

大口径望远镜主镜径向偏心误差检测技术

李敏^{1,2}, 张昂¹, 张俊波¹, 鲜浩¹

¹中国科学院光电技术研究所自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为保证大口径望远镜主镜在加工、镀膜和装调过程中的径向公差要求, 提出一种基于图像处理的实时检测大口径望远镜主镜径向偏心误差的方法, 利用光学成像系统对沿轴线运动的主镜的内孔和固定于主镜支撑结构底座的参考孔进行成像, 通过边缘提取和质心算法计算主镜相对于支撑结构的径向偏心误差。经实验验证, 该方法可实现对主镜径向偏心误差的实时测量, 且测量精度满足主镜的径向公差要求。

关键词 成像系统; 大口径望远镜主镜; 径向偏心误差; 质心算法

中图分类号 O438 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.091103

Radial Eccentricity Error Detection of Primary Mirror of Large Aperture Telescopes

Li Min^{1,2}, Zhang Ang¹, Zhang Junbo¹, Xian Hao¹

¹Key Laboratory of Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to achieve the radial tolerance requirement in the process of machining, coating and aligning of the primary mirror of large aperture telescopes, we present a method based on image processing to realize the real-time detection of the radial eccentricity error of the primary mirror. Using optical imaging systems to take pictures of the reference hole which is fixed to the base of the primary mirror support structure and the inner hole of primary mirror while it is moving along the axis, the radial eccentricity error of the primary mirror with respect to the support structure is calculated by the edge extraction and the centroidal algorithm. Experimental results show that this method can realize the real-time measurement of the radial eccentricity error of the primary mirror, and the accuracy satisfies the radial tolerance requirement.

Key words imaging systems; primary mirror of large aperture telescopes; radial eccentricity error; centroidal algorithm

OCIS codes 110.6770; 110.1080; 220.1140; 220.1010

1 引言

随着天文学的不断发展, 望远镜的口径在不断地增大^[1-4]。自 20 世纪 90 年代以来, 一批代表着最先进技术的 8~10 m 级可见光和红外大口径望远镜相继建成^[5], 如美国大双筒望远镜(LBT)、日本的 SABARU、欧洲甚大望远镜(VLT)等望远镜的主镜口径都达到了 8 m 以上。为保证大口径望远镜的成像质量, 要求在主镜的加工、镀膜、装调等不同工作阶段, 主镜与支撑结构之间满足一定的径向公差要求。

目前, 常用的径向偏心误差测量方法主要有坐标法、反向法和壁厚法等^[6-7], 这些测量方法都是在通用器

收稿日期: 2017-02-05; **收到修改稿日期:** 2017-03-11

作者简介: 李敏(1990—), 女, 博士研究生, 主要从事大口径望远镜在线调整方面的研究。

E-mail: limin414@mails.ucas.ac.cn

导师简介: 鲜浩(1969—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事自适应光学和光机系统设计等方面的研究。

E-mail: xianhao@ioe.ac.cn(通信联系人)

具(如圆度仪、坐标测量仪、分度头)上,利用 V 形块和指示器进行测量^[8],或通过外圆圆周方向多点测量主镜与支撑结构之间的距离来测定径向偏心误差。这些方法多为接触式,测量精度受人为因素影响较大,测量速度慢、过程复杂^[9],而且由于主镜处于沿轴线方向连续运动的状态,传统的检测方法无法实现对运动元件径向偏心误差的实时测量。

因此,本文提出了一种检测大口径望远镜主镜径向偏心误差的方法,该方法是一种非接触测量方法,利用光学成像系统对参考孔和主镜内孔成像,通过计算机进行图像处理,计算主镜内孔相对于参考孔的质心位置和倾斜状态,实时计算不同物距下主镜的径向偏心误差并进行调校,最终使望远镜主镜与其支撑机构之间的径向装调误差满足要求。该法不受人因为因素影响,测量速度快,可实时检测主镜径向偏心误差,提高了测量速度和工作效率。

2 基本原理

在望远镜主镜沿轴线方向由初始位置向目标位置运动过程中,通过光学成像系统和 CCD 相机对主镜内孔和固定于主镜支撑结构底座的参考孔进行成像,根据边缘提取和质心算法计算主镜内孔的质心位置变化,实现对主镜径向偏心误差的实时检测,保证主镜相对于支撑结构的径向装调误差满足要求。检测原理如图 1 所示。

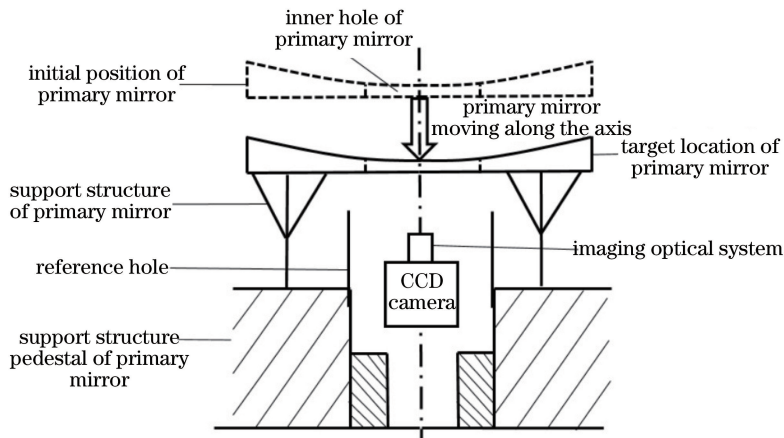


图 1 主镜径向偏心误差实时检测原理图

Fig. 1 Schematic of real-time detection for radial eccentricity error of primary mirror

从图 1 可以看出,由于主镜沿轴线连续运动,因此主镜移动过程中,光学成像系统需要将主镜内孔和参考孔清晰成像,探测器靶面需要满足视场要求。

利用 Matlab 软件对不存在径向偏心误差的理想装调状态下参考孔和主镜内孔的成像进行仿真,并对仿真结果进行二值化处理,得到参考孔和主镜内孔的成像结果,如图 2 所示。

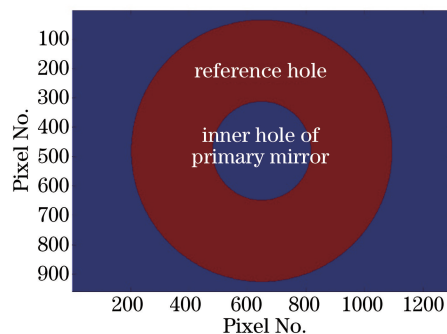


图 2 无径向偏心误差时的理想成像结果

Fig. 2 Ideal imaging results without radial eccentricity error

为了减小随机噪声的影响,在图像处理前,对同一系统状态下图像序列进行灰度值均衡化处理,计算公式为

$$I(x, y) = \frac{\sum_{j=1}^n I_j(x, y)}{n}, \quad (1)$$

式中 $I_j(x, y)$ 为第 j 幅图像在像素坐标 (x, y) 处的光强值, n 为采集的图像帧数。

分别对参考孔和望远镜主镜内孔进行边缘提取,对图 2 所得的仿真图像进行边缘提取所得结果如图 3 所示。

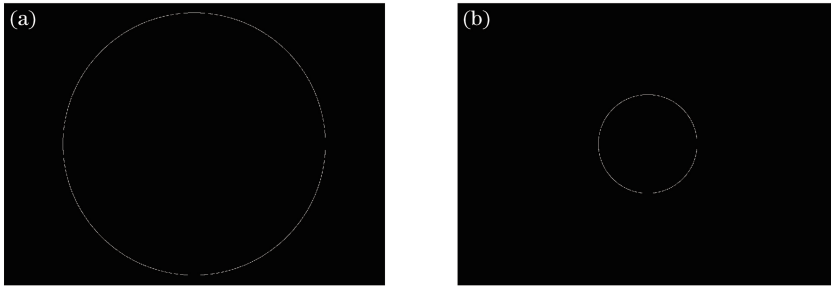


图 3 (a)参考孔边缘提取图;(b)主镜内孔边缘提取图(理想成像结果)

Fig. 3 (a) Edge extraction result of the reference hole; (b) edge extraction result of the inner hole of primary mirror (ideal imaging results)

根据图 3 中参考孔和主镜内孔的边缘提取结果,利用质心算法计算质心坐标,计算公式为^[10]

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \times P(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^N P(x_i, y_i)}, \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \times P(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^N P(x_i, y_i)}, \quad (2)$$

式中 N 为采样点个数, $P(x_i, y_i)$ 为边缘提取结果 $P(x, y)$ 在第 i 个采样点 (x_i, y_i) 所对应的像素光强值。

对于像空间而言,主镜内孔与参考孔的质心坐标偏差计算公式为

$$\Delta x = x_{co} - x_{cr}, \quad \Delta y = y_{co} - y_{cr}, \quad (3)$$

式中 (x_{co}, y_{co}) 为根据(2)式计算的像面上主镜内孔的质心坐标, (x_{cr}, y_{cr}) 为根据(2)式计算的像面上参考孔的质心坐标。

根据光学系统的成像公式,由像空间主镜内孔与参考孔的质心坐标偏差计算物空间二者径向偏心误差,计算公式为

$$\Delta x_e = \frac{\Delta x \times d}{1000\beta}, \quad \Delta y_e = \frac{\Delta y \times d}{1000\beta}, \quad (4)$$

式中 Δx 、 Δy 为像空间主镜内孔与参考孔的质心坐标偏差, d 为探测器像素尺寸, β 为主镜所在物距下对应的光学系统成像放大倍率。

该方法除了能实时检测大口径望远镜主镜相对于支撑结构的径向偏心误差外,还可根据主镜内孔和参考孔的边缘提取结果进行椭圆拟合,利用椭圆长轴长度 a 和短轴长度 b 的比值 $\sin \gamma = b/a$, 计算主镜内孔相对于支撑结构的倾斜角度 γ 。

3 实验结果

3.1 探测器暗噪声标定

在进行实验前,首先对 CCD 相机的暗噪声进行标定。关闭相机镜头光圈,使 CCD 相机连续采集 T 帧灰度图像,每幅图像由 $n_x \times n_y$ 个像素组成,则图像可表示为 $A(x, y, t)$, 其中 $x = 1, 2, \dots, n_x, y = 1, 2, \dots, n_y, t = 1, 2, \dots, T$ 。CCD 相机平均暗噪声可表示为

$$\overline{S(x, y)} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T A(x, y, t). \quad (5)$$

相机暗噪声的均方根可表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \frac{\sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{x=1}^{n_x} \left\{ \sum_{y=1}^{n_y} [A(x, y, t) - \bar{A}]^2 \right\} \right\}}{n_x \times n_y}}, \quad (6)$$

式中 \bar{A} 为 T 帧图像每个像素的平均灰度值, 计算公式为

$$\bar{A} = \frac{1}{n_x n_y T} \sum_{x=1}^{n_x} \sum_{y=1}^{n_y} \sum_{t=1}^T A(x, y, t). \quad (7)$$

在本实验中, 为了提高成像亮度、保证主镜内孔和参考孔的成像质量, 设置长曝光时间为 5 s, 连续采集 20 帧 8 bit 图像, 根据(5)式计算 CCD 相机的平均暗噪声, 得到平均暗噪声分布直方图, 如图 4 所示。

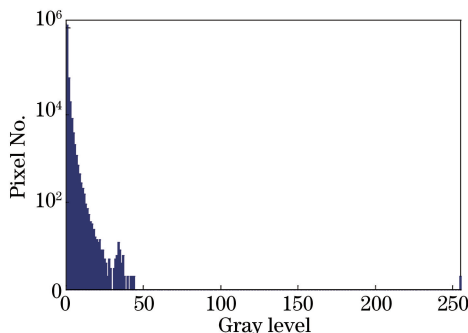


图 4 CCD 相机平均暗噪声分布直方图

Fig. 4 Average dark noise distribution histogram of the CCD camera

图 4 为长曝光时间下 CCD 相机暗噪声的分布直方图, 经分析发现 CCD 相机存在两个灰度级为 255 的像素坏点, 两个坏点对应的行列坐标分别为 (590, 498) 和 (522, 888), 在后续计算中将忽略这两个坏点值。CCD 相机除个别像素点暗噪声较大, 其他大多数像素点暗噪声均小于 50 灰度级。根据(6)式计算 CCD 相机的暗噪声均方根为 0.8478 灰度级。

为了提高信噪比, 在图像处理时将拍摄的图片与背景图片求差值消除相机噪声及背景噪声的影响。为了消除随机噪声的影响, 可采集多帧图像根据(1)式对图像进行灰度值均衡化处理。

3.2 实验结果及分析

设定参考孔直径为 126 mm, 主镜内孔直径为 194 mm, 搭建实验平台。其中, 参考孔位置固定, 距离光学成像系统的物距为 200 mm, 主镜内孔沿直线导轨由初始位置(距离光学成像系统物距 650 mm 处)移动到目标位置(距离光学成像系统物距 350 mm 处)。实验平台如图 5 所示。

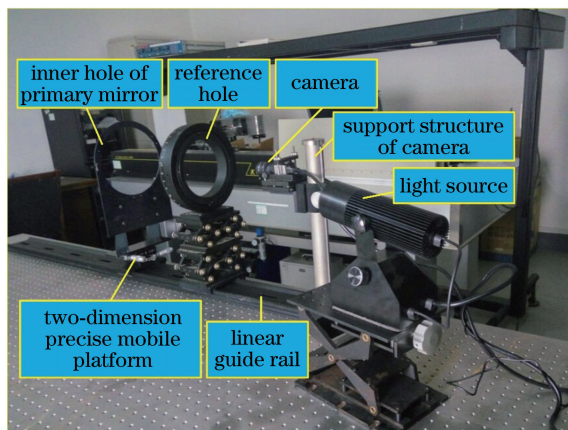


图 5 实验平台

Fig. 5 Experimental platform

利用该平台对所提出的主镜径向偏心误差检测方法的测量精度进行验证。具体实验过程如下: 将参考孔固定安装于支撑结构, 主镜内孔安装于二维精密移动平台, 并安装在直线导轨上, 通过主镜内孔沿直线导

轨的移动模拟主镜由初始位置到目标位置的下降过程,同时,主镜内孔可通过二维精密移动平台在径向方向移动,模拟主镜相对于支撑结构的径向偏心误差。实验时,在主镜相对于光学成像系统的物距范围内选择一个物距,将主镜固定,通过二维移动平台使主镜产生一定的径向偏心误差,以此来验证本文方法的测量精度。

在本文实验中,首先将主镜固定在相对于光学成像系统的物距 500 mm 处,调节相机、参考孔和主镜内孔的高度,根据参考孔和主镜内孔在相机上的成像,计算参考孔和主镜内孔质心坐标相对于 CCD 靶面中心的偏移,对相机位置和主镜位置进行调节,使其中心位于同一轴线,利用成像光学系统和 CCD 相机拍摄图片。由于实验采用的光学成像系统的通光口径很小,照明光源的强度也较小,为提高 CCD 探测光强,采用较长的曝光时间,同时对主镜内孔和参考孔表面进行了简单的处理以提高成像亮度,所得结果如图 6 所示。

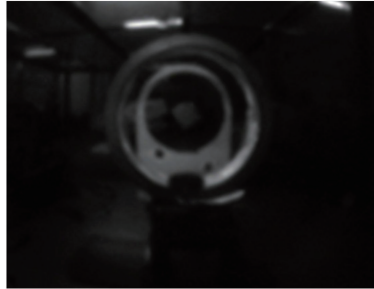


图 6 主镜内孔和参考孔的成像结果

Fig. 6 Imaging results of primary mirror inner hole and reference hole

对相机采集的图像进行图像处理,分别对参考孔成像和主镜内孔成像进行边缘提取,结果如图 7 所示。

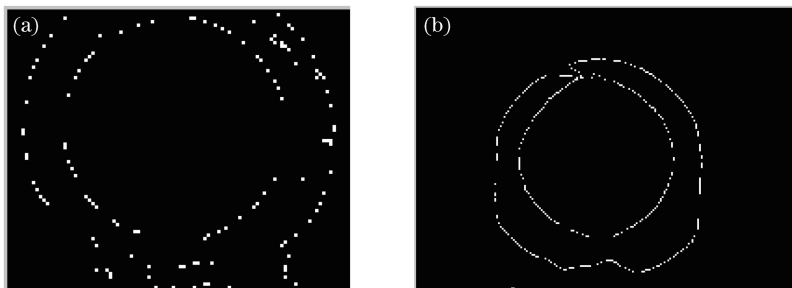


图 7 (a)参考孔边缘提取图;(b)主镜内孔边缘提取图(实验结果)

Fig. 7 (a) Edge extraction result of the reference hole; (b) edge extraction result inside the primary mirror (experimental result)

由于实验中采用的参考孔和主镜内孔都存在一定的厚度,因此进行边缘提取时会出现环状结果,在计算主镜内孔与参考孔的质心坐标时只需要根据最内侧孔的边缘提取结果选取采样点计算理想状态下参考孔和主镜内孔的质心位置。

通过二维精密移动平台,分别以 0.1,0.2,0.3 mm 步长沿径向移动主镜内孔,使主镜内孔相对于参考孔产生一定的径向偏心误差,主镜的径向偏心误差每增加一个步长,则相机连续采集 10 幅图片进行图像灰度均衡化处理,并对不同移动步长下的图像分别进行边缘提取,利用质心算法计算主镜的径向偏心误差每增加一个步长时所对应的主镜内孔质心坐标变化量的均值和标准差,将所得结果与理论值比较,以此来确定本文方法的测量精度。

当主镜相对于参考孔的径向偏心误差分别以 0.1,0.2,0.3 mm 步长递增时,随着径向偏心误差的增大,质心位置理论变化量与测量值的关系如图 8 所示,径向偏心误差每增大一个步长所对应的主镜内孔质心坐标的位置变化如图 9 所示。

由图 8 可知,当主镜的径向偏心误差以 0.1 mm 步长增加时,主镜质心位置的理论变化量与测量值关系的总体趋势呈现线性,但波动较大,对其进行线性拟合,得到线性拟合误差为 1.08 mm,拟合误差较大,测量结果准确度较低。当主镜的径向偏心误差以 0.2 mm 步长增加时,主镜质心位置的理论变化量与测量值的关系呈线性变化,其线性拟合误差为 0.08 mm,拟合误差较小,线性度较好。当主镜的径向偏心误差以

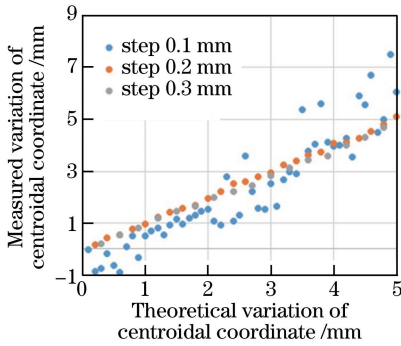


图 8 质心位置理论变化量与测量值关系图

Fig. 8 Relationship between theoretical and measured variation of centroidal coordinate

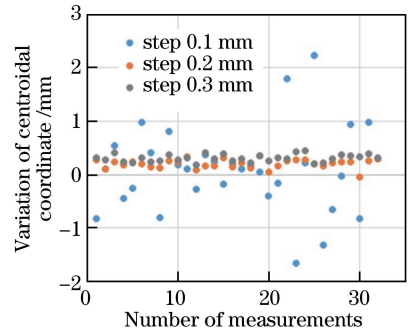


图 9 径向偏心误差每变化一个步长对应的质心位置的变化量

Fig. 9 Variation of centroidal coordinate with the stepping increasing of radial eccentricity error

0.3 mm步长增加时,主镜质心位置的理论变化量与测量值的关系呈线性变化,且线性拟合误差较小,仅为0.10 mm。说明当主镜径向偏心误差以不小于0.2 mm的步长递增时,主镜质心位置的测量值与理论变化量相符,本文所采用的方法可以准确地测量主镜的径向偏心误差。

表 1 主镜物距 500 mm 时径向误差递增一个步长对应的质心位置坐标变化量

Table 1 Variation of centroidal coordinate with the increasing of primary mirror radial eccentricity error of one step at the object distance of 500 mm

Incremental step of radial eccentricity error /mm	Theoretical value /mm	Calculated value /mm	Standard deviation /mm
0.1	0.1	0.12	1.04
0.2	0.2	0.20	0.08
0.3	0.3	0.30	0.07

根据图 9 计算质心位置坐标变化量如表 1 所示,主镜相对于支撑结构的径向偏心误差每增加 0.1 mm,对应的质心坐标变化量的均值为 0.12 mm,标准差为 1.04 mm,与理论值 0.1 mm 相比相差不大,但所得结果标准差较大,由图 9 可知,在该步长下,计算结果变化幅度很大,存在较大的随机误差,测量不准确。说明当主镜相对于支撑结构的径向偏心误差为 0.1 mm 时,该方法测量误差较大,无法准确地测得该物距下主镜的径向偏心误差。主镜径向偏心误差每变化 0.2 mm 对应的质心坐标变化量的均值为 0.20 mm,标准差为 0.08 mm,与理论值 0.2 mm 相同,且标准差很小。说明当主镜的径向偏心误差变化 0.2 mm 时,本文采用的方法可以准确地计算出主镜的径向偏心误差。当主镜径向偏心误差以 0.3 mm 步长增加时,根据图 9 测量结果计算得到对应的质心坐标变化量的均值为 0.30 mm,标准差为 0.07 mm,计算结果与理论值匹配且标准差较小,说明当主镜相对于支撑结构的径向偏心误差以步长 0.3 mm 变化时,该方法可以准确地计算主镜的径向偏心误差。

由以上分析可知,当主镜相对于支撑结构的径向偏心误差小于 0.2 mm 时,该方法的测量结果与理论值相差较大,且标准差较大,存在较大的随机误差,无法准确计算主镜的径向偏心误差;当主镜相对于支撑结构的径向偏心误差不小于 0.2 mm 时,该方法可以较为精确地计算主镜的径向失调误差,且标准差较小。表明该方法可检测的主镜径向偏心误差的精度可达 0.2 mm,满足径向公差 2 mm 的检测要求。

为了进一步验证本文方法对主镜径向偏心误差的检测精度,分别在主镜相对于光学成像系统的物距为 400 mm 和 600 mm 时重复上述实验过程,所得结果如表 2 所示。

由表 2 可知,当主镜物距为 400 mm 和 600 mm 时,若主镜径向偏心误差小于 0.2 mm,采用光学成像系统和 CCD 相机对主镜内孔和参考孔成像计算主镜径向失调误差的方法计算结果与理论值偏差略大,且拟合标准差均大于 1,拟合误差较大,无法准确计算主镜的径向偏心误差;当主镜径向偏心误差不小于 0.2 mm 时,该方法计算结果与理论值相符,且计算结果标准差较小,说明本文方法可精确计算主镜的径向失调误差。

由图 8、图 9、表 1、表 2 的分析结果可知,在不同的物距下,当主镜的径向偏心误差以 0.1 mm 步长递增

时,其测量结果标准差较大,存在较大的随机误差,主要原因是实验中采用的二维精密移动平台在移动时存在一定的误差,因此当以 0.1 mm 步长递增时,误差累积较大,从而导致测量误差的增大。

此外,由以上分析数据可知,当主镜相对于光学成像系统的物距增大时,主镜径向偏心误差的测量结果标准差略有增大,主要是由于物距的增大导致相机靶面接收的光强减小,边缘对比度降低,在程序处理尤其是边缘提取时误差增加。因此在实际应用时,应合理设计光源安放位置,采用光强足够且强度均匀的照明光源。

表 2 主镜物距分别为 400 mm 和 600 mm 时的计算结果

Table 2 Calculation results of primary mirror object distance at 400 mm and 600 mm

Item	Theoretical value /mm	Object distance		
		400 mm	600 mm	
		Calculated value /mm	Calculated value /mm	
Axial error increasing by 0.1 mm	Variation of centroidal coordinate	0.1	0.10	0.14
	Standard deviation of centroidal coordinate variation	0	1.03	1.54
Axial error increasing by 0.2 mm	Variation of centroidal coordinate	0.2	0.20	0.20
	Standard deviation of centroidal coordinate variation	0	0.10	0.12
Axial error increasing by 0.3 mm	Variation of centroidal coordinate	0.3	0.30	0.30
	Standard deviation of centroidal coordinate variation	0	0.07	0.09

综上所述,本文提出的大口径望远镜主镜径向偏心误差测量方法的测量精度可达 0.2 mm,满足径向公差 2 mm 的测量要求。此外,在实验过程中,光源的强度和均匀性对测量精度有较大影响,在实际应用中,为保证测量精度,应根据光源的强度、发散角和光照均匀性、稳定性等选择合适的光源照明主镜内孔和参考孔并合理设计光源的安放位置。

4 结 论

提出了一种实时检测大口径望远镜主镜径向偏心误差的方法,用于保证主镜相对于支撑结构的径向公差要求。相比于传统的径向偏心误差检测方法,本文方法可实现非接触式测量,避免损伤光学元件表面,且无需在镀膜室或支撑机构上额外增加主镜侧面的定位机构即可方便地测出主镜径向偏心误差,便于主镜位置快速、精确调节,同时不需要人工操作,可实现对沿轴线连续运动的望远镜主镜径向偏心误差的实时检测。经实验验证,该方法检测主镜径向偏心误差的精度可达 0.2 mm,满足主镜径向公差 2 mm 的要求,且计算机对数据的处理速度很快、效率高,对于实际工程中实时检测望远镜主镜的径向失调误差有很高的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Zeng Renchang, Liu Xiaohua, Hu Xinqi, *et al.* Frequency-domain iterative algorithm for extended scene Shack-Hartmann wavefront sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0701006.
曾仁昌, 刘晓华, 胡新奇, 等. 扩展目标夏克-哈特曼波前传感器的频域迭代算法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0701006.
- [2] Li Jing, Gong Yan. Insert algorithm of wavefront reconstructions for Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(12): 120101.
李 晶, 巩 岩. 哈特曼-夏克波前传感器的插值重构算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(12): 120101.
- [3] Han Xingzi, Hu Xinqi, Yu Xin. Precisely integrated wavefront sensorless calibration of high-resolution space optical system with large position errors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0626003.
韩杏子, 胡新奇, 俞 信. 高分辨率空间光学系统位置误差的无波前传感综合校正[J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0626003.

- [4] Zhou Chao, Yang Hongbo, Wu Xiaoxia, *et al.* Structural analysis of ground-based large telescopes[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(1): 138-145.
周超, 杨洪波, 吴小霞, 等. 地基大口径望远镜结构的性能分析[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 138-145.
- [5] Sun Jingwei. Study on the alignment technique of large ground-based electro-optical imaging telescope[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011: 1-16.
孙敬伟. 地基大口径光电成像望远镜装调技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011: 1-16.
- [6] Li Zhu. Interchangeability and measurement technology foundation[M]. Beijing: Chinese Metrology Press, 1985: 85-90.
李柱. 互换性与测量技术基础[M]. 北京: 计量出版社, 1985: 85-90.
- [7] Jiang Jiadong, Yuan Daocheng, Pu Jie. Research on online measurement and adjustment of coaxial cylinder axis with non-contact method[J]. Measurement Technique, 2005(9): 19-22.
蒋家东, 袁道成, 蒲洁. 非接触法在线测量和调整圆柱轴线同轴度研究[J]. 计量技术, 2005(9): 19-22.
- [8] Xiao Xiongliang, Guo Chao. Coaxial-based image processing method of line detection error[J]. New Technology and New Process, 2011(10): 37-39.
肖雄亮, 郭超. 基于图像处理的同轴误差在线检测方法的研究[J]. 新技术新工艺, 2011(10): 37-39.
- [9] Zhang Yingwei, Zhu Wanbin, Zhang Xindong, *et al.* Research on coaxiality measuring method based on the two-dimensional laser displacement sensor[J]. Laser and Infrared, 2014, 44(12): 1335-1338.
张瑛玮, 朱万彬, 张歆东, 等. 基于二维激光位移传感器同轴度测量方法研究[J]. 激光与红外, 2014, 44(12): 1335-1338.
- [10] Pan Bo, Yang Genqing, Liu Yong. Study on optimization threshold of centroid algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(9): 1787-1792.
潘波, 杨根庆, 刘勇. 星点质心定位算法最优门限研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1787-1792.