

# 光学学报

## 基于等厚干涉的拼接镜面边缘传感器研究

左恒<sup>1,2\*</sup>, 张茜<sup>1,2,3</sup>, 张勇<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

<sup>2</sup>中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏 南京 210042;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 拼接镜面共相技术是大口径望远镜研制中的关键技术之一,共相精度主要取决于边缘传感器的测量精度。针对大口径拼接镜面望远镜的共相需求,提出一种基于光学等厚干涉原理的边缘传感器设计方案,阐述其基本原理并给出该边缘传感器的结构图。利用数据拟合和图像处理方法,对该方案进行仿真模拟,仿真结果显示该方案的测量精度可以达到倾斜误差为  $0.02''$ , 平移误差为 20 nm,可以满足大口径拼接镜面望远镜的共相检测需求。

**关键词** 光学器件; 边缘传感器; 图像处理; 拼接镜面; 子镜共相

中图分类号 TP212.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1212002

## Segmented Mirror Edge Sensors Based on Equal Thickness Interference

Zuo Heng<sup>1,2\*</sup>, Zhang Xi<sup>1,2,3</sup>, Zhang Yong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Segmented mirror co-phasing is one of the key techniques in the development of large-aperture telescopes, and its accuracy mainly depends on the measurement accuracy of the edge sensors. Aiming at the co-phasing requirement of large-aperture segmented mirror telescopes, we proposed the design scheme of an edge sensor based on equal thickness interference. Then, the basic principle was expounded and the structure diagram of the edge sensor was provided. Furthermore, data fitting and image processing were applied to the scheme simulation. The results show that the measurement accuracy of this scheme can reach a tilt/tip error of  $0.02''$  and a piston error of 20 nm, meeting the co-phasing detection requirements of large-aperture segmented mirror telescopes.

**Key words** optical devices; edge sensor; image processing; segmented mirrors; segmented mirror co-phasing

**OCIS codes** 120.4640; 100.1160; 100.3008; 150.0155

### 1 引言

随着天文学的飞速发展和人类对于宇宙探索的不断深入,建造更大口径的天文望远镜成为天文光学技术研究的重点。但大口径不仅意味着更强的集

光能力和分辨本领,也意味着成本增加、镜面加工和支撑装调等技术难度的提升。拼接镜面可以有效解决大型望远镜口径限制问题;通过把整个镜面分割成多个小镜面,既能降低造价,又能降低镜面加工支撑的难度。当前全世界已经建成了一大批口径为

收稿日期: 2020-12-17; 修回日期: 2021-01-11; 录用日期: 2021-01-22

基金项目: 国家自然科学基金天文联合基金重点项目(U2031207)、国家自然科学基金(U1931126、12073053)、中国科学院青年创新促进会(2013041)

\* E-mail: hengz@niaot.ac.cn

8~10 m 的拼接光学/红外望远镜,如美国的 KECK 望远镜、Hobby Elberly Telescope (HET), 西班牙的 Grand Telescope Canarias 望远镜 (GTC), 以及我国的郭守敬望远镜 (LAMOST) 等。下一代大型望远镜,如詹姆斯-韦伯空间望远镜 (JWST)、美国三十米望远镜 (TMT)、欧洲 European Extremely Large Telescope (E-ELT), 以及我国筹建的 12 m 大型光学红外望远镜 (LOT) 等,也都将采取拼接镜面结构。

拼接镜面只有在实现所有子镜的严格共相时,才能真正发挥其大口径的最大光学性能。主动共相 (Co-phasing) 过程通过调整子镜的倾角 (Tip/Tilt) 和平移 (Piston), 使所有子镜按光学设计拼接成一个完美的反射面<sup>[1]</sup>。共相主要包括两个步骤:共相定标和共相维持。共相定标在天文观测前进行,而共相维持通过边缘传感器来测量观测过程中相邻子镜的位姿变化,利用促动器调整子镜姿态,使镜面维持共相状态<sup>[2]</sup>。因此,边缘传感器的测量精度对共相维持至关重要。目前世界上的大型拼接望远镜采用的边缘传感器主要有电容式、电感式、电涡流式等传感器。TMT 与 Keck 望远镜、GTC 望远镜采用类似的电容位移传感器技术<sup>[3-4]</sup>,其中 Keck 传感器量程为  $-12\sim 12\ \mu\text{m}$ ,测量精度为 3 nm,实际工作精度为 10 nm (RMS) 左右<sup>[3]</sup>;TMT 传感器量程为 200  $\mu\text{m}$ ,测量精度为 1 nm (RMS),其精度虽有大幅提升,但受介质影响较为明显<sup>[4]</sup>。欧洲的 E-ELT 望远镜采用德国米铍公司研制的电感式边缘传感器,量程为 400  $\mu\text{m}$ ,分辨率为 0.5 nm,重复精度为 1 nm<sup>[5]</sup>,对介质不敏感但仍有温漂。国内对边缘传感器也有一定研究,20 世纪 90 年代天津大学研制的 JDC2000 电容位移传感器,已成功应用于南京天文光学技术研究所的“望远镜主动光学技术的预研”项目中,其量程为 20  $\mu\text{m}$ ,测量精度为 6 nm,但受环境影响大(在室温条件下温漂量为 100 nm)<sup>[6]</sup>。中国科学技术大学的冯志华教授团队研制的电涡流位移传感器分辨率达到 0.07 nm,补偿后温漂小于 3 nm/ $^{\circ}\text{C}$ <sup>[7]</sup>,距离实际工程应用还有一段距离。此外,南京天文光学技术研究所的张勇研究员团队基于 D-E30.200 电容传感器搭建了类似 Keck 的高精度差分边缘传感器,在恒温控制条件下,精度可以维持在 20 nm (RMS) 以下<sup>[8]</sup>。以上电学传感器虽然精度可达到要求,但存在着难以消除的温漂和时漂等问题。

本文提出一种基于光学等厚干涉原理的边缘传感器设计方案。等厚干涉的光学原理为:在同一条

牛顿环的条纹上,光程差相等,因此平晶与反射面间的气隙厚度也相等<sup>[9-10]</sup>。等厚干涉已经有诸多应用,如菲索干涉仪<sup>[11]</sup>、干涉膨胀仪、超高速干涉记录仪<sup>[12]</sup>、利用牛顿环测量微小厚度或者微小角度等<sup>[13-16]</sup>,可达到很高的测量精度。本文提出的传感器可直接在拼接镜面(子镜缝隙上)实时获得相邻子镜光学表面的绝对位姿误差,并将其作为高精度的反馈传感器来引导位移促动器实时校正拼接镜面误差,实时保证拼接镜面的共相状态,集共相定标和共相维持功能于一体,简化共相定标和共相维持两阶段为一个拼接共相阶段。

## 2 基于等厚干涉的拼接共相边缘检测原理

基于等厚干涉的边缘误差直接测量方案,其结构如图 1 所示:在拼接镜面拼缝上放置一块等厚平晶透镜,当有一束单色平行光入射到平晶,经平晶后表面反射的光线与经过镜面反射面反射回的两束光线之间有一个固定的光程差,因此两束光线发生等厚干涉,在接收面上会出现明暗相间的牛顿环干涉条纹,通过测量这些条纹的信息就能得到两块拼接镜面的相对拼接误差。

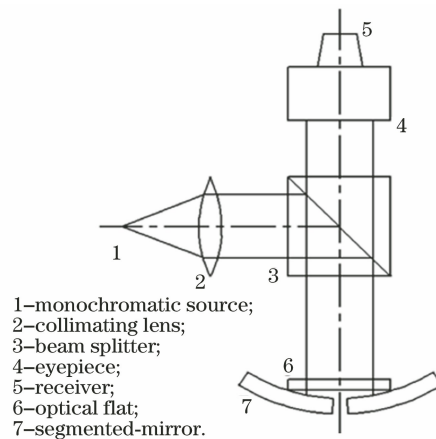


图 1 基于等厚干涉测量的拼接镜面边缘误差检测结构  
Fig. 1 Edge error detection structure of segmented-mirror based on equal thickness interference

与经典的等厚干涉原理相比,这种方案的待测反射面是两块拼接反射镜,得到的牛顿环也是由两部分组成;当两块子镜存在平移或倾斜误差时,两部分牛顿环的条纹密度以及圆心坐标、半径等参数不相同,可直接反映两块相邻拼接子镜在拼缝处的相对位姿误差。

图 2 中, $R$  为望远镜拼接镜面的曲率半径, $d$  为平晶下表面与镜面之间的间隙, $r$  为该位置牛顿环

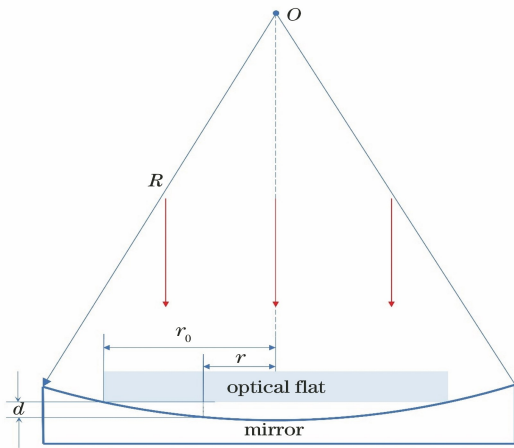


图2 基于等厚干涉原理的拼接镜面测量

Fig. 2 Segmented-mirror measurement based on equal thickness interference principle

的半径,  $r_0$  为牛顿环 0 级条纹的半径, 在拼接镜面不存在误差时等于平晶半径, 称为平晶等效半径。在间隙为  $d$  的位置, 被平晶下表面和镜面反射面反射的两束相干光的光程差  $\delta$  为

$$\delta = 2nd - \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda, & \text{bright ring} \\ \frac{\lambda}{2}(2k-1), & \text{dark ring} \end{cases}, \quad k=0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

式中:  $n$  为折射率;  $\lambda$  为入射波长;  $k$  表示牛顿环级次。与望远镜主镜的曲率半径  $R$  相比, 平晶的等效半径  $r_0$  非常小, 可以忽略不计, 则

$$d = \frac{r_0^2 - r^2}{2R}. \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式, 由此可以得到所形成的牛顿环半径为

$$r = \sqrt{r_0^2 - 2dR} = \sqrt{r_0^2 - \frac{(\delta + 0.5\lambda)R}{n}}. \quad (3)$$

对于不同的明环和暗环, 光程差  $\delta$  不同, 因此牛顿环明暗环的半径为

$$r = \begin{cases} \sqrt{r_0^2 - \frac{(2k+1)R\lambda}{2n}}, & \text{bright ring} \\ \sqrt{r_0^2 - \frac{kR\lambda}{n}}, & \text{dark ring} \end{cases}, \quad k=0, 1, 2, \dots. \quad (4)$$

在空气中, 折射率  $n=1$ , 望远镜曲率半径  $R$  固定不变, 因此, 由(4)式可知, 牛顿环的条纹半径仅与平晶等效半径  $r_0$ 、光源波长  $\lambda$  有关。对于已知的球面反射镜和平晶, 可以通过上述公式求出明环和暗环的条纹半径。

对一块理想的球面反射镜, 得到的是理想的明

暗相间的牛顿环。若球面由两块子镜拼接而成, 牛顿环将被一分为二, 若两块子镜没有拼接误差, 那么牛顿环的两部分应该能完全对齐, 即两边相应环带的半径和中心都完全一致; 但是如果两块镜面存在拼接误差, 相应环带的半径和中心会存在误差。通过分别测量两侧对应牛顿环的半径和圆心, 就可以得到两块反射镜面的边缘拼接误差。

### 3 拼接子镜的等厚干涉光强分布仿真

当同一束光源发出的两束相干光发生干涉时, 在靶面形成的干涉条纹光强分布可表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta_p = 4I_0 \cos^2 \left( \frac{\delta_p}{2} \right), \quad (5)$$

式中:  $\delta_p$  为相位差。当两束光来自同一光源时, 光强  $I_1 = I_2 = I_0$ ; 将(1)、(2)式代入(5)式, 考虑到空气中折射率  $n=1$ , 光强为  $I_0$ , 将光程差  $\delta$  转换为相位差  $\delta_p$ , 可以得到两块子镜出现拼接误差后的干涉条纹光强分布, 即

$$I = \sin^2 \left[ \frac{\pi(r_0^2 - x^2 - y^2)}{R\lambda} + \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi(y \tan \theta_y + x \tan \theta_x + p)}{\lambda} \right], \quad (6)$$

式中:  $r_0$  为平晶的半径;  $R$  为被测镜的曲率半径;  $\lambda$  为测试光波长;  $\theta_x$  为相邻拼接镜面的旋转误差(绕  $x$  轴, tip 误差);  $\theta_y$  为相邻拼接镜面的旋转误差(绕  $y$  轴, tilt 误差);  $p$  为相邻拼接镜面的镜面高低差(piston 误差);  $y \tan \theta_y + x \tan \theta_x + p$  为拼接误差带来的光程差;  $x$  和  $y$  分别为平晶、被测镜上直角坐标系的坐标轴。

由(6)式可知: 当两块相邻子镜存在拼接误差时, 倾斜误差与平移误差均独立影响接收面的光强分布, 相位差不同, 光强分布则不同, 因此条纹图样也不同。

采用 MATLAB 软件进行光强分布的仿真模拟, 具体参数如表 1 所示。

当两侧拼接子镜不存在拼接误差时, 其光强分布图像为完全同心的牛顿环图像, 两侧对应级次牛顿环半径相等, 圆心相同, 如图 3 所示。

当两个子镜反射面存在相对的倾斜误差(tip/tilt)或平移误差(piston)时, 以左侧的镜面 1 作为基准, 模拟右侧的镜面 2 相对于镜面 1 发生两个方向的倾斜和沿轴向的平移, 得到的牛顿环图像如图 4 所示。



表 1 两块拼接子镜构成的边缘检测系统参数

Table 1 Parameters for the edge detection system composed of two segmented-mirrors

Parameter	Curvature radius $R$ /mm	Sampling rate $N$ /pixel	Index of refraction $n$	Incident wavelength $\Delta$ /mm	Optical flat radius $r_0$ /mm
Value	40000	1024	1	$0.5 \times 10^{-3}$	15

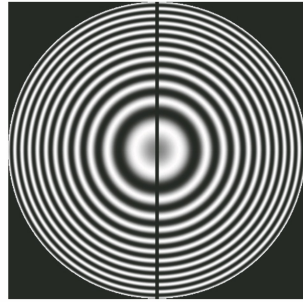


图 3 两子镜无拼接误差时的光强分布

Fig. 3 Light intensity distribution of two sub-mirrors without segment error

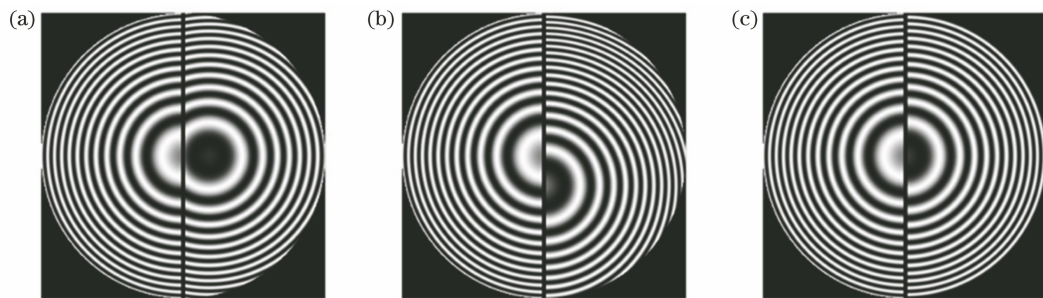


图 4 两子镜存在相对误差时的光强分布。(a)  $x$  轴倾斜误差;(b)  $y$  轴倾斜误差;(c) 平移误差  
Fig. 4 Light intensity distribution when the two sub-mirrors have relative errors. (a)  $x$ -axis tip error;  
(b)  $y$ -axis tilt error; (c) piston error

从仿真结果可以看出,  $x$  轴倾角、 $y$  轴倾角以及平移误差对于光强分布条纹的影响互相独立, 因此, 若给定一幅光强分布条纹图, 则可通过图像处理来反解出  $x$  轴、 $y$  轴倾角以及平移误差的大小。

#### 4 平移误差和倾斜误差的检测模拟

基于表 1 中的拼接镜面系统, 令右侧的镜面 2 相对左侧镜面 1 发生相对微小的平移或倾斜, 利用获得的等厚干涉牛顿环条纹图, 通过图像处理进行两个镜面的位姿误差检测模拟。

##### 4.1 平移误差的检测模拟

当镜面 2 相对于镜面 1 存在平移误差时, 如图 4(c) 所示, 镜面 2 对应的牛顿环同心圆圆心不变, 但半径发生变化。沿  $x$  轴选取一条过圆心的直线, 这条直线上所有点的灰度值变化可反映出两侧牛顿环的明暗变化。

图 5 展示了两镜平移误差为 35 nm 时, 左右两侧子镜干涉图圆心所在的  $x$  轴上点的灰度值变化曲线。通过数据拟合处理, 可以看到, 拟合曲线的每

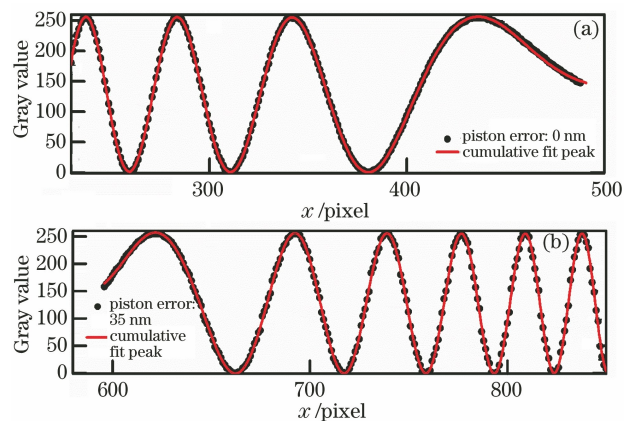


图 5 牛顿环中心线上灰度值拟合。(a) 左侧子镜对应牛顿环的灰度值;(b) 右侧子镜产生 35 nm 平移误差时对应牛顿环的灰度值

Fig. 5 Gray value liner fitting on the center line of Newton ring. (a) Newton ring corresponding to the left sub-mirror; (b) Newton ring corresponding to the right sub-mirror with 35 nm piston error

一个波峰位置对应一条明环, 每一个波谷位置对应一条暗环, 用波峰或波谷的坐标值减去干涉图的中

心点圆心坐标,就是每个环的半径值。从图5可以明显看到,当右侧子镜相对左侧子镜发生35 nm 平移时,其像面上各条牛顿环峰谷均发生显著平移,即对应的牛顿环半径均发生变化。

这种测量方法的另外一个优点是:在像面上可获得多条牛顿环,每条牛顿环的变化均能反映子镜之间的相对运动。选取不同级次的牛顿环,计算不同级次的牛顿环半径随平移误差的增大而产生的变化,结果如图6所示。

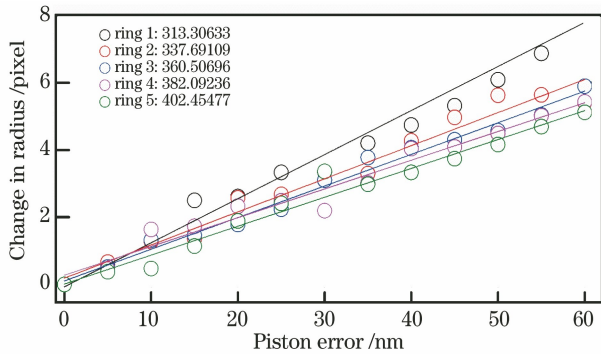


图6 牛顿环半径随平移误差的变化

Fig. 6 Change of radius of Newton ring with piston error

从图6可以看到,经过数据拟合后,随着平移误差的增大,牛顿环的半径变化量呈近似线性增大,半径越小的条纹,对平移误差的灵敏度越高。当平移误差为20 nm时,对应的5条牛顿环的半径变化量分别为2.61, 2.57, 1.78, 2.33, 1.89 pixel,在实际

工程中很容易检测到这个量级的像素变化。

在实际的拼接镜面共相过程中,可通过拟合两侧牛顿环的半径,并取多条牛顿环进行对比判断来确定两侧子镜的相对平移误差;只有当两侧图样上多条牛顿环的半径差均小于设定阈值后,才认为两侧平移误差在共相拼接的允许范围内。

#### 4.2 半波长整数倍平移误差的情况分析

在传统的牛顿环检测中,还会存在平移误差是半波长整数倍的情况:由于上面的检测透镜是曲面,中心与镜面贴合,产生的牛顿环中心为0级干涉条纹,级次越高,条纹半径越大;当平移误差的大小恰好等于半波长的整数倍时,牛顿环图样一致,因此无法直接测出平移误差。但本方案的检测透镜并不是球面透镜,而是一块等厚平晶,其边缘与待测镜面接触。由(4)式可知,0级条纹出现在平晶与子镜的接触处,也就是图像的最边缘处;当其中有一块子镜产生平移误差时,平晶两端依旧保持与待测子镜的接触,传感器整体倾斜,如图7所示。可以看到,当两个子镜存在平移误差时,传感器整体发生倾斜,左、右两侧镜面的平晶等效口径都会发生变化,因此,牛顿环的0级条纹半径会改变。其中,左侧子镜对应的平晶等效口径会小于原口径,而右侧镜面的平晶等效口径会大于原口径,由(4)式可知,等效口径的变化对应到牛顿环图像上即为左侧半径减小,右侧半径增大。

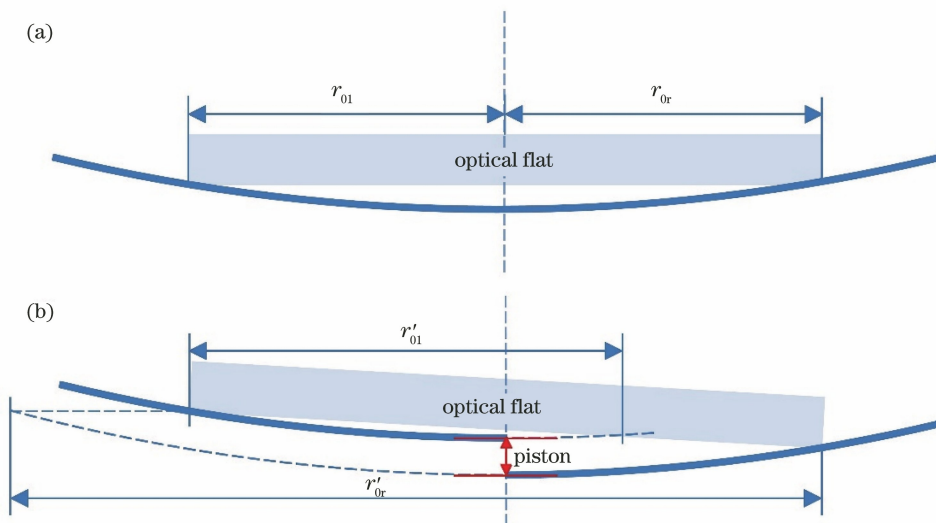


图7 两镜面出现平移误差后平晶位置及等效口径的变化。(a)无误差;(b)有误差

Fig. 7 Changes in the position of the optical flat and the equivalent aperture after the piston error of the two mirrors.

(a) No error between the two sub-mirrors; (b) a piston error between the two sub-mirrors

综上所述,即使平移误差恰好等于半波长的整数倍,两侧平晶的等效口径仍不相等,且一侧平晶口径变小,另一侧变大,均呈单调变化;平移误差并不

影响牛顿环的圆心位置,当存在平移误差时,两侧条纹的圆心依旧重合,仅半径改变,只有当两子镜不产生平移误差时,两侧等效口径才能一致,牛顿环半径

才能完全相等。

由(4)式可知,条纹半径不仅与等效口径有关,还与入射光的波长 $\lambda$ 有关。当入射光的波长发生变化时,靶面上接收到的同一级条纹半径也会变化。因此,对于几块相邻子镜上的边缘传感器,可以共同使用两种或者三种激光光源,例如常见的波长为 511,532,632.8 nm 的激光;在传感器量程范围内切换不同波长的激光光源,当使用不同波长的光源时,左、右两侧的牛顿环半径均能保持一致,则判断两侧子镜的相对平移误差已被消除。这种切换光源的方法可以作为补充,能消除在任意选择圆弧条纹对准和映射的时候可能存在的 uncertainty,方便应用。

### 4.3 倾斜误差的检测模拟

当镜面 2 相对于镜面 1 存在倾斜误差时,对应到传感器检测像面上,就表现为镜面 2 对应牛顿环的圆心位置发生变化。对此,基于 Opencv 计算机视觉库,采用霍夫(Hough)圆变换的方法进行同心圆位置的提取<sup>[17]</sup>。

霍夫圆变换是将二维图像空间的一个圆转换为三维参数空间的一个点的过程<sup>[18]</sup>。传统的霍夫圆变换有 3 个参数,在计算时,参数越多,计算速度越慢。Opencv 库中自带的 Houghcircles 函数采用的是 2-1 霍夫变换法,也称霍夫梯度法。它将霍夫圆变换分为两个阶段,以降低维数:一阶段检测圆心,通过对圆周上的点做法线,法线的交点即判定为圆心;二阶段通过圆心检测出半径,由于圆心到圆周任意一点的距离(即半径)都相等,因此,给定一个半径区间 $[a, b]$ ,找出 $[a, b]$ 中所有到圆心距离相等的点,则获得圆半径。2-1 霍夫变换法可以提升计算速度,但是也存在一些缺点,例如当圆心检测出现误差时,半径检测也一定出现误差。

针对霍夫圆变换的原理,并结合牛顿环条纹图样的特点<sup>[19]</sup>,本研究对 Opencv 库中的 Houghcircles 函数进行一定改进:首先,给定一个半径范围和步长值,在此区间上用 2-1 霍夫变换循环找圆,则可找到半径不同的多个圆;然后,求每两个圆的圆心距,给定阈值,依赖圆心距判定其是否为同一个圆心,以此来寻找不同半径的同心圆。如图 8 所示,简单的 2-1 霍夫找圆法利用的数据相对较少,一次只检测出一个圆,误差相对较大;而改进后的函数可以利用更多的图像数据,进一步减少图像检测误差。

使用(6)式模拟计算两块曲率半径为 40 m 的

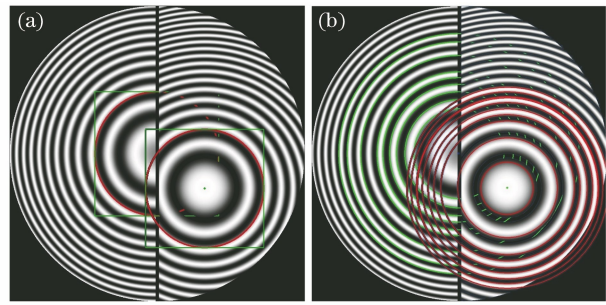


图 8 两子镜存在倾斜误差时霍夫检测结果。(a) 2-1 霍夫检测结果;(b)改进后的霍夫同心圆检测结果

Fig. 8 Hough test results when there is a tilt error between the two sub-mirrors. (a) 2-1 Hough test result; (b) improved Hough concentric circle test result

子镜发生  $0.02''$  的相对倾斜时像面上的牛顿环图像,得到牛顿环圆心变化量和倾斜误差如表 2 所示。

表 2 倾斜误差  $\sigma$  均为  $0.02''$  时的圆心变化量

Table 2 Change in the center of the circle when the tilt error is  $0.02''$

Error	$\sigma_{\text{Tip}}=0.02''$	$\sigma_{\text{Tilt}}=0.02''$
Center change along $x$ /pixel	0.0012	0.2835
Center change along $y$ /pixel	0.2444	0

当两个镜面发生  $0.02''$  的相对倾斜时,牛顿环的圆心大约偏移 0.25 pixel,采用一般图像检测方法,精度可达到  $1/20$  pixel,因此,改进后的霍夫同心圆检测方法可以满足  $0.02''$  的相对倾斜误差的检测要求。

## 5 传感器安装误差的模拟与分析

实际应用中,将边缘传感器安装在拼接镜面望远镜上难免会存在安装误差,本实验还针对传感器在镜面上的安装误差问题进行了模拟分析。

传感器安装过程中存在侧移误差,即边缘传感器的平晶没有完全对称地安装在两块子镜的中间位置,所得到的牛顿环图像如图 9 所示。可以看到,当存在安装平移误差时,得到的牛顿环依然是同心牛顿环,只是牛顿环的中心出现整体偏移。而本测量方法通过检测两侧牛顿环的半径和圆心的相对变换量,求解子镜之间的相对平移和倾斜误差,因此平晶安装时引入的平移误差对传感器的测量几乎没有影响。

此外,传感器安装时,由于表面平晶与镜面软接触,传感器整体可能存在倾斜安装误差,本研究将其称为指向误差。当存在指向误差时,传感器整体发生倾斜,模拟在这种情况下得到的等厚干涉图像如



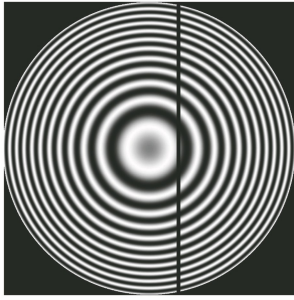


图9 光学平晶存在3 mm侧移误差时的等厚干涉图像  
Fig. 9 Interference image of equal thickness when the installation translation error of optical flat is 3 mm

图10所示。可以看到:当传感器整体倾斜时,条纹的也会发生整体偏移,最显著的表现就是圆心出现漂移;若两块子镜之间不存在相对误差,虽然圆心存在漂移,但两侧条纹依然可组成同心圆环;只要等厚干涉条纹的中心依然处于像面范围内,就可以通过图像处理算法得到两侧图像中对应的牛顿环,并求解出牛顿环的圆心和半径参数。

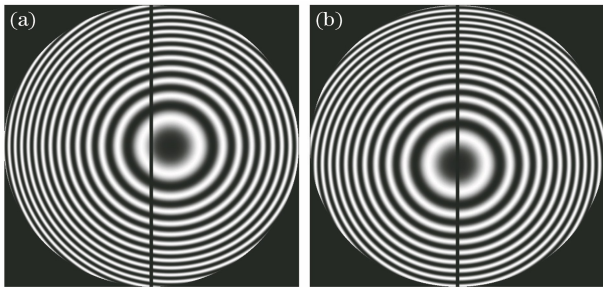


图10 传感器存在整体倾斜误差时的等厚干涉条纹图像。(a)沿x轴方向存在10''的倾斜误差;(b)沿y轴方向存在10''的倾斜误差

Fig. 10 Interference fringe images of equal thickness when there is an overall tilt error. (a) Existing a tilt error of 10'' along the x-axis; (b) existing a tilt error of 10'' along the y-axis

假设两子镜间存在相对倾斜误差,通过计算传感器系统无指向误差时和存在指向误差时等厚干涉

表4 所设计传感器与电学传感器的比较

Table 4 Comparison of the designed sensor and electrical sensor

Type	Accuracy	Stability	Range	Temperature/ Time drift	Algorithm	Barrier	Stray light	Cost
Electrical sensor	High	Good	Small	Yes	Simple	No	No	High
Designed sensor	High	Better	Wide	No	Complex	Yes	Yes	Low

可以看到,相较于传统的电学传感器,所提出的基于光学等厚干涉原理的边缘传感器的不足之处主要在于:直接测量反射面,存在挡光问题,但目前的集成化器件可以把挡光面积做到很小;算法相对复

条纹圆心相对偏移量的变化,可更直观地看出指向误差对测量精度的影响。假设两子镜存在倾斜误差,以左侧子镜1为参考镜,令右侧子镜2产生一个 $\sigma_{\text{Tip}}=0.02''$ 的倾斜误差;当系统不存在指向误差时,计算子镜2的条纹圆心相对于子镜1的条纹圆心的偏移值,并计算两侧条纹半径的变化量;当系统存在 $35''$ 的指向误差时,重复上述计算,所得到的结果如表3所示。可以看到,指向误差的存在对于两侧条纹圆环的参数基本无影响。

表3 存在指向误差时的条纹参数变化量( $\sigma_{\text{Tip}}=0.02''$ )

Table 3 Change of the fringe parameters with or without pointing error ( $\sigma_{\text{Tip}}=0.02''$ )

Pointing error	0''	35''
Center change along x /pixel	0.15	0.15
Center change along y /pixel	13.14	13.16
Change in radius /pixel	0	0

传感器安装时引入的倾斜或平移误差只带来牛顿环的圆心偏移,在不存在相对误差的前提下,两侧牛顿环依然组成一系列完美同心圆环;依然可以通过求解两侧牛顿环圆心和半径的变化,得到子镜之间的相对位姿变化。从模拟结果可以看到这种测量方法从原理上对传感器安装精度的要求不高,装调过程中可以先通过基于波前传感器的粗调,使相邻子镜进入传感器测量范围,然后安装该边缘传感器进行精细调节。

同时通过对传感器误差的模拟与仿真,可以看到生成牛顿环的中心随传感器倾斜角度的变化而变化,只要生成的同心牛顿环中心在像面内,都可以通过图像处理的方式找到同心圆环的中心,对于本实验设置的模拟条件,当指向误差达到 $75''$ 时,牛顿环的中心到达像面边缘,也就是说传感器对倾斜误差的最大量程为 $75''$ 。

表4所示为电学传感器和所设计传感器的优缺点对比。

杂,但已有的仿真结果显示算法的测量精度可以满足主动光学需求。但同时,基于光学等厚干涉原理的边缘传感器可以解决电学传感器都无法避免的温漂和时漂问题,测量精度高,且原理简单,成本低廉。

## 6 结 论

提出了一种基于光学等厚干涉原理的边缘传感器设计方法,可用于大型拼接镜面望远镜的共相检测。通过仿真模拟,证明本文方法可以达到拼接镜面共相检测的精度要求:它简化了拼接共相过程,可实时得到子镜之间的相对倾斜和平移的绝对误差,无须单独进行共相定标来记录子镜之间的初始相对误差;利用两边子镜的条纹差异信息来反演相邻子镜的相对位姿误差,可避免传感器安装支架和系统的重力变形、热变形及安装误差带来的影响;系统设计不基于电学原理,不受温漂和时漂的影响,也避免了电噪声的干扰;且原理简单,结构紧凑,易于装调,方便在镜面上大规模部署,有望在未来的大型拼接望远镜中实际应用。

## 参 考 文 献

- [1] Esposito S, Pinna E, Tozzi A, et al. Cophasing of segmented mirrors using the pyramid sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5169: 72-78.
- [2] Zhang Y, Zhang L, Liu G R, et al. Experimental study of segmented mirrors co-phase using dispersed fringe sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0212004.  
张勇, 张靓, 刘根荣, 等. 基于色散条纹传感器的拼接镜面共相的实验研究[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0212004.
- [3] Jared R C, Arthur A A, Andreae S, et al. The W. M. Keck Telescope segmented primary mirror active control system[J]. Proceedings of SPIE, 1990, 1236: 996-1008.
- [4] Mast T, Chanan G, Nelson J, et al. Edge sensor design for the TMT[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6267: 62672S.
- [5] Wasmeier M, Hackl J, Leveque S. Inductive sensors based on embedded coil technology for nanometric inter-segment position sensing of the E-ELT [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9145: 91451R.
- [6] Zhang H G, Wu J G, Zheng Y Z. Nanometer accurate position technology [J]. Instrument Technique and Sensor, 2001(10): 3-5.  
张洪刚, 吴敬国, 郑义忠. 电容传感器及其纳米量级定位技术[J]. 仪表技术与传感器, 2001(10): 3-5.
- [7] Wang H B, Ju B, Li W, et al. Ultrastable eddy current displacement sensor working in harsh temperature environments with comprehensive self-temperature compensation[J]. Sensors and Actuators A, 2014, 211: 98-104.
- [8] Zhang Y, Wang Q M, Li Y P, et al. Research progress of co-phasing inductance edge sensor for Chinese extremely large telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9145: 91454Y.
- [9] Xie H H, Peng Y X, Meng D P, et al. Newton's ring and its new discovery[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 6028: 602825.
- [10] Feng M C, Xu L, Wang Y J. Collimation factors and performance analysis based on Michelson interferometer [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 132201.  
冯明春, 徐亮, 王玉杰. 基于迈克耳孙干涉仪的准直因素及性能分析研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 132201.
- [11] de Groot P. Light: introduction to optics and photonics[M]//Judith F, Donnelly N M M. Boston, MA, USA: New England Board of Higher Education, 2007: 180-184.
- [12] Lu J, Ni X W, He A Z. Equal-thickness-fringe multiple reflection interferometer for ultra-high-speed interference recording [J]. Optical Engineering, 1996, 35(6): 1772-1774.
- [13] Nascov V, Dobroiu A, Apostol D, et al. Statistical errors on Newton fringe pattern digital processing [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5581: 788-796.
- [14] Wahl K J, Chromik R R, Lee G Y. Quantitative *in situ* measurement of transfer film thickness by a Newton's rings method[J]. Wear, 2008, 264(7/8): 731-736.
- [15] Nascov V, Dobroiu A, Apostol D, et al. Automatic digital processing of Newton's rings fringe patterns [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4430: 835-841.
- [16] Xu D H, Tang X H, Fang G M, et al. Method for calibration of optical axis parallelism based on interference fringes[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1712005.  
徐丹慧, 唐霞辉, 方国明, 等. 基于干涉条纹的光轴平行性校准方法[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1712005.
- [17] Hough P V C. Method and means for recognizing complex patterns: US069654[P]. 1962-12-18.
- [18] Duda R O, Hart P E. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures [J]. Communications of the ACM, 1972, 15(1): 11-15.
- [19] Wu S L, Hu H R, Zhong S M, et al. Automatic extraction of speckle interference fringe regions[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1212004.  
吴双乐, 胡慧然, 钟诗民, 等. 散斑干涉条纹区域的自动提取[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1212004.