation technology and LED application technology.



王逸文, 2016 年于重庆理工大学获得学士学位, 现为长春理工大学硕士研究生, 主要从事太阳模拟技术研究。

E-mail: ewin.wang@foxmail.com

Wang Yiwen received his B. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2016. He is currently a M. Sc. candidate at Changchun University of Science and Technology. His research interest is solar simulation technology.