

基于五棱镜的大型平行光管焦面监测技术及误差修正方法

李 响^{1,2}, 张晓辉¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 大型平行光管在进行空间环境模拟实验中由于受到温度、气压大幅改变的影响, 离焦现象较为严重, 为了解决该状态下平行光管离焦量检测难度较大、检测精度不高等问题, 提出了一种针对大口径长焦距平行光管焦面位置检测的新方法, 可以对平行光管的离焦量进行实时的监测。分析了由五棱镜引入的主要系统误差, 并使用更新基准数据的方法将其修正。在口径为 700 mm 焦距为 18 m 的平行光管上进行了实验, 结果表明该系统检焦精度在 150 μm 以内, 满足实验室对大型平行光管焦面位置精度小于 200 μm 的指标要求。

关键词: 焦面监测; 平行光管; 五棱镜; 大口径;

中图分类号: TH74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2251-06

Monitoring technique of focal plane position for large scale collimator based on pentaprisms and its error compensation method

Li Xiang^{1,2}, Zhang Xiaohui¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The large collimator defocus phenomenon becomes more serious due to the substantial change in temperature and atmospheric pressure during the simulation experiments of space environment. In order to solve this problems that there is an increasing difficulty and a bad accuracy when detecting the defocus of collimator, a new method was proposed to detect the focal plane position and monitor the defocus amount in real time for large diameter long focal length collimator. The major systematic errors which induced by the pentaprism were analyzed, and they were corrected by using the method of updating the reference data. Experiments which have been performed on the collimator of 700 mm aperture and 18 m focal length showed that the detection accuracy of focal plane position can be reached 150 μm , and it

收稿日期: 2013-11-05; 修订日期: 2013-12-03

作者简介: 李响(1986-), 男, 博士生, 主要从事光学检测和空间载荷像质评价等方面的研究。Email: abelfeel@163.com

导师简介: 张晓辉(1967-), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间光学遥感器的光学系统、整机成像系统的像质评价工作、相关检测理论的研究和检测设备的研制方面的研究。Email: zhangxiaohui0123@163.com

fully met the requirements of optical test in laboratory that position accuracy of focal plane should be less than 200 μm for large collimator.

Key words: focal plane monitoring; collimator; pentaprisms; large-aperture

0 引言

随着空间光学的发展, 大口径高分辨率天文望远镜、空间相机需求量日趋增大, 其光学性能测试系统的标准也随之提高, 平行光管作为光学性能测试系统的主要组件也因此向大口径、长焦距方向发展。目前主要通过检测大型平行光管的波相差、焦距和焦面位置评价其光学性能^[1-2]。其中焦面位置较容易受到工作环境的影响产生离焦, 尤其是在进行空间环境模拟实验时, 随着真空罐内气压和温度的大幅降低, 大型平行光管管体伸缩量可达数毫米, 焦面明显偏离常温常压下标定位置, 最终影响实验结果的准确性。由于被检光学系统相对离焦量与平行光管离焦量的关系是两者焦距平方的反比, 所以一般使用 3~5 倍于被检光学系统焦距的平行光管来对其进行检测, 这样可以使大口径长焦距平行光管的离焦对被检设备的影响降到同等焦距检测时的 1/9~1/25。因此正常情况下实验室大型平行光管的焦面位置精度应小于 200 μm 才可以满足对大口径光学设备的检测要求(由于大口径长焦距平行光管的焦深一般比实验室要求的焦面位置精度大数倍, 所以文中不考虑其焦深问题)。

目前国内外对大口径长焦距平行光管焦面标定与检测最常用的方法是干涉仪法。由于该方法需要使用与平行光管口径相当的高精度平面镜作为自准直辅助镜, 所以一般用于大型平行光管实验前的标定, 精度可以达到 100~200 μm , 但无法对空间环境模拟实验中处于工作状态的平行光管离焦量进行检测。虽然自动检焦、对焦技术自 20 世纪 70 年代发展至今已经较为成熟, 但大多是基于数字图像处理技术且主要针对空间相机或天文望远镜等成像光学系统^[3-6], 所以对于大口径长焦距平行光管这类非成像光学系统目前缺少一种光学遮拦较小、检焦精度较高、可以在平行光管进入真空罐并达到所需环境条件后仍可继续监测其离焦量变化情况而又无需破坏平行光管现有工作状态的检测系统。

文中针对以上问题设计了一种适用于大口径长焦距平行光管的焦面实时监测系统, 采用五棱镜作为反射元件, 光学遮拦小、可以安装在平行光管上且不影响其正常使用; 采用半导体激光器、小型镜头和线阵 CCD 等元件实现对大型平行光管离焦量的检测并且全程由图形化软件进行实时监测与控制。在口径为 700 mm 焦距为 18 m 的平行光管上进行了实验, 结果表明该系统针对大口径长焦距平行光管离焦量的检测精度可以达到 150 μm , 满足实验室对大型平行光管焦面位置精度小于 200 μm 的指标要求。

1 系统设计

1.1 系统设计指标要求

大口径长焦距平行光管检焦系统指标要求如表 1 所示。

表 1 系统设计参数

Tab.1 Technical parameters of system

Technical parameters	Design requirements
Detection type of collimator	Newton or Cassegrain collimator
Detection range of diameter range	≥ 700 mm
Detection range of focal length	13~20 m
Detection precision of defocusing amount	≤ 200 μm
Detection range of defocus	-60~60 mm

该系统结构设计主要根据被测平行光管的口径、焦距、焦面位置、外形结构特点等参数来确定其主要元件的安装角度和位置, 以及镜头的焦距、视场、相对孔径、像面大小等必要指标。

1.2 工作原理

整个系统主要分为四部分(见图 1), 第一部分是目标发射装置, 以半导体激光器作为光源通过分光棱镜和半反半透镜使两束激光在平行光管焦面位置处相交并照亮位于其上的狭缝目标板; 第二部分是自准直装置, 利用两块对称放置的五棱镜接收由平

行光管出射的两束激光并将其折转 180° 反射回去, 作为自准直检测的辅助镜。第三部分是目标接收装置, 使用两组小型镜头将经过五棱镜和平行光管自准回焦面的两束激光会聚到后方的 CCD 上; 第四部分是计算机控制终端, 通过图形化软件可以对 CCD 上两光斑的距离、坐标、平行光管离焦量等参数进行实时监测。

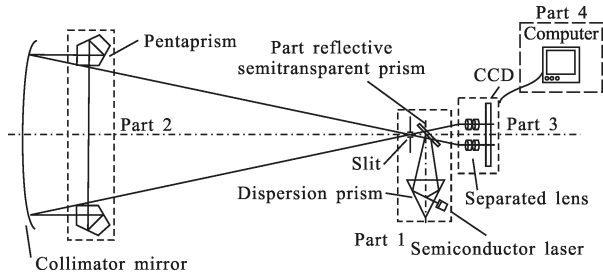


图 1 焦面监测系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of focal plane monitoring system

根据文中可知, 系统第三部分目标接收装置的工作原理如图 2 所示。当被测平行光管合焦时, 平行光管靶面安装位置与平行光管焦面重合于 A 点, 此时由五棱镜反射回来的光束通过两组小型镜头会聚于 CCD 上得到距离 L_0 作为文中检测平行光管离焦量的基准数据。当平行光管靶面安装位置离焦 Δ 时, 由五棱镜反射回来的光束交点反向离焦 Δ 于 A' 点, 导致 CCD 上的光斑偏离合焦基准位置并移动 δ 。

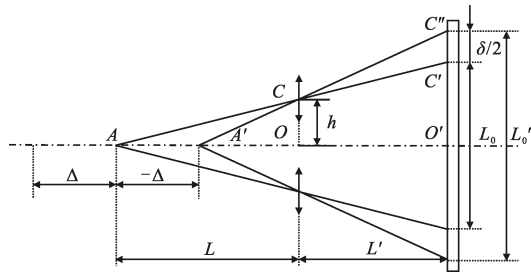


图 2 平行光管离焦时 CCD 上光斑位置的变化

Fig.2 Variation of light spot position on CCD when collimator defocus

假设小型镜头的放大率是 M 、焦距是 f 、镜头光轴距平行光管光轴为 h 并且当 $L_0' > L_0$ 即 $\delta > 0$ 时系统离焦方向为正(如图 2 中离焦状态), 反之为负, 则根据图中各量关系可以得到平行光管离焦量 Δ 与检焦系统各参数的关系式:

$$\Delta = \frac{\delta f(1+M)}{M(2Mh+\delta)} \quad (1)$$

1.3 光学系统设计

由上式可知, 镜头的焦距 f 与放大率 M 对系统检焦精度影响较大, 所以对镜头进行合理的设计与优化将大大提高本系统对于大型平行光管焦面位置的检测能力, 光学系统如图 3 所示。



图 3 镜头光学系统图

Fig.3 Optical system structure of the lens

镜头传递函数曲线如图 4 所示, 从图中可以看出该光学系统接近衍射极限满足设计要求。

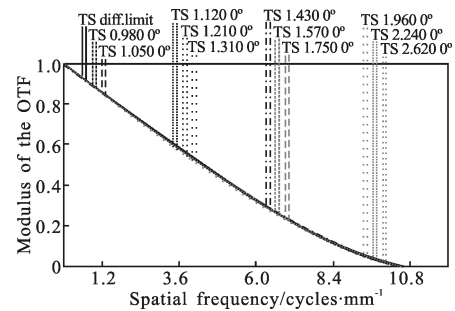


图 4 镜头传递函数曲线

Fig.4 MTF curves of the lens

平行光管单位 20 mm 离焦时像面的点列图如图 5 所示, 可以从图中看到在系统离焦 ± 60 mm 范围内, 像面有效弥散斑小于 $7.5 \mu\text{m}$, 基本达到衍射极限, 并接近 CCD 像元大小, 有利于提高对光斑移动

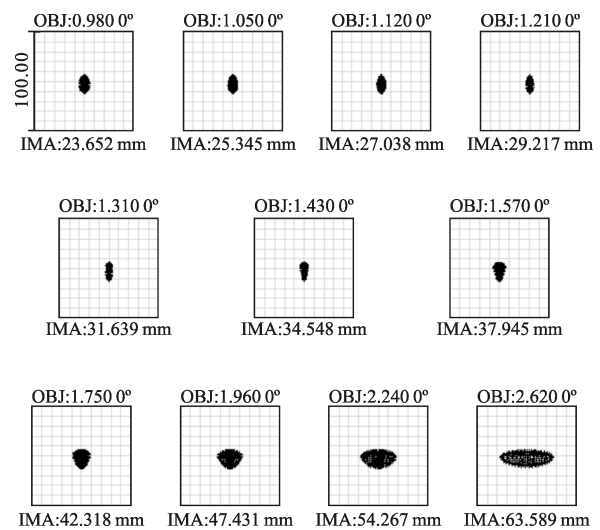


图 5 镜头点列图

Fig.5 Spot diagrams of the lens

距离 δ 的检测精度,基本满足设计要求。由于该系统只需捕捉 CCD 上会聚光斑的坐标,所以对光学系统像差要求并不十分严格,只需简单矫正初级像差即可,所以不再详述。

1.4 图像处理算法

在确定了镜头的各种主要指标后,根据公式(1)中该系统各参数的关系可知,被测平行光管的离焦量只与 δ 有关,所以准确捕捉会聚光斑在 CCD 上的位置坐标将保证该检焦系统对于大型平行光管离焦量检测的正确性。根据该系统的技术要求,对比多种图像处理方法^[7-9],最终选用优化后的质心法作为 CCD 采集数据的处理方法。该方法可以显著降低信号中每个点对于整体的影响,精度较高、重复性较好、计算速度快,能够满足本系统的实时性要求。

设 CCD 上每个像元对应的空间坐标为 (x_i, y_i) , 每个像元被光照时产生的光电子数是 g_i , 第 i 个光斑的面积为 S_i , 阈值 g_i 覆盖的像元范围作为积分区域, 则 CCD 上每个光斑面积如下:

$$S_i = (x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} - y_i) \quad (2)$$

通过面积的比对,剔除次级光斑和由系统元件反射产生的不规则光斑,得到主极大光斑并确定其质心坐标:

$$y_c = \frac{\sum g_i (y_{i+1} - y_i) y_i}{\sum y_i (y_{i+1} - y_i)} = \frac{\sum g_i \cdot y_i}{\sum g_i} \quad (3)$$

$$x_c = \frac{\sum g_i (x_{i+1} - x_i) x_i}{\sum g_i (x_{i+1} - x_i)} = \frac{\sum g_i \cdot x_i}{\sum g_i} \quad (4)$$

式中: $g_i = k(g_{\max} - g_{\min}) + g_{\min}$, $k = 0.1$ 这样可使积分区域包括完整的光斑图像。

最后,通过质心坐标计算出两个返回光斑的偏移量 δ 并由公式(1)得出平行光管的离焦量 Δ 。

2 主要系统误差分析与修正

文中使用五棱镜而非大口径平面镜作为光束反射元件,由于五棱镜存在第一平行差,导致系统引入了最主要的焦面位置检测误差^[10-12]。第一平行差使被转向光束在五棱镜主截面内的转向角偏离 90° , 导致射出光束与入射光束之间产生了一个固定误差角。如图 6 所示,假设五棱镜中 $\angle BOE$ 存在加工误差 Δ_{45° , 则 $\angle BOE'$ 就会增加 $3\Delta_{45^\circ}$, 使 AB 、 $A'E'$ 产生 $3\Delta_{45^\circ}$ 的夹角, 导致光束偏转角改变。同理,若 $\angle ABO$ 、 $\angle AEO$ 分别存在 Δ_1 、 Δ_2 的角度误差,则由五棱镜角

度加工误差引起的光束总偏转误差角为:

$$\theta = 3\Delta_{45^\circ} + \Delta_1 + \Delta_2 \quad (5)$$

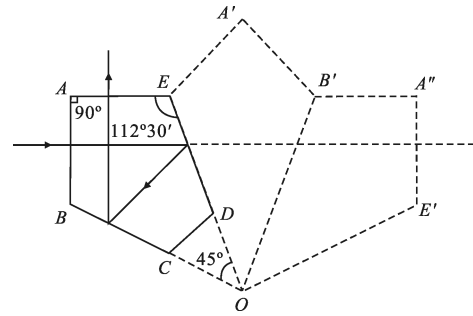


图 6 五棱镜展开图

Fig.6 Expanded diagram of pentaprism

当把存在以上误差的五棱镜放入该系统的光路中时(如图 7),被转向光线出现偏转角 θ , 并与平行

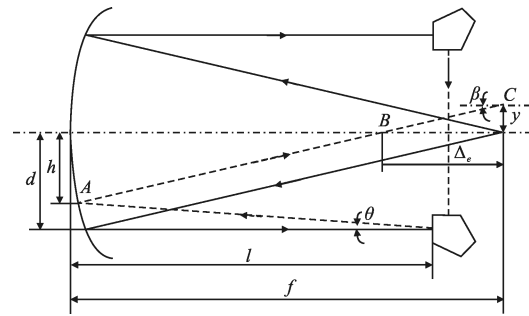


图 7 五棱镜角度误差对检测系统的影响

Fig.7 Effect of pentaprism angular error on detection system

光管的主镜交于点 A 距光轴为 h ; 与光轴交于点 B 相对平行光管焦点偏离 Δ_e ; 最后入射到焦面处 C 点, 与光轴夹角为 β 且距离平行光管焦点为 y 。图中 l 为五棱镜到平行光管主镜的距离, Δ_e 为五棱镜第一平行差引起的系统检焦误差, f 为平行光管焦距, 由图中各量关系可以得到如下关系式:

$$\Delta_e = \frac{f^2 \tan \theta}{d + (f-1) \tan \theta} \quad (6)$$

使用经纬仪检测五棱镜的真实转向角度,得到该系统两个五棱镜的转向误差, $\theta_1 = 8.2''$ 、 $\theta_2 = -7''$, 总转向误差 $\theta = 1.2''$, 由上式可以计算出在口径为 700 mm 焦距为 18 m 的平行光管上该系统由五棱镜引入的检焦误差 Δ_e 为 6.178 mm。

由公式(1)、(6)可知,由于 θ 的存在系统在开始检测之前就包含了一个离焦量 Δ_e , 导致返回光线无法回到平行光管自身焦点,所以基准数据 L_0 不能再

代表系统零位。又因为系统检测的离焦量 Δ 与 CCD 上光斑移动量 δ 为非线性关系, 所以不能直接把 Δ_e 从结果中减去, 应更新正确的基准数据 L_0' 后再进行修正, 具体过程如下。

通过公式(1)的反函数可以得到与 Δ_e 相关的光斑移动量 δ_e 的表达式:

$$\delta_e = \frac{2M^2h\Delta_e}{M(f-\Delta_e)+f} \quad (7)$$

计算出正确的基准数据 $L_0'=L_0-\delta_e$, 重置系统零位。最后得到修正后被检平行光管真正的离焦量:

$$\Delta = \frac{\delta'f(1+M)}{M(2Mh+\delta')} - \Delta_e \quad (8)$$

式中: $\delta'=L-L_0'$, L 为系统进行检测时 CCD 上会聚光斑的实时距离。

除以上由五棱镜引入的主要系统误差以外, 其他影响检测结果的因素包括:

(1) 两块五棱镜的相对位置安装误差。由五棱镜折转光路的特性和该系统所采用的相对测量方法可知, 在系统正确安装的前提下, 五棱镜相对位置安装误差对检测结果影响较小。

(2) 振动的影响。大口径长焦距平行光管工作在隔振平台上并且该系统的检测结果为多次测量的平均值, 可以有效地降低振动对该系统检测结果造成的影响。

(3) 气流的影响。文中主要是针对工作在低温低压环境下平行光管设计的检焦系统, 所以气流对该系统的影响可以忽略。

3 实验结果分析

3.1 实验装置

该实验使用的是焦距 18 m, 口径为 700 mm 的卡塞式平行光管。系统主要包括以下元件: 半导体激光器; 分光棱镜; 半反半透棱镜; 0.2 mm×3 mm 狭缝目标板; 两个口径为 40 mm×40 mm 的五棱镜; 两组焦距为 100.625 mm, 口径为 11 mm 的小型镜头; DALSA 公司的 Piranha 2 线阵 CCD 相机(像素为 4 096, 像元大小为 7 μm×7 μm); DALSA 公司的 X64-CL iPro 图像采集卡(该采集卡拥有双输出的 Camera link 接口, 最大传输速率可以达到 528 M/s, 适用于该系统实时性的要求)。

3.2 实验过程与结果分析

进行实验之前, 首先对被测平行光管焦平面位

置进行标定, 确保平行光管自身焦点与其靶面安装位置重合并根据系统的设计结构, 对各元件进行安装调试。之后打开激光器, 使激光照亮安装于平行光管靶面的狭缝目标, 通过检焦系统控制软件设定系统零位, 然后开始检测。转动平行光管靶面调节鼓轮, 使安装在靶面上的狭缝目标离开平行光管焦面。每次离焦量 $\Delta_{真}$ 为 150 μm, 记录该系统检测的离焦量 $\Delta_{理}$, CCD 上光斑移动距离 δ 。详细实验数据见表 2, 其中 δ 与 $\Delta_{理}$ 为 10 次测量的平均值。

表 2 实验数据

Tab.2 Experiment data

$\Delta_{真}/\mu\text{m}$	$\delta/\mu\text{m}$	$\Delta_{理}/\mu\text{m}$	$ \Delta_{理}-\Delta_{真} /\mu\text{m}$
-750	-2.30	-2 756.38	2 006.38
-600	-1.84	-2 204.67	1 604.67
-450	-1.39	-1 660.85	1 210.85
-300	-0.92	-1 099.18	799.18
-150	-0.46	-554.39	404.39
0	0	0	0
150	0.47	565.16	415.16
300	0.91	1 101.39	801.39
450	1.37	1 652.42	1 202.42
600	1.85	2 216.63	1 616.63
750	2.31	2 771.82	2 021.82

由表 2 可知, 五棱镜角度误差引起的系统误差严重影响了该系统的检焦精度, 而通过公式(8)对系统采集数据和基准数据进行修正后(见表 3), 可以发现系统中主要误差被消除, 对 150 μm 的离焦量反应较为灵敏。

表 3 修正后数据

Tab.3 Corrected data

$\Delta_{真}/\mu\text{m}$	$\delta/\mu\text{m}$	$\Delta_{理}/\mu\text{m}$	$ \Delta_{理}-\Delta_{真} /\mu\text{m}$
-750	-2.30	-742.54	7.46
-600	-1.84	-593.63	6.37
-450	-1.39	-446.99	3.01
-300	-0.92	-295.68	4.32
-150	-0.46	-149.06	0.94
0	0	0	0
150	0.47	151.81	1.81
300	0.91	295.71	4.29
450	1.37	443.44	6.56
600	1.85	594.56	5.44
750	2.31	743.12	6.88

文中通过反复试验,确定使用 $0.2\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 狭缝目标时,可以得到 $150\text{ }\mu\text{m}$ 的检焦分辨率,小于 $7.5\text{ }\mu\text{m}$ 的测量误差,结果较为满意。基本满足系统设计要求 and 实验室科研工作对大型平行光管焦面标定精度的要求。

4 结 论

文中针对大口径长焦距平行光管在进行光学检测工作中容易受到环境影响发生离焦的现象,同时考虑到传统干涉仪法使用的大口径平面镜装调与安装都较为不便,只能作为实验前平行光管焦面的静态标定方法,无法在平行光管进入低温、低压或其他工作状态后对其离焦量进行动态的监测。为了解决以上问题文中提出了一种检定大型平行光管焦面位置的新方法,采用五棱镜作为反射元件,光学遮拦较小,可以在平行光管进入真空罐并达到所需环境条件后继续监测其离焦量的变化情况而又不会破坏平行光管现有的工作状态。设计了接受返回光束的小型镜头,满足了 $-60\sim 60\text{ mm}$ 系统检焦范围的技术要求。研究了常见的数据处理方法,最终选择优化后的质心法捕捉光斑位置坐标,达到了高精度实时检测离焦量的要求。分析并计算了由五棱镜引入的主要系统误差,并给出了相应的修正方法。在口径为 700 mm 焦距为 18 m 的平行光管上进行了实验,结果表明该系统检焦分辨力可以达到 $150\text{ }\mu\text{m}$,满足实验室对大型平行光管焦面位置精度小于 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的指标要求,为进一步优化大口径光学设备的检测技术提供了积极的参考作用。

参 考 文 献:

- [1] Yang Zhiwen. Optical Measurement [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995: 17-18. (in Chinese)
- [2] Gao Minghui, Li Lifu, Xu Jingli, et al. Design of a new kind of multi-waveband large aperture parallel light pipe[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 698-701. (in Chinese)
- [3] Chen Yuqun, Fan Dian, Hu Jun, et al. Auto-focus technology in the detection of infrared lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2120-2125. (in Chinese)
- [4] Guo Huinan, Cao Jianzhong, Zhou Zuofeng, et al. Auto-focus algorithm of digital camera based on optical flow estimation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3417-3422. (in Chinese)
- [5] Liang Cuiping, Gao Yan, Qiao Yanfeng, et al. Research on the examining-focus technology in the theodolite based on the phase method with lens-apart [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(6): 349-351. (in Chinese)
- [6] Wu Lintao, Cai Sheng, Qiao Yanfeng. Modeling and analysis of dialyte-lens auto-focusing technology for theodolite [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 28(12): 1241-1244. (in Chinese)
- [7] Li Zhaohui, Wu Keyong. Application of centroid sensing method in real-time auto-focusing system used in space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(4): 335-338. (in Chinese)
- [8] Zhang Jichao. Application of auto-focusing with margin field for airborne remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 1038-1043. (in Chinese)
- [9] Fan Chao, Li Yingcai, Fu Hongliang, et al. Influence of defocusing on measurement accuracy of image motion of space camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1028002. (in Chinese)
- [10] Ma Dongmei, Liu Zhixiang, Ma Lei, et al. Influences of alignment error in pentaprism scanning system and fabrication angle error on measuring accuracy of optical surface [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(12): 2517-2523. (in Chinese)
- [11] Hao Qun, Zhao Yang, Cao Mang, et al. Application of pentaprism in establishing the datum plane for measuring flatness in large scale dimension [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(8): 1134-1137. (in Chinese)
- [12] Yu Lina. Wavefront sensing of large aperture collimating optical system based on pentaprism scanning method [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008: 35-38. (in Chinese)