

doi: 10.3788/gzxb20164502.0223001

星模拟器星点能量中心修正方法的研究

王凌云^{1,2}, 王博¹, 张国玉^{1,2}, 孙高飞^{1,2}, 刘石^{1,2}

(1 长春理工大学, 长春 130022)

(2 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 长春 130022)

摘要:对星模光学系统中各种像差对几何中心位置的影响及像差对显示星点能量中心位置造成的偏差进行了分析与综合评估。分析结果表明,视场位置越大的星点产生的像点能量越不均匀,重心偏移越明显,系统中慧差和畸变对于星点能量中心影响较大。根据球面镜组成的共轴光学系统性质可知,能量中心的偏移发生在星点所在极半径方向上,因此提出了一种基于极坐标的星点位置修正方法,只需在星点所在方向对极半径进行修正。该方法简化了基于二维坐标轴分区修正的过程,减少了数据计算量。利用极坐标修正方法对星模拟器修正前后的单星位置误差进行了测试,实验结果表明极坐标修正过程较以往修正方法简单快捷,且修正结果更加准确。

关键词:星模拟器;像差;极坐标;星点;能量中心;修正

中图分类号: V448.25⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)02-0223001-6

Star Point Energy Center Correction Method of Star Simulator

WANG Ling-yun^{1,2}, WANG Bo¹, ZHANG Guo-yu^{1,2}, SUN Gao-fei^{1,2}, LIU Shi^{1,2}

(1 Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement & Control Instrument, Changchun 130022, China)

Abstract: The affects of various aberration on geometrical center position, and the deviation of displayed star position energy center caused by aberration in the star simulator optical system were analyzed and comprehensively evaluated. The analysis results show that, the energy generated by the greater star position field will be more uneven, and the energy center offset will be more obvious. Coma and distortion have great influence on the energy star center. According to the property of coaxial optical system composed by the spherical mirror, energy center offset is occurred in the polar radius direction of the star. A correction method based on polar coordinates of the star position was proposed, which only need to correct the polar radius in the direction of star. The method simplifies the correction based on two-dimensional coordinate axes partition and reduces a lot of data calculations. The errors between the revised single star positions with star simulator corrected and uncorrected were tested by the polar coordinate correction method, the experimental results show that the correction processing based on polar coordinates is simple and shortcut, and the correction results are more accurate.

Key words: Star simulator; Correction; Polar coordinates; Star point; Energy center; Aberration

OCIS Codes: 230.0230; 230.1150; 250.0250

0 引言

动态星模拟器是一种星敏感器的地面检测标定设备,在星敏感器的检测与标定过程中起着重要作用^[1]。动态星模拟器能够模拟无穷远处恒星组成的星图,显示不同恒星的位置及星等。星敏传感器通过观察动态星

模拟器显示的星图,实现对自身的星图识别和星跟踪等功能的检测。因此,动态星模拟器显示星图的准确程度直接影响了星敏传感器检测的准确程度^[2-3]。

对于星模拟器,除了高精度的硬件要求,软件修正及运算速度的提升也必不可少。但现有研究对于光学系统像差的修正只停留在通过人眼使用经纬仪进行测

基金项目:国家公益性行业科研专项 (No. GYHY201406037)资助

第一作者:王凌云(1977-),女,副研究员,博士,主要研究方向为光电检测技术与仪器、空间科学与技术、靶场测试技术等。Email: wlywly888@126.com

收稿日期:2015-07-06;录用日期:2015-09-24

<http://www.photon.ac.cn>

试的阶段,记录实验数据后,对数据进行处理修正,或者只对畸变造成的星点显示几何中心位置误差进行修正^[4],这样只是修正了畸变对几何中心的影响,忽略了其他像差对能量中心造成的偏移,而星敏传感器对于星点的识别往往是对能量中心的识别^[5-6].同时以往的修正方法只是将像面看作是一个二维平面,修正时建立一个二维坐标系,根据不同的位置进行分区^[1],但星模光学系统完全是由球面镜组成的共轴光学系统,通过系统光轴的任意方向上相同视场的像差绕着光轴旋转对称,使得在二维坐标下分区的方法略为繁琐.

在总结以往的星点误差修正方法的基础上,本文以 22°视场星模为例,单星位置误差要求 $\leq \pm 22''$,提出了一种通过分析光学系统的点分布函数来确定能量中心位置、并在极坐标系上进行修正的方法.

1 星模拟器工作原理及像差分析

1.1 星模拟器工作原理

星模拟器作为星敏传感器的模拟测试设备,为星敏提供无穷远星点的模拟,其模拟过程是通过显示器件来完成.显示器件上所显示的星点经过准直光学系统呈平行光出射,在星敏传感器的入瞳处成像,由此完成对无穷远星点的模拟.由姿轨仿真计算机给出星敏传感器在当前时刻的工作信息,包括轨道参数、姿态参数和光轴指向参数.动态星模拟器根据这些信息给出在该时刻、该轨道参数和光轴指向下满足条件的导航星,通过空间光调制器硅基液晶(Liquid Crystal on Silicon, LCOS)来完成星图显示工作.星图经过准直光学系统成平行光出射,在星敏传感器的入瞳处成像,由此完成对无穷远星图的模拟,如图 1.

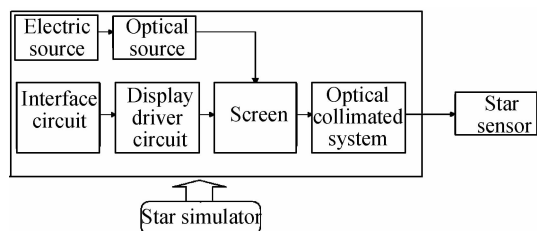


图 1 星模拟器各组成部分的相互关系

Fig. 1 The interrelation of star simulator compositions

1.2 像差分析

光学系统的像差分为单色像差和色差,其中单色像差分为球差、慧差、像散、场曲和畸变,而色差分为位置色差和倍率色差.由于准直光学系统中各种像差的存在,使得星点显示的实际能量中心与理论能量中心有所差异,导致星模拟器星点位置模拟精度有所下降.

1) 球差影响:由于球差的存在,轴上物点发出的光束经光学系统后,与光轴呈不同角度的光线交光轴于不同位置,使星点在像面上形成一个圆形弥散斑.

2) 慧差影响:由于慧差的存在,由位于主轴外的星

点,向光学系统发出的单色圆锥形光束,经光学系统折射后,在理想平面处不能结成清晰点,而是结成拖着明亮尾巴的彗星形弥散斑.

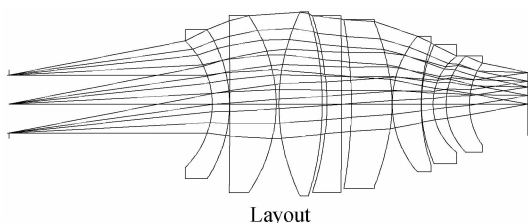
3) 像散和场曲影响:由于光学系统像散和场曲的存在,当发光星点不在光学系统的光轴上时,它所发出的光束与光轴有一倾斜角.该光束经透镜折射后,其子午细光束与弧矢细光束的汇聚点不在一个点上.即光束不能聚焦于一点,成像不清晰,形成椭圆形弥散斑^[14].

4) 畸变影响:当像散场曲校正为零时,由于畸变的存在,主光线不与理想像点重合,只引起像星点的位置误差,并不产生弥散斑.

5) 位置色差影响:类似于球差的影响,星点发出的各色光通过透镜时,由于位置色差的存在不能在象平面上会聚成一个象点,形成彩色圆形弥散斑.

6) 倍率色差的影响:由于倍率色差的存在,星点发出的不同色光对于透镜的折射率不同,导致不同色光成像大小差异,形成彩色弥散斑.

光学系统的所有像差几乎都对星点的能量中心显示产生影响.为了尽量减小像差产生的能量中心偏移,设计视场 22°、焦距 56.0006mm 的光学系统.如图 2.不同视场能量分布如图 3.



Layout

图 2 星模拟器光学系统

Fig. 2 Optical system of star simulator

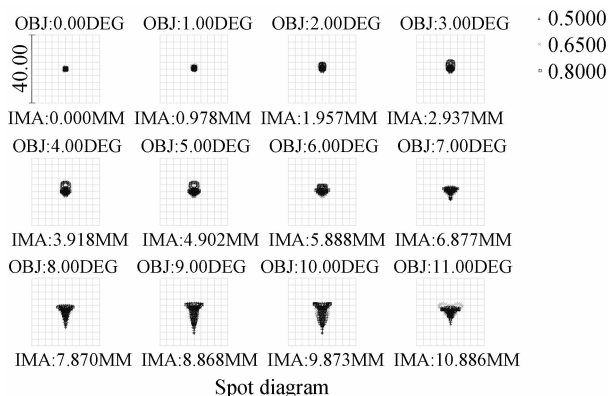


图 3 不同视场能量分布情况

Fig. 3 Energy distribution condition under different field of views

根据光学系统的点列图可知,对于视场位置越大的星点产生的像点能量越不均匀,重心偏移越明显.对系统中所有相差进行综合修正,根据实际设计的系统光学参数分析,系统中慧差和畸变对于星点能量中心

影响较大^[6].

2 极坐标修正原理

2.1 单星位置的确定

当显示屏被看成 xoy 二维坐标系时,单星位置计算空间模型如图 4. 其中 $O(x_0, y_0)$ 为显示屏与主光轴交点(即视场中心点), $P(x, y)$ 为星点位置, f 为光学系统焦距.

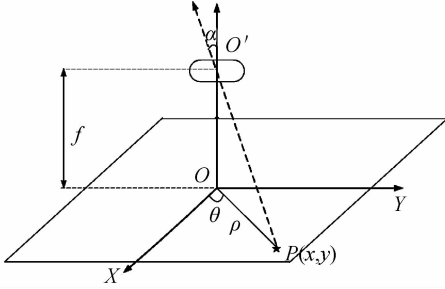


图 4 单星位置空间模型

Fig. 4 Spatial model single star position

单星角位置 α 的计算公式为

$$\alpha = \arctan \frac{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}}{f} \quad (1)$$

由于星模光学系统完全是由球面镜组成的共轴光学系统,以主光轴为中心,相同视场像差均围绕中心旋转对称,因此像差只与视场有关而与方向无关. 由此将二维 xoy 坐标转化成以 O 点为原点,以星点与原点距离 ρ 和方位角 θ 有关的二维极坐标系. 由坐标系可知

$$\begin{cases} x = \rho \cos \theta \\ y = \rho \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中, $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$, 将式(2)代入式(1)得

$$\alpha = \arctan \frac{\rho}{f} \quad (3)$$

根据式(3)可知星点位置误差只与星点与视场中心距离 ρ 有关,与方位角 θ 无关.

2.2 极坐标修正方法

根据球面镜组成的共轴光学系统性质可知,相同视场产生的各种相差都围绕中心旋转对称,弧矢面像差必然关于其主光线所在的子午面对称,由此可知能量中心的偏移,都是在该星点所在极半径方向上发生的,因此修正时只需在星点所在方向对极半径进行修正即可.

极坐标下的修正公式为

$$\rho_{\text{theory}} = \rho_{\text{real}} + \Delta\rho \quad (4)$$

式中, ρ_{theory} 为理论极半径, ρ_{real} 为实际极半径, $\Delta\rho$ 为极半径误差修正值.

将式(3)代入式(4)可得

$$\alpha_{\text{theory}} = \alpha_{\text{real}} + \Delta\alpha \quad (5)$$

式中, α_{theory} 为理论方向角, α_{real} 为实际方向角, $\Delta\alpha$ 为方向角误差修正值.

空间模型如图 5.

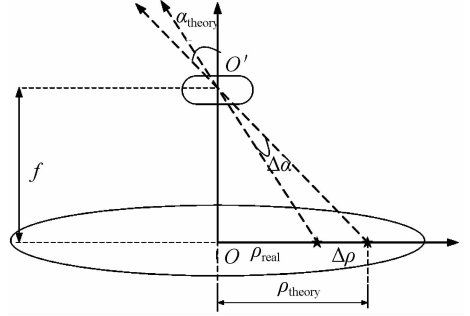


图 5 极坐标修正空间模型

Fig. 5 Spatial model based on polar coordinates correction

3 能量中心修正过程

为了计算出不同位置视场点成像的位置和各种像差的分布情况,对三类光线进行追迹:

1) 子午面内的光线光路计算,包括近轴光线的光路计算和实际光线的光路计算,以求出理想像的位置和大小、实际像的位置和大小以及有关像差值.

2) 轴外点沿主光线的细光束光路计算,以求像散和场曲.

3) 子午面外的空间光线光路计算,求得空间光线的子午像差分量和弧矢像差分量,对光学系统的像质进行全面了解.

近轴光线追迹公式为

$$\begin{cases} i = (l-r)u/r \\ i' = ni/n' \\ u' = u + i - i' \\ l' = (i'r/u') + r \end{cases} \quad (6)$$

远轴光线追迹公式为

$$\begin{cases} \sin I = (L-r) \sin U/r \\ \sin I' = n \sin I/n' \\ U' = U + I - I' \\ L' = r + r \sin I'/\sin U' \end{cases} \quad (7)$$

子午像点和弧矢像点的计算公式为为

$$\frac{n' \cos^2 I_z}{t'} - \frac{n \cos^2 I_z}{t} = \frac{n' \cos I_z - n \cos I_z}{r} \quad (8)$$

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' \cos I_z - n \cos I_z}{r} \quad (9)$$

式中, I_z, I'_z 为主光线的入射角和折射角; t, t' 为沿主光线计算的子午物距和像距^[3].

在星模光学系统中,实际光线的位置和方向是不确定的,为了模拟实际光线传播的路径,采用非序列光线追迹方法. 利用 Monte Carlo 算法模拟星点产生的随机光线来模拟光线路径,进行光线追迹. 通过模拟出的像点分布函数,利用计算机进行数据分析,确定能量中心位置与理论设计时能量中心位置的偏移关系.

Monte Carlo 光线追迹方法中随机光线的选择基

于概率函数及算法中的抽样,归一化的概率函数为

$$\int_{-\infty}^{+\infty} P(x) dx = 1 \quad (10)$$

式中 x 代表随机变量,对任意的 x ,有 $P(x) \geq 0$. 其相应的积分为

$$D(x) = \int_{-\infty}^x P(x') dx' \quad (11)$$

根据一个给定的概率函数 $P(x)$ 来获得一系列的随机数 x_p , 运算法则步骤为

- 1) 选择一个在区间 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数 p ;
- 2) 在累积分布函数曲线中利用 $p = D(x_p)$ 来计算相应的值 x_p , 重复这两步就可以得到根据 $P(x)$ 分布的数 x_p [3].

在设计的光学系统在 Zemax 中观察其点分布函数, 根据点分布函数可知每个视场中能量中心的偏移量. 各视场衍射能量分布如图 6.

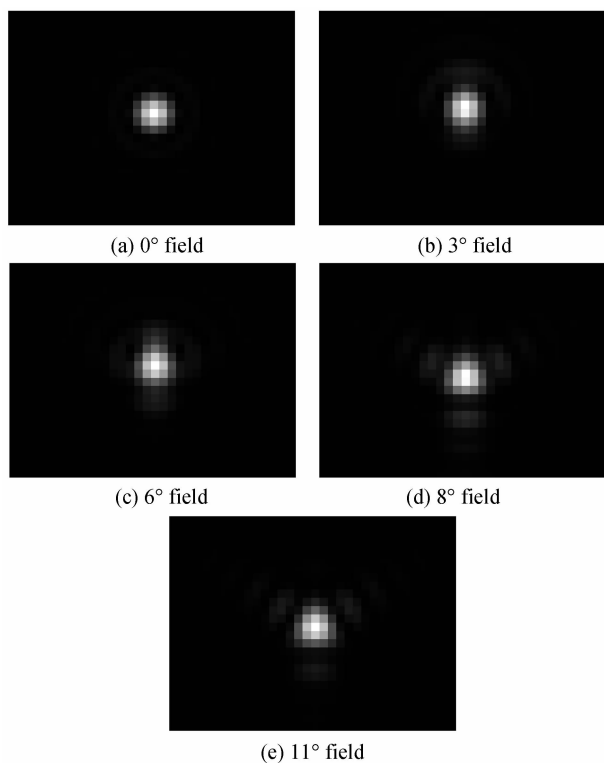


图 6 各视场衍射能量分布

Fig. 6 Each field's diffraction energy distribution

根据 Zemax 相关函数求解出不同视场实际能量中心与理论能量中心差异, 结果见表 1.

表 1 能量中心差异

Table 1 Energy center difference

Theoretical field α_{theory}	Actual field α_{real}
0°	0°
3°	2.93661516°
6°	5.88791237°
8°	7.87029149°
11°	10.8863639°

由点分布函数计算理论与实际能量中心位置偏

差, 可拟合出沿极轴方向, 不同视场产生的偏差大小. 如图 7、8.

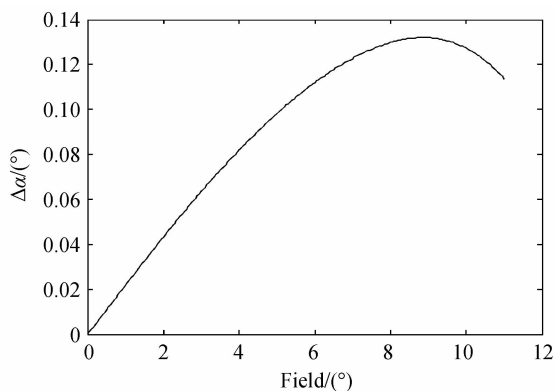


图 7 理论视场与能量中心偏差曲线

Fig. 7 Energy center of theoretical field deviation curve

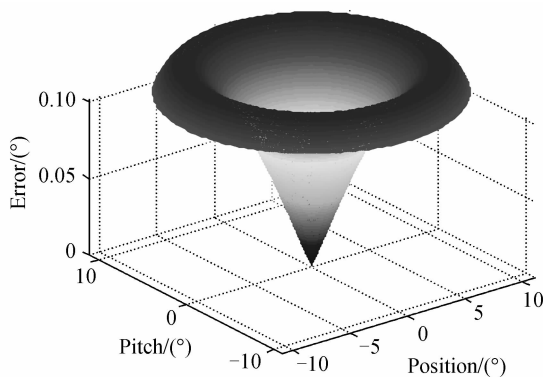


图 8 显示屏位置与能量中心偏移关系

Fig. 8 The relationship between energy centers' offset and corresponding position on the display

通过最小二乘法拟合出实际能量中心与理论能量中心的对应关系, 对理论能量中心进行修正, 使屏幕显示的实际能量中心, 经修正后与理论能量中心一致.

根据 Zemax 分析出的点分布函数可知任意视场点能量中心的偏移量, 根据这些偏移量可拟合出修正后的实际理论能量中心曲线 $\omega = \varphi(\alpha)$, 用偏差的平方和最小的原则即最小二乘法 $\sum_{i=1}^m \delta_i^2 = \sum_{i=1}^m [\varphi(\alpha_i) - \omega_i]^2 = \min$, 拟合出修正曲线, 即

$$\begin{aligned} \omega = & -1.2121e-6\alpha^5 + 2.5269e-5\alpha^4 - \\ & 2.6733e-4\alpha^3 + 4.7816e-4\alpha^2 + 2.1531e- \\ & 2\alpha + 3.4731e-5 \end{aligned} \quad (12)$$

修正后, 再根据被修正点的方位角 θ , 恢复出二维坐标系 x_0y 下的 (x, y) 坐标形式在屏幕上对应的像素坐标位置点亮星点, 转换公式为

$$\begin{cases} x = f \tan \omega \cos \theta \\ y = f \tan \omega \sin \theta \end{cases} \quad (13)$$

式中 θ 为修正前需要被点亮星点的方位角.

4 误差分析

根据系统要求精度, 单星位置误差 $\leq \pm 22''$ 可知,

视场 ω 允许误差 δ_ω 必须满足截断误差项小于单星位置误差,即 $\delta_\omega \leq 22''$ 。根据拟合方程可推断出最大截断误差为 $0.41832''$,远小于 $22''$,满足单星位置精度的要求。

对于静态星模拟器,在星检板上直接刻画的星点对于读取能量中心产生的偏差即为修正误差^[4]。本系统静态修正误差即为系统最大截断误差 $0.41832''$,满足精度要求。

但对于动态星模拟器由于显示器条件限制,星点在 LCOS 上的单位移动量为 0.008 mm ,即器件影响产生的最大误差为

$$\nabla\omega = \arctan \frac{0.008 \text{ mm}/2}{56.0006 \text{ mm}} \approx 14.733''$$

对动态星模拟器采用亚像素显示技术,通过插值算法将一个像素细化成更小的像素单位,如 $1/2$ 个像素、 $1/5$ 个像素、 $1/10$ 个像素。亚像素就是将一个像素分为更小的单位,以 8bit 的系统为例,该像素的灰度值级别为 256,那么对这类系统进行亚像素计算就要把这个像素分为 255 个小单位^[5],并通过插值算法通过与周围像素灰度值进行配合,使得星点显示像素位置移动精度达到小数范围。利用亚像素星点显示方法将能量中心位置显示精度提高到 0.1 个像元后,影响误差为

$$\nabla\omega = \arctan \frac{0.0008 \text{ mm}/2}{56.0006 \text{ mm}} \approx 1.4733''$$

误差累积后依然满足系统精度要求。

利用极坐标修正方法对星模拟器修正前后的单星位置误差进行了测试,测试结果见表 2。

表 2 修正前后单星位置误差

Table 2 The position error of single star before or after correction

Before		After		
Theoretical value/(°)	Actual value/(°)	Error/(")	Actual value/(°)	Error/(")
11	10.8863639	-409.08996	11.0002470	0.88920
10	9.87256961	-458.749404	9.9998506	-0.53784
9	8.86817087	-474.584868	9.0001958	0.70488
8	7.87029149	-466.950636	8.0001998	0.71928
7	6.87721666	-442.020024	7.0000787	0.28332
6	5.88791237	-403.515468	5.9998977	-0.36828
5	4.90170756	-353.852784	4.9998955	-0.37620
4	3.9180953	-294.85692	4.0000287	0.10332
3	2.93661516	-228.185424	3.0001285	0.46260
2	1.9567907	-155.55348	2.0000478	0.17208
1	0.978104754	-78.8228856	0.9999471	-0.19044
0	0	0	0	0

5 结论

本文对星模光学系统中像差对几何中心位置的影

响及像差对显示星点能量中心位置造成的偏差进行了分析,并提出了一种基于极坐标的星点位置修正方法。实验结果表明,这种通过分析光学系统点分布函数来确定实际能量中心位置与理论能量中心位置的差异,并在极坐标上进行修正的方法,简化了基于二维坐标轴分区修正的计算过程,降低了计算量及修正时间,提高了星点模拟的精度。

参考文献

- [1] XING Fei, WU Yan-peng, DONG Ying, et al. Research of laboratory test system for micro-star tracker [J]. *Optical Technology*, 2004, **30**(6): 703-709.
刑飞,武延鹏,董瑛,等.微型星敏传感器实验室测试系统研究[J]. *光学技术*, 2004, **30**(6): 703-709.
- [2] SONG Qing-guo. The research of extract and recognize film [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008: 21-22.
宋庆国. 焊缝图像缺陷提取与识别系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008: 21-22.
- [3] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- [4] KERYSZIG E. Advanced engineering mathematics [M]. Wiley, 1993.
- [5] SUN Gao-fei, ZHANG Guo-yu, ZHENG Ru, et al. Star sensor calibration research and development [J]. *Changchun University of Science and Technology*, 2010, **34**(4): 8-14.
孙高飞,张国玉,郑茹,等.星敏传感器标定方法的研究现状与发展趋势[J]. *长春理工大学学报*, 2010, **34**(4): 8-14.
- [6] ZOU Yang-yang, ZHANG Guo-guo, SUN Gao-fei, et al. Star position correction of dynamic star simulator based on distortion effect [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2014, **34**(4): 468-473.
邹阳阳,张国玉,孙高飞,等.基于畸变影响的动态星模拟器星点位置修正方法[J]. *空间科学学报*, 2014, **34**(4): 468-473.
- [7] ZHANG Wen-ming, LIN Lin, HAO Yong-jie, et al. Design of a dynamic display system for star map in small-sized star simulator [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, **27**(5): 11-14.
张文明,林玲,郝永杰,等.小型星模拟器中星图动态显示系统的设计[J]. *光电工程*, 2000, **27**(5): 11-14.
- [8] GONG Yan, HU Yi-ning, ZHAO Yang. Design of a mini star simulator based on digital optical processing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(11): 1698-1704.
巩岩,胡宜宁,赵阳.基于数字光处理技术的小型星模拟器设计[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(11): 1698-1704.
- [9] FENG Gang-jun, MA Zhen, LI Ying-cai. Design of 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.
- [10] JIANG Han-yuan, LI Xue-lei, CHEN Tao, et al. Research on automatic focusing system for theodolite's image measurement [J]. *Computer Measurement & Control*, 2010, **18**(1): 183-185.
蒋汉元,李雪雷,陈涛,等.光电经纬仪图像测量中的自动调焦系统研究[J]. *计算机测量与控制*, 2010, **18**(1): 183-185.
- [11] ZHAO Chen-guang, TAN Jiu-bin, LIU Jian, et al. Star simulator for testing celestial navigation equipment [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(6): 1326-1332.
赵晨光,谭久彬,刘俭,等.用于天文导航设备检测的星模拟装置[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(6): 1326-1332.
- [12] LI Chun-yun, LI Huai-feng, SUN Cai-hong. A astronomical calibration method and observation analysis for high-accuracy

star sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(4): 558-563.

李春艳,李怀锋,孙才红. 高精度星敏传感器天文标定方法及观测分析[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(4): 558-563.

- [13] MOHEDANO R, MINANO J, BENITEZ P, *et al.* Ultracompact nonimaging devices for optical wireless communications[J]. *Optical Engineering*, 2000, **39**(10):

2740-2747.

- [14] CRASSIDIS J. Angular velocity determination directly from star tracker measurements[J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2002, **25**: 1165-1168.

- [15] LIEBE C. Accuracy performance of star tracker a tutorial [J]. *Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, **38**(2): 587-599.