

GE Shirui, SU Shi, HOU Xing'an, WANG Donglai, GUO Yuxi, LIU Jinsheng, FAN Yihong, FANG Chunshuai. Design of Automatic Changing Device for Multiple Star Points of Single Star Simulator (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(1): 221–231. CSTR:32142.14.cjss.2025-0003. DOI:10.11728/cjss2026.01.2025-0003

单星模拟器多星点自动更换装置设计*

葛世蕊¹ 苏拾^{1,2} 侯兴安¹ 王东来¹
郭玉玺¹ 刘近生¹ 范一宏¹ 方纯帅¹

1(长春理工大学光电工程学院 长春 130022)

2(光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室 长春 130022)

摘要 为解决单星模拟器模拟不同恒星目标时需要手动更换星点板、检定效率低、光轴一致性差等问题,设计一种单星模拟器多星点自动更换装置. 基于离轴反射式单星模拟器工作原理提出一种转轮式多星点自动更换装置,根据恒星模拟理论和设计要求确定星点板微孔尺寸,设计星点板安装及调整结构,以轻量化为目标对星点盘进行有限元分析与优化;分析杂光传输来源,设计消杂光结构,降低对星等模拟的影响;设计电控系统实现星点板自动切换,通过自校正控制减少星点板的轴向偏移误差,并对影响星点板切换精度的误差源进行分析. 结果表明,星点单星张角误差优于 $1.2''$,星点位置光轴一致性优于 $10\text{ }\mu\text{m}$,满足了单星模拟器模拟不同恒星目标时的高效性和星点张角与位置的精确性要求.

关键词 单星模拟器, 多星点模拟, 自动调整, 杂散光分析, 光轴一致性

中图分类号 V448.25, V447

Design of Automatic Changing Device for Multiple Star Points of Single Star Simulator

GE Shirui¹ SU Shi^{1,2} HOU Xing'an¹ WANG Donglai¹
GUO Yuxi¹ LIU Jinsheng¹ FAN Yihong¹ FANG Chunshuai¹

1(School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022)

2(Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Control and Optical Information Transmission Technology,
Ministry of Education, Changchun 130022)

Abstract In order to solve the problems of manually changing the star point plate when simulating different stellar targets with a single star simulator, low efficiency of calibration, poor consistency of the optical axis, etc. A single-star simulator multi-star point automatic replacement device is designed. Based on the working principle of off-axis reflective single star simulator, a rotating wheel type multi-star point automatic replacement device is proposed, according to the theory and design requirements of

* 吉林省科技计划项目资助 (20190302064GX)

2025-01-06 收到原稿, 2025-06-25 收到修定稿

the stellar simulator to determine the size of the star point plate micro-aperture, to design the mounting and adjustment structure of the star point plate, to adjust the consistency of the star point micro-aperture with the optical axis of the optical system, and to carry out the finite element analysis and optimization of the star point disc with the goal of light weighting. Circularity, the sources of stray light transmission are analyzed and suppression measures are summarized, and a stray light cancellation structure is designed to reduce the impact on the magnitude simulation. The design of the electronic control system to achieve the automatic switching of the star point plate and the precision analysis of the error source of the influence. The results show that the single star point tensor angle error is better than $1.2''$, and the optical axis consistency of the star point position is better than $10\text{ }\mu\text{m}$, which meets the accuracy requirements of the single star tensor angle and the star point position of the single-star simulator when simulating different stellar targets, and improves the efficiency of the checking and simulation accuracy of the simulation of different stellar targets.

Key words Single star simulator, Multi-star point simulation, Automatic alignment, Stray light analysis, Optical axis consistency

0 引言

近年来,中国航天事业快速发展,星光探测和星光导航的应用越来越广泛^[1],星敏传感器是星光导航系统中高精度的姿态测量设备^[2],对作为星敏传感器的地面标定设备,即对星模拟器提出了大视场、高精度、多光谱、小型化、自动化等更高的技术要求^[3].在单星模拟器中,通常采用光源照亮不同尺寸的微孔星点,对不同张角的恒星目标进行模拟.

有研究通过点亮刻有4个星点孔的分划板实现16个无穷远星点像的模拟^[4].美国Hughes公司通过人工光源直接透射或经滤光片后照射星点板来模拟空间恒星^[5].Feng等^[6]采用光源经积分球出口照亮星点板的方法,经准直光学系统模拟无穷远处的星点.Gan等^[7]选择LED作为光源出光照亮星点板,对目标恒星进行模拟.Liu等^[8]以溴钨灯配合升色温滤光片为基底光源,多种LED进行补偿,照亮星点板模拟星点.Liu等^[9]将光源通过光阑调节进入积分球匀光,照射至焦平面处的星点板,经准直光学系统出射模拟无穷远星点.目前单星模拟器一次只能模拟一个恒星目标,模拟不同张角恒星目标时,需要手动更换星点板,存在操作复杂,光轴一致性差,有杂光影响,检定效率低等不足.

为此,针对离轴反射式单星模拟器设计一种电控多星点自动更换装置,基于恒星模拟理论分析,确定星点板微孔尺寸,利用有限元技术对装置结构进行分析与优化,提出一种消除杂散光的方法,拟定电控系

统方案,并对装置进行精度分析,多星点自动更换装置能够在单星模拟器中依次实现不同恒星目标的高效、准确模拟.

1 离轴反射式单星模拟器组成及工作原理

单星模拟器主要由LED及准直单元、可变光阑、光源控制系统、积分球、光电池、多星点自动更换装置及其控制系统和离轴反射式准直光学系统组成(见图1).

LED光源发出的光经其准直单元和可变光阑入射到积分球,积分球混光匀光后照亮星点板,经离轴反射式准直光学系统后成平行光出射^[10],实现无穷远处恒星目标的模拟.利用光电池、可变光阑和光源控制系统组成的双极反馈控制系统调节目标星等^[11],光源控制系统通过调整LED电流大小和光阑尺寸^[12],实现单星模拟器0~8 Mv高星等模拟.利用多星点自动更换装置电控切换不同微孔的星点板,可在离轴反射式单星模拟器中对不同几何特征的恒星目标实现高效准确的自动切换.

根据单星模拟器功能与技术要求,多星点自动更换装置设计指标列于表1.

2 多星点自动更换装置设计

2.1 恒星模拟理论

单星模拟器需要对星点大小进行模拟,星点大小

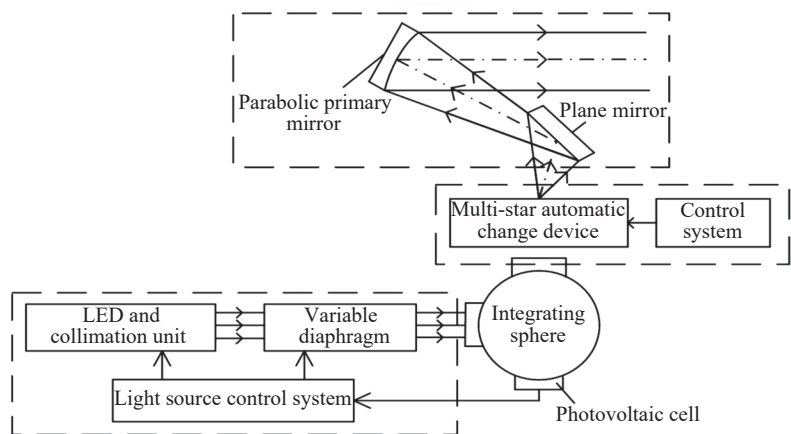


图 1 单星模拟器组成原理

Fig. 1 Composition principle of single star simulator

表 1 多星点自动更换装置设计指标
Table 1 Design index of multi-star point automatic replacement device

技术指标	设计要求
模拟星点数量	15
星点尺寸范围/ μm	15~230
单星张角误差/($''$)	<1.2
星点光轴一致性误差/ μm	<10
星点板更换方式	electric control

一般用其对地球的张角来表征, 恒星对地球张角如图 2 所示, 有

$$\theta = \frac{d}{D}. \quad (1)$$

其中, d 表示恒星的直径, D 表示恒星到地球的距离.

在星模拟器中, 用单星张角来表示恒星的大小, 与恒星的直径一致, 星模拟器单星张角如图 3 所示, 即

$$\theta' = \frac{d'}{f'}. \quad (2)$$

其中, f' 为星模拟器焦距, d' 为星点板微孔直径. 当星模拟器焦距一定时, 通过更换不同微孔尺寸的星点板模拟不同角度的恒星^[13]. 要求的单星张角越小时, 星点尺寸越小, 焦距越大, 因此 d' 不能太小, 通过上述分析推导计算, 最终选择 $\phi 15, \phi 25, \dots, \phi 230 \mu\text{m}$ 等 15 种微孔星点板模拟不同恒星目标.

2.2 多星点自动更换装置总体结构

多星点自动更换装置主要由星点盘、星点板安装及调整结构、伺服电机、电机支架、零位传感器、星点

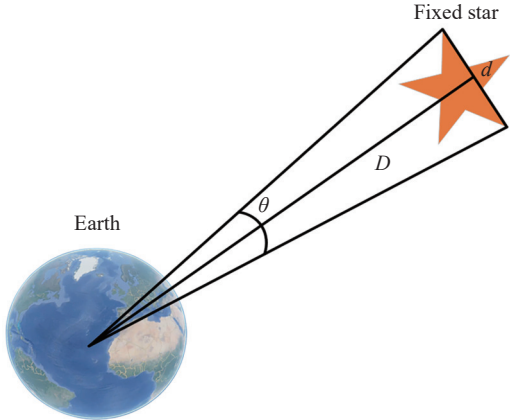


图 2 星对地球张角

Fig. 2 Angular of a star as seen from Earth

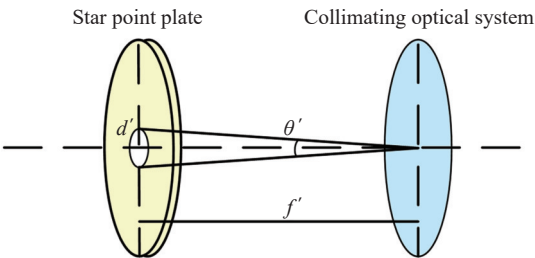


图 3 星模拟器单星张角

Fig. 3 Single-star angular of star simulator

精密调整装置 (方位电动旋转台、俯仰电动旋转台、水平电动升降台、垂直电动升降台) 和电控系统组成. 显示器软件界面发送指令到工控机内的运动控制卡, 电机驱动箱控制伺服电机, 使星点盘转动到与目标对应的星点板位置. 同样指令控制步进电机, 星点精密

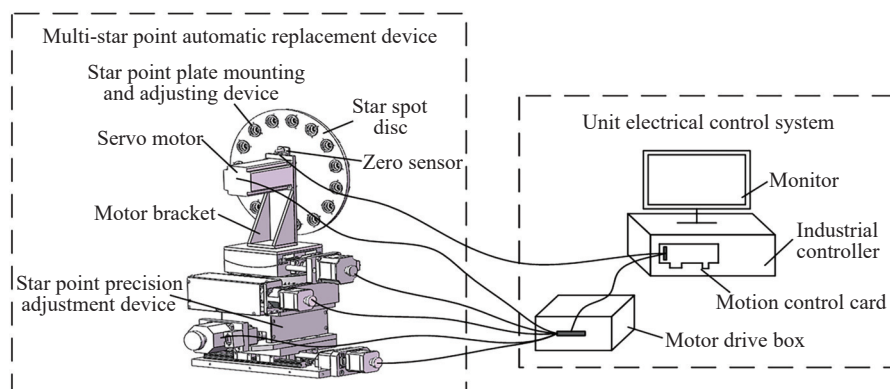


图 4 多星点自动更换装置总体结构

Fig. 4 Overall structure of automatic multi-star point changing device

调整装置控制星点盘, 确保每一路星点孔与光学系统的共轴性. 星点盘转动后需要复位操作, 因此发送指令启动零位传感器, 控制其转动到零位位置, 零位传感器检测到信号回传后, 伺服电机停止转动, 完成复位操作, 实现 15 个不同目标恒星的模拟, 多星点自动更换装置总体结构如图 4 所示.

2.3 星点板安装及调整结构设计

不同单星张角的恒星模拟需要不同微孔的星点板实现, 设计 15 个不同微孔大小的星点板, 每个星点板的中心采用激光加工^[14], 星点板直径均为 20 mm, 使用不锈钢作为基底材料, 考虑到星点板表面反射率问题, 在材料表面染黑, 使其表面不透光, 减小杂光影响, 星点板如图 5 所示.

改变传统星点板安装方式, 采用筒套筒结构形式, 方便 15 个星点板的固定与调节, 如图 6 所示, 将星点板置于星点板安装筒内部固定, 利用星点板压圈压固, 再采用聚四氟垫圈和压圈将其压固在星点板调节筒内部. 利用三个固定螺钉将星点板调节筒固定在

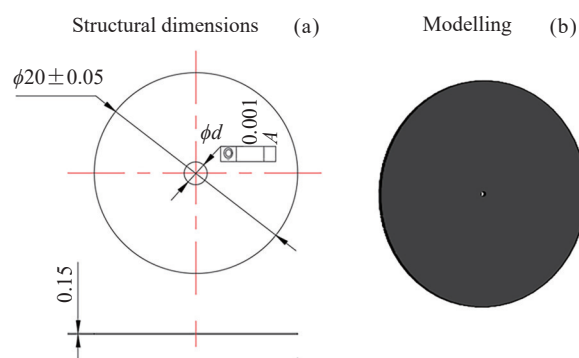


图 5 星点板

Fig. 5 Star point plate

星点盘上, 装调时, 通过四个径向调整螺钉调节星点板位置, 保证星点孔与光学系统的光轴一致性.

2.4 星点盘结构分析与优化

通过在星点盘不同通孔处安装星点板, 形成不同的安装及调整结构, 以实现 15 种不同单星张角恒星的模拟. 对星点盘结构静态分析, 采用补丁适形的算

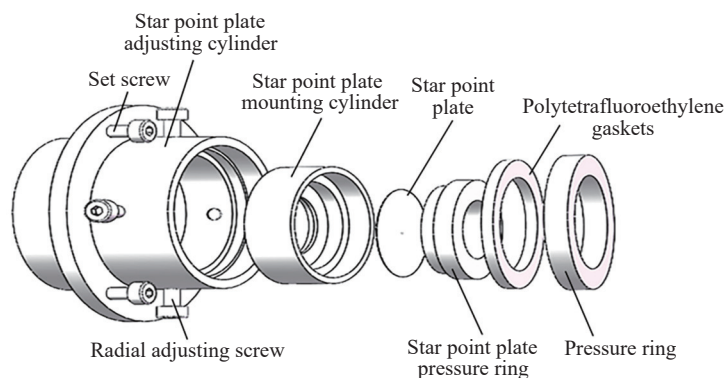


图 6 星点板安装及调整结构

Fig. 6 Mounting and adjustment structure of star point plate

法进行四面体单元网格划分^[15], 约束安装电机的两通孔内表面为固定面, 并施加电机工作时星点盘受到的瞬间最大力矩 (1.9 N·m) 进行仿真^[16], 图 7 为星点盘的受压形变和应力分布, 最大等效应力为 2.7963 MPa, 当其处于工作状态时, 星点盘组件边缘压力大. 星点盘中心变形较小, 边缘变形较大, 最大变形量为 1.7748×10^{-3} mm.

模态分析主要分析其固有频率和模态振型^[17], 为星点盘的动力性能提供参考, 约束安装电机的两个通孔内表面为固定面, 求解前六阶模态振型如图 8 所示. 星点盘的低阶固有频率较高, 最低阶固有频率为 350 Hz, 伺服电机工作时驱动系统频率为 50 Hz, 不接近设备的固有频率, 星点盘在工作状态下无共振现象发生^[18], 满足设计要求, 验证了多星点自动更换装置设计的合理性^[19].

以轻量化为目标优化星点盘, 确定星点盘厚度为优化参数, 采用拉丁超立方体抽样方法按 ± 2 mm 变量建立 5 个设计点, 采用克里金响应面类型建立近似代理模型, 有限元迭代分析得到各输出量关于星点盘厚度的局部灵敏度曲线 (见图 9).

由图 9 可知, 在 4~8 mm 区间, 随着星点盘厚度的增加, 星点盘的质量呈线性增大, 最大等效应力和最大变形均有降低趋势. 利用多目标遗传算法 (MOGA) 对近似代理模型进行优化, 软件默认给出三个优化的候选设计, 如表 2 所示.

在保证最大等效应力及最大变形变化较小的情况下, 减小星点调整盘的质量, 综合三个变量, 选择候选点 3 是最佳优化结果, 初始尺寸及优化后的尺寸列于表 3.

结果表明, 优化后最大等效应力和最大变形均有

些许增大, 但星点调整盘质量较优化前有少许减少, 确定能够满足要求, 且质量减轻^[20], 证明了对星点盘结构优化的正确性.

2.5 消除杂光分析与设计

单星模拟器模拟高星等恒星目标时, 随着模拟星等的提高, 恒星目标的亮度较弱^[21], 会受到入射孔径的衍射杂散光影响^[22], 影响星等模拟的准确度. 单星模拟器采用离轴反射式光路结构, 光路本身的杂光会导致星点成像对比度下降. 因此, 在多星点自动更换装置前、后均分别进行消杂光设计.

2.5.1 多星点自动更换装置前消杂光设计

高星等恒星目标为微弱光, 孔径衍射属于场内杂散光, 影响光强, 图像模糊导致对比度下降, 有

$$E' = E + E_{\text{stray light}}. \quad (3)$$

随着星等的提高, E 值降低, 导致最终星等模拟的准确度降低.

如图 10 所示, 在积分球和多星点自动更换装置之间加装黑色橡胶圈, 结合积分球入口处光源创造人工暗室条件, 橡胶圈的设计可以避免其他杂散光进入星点板微孔.

2.5.2 多星点自动更换装置后消杂光设计

多星点自动更换装置后的消杂光设计是利用遮光罩和挡光环组合结构实现杂散光的抑制, 遮光罩设计在星点板调节筒出口处, 使光瞳得到较好的衔接, 如图 11 所示. 遮光罩的基本原则是在不遮挡视场内光线的前提下, 尽可能地阻拦视场外的杂散光进入光学系统^[23], 主要用于抑制大角度入射的光线, 其长度受到光机系统结构尺寸的约束, 目前遮光罩结构尺寸较常用的计算公式如下^[24]:

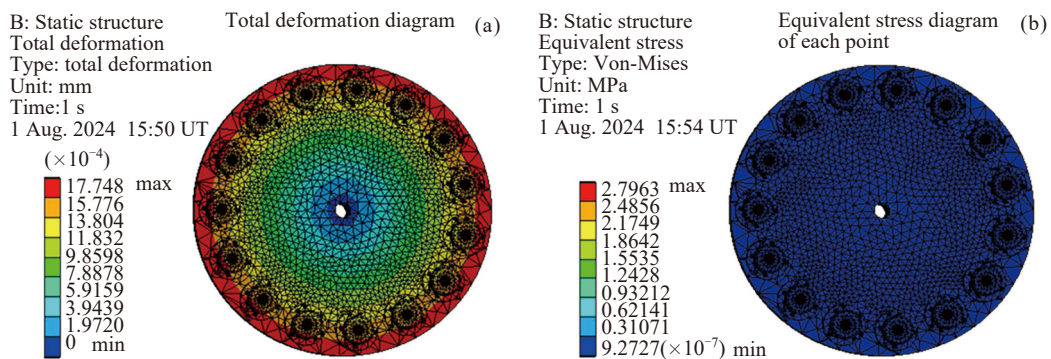


图 7 星点盘静态分析

Fig. 7 Static analysis of the star point disc

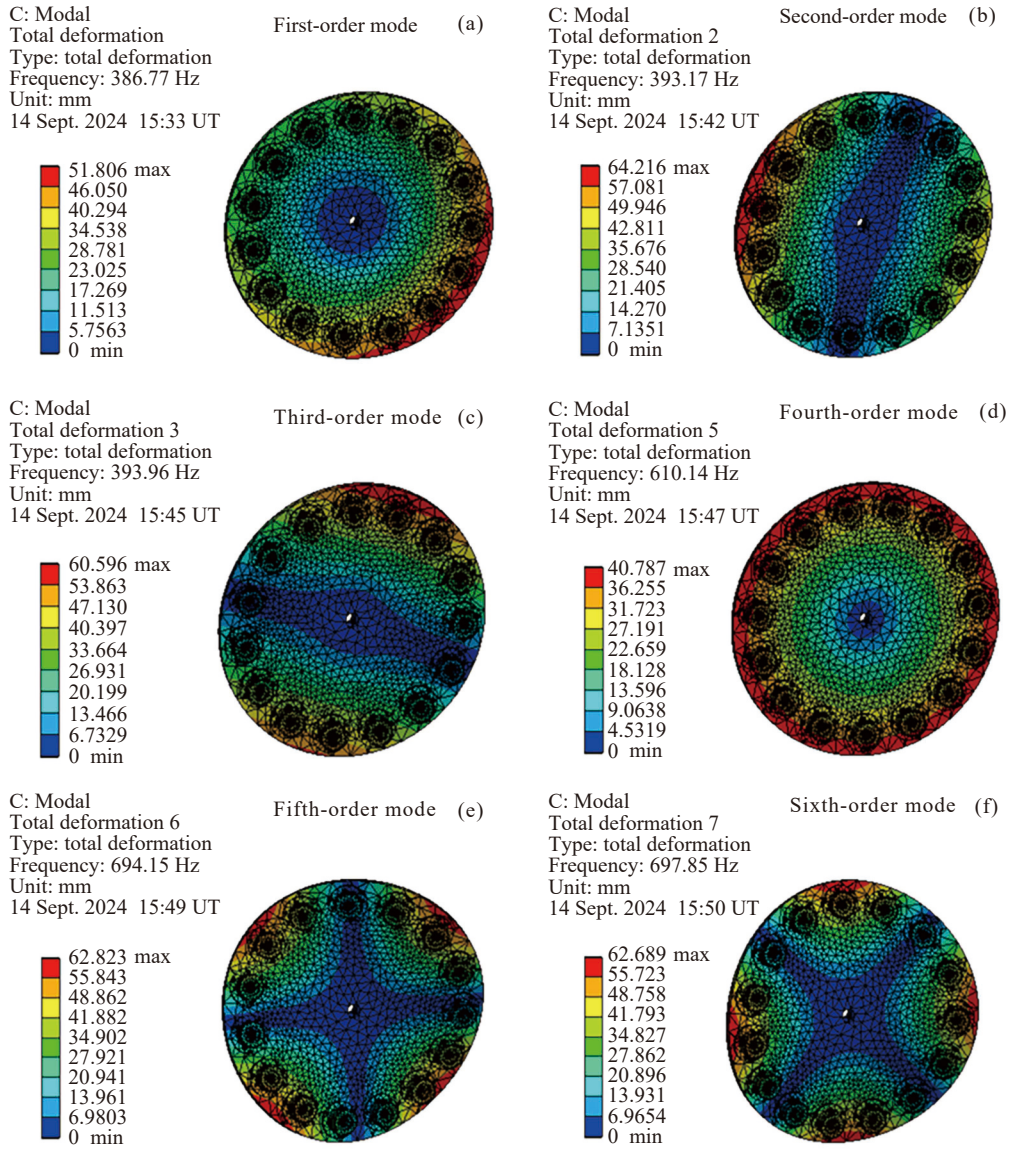


图 8 星点盘模态分析

Fig. 8 Modal analysis of the star point disc

$$D_1 = D_0 + 2L \tan \theta, \quad (4)$$

$$D_0 + \tan \theta = L \tan \alpha. \quad (5)$$

其中, L 为遮光罩的长度, α 为杂散光抑制角, θ 为半视场角, D_0 为内口径直径, D_1 为遮光罩直径。

已知遮光罩直径为 12 mm, 根据式 (4) 和 (5) 计算出在 $\alpha = 30^\circ$ 时, 图 11 所示光学系统需要的遮光罩长度为 9.5 mm, 内口径为 5.1 mm。

在星点板调节筒遮光罩内部设置竖直放置的挡光环结构, 以此来增加杂散光在系统内部的反射次数^[25]。挡光环的端面采用了 30° 的刀口形状设计, 在其表面上喷涂消光漆, 已知遮光罩的长度和直径, 直

接建模, 星点板调节筒内部消杂光结构如图 12 所示。

星点板调节筒内部的遮光罩与挡光环组合设计可以有效地消除杂散光, 通过消杂光结构的光束形成星点像背景较暗, 单星模拟器模拟微弱星光时的影响较小, 能够提高星点的成像质量和星等的模拟精度。

2.6 多星点自动更换装置电控系统设计

2.6.1 电控系统组成与工作原理

电控系统主要由显示器控制端、工控机、运动控制卡、零位传感器、电源、步进电机驱动器、伺服电机驱动器、步进电机和伺服电机组成。

电控系统控制原理如图 13 所示, 显示器与工控

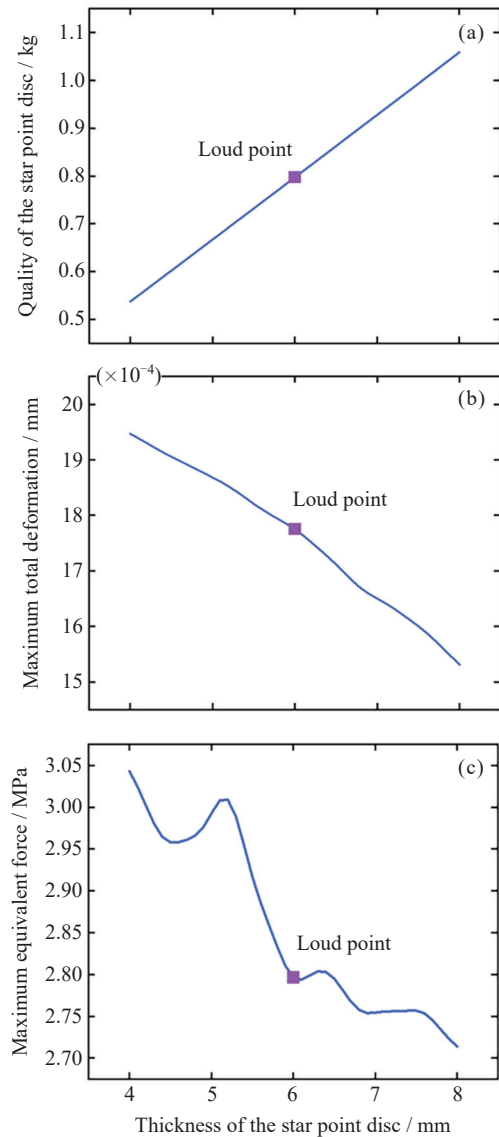


图 9 各输出量关于星点盘厚度的局部灵敏度曲线
Fig. 9 Local sensitivity curves for each output with respect to the thickness of the star point disc

机连接, 工控机执行运动控制算法, 将指令发送给内部集成的运动控制卡, 运动控制卡生成脉冲信号, 控制电机驱动器, 电源负责将 220 V 交流电转换为步进电机驱动器需要的 24 V 直流电源, 驱动器接收信号, 控制电机转动. 零位传感器通过数字输入/输出接口连接运动控制卡, 检测装置零点位置, 实现复位控制.

2.6.2 电控系统自修正控制

由于电控系统中伺服电机的加工误差, 在机械自锁的情况下, 轮系依然有一个小范围转动余量 θ' , 当星点盘转动进行星点板切换时, 星点板轴向偏移误差积累, 影响星点盘切换星点板时的定位精度. 利用自校准算法在切换过程中实时校准微小角度偏移, 实现伺服电机的位置环控制, 控制流程如图 14 所示. PID 算法如下:

$$u(k) = K_P e(k) + K_I \sum_{i=0} e_i + K_D [e(k) - e(k-1)]. \quad (6)$$

其中, $u(k)$ 为输出值, e 为误差项. 简化后可表示为

$$u(k) = [K_P \ K_I \ K_D] \cdot [e_P \ e_I \ e_D]^T. \quad (7)$$

其中,

$$\begin{cases} e_i = x_i - x_{\text{target}}, \\ e_P = e_i - e_{i-1}, \\ e_I = e_i, \\ e_D = e_i - 2e_{i-1} + e_{i+1}. \end{cases} \quad (8)$$

其中, e_i 为目标变量的当前值与目标值的差值, x_i 为由编码器算出的角度值. 利用 PID 算法可以实现切换星点板过程中的小角度校准.

3 多星点自动更换装置精度分析

3.1 单星张角误差

多星点自动更换装置设计完成后, 需要对其模拟

表 2 三个候选优化结果
Table 2 Three candidate optimization results

候选点		1	2	3
星点盘厚度/mm		4.3088	4.3321	4.3773
星点盘质量/kg	参数值	0.5773	0.5803	0.5862
	与参考值的偏差	-27.56%	-27.18%	-26.45%
最大总变形/mm	参数值	0.0019208	0.0019188	0.0019151
	与参考值的偏差	8.23%	8.12%	7.91%
最大等效应力/MPa	参数值	2.9784	2.9742	2.9673
	与参考值的偏差	6.51%	6.36%	6.11%

表 3 优化前后各数值的对比
Table 3 Comparison before and after optimization

优化目标	星点盘厚度/mm	星点盘质量/kg	最大总变形/mm	最大等效应力/MPa
初始值	6.0000	0.7970	0.0018	2.7963
优化值	4.3773	0.5862	0.0019	2.9673

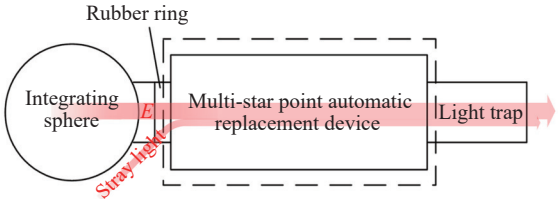


图 10 消杂光总体结构

Fig. 10 Overall structure of stray light suppression

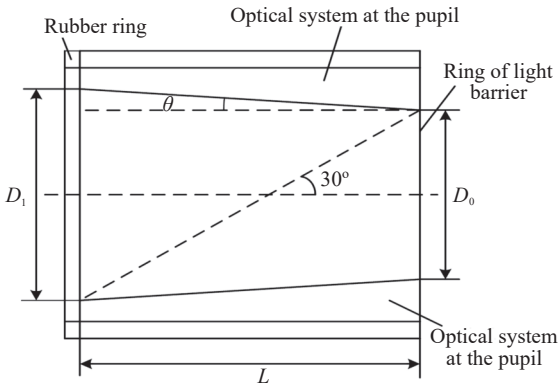


图 11 遮光罩外形尺寸

Fig. 11 Light baffle outline dimensions

的星点单星张角进行误差分析. 利用星点板加工精度误差与焦距误差计算单星张角系统误差, 单星张角 α 取决于焦距 f' 和星点尺寸参数 d , 表示为

$$\alpha = 2 \arctan \frac{d}{2f'}, \quad (9)$$

对式 (9) 中的 α 进行全微分, 并以误差量符号代替微量符号得到

$$\Delta\alpha = \frac{4f'}{4f'^2 + d^2} \Delta d - \frac{4d}{4f'^2 + d^2} \Delta f', \quad (10)$$

其中, $\frac{4f'}{4f'^2 + d^2}$ 和 $\frac{4d}{4f'^2 + d^2}$ 分别为 Δd 和 $\Delta f'$ 对 $\Delta\alpha$ 的误差传递系数.

星点板微孔直径采用三坐标进行精确标定, 尺寸公差为 ± 0.001 mm, 即 $\Delta d = 0.001$ mm. 单星模拟器焦距采用精密测角法测量焦距为 1000 mm, 焦距误差

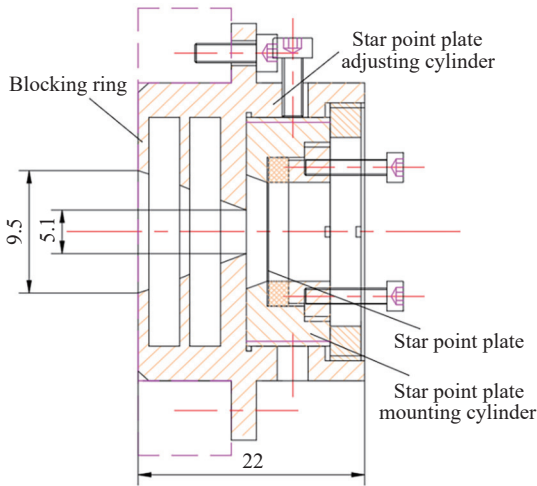


图 12 星点板调节筒消杂光结构

Fig. 12 Stray light suppression structure of star target adjustment tube

为 ± 1 mm. 即 $\Delta f' = 1$ mm, 利用式 (10) 计算 15 个不同直径下单星张角的系统误差, 代入

$$\alpha = 2 \arctan \frac{d}{2f'} + \Delta\alpha \quad (11)$$

即可得到单星张角计算结果.

利用徕卡经纬仪实际测量 15 个待测星点的单星张角, 分别进行五次实验, 取平均值后得到单星张角实际测量值, 通过经纬仪实际观测星点, 如图 15 (a) 所示. 比较实测单星张角与理论单星张角, 测试结果如图 15 (b) 所示, 比较计算可知最大单星张角误差为 $1.086''$, 星点单星张角误差优于 $1.2''$, 满足了对标准恒星目标的精确模拟.

3.2 星点光轴一致性误差

该单星模拟器主要分析多星点自动更换装置切换不同星点板时成像光斑的图像质心是否偏移, 以此判断星点光轴的一致性, 误差分析的主要误差源有零件误差和对准误差, 零件误差包括零件制造误差和零件安装误差: 星点盘通孔的位置度公差为 0.008 mm; 其中配合间隙误差: 星点板安装座内径同轴度为

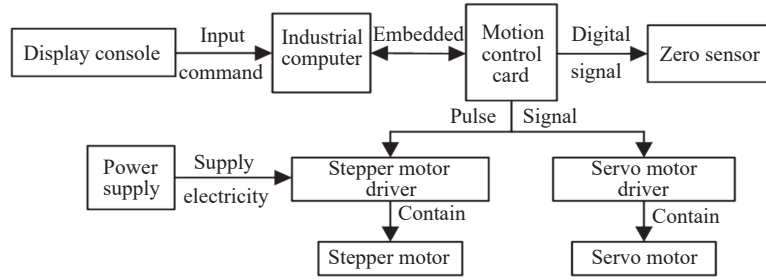


图 13 电控系统控制原理

Fig. 13 Control schematic diagram of electronic control system

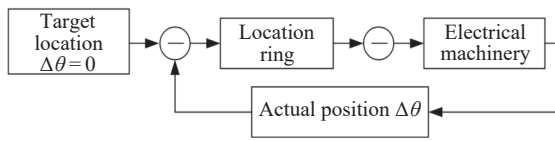


图 14 位置环控制流程

Fig. 14 Control flow of position loop

0.006 mm, 星点板调整座内径同轴度为 0.006 mm.

为保证星点孔与光学系统的光轴一致性, 需要能够对多星点自动更换装置进行直线位移和转动角度调整. 对星点精密调整装置选型, 并检测其对准误差, 其中水平电动位移台和垂直电动升降台重复定位精度优于 ± 0.02 mm, 电动旋转台和俯仰电动角位台重复定位精度优于 $\pm 0.001^\circ$.

垂直电动升降台和俯仰电动角位台导致垂直方向上的光轴偏移误差, 电动旋转台导致水平方向上的

光轴偏移误差, 误差原理如图 16 所示, 影响了星点光轴的一致性. 垂直电动升降台导致的最大误差为 0.02 mm.

俯仰电动角位台调整时, 其最大误差为

$$\Delta y = R - R \cos \theta. \quad (12)$$

其中, R 为星点盘中心到通孔中心的距离. 电动旋转台调整时, 其最大误差为

$$\Delta x = \sqrt{R^2 - (R - \Delta x)^2}. \quad (13)$$

通过上述计算, 经垂直、俯仰和旋转轴系的出射光轴相对于入射光轴的光轴一致性误差为

$$(x, y) = (\pm 0.11 \text{ mm}, \pm 0.02 \text{ mm}).$$

光轴一致性误差为未定系统误差, 需要统计出其不超过某一极限范围 $\pm e$ 的系统误差, 影响光轴一致性的各项误差在平面上符合二维正态分布, x, y 方向上光轴一致性的极限误差计算表示为

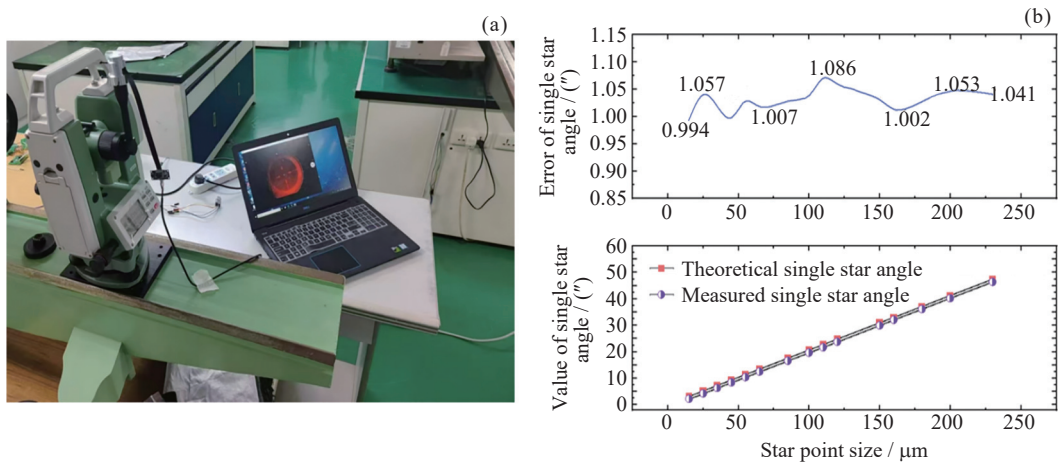


图 15 单星张角误差分析. (a) 经纬仪实测单星张角, (b) 实测单星张角与理论单星张角对比

Fig. 15 Error analysis of single-star angular. (a) Single-star angular measured by theodolite, (b) comparison diagram of measured and theoretical single star angular

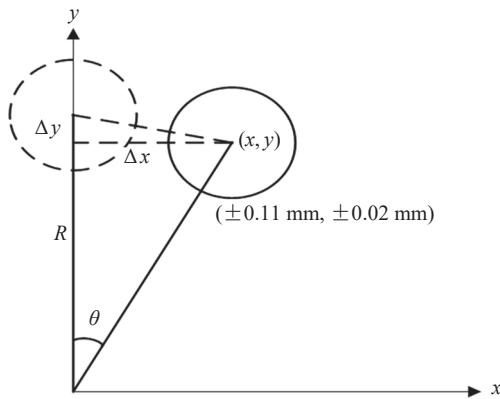


图 16 光轴偏移误差原理

Fig. 16 Principle of optical axis offset error

$$\begin{cases} e_{x,y} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \\ e = \sqrt{e_{x,y}^2 + \sum_{i=1}^S e_i^2}. \end{cases} \quad (14)$$

其中, S 表示单项未定系统误差的个数, e_i 表示单项极限误差, $e_{x,y}$ 表示 x, y 方向上的对准误差. 由式 (14) 计算得出星点光轴一致性误差为 $e=9.539 \mu\text{m}$, 满足星点光轴一致性优于 $10 \mu\text{m}$ 的指标, 保证了单星模拟器模拟星点光斑的良好均匀性.

4 结论

由于离轴反射式单星模拟器在模拟不同恒星目标时出现星点板更换难、操作复杂、标校效率低、有杂散光影响和星点位置不一致等问题, 设计了多星点自动更换装置. 阐述了星点板安装及调整结构; 对星点盘进行了有限元分析与优化, 实现轻量化设计; 分析了系统杂散光的产生位置, 以及其对星等模拟精度的影响, 并提出了消除杂散光方法与结构; 确定了星点板自动切换的电控系统方案与策略. 由多星点自动更换装置精度分析可知, 星点单星张角误差优于 $1.2''$, 保证了不同恒星目标经准直光学系统后的高质量成像效果; 星点光轴一致性优于 $10 \mu\text{m}$, 能够有效提高星点自动更换装置切换星点板时成像光斑的均匀性和清晰度.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] ZHENG Ru, LIU Bo, GAO Yue, *et al.* Research on star

points position analysis and simulation technology of infrared star simulators[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, **43**(9): 115-121 (郑茹, 刘博, 高越, 等. 红外星模拟器星点位置分析与模拟技术研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2022, **43**(9): 115-121)

- [2] LIU Shi, ZHANG Guoyu, SUN Gaofei, *et al.* Design of dynamic star simulator based on LCOS optical splicing technology[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2013, **33**(2): 200-206 (刘石, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于 LCOS 拼接技术的动态星模拟器设计 [J]. *空间科学学报*, 2013, **33**(2): 200-206)
- [3] WANG Lingyun, WANG Bo, ZHANG Guoyu, *et al.* Study on high precise and high dynamic star simulator[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2015, **35**(3): 356-361 (王凌云, 王博, 张国玉, 等. 高精度高动态星模拟器研究 [J]. *空间科学学报*, 2015, **35**(3): 356-361)
- [4] PITTELKAU M E. Kalman filtering for spacecraft system alignment calibration[J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2001, **24**(6): 1187-1195
- [5] ZAKRZWSKI C, SANNEMAN P, HUNT T, *et al.* Design of the EO-1 pulsed plasma thruster attitude control experiment[C]//37th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Salt Lake City: AAAI, 2001
- [6] FENG Guangjun, MA Zhen, LI Yingcai. Design and performance analysis of standard starlight simulator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(1): 39-42 (冯广军, 马臻, 李英才. 一种高星等标准星光模拟器的设计与性能分析 [J]. *应用光学*, 2010, **31**(1): 39-42)
- [7] GAN X J, GAO X H, CHEN Y, *et al.* Design of single star simulator based on LED light source[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, **397-400**: 932-935
- [8] LIU Hongxing, REN Jianwei, LIU Zexun, *et al.* LED-based single star simulator with multi-color-temperature and multi-star-magnitude output[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(2): 0212003 (刘洪兴, 任建伟, 刘则润, 等. 基于 LED 的多色温多星等单星模拟器 [J]. *光学学报*, 2015, **35**(2): 0212003)
- [9] LIU Shangkuo, XUE Xun, LI Kun, *et al.* Design and calibration of weak-light single star simulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(10): 1012001 (刘尚阔, 薛勋, 李坤, 等. 弱光单星模拟器的设计与标定 [J]. *光学学报*, 2017, **37**(10): 1012001)
- [10] ZHU Haoran, LIU Yunqing, ZHANG Wenying. Design of optical system for off-axis reflective star sensor ground calibration equipment[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2017, **37**(6): 752-759 (朱浩然, 刘云清, 张文颖. 离轴反射式星敏感器地面标定设备光学系统设计 [J]. *空间科学学报*, 2017, **37**(6): 752-759)
- [11] XU Da, ZHANG Guoyu, SUN Gaofei. Design of star simulator with spatial background light[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, **38**(4): 575-582 (徐达, 张国玉, 孙高飞. 空间背景星光模拟器系统设计 [J]. *空间科学学报*, 2018, **38**(4): 575-582)
- [12] CHEN Zeyi. Research on Methods to Improve the Accuracy of Single Star Simulators[D]. Changchun: Changchun

- University of Science and Technology, 2023 (陈泽羿. 单星模拟器精度提高方法研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2023)
- [13] DONG S, GONG R, YE Z L, *et al.* The analysis of the impact of star sensor calibration precision about single star simulator pin hole size specification[C]//Proceedings Volume 10697, Fourth Seminar on Novel Optoelectronic Detection Technology and Application. Nanjing: SPIE, 2017
- [14] WANG Shiran, WANG Lingyun, ZHENG Ru, *et al.* Design of collimating optical system for static star simulator with long exit pupil distance[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2023, **46**(3): 39-45 (王诗然, 王凌云, 郑茹, 等. 长出瞳距静态星模拟器准直光学系统设计 [J]. 长春理工大学学报 (自然科学版), 2023, **46**(3): 39-45)
- [15] LIU Xinrui, YU Xiwei, JIANG Jibin. Workbench-based optimized design of tapered roller bearings[J]. *Intelligent Manufacturing*, 2024(4): 66-70 (刘鑫瑞, 俞希伟, 江吉彬. 基于 Workbench 的圆锥滚子轴承优化设计 [J]. 智能制造, 2024(4): 66-70)
- [16] JIN Darong, YU Qiang, YU Chun. Finite element analysis of actuator for active vibration isolation system[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2010, **30**(1): 73-78 (金大荣, 于强, 余春. 主动隔振系统中驱动器的有限元分析 [J]. 空间科学学报, 2010, **30**(1): 73-78)
- [17] ZHANG Lei, JIN Guang. Structure design and modes analysis for the truss of light high resolution space camera[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2008, **28**(3): 260-263 (张雷, 金光. 轻型空间相机桁架结构与模态分析 [J]. 空间科学学报, 2008, **28**(3): 260-263)
- [18] JIANG Shouwang, XIA Zhentao, SUN Yongxue, *et al.* Optical design and stray-light analysis of urban night-light remote sensing imaging system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, **57**(1): 012201 (姜守望, 夏振涛, 孙永雪, 等. 城市夜光遥感成像系统设计与杂散光分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, **57**(1): 012201)
- [19] JIA Xuezhi, JIN Guang, JIA Jiqiang, *et al.* Topology optimization design for main board of lightweight space camera[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2011, **31**(3): 395-400 (贾学志, 金光, 贾继强, 等. 轻型空间相机主承力基板结构拓扑优化设计 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(3): 395-400)
- [20] YANG Moxin, ZHANG Aibing, XIE Shijun. Lightweight design and verification of electrostatic analyzer for space exploration[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(2): 330-339 (杨墨欣, 张爱兵, 解世君. 用于空间探测的静电分析器轻量化设计与验证 [J]. 空间科学学报, 2023, **43**(2): 330-339)
- [21] SUN Mingzhe, ZHANG Hongxin, LU Zhenwu, *et al.* Stray light suppression of the large field of view coronagraph optical system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, **51**(5): 052203 (孙明哲, 张红鑫, 卢振武, 等. 大视场日冕仪光学系统杂散光抑制 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, **51**(5): 052203)
- [22] ZHOU Xingyu, SUN Liang, PAN Qiao, *et al.* Large relative aperture receiving optical system and stray light suppression for laser ranging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, **61**(5): 0528001 (周星宇, 孙亮, 潘俏, 等. 大相对孔径激光测距接收光学系统及杂散光抑制 [J]. 激光与光电子学进展, 2024, **61**(5): 0528001)
- [23] STAUNDER J L. Stray Light Comparison of Off-Axis and On-Axis Telescopes[D]. Logan: Utah State University, 2000
- [24] CHEN Xing, HU Chunhui, YAN Changxiang, *et al.* Analysis and suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view[J]. *Chinese Optics*, 2019, **12**(3): 678-685 (陈醒, 胡春晖, 颜昌翔, 等. 大视场空间可见光相机的杂散光分析与抑制 [J]. 中国光学, 2019, **12**(3): 678-685)
- [25] WANG Yifan, LI Lingyin. Stray light suppression of star photoelectric detection system for space target in daytime[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(12): 2854-2861 (王一凡, 李零印. 白天观测空间目标的恒星光电探测系统的杂散光抑制 [J]. 光学精密工程, 2011, **19**(12): 2854-2861)

作者简介



葛世蕊 (第一作者) 女, 1998 年 3 月出生于黑龙江哈尔滨市, 现为长春理工大学硕士研究生, 主要研究方向为星模拟技术。

E-mail: gsr0309@163.com



苏 拾 (通信作者) 男, 1978 年 5 月出生于吉林长春市, 现为长春理工大学光电工程学院教授, 主要研究方向为精密测量技术、太阳模拟技术与 LED 应用技术等。

E-mail: sushi@cust.edu.cn