

大口径望远镜主镜支撑系统装调

赵勇志, 邵亮, 明名, 吕天宇, 刘昌华

(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: 针对 1.2 m 大口径望远镜主镜支撑系统, 为保证主镜面形精度均方根要求, 提出了一种有效的装调方法。该主镜支撑系统结合运动学原理, 分别设计了 Whiffletree 轴向支撑和柔性切向杆侧向支撑结构, 以保证其在较大温差范围内 ($-20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$) 以及不同俯仰状态下 (垂直-水平) 始终具有较好的面形精度。机械加工误差及安装误差使柔性机构在组装过程中极易引入装配应力, 明显地增大主镜表面变形。借助于有限元软件对装调过程中可能出现的误差进行仿真分析, 根据结果制定装调流程, 并对实际装调进行指导。完成主镜支撑系统装调后, 采用补偿器和干涉仪对主镜的垂直检测及水平检测, 检测出两种状态下主镜的实际面形误差分别为 $\lambda/42$ 和 $\lambda/31$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)。

关键词: 主镜支撑; 有限元分析; 装调; 面形精度检测

中图分类号: TH751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0918003

Assembly for large aperture telescope primary mirror support system

Zhao Yongzhi, Shao Liang, Ming Ming, Lv Tianyu, Liu Changhua

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: According to 1.2 m large aperture telescope primary mirror support system, an effective assembly method was advanced to insure the root-mean-square (RMS) of the surface accuracy. The primary mirror support system was designed following kinematic principle. To achieve excellent performance of the RMS of primary mirror surface accuracy at different ambient temperature (from $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$) and different elevation (from vertical to horizontal), whiffletree structure were used for axial support, while lateral support mechanisms based on flexible tangent link structure were adopted. Resulting from machining error and installation error of the flexible structures, assembly stress was presented certainly, that could increase primary mirror distortion range evidently. By the finite element analysis (FEA) simulation, the effects of various errors were calculated. According to simulation results, assembly processes were established. After assembly of primary mirror support system, the RMS of primary mirror surface accuracy was measured by compensator and laser interferometer. In measurement, the RMS of surface accuracy was $\lambda/42$ and $\lambda/31$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$), when optical axis of primary mirror was vertical and horizontal.

Key words: primary mirror support; FEA; assembly; surface accuracy measurement

收稿日期: 2017-01-05; 修订日期: 2017-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(51605465)

作者简介: 赵勇志(1979-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事大型光电经纬仪结构设计方面的研究。Email: zyz0715@sohu.com

0 引言

随着现代地基光电望远镜的探测能力和观测分辨力不断提高,导致望远镜向大口径方向发展。主镜作为光电望远镜主光学系统中的关键元件,其面形精度直接影响望远镜的成像质量^[1-5]。影响主镜面形精度的主要因素包含:主镜镜面的加工残差,重力变形,热变形,装调应力变形。其中,主镜镜面残差为系统误差;重力变形及热变形与主镜支撑结构设计的相关;装调应力变形是由于机械加工误差和装调误差导致支撑部件形位偏差引起主镜受力变形。为获得良好的主镜面形精度,除提高主镜镜面加工水平外,优良的支撑机构设计是降低主镜重力变形、热变形的前提,正确合理的装调方法是实现这一目标的关键。

为满足系统高刚度要求,文中所涉及的 1.2m 微晶主镜采用 18 点 Whiffletree 轴向支撑结构以及 6 套柔性切向杆侧向支撑结构的被动式支撑系统,其中侧向支撑机构的装调是整个装调工作的重点及难点。国际上采用类似侧向支撑机构的大口径望远镜主要有 SOFIA 以及 SOAR 望远镜主镜。SOFIA 主镜系统最终面形精度约为 140 nm,而 SOAR 主镜系统采用的被动式侧向支撑难以满足要求而最终改为主动式侧向支撑。上述两台望远镜侧支撑之所以未能表现出良好的支撑效果,一方面由于主镜口径较大,另一方面与无法有效的克服安装误差及机械加工误差带来的装调应力有着直接关系^[6-7]。因而如何克服各种误差及装调应力的影响,将是文中所述 1.2 m 望远镜主镜装调工作的最大挑战。

针对上述实际难点,文中提出借助于有限元软件模拟各种误差及装配应力情况,通过分析其对主镜影响不同程度,制定装调步骤及方法。借助于该方法,完成主镜支撑系统装调工作;经检测,主镜面形精度满足要求,验证了该装调方法的合理性。

1 主镜支撑方案

主镜选用刚度高且膨胀系数低的微晶玻璃,以降低重力变形及热变形影响。主镜采用平凹镜设计,外径 $\Phi 1\ 230\ \text{mm}$,内径 $\Phi 250\ \text{mm}$,厚度 160 mm,总重 395 kg。主镜反射面为抛物面,顶点曲率半径

$R=3\ 600\ \text{mm}$,反射面加工完成后要求面形精度 $\text{RMS} \leq \lambda/50 (\lambda=632.8\ \text{nm})$ 。主镜支撑系统光轴指向不同俯仰角时,其面形精度要求 $\text{RMS} \leq \lambda/30$ 。

为保证主镜定位精度,主镜支撑机构应满足静定机构支撑原理,实现六自由度定位,即满足:

$$F=6(n-1)-\sum_{i=1}^g(6-f_i)=0 \quad (1)$$

式中: F 为系统自由度总数; n 为部件数; g 为节点个数; f_i 为第 i 个节点的自由度。主镜支撑系统中,每组支撑机构及其扩展支撑点之间形成 1 个约束关系。因而由轴向支撑和侧向支撑组成的主镜支撑系统恰好需 6 组支撑机构对主镜进行约束^[8]。

轴向支撑通过采用 3 组 Whiffletree 结构,逐级扩展为 18 个等力支撑点方式对主镜进行支撑,并约束主镜 3 个自由度,如图 1 所示。文中 Whiffletree 结构为两级扩展方式:第一级为等长摆臂机构;区别于传统球铰连接方式,通过防转膜片结合球铰的方式形成十字铰链实现摆臂与第二级力扩散器的连接;支撑点处采用轴向柔性细杆机构,可有效实现轴向支撑与侧向支撑的解耦,有利于主镜径向的自由膨胀,实现轴向支撑机构与主镜热变形的解耦。

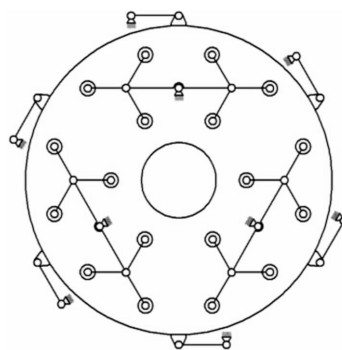


图 1 支撑机构图

Fig.1 Schematic diagram of support mechanism

对于大口径主镜被动式支撑系统而言,其侧向支撑机构多采用杠杆配重结合硬点方式。其中杠杆配重机构通过杠杆比大于 1 的放大机构施加推拉力以平衡主镜自重,硬点机构通过三点定位原理负责主镜侧向定位;该支撑方式理论上可以较好的实现主镜的面型精度,但根据参考文献[5]的论述可知杠杆配重机构自身的平衡依赖于主镜,而其与主镜组成的力学平衡系统属于动态平衡系统,需要硬点机

构辅助平衡,因而主镜的侧向支撑刚度仅由硬点机构实现;同时由于杠杆机构的存在放大了外界干扰对于支撑系统的影响(外界的影响放大了杠杆比的平方根倍),使其整个支撑系统难以满足高刚度需求的应用场合。

为适应主镜支撑系统高刚度应用要求,文中所述侧向支撑机构采用 6 套柔性切向杆机构对称排布方式对主镜侧向进行约束与支撑,如图 1 所示。在实际运用中每组切向杆侧向支撑机构均参与主镜的约束,可很好的提高支撑系统刚度;在具体设计中,切向杆机构在主镜径向及轴向方向采用柔性切口,实现其柔性柱铰功能及轴向解耦能力;每对相互对应平行的切向杆机构包含一个用于分散作用力的虚约束,3 对切向支撑结构可约束了主镜 3 个自由度,同时避免与轴向支撑耦合。热变形过程中 6 套切向支撑机构具有相同的伸缩量,可将主镜与镜室之间径向热变形量的差异转化为主镜绕光轴方向的微量转动,从而释放主镜和镜室因径向热膨胀不一致而产生的热应力,实现支撑系统热解耦能力,可有效降低热应力对主镜镜面面形的影响^[9-10]。

利用 ANSYS 软件建立所述 1.2 m 微晶主镜及支撑系统模型并进行仿真验证,如图 2 所示。主镜利用板单元建立沿径向截面,通过旋转扫掠成实体单元;主镜室采用不同厚度壳单元建成;支撑系统依照实际设计采用不同截面及尺寸的梁单元建成;不同部件的连接处根据不同的连接方式采用 CE 节点约束方程、节点合并及 MPC 单元实现不同的连接方式及运动副的仿真。由于主镜建模方式沿半径节点分布逐渐稀疏,为提高分析的准确性,面形精度统计结果采用节点加权方式,权值为节点所对应位置的归一化半径长度。

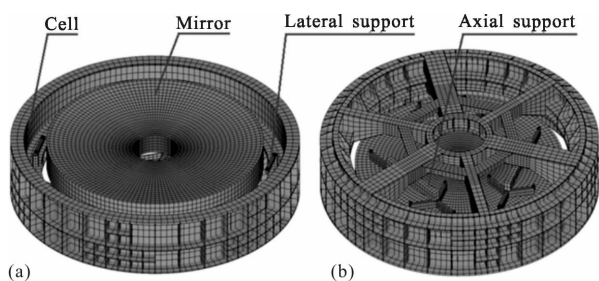


图 2 有限元模型示意图

Fig.2 Schematic of FEA model

经有限元仿真分析,在重力作用下主镜光轴指向天顶时面形精度 2.99 nm,主镜光轴指向水平时面形精度 11.05 nm;主镜支撑系统在 60℃温差范围内对于主镜的影响为 0.67 nm;支撑系统 1 阶频率 66.8 Hz;支撑系统中最大应力出现在侧向支撑系统的柔性部件,该处应力为 24.5 MPa,相比于其材料屈服极限 355 MPa,安全系数达到 14.5,远高于通常机械系统 3 的安全系数,因而支撑系统的设计满足要求。

2 主镜支撑系统装调

1.2 m 主镜支撑系统主要由主镜、主镜室、轴向支撑机构、侧向支撑机构、轴向保护机构以及侧向保护机构构成。支撑系统的装调主要包含两部分,即未与主镜连接时支撑系统的初调工作以及支撑机构与主镜的联调工作。前者主要是完成各个功能机构的组装,在部件机械加工水平满足要求条件下,该部分工作较为容易实现;后者各支撑机构与主镜的联调过程中,需要保证主镜位置及面形精度要求,具有较大的难度,该部分为文中研究重点。图 3 所示为完成初调工作的主镜支撑系统,其中轴向保护机构及侧向保护机构可实现沿轴向及侧向调节,兼具主镜装调过程辅助定位功能。

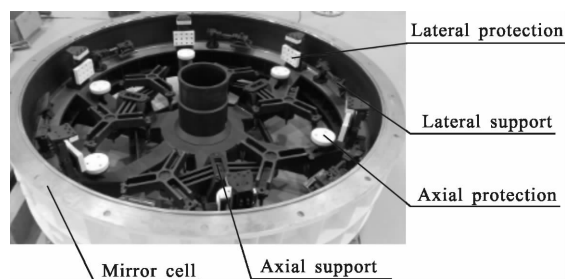


图 3 支撑系统

Fig.3 Support system

针对文中所述支撑系统特点,制定以下主要装调步骤:

(1) 将主镜与主镜室对接,落于轴向支撑之上,调整主镜位置,使主镜光轴与镜室机械轴之间相对位移及倾斜达到要求;

(2) 利用主镜与支撑系统之间的定位关系,完成相应支撑点胶接工作,其中侧向支撑点通过专用胶接固定工装定位,轴向支撑点直接利用 Whiffletree 系统自动平衡定位;

(3) 支撑点胶接固化后,测量主镜与镜室相对位置,若发生的相对位移量超出要求范围,松开轴向细杆机构与轴向支撑点连接,调整主镜位置至要求范围内;

(4) 通过侧向支撑机构连接主镜支撑点,安装过程中应通过在合理范围内调整侧向支撑相应连接进而释放部件锁紧连接时产生的装配应力。

主镜支撑系统俯仰角发生改变时,装调过程中的安装误差使得实际支撑效果相对于理想支撑效果产生附加力矩等干扰因素,该现象对于主镜面形精度的影响随主镜俯仰角的不同而发生改变。由于机械加工误差及安装定位误差的存在,不同部件间相互连接锁紧时将出现装配应力,且无法通过调整相应机构完全释放。对文中所述支撑机构采用的柔性细杆机构及柔性切向杆机构而言,这种装配应力将导致柔性环节的弹性变形。该弹性变形通过支撑点对主镜施加弹性反力而影响主镜面形精度。

采用类似侧向支撑机构的 SOFIA 望远镜主镜支撑系统在装调早期被动式侧向支撑机构过程中主要关注于切向力的调整,即通过理论定标计算出每个侧向支撑点的切向力对于主镜面形精度的影响,利用计算结论逐个调整每套侧向支撑机构切向力到理论值。SOFIA 主镜支撑机构的调整方法理论上可实现主镜面形精度要求,但在实际侧向支撑机构中不仅存在切向力偏差,同时存在着由于支撑机构的装调偏差导致的轴向及径向应力的影响,因而装调过程中仅对于切向力关注不足以克服其他两个垂直方向装调应力对于主镜面形的影响。

对于文中所述主镜支撑系统而言,不同来源的安装误差及装配应力对于镜面面形精度影响的敏感度并不一致,同时由于实际安装误差及装配应力的存在无论采用何种装调方式及安装顺序均无法完全消除其对于主镜影响。针对这一实际情况,笔者认为应对不同来源的安装误差及不同方向的装配应力对于主镜的影响进行分析,在实际装调过程中通过以保留部分对主镜并不敏感的因素为代价,尽量释放对主镜较为敏感的影响的方式提高主镜面形精度。

根据所述装调思想为指导,利用有限元软件对支撑系统各种安装误差及装配应力对于主镜支撑面形的影响进行分析,制定分配各个机构装配精度的优先级别,进而对实际装调工作进行指导。

有限元仿真过程中,安装误差采用修改模型支撑位置节点位置的方式实现。实际装调过程中支撑机构不同连接部件接触面之间存在间隙(包含位移及倾斜),使得锁紧后连接部件后产生装调应力并最终传递至主镜;实际装调过程中导致该应力的间隙可通过塞尺测得,因而在建模过程中该装调应力的引入可采用对连接部件有限元模型相应节点施加强制位移方式实现^[11-13]。

相对理想支撑系统模型,实际情况中各个支撑点引入的装调偏差应带有随机性,这里采用对相应支撑点施加随机误差,通过多次运算进行统计的方式得到各种安装误差及装配应力对于主镜面形精度影响。由于随机偏差的引入,使得每次模拟计算结果均不一致,理论上讲通过该方法进行统计无法得到安装误差及装配应力对于主镜面形精度影响的具体仿真值;但由于工程中大多数随机误差的正态分布特性,使得某一组数量足够多的有限仿真样本的统计结果接近于真值,因而对实际装调效果的估算仍具有指导意义。

针对文中所述 1.2 m 主镜支撑系统实际装调工作中可能出现的安装误差及装配应力,表 1 为利用

表 1 安装误差及装配应力影响

Tab.1 Installation error and assembly stress disturbance

Serial	Source of error and stress	RMS of surface accuracy/nm
1	Ideal condition(Optical axis to vertical)	2.99
2	Ideal condition(Optical axis to horizon)	11.05
3	Position error of axial support(1 mm)	0.20
4	Slope error of axial support(0.2°)	0.24
5	Eccentric error between mirror and cell (0.05 mm)	0.14
6	Slope error between mirror and cell (5")	0.01
7	Axial position error of lateral support (0.2 mm)	1.99
8	Radial position error of lateral support (0.5 mm)	0.78
9	Assembly stress of lateral support from axial slit (0.05 mm)	3.36
10	Assembly stress of lateral support from radial slit(0.05 mm)	0.45
11	Assembly stress of lateral support from lateral slit(0.05 mm)	1.44

有限元仿真计算对所述因素影响主镜面形精度的分析结果。

表 1 中,1~2 项为仅受重力作用的理想状态下主镜面形精度仿真结果;3~11 项为不受重力作用时各种来源的误差及应力对于主镜面形精度的影响,其具体数值为某 30 次引入随机误差的模型仿真分析后的统计计算结果,虽该过程理论上无法得到固定值,但对于指导实际装调步骤的制定,仍具有指导意义;3~4 项,由于轴向支撑点利用 Whiffletree 自身定位胶接而非采用专用胶接定位工装,定位偏差相对较大,但通过分析可知,该影响较小;5~6 项偏差根据主镜支撑系统安装要求给出,经分析该量级的偏心及倾斜对主镜面形精度影响较小;7~8 项,侧向支撑点胶接定位精度对主镜面形精度影响较大,因而侧向支撑点胶接过程需采用专用工装保证其定位精度。

根据表 1 中 9~11 项,侧向支撑机构装调过程中,相同尺度安装误差或部件机加误差导致的装配应力对于面形精度的影响的敏感程度依大到小为:轴向、切向、径向装配应力;因而侧向支撑机构装调过程,应着重注意的是释放侧向支撑轴向装配应力,其次切向装配应力,最后是径向装配应力;在侧向支撑装调步骤的制定上应遵循:优先调整侧向支撑机构轴向自由度、其次切向自由度,将装调过程积累的各种偏差影响尽量集中于径向自由度的最终装调。主镜完成精抛后,面形精度达到 $\lambda/57$,其面形云图如图 4 所示。

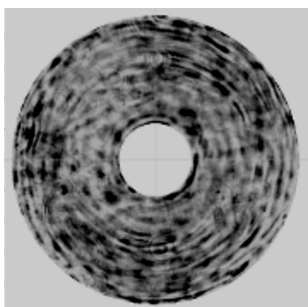


图 4 主镜面形精度

Fig.4 Primary mirror surface accuracy

图 5(a)为主镜与支撑系统对接过程。由于侧向保护机构的预先设置,完成初步对接后主镜与镜室偏心小于 2 mm。图 5(b)为利用百分表测量、调整主镜及镜室偏心、倾斜。偏心通过轴向保护机构将主镜

略升起至脱离轴向支撑点,针对测得的偏心数值调整相应方向侧向保护机构推动主镜发生微量平移至理想位置后,降下轴向保护机构将主镜落至轴向支撑点。该过程会出现一定的反复但总体趋势收敛,经过 3~4 次调节后,可将主镜偏心调整要求范围内。为提高系统刚度,主镜倾斜的调整采用了修整垫片的方式。经过调整后测量,主镜与镜室偏心 0.03 mm,倾斜 4",满足主镜使用要求。



图 5 主镜安装和主镜调整

Fig.5 Installation for primary mirror and adjustment for primary mirror

经前文分析可知,侧向支撑点定位偏差对于主镜面形精度影响较为明显,需通过相应的胶接定位工装保证侧向支撑点胶接定位的准确性,图 6 为侧向支撑



图 6 侧向支撑点胶接定位工装

Fig.6 Positioning tooling for lateral support points gluing

点胶接定位工装及使用方式。定位工装沿主镜边缘切向运动通过工装与镜室连接锁死,其余 5 个自由度的调节可通过定位工装配合辅助垫片实现。侧向支撑点

胶接具体步骤为:首先通过相应自由度调整支撑点与主镜外侧面相对位置并锁死;通过调整定位工装,使支撑点沿径向远离主镜运动,并在支撑点及主镜相应位置涂胶;调整定位工装沿主镜径向靠近主镜运动,并利用薄钢垫片控制胶层厚度,使支撑点与主镜靠近并锁紧;为防止漏胶,支撑点周围用橡皮泥裹匀;胶接固化后,撤除相应工装并去除橡皮泥。通过以上步骤,可确保侧向支撑点较高的胶接定位精度。

根据表1分析结果,侧向支撑装配应力对于面形精度的影响的敏感程度依大到小为轴向、切向、径向3个方向,因而装调顺序及关注程度也应照此排序。如图7所示,为侧向支撑机构。为叙述方便,定义光轴方向为 z 方向,主镜径向为 y 方向,切向为 x 方向, U_x 、 U_y 、 U_z 为3个位移自由度, R_x 、 R_y 、 R_z 为3个旋转自由度。各调整部件可实现的自由度调节在图7中标出。装调过程中发现, R_x 、 R_y 、 R_z 为3个旋转自由度调整可通过调整相应间隙、位移实现,其依次对应 U_z 、 U_x 、 U_y 方向。

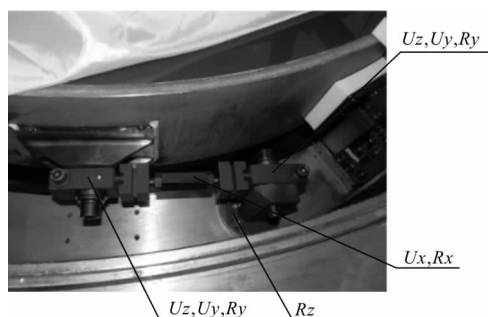


图7 侧向支撑机构

Fig.7 Lateral support structure

侧向支撑机构装调过程为:首先大致调整侧向支撑机构各部件的空间位置及连接;依次锁死侧向支撑机构中的两个弹性夹、底座、连接螺母;松开两个弹性夹,释放轴向应力及部分径向应力;锁紧弹性锁后,松开连接螺母释放切向装配应力;锁紧连接螺母,松开底座释放其余径向应力,之后再次锁紧底座。上述过程本着依次释放轴向、切向、径向应力的原则,多次反复进行,可使侧向支撑机构装调满足使用要求。使用该方案进行装调,最终装调应力主要集中在径向,而径向应力对于主镜面形精度影响相对不敏感,符合仿真分析结论,有利于实现主镜支撑系统良好的面形精度水平。

3 面形精度检测

装调过程采用主镜垂直检测面形精度作为装调效果评判。图8为主镜侧向支撑机构初步连接后垂直检测结果,面形精度RMS达到 $\lambda/32$ 。

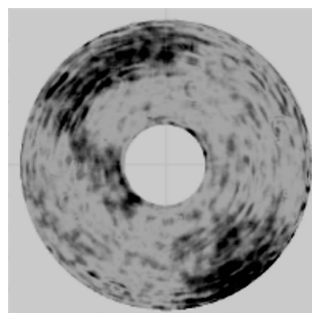


图8 初始垂直检测结果

Fig.8 Vertical measuring preliminary result

此时检测结果满足主镜面形精度 $RMS \leq \lambda/30$ 的设计要求。考虑到垂直状态是主镜面形精度最优状态,同时检测结果中含有较大的象散(约 $\lambda/40$),说明安装误差及装配应力对主镜面形精度影响较大,可推测主镜在其他俯仰角下的面形精度可能难以满足设计要求。

为提高主镜支撑系统装调精度,按所分析的方法及步骤反复调试,具体过程如下:

(1) 侧向支撑机构共计3对(6处),相对应的每1对(2处)为虚约束,装调过程中应优先选择间隔的3处进行第1组装配,其余的3处侧向支撑机构在完成第1组装配后进行第2组装配,以上过程可有效防止临近2处支撑机构互相干扰现象;

(2) 选择间隔的3处侧向支撑机构进行第1组释放应力及精调,依次松开弹性夹,释放轴向应力及部分径向应力后再次锁紧弹性锁后,松开连接螺母释放切向装配应力并锁紧连接螺母,最后松开底座释放其余径向应力,之后再次锁紧底座;

(3) 完成第1组侧向支撑机构应力释放后,进行第2组侧向支撑机构的释放应力及精调,其过程与(2)过程一致;

(4) 重复(2)、(3)过程多次,该过程中可以发现主镜象散项总体趋势逐步降低,但达到一定程度后无法进一步提高主镜面形精度;

(5) 观察、分析主镜检测面形云图,若仍存在局部影响较大的象散,可尝试单独调整对应位置的侧向支撑机构。

经上述释放应力及精调过程,主镜面形精度最终达到 $\lambda/42$ 。此时象散明显降低(约 $\lambda/80$),测得面形云图如图 9 所示。

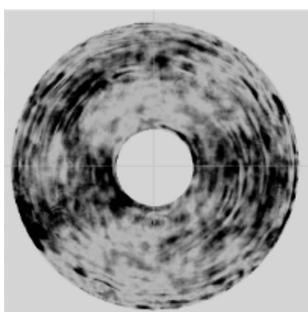


图 9 最终垂直检测结果

Fig.9 Vertical measuring final result

主镜支撑系统进行水平检测时,侧向支撑起到主导支撑作用,面形检测结果将直接反映侧向支撑机构实际装调效果。水平检测试验中,面形精度 RMS 达到 $\lambda/31$,其面形云图如图 10 所示。光轴水平是支撑系统支撑效果最差状态,该状态下所测结果满足要求,结合最优状态下的检测结果,可判定支撑系统在不同俯仰角下,支撑效果均满足设计要求。所测结果验证了所述装调方案的合理性及可行性。

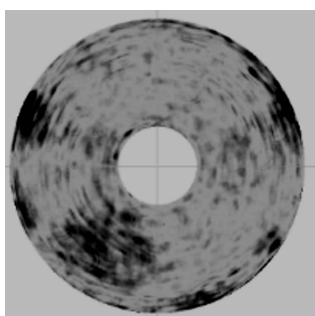


图 10 最终水平检测结果

Fig.10 Horizontal measuring final result

4 结论

针对 1.2 m 微晶主镜支撑机构装调难点,借助于有限元软件模拟各种误差及装配应力对主镜面形精度影响,并依仿真分析结果制定装调步骤及方法,完成主镜支撑系统装调工作。经检测,主镜在垂直及水

平状态下,面形精度 RMS 分别达到 $\lambda/42$ 及 $\lambda/31$,满足设计要求。检测结果验证了所述装调方案的合理性及可行性,该研究的开展可为类似支撑系统装调工作提供一定的借鉴和指导。

参考文献:

- [1] Wang Jianli, Chen Tao, Zhang Jingxu. General requirements and key technologies for the ground-based high resolution EO imaging telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(S): 1-16. (in Chinese)
王建立, 陈涛, 张景旭. 地基高分辨率光电成像望远镜总体需求及技术分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(S): 1-16.
- [2] Fan Lili, Zhang Jingxu, Jiang Hao, et al. Design of the primary mirror support of equatorial telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 476-479. (in Chinese)
范李立, 张景旭, 姜皓, 等. 极轴式望远镜主镜支撑设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 476-479.
- [3] Fan Lei, Zhang Jingxu, Shao Liang, et al. Axial support for large aperture primary based on hydraulic Whiffle-tree [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2126-2131. (in Chinese)
范磊, 张景旭, 邵亮, 等. 采用液压 Whiffle-tree 的大口径主镜轴向支撑[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2126-2131.
- [4] Shao Liang, Wu Xiaoxia, Chen Baogang, et al. Passive support system of light-weighted SiC primary mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1380-1386. (in Chinese)
邵亮, 吴小霞, 陈宝刚, 等. SiC 轻量化主镜的被动支撑系统 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1380-1386.
- [5] Hans J K, Peter E, Martin S. Mechanical principles of large mirror supports[C]//SPIE, 2010, 7733: 77332O.
- [6] Hermann B, Matthias E, Peter H, et al. SOFIA primary mirror assembly: structural properties and optical performance [C]//SPIE, 2003, 4857: 266-273.
- [7] Douglas R N, Victor K, John A, et al. Active tangent link system for transverse support of large thin meniscus mirrors [C]//SPIE, 2007, 6665: 66650F.
- [8] Shao Liang, Wu Xiaoxia, Yang Fei, et al. Progress on the hydraulic Whiffletree support system for SiC lightweight mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3820-3824. (in Chinese)
邵亮, 吴小霞, 杨飞, 等. SiC 轻量化主镜液压 Whiffletree 支撑系统的改进 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(11): 3820-3824.

- [9] Shao Liang, Yang Fei, Wang Fuguo, et al. Design and optimization of supporting system for 1.2 m lightweight SiC primary mirror[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 229–234. (in Chinese)
邵亮, 杨飞, 王富国, 等. 1.2 m 轻量化 SiC 主镜支撑系统优化设计[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 229–234.
- [10] Wu Xiaoxia, Wang Minghao, Ming Ming, et al. Calibration of thermal distortion for large aperture SiC lightweight mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1243–1249. (in Chinese)
吴小霞, 王鸣浩, 明名, 等. 大口径 SiC 轻量化主镜热变形的定标[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1243–1249.
- [11] Yang Dehua, Gu Bozhong, Cui Xiangqun. Structural analysis of the reflecting surface system of a large astronomical telescope [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 17(3): 415–419.
- [12] Yang Dehua, Xu Lingzhe, Xu Xinqi. Wind disturbance study on large astronomical telescopes [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(3): 342–346. (in Chinese)
杨德华, 徐灵哲, 徐欣圻. 大型光学天文望远镜风载作用分析[J]. 光学技术, 2009, 35(3): 342–346.
- [13] Hu Qiqian, Yao Zhengqiu. Astronomical Telescope Design [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003: 338–357. (in Chinese)
胡企千, 姚正秋. 天文望远镜设计 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003: 338–357.