

文章编号 1004-924X(2015)09-2482-08

光学系统弥散斑参数的测试

李 坤*, 陈永权, 赵建科, 段亚轩, 李巧玲, 潘 亮, 龙江波, 张海洋
(中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要:采用 CCD 显微成像系统对光学系统弥散斑参数进行定量测量,并设计了弥散斑参数的评价算法。首先,给出了弥散斑参数的定义,分析了弥散斑所形成的能量等高线构成的闭合的连通区域,对占总能量 80% 的区域计算其弥散斑直径。然后,对该区域的边界点进行椭圆拟合,得到弥散斑圆度。提出的方法通过对光学系统在像平面所成的星点像的能量分布的分析,在弥散斑圆度测试中引入了椭圆拟合,减少了 CCD 噪声和测试环境中的杂光等随机因素对测试结果的影响,提高了测试结果的置信度。实验结果显示:弥散斑直径测试重复性为 0.18 μm ,弥散斑圆度测试重复性为 1.65%。提出的方法实现了弥散斑参数的定量测试,满足航天项目中光学系统成像质量控制要求。

关键词:光学系统;弥散斑参数;CCD 显微测量系统;能量等高线;区域填充;椭圆拟合

中图分类号:TB96;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152309.2482

Measurement of defocused spot parameters of optical system

LI Kun*, CHEN Yong-quan, ZHAO Jian-ke, DUAN Ya-xuan,
LI Qiao-ling, PAN Liang, LONG Jiang-bo, ZHANG Hai-yang

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

* Corresponding author, E-mail: wllk-19821118@163.com

Abstract: Defocused spot parameters of an optical system were measured by a testing system with CCD microscopic imaging quantitatively, and an evaluating method for the defocused spot parameters was designed. Firstly, the definitions of the defocused spot parameters including the diameter and the roundness were given. The connected region shaped by the energy contour of the defocused spots was analyzed, and the diameter equal to the area which is 80% of the total energy of the defocused spots was calculated. Then, the boundary of the region was fitted as an ellipse and the roundness of defocused spot was obtained. The method introduces the ellipse fit into the defocused spot roundness measurement through analysis of the energy distribution of star point image on image plane, so that the effects of CCD noise and stray light in test environment on the measuring results are reduced and the confidence of the test results is improved. The experimental results show that the repeatability of the diameter is 0.18 μm and that of the roundness is 1.65%. The method meets the needs of the optical systems in space projects for the imaging quality control.

Key words: optical system; defocused spot parameter; CCD microscopic system; energy contour; region filling; ellipse fitting

收稿日期:2015-04-02;修订日期:2015-05-15.

基金项目:神光 III 大科学工程资助项目(No. 091Z512B0A)

1 引言

点光源(即星点)经过光学系统后在像面前后不同截面上所成的衍射像的光强分布即为弥散斑。理想的星点成像时像平面前后的光强呈对称分布,并随着视场不同而变化;而实际光学系统成像时,像差等缺陷很容易破坏这种对称性。弥散斑能量的分布情况能够非常灵敏地反映光学的像差和缺陷^[1],因此定量测量弥散斑参数是控制光学系统成像质量的重要手段。

目前,量化测量弥散斑参数的需求主要集中在星敏感器光学系统的研制中。星敏感器是一种高精度的姿态测量设备,因其角秒量级的姿态测量精度而广泛地应用于卫星等各类航天器中。星敏感器可拍摄视场范围内的星空图像,通过星点识别提取和星点中心判定^[2]完成星图匹配,实现航天器空间姿态的测定。

星敏感器主要由光学系统和图像传感器组成。为了获得大视场范围的星空图像,星敏感器的光学系统^[3]一般为广角镜头,焦距较小,焦面处的星点像为亚像素级,不易识别。为了提高星点识别的几率和星点中心判定的精度,星敏感器光学系统常离焦使用或在光学系统中加入球差,使得星空中的星点成弥散像,故弥散斑成像特性是星敏感器光学系统的关键指标,其测量也成为研究重点。

弥散斑的量化参数测量^[4]是采用 CCD 显微测量系统进行的。该方法利用光学手段将弥散斑放大,不仅提高了系统采样率,而且有利于后续的图像处理和分析。合理的图像处理算法是保证 CCD 显微测量弥散斑参数的关键。

本文将背景阈值估计、区域填充、椭圆拟合等图像处理技术引入弥散斑参数的定量测量,减少了 CCD 噪声、CCD 量化误差和测试环境中的杂光等随机因素的影响,提高了测试结果的置信度。椭圆拟合和椭圆几何参数的求解更为详尽地评价了弥散斑的像差,从而为光学系统的成像质量控制提供指导,满足了航天项目星敏感器成像质量控制的要求,填补了国内对于弥散斑圆度测试的空白。

2 弥散斑测试系统的构成及工作原理

2.1 弥散斑参数的定义

由标量衍射理论可知,理想光学系统在像平面所成的星点像的能量分布为:

$$I = I_0 \left[\frac{2J_1(Z)}{Z} \right]^2, \quad (1)$$

式中: I_0 为轴上点的强度, $J_1(Z)$ 为一阶贝塞尔函数, $Z = ka\theta$, k 为波数, a 为光学系统孔径光阑的半径, θ 为衍射角。

在光学系统光轴方向离焦后,星点像形成弥散斑。弥散斑参数^[5]包括弥散斑直径和弥散斑圆度。弥散斑直径是指全视场范围内、合适的离焦量下,对弥散斑能量分布做闭合的能量等高线,与能量占总能量一定比例的能量等高线所形成的闭合区域面积相等的圆直径,即等效圆直径。在某些特殊的应用场合,如星敏感器测量航天器姿态时,需要通过轴上离焦使得弥散斑扩散到探测器的多个像元,但要避免轴外弥散斑扩散太大而使弥散斑能量密度太小,此时探测器无法进行探测。因此在全视场范围内、合适的离焦量下,弥散斑的直径 D 要满足:包含 $A\%$ 能量的闭合区域 $D \geq D_1$, 包含 $B\%$ 能量的闭合区域 $D \leq D_2$, 且 $B > A$, $D_2 > D_1$ 。弥散斑直径反映了弥散斑的能量集中度。

弥散斑圆度是指在全视场范围内、合适的离焦量下,能量占总能量一定比例的能量等高线所形成的闭合区域。过弥散斑质心,在等高线上取正交两个方向的弦长 X_1 和 X_2 , 若 $X_1 \geq X_2$, 则弥散斑圆度 φ 为:

$$\varphi = \frac{X_1 - X_2}{X_1} \times 100\%. \quad (2)$$

一般要求 $\varphi \leq 20\%$ 。弥散斑圆度反映了能量在与光轴垂直的平面内正交方向的分布情况,体现了弥散斑受彗差、像散等的影响程度。

2.2 弥散斑测试系统的工作原理

采用 CCD 显微测量系统的弥散斑参数测量系统如图 1 所示。

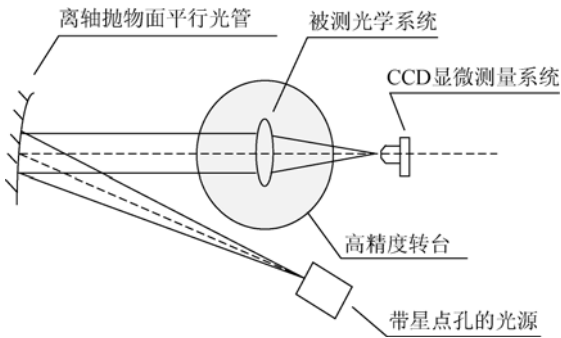


图 1 弥散斑参数的 CCD 显微测量系统

Fig. 1 Testing system with CCD microscopic imaging

离轴抛物面平行光管和其焦平面处的带星点孔的光源模拟无穷远的点目标, 经被测光学系统成像于其焦平面附近, CCD 显微测量系统在被测光学系统的光轴方向离焦采集星点像, 即得到弥散斑。高精度转台提供不同的视场角, 以得到不同视场下的弥散斑。其中, 星点孔直径、显微物镜

的数值孔径和放大倍率、CCD 像元尺寸的选定均要满足被测光学系统弥散斑测试空间采样的要求。CCD 的动态范围、灵敏度、光谱响应要满足被测光学系统弥散斑能量量化的要求。

弥散斑直径 $D^{[6]}$ 的计算公式为:

$$D = \frac{D_{\text{Image}}}{K} - \frac{f_{\text{test}}}{f_{\text{col}}} \times d_{\text{pin}}, \quad (3)$$

式中: D_{Image} 为弥散圆直径的测量值, K 为显微物镜的放大倍率, f_{test} 为被测光学系统的焦距, f_{col} 为离轴抛物面平行光管的焦距, d_{pin} 为离轴抛物面平行光管焦面处的星点孔的直径。

3 图像处理算法

通过 CCD 显微测量系统采集弥散斑, 对被测光学系统一定离焦量后的弥散斑图像进行图像处理, 具体流程如图 2 所示。

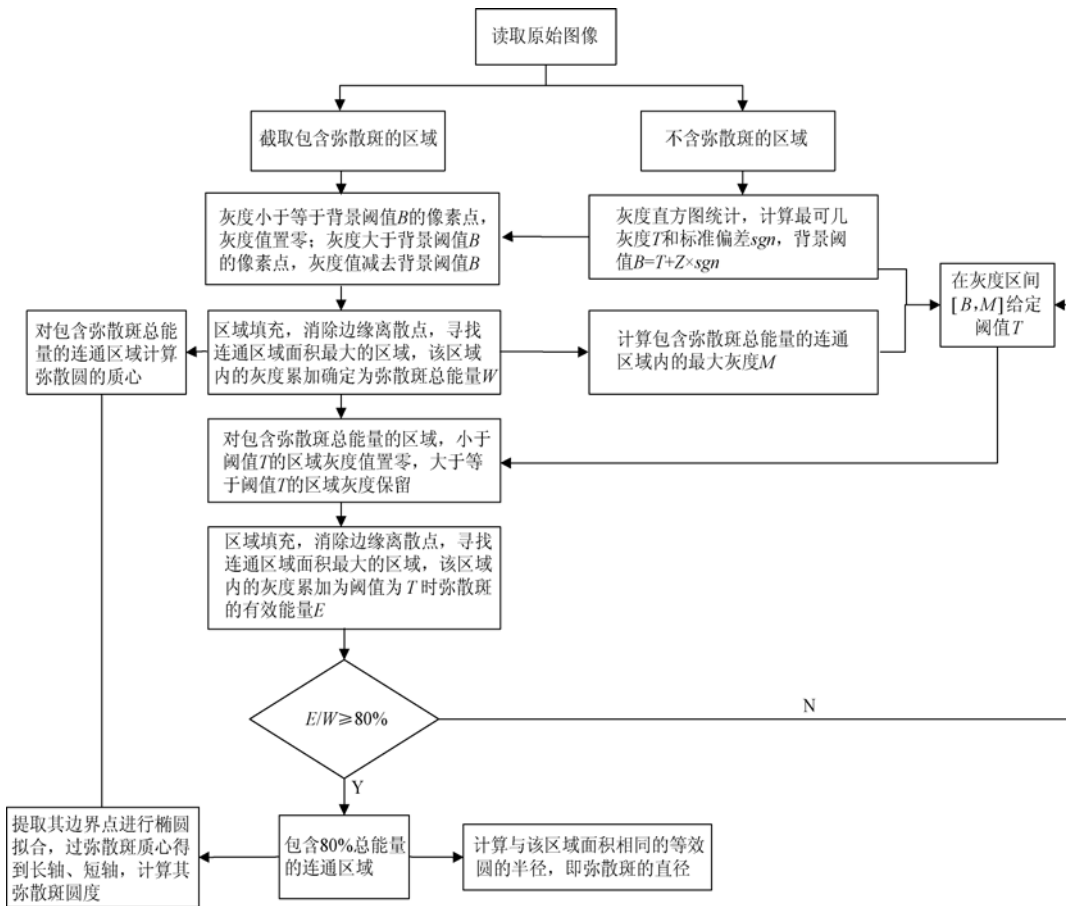


图 2 弥散斑参数测试图像处理流程图

Fig. 2 Flow chart of image processing in parameter test of defocused spots

3.1 背景阈值估计

背景阈值 B 主要反映在一定的曝光时间和增益下 CCD 的响应特性和噪声水平^[7-8]。背景阈值的选取关系到弥散斑和背景的分离及弥散斑总能量的计算。

采用基于灰度直方图的阈值算法来统计背景区域的噪声特性,实现了自适应的背景阈值选取。背景阈值 B 为:

$$B = T + Z \times sgn \quad (4)$$

式中: T 为背景灰度中出现概率最大的灰度,即最可几灰度; Z 是与 CCD 曝光时间、增益相关的参数; sgn 为背景灰度的标准偏差。

自适应选定背景阈值实现了弥散斑区域的选取,减小了 CCD 响应特性和噪声水平对测试结果的影响。不含弥散斑区域及背景区域的灰度直方图如图 3 所示。

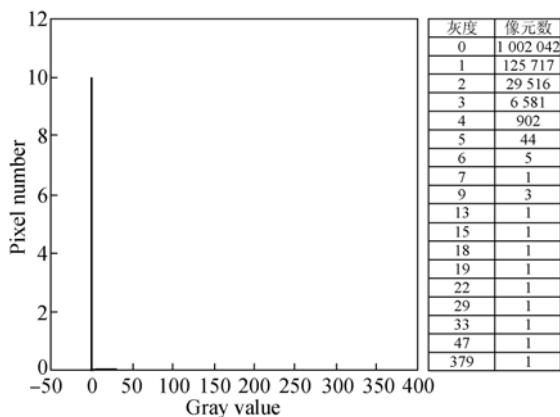


图 3 背景区域的灰度直方图

Fig. 3 Histogram of gray value of background

分析灰度直方图可知,该区域的灰度主要分布在 0~6,最可几灰度 T 为 0,灰度的标准偏差 sgn 为 0.62, Z 取 10,背景阈值 B 取整后为 6。

3.2 区域填充

在提取弥散斑形成的连通区域时,由于 CCD 噪声和 CCD 量化误差的影响,连通区域的边缘附近会出现孤立的散点,使边缘不平滑。采用区域填充可消除孤立散点的影响。

区域填充^[9]也称为条件膨胀,区域和区域的边界可以互求,给定区域的边界点集 A 及其补集 A^c ,通过结构元 Q 对其进行膨胀、求补和求交来填充区域。具体过程如下:

$$X_k = (X_{k-1} \oplus D) \cap A^c, k = 1, 2, 3, \dots, K, \quad (5)$$

当 $X_k = X_{k-1}$ 时,停止迭代。 X_k 和 A 的交集就包含了区域的内部和边界,它与 A^c 的交集就限制在感兴趣的区域,根据实际需要选取结构元 Q 。星点像的能量分布包含基于圆域定义的一阶贝塞尔函数,弥散斑为离焦后的星点像,故结构 Q 元可选用孔洞结构^[10]。

区域填充的效果如图 4 所示。图中,灰色区域为区域填充后形成的闭合区域,白色散点为去背景后的边缘噪点。



图 4 区域填充

Fig. 4 Region filling

3.3 椭圆拟合

鉴于星点像的能量分布含一阶贝塞尔函数,而一阶贝塞尔函数是定义圆域的函数。即考虑离焦和像差的影响,又不失一般性,可对连通区域的边缘进行椭圆拟合^[11-13]。椭圆的一般表达式为:

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0, \quad (6)$$

式中: x, y 为边界点的横、纵坐标, a, b, c, d, e 为系数, f 为常数项。

由椭圆的一般表达式不能直接地得到表征椭圆几何特征的参数,因此要通过求解椭圆的几何参数^[14],才能得到表征椭圆几何特征的参数:椭圆的中心点坐标、长轴、短轴、旋转角。

椭圆的拟合结果如图 5 所示。图中星点构成的闭合曲线为包含总能量 80% 的能量等高线,实心点构成的椭圆为椭圆拟合后的结果,中心区域的星点为弥散斑质心,中心区域的实心点为总能量 80% 的能量等高线拟合后的椭圆形心。从图中可以看出,该椭圆的形心与弥散斑的质心偏差不大,这说明该弥散斑主要受像散影响。

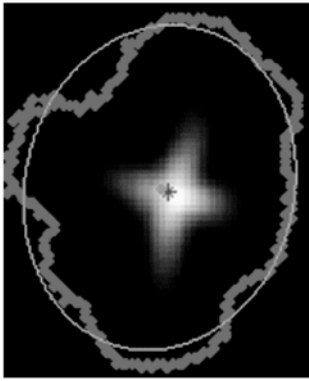


图 5 椭圆拟合
Fig. 5 Ellipse fitting

椭圆的中心点坐标与弥散斑质心的偏离、旋转角主要反映了彗差的影响。椭圆的短轴与长轴的相对偏差体现了像散的影响。拟合连通区域的边缘椭圆得到椭圆的几何参数,可更详尽地评价弥散斑像差,为光学系统成像质量的控制和分析提供指导。

4 实验结果和分析

本实验中,像分析器为 CCD 显微测量系统。CCD 图像传感器型号为 ES3200,像元尺寸为 $6.8 \mu\text{m} \times 6.8 \mu\text{m}$,像素为 $2\ 184 \text{ pixel} \times 1\ 427 \text{ pixel}$,三维平移台光轴方向的重复定位精度为 $2 \mu\text{m}$,显

微物镜为平场复消色差物镜(OLYMPUS),数值孔径 NA 为 0.75,放大倍率 K 为 19.52;离轴抛物面平行光管的焦距 f_{col} 为 1 210.8 mm,有效通光口径 DL 为 127 mm,星点孔直径 d_{pin} 为 0.02 mm;光源为卤钨灯,稳压直流供电;高精度转台的定位重复精度为 $1''$ 。

被测光学系统的技术参数如下:焦距 f_{test} 为 119.7 mm,F 数为 1.6,工作面远离被测光学系统且离焦 0.045 mm,测试装置如图 6 所示。光学系统弥散斑参数的设计指标要求和测试结果分别如表 1、表 2 所示。

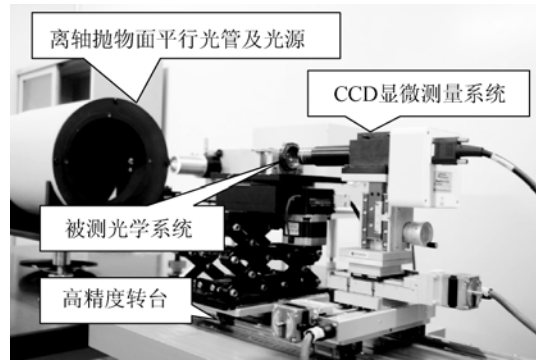


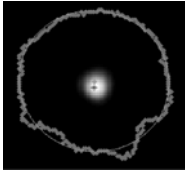
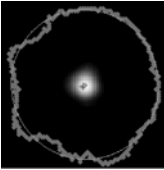
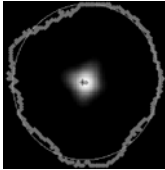
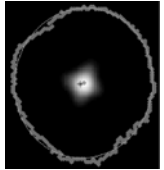
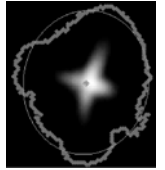
图 6 光学系统弥散斑显微测量装置
Fig. 6 Equipment of defocused spot measurement by CCD microscopic imaging

表 1 弥散斑参数设计指标要求

Tab. 1 Designed requirements of defocused spots

视场/(°)	0	0.75	1.05	1.2	1.5
弥散斑					
弥散斑直径/ μm	17.18	16.82	17.22	17.02	17.24
弥散斑圆度/%	4.48	7.52	10.85	14.26	20.07

表 2 弥散斑参数测试结果
Tab.2 Testing results of defocused spots

视场/(°)	0	±0.75	±1.05	±1.2	±1.5
弥散斑					
弥散斑直径/ μm	17.84	17.56 17.49	17.73 17.60	17.61 17.61	17.04 17.45
弥散斑圆度/%	3.10	9.44 6.06	13.84 7.34	14.83 9.11	14.93 11.86

由表 2 可知:被测光学系统在该工作面下,各视场范围内,拟合椭圆的形心与弥散斑的质心偏离不大,弥散斑圆度主要受像散的影响。为了降低计算复杂性,弥散斑圆度为拟合椭圆的长轴与短轴偏差与长轴的比值。各个正视场下,拟合椭圆的旋转角方向一致;各个负视场下,拟合椭圆的旋转角方向也一致,且正、负视场中拟合椭圆的旋转角方向相反,这一测试结果与光学系统彗差的分析一致,验证了椭圆拟合的可行性。在正、负视场下,弥散斑圆度随视场的增大而单调递增。弥散斑参数的测试结果与设计吻合。

影响弥散斑参数测量的因素有 CCD 噪声、测试环境中的杂光、图像处理的技术参数、被测系统安装调整重复性等随机因素带来的误差等。5 次重复测试结果见表 3。各对应视场的弥散斑直径

测量值的极差为 $0.41 \mu\text{m}$,弥散斑圆度测量值的极差为 3.85% ,由极差法^[15]得到弥散圆直径测试的重复性为 $0.18 \mu\text{m}$,弥散斑圆度测试的重复性为 1.65% 。

5 结 论

本文通过分析光学系统在像平面所成星点像的能量分布,在弥散斑圆度测试中引入椭圆拟合,减少了 CCD 噪声和测试环境中的杂光等随机因素对测试结果的影响,提高了测试结果的置信度。通过多次测量,弥散圆直径测试的重复性为 $0.18 \mu\text{m}$,弥散斑圆度测试的重复性为 1.65% 。通过求解椭圆的几何参数,可更详尽地评价弥散斑的像差,为光学系统的成像质量控制提供指导。

表 3 5 次重复测试结果

Tab. 3 Results of 5 times repeated measurements

测量次数	视场/(°)	0	±0.75	±1.05	±1.2	±1.5
1	弥散斑直径/ μm	17.86	17.55	17.86	17.58	17.14
			17.48	17.68	17.42	17.34
	弥散斑圆度/%	3.32	9.01	14.10	13.72	15.36
			6.32	6.23	9.88	13.59
2	弥散斑直径/ μm	17.88	17.48	17.75	17.63	16.94
			17.53	17.67	17.67	17.60
	弥散斑圆度/%	0.80	9.33	13.32	14.37	16.04
			7.59	7.21	8.57	11.58
3	弥散斑直径/ μm	17.89	17.49	17.46	17.64	16.96
			17.41	17.61	17.62	17.31
	弥散斑圆度/%	4.34	7.51	14.70	15.33	14.47
			5.06	7.78	8.19	12.86
4	弥散斑直径/ μm	17.81	17.70	17.84	17.58	17.09
			17.54	17.48	17.61	17.57
	弥散斑圆度/%	3.90	11.36	12.77	15.27	14.69
			6.53	7.39	9.66	11.15
5	弥散斑直径/ μm	17.76	17.60	17.73	17.59	17.05
			17.47	17.57	17.74	17.43
	弥散斑圆度/%	3.15	9.97	14.30	15.45	14.09
			4.82	8.08	9.24	10.13

参考文献:

- [1] 沈海龙. 光学测量[M]. 上海: 华东工程学院出版社, 1982.
SHEN H L. *Optics Measurement* [M]. Shanghai: Huadong Institute of Engineer Press, 1982. (in Chinese)
- [2] 支帅, 张刘, 李欣璐. 带噪声模拟仿真星图的实现[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 581-587.
ZHI SH, ZHANG L, LI X L. Realization of simulated star map with noise [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 581-587. (in Chinese)
- [3] 唐杰, 蔡盛, 乔彦峰. 行星光学远程着陆模拟器光学系统设计[J]. 中国光学, 2014, 7(6): 962-968.
TANG J, CAI SH, QIAO Y F. Optical system design of simulator for autonomous landing on planets based on optical navigation [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 962-968. (in Chinese)
- [4] 周艳, 赵建科, 昌明, 等. 星敏感器光学系统弥散斑测试方法[J]. 应用光学, 2009, 30(3): 454-456.
ZHOU Y, ZHAO J K, CHANG M, *et al.* Measurement of dispersed spot for star sensor optics [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(3): 454-456. (in Chinese).
- [5] 李璟, 杨宝喜, 胡中华, 等. 星敏感器光学系统的研制与性能测试[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0522005.
LI J, YANG B X, HU ZH H, *et al.* Development and performance testing of optical system for star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0522005. (in Chinese)
- [6] 徐德行, 王青, 高志山, 等. 现行光学元件检测与国际标准[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
XU D Y, WANG Q, GAO ZH SH, *et al.* *Test and International Standard for Contem Porary Optical Components* [M]. Beijing: Science Press, 2009.

- (in Chinese).
- [7] 罗长洲,王胜男,邵雷,等. 星点识别算法中背景阈值的确定方法[J]. 航天控制,2013,31(5):50-54.
LUO CH ZH, WANG SH N, SHAO L, *et al.* The method of deciding background threshold instar dot recognition algorithm [J]. *Aerospace Control*, 2013,31(5):50-54. (in Chinese).
- [8] 原玉磊,郑勇. 一种大视场星图星点提取的阈值算法[J]. 海洋测绘,2011,31(5):41-43.
YUAN Y L, ZHENG Y. A threshold segmentation method of star extraction in large field star image [J]. *Hydrographics Surveying and Charting*, 2011,31(5):41-43. (in Chinese)
- [9] 倪崇嘉. 数学形态学基础及其在图像处理中的应用[D]. 昆明:昆明理工大学,2003.
NI CH J. *The Basis of Mathematical Morphology and It's Applications in Image Processing* [D]. Kunming:Kunming University of Science and Technology,2003. (in Chinese)
- [10] SOILLE, P. *Morphological Image Analysis: Principles and Applications* [M]. Springer-Verlag, 2004.
- [11] FITZGIBBON A, PILU M, FISHER R B. Direct least squares fitting of ellipses [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*,1999,21(5):476-480.
- [12] 曾周末,刘芳,封皓,等. 基于 3×3 耦合器的双马赫-曾德尔干涉仪数字化相位解调[J]. 光学精密工程,2014,22(6):1410-1417.
ZENG ZH M, LIU F, FENG H, *et al.* Digitalized demodulation based on 3×3 coupler for dual Mach-Zehnder fiber interferometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6):1410-1417. (in Chinese)
- [13] 孙宏伟,房建成,李艳. 椭圆拟合方法在磁罗盘罗差校准中的应用[J]. 光学精密工程,2009,17(12):3034-3039.
SUN H W, FANG J CH, LI Y. Application of ellipse fitting method to calibration of magnetic compass deviation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12):3034-3039. (in Chinese)
- [14] 陈基伟. 椭圆直接拟合算法研究[J]. 工程勘察,2007,6:49-51.
CHEN J W. Research of direct ellipse fitting algorithm[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2007, 6:49-51. (in Chinese)
- [15] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:误差理论与数据处理,2004.
FEI Y T. *Error Theory and Data Processing* [M]. Beijing:China Machine Press, 2004. (in Chinese)

作者简介:



李坤(1983—),男,山西朔州人,工程师,2009年于四川大学获得硕士学位,主要从事光学检测技术及图像处理方面的研究。E-mail: wllk-19821118@163.com



陈永权(1979—),男,山西忻州人,高级工程师,2006年于四川大学获得硕士学位,主要从事激光光束参数标定和质量评价方面的研究。E-mail: cyq@opt.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)