

基于光电位置传感器的发射轨道空间几何坐标 一致性校正系统设计

荣四海 沈 华 朱日宏 黄 亚 王小锋 卞殷旭

(南京理工大学电子工程与光电技术学院 江苏 南京 210094)

摘要 在现代发射轨道空间弹丸飞行姿态研究中,通过轨道上的多组阴影相机基站瞬态捕捉弹丸姿态图像数据,对图像数据进行处理计算可以获得弹丸的飞行轨迹数据。因此,阴影相机的空间坐标校正对飞行姿态数据的获取以及测量精度有着重要的影响。针对传统悬线型基准系统校正误差大以及因每组相机间独立校正而导致的空间几何坐标校正一致性低的问题,基于光电位置传感器和光学杠杆原理,设计了新型阴影相机空间几何坐标校正系统。阐述了该系统的理论背景、组成以及调校方法,并对该系统进行了实验分析。实验结果表明,采用该系统校正阴影相机俯仰角精度优于 $10''$,单组相机校正实验测量结果误差不超过 0.06 mm,多组相机校正一致性误差不超过 0.1 mm。

关键词 测量;弹丸姿态测量;光学杠杆;坐标校正;位置敏感探测器

中图分类号 TN206;TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0908003

Design of Launch Orbits Spatial Geometry Coordinate Coherence Calibration System Based on Positive Sensitive Detector

Rong Sihai Shen Hua Zhu Rihong Huang Ya Wang Xiaofeng Bian Yinxu

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract In the research of bullet flight attitude in modern launch orbits space, the transient attitude of the bullet is captured by several groups of shadow cameras. By image processing and calculation, the whole flight data can be known. In order to acquire accurate measured data, it is critical to calibrate spatial geometrical coordinates. Considering the low precision and poor calibration coherence of traditional grid calibration system, a new type of shadow camera calibration system based on positive sensitive detector and optical lever is researched. The principle background, components and adjusting means are illustrated, and the experimental consequence is analyzed. The results indicate that the calibration accuracy of angle is better than $10''$, and the measurement error is less than 0.06 mm. The multi-group cameras' calibration coherence error is less than 0.1 mm in use with this new system.

Key words measurement; bullet flight attitude measurement; optical lever; coordinate calibration; position sensitive detector

OCIS codes 120.3930; 280.4788; 220.4840

1 引 言

发射轨道的测量研究主要用于子弹、炮弹以及火箭在离开火炮口的后效期内飞行姿态等飞行特性的测量研究。目前弹道发射轨道的主要测试方法是采用轨道阴影摄影技术^[1,2],在弹道两侧分布多个

闪光阴影照相站,每个照相站采用正交摄影的方式获得两幅弹丸飞行的阴影图像。通过对图像的处理判读和弹丸空间位置的计算,就能够得到弹丸的飞行姿态角和质心空间坐标^[3,4]。发射轨道空间基准系统能够实现阴影相机的准确校正,同时在整个轨

收稿日期: 2012-04-23; **收到修改稿日期**: 2012-05-24

作者简介: 荣四海(1988—),男,硕士研究生,主要从事光学干涉计量方面的研究。E-mail: rongsihai305@gmail.com

导师简介: 朱日宏(1964—),男,博士,教授,主要从事光学干涉计量方面的研究。

E-mail: zhurihong@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

道空间建立一整套的空间测量坐标系^[5],将弹丸的实际空间坐标和实验测量得到的弹丸图像坐标联系起来。因此,测量结果的精度直接取决于空间基准系统的结构、精度和数据处理判读方式。

目前,主要采用悬线型基准系统^[6],通过在沿轨道移动的小车上设立一个网格作为基准定位标志,测量前先将阴影照相站对网格基准精确定位,并将网格成像记录在底片上。测量时将网格基准移走,将弹丸的飞行影像记录在另外的底片上。最后,将两片底片重合,就可以得到既有定位基准网格又有弹丸飞行影像的图像,从而可以计算出弹丸飞行的姿态轨迹。其优点是结构简单、数据判读方便。但是,由于网格基准的制作过程中存在误差,同时校正过程中始终存在人为视觉的判读误差,难以保证阴影相机的主光轴与网格基准中心轴线严格重合以及多次校正的基准一致性,继而影响相机校正的精度,使得弹丸飞行姿态测量数据误差较大。

为达到相机坐标校正的高精度和一致性^[7],本文提出一种新的发射轨道阴影相机坐标校正技术,在光学杠杆原理^[8]和位置敏感探测器(PSD)^[9,10]的基础之上,利用激光追迹火炮弹道基线,通过光学杠杆原理对光束偏离角度的放大和 PSD 对光点位移的精确探测,实现追迹基线与阴影照相系统轴线和坐标系的调校以及阴影相机对追迹激光的瞄准成像。

2 系统原理

光学杠杆原理主要是指平面镜的旋转特性,平面反射镜旋转一定角度,平行光束焦点在透镜焦面上发生横向位移。利用光学杠杆原理,从远处发射的激光光束,当其光束光轴与透镜主光轴存在一定夹角 θ ,入射到透镜上时(如图 1 所示),光束焦点在透镜焦面上的横向位移 y 和夹角 θ 存在如下关系:

$$y = f' \tan \theta, \quad (1)$$

式中 f' 为透镜焦距。通过 PSD 对光束焦点位移的探测,可以计算出激光束光轴与透镜主光轴的实际

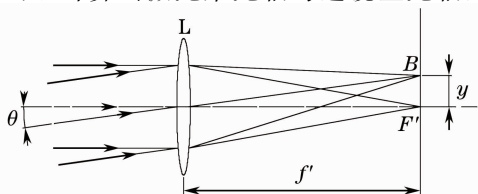


图 1 光学杠杆原理光路图
Fig. 1 Optical lever principle

夹角 θ 。对(1)式两边同时微分,得到

$$dy = f' \frac{1}{\cos^2 \theta} d\theta. \quad (2)$$

可以看出,提高透镜焦面上 PSD 的灵敏度及最小探测位移 dy ,就能提高激光束与透镜主光轴平行度的调校能力。

在两个透镜组成的望远缩束系统中,全口径入射的激光束平行入射,在两个透镜的焦点处聚焦,最后平行出射。当激光束光轴与系统主光轴不重合入射时,光束光轴在入射面横向截面上存在位移 $d^{[11]}$,如图 2 所示。

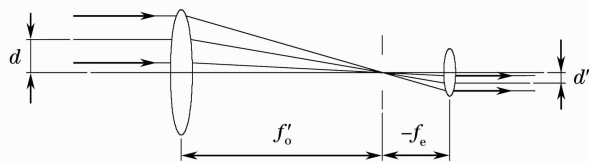


图 2 缩束系统光学杠杆原理光路图

Fig. 2 Optical lever principle of beam-reducer system

出射光束在出射截面上的横向位移 d' 与 d 存在如下关系:

$$\beta = \frac{d'}{d} = \frac{-f_e}{f'_o}, \quad (3)$$

式中 f_e 是缩束系统目镜焦距, f'_o 是缩束系统物镜焦距。从(3)式可以看出透镜焦距是已知量,只要测出出射光束位移 d' 就能够计算得到入射光束的横向位移 d 。对(3)式做变换得到

$$\frac{\Delta d'}{\Delta d} = \frac{-f_e}{f'_o}, \quad (4)$$

从(4)式可以看出,提高 PSD 灵敏度同时增加 f_e 和 f'_o 的比例即系统放大率,可以增强对激光束光轴横向位移的探测能力。

3 系统设计

该系统主要由两部分组成:1) 发射系统,主要由激光器、偏振片、分光棱镜、1/4 波片、十字分划板和高灵敏度水准泡组成。主要作用是发射激光束追迹火炮轴线,模拟弹丸飞行轨迹,提供校正光源。发射系统中采用的激光器是美国 JDSU 公司波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器。激光功率较高,加入偏振片和 1/4 波片可以通过偏振消光阻断由器件表面反射回来的光直接进入激光器,避免长时间高功率激光照射损坏发射源。2) 校正系统,主要由望远缩束系统、分光棱镜、PSD、十字分划板、五角棱镜扫描系统、高灵敏度水准泡、基准坐标光刻板以及 CCD 成像器件组成。该子系统主要完成追迹激光

束与扫描光轴的校准和瞄准光线的扫描校正,并通过高精度光刻坐标板实现坐标系投影。其中校正系

统具体光路结构如图 3 所示。

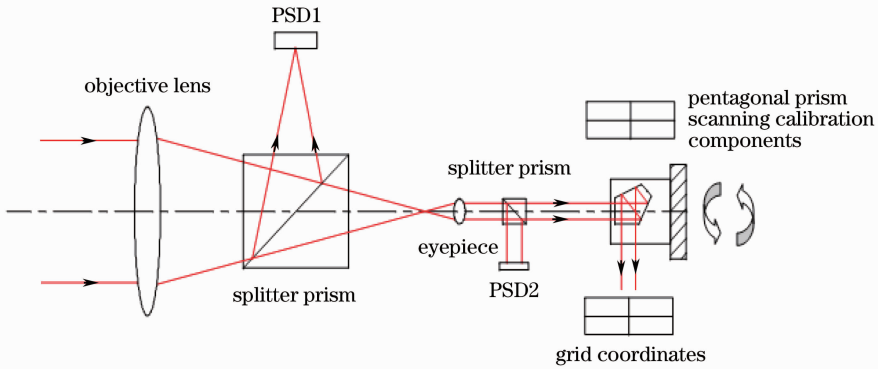


图 3 校正系统光路结构原理图

Fig. 3 Optical structure of calibration system

校正时,火炮口处的发射系统发射出准直激光束追迹火炮基线,激光束从靶道轨道上的校正系统入射,通过物镜和分光棱镜分成两束光,一束光直接投射在物镜焦面的 PSD 上;另一束光经过目镜后,投射在目镜后方的分光棱镜上,将入射光再分成两束光,其中一束直接投射在 PSD 上,另外一束经过五角棱镜折转从光刻坐标板中心原点垂直出射,作为相机校正瞄准目标。PSD 采集到光点中心的位移信息,计算入射光束光轴的倾斜和偏移量^[12],进而得到校正系统的主光轴空间倾斜偏移量。根据计算得到的数据,调整校正系统的六维姿态,实现水平姿态调节并使得两光轴重合,通过阴影相机对出射扫描光点和坐标板的瞄准,完成阴影相机几何坐标的校正。

4 PSD 的调校

在相机坐标校正过程中,PSD 采集的光点中心位移数据精度直接决定相机校正的精度以及多组基站相机校正的一致性和基准归一化程度。整个系统共采用了两个高精度 PSD,其中一个放置在物镜焦面上,另一个处于目镜后方。为减小 PSD 采集数据带来的误差^[13],提高精度,在调校过程中,采用缩束系统光轴作为基准光轴,以基准光轴对 PSD 位置进行调校^[14]。

调校前,先将缩束系统放置于平行光管焦距仪的平行光路中,调校系统六维姿态保证系统平台处于水平状态,并使缩束系统光轴与焦距仪光轴重合,按照计算图纸,把 PSD、棱镜按照设计位置摆放在校正系统底板上。粗略调整各部件间的位置,使各部件间不至发生冲突。将各个分光棱镜分别取下,

代之以五角棱镜,利用五角棱镜对基准光轴的 90°折转特性,以此为基准调校 PSD。

4.1 物镜焦面 PSD 的调校

此步骤主要调校 PSD,使得 PSD 靶面与物镜焦面重合,同时 PSD 中心原点与物镜焦点重合。调整 PSD 的前后、左右和上下三维姿态,同时观察 PSD 显示的坐标,当 PSD 靶面上光斑最小且 PSD 显示坐标为坐标系中心时,光束聚焦在 PSD 靶面中心,亦即 PSD 靶面准确调校在缩束系统物镜焦面上。此时调节整个系统前后、左右、上下三维姿态,若入射光束始终能够聚焦在 PSD 靶面原点,PSD 二维位移坐标始终为 0,即可认为 PSD 靶面原点法线与折转基准光轴重合。

PSD 调校完毕后,换下五角棱镜,以基准入射光束焦点在 PSD 靶面中心为基准,装调分光棱镜,使得光束焦点再次与 PSD 靶面原点重合。

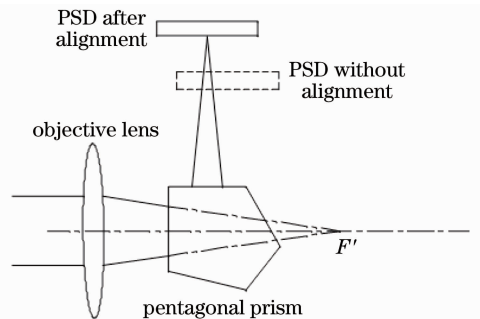


图 4 物镜焦面 PSD 装校原理图

Fig. 4 Installation and calibration of objective focal PSD

4.2 目镜后方 PSD 的调校

此步骤主要完成目镜后方 PSD 的装调,保证 PSD 靶面原点法线与入射基准光轴重合。为了在

一定程度上控制系统的体积,PSD 不宜放置在离目镜太远的位置。基准光束经五角棱镜 90° 折转垂直入射到 PSD 靶面上,调校 PSD 三维姿态,使得基准光线垂直入射到 PSD 靶面原点,可以看到 PSD 二维位移坐标均为 0。此时即完成了 PSD 调校。

PSD 调校完成后,将五角棱镜替换为分光棱镜,以基准光束入射在 PSD 靶面原点为基准,装调分光棱镜,使得光束从 PSD 靶面原点入射。

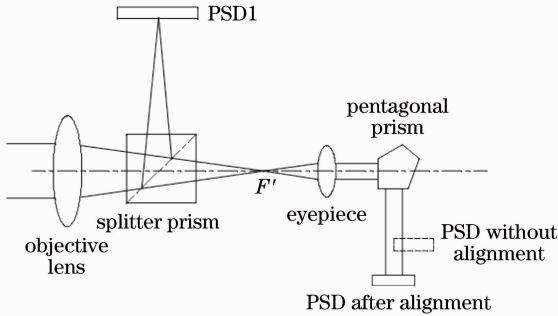


图 5 目镜后方 PSD 装校原理图

Fig. 5 PSD installation and calibration after eyepiece

5 实验结果

在发射轨道内进行实测实验,选取了 9 组基站阴影相机进行几何坐标校正。在校正过程中,首先通过观察水准泡调整校正子系统的姿态使得系统在该校正点处于水平状态;然后调整系统姿态使追迹光束从缩束系统入射,光点聚焦在物镜焦点处 PSD 上,调节光点位置,使得光束中心会聚在物镜焦点处 PSD 的中心,接着调节目镜后方 PSD 光点位置,使光点会聚在 PSD 中心,反复调节两个 PSD 的光点中心位置,直至光点分别入射到 PSD 中心,此时系统光轴与追迹基线重合;最后通过五角棱镜扫描系统进行光束扫描,相机对光束瞄准同时对光刻坐标板成像,即完成了阴影相机的坐标校正。最终的校正子系统和相机校正数据如图 6 和表 1 所示。

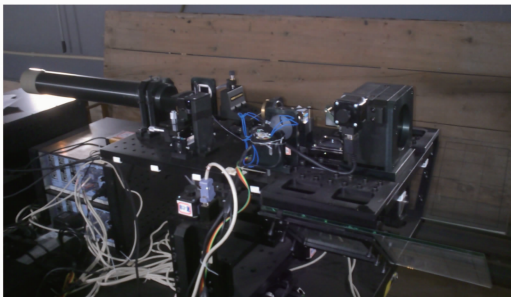


图 6 校正子系统结构图

Fig. 6 Calibration system structure

表 1 相机校正实验数据

Table 1 Experimental data of camera calibration

No.	Calibration result of objective focal PSD /mm	Calibration result of PSD after eyepiece /mm
1	(0.0008,0.0007)	(-0.0003,-0.0006)
2	(-0.0005,0.0003)	(0.0008,0.0001)
3	(0.0001,0.0004)	(-0.0005,0.0007)
4	(0.0004,-0.0007)	(0.0001,0.0003)
5	(0.0002,0.0001)	(0.0005,-0.0003)
6	(-0.0006,-0.0003)	(0.0006,0.0007)
7	(0.0007,-0.0003)	(-0.0004,0.0005)
8	(0.0008,0.0001)	(-0.0003,0.0007)
9	(0.0005,0.0003)	(0.0005,-0.0003)

在基站相机之间悬挂一个弹丸模型,用游标卡尺测量出该弹丸模型长度为 102.50 mm。用校正后的基站相机正交摄影,对得到的阴影图像进行判读处理,在计算机上对判读数据进行坐标换算,得出各组基站相机分别测量到的弹丸模型长度以及 9 次测量误差分布曲线图如表 2 和图 7 所示。

表 2 模拟弹丸长度测量实验数据

Table 2 Experimental data of virtual bullet length measurement

No.	Measurement result /mm	Error /mm
1	102.56	0.06
2	102.51	0.01
3	102.53	0.03
4	102.46	-0.04
5	102.49	-0.01
6	102.52	0.02
7	102.47	-0.03
8	102.48	-0.02
9	102.54	0.04

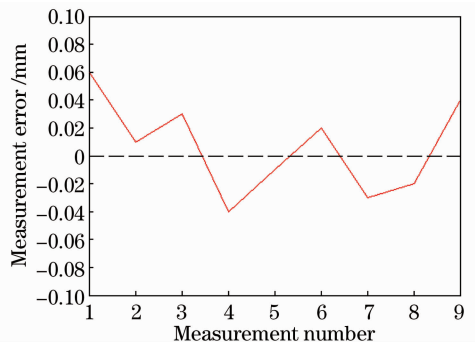


图 7 测量误差分布

Fig. 7 Measurement error distribution

由测量结果可以看到,计算得到的模型长度与游标卡尺测得的长度相差小于 0.06 mm,同时多组相机坐标校正一致性误差小于 0.1 mm。实验结果表明,所设计的系统对发射轨道基站相机空间几何

坐标进行校正是可行的。

6 精度分析

6.1 火炮基线与校正系统光轴调校重合精度

火炮基线追迹激光通过精密水准泡实现水平调节,水准泡偏差 $\sigma_1 = 4''$,发射源水平俯仰角通过精密光栅机械转台实现,转台精度 $\sigma_2 = 1''$ 。校正子系统水平俯仰角调校 PSD 最小可以探测 0.001 mm 的光点中心位移量,物镜焦距 550 mm,根据(1)式,PSD 所能检测的入射追迹光束水平俯仰角精度 $\sigma_3 = \arctan(0.001/550) = 0.38''$,校正系统水平姿态调校光栅转台精度 $\sigma_4 = 1''$ 。则火炮基线与校正系统主光轴重合精度为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} = \sqrt{4^2 + 1^2 + 0.38^2 + 1^2} = 4.26'' \quad (5)$$

6.2 追迹扫描光线校正阴影相机坐标精度

实际校正过程中,通过光栅尺精密转台驱动五棱镜扫描,分别校正同组基站中两个对应相机,转台精度为 $\sigma_1 = 1''$ 。

6.3 弹丸阴影像坐标换算精度

最后的数据处理通过分别获取坐标板和弹丸阴影像组合,来计算弹丸的空中坐标数据。精密光刻坐标板的刻线线宽误差 $\sigma_1 = \pm 5 \mu\text{m}$,网格间距误差 $\sigma_2 = 10 \mu\text{m}$,弹丸阴影像坐标换算精度为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{5^2 + 10^2} = 11.18 \mu\text{m} \quad (6)$$

7 结 论

发射轨道阴影相机坐标的精确一致校正对于靶道研究弹丸的飞行姿态有着重要的意义,直接决定着最后计算得到的坐标数据是否精确。基于光学杠杆原理和 PSD 的发射轨道阴影相机坐标校正方法,利用激光追迹靶道基线,校正相机坐标系与拍摄姿态。针对传统田字悬线基准投影校准法中人为判读误差大以及由于校正一致性差导致的各组相机间校正误差大的问题,有效地提高了校正精度。通过光学杠杆对坐标偏差的放大和 PSD 对坐标位移灵敏的探测,极好地保证了校正结果的一致,各组相机校正一致性高。针对新型校正系统的特点研究了装调方法,并用具体装置对装调方法进行了验证。该方法校正流程简单,极大地提高了校正效率。

参 考 文 献

1 Luo Hong'e, Chen Ping, Gu Jinliang *et al.*. Research and application on ultra-fast orthogonal shadowgraph system[J].

Electronic Measurement Technology, 2008, **31**(12): 1~3
 罗红娥,陈平,顾金良等.超高速 CCD 正交阴影照相系统的研究与应用[J].电子测量技术,2008, **31**(12): 1~3
 2 Gu Jinliang, Chen Ping, Xia Yan *et al.*. Digital ballistic range shadowgraph system[J]. *Journal of Ballistics*, 2009, **21**(4): 38~41
 顾金良,陈平,夏言等.数字式靶道阴影照相系统[J].弹道学报,2009, **21**(4): 38~41
 3 Ma Suodong, Zhu Rihong, Li Jianxin *et al.*. A multi-view measurement system for three-dimensional surface distribution of transient moving target[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3091~3097
 马锁冬,朱日宏,李建欣等.瞬态飞行目标三维面形的多视角测量系统[J].中国激光,2010, **37**(12): 3091~3097
 4 Mao Xianfu, Su Xianyu, Xiang Liqun *et al.*. Optical 3-D coordinate measurement based on handheld phase target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2006~2011
 毛先富,苏显渝,向立群等.基于手持相位标靶技术的光学三维坐标测量[J].光学学报,2010, **30**(7): 2006~2011
 5 Li Guantao. Design principle for ballistic range reference frame[J]. *Journal of Ballistics*, 1991, (2): 60~69
 李观涛.弹道靶道空间基准系统的设计原理[J].弹道学报,1991, (2): 60~69
 6 Liu Shiping, Yi Wenjun, Gu Jinliang *et al.*. A new method for image analysis and data extraction of projectiles in flight[J]. *Acta Armamentarii*, 2000, **21**(3): 201~204
 刘世平,易文俊,顾金良等.弹道靶道数据判读与处理方法研究[J].兵工学报,2000, **21**(3): 201~204
 7 Fu Yuegang, Jiang Huilin. Research on testing system of artillery axis consistency and departure angle[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2002, **23**(5): 80~82
 付跃刚,姜会林.火炮轴线一致性与偏离角测试系统研究[J].仪器仪表学报,2002, **23**(5): 80~82
 8 Cao Fei, Huang Duzhi. Studying adjustment of optical lever and telescope in the optical experiments[J]. *Physical Experiment of College*, 2010, **23**(6): 26~27
 曹飞,黄笃之.关于光学实验中望远镜与光杠杆的调节探讨[J].大学物理实验,2010, **23**(6): 26~27
 9 Zhang Yajuan, Qiu Zurong, Li Xinghua *et al.*. Laser tracking coordinate measurement system based on PSD[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, **30**(7): 116~119
 张亚娟,裘祖荣,李杏华等.基于 PSD 的激光跟踪坐标测量系统[J].传感器与微系统,2011, **30**(7): 116~119
 10 Zhang Peilin, Kong Guojie, Fu Jianping *et al.*. A method for measuring straightness of gun bore using PSD[J]. *J. North University of China(Natural Science Edition)*, 2011, **32**(2): 143~148
 张培林,孔国杰,傅建平等.一种利用 PSD 测量火炮身管直线度的方法[J].中北大学学报(自然科学版),2011, **32**(2): 143~148
 11 Wen Zhimin. Establishment of space datum line for high speed synchro-photographic device in exterior ballistic test basic system[J]. *J. Xi'an Institute of Technology*, 1987, (3): 52~57
 温志敏.狭缝联动摄影外弹道测试基础系统空间基准线的建立[J].西安工业学院学报,1987, (3): 52~57
 12 Huang Xiang, Wu Nianxiang. The research photoelectric autocollimator angle measurement system based on PSD[J]. *Manufacturing Automation*, 2011, **33**(6): 39~41
 黄祥,吴年祥.基于 PSD 的光电自准直仪角度测量系统研究[J].制造业自动化,2011, **33**(6): 39~41
 13 Guo Lifeng, Zhang Guoxiong, Guo Jingbin *et al.*. Study on spatial 3-D nonlinear correction technique for PSD[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(5): 566~570
 郭丽峰,张国雄,郭敬滨等.PSD 空间三维非线性修正技术的研究[J].光子·激光,2007, **18**(5): 566~570
 14 Huang Lu, Guo Honglian, Qu E *et al.*. Method for displacement calibration of four-quadrant photodetector in optical tweezers system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1004001
 黄璐,郭红莲,屈娥等.四象限探测器位移测量的标定方法[J].光学学报,2011, **31**(10): 1004001