

文章编号: 1002-2082(2007)05-0649-05

用 ZEMAX 模拟五棱镜误差对平行度检测的影响

闫亚东^{1,2}, 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, 陕西 西安 710119;

(2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 介绍了用五棱镜法检测大口径光束平行度的原理。分析了五棱镜加工的角度误差及面形误差对检测结果的影响, 得出了五棱镜角度误差不影响检测结果, 2 个折射面的面形误差对检测结果的影响较小, 2 个反射面的面形误差对检测结果影响最大的结论。介绍了选择五棱镜的方法和减小面形误差影响的方法。最后, 给出了用五棱镜法检测单星模拟器出射光束平行度的应用实例。

关键词: 五棱镜法; 平行度检测; ZEMAX 模拟; 角度误差; 面形误差

中图分类号: O435; TH74

文献标志码: A

Effect of penta prism error on parallelism detection

YAN Ya-dong^{1,2}, 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 School of CAS, Beijing 100039, China)

Abstract: The detection concept for large diameter beam parallelism with penta prism is introduced. The effect of penta prism angle and surface profile errors on parallelism detection was analyzed. It is concluded that the angle error has no impact on the detection results and the profile errors of the two refraction surfaces have little effect, but the profile errors of the two reflection surfaces have great influence on the detection. The methods for selecting penta prism and reducing the effect of surface profile error on detection are introduced. At the end, an example is given to illustrate the detection of the parallelism error of a single star simulator with penta prism.

Key words: penta prism method; parallelism detection; ZEMAX simulation, angle error; surface profile error

引言

大口径平行光管及单星模拟器出射光的平行度指标的检测非常重要。常用的大口径光束平行度检测方法有: 远物法、可调前置镜法、自准直法、五棱镜法和三管法以及近年来提出的剪切干涉法、塔耳波特成像法^[1]等。这些方法中五棱镜法因设备简

单, 检测精度较高而广泛应用。对五棱镜法检测平行度的原理报道较多, 对五棱镜法检测平行度的导轨运动误差的影响分析^[2]也有报道, 但是在对检测结果的误差分析中往往忽视了五棱镜本身带来的误差, 而在实际使用该方法过程中, 五棱镜的选取是十分关键的。若五棱镜精度太低, 则会给检测结

收稿日期: 2006-12-15; 修回日期: 2007-03-02

作者简介: 闫亚东(1979—), 男, 河南周口人, 中科院西安光学精密机械研究所博士生, 主要研究方向光学设计和光学检测。

E-mail: yyd@opt. ac. cn

果带来较大误差。然而,五棱镜加工误差对检测结果的影响分析较为困难。本文建立了五棱镜误差分析模型,用光学设计软件ZEMAX 对分析模型进行了模拟,完善了五棱镜法检测结果的误差分析,并

给出了减小误差的方法以及五棱镜法应用实例。

1 五棱镜法平行度检测的原理

五棱镜法检测平行度的原理^[3]如图1所示。将

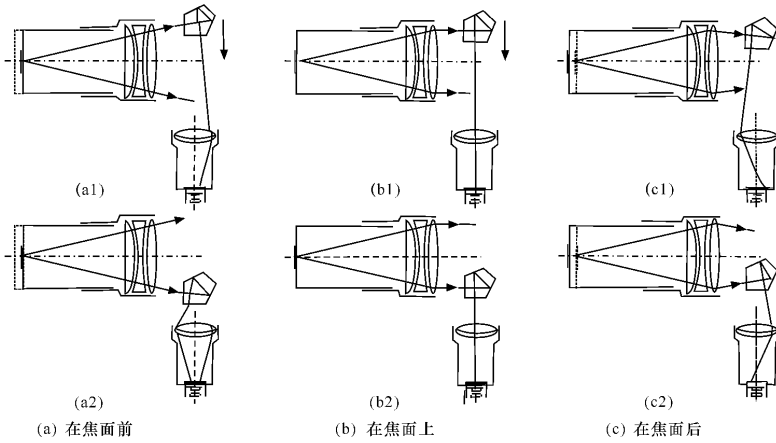


图1 五棱镜法原理示意图

Fig. 1 Principle of penta prism method

五棱镜固定于待检平行光束前的平移台上,平移台可以沿垂直于待检光束光轴的方向平移。用高精度数显自准直仪观察经五棱镜取样的待检光束的分划像,使之和自准直仪的分划线对准。沿垂直于光束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于入射光线,即将光线折转 90° ,若待检光束严格平行,如图1(b1,b2)所示。在棱镜移动过程中,光束的分划像相对于自准直仪分划线不会产生横向移动。否则,如图1(a1,a2,c1,c2)所示,五棱镜从光束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;重新调整自准直仪使光束分划像再次与分划线对准,自准直仪将显示光束的平行度误差。

束转向并非绝对的 90° 。一般认为该误差会影响检测结果,事实并非如此。譬如五棱镜工作误差为 $\pm 2''$ (即将入射光束偏转 $90^\circ \pm 2''$),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。而检测的正是光束的一个边缘到另一边缘各个孔径光线的相对不平行度,因此五棱镜的角度加工误差不会影响检测结果。图2是五棱镜 45° 角存在误差时对光束的转向情况,实际

该方法主要应用了五棱镜将光束折转 90° 的特性,然而五棱镜自身加工中的角度误差和面形误差将影响五棱镜 90° 折转特性,从而可能影响五棱镜法检测的结果。下面详细分析角度误差和面形误差对检测结果的影响。

2 五棱镜加工误差对检测结果的影响

2.1 角度误差对检测结果的影响

实际的五棱镜不可能是理想的五棱镜,它的5个角度都不同程度地存在一定的加工误差,因而光

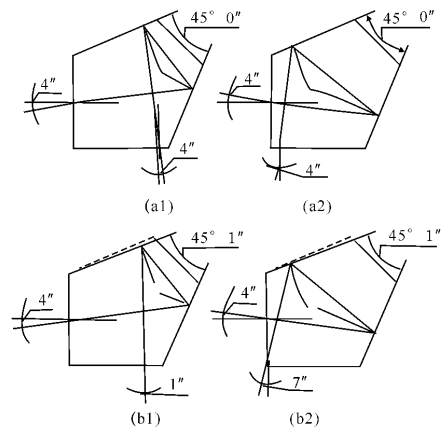


图2 棱镜角度误差对出射光束方向的影响

Fig. 2 Effect of prism angle error on direction of emergent beam

上,无论是哪一角度存在误差或是几个角度同时存在误差,最终结果都是将射出光束整体向某个方向偏转,不会影响光束的相对结构,也就不会影响到检测结果。因此,在应用五棱镜法时没有必要过高要求五棱镜的角度加工精度。

2.2 面形误差对检测结果的影响

五棱镜的加工面形要求包括光圈 N 和局部光圈 ΔN 。在分析面形误差对检测精度的影响时,因为光学元件表面面形较复杂,需要建立既简单又能反映出主要问题的分析模型。一般局部光圈 ΔN 较小,为简化分析可以忽略其影响^[4],只考虑光圈 N 的影响,为此建立了如图3所示的分析模型。

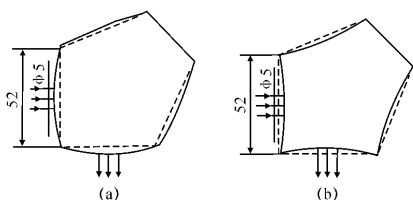


图3 五棱镜面形误差分析模型

Fig. 3 Analytical model for surface-shape mismatched error of penta prism

用光学设计软件ZEMAX对模型a(各面同为高光圈)和模型b(同为低光圈)2种极端情况进行了光线追迹分析^[5-6]。若折射面取光圈 $N_1=1$ (中等精度),反射面取 $N_2=0.5$ (高精度), $\lambda=0.555\ \mu\text{m}$,由棱镜口径 D 根据公式(1)算出各面的曲率半径 R (玻璃材料取K9,通光口径为 $\varphi 5$)。

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

对子午面内各孔径的光线进行追迹,在离棱镜400 mm处考察光线的偏角,结果见表1。

表1 模型a 光线追迹结果

Table 1 Ray tracing results of model a

Aperture	Ray deviation angle/"	Reflection surface component/"	Refraction surface component/"
0.1	0.04	0.03	0.01
0.2	0.09	0.03	0.01
0.3	0.13	0.10	0.03
0.4	0.17	0.14	0.03
0.5	0.22	0.17	0.05
0.6	0.26	0.20	0.06
0.7	0.30	0.24	0.06
0.8	0.34	0.27	0.07
0.9	0.39	0.31	0.08
1.0	0.46	0.34	0.12

表2 模型b 光线追迹结果

Table 2 Ray tracing result of model b

Aperture	Ray deviation angle/"	Reflection surface component/"	Refraction surface component/"
0.1	0.04	0.03	0.01
0.2	0.09	0.07	0.02
0.3	0.13	0.10	0.03
0.4	0.17	0.14	0.03
0.5	0.22	0.17	0.05
0.6	0.26	0.20	0.06
0.7	0.30	0.24	0.06
0.8	0.34	0.27	0.07
0.9	0.39	0.31	0.08
1.0	0.43	0.34	0.09

由表1和表2可以看出:虽然折射面面形精度要求较低,反射面面形精度要求较高,但在结果误差中,反射面对误差的贡献量比折射面的贡献大3倍多,且误差随着通光口径的增大而相应地增大。

在折射面光圈 $N_1=1$ 、反射面光圈 $N_2=0.5$ 的情况下,模型a和模型b面形误差引起的最大角度误差分别是 $0.46''$ 和 $0.43''$ 。一般五棱镜各面的光圈高低是随机的,相互之间可能互相抵消一部分,实际面形误差引起的角度误差要小于极端情况。图5(a)组是抵消最好的2种情况,(b)组是抵消较好的2种情况。

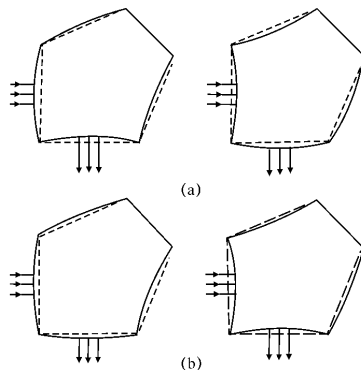


图5 五棱镜各面误差相互抵消示意

Fig. 5 Sketch of error counteraction on all surfaces of penta prism

在实际选择五棱镜时,有时检测各个面的面形误差受到各种条件的限制,不易做到。另外,一个更有效的方法就是对五棱镜的成像鉴别率进行检验。

3 减小面形误差影响的方法

五棱镜加工完成以后,其面形误差是固有的定

值,但是可以通过在五棱镜前加1个小孔光阑,以减小通光口径,来减弱面形误差的影响。应用中尽量使用五棱镜中心面部分,以减小棱镜面塌边、勾边造成的影响。另外,小孔光阑的应用可以对待检光束进行更多更精确的采点,提高了检验精度。但是,有时光阑的大小受到待检光束照度的限制,光阑太小,采样光束太弱,不利于自准直仪对准,因此光阑的大小要根据实际情况权衡而定。

4 五棱镜法应用实例

用五棱镜法对单星模拟器模拟的无穷远星光的平行度进行了检测、调试,检测装置如图6所示。

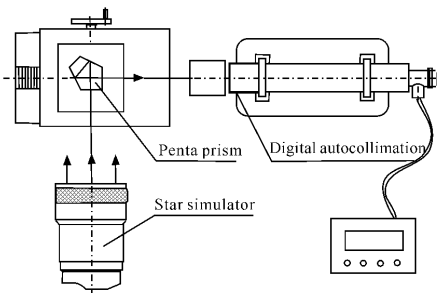


图6 单星模拟器检测装置

Fig. 6 Detection equipment of single-star simulator

单星模拟器出射光束口径100 mm,五棱镜小孔光阑直径5 mm。

数字显示自准直仪指标为

- a) 自准直仪示值误差1'内±0.3";
- b) 自准直仪瞄准精度±0.1";
- c) 自准直仪读数误差±0.02"。

五棱镜放在1个导轨平行度经过严格调校的平移台上,导轨平行度误差0.8",平移台能够在垂直星模拟器出射光束方向移动。

4.1 检测装置系统误差

系统误差来源主要有:①五棱镜加工面形误差 δ_1 ;②导轨平行度误差 δ_2 ;③自准直仪总误差为

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

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

$$\delta = \pm \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} = \pm \sqrt{0.46^2 + 0.80^2 + 0.32^2} = \pm 0.98'' \quad (3)$$

4.2 检测、调校方法与步骤

首先将五棱镜移到星模拟器出射光束的一侧,将自准直仪的像点调到十字丝中心,并将自准直仪清零。当五棱镜从光束口径一个边缘以步长10 mm移到另一边缘时,记录自准直仪读数。

若平行度误差过大,则通过调整星模拟器修切圈的厚度,调节星点板到物镜之间的距离,然后再进行检测,反复进行此过程,直到检测结果满足要求为止。

4.3 调校结果

用上述方法经过2次调整之后,检测结果如表3中I组数据。可以看出,全口径内最大平行度误差为1.83",考虑到系统误差±0.98"仍然满足±2"的平行度误差要求。为防止物镜偏心引起出射光束不对称,将星模拟器翻转90°再进行测量,记录结果如表3中II组数据,可以看出,由于偏心引起的光束不对称度,考虑到系统误差后,数据仍在允许的范围之内。

表3 单星模拟器检测结果数据

Table 3 Detected results of single-star simulator

Guide position /mm	Ray deviation angle I /"	Ray deviation angle II /"
20	0	0
30	0.88	0.70
40	0.80	1.10
50	1.03	0.95
60	0.92	1.24
70	1.14	1.68
80	1.57	1.37
90	1.83	1.75
100	1.68	1.96

5 结论

用五棱镜法进行平行度检测,检测精度受下列很多因素的影响,平移台导轨精度、自准直仪误差及环境影响等,但在五棱镜加工误差的因素中,2个反射面面形误差的影响起着主要作用。选择五棱镜时必须注意,在面形精度相同的情况下,大尺寸的五棱镜要比小尺寸的五棱镜面形更好。检测中要尽量减小五棱镜小孔光阑尺寸,并利用五棱镜面中间部分,以减小五棱镜加工面形误差对检测结果的

影响,提高检测精度。

参考文献:

- [1] 王之江. 光学技术手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1987:340-341.
WANG Zhi-jiang. Optical technique manual [M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing House, 1987:340-341. (in Chinese)
- [2] 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.
CHANG Shan, CAO Ying-ping, CHEN Yong-Quan. Effect of processed angle error of pentagonal prism on front wave measurement[J]. Optical Instruments, 2005,27(3):12-16. (in Chinese)
- [3] 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.
LI Song. Theory analysis of detection collimation using pentagonal prism[J]. Journal of Geomatics, 1999(2):30-31. (in Chinese)
- [4] 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.
FANG Qi-yong, SHI Huan-fang, GAO Hong-yao. Application of right angle prism plane reflection attenuation in laser beam diagnostic [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(10): 1220-1224. (in Chinese)
- [5] 张斌,张晓晖,韩昌元. 光学系统计算机辅助装调中的一种优化算法[J]. 光学精密工程, 2000,8(3):273-277.
ZHANG Bin, ZHANG Xiao-hui, HAN Chang-yuan. Algorithm for misalignment determination in computer-aided alignment of optical system [J]. Optics and Precision Engineering. 2000, 8(3): 273-277. (in Chinese)
- [6] 杨晓飞,张晓辉,韩昌元. Zemax 软件在离轴三反射镜系统计算机辅助装调中的应用. 光学精密工程, 2004,12(3):270-274.
YANG Xiao-fei, ZHANG Xiao-hui, HAN Chang-yuan. Application of Zemax software in alignment of three-mirror off-axis aspherical optical system [J]. Optics and Precision Engineering. 2004, 12(3): 270-274. (in Chinese)
- (上接第 644 页)
- GAO Zhi-shan. Application of Zemax in aberration design[D]. Nanjing: NJUST, 2006. (in Chinese)
- [11] 徐渊,赵炜,惠延年. 波前像差与屈光矫正[J]. 世界核心医学期刊文摘, 2005,1(3):1-5.
XU Yuan, Zhao Wei, HUI Yan-nian. Wavefront aberration and refraction remedy [J]. World Core Medical Journal, 2005,1(3):1-5. (in Chinese)
- [12] CURATU E O, PETTIT G H, CAMPIN J A. Customized schematic eye model for refraction correction design based on ocular wavefront and corneal topography measurements [J]. SPIE, 2002, 4611:165-175.
- [13] HWEY-LAN L, NOBEL A B. Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling [J]. J. Opt. Soc. Am. A., 1997, 14(8):1684-1695.
- [14] ESCUDERO-SANZ I, NAVARRO R. Off-axis aberrations of a wide-angle schematic eye model [J]. J. Opt. Soc. Am. A., 1999, 16(8):1881-1891.
- [15] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
YU Dao-yin, TAN Heng-ying. Engineering optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2002. (in Chinese)