文章编号　2095-1531(2015)06-1027-08

大口径反射镜加工机床在线检测高精度对准方法

陶小平
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要:本文提出了基于特殊点对靶标的快速对准装置,实现机床加工臂和检测臂初始扫描位置自动高精度复位。靶标由外围区域四组放大倍率标定点对和中心区域大小对准点对组成;对准装置经初次使用前的畸变校正后,每次自动识别靶标区域完成自动对焦;根据外围点对进行放大倍率标定;自动识别中心大小点对并对其进行坐标定位;根据当前点对靶标位置计算与理想位置角度量和平移量偏差,指导机床转台和导轨互相配合,迭代调整直至完成精确对准。实验表明该方法对准精度约为 5 μm,优于几十 μm 的机械定位精度,更利于实现超高精度光学加工的快速收敛,提高大口径反射镜加工效率。

关　键　词:光学制造;在线检测;大口径反射镜;精确对准;图像配准
中图分类号:TH741; TP23　　**文献标识码**:A　　doi:10.3788/CO.20150806.1027

Precise alignment method of online optical testing for large-aperture mirror fabrication

TAO Xiao-ping
(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: taoxp*99@163.*com*

Abstract: A precise alignment method based on special target and fast point matching is proposed. The target includes four point-pairs for magnification calibration in peripheral area and one large-small point-pair for registration in center area. Distortion calibration of the alignment system is completed at the first time of operation. When the optical testing arm or the fabrication arm reset, the target area is focused automatically. The image captured is used to calculate the magnification of the system. Then, the large-small point-pair is located and the angle of the line through the two points is employed to adjust the swivel table, while the distance between the two points is applied for correction of the guide rail. The procedure is repeated iteratively until current location coincides with the ideal position. It is proved that the alignment accuracy of the method is about 5 μm, which is better than the precision of mechanical approach and is helpful for rapid and precise optical

收稿日期:2015-06-12;**修订日期**:2015-06-30
基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(No. 61036015),国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(No. 2011CB013205)
Supported by Major Project of National Science Foundation of China(No. 61036015), National Program on Key Basic Research Projects of China(No. 2011CB013205)

fabrication, and can improve the consistency of the optical testing simulation path and the practical fabrication path.

Key words: optical fabrication; optical testing online; large-aperture mirror; precise alignment; image registration

1 引 言

大口径光学系统具有能量收集能力强、空间角度分辨力高的优点,广泛用于天文观测及高精度对地成像等领域。从20世纪末开始,出现了一大批空间及地面大口径望远镜:如1993年发射的口径为2.4 m的哈勃太空望远镜[1],,首次获取了不受大气湍流影像的星系图像;而接替哈勃的JWST太空望远镜[2],其主镜口径达到6.5 m,将进一步延伸人类探索太空的能力。地基望远镜的口径则更大:1991年和1996年,美国加州理工学院和加州技术学会联合研制完成口径为10 m的Keck I和Keck II望远镜[3];1997年,麦克唐纳天文台建造完成口径为9.2 m的HET(Hobby Eberly Telescope)望远镜[4];2005年,南非天文台也完成了口径为11 m的SALT(South African Large Telescope)望远镜[5]的建造。而正在筹建的大型望远镜还包括口径为25 m的GMT(Giant Magellan Telescope)望远镜[6],由多国参与建造的口径为30 m的TMT(Thirty Meter Telescope)望远镜[7],及欧洲南方天文台(European Southern Observatory,ESO)主持建造的42 m口径EELT(European Extremely Large Telescope)望远镜[8]和口径100 m级的OWL(Overwhelming Large Telescope)望远镜[9]。我国的4 m大型天文光谱望远镜(Large Multi-Object Spectroscopy Telescope,LAMOST)也在2012年开始了巡天观测。由于超大口径单一反射镜在材料制备、加工、检测以及结构支撑技术等方面都存在巨大的困难,这些大型望远镜主镜大多采用分块子镜拼接而成,不过子镜口径也在1~2 m量级,其中GMT子镜口径甚至达到了8.4 m。在高分辨对地遥感方面,0.5 m量级地面分辨率的WorldView-2、GeoEye-1、GeoEye-2系列成像卫星的主镜口径也都在1 m以上,KH-11、KH-12系列卫星主镜口径甚至达到了2~3 m。

大口径反射镜加工难度大,加工周期长,是大口径光学系统的关键部件之一。目前的光学反射镜加工技术主要包括采用小磨头的计算机表面成型技术[10];依据反射镜曲率实时形变的应力盘加工技术[11-12];借助磁流变液体在抛光轮磁力区的剪切力实现材料去除的磁流变抛光技术[13-14]以及利用高能离子束流轰击溅射效应修形的离子束抛光技术[15]等。在大口径反射镜制备过程中,任何一种加工技术都是与检测过程交替进行的,加工路径和驻留时间的规划以面形检测结果为基础。反射镜的最终加工精度依赖于镜面的检测精度,以及加工磨头的对准精度。如果磨头与反射镜之间存在较大的对准误差,那么实际加工路径与规划路径亦存在偏差,其结果可能会造成对原有面形的破坏,使加工过程出现反复,难以收敛。尤其对于口径大于1 m量级的大型反射镜,面形精度要求高于$\lambda/50$甚至$\lambda/100$,每个加工周期需花费数十小时,由于加工路径与规划路径的不一致性导致的多次反复将占用大量的人力和设备资源,而且难以达到预定的面形精度。另外,由于对准误差引起的加工过程反复迭代还会在镜面上产生较大的中高频误差,进而影响光学系统的成像质量。

目前光学加工中常用的机械对准方法精度约为几十甚至数百微米量级,不适应超高精度光学加工中快速收敛的使用需求。本文提出在大口径反射镜加工机床上增加加工磨头和检测探头高精度对准装置,可实时计算当前位置偏差,指导机床转台和导轨的精确调整,保证反射镜的加工精度和收敛效率。

2 机床高精度对准装置

反射镜研磨阶段的检测主要由三坐标测量

仪、摆臂轮廓仪[16-17]等完成,而高精度抛光阶段则主要使用光学干涉仪进行检测。摆臂轮廓仪可以集成在加工机床上实现在线检测,对于大口径反射镜来说,相对三坐标测量仪效率更高。本文将主要讨论摆臂轮廓仪集成检测的精确对准方法。图 1 是典型的大口径反射镜在线检测加工机床示意图,一侧为机床加工臂,可以安装小磨头、应力盘、磁流变抛光头等各类加工工具;另一侧为检测臂,安装摆臂轮廓仪进行在线检测。

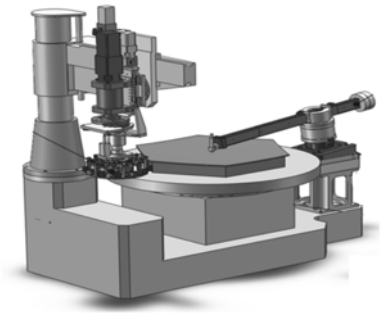


图 1　大口径反射镜在线检测加工机床

Fig. 1　Schematic diagram of optical fabrication machine for large-aperture mirror with optical testing device online

选择两套由短焦距小畸变定焦镜头,小像元尺寸、高信噪比成像传感器组成对准系统,将磨头对准装置安装在加工臂上,便于多种磨头更换。安装位置注意磨头本身不遮挡对准装置光路;检测对准装置则安装在检测探头旁。使用时保证两对准系统均对焦清晰,像面全视场照度均匀。

在反射镜非工作区(一般为边缘或中心无效视场)粘贴用于对准的靶标,靶标图样如图 2 所示。图样分为两个区域:四周外围区有 P1 ~ P8 一共 4 组点对,每组点对之间的距离分别为 10、15、20、25 mm,用于对准装置光学系统的放大倍率标定;中心区有 L、S 一大一小两标识点,用于计算当前位置与理想位置的偏移量,使用不同大小两点的目的:其一是便于偏移后的两点坐标计算一一对应,其二是可确认由两点组成的射线方向,以区分旋转角度超过 180°的情况。

对准时为保持安全距离,将加工磨头和检测磨头置于反射镜上方约 0.25 m 处。选择 25 mm 定焦镜头,像元尺寸为 4.4 μm,分辨率为 1 600 × 1 200的 PointGrey Flea2 图像传感器,此时光学系统放大倍率约为 1/11,图像传感器靶面对应物方空间约为 63.4 mm × 47.5 mm。采集靶标图像时,标识点 L、S 需完整出现在视场中,4 组放大倍率标定点对则只需保证至少有 2 组处于视场中即可。

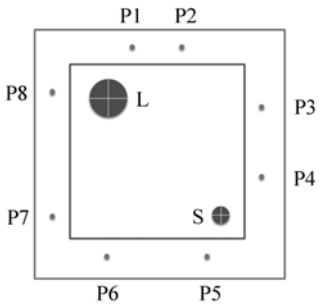


图 2　对准靶标图样

Fig. 2　Target pattern for alignment

3　高精度对准算法

3.1　畸变标定

对准系统安装在加工臂和检测臂上后,须利用三坐标仪测量其基准面,分别确定加工臂与加工对准系统,检测臂与检测对准系统之间的空间转换坐标系,以便于后期使用靶标图像计算结果指导机床进行位置调整。

对准系统首次使用之前须进行畸变标定,以消除各视场放大倍率的不同。在待加工镜体非工作区任意位置粘贴网格靶标,将加工磨头移动至该靶标上方,使网格充满成像系统全视场,采集靶标图像。由图像可计算出像面上每个网格交点的坐标,根据已知的网格实际物理尺寸,计算对准系统各视场的畸变系数,由此可得系统全视场畸变校正矩阵。类似的,将检测探头移动至该靶标上方,采集靶标图像,以同样的方法计算检测探头对准系统各视场的畸变系数和全视场畸变校正矩阵。对准系统畸变标定过程仅需在首次使用此系统时进行,在后期的每次使用无需重复该过程。

3.2　自动对焦

加工磨头和检测探头一般以迭代交替的方式工作:检测探头扫描整个镜体,完成镜体面形检

测;以此检测结果进行加工路径和驻留时间规划,制作数控机床加工文件,指导加工磨头工作。为避免加工臂和检测臂互相干涉,一方工作时,另一方将移出待加工镜体正上方区域。再次返回工作扫描区时,须借助对准靶标来复位扫描初始位置。

将畸变标定时的网格靶标替换为如图2所示的对准靶标,将检测探头(加工磨头)移动至该靶标上方(4组放大倍率标定点对至少有2组处于视场中,并保证视场内光照均匀),为了采集清晰的对准靶标图像,系统利用对焦深度法进行自动对焦。在离镜体表面高度约0.25 m处,驱动检测臂(加工臂)以5 mm为步长自上而下移动,采集5幅图像,计算其清晰度评价曲线,寻找到曲线顶点后缩小移动步长,再次采集5幅图像计算清晰度评价曲线,如此反复迭代直至确定准确对焦位置。

3.3 放大倍率标定

完成自动对焦后,采集靶标图像A,以此记录待加工镜体——加工磨头——检测探头坐标系的初始原点位置。以3.1中系统全视场畸变校正矩阵处理图像A,其中图像坐标系以左上为原点,水平方向为X轴,向右为正,竖直方向为Y轴,向下为正。然后利用质心法计算P1-P2、P3-P4、P5-P6、P7-P8 4组点对(至少2组)每点的坐标,(X_{A1},Y_{A1}),(X_{A2},Y_{A2}),……(X_{A8},Y_{A8}),计算每组点对中两点之间的相对距离a_{A12}、$d_{A34}$$d_{A56}$、$d_{A78}$:

$$d_{Amn}=\sqrt{(X_{Am}-X_{An})^2+(Y_{Am}-Y_{An})^2}\ ,\quad(1)$$

式中,m值分别为1、3、5、7,对应n值分别为2、4、6、8。已知每组点对实际物理距离D_{mn},可得放大倍率β_{Tmn}为:

$$\beta_{Tmn}=\frac{d_{Am}}{D_{mn}}\ .\quad(2)$$

取多组放大倍率的均值,即为检测探头对准系统的放大倍率β_T。

同样的,将加工磨头移动至对准靶标上方,采集靶标图像B。在进行畸变校正后计算4组点对(至少2组)的质心坐标(X_{B1},Y_{B1}),(X_{B2},Y_{B2})……(X_{B8},Y_{B8}),可得像面上两点之间的相对距离d_{Bmn}。根据每组点对实际物理距离D_{mn}计算放大倍率,取多组均值即为加工磨头对准系统放大倍率β_M。

为便于后期位置偏移量计算,希望加工系统和检测系统的放大倍率尽可能接近。若$|\beta_M-\beta_T|>5\times10^{-4}$,可在景深范围内微调加工磨头的高度直至两者近似相等($|\beta_M-\beta_T|\leqslant5\times10^{-4}$)。事实上,在实验中使用$F$数为4的大光圈进行靶标图像采集,景深较小,经自动对焦后放大倍率已满足一致性要求。因此,若自动对焦功能工作无误,放大倍率标定这一步骤只需在机床周期性参数复核时进行即可,无需在每次对准中重复这一过程。

3.4 L、S大小点对定位

对均匀照明的靶标图像进行灰度直方图统计,自适应选择黑白双峰之间的谷值作为阈值完成二值化处理。利用哈夫变换寻找L、S两点所对应的圆域区,以种子生长法标识圆域内的所有有效像元,再以质心法确定圆域中心坐标,坐标定位精度一般优于0.1 pixel。其中检测臂采集的对准图像圆心坐标表示为(X_{AL},Y_{AL}),(X_{AS},Y_{AS}),加工臂则标识为(X_{BL},Y_{BL}),(X_{BS},Y_{BS})。

3.5 计算旋转角,指导转台调整

以图像A的大、小点对圆心坐标计算通过此两点的直线解析表达式:

$$y=k_Ax+b_A.\quad(3)$$

同样计算图像B中通过大、小两点的直线解析表达式:

$$y=k_Bx+b_B,\quad(4)$$

式中,b_A和b_B是直线是图像Y轴交点,k_A和k_B是直线斜率,即:

$$\begin{cases}k_A=\mathrm{tg}\alpha_A\\k_B=\mathrm{tg}\alpha_B\end{cases},\quad(5)$$

式中,α_A和α_B是直线与图像X轴的夹角,定义逆时针旋转为正方向。因此两幅图像的相对旋转角θ是:

$$\theta=\alpha_B-\alpha_A=\mathrm{arctg}(k_A)-\mathrm{arctg}(k_A)\ .\quad(6)$$

在此需注意的是,旋转角θ的定义域为[0,2π],而α_A和α_B的定义域是[$-\pi/2,\pi/2$]。不过由于使用的靶标是一大一小两点,算法可自动判断以大点(或小点)为端点的射线方向,即可判断出α_A、α_B是否超出的[$-\pi/2,\pi/2$]定义域;若超

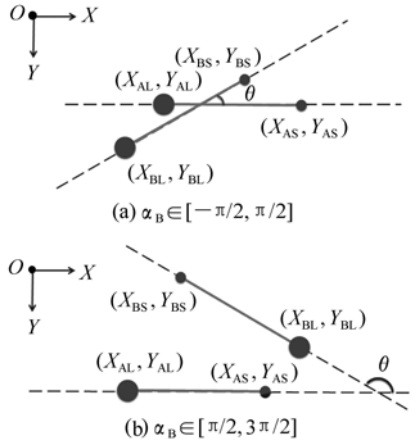


图 3　旋转角计算示意图

Fig. 3　Schematic diagram of rotation angle calculation

出该范围,则 $\alpha = \alpha + \pi$,即可转换至[π/2,3π/2]区间内。如图 3 所示,分别是 $\alpha_B \in [-\pi/2, \pi/2]$ 和 $\alpha_B \in [\pi/2, 3\pi/2]$ 时的计算示意图。由此计算出的旋转角 θ 若 <0,则 $\theta = \theta + 2\pi$,即可转换至定义域[0,2π]内。

根据旋转角 θ 调整加工转台角度,注意若 θ 角较大,直接移动 $-\theta$ 角可能会移出靶标对准区,丢失目标。因此需缓慢小角度移动转台,对准装置实时采集图像,自动判别大小点对是否移出视场,在将要移出视场时,指导平移导轨随动,使靶标始终保持在视场中。

3.6　计算平移量,指导导轨调整

转台完成 $-\theta$ 角旋转后,重新采集对准靶标图像 C,重复 3.4 节中的 L、S 大小点对定位步骤,得到两点坐标 (X_{CL}, Y_{CL}),(X_{CS}, Y_{CS})。与初始图像 A 对比,分别计算两图中 L、S 两点的两维相对平移量:

$$\begin{cases} d_{XL} = X_{CL} - X_{AL} \\ d_{YL} = Y_{CL} - Y_{AL} \end{cases}, \quad \begin{cases} d_{XS} = X_{CS} - X_{AS} \\ d_{YS} = Y_{CS} - Y_{AS} \end{cases} \tag{7}$$

若两点平移量近似相等($|d_{XL} - d_{XS}| \leqslant 0.1$ pixels,$|d_{YL} - d_{YS}| \leqslant 0.1$ pixels),说明转台调整到位。根据 d_{XL}, d_{YL} 或者 d_{XS}, d_{YS} 按 3.3 节中所标定的放大倍率将像面距离转换为实际物理距离,指导平移导轨运动到指定位置即可完成对准。

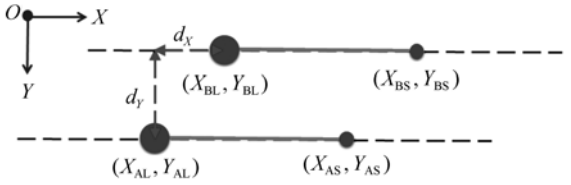


图 4　平移量计算示意图

Fig. 4　Schematic of calculation of displacement

$$\begin{cases} D_X = d_{XL} \times \beta_M \\ D_Y = d_{YL} \times \beta_M \end{cases}. \tag{8}$$

不过,由于机床检测臂、加工臂和转台的相对位置误差及转台本身的角度误差,单次调整不易直接到位,需要利用图像 C 再次与图像 A 对比,计算旋转角偏差 θ。重复 3.5、3.6 节的调整步骤,直至完成精确对准。实际对准精度约为 $p/\beta_M \times 0.1$ pixels ≈ 4.4 μm × 11 × 0.1 ≈ 5 μm。

需要说明的是,基于靶标的对准也可以使用多种图像配准算法[18-19]来完成,但是旋转图像配准或需要进行旋转插值,或需要复杂稳定的角点捕获与匹配,计算时间相对较长,精度也不易保证。而本文所设计的特殊靶标将旋转图像配准的复杂计算简化为点、线的旋转与平移关系,缩短了计算时间,定位精度也达到了 5 μm,对准速度快,可以有效提高加工检测效率。

4　实验数据分析

首次使用前对图 1 所示的加工机床上的加工臂和检测臂对准装置分别进行畸变标定。将一块口径为 1.5 m 的非球面反射镜置于加工机床上进行研磨和在线检测,特征靶标粘贴在镜体中心位置。将摆臂轮廓仪检测探头移动至镜体上方,对准装置完成自动对焦后,采集靶标图像 A,如图 5(a)所示,以此记录扫描初始位置。

对采集图像进行畸变校正后,搜索 4 组放大倍率标定点对,P1 ~ P8 点对坐标如表 1 所示。由坐标可计算出点对之间的距离,与点对实际物理距离对比,即可得对准系统的放大倍率。取四组放大倍率的均值,$\beta_T = 1/10.917$。

表1 机床对准系统放大倍率标定

Tab. 1 Magnification calibration of the alignment system of the optical fabrication machine

Object Distance/mm	P*m*	P*n*	Image Distance(pixels)	β_M
10	(485.09,1333.01)	(692.34,1332.85)	207.25	1/10.966
15	(1116.91,959.87)	(1115.43,647.60)	312.27	1/10.917
20	(797.32,283.93)	(381.75,284.95)	415.57	1/10.938
25	(69.83,549.63)	(74.43,1073.35)	523.74	1/10.849

搜索靶标图像中心区大小点对位置,L、S 坐标如表2所示。由坐标可计算出 L、S 点对连线与图像坐标系 X 轴的夹角为 -44.47°。

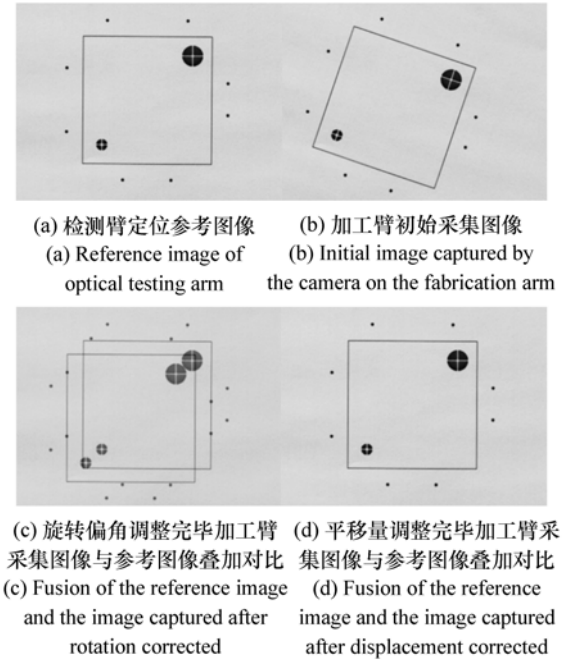
表2 机床对准系统旋转角与平移量计算

Tab. 2 Calculation of rotation angle and displacement of the alignment system of the optical fabrication machine

	L	S	α
(a)	(296.87,1098.64)	(876.85,507.82)	-44.47
(b)	(451.35,1049.86)	(811.81,304.55)	-25.81
θ(b-a)	-	-	18.66
(c)	(388.58,990.93)	(968.89,401.39)	-44.55
d*x*(c-a)	91.72	-107.71	-
d*y*(c-a)	92.04	-106.43	-

摆臂轮廓仪扫描镜体多条母线后完成被测镜面形重构,由此面形分布规划下一周期的加工路径和驻留时间,制作加工文件。移开摆臂轮廓仪,将加工臂移至镜体上方,对准装置进行自动对焦,采集靶标图像 B,如图5(b)所示。同样对该图像进行畸变校正和放大倍率标定,搜索靶标图像 L、S 点对坐标,计算两点连线与图像坐标系 X 轴的夹角为 -25.81°,则当前位置与理想位置的旋转角偏差约为 18.66°。调整转台,到位后采集图像 C,对准靶标坐标如表2所示,两点连线倾角约为 -44.55°。图5(c)是图像 A 和 C 的叠加对比图,可以看出两者基本平行。计算出两图相对平移量,根据标定的放大倍率转换为物空间实际距离调整平移导轨。调整结束后采集图像 D,图5(d)为图像 A 和 D 的叠加图,可以看到两者吻合度较高。

至此加工臂初始扫描位置与检测臂初始位置对准完成,导入检测面形所规划的加工文件,加工磨头开始遍历整个镜体。一个加工周期完成后,加工臂移出,检测臂以初始图像 A 的位置为基准



(a) 检测臂定位参考图像 (a) Reference image of optical testing arm

(b) 加工臂初始采集图像 (b) Initial image captured by the camera on the fabrication arm

(c) 旋转偏角调整完毕加工臂采集图像与参考图像叠加对比 (c) Fusion of the reference image and the image captured after rotation corrected

(d) 平移量调整完毕加工臂采集图像与参考图像叠加对比 (d) Fusion of the reference image and the image captured after displacement corrected

图5 检测臂与加工臂初始扫描位置对准

Fig. 5 Original location alignment of optical testing arm and fabrication arm

进行复位,重新开始新一轮扫描,获得镜体的面形检测分布后规划下一周期的加工路径和驻留时间,指导加工臂进行研磨。依此步骤进行反复迭代,直至镜体面形收敛至设计需求。

5　结　论

大口径反射镜在天文观测和高分辨对地遥感方面应用日益广泛,对其加工精度和加工效率也提出了更高的要求。除了反射镜加工技术和检测方法本身的不断进步之外,保证检测规划路径和实际加工路径的一致性也是提高加工收敛效率的关键之一。检测探头和加工磨头初始扫描位置的对准依靠传统机械方法精度约为几十微米,难以满足超高精度光学加工的快速收敛需求。本文提出了借助特殊点对靶标作为定位基准,以与加工臂、检测臂固连的对准装置采集靶标图像,实时计算当前位置的旋转角和平移量偏差,指导加工机床的转台和导轨进行调整,实现快速精确对准复位。实验验证该方法定位精度约为 5 μm,为加工路径和规划路径的一致性提供了保证,避免了两者之间的偏差造成的对原有面形的破坏,减少了加工周期的反复迭代,节省了加工时间,还有利于降低镜面的中高频误差,一定程度上将减轻广角散射对成像系统质量的影响,可有效提高反射镜的加工精度和收敛效率。

参考文献:

[1] ENDELMAN L L. Hubble space telescope:mission, history, and systems[J]. *SPIE*,1991,1358:422-441.

[2] SEERY B D. The James Webb Space Telescope(JWST):Hubble′s scientific and technological successor[J]. *SPIE*, 2003,4850:170-178.

[3] NELSON J E,MAST T S. Construction of the keck observatory[J]. *SPIE*,1990,1236:47-55.

[4] HILL G J. Hobby-Eberly Telescope:instrumentation and current performance[J]. *SPIE*,2000,4008:50-61.

[5] CRAUSE L A,SHARPLES R M. Performance of the Southern African Large Telescope(SALT) High Resolution Spectrograph(HRS)[J]. *SPIE*,2014,9147:91476T.

[6] MARTINA H M,ALLENA R G,BURGE J H,*et al*.. Fabrication and testing of the first 8.4 m off-axis segment for the Giant Magellan Telescope[J]. *SPIE*,2010,7739:77390A.

[7] GARY H S. Managing a big ground-based astronomy project:the Thirty Meter Telescope(TMT) project[J]. *SPIE*,2008, 7017:70170H.

[8] ROBERTO G. The European ELT:status, science, size[J]. *SPIE*,2008,6986:698604.

[9] PHILIPPE D,BERNARD D,LOTHAR N. OWL optical design, active optics, and error budget[J]. *SPIE*,2000,4003: 203-209.

[10] JONES R A. Rapid optical fabrication with CCOS[J]. *SPIE*,1990,1333:34-43.

[11] YI Z,YING L,LEI W,*et al*., Method of stressed lap shape control for large mirror fabrication[J]. *SPIE*,2006,6273: 62730D.

[12] 罗霄.采用平转动应力盘技术加工超大口径非球面的研究[D].北京:中国科学院研究生院,2011.
LUO X. Fabrication of large aspherics using stressed lap with orbital tool motion[D]. Beijing:Graduate University of the Chinese Academy of Sciences,2011.(in Chinese)

[13] HARRIS D C. History of magnetorheological finishing[J]. *SPIE*,2011,8066:80160N.

[14] LUO X,REN K,HU H,*et al*.. Magnetic rheological polishing device suitable for large aperture optical processing[P], CN201410120264.0,2014.

[15] DEMMLER M,ZEUNER M,LUCA A,*et al*.. Ion beam figuring of silicon aspheres[J]. *SPIE*,2011,7934:793416.

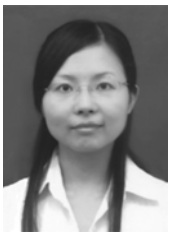
[16] ANDERSON D S,BURGE J H. Swing-arm profilometry of aspherics[J]. *SPIE*,1995,2536:169-179.

[17] PENG S,CHANG J,ROBERT E,*et al*.. Swing arm optical CMM for aspherics[J]. *SPIE*,2009,7426:74260J.

[18] ZITOVA B,FLUSSER J. Image registration methods:a survey[J]. *Image and Vision Computing*,2003,21:977-1000.

[19] SHARMA K, GOYAL A. Classification based survey of image registration methods[C]. IEEE - 4th ICCCNT, Tiruchengode, India, July 4, 2013: 1-7.

作者简介：



陶小平(1984—)，女，湖北麻城人，博士，副研究员，2005年、2010年于浙江大学分别获得学士、博士学位，主要从事遥感成像系统设计与检测方面的研究。E-mail: taoxp99@163.com