

单星模拟器的调校准确度分析

闫亚东^{1,2}, 董晓娜¹, 何俊华¹, 仓玉萍^{1,2}, 陈良益¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要:介绍了五棱镜法调校单星模拟器的原理,并给出了一种判断星点板位于焦前、焦后以及离焦量的简单有效方法.通过详细分析影响调校准确度的主要误差源,得出了五棱镜 90°转向误差不影响平行度调校准确度的结论,确立了平移台导轨准确度和五棱镜法调校准确度之间的定量关系式.实验证明,用五棱镜法调校单星模拟器是可行的,能满足±2"的平行度误差要求.

关键词:调校;准确度分析;星模拟器;五棱镜;棱镜转动定理

中图分类号:O435;TH74

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2007)09-1742-5

0 引言

星传感器作为高准确度的姿态敏感器,在卫星等航天器上得到了广泛应用,其性能指标直接关系到测量结果的可信程度.星传感器进行姿态控制的参照物是恒星^[1],地面检测时通常用星模拟器,因此星模拟器出射光的平行度指标至关重要.星模拟器又分星图模拟器^[2]和单星模拟器,其中对单星模拟器平行度的调校方法国内未见相关报道.关于五棱镜法^[3]调校单星模拟器平行度的原理报道较多,但是对该方法在实用中误差源的影响和调校准确度分析报道少见.本文以单星模拟器的调校为例对五棱镜法的准确度和调校单星模拟器的可行性进行了研究.

1 用五棱镜法调校单星模拟器

1.1 调校原理

用五棱镜调校单星模拟器的装置如图1,将五

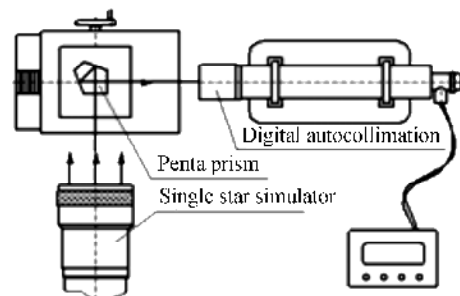


图 1 单星模拟器调校装置

Fig. 1 Adjusting equipment of single star simulator

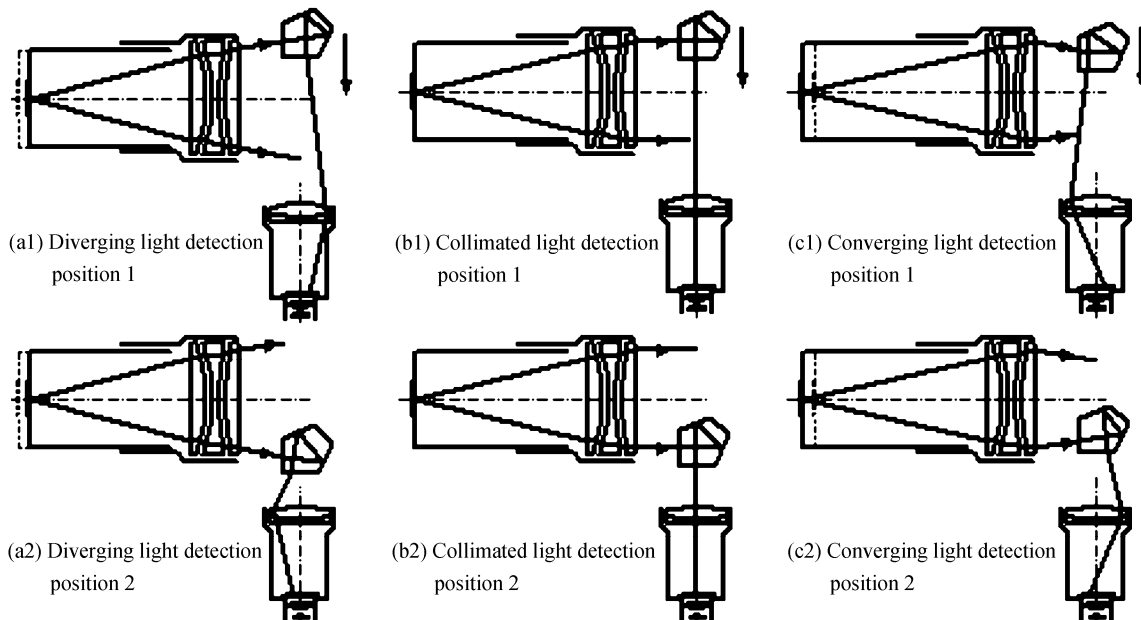


图 2 五棱镜法原理(a. 在焦面前 b. 在焦面上 c. 在焦面后)

Fig. 2 Principle of penta prism method (a. in front of focus b. be in focus c. behind focus)

棱镜固定于单星模拟器物镜前的平移台上,平移台运动方向与单星模拟器光轴垂直.用自准直仪观察经五棱镜射出的单星模拟器分划像,使之和自准直

仪的分划线对准.如图 2 所示沿垂直于单星模拟器光轴方向移动五棱镜,由于理想五棱镜使出射光线严格垂直入射光线,即将光线折转 90°,若单星模拟器发出平行光(图 2 b1,b2),在棱镜移动过程中,单星模拟器的分划像相对于自准直仪分划线不会产生横向移动.否则(图 2. a1,a2,c1,c2)五棱镜从单星模拟器孔径一侧移到另一侧,自准直仪相当于对物距一定、距离光轴不同的物点分别成像,像将会有横向移动,单星模拟器需要进行调校.

1.2 调校方法与步骤

单星模拟器的调整部件是物镜的修切圈.调校中主要任务是确定单星模拟器的星点板位于焦前还是焦后,以及离焦量,从而调整修切圈的厚度.一种确定离焦情况简易有效的方法是:1)在物镜和单星模拟器光管联接处画一条细直线确定两者的初始相对位置,如图 3(a).2)将物镜向远离星点板方向旋转并用自准直仪检测平行度误差变化情况;若误差

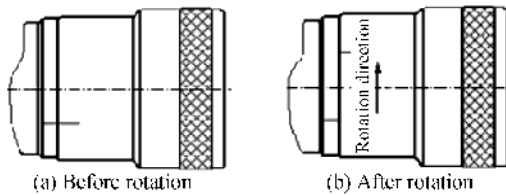


图 3 物镜调校方法
Fig. 3 Method of adjusting object lens

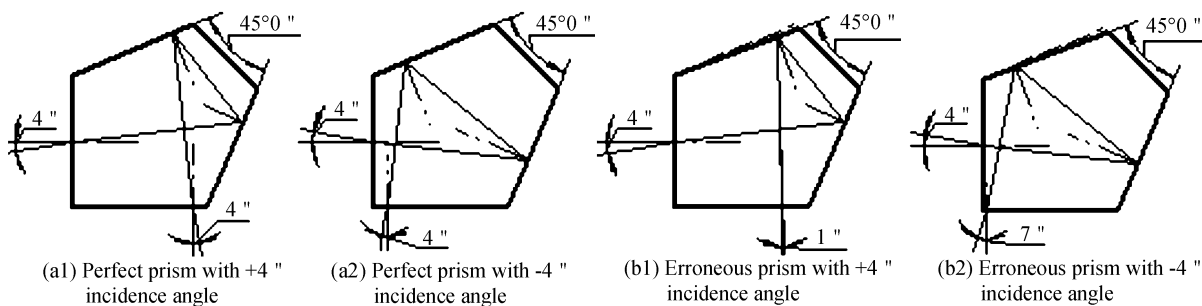


图 4 棱镜角度误差对出射光束方向的影响
Fig. 4 Effect of Prism deflection angle error on exit beam direction

2.1.2 五棱镜面形误差

五棱镜的加工面形要求包括光圈 N 和局部光圈 ΔN .为使仪器有较好的成像质量,按照瑞利条件光波波面的变形量不能超过波长的四分之一,即 N 最大为 0.5.局部光圈 ΔN 更小,其影响可以忽略^[5].为分析面形误差对调校准准确度的影响,用光学设计软件 Zemax 对模型(a)(各面同为凸面)和模型(b)(同为凹面)两种极端情况进行了光线追迹分析,五棱镜模型见图 5.

经模拟,五棱镜两个折射面面形误差对结果影响较小,而两个反射面面形误差影响较大.若折射面取光圈 $N_1=1$ (中等准确度),反射面取 $N_2=0.5$ (高准确度), $\lambda=0.555 \mu\text{m}$,由棱镜口径 D 根据式(2)算

变小说明需更换一个厚的修切圈,否则需将原修切圈变薄.旋动物镜直至自准直仪观察不出平行度误差时停止,根据物镜上画线旋动的弧长 ζ 、镜框外径 Φ 和螺纹螺距 t 可计算出调焦量 Δd .

2 调校准准确度分析

影响调校准准确度的因素可能有:五棱镜加工误差、五棱镜运动误差、自准直仪测量误差及环境影响等.其中环境影响在具有良好隔振的恒温实验室内可以忽略,下面对其他因素逐一进行分析.

2.1 五棱镜加工误差

2.1.1 五棱镜角加工误差

由于五棱镜存在角度加工误差,使光束转向并非绝对的 90°.一般认为该误差会影响调校准准确度,从而过高追求高准确度转向的五棱镜.但事实上,譬如五棱镜工作误差为 +2'',这将使所有通过五棱镜的光线都向一个方向偏转 2'',而不会改变光线之间的相对偏角.调校时检测的是光束的一个边缘到另一边缘光线的相对不平行度,因此五棱镜的角度误差不会影响调校准准确度.图 4 是五棱镜 45°角存在误差时对光束的转向情况^[4].实际上不论是哪一折反面偏离或是几个面同时偏离,最终结果都是将出射光束整体向某个方向偏转,而不会影响调校准准确度.

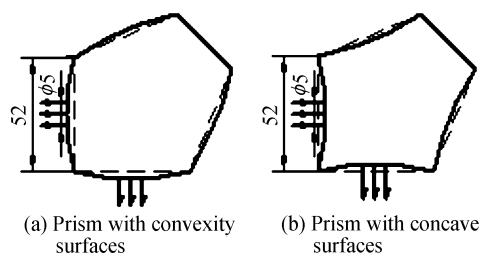


图 5 五棱镜模型
Fig. 5 Model of Penta Prism

出各面的曲率半径 R (玻璃材料取 K9,通光口径 $\phi 5$).

$$R = \frac{D^2}{8h} = \frac{D^2}{4\lambda N} \quad (1)$$

对子午面内各孔径的光线进行了追迹,在离棱镜 400 mm 处考察光线的坐标,结果如下

表 1 模型(a),(b)边缘光线追迹结果

y_a	光线偏角	y_b	光线偏角
0.1	0.04"	0.1	0.04"
0.2	0.09"	0.2	0.09"
0.3	0.13"	0.3	0.13"
0.4	0.17"	0.4	0.17"
0.5	0.22"	0.5	0.22"
0.6	0.26"	0.6	0.26"
0.7	0.30"	0.7	0.30"
0.8	0.34"	0.8	0.34"
0.9	0.39"	0.9	0.39"
1.0	0.46"	1.0	0.43"

模型(a),(b)面形误差引起的最大角度误差分别为 0.46"和 0.43"。一般五棱镜各面的面形误差是随机的,各面误差可能互相抵消一部分,实际的角度误差 δ_1 要小于 0.46"。

2.2 五棱镜运动误差引起光束转向误差

2.2.1 五棱镜运动误差引起光束转向变换矩阵

由于导轨运动时的微量抖动引起的五棱镜的状态变化可等效为五棱镜相对 x, y, z 轴分别旋转 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 。棱镜转动定理是^[6]:假定物空间不动,棱镜绕 P 转 θ 角,则像空间首先绕 P' 转 $(-1)^{n-1}\theta$, 然后绕 P 转 θ ,数学表达式为: $[A] = (-1)^{n-1}\theta P' + \theta P$ 。这里 $[A]$ 作为像空间转动状态的代号, n 为反射次数, θ 为有限转角, P 为表示棱镜转轴方向和位置的单位向量, P' 为 P 在像空间的共轭像。

五棱镜反射次数 $n=2$,物像相似, x, y, z 轴在像方空间对应的共轭像轴为 x', y', z' 轴,见图 6。

$$i = -j', j = i', k = k' \tag{2}$$

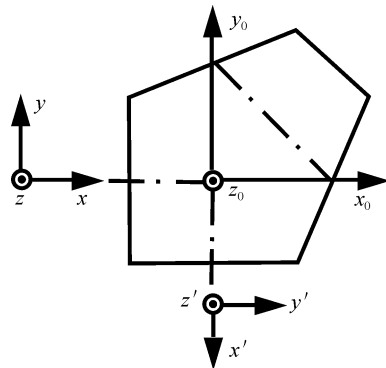


图 6 五棱镜成像特性
Fig. 6 Character of Penta Prism imaging

五棱镜沿 x 轴正向入射光线的方向向量 $r = i$, 出射光线的方向向量为 $r' = i'$,五棱镜绕 x 轴旋转 θ_1 ,像方空间绕 x' 轴旋转 $-\theta_1$ 后再绕 x 轴旋转 θ_1 的变换矩阵分别为

$$A'_{1(x')} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ 0 & -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix}$$

$$A_{1(x)} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 \end{bmatrix}$$

$$r_1 = A_{1(x)} A'_{1(x')} r' \tag{3}$$

同理得绕 y 轴旋转的矩阵分别为

$$A'_{2(y')} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & -\sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$A_{2(y)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \\ 0 & \sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$r_2 = A_{2(y)} A'_{2(y')} r_1 \tag{4}$$

绕 z 轴旋转的矩阵分别为

$$A'_{3(z')} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & \sin \theta_3 & 0 \\ -\sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{3(z)} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R = r_3 = A'_{3(z')} A_{3(z)} r_2 = A'_{3(z')} A_{3(z)} A'_{2(y')} A_{2(y)} A'_{1(x')} A_{1(x)} r' \tag{5}$$

经计算可知: $A'_{3(z')} A_{3(z)} = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{bmatrix}$,

故 $R = r_3 = A'_{3(z')} A_{3(z)} r_2 = A'_{2(y')} A_{2(y)} A'_{1(x')} A_{1(x)} r'$ 。

由此可见,五棱镜沿 z 轴旋转对像空间没有影响,但五棱镜绕 x, y 轴的微小旋转,将影响五棱镜的出射光线方向。

2.2.2 五棱镜绕单轴旋转对光束转向的影响

若在调校中,五棱镜由标准位置移动到另一位置后,导轨造成五棱镜绕 x 轴旋转 0.1",即 $\theta_1 = 0.1''$ (约 4.848×10^{-6} rad)。用 Matlab 进行矩阵计算得

旋转后出射光方向向量为 $(9.999\ 999\ 999\ 882\ 477 \times 10^{-1}, 0, 4.848\ 136\ 811\ 076\ 368 \times 10^{-6})^T$

初始出射光方向向量为 $(1, 0, 0)^T$

根据两个向量 α, β 之间的夹角公式

$$\cos \langle \alpha, \beta \rangle = \frac{\alpha \cdot \beta}{|\alpha| |\beta|} \tag{6}$$

经计算,五棱镜微小偏转而引起的出射光平行度误差为 0.1"。

用 Matlab 绘制的平行度误差和五棱镜绕 x 轴微小偏角关系如图 7。由图可见,当五棱镜绕 x 轴的旋转角从 $4.8 \times 10^{-8} \sim 4.8 \times 10^{-6}$ rad (0.01"~1"),引起的五棱镜出射光方向改变从 $0.009\ 7'' \sim 1''$,基本是一线性关系。五棱镜的微小偏角引起的平行度

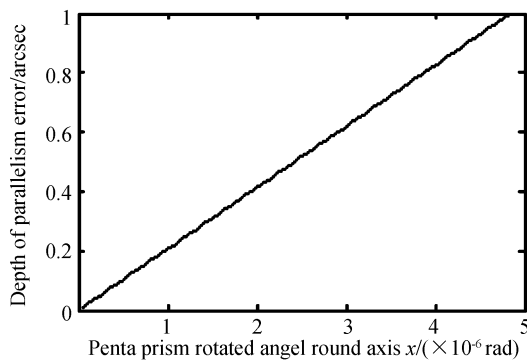


图 7 五棱镜绕 x 轴旋转引起的平行度误差
Fig.7 Parallel error caused by penta prism rotation round axis x

误差可表示为

$$\delta_x \approx \theta_1 \tag{7}$$

式中 δ_x 为五棱镜绕 x 轴旋转引起的出射光束平行度误差, θ_1 为五棱镜绕 x 轴旋转角度。

2.2.2 五棱镜绕 x, y 轴旋转对单星模拟器调校的影响

若五棱镜由标准位置移动后,分别绕 x 轴旋转 $0.1''$,绕 y 轴旋转 $0.1''$,即 $\theta_1 = \theta_2 = 0.1''$ 。用 Matlab 进行矩阵计算,得出五棱镜微小偏转而引起得误差为 $0.19999'' \approx 0.2''$ 。

用 Matlab 绘制的平行度误差随五棱镜绕 x 轴, y 轴微小偏角关系图如图 8。由图可知,当五棱镜绕 x 轴旋转角度范围在 $0.01'' \sim 1''$,绕 y 轴旋转角度范围在 $0.01'' \sim 1''$,引起的平行度误差图形基本为一个平面。其平面方程近似可表示为

$$\delta_z \approx \theta_1 + \theta_2 \tag{8}$$

式中, δ_z 为平移台沿导轨运动引起的棱镜出射光束平行度误差, θ_1 为五棱镜绕 x 轴旋转角度, θ_2 为五棱镜绕 y 轴旋转角度。检测中平移台导轨平行度经反复调校过,运动误差指标 $\delta_2 = \pm 0.8''$ 。

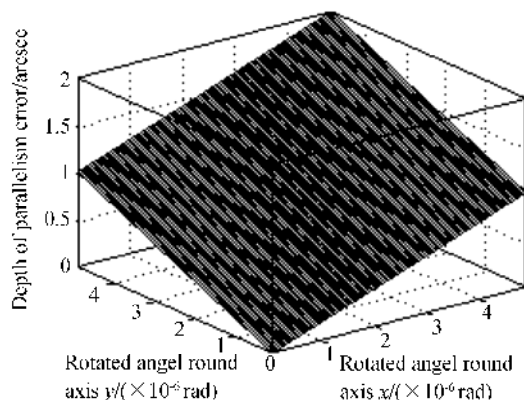


图 8 五棱镜绕 x, y 轴旋转引起的平行度误差
Fig.8 Depth of parallelism error caused by penta prism rotation round axes x and y

2.3 自准直仪误差

自准直仪误差主要有:1)自准直仪示值误差 $1'$

内 $\pm 0.3''$;2)自准直仪瞄准准确度 $\pm 0.1''$;3)自准直仪读数误差 $\pm 0.02''$ 。

自准直仪总误差

$$\delta_3 = \pm \sqrt{(\pm 0.3'')^2 + (\pm 0.1'')^2 + (0.02'')^2} \approx \pm 0.32'' \tag{9}$$

根据误差理论,可算出五棱镜法调校单星模拟器的极限误差为

$$\delta = \pm \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} = \pm \sqrt{0.46^2 + 0.80^2 + 0.32^2} = \pm 0.98'' \tag{10}$$

3 调校结果

对物镜修切圈进行两次修切后,自准直仪已不易观察出平行度误差变化,此时每次移动五棱镜后,先将自准直仪的分划像移开再重新对准测量,其结果如表 2。由结果可知,即使考虑到测量的极限误差,单星模拟器的平行度误差在 $\pm 2''$ 以内。

表 2 调校结果数据

导轨位置 /mm	20	30	40	50	60	70	80	90	100
平行度误差 /arcsec	0	0.88	0.80	1.03	0.92	1.14	1.57	1.83	1.68
平行度误差 /arcsec	0	0.70	1.10	0.95	1.24	1.68	1.37	1.75	1.96

4 结论

实践证明,五棱镜法调校单星模拟器简单可行。平移台导轨准确度和五棱镜法调校准准确度之间的定量关系式对五棱镜法的应用有一定的参考价值。在用五棱镜法时,不应过高地追求五棱镜的转向准确度;应该尽量提高五棱镜导轨的运动准确度,减小运动引起的光束转向误差,使五棱镜光束转向系统在调校中发挥最佳效能。

参考文献

- [1] WANG Hu, MIAO Xing-hua, WEN De-sheng, et al. Optical system design of star sensor with wide-view field and small F-number[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**, (12): 1822-1824.
王虎,苗兴华,汶德胜,等.宽视场大相对孔径星敏感器光学系统设计[J].光子学报,2005,**34**(12):1822-1824.
- [2] ZHANG Wen-ming, LIN Ling, HAO Yong-jie, et al. Design of adynamic display system for star map in small-sized star simulator[J]. *Opto-electronic engineering*, 2007, **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设计[J].光电工程,2000,**27**(5):11-14.
- [3] LI Song. Principle analysis of detecting collimating performance of light beam[J]. *Journal of Geomatics*, 1999, (2):30-31.
李松.用五棱镜法检测光束准直性的原理分析[J].测绘信息与工程,1999,(2):30-31.
- [4] YU Dian-hong, LI Lin, LU Bing-heng. Analysis on method establishing high accuracy datum plane [J]. *Acta Photonica*

Sinica, 2005, **35**, (6): 912-915.

于殿泓, 李琳, 卢秉恒. 高准确度基准平面建立方法分析[J]. 光子学报, 2005, **35**(6): 912-915.

- [5] FANG Qi-yong, SHI Huan-fang, GAO Hong-yao. Application of right angle prism's plane reflection attenuation in laser beam diagnostic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**, (10): 1220-1224.

房启勇, 施浣芳, 高洪尧. 直角棱镜平面反射衰减在激光光束诊断中的应用研究[J]. 光子学报, 2003, **32**(10): 1220-1224.

- [6] CHANG Shan, CAO Yi-ping, CHEN Yong-quan. Kinematic error effect of pentagonal prism on wavefront measment[J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**, (3): 12-16.
常山, 曹益平, 陈永权. 五棱镜的运动误差对波前测量的影响[J]. 光学仪器, 2005, **27**(3): 12-16.

Accuracy Analysis of Adjusting Single Star Simulator

YAN Ya-dong^{1,2}, DONG Xiao-na¹, HE Jun-hua¹, CANG Yu-ping^{1,2}, CHEN Liang-yi¹

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Received date: 2006-06-12

Abstract: The principle of adjusting single star simulator with Penta Prism method was introduced. A new simple and effective method of judging whether the focus glass be in focus or not was given. A conclusion that pentagonal prism 90° swerving error does not affect the adjusting precision was drown through analyzing the main error sources in detail. And the function of the translational plane precision and changed scalar of ray direction was established. It was proved that it was feasible that adjusting single star simulator with Penta Prism method. This method can meet the demand of parallel error of ± 2 arcsec.

Key words: Adjust; Accuracy analysis; Star simulator; Pentagonal prism; Law of prism turning

YAN Ya-dong was born in 1979. He received his Bachelor's degree from Zhengzhou University in 2003. He is now a doctoral candidate in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences. His research interest focuses on optical engineering.

