

单自由度动态太阳光模拟系统的设计与控制

王红睿¹, 李会端², 王玉鹏¹, 方伟¹, 王凯¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 楚雄师范学院, 云南 楚雄 675000)

摘要: 为了给不宜翻转安装、不宜被旋转的航天太阳跟踪产品提供模拟太阳光, 提出了调整反射镜姿态的动态太阳光模拟方法, 设计并实现了单自由度太阳光模拟系统。系统包括太阳模拟器、运动台、平面反射镜、编码器、光栅尺、电机和控制系统等。系统通过同时调整平面反射镜的水平位移和倾角, 将模拟太阳光总是投射到航天太阳跟踪系统中的太阳敏感器处, 保证了航天太阳跟踪产品在模拟太阳光照试验中完全自主运动, 不被转动或翻转安装, 保护了航天产品中的敏感机械组件。系统建立的光照环境贴近真实太阳光照, 便于航天太阳跟踪产品调试和测试。试验结果表明, 单自由度太阳光模拟系统可满足航天太阳跟踪产品的测试需求, 模拟太阳光入射偏差为 0.698 4 mm。

关键词: 环境模拟; 物理仿真; 太阳模拟器

中图分类号: TM923 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2582-07

Design and control of dynamical sunshine simulation system with one degree of freedom

Wang Hongrui¹, Li Huiduan², Wang Yupeng¹, Fang Wei¹, Wang Kai¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Chuxiong Normal University, Chuxiong 675000, China)

Abstract: Dynamical sunshine simulation method was proposed by controlling reflection-mirror's attitude in order to provide simulated sunlight for space products of solar-tracking. It is better to install space products of solar-tracking without reversing and not to rotate space products of solar-tracking. Sunshine simulation system with one degree of freedom was designed and implemented. The system included solar-simulator, moving table, reflection mirror, coder, grating ruler, motors and etc. Light from solar-simulator was always reflected to sun sensor in the space products of solar-tracking by controlling both displacement and inclination of the reflection mirror simultaneously. The space product moved by itself in the experiments of simulated sunlight. The space product was not moved by any other devices and not installed with reversing. Thus sensitive mechanical elements in the space products for solar-tracking were protected. Simulated sunshine environment provided by the system was close to the real sunlight

收稿日期: 2013-12-19; 修订日期: 2014-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(61077080); 云南省应用基础研究项目(2012FD050); 吉林省科技发展计划项目(20130101044JC)

作者简介: 王红睿(1980-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事空间太阳活动观测、非线性控制等方面研究。

Email: wanghongrui01@sina.com

illumination. Convenience was provided for debugging and testing of the solar tracking device. Experiments prove that the proposed sunshine simulation system is able to provide proper simulated sunlight for space products of solar-tracking. Deviation of incoming simulated sunlight is 0.698 4 mm.

Key words: environment simulation; physical simulation; solar simulator

0 引言

航天太阳跟踪装置可承载太阳活动观测仪器对日定向,在轨获取较高的太阳指向精度,有助于获取高质量的太阳活动遥感数据产品,为研究全球气候变迁等提供基础的数据支持,受到了相当关注^[1-2]。为调试、测试在轨太阳跟踪系统的闭环跟踪性能,一般采用太阳光模拟装置令系统中的太阳敏感器成像^[3]。不仅要求模拟太阳光的辐照强度、准直角、辐照不均匀度、不稳定性^[4-5]等指标满足要求,令太阳敏感器正常工作,同时要求入射模拟太阳光还应是动态的,俯仰角或方位角可随时间变化。目前,为了测试航天太阳跟踪装置,一般采用“太阳模拟器+转台”的方案^[6]。待测产品固定于转台上,太阳模拟器位置固定。太阳模拟器出射光方向始终不变,转台匀速旋转,相对于太阳跟踪设备,入射模拟太阳光的俯仰角或方位角改变。这种“太阳模拟器+转台”的方法有若干局限性。第一,转动航天产品引入了潜在的风险,例如碰撞、跌落等。第二,试验中有时须翻转航天产品到特定姿态后固定在转台上。这种安装方式不利于机械结构复杂的航天产品。第三,产品前期调试中,需频繁在转台上拆卸以调试机械、光学等子系统,频繁的拆卸操作可能耗费大量时间;另外,使用者须随转台运动来观察光照,测试信号较困难,不便于前期的产品调试。

FY-3(03)星太阳辐射监测仪具有自主太阳跟踪系统^[7],包括锁定装置、内框架、外框架、电机、轴承、传动装置等复杂机械结构^[8]。若采用“太阳模拟器+转台”的太阳光照模拟方法,需翻转安装产品,导致自主太阳跟踪系统的内、外框机械结构不再平衡,重力作用、活动部件转动等因素将损伤航天产品的精密轴承等机械组件,产生难以预料的技术风险。因此,为保护航天产品,在调试、测试系统对日跟踪性能的模拟太阳光照试验中,太阳辐射监测仪应完全自主运动,不宜被转台等外部设备旋转,亦不宜频繁

在转台上拆卸。入射的模拟太阳光应相对航天太阳跟踪装置主动变化,形成俯仰角或方位角可变的模拟太阳光。FY-3(03)星太阳辐射监测仪难以使用“太阳模拟器+转台”的一般太阳光模拟方法。为了解决这个问题,笔者提出了一种通过调整平面反射镜姿态来建立动态模拟太阳光照环境的方法,设计了单自由度动态太阳光模拟系统,构造了系统控制器。系统通过调整平面反射镜的倾角和水平位移,将太阳模拟器发出的模拟太阳光总是投射到航天太阳跟踪系统的太阳敏感器处。待测的航天产品完全自主运动,不被翻转安装,不被外界设备移动,不需被频繁拆卸。建立的太阳光照环境直观,贴近真实太阳光照情况,便于调试、测试太阳跟踪装置。模拟太阳光俯仰角或方位角自动变化,光照环境可多次复现,能满足航天太阳跟踪装置的需求。

1 系统概述

单自由度太阳光模拟系统 SSSTSIM-1 包括小型太阳模拟器、水平位移导轨、水平位移反馈单元、运动台、平面反射镜、角度编码器、位移电机、旋转电机和控制系统等,见图 1 和图 2。位移和旋转电机均选用两相混合式步进电机。以增量光栅尺来测量平面反射镜的水平位移。

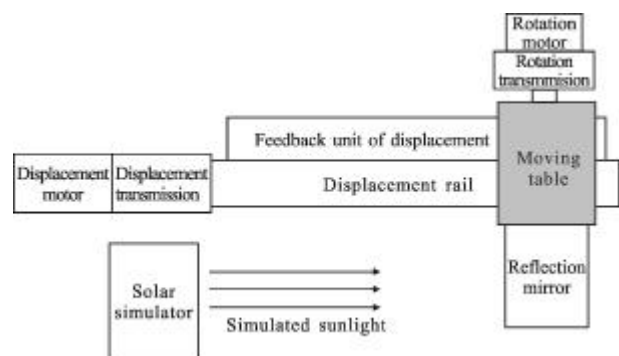


图 1 单自由度太阳光模拟系统的俯视图

Fig.1 Looking-down illustration of sunshine simulation system with one degree of freedom

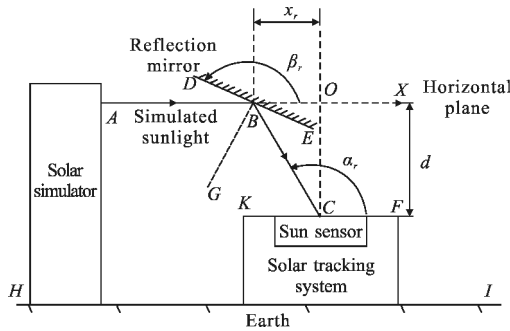


图 2 系统坐标图, $x_r < 0$

Fig.2 System coordination, $x_r < 0$

小型太阳模拟器包括光源、氙灯、聚光系统、光学积分器、准直系统和太阳光谱辐照度分布匹配滤光片等组件。光源为轴对称的短弧氙灯。氙灯出射的光首先由聚光镜单元会聚并反射；然后在光学积分器内形成一个期望的辐照度分布；这个分布再经各元素透镜，在叠加透镜的焦平面上形成一个辐照度均匀的辐照面；最后，经准直透镜投影成像在目标区域上。小型太阳模拟器的口径是 100 mm，模拟太阳光辐照度最大可达到 0.15 个太阳常数。模拟太阳光的光束准直角为 $\pm 16'$ ，辐照不均匀度为 $\pm 5\%$ ，辐照不稳定性为 $\pm 2\%$ ，模拟太阳光的设计工作距离为 2 m。

平面反射镜表面镀有加硬铝反射膜^[9]，在可见光波段的设计反射率为 85%，基底材料为浮法玻璃，应用波段为 400~700 nm，反射镜中心厚度为 40 mm。

系统上电后，首先平面镜回位移初始点；接着，用户设置光照模拟参数；之后，根据用户设置参数，计算模拟太阳光期望倾角，生成反射镜期望倾角和位移；最后，系统读取光栅位移传感器提供的平面反射镜位移反馈，进行平面反射镜的位移控制，同时，结合编码器的平面反射镜倾角反馈，进行平面反射镜的角度控制。

2 太阳光模拟方法

小型太阳模拟器位置固定不变，放置于水平面上。通过调整平面反射镜倾角、平面反射镜的水平位移，改变模拟太阳光方向，将模拟太阳光总是反射到航天太阳跟踪装置的太阳传感器处。

以俯仰角可变的试验为例说明单自由度太阳光模拟方法，方位角可变的太阳光模拟方法与之类似。图 3 和图 4 中，AB 为小型太阳模拟器的主光轴；CO

为太阳传感器的主光轴；O 为坐标原点；DE 为平面反射镜的反射面；B 点垂直纸面的方向为反射镜旋转轴方向；航天太阳跟踪装置中太阳传感器上表面保持水平时，太阳传感器的上表面为 CF；BG 为入射模拟太阳光 AB 在平面反射镜上的法线方向；HI 为太阳跟踪装置的安装底面。

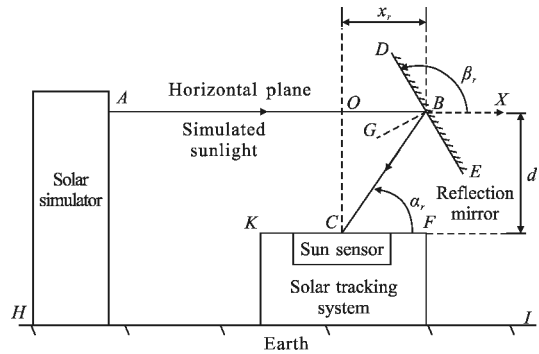


图 3 系统坐标图, $x_r \geq 0$

Fig.3 System coordination, $x_r \geq 0$

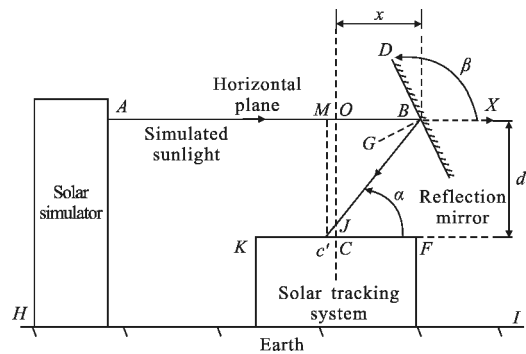


图 4 $x > 0$ 且 $CC' < 0$ 时的系统坐标图

Fig.4 System coordination, $x > 0$ and $CC' < 0$

系统满足如下条件：(1) 小型太阳模拟器的主光轴 AB 平行于水平面。(2) 太阳跟踪装置安装在水平面。(3) 太阳传感器上表面保持水平时，太阳传感器的主光轴 CO 与小型太阳模拟器的主光轴 AB 垂直。

图 3 和图 4 中，x 为平面反射镜沿水平方向在 X 轴上的位移；d 为小型太阳模拟器主光轴 AB 与太阳传感器上表面间的最小距离；beta 为平面反射镜与水平面的倾角，相对于 OX，逆时针旋转为正；alpha 为入射到太阳传感器的模拟太阳光俯仰角，相对于 CF，逆时针旋转为正。alpha_r 为入射到太阳传感器中的模拟太阳光期望俯仰角；x_r 为平面反射镜沿水平方向在 X 轴上的期望位移；beta_r 为平面反射镜与水平面的期望倾角。

假设模拟太阳光俯仰角、平面反射镜倾角和水平位移三者均无偏差跟踪参考。

期望位移 $x_r < 0$ 时,系统坐标图见图 2,有

$$\beta_r + \angle DBA = \pi \quad (1)$$

反射镜期望倾角为:

$$\beta_r = \pi - \angle DBA = \frac{\pi}{2} + \frac{\alpha_r}{2} \quad (2)$$

平面反射镜沿水平方向的期望位移为:

$$x_r = \frac{d}{\tan(\alpha_r - \pi)} \quad (3)$$

期望位移 $x_r \geq 0$ 时,见图 3。平面反射镜沿水平方向的期望位移为:

$$x_r = \frac{d}{\tan(\alpha_r)} \quad (4)$$

3 星上太阳光矢量计算

由卫星的轨道参数、时间等参数来计算卫星太阳跟踪系统本体坐标系下的太阳光矢量^[10]。

地心坐标系中太阳赤经 α_s 及太阳赤纬 δ_s 为:

$$\tan \alpha_s = \cos \varepsilon \sin \Theta / \cos \Theta \quad (5)$$

$$\sin \delta_s = \sin \varepsilon \sin \Theta \quad (6)$$

式中: Θ 为太阳真黄经; ε 为黄赤交角。

可根据当前时间折算儒略日等后确定太阳真黄经、黄赤交角等参数。

太阳光单位矢量在地心惯性坐标系中的分量为:

$$S_1 = \begin{bmatrix} \cos \delta_s \cos \alpha_s \\ \cos \delta_s \sin \alpha_s \\ \sin \delta_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_r \\ \varphi_r \\ \gamma_r \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: α_r 、 φ_r 和 γ_r 分别为太阳光单位矢量在地心惯性坐标系中的俯仰角、偏航角和滚转角。

将地心坐标系中的太阳光矢量转换到卫星上太阳跟踪系统本体坐标系中

$$S = T_3 \times T_2 \times T_1 \times S_1 \quad (8)$$

式中: T_1 为地心惯性坐标系到航天器轨道坐标系的转换矩阵; T_2 为航天器轨道坐标系到航天器本体坐标系的转换矩阵; T_3 为航天器本体坐标系到太阳跟踪系统坐标系的转换矩阵; S 为星上太阳跟踪系统本体坐标系下的太阳光矢量。

4 系统控制

4.1 位移控制

采用封闭式增量光栅尺来获取反射镜位移 x 的

反馈。光栅尺有效量程为 100~3 200 mm。

光栅尺将莫尔条纹转换为正弦变化的电信号后,输出两路相位差 90° 的方波信号 A 和 B。信号 A 和 B 的逻辑关系为:(1) 指示光栅正向移动时,在一个周期内,A、B 两相信号状态变化为:00-10-11-01,位移计数器加一计数。(2) 当指示光栅负向移动时,A、B 两相信号状态变化为:00-01-11-10,位移计数器减一计数。(3) 若出现其他状态转移,视为干扰,不计数。采用可编程器件 FPGA 构建位移计数器,对信号 A 和 B 进行计数^[11]。位移计数器为 c。保存 A、B 两相信号当前采样和上一采样状态的寄存器变量为 R。R(0)保存 B 相信号当前采样值,R(1)保存 A 相信号当前采样值,R(2)保存 B 相信号前一采样值,R(3)保存 A 相信号前一采样值。以 VHDL 语言,位移计数的过程简述如下。

IF (同步时钟上升沿) THEN

R(0)=B;

R(1)=A;

R(2)=R(0);

R(3)=R(1);

case R is

WHEN

case R is

when "0010" => c <= c + 1;

when "1011" => c <= c + 1;

when "1101" => c <= c + 1;

when "0100" => c <= c + 1;

when "0001" => c <= c - 1;

when "0111" => c <= c - 1;

when "1110" => c <= c - 1;

when "1000" => c <= c - 1;

when others => NULL;

end case;

平面反射镜位移 x 反馈为:

$$x = x_0 + C \times C_u \quad (9)$$

式中: x_0 为位移初始点对应的位移零点; C_u 为光栅尺输出的单个脉冲信号对应的距离。

平面反射镜的位移偏差 e_x 为:

$$e_x = x_r - x \quad (10)$$

可采用 PID 等多种方法来设计位移控制器^[12-17]。这里,位移控制器的控制输出为各采样时刻位移电

机的驱动脉冲数 p_x :

$$p_x = k_x e_x \quad (11)$$

式中: k_x 为位移控制器的控制增益。

为了加快控制器响应, 根据平面反射镜的位移偏差 e_x , 构造模糊逻辑, 在线调整位移控制器的增益 k_x 。以 Mamdani 型推理逻辑构造调整位移控制器增益 k_x 的模糊逻辑。输入变量为平面反射镜的位移偏差, 模糊子集为 {ZE, SM, MI, LA, VLA}。输入变量的隶属度函数采用均匀分布的三角形函数。输出为位移控制器的控制增益。

位移控制器增益的模糊逻辑规则为:

规则 j 若 $|e_x|$ 为 D_{xj} , 则 k_x 为 K_{xj} ($j=1, 2, \dots, 5$)

4.2 角度控制

平面反射镜的倾角偏差 e_β 为:

$$e_\beta = \beta_r - \beta \quad (12)$$

其中, 平面反射镜与水平面倾角 β 的反馈由绝对式编码器提供。绝对式编码器输出位数为 16 位, 并行输出, 输出码制为自然二进制码。

绝对式编码器与平面反射镜的旋转轴通过同步带轮联接。同步带轮的减速比为 2, 若平面反射镜转动角度为 θ , 绝对式编码器旋转转动角度为 2θ 。

倾角控制器的控制量为各采样时刻旋转电机的驱动脉冲数 p_β :

$$p_\beta = k_\beta e_\beta \quad (13)$$

式中: k_β 为倾角控制器的增益。

与位移控制器设计相似, 同样以 Mamdani 型推理逻辑构造可调整增益 k_β 的模糊逻辑。输入为反射镜的倾角偏差, 模糊子集为 {ZE, MI, LA}。输入变量的隶属度函数采用均匀分布的三角形函数。模糊逻辑的输出为倾角控制器增益。模糊逻辑规则为:

规则 j 若 $|e_\beta|$ 为 $D_{\beta j}$, 则 k_β 为 $K_{\beta j}$ ($j=1, 2, 3$)

5 系统误差

模拟太阳光俯仰角的偏差为:

$$e_\alpha = \alpha_r - \alpha \quad (14)$$

分析 $x > 0$ 且 $CC' < 0$ 的情况, 见图 4。由于平面反射镜的倾角偏差, 实际的模拟太阳光俯仰角为:

$$\alpha = 2\beta - \pi = 2\beta_r - 2e_\beta - \pi \quad (15)$$

由第 3 节的结果, 有:

$$2\beta_r - \pi = \alpha_r \quad (16)$$

进一步得到模拟太阳光俯仰角的偏差:

$$e_\alpha = 2e_\beta \quad (17)$$

由于反射镜位移偏差和倾角偏差的影响, 从太阳模拟器主光轴处发出的光, 经平面镜反射后, 没有从期望的位置(C 点)入射, 而是从 C' 点入射, 两者间距离为模拟太阳光入射偏差 e_d :

$$e_d = CC' = OM = BM + OB = -\frac{d}{\tan(\alpha)} + x \quad (18)$$

$x > 0$ 且 $CC' \geq 0$ 的情况与图 4 的情况类似, 见图 5, 偏差与公式(18)相同。与 $x > 0$ 的情况类似, $x \leq 0$ 时, 模拟太阳光入射偏差均为:

$$e_d = CC' = OM = OB + BM = x + \frac{d}{\tan(\pi - \alpha)} \quad (19)$$

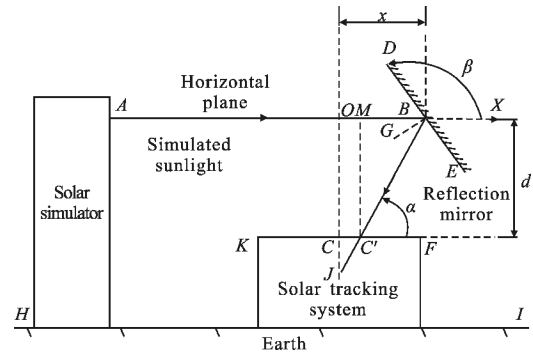


图 5 $x > 0$ 且 $CC' \geq 0$ 时的系统坐标图

Fig.5 System coordination, $x > 0$ and $CC' \geq 0$

6 试验

在太阳光照模拟试验中, 首先根据标准硅光电电池的辐照度测量结果, 调整太阳模拟器的功率, 令太阳模拟器的出射光经过平面反射镜后, 辐照度达到 0.12 个太阳常数, 以使反射后的模拟太阳光可透过太阳传感器中的滤光片成像。另外, 考虑到反射镜对模拟太阳光的衰减作用, 有时还需微调太阳模拟器的聚光镜单元, 令出射的模拟太阳光辐照度达到 0.15 个太阳常数。

采用文中提出的单自由度太阳光模拟系统, FY-3(03)星太阳辐射监测仪的模拟太阳光照试验情况见图 6。

根据第 5 节的方法获取模拟太阳光俯仰角的参考, 由控制上位机发送给下位机。6 次太阳光模拟试验的反射镜平均位移偏差和平均角度偏差见表 1。反射镜平均位移偏差为 0.198 1 mm, 反射镜平均角度偏差为 0.002 8°。根据第 5 节的偏差分析结果, 可知模拟太阳光俯仰角的平均控制精度为 0.005 6°。1#

太阳光模拟试验的太阳模拟器入射光偏移距离等见图 7。模拟太阳光入射偏差为太阳模拟器主光轴到太阳传感器中心线的偏移距离。在太阳光模拟试验中,平均的模拟太阳光入射偏差为 0.698 4 mm,由于太阳模拟器的口径为 100 mm,模拟太阳光中心距离太阳传感器主光轴的距离是较小的,经反射镜后模拟太阳光可入射到太阳传感器中。试验中,太阳传感器的俯仰角反馈表明了模拟太阳光始终在太阳传感器的视场中,没有出现模拟太阳光逸出太阳传感器视场的情况。



图 6 单自由度太阳光模拟系统 SSSTSIM-1

Fig.6 Sunshine simulation system with one degree of freedom SSSTSIM-1 in experiment

表 1 太阳光模拟试验结果

Tab.1 Experimental results of sunshine simulation

No.	Average displacement error of reflection mirror/mm	Average angular error of reflection mirror/(°)	Deviation of simulated sunlight/mm
1#	0.198 1	0.002 8	0.697 9
2#	0.210 5	0.002 5	0.665 8
3#	0.170 8	0.002 9	0.715 3
4#	0.195 2	0.003 1	0.758 2
5#	0.187 3	0.002 7	0.674 6
6#	0.190 6	0.002 6	0.678 7
Average	0.192 1	0.002 8	0.698 4

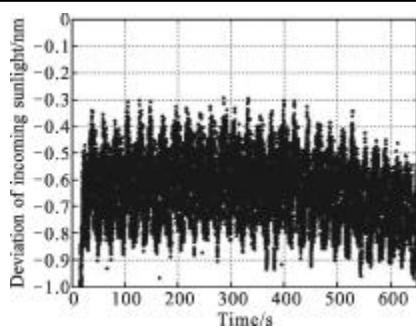


图 7 模拟太阳光入射偏差,对应 1# 试验

Fig.7 Displacement error of incoming light in experiment 1#

7 结 论

为了调试、测试航天太阳跟踪系统,一般采用“太阳模拟器+转台”的太阳光照模拟方法,这种太阳光照模拟方法要旋转待测的航天产品,有时还须翻转安装航天产品。某些机械结构复杂的航天太阳跟踪产品不宜使用这种一般的“太阳模拟器+转台”的太阳光照模拟方法。在地面测试工况下,因为重力作用、旋转因素等原因,翻转安装的方式可能损害轴承等精密机械组件,不利于结构复杂的航天产品,引入较大的技术风险。另外,在早期产品调试中,频繁在转台上拆卸、操作航天产品,较为麻烦,影响产品研制进度。结合 FY-3(03)星太阳辐射监测仪模拟太阳光照试验,以保护航天太阳跟踪产品精密机械构件为目标,在航天太阳跟踪装置不被转动、不被旋转安装的限制条件下,提出了同时调整反射镜倾角和位移的太阳光模拟方法,将模拟太阳光总是投射到太阳跟踪系统处。设计了单自由度太阳光模拟系统,规划了系统工作模式,构造了系统控制器,建立了俯仰角或方位角可变的模拟太阳光环境,保证了待测航天产品在模拟太阳光照测试中完全自主运动。试验结果表明,单自由度太阳光模拟系统满足航天太阳跟踪装置的模拟太阳光照试验要求,能够提供俯仰角或方位角动态变化的模拟太阳光。

参考文献:

- [1] Frohlich Claus. Total solar irradiance observations [J]. Surveys in Geophysics, 2012, 33(3-4): 453-473.
- [2] Liu Enchao, Zheng Xiaobing, Li Xin, et al. Wavelength calibration of absolute irradiance spectra-radiometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(3): 608-615. (in Chinese)
刘恩超, 郑小兵, 李新, 等. 绝对光谱辐照度仪的波长定标 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(3): 608-615.
- [3] Liu Xiaofeng, Fan Qiaoyun, Zhang Guangjun. Imaging modeling and simulation for digital sun sensor [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3): 677-683. (in Chinese)
刘啸峰, 樊巧云, 张广军. 数字太阳敏感器成像建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 677-683.
- [4] Pan Yongqiang, Bai Tao, Hang Lingxia. Study on AM1.5 filter in solar simulator for photovoltaic module solar simulator [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9):

- 2484-2488. (in Chinese)
潘永强, 白涛, 杭凌侠. 光伏电池组件太阳模拟器 AM1.5 滤光片的研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2484-2488.
- [5] Zhou Jian, Bian Jieyu, Li Hongfei, et al. Wavelength calibration of absolute irradiance spectra-radiometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(6): 1517-1523. (in Chinese)
周健, 卞洁玉, 李红飞, 等. 晶硅光伏电池的标准测试 [J]. 光学 精密工程, 2014, 22(6): 1517-1523.
- [6] Liu Shenzhao. Semi-physical simulation method of satellite control system using multi-turn-tables and multi-simulators [J]. Control Engineering, 2004, 3: 7-13. (in Chinese)
刘慎钊. 卫星控制系统多转台多模拟器半物理仿真方法 [J]. 控制工程, 2004, 3: 7-13.
- [7] Yang Zhenling, Fang Wei, Wang Kai, et al. Field of view measurement and correction term calculation for small-field radiometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 870-875. (in Chinese)
杨振岭, 方伟, 王凯, 等. 小视场绝对辐射计视场测量及修正项计算[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(4): 870-875.
- [8] Zheng Liming, Huang Jianbo. Co-simulation of solar tracker based on ADAMS and Simulink [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(5): 1212-1219. (in Chinese)
郑黎明, 黄剑波. 基于 ADAMS 和 Simulink 的太阳跟踪器联合仿真[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(5): 1212-1219.
- [9] Zhou Ziyun, Gao Yunguo, Shao Shuai, et al. Design of fast steering mirror using flexible hinge[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(6): 1545-1554. (in Chinese)
周子云, 高云国, 邵帅, 等. 采用柔性铰链的快速反射镜设计[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(6): 1545-1554.
- [10] Sun Jun, Zhang Shijie, Li Baohua. Autonomous navigation based on star light and ultraviolet earth sensors [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 870-875. (in Chinese)
孙俊, 张世杰, 李葆华. 利用地球紫外和恒星可见光的卫星自主导航[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(5): 1192-1198.
- [11] Feng Shouting, Li Di, Liu Tanyi. High precision raster ruler data acquisition card based on FPGA [J]. Instrument Technique and Sensor, 2006, 2: 55-57. (in Chinese)
冯寿廷, 李迪, 刘潭义. 基于 FPGA 的高精度光栅计数卡 [J]. 仪表技术与传感器, 2006, 2: 55-57.
- [12] Liu Bo, Sun Yongquan, Guo Jianying. Modeling and control for PZT micro-displacement actuator [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1501-1509. (in Chinese)
刘泊, 孙永全, 郭建英. 压电陶瓷位移驱动器建模与控制 [J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6): 1501-1509.
- [13] Nian Wei, Liu Zhaojun, Lin Zhe, et al. Optical path scanning control system design of the Fourier spectrometer [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 218-227. (in Chinese)
粘伟, 刘兆军, 林喆, 等. 傅里叶光谱仪的光程扫描控制系统设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2085-2091.
- [14] Li Pengzhi, Yan Feng, Ge Chuan, et al. Wavelength calibration of absolute irradiance spectra-radiometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(2): 414-419. (in Chinese)
李朋志, 闫丰, 葛川, 等. 压电驱动器的开闭环迭代学习控制[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(2): 414-419.
- [15] Liang Fengchao. Constant exposure dose control for laser direct writing of mesh in a deep concave spherical substrate [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(2): 381-386. (in Chinese)
梁凤超. 深凹球面网栅恒定曝光量激光直写控制实现[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 381-386.
- [16] Li Di, Chen Xiangjian, Xu Zhijun. Gain adaptive sliding mode controller for flight attitude control of MAV[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(5): 1183-1191. (in Chinese)
李迪, 陈向坚, 续志军. 增益自适应滑模控制器在微型飞行器飞行姿态控制中的应用[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(4): 1086-1095.
- [17] Ma Jianguang, Tang Tao. Review of compound axis servomechanism tracking control technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 218-227. (in Chinese)
马佳光, 唐涛. 复合轴精密跟踪技术的应用与发展 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 218-227.