

文章编号 1004-924X(2017)10-2564-08

大口径主镜的侧向定位系统

原 帅^{1,2}, 张景旭¹, 王富国^{1*}, 刘祥意¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对采用 Whiffletree 式底支撑和推拉平衡重式侧支撑的大口径主镜在主镜室中的准确定位, 基于运动学约束原理提出了一种大口径主镜侧向定位方法。介绍了运动学约束的基本原理, 提出了一套主镜侧向定位系统实现方案, 包括定位点位置的选取、柔性铰链和定位基座的设计, 并设计了一种侧向定位系统。利用有限元方法, 分析了设计的侧向定位系统对大口径主镜系统的位置、谐振频率和镜面面形精度等方面的影响。结果表明, 使用该侧向定位系统的整个主镜系统谐振频率达到 13.6 Hz, 光轴水平时主镜沿 Y 轴方向的平均位移为 -355.863 nm, 镜面面形未受影响, 所有指标均满足设计要求。实验结果验证了提出的主镜侧向定位系统设计方案对大口径望远镜主镜的支撑和定位系统设计具有工程指导意义。

关 键 词:大口径主镜; 定位; 运动学约束; 谐振频率; 面形精度

中图分类号:TH743; TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172510.2564

Lateral positioning system for large aperture primary mirror

YUAN Shuai^{1,2}, ZHANG Jing-xu¹, WANG Fu-guo^{1*}, LIU Xiang-yi¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

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

*Corresponding author, E-mail: yuansam@foxmail.com

Abstract: To locate accurately a large aperture primary mirror with balance weight support and Whiffletree support in the primary mirror cell, a lateral positioning method for the large aperture primary mirror was proposed based on the kinematic constraint. The principle of kinematic constraint was introduced, a design scheme of lateral positioning system for the primary mirror was proposed including the selection of location points and the design of flexure hinges and location bases, and then a lateral positioning system was implemented. With finite element method, the influences of the lateral positioning system on the large aperture primary mirror system was analyzed in several aspects, such as system location, resonant frequency and mirror surface profile. As the results, it shows that the resonant frequency of the primary mirror reaches 13.6 Hz, the average displacement of the primary mirror is -355.863 nm along the Y-axis direction, and the primary mirror surface profile is uninfluenced.

收稿日期: 2017-05-22; 修订日期: 2017-06-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11403023)

These parameters all meet the design requirements of this lateral positioning system. Experimental results verify the engineering signification of proposed lateral positioning system on the design of support and position systems of primary mirror in large aperture telescopes in the future.

Key words: large aperture primary mirror; positioning; kinematic constraint; resonant frequency; surface profile

1 引 言

在望远镜系统中,通常将两米级及以上口径的主镜称为大口径主镜^[1]。主镜是望远镜的核心光学元件,其面形精度和主镜在光机系统中的位置精度是影响光学系统像质的两个主要因素。光机系统中各光学元件的准直和间距控制,是避免额外像差、保证成像质量的有效手段^[2-4]。

目前,针对单一主镜在光机系统或主镜室中的定位方法开展了很多研究。美国国家光学天文台的大型综合巡天望远镜(Large Synoptic Survey Telescope, LSST),其主镜口径为 8.4 m,采用六杆运动平台作为硬点来约束主镜的 6 个自由度^[5]。国内北京空间机电研究所陈晓丽等设计的 2 m 口径的空间望远镜采用了基于博伊斯运动定位支撑的三点定位方式^[6]。长春光机所杨飞等设计的 1.23 m 口径的主镜,利用主镜的中心孔,采用了芯轴定位机构^[7]。前两种方案多应用在主镜轴向定位设计方案之中;第三种方案在 700~1230 mm 口径主镜的侧向定位上有非常良好的效果,但如果在更大口径主镜上应用,则存在加工难度高、安装难度大、热变形力大等问题。此外,主镜轻量化、弯月镜等新结构形式的应用,对大口径主镜在光机系统中的定位提出了新的挑战^[8-9]。

本文针对某 2 m 口径主镜,提出了基于运动学约束的大口径主镜侧向定位方法,设计了一套主镜侧向定位系统,包括定位点位置的选取、柔性铰链和定位基座的设计。最后对定位机构对主镜的定位精度、谐振频率、镜面面形等方面的影响进行了有限元分析。

2 基于运动学原理的定位方法

在机械原理中,系统中构件相对于参考系的独立运动参变量的数量,称为构件的自由度。任

意一个自由刚体在三维空间中都具有 6 个自由度,包括沿 X 轴、 Y 轴、 Z 轴 3 个方向的平动(分别记作 T_x 、 T_y 、 T_z)和绕 X 轴、 Y 轴、 Z 轴 3 个方向的转动(分别记作 R_x 、 R_y 、 R_z)^[10]。

当所引入的定位点恰好限制住刚体全部的 6 个自由度且不产生过约束时,将这种情况称为运动学约束。一个刚体若允许存在少量的过约束,而不会对刚体的整体情况造成明显的影响,这种情况称为半运动学约束。运动学约束的定位系统具有可重复定位的功能,受到外力后能够进行自动调整。当环境温度剧烈变化时,定位系统能够自动调整,且不引起定位精度的下降。

图 1 是基于运动学原理的主镜侧向定位方法的最基本形式^[11]。图中 3 个挠性叶片连接在主镜的圆周中性面上,曲线箭头表示每一个挠性叶片单独作用下的可运动方向。理想情况,3 个可自由运动的方向应该相交于同一点,挠性长度是相等的,3 个挠性叶片的端点形成一个等边三角形。则假设没有挠性叶片 C 的存在,那么主镜在挠性叶片 A 和 B 的组合作用下就只能允许反射镜绕着 O 点(挠性叶片 B 与挠性叶片 A 的延长线的交点)旋转。实际上,由于 C 在该方向上是刚

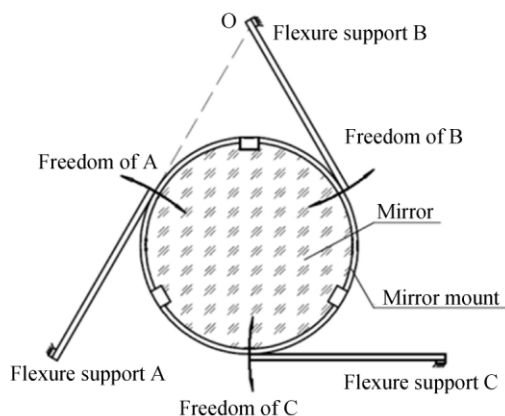


图 1 基于运动学原理的 3 点侧向定位

Fig. 1 Three-point lateral positioning based on kinematics theory

性的,则主镜绕 O 点无法实现旋转,形成运动学约束。

3 大口径主镜的支撑和定位系统

3.1 主镜模型

本文以某 SiC 主镜为研究对象, SiC 主镜具有比刚度大、光学性能好、热膨胀系数大、光学热稳定性好等特点。近年来,随着生产加工工艺的逐渐成熟, SiC 将成为制造望远镜主镜的优选材料^[12-13]。如图 2 所示,该主镜口径为 2 m,圆周直径为 2 030 mm,中心孔直径为 330 mm,镜面曲率半径为 6 000 mm,反射面圆周有 15 mm 宽的压边,圆周厚度为 180 mm。如图 3 所示,该主镜经过了轻量化设计,采用背部半封闭式结构,轻量化孔为扇形孔;在其圆周上,每隔 5° 有一个加强筋。

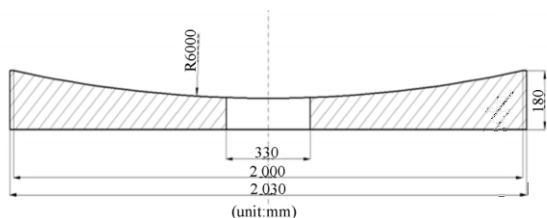


图 2 某 2 m SiC 主镜结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SiC primary mirror with aperture of 2 m

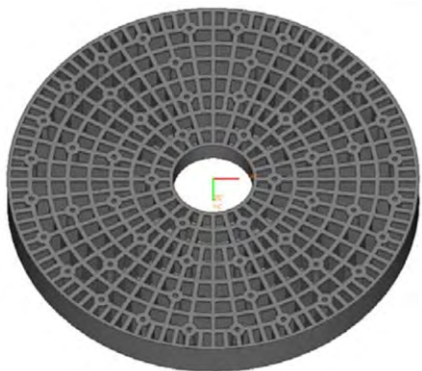


图 3 某 2 m SiC 轻量化主镜模型

Fig. 3 Finite element model of lightweight SiC primary mirror with aperture of 2 m

3.2 主镜支撑系统

该主镜的支撑系统采用底支撑和侧支撑相互独立的被动柔性支撑方式。该支撑方案中,底支撑杆与侧支撑杆的轴向相互正交。由于支撑杆的

直径很小,支撑杆仅在轴向方向上有很强的刚度,而径向方向上刚度则很小,底支撑力和侧支撑力可以相互解耦。

该主镜的底支撑系统采用 3 级 18 个支撑点的 Whiffletree 支撑结构^[2]。Whiffletree 支撑结构是一种无定向支撑方式,将支撑和定位合二为一。工作时,底支撑系统在起到轴向支撑作用的同时,可以限制主镜 R_x, R_y, T_z 3 个方向的自由度,使主镜位置保持在一个虚拟的底支撑面上。

该主镜的侧支撑系统采用主镜外圆周平衡重下推上拉的支撑方式,简称推拉平衡重支撑^[2]。推拉平衡重式支撑方案具有零响应、支撑力大小易调整、面形精度高等优点。经过有限元分析和优化,采用 16 个支撑点的支撑结构。侧向支撑点位置都选取在主镜圆周中性面上,位置如图 4 所示。侧向支撑杆沿 Y 轴平行方向,杠杆长度比例为 1:8,各平衡重锤的重量相等。

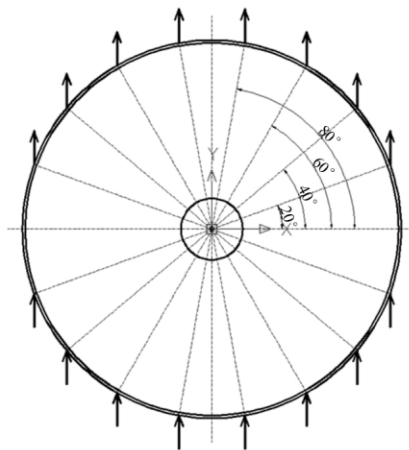


图 4 主镜推拉平衡重式侧支撑示意图

Fig. 4 Schematic diagram of lateral support system of primary mirror with balance weights

但推拉平衡重是一种仅提供支撑力的浮动支撑方式。平衡重锤可以平衡主镜在任何角度所受重力在侧向方向上的分力,但并不能限制主镜在底支撑面上的自由度。因此必须引入一组侧向刚性定位机构来辅助定位,方能消除镜子的 3 个剩余自由度 T_x, T_y, R_z 。

3.3 侧向定位点的选择和优化

3.3.1 定位机构遵循的原则

由于主镜的侧向支撑采用推拉平衡重的支撑方式,这是一种支撑和定位分开的系统,需要有定位机构来辅助主镜定位。定位机构设计需要依照

以下两个原则^[2]:

(1)在不影响支撑系统的情况下,必须消除镜子的全部剩余自由度;

(2)刚性定位点上要加适当的预紧力以保证定位可靠,预紧力一般不超过支撑力总量的 5%~10%。

3.3.2 定位点位置的选择

由于对大口径主镜进行了轻量化加工,侧支撑系统的支撑点和定位点在主镜的圆周中性面上并非是连续可取的,应该选择有加强筋位置的离散点。

第一种定位点选取方案如图 5 所示,根据主镜受力的特点,以主镜中性面的圆周在 Y 轴正半轴上的点为起点,选取沿圆周 120° 均布的 3 个点为定位点 A、B、C,定位杆 A、B、C 的方向沿圆周切线方向。这种设计方式结构简单、对称性好,3 组定位杆之间相互约束,可以最大程度地避免镜子在底支撑面上的位移。

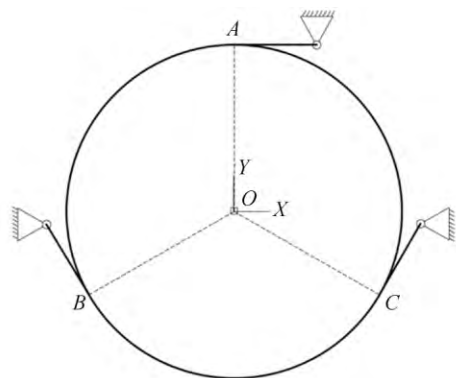


图 5 主镜侧向定位点方案一

Fig.5 Plan A of lateral positioning points of primary mirror

根据以上设计方案建立主镜支撑和定位系统的有限元模型,使用 Patran/Nastran 软件进行有限元分析。当光轴水平时,3 个定位杆末端节点的受力情况如表 1 所示。由表可知,定位杆 A 的受力与定位杆 B 和定位杆 C 相比小两个数量级,几乎不受力;定位杆 B 和定位杆 C 的受力关于 Y 轴对称,这与理论分析相一致。但是,将图 4 和图 5 结合可以明显看出,3 个定位点的两侧都有侧支撑机构。因为根据定位机构的设计原则,定位机构的设计不得影响支撑机构,所以定位机构的结构设计(尤其在零件尺寸和空间排布方面)产生了很多限制。由此,提出第二种定位点选取方案。

表 1 主镜侧向定位设计方案一中三个定位杆末端节点受力情况

Tab.1 Force at end of three positioning rots in plan A

(N)

节点	X 方向	Y 方向	Z 方向	总大小
A	0.000	-0.047	0.000	0.047
B	2.093	-3.653	0.000	4.210
C	-2.093	-3.653	0.000	4.210

第二种定位点选取方案如图 6 所示。由于定位点 A 在整个系统中的对称性,故将定位点 A 仍选在 Y 轴正半轴上;但由于定位杆 A 几乎不受力,则不用必须位于中性面上,而是沿 Z 轴负向偏移了 35 mm,以避开两侧支撑杆件。由于定位杆 B、C 上的力较大且始终存在,如果不选取在中性面上,将会给面形产生较大的影响,则定位点 B、C 的位置只能在中性面上向外移动;调整之后定位点 B、C 和圆心的连线与 X 轴的夹角为 15°。

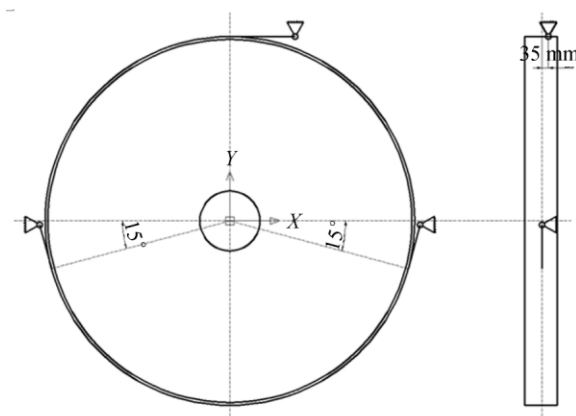


图 6 主镜侧向定位点方案二

Fig.6 Plan B of lateral positioning points of primary mirror

在第二种主镜侧向定位点方案中,定位杆不会与侧向支撑杆产生空间干涉,并且仍然对主镜形成运动学约束,约束了主镜在底支撑面上的 3 个剩余自由度 T_x, T_y, R_z 。

3.4 定位机构的设计

3.4.1 柔性铰链的设计

当温度发生变化时,产生的热应力会对镜面面形产生影响。为了尽可能地减少这种影响,以及与底支撑系统的解耦,侧向支撑系统和定位系统均采用柔性铰链,且具有两个方向的柔性。这里采用一种新型的柔性铰链(见图 7)。这种新型

的细杆型柔性铰链采用了全径向圆弧形缺口,与以往常用的缺口型或板簧型柔性铰链相比,具有柔度高、结构紧凑、热变形好的特点。

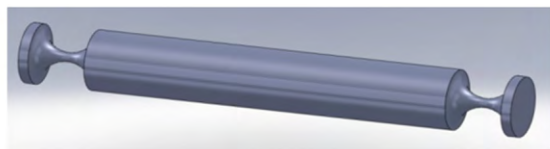


图 7 主镜侧向支撑和定位系统中使用的柔性铰链
Fig. 7 Flexible-hinge used in primary mirror lateral support and positioning system

3.4.2 定位基座设计

定位机构相比支撑机构需要具有较高的刚度,而定位基座则要具有一定的缓冲能力,以防在出现负载过大时(如过大风载、系统惯性力过大、驱动器故障等突发情况)反射镜受到较大的力或力矩载荷而造成损坏。因为定位杆上的力可能是拉力,也可能是压力,所以缓冲应该是双向的。一种定位基座的设计结构方案如图 8 所示。根据定位机构设计原则的第二条,定位基座中的两个弹簧预紧力都是 200 N。

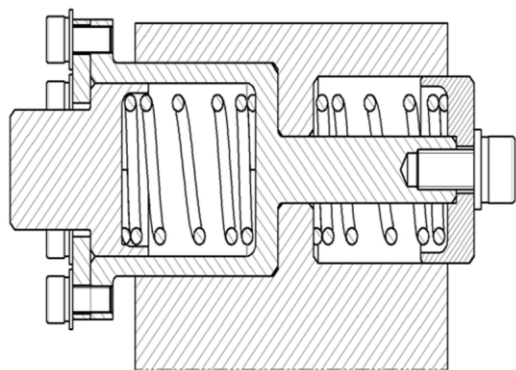


图 8 定位基座结构示意图(左端定位杆未画出)
Fig. 8 Schematic diagram of positioning base (positioning rod in left side is not shown)

4 主镜组件系统的有限元分析

使用有限元软件 Hypermesh 和 Patran/Nastran,采用手动划分网格的方式建立主镜组件系统(包括主镜、底支撑系统、侧支撑系统和侧向定位系统)的有限元模型(见图 9)。将主镜看作壳体

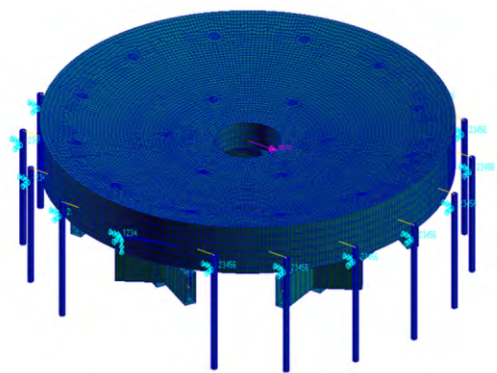


图 9 主镜组件系统的有限元模型
Fig. 9 Finite Element Model (FEM) of primary mirror assembly system

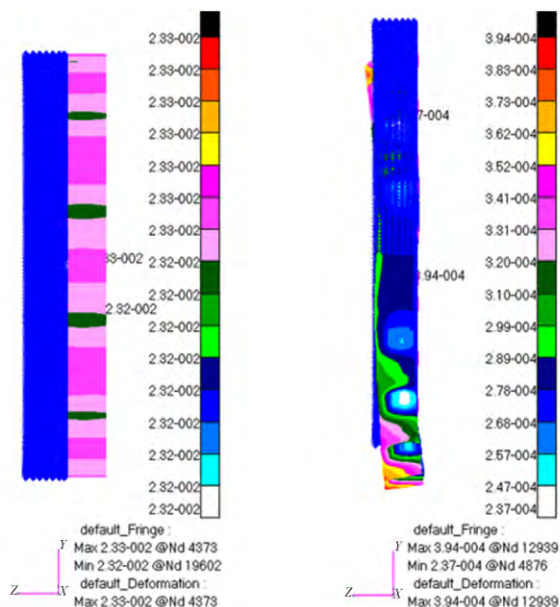
类零件,采用 2D 壳单元进行划分,划分为 37 034 个 Quad element 和 620 个 Tri element。主镜的支撑和定位系统中杆件简化为 1D 单元,根据受力情况的不同分别赋予 Beam、Rod、Spring 等不同的属性;平衡重锤简化为 0D 单元。

4.1 主镜位置精度

望远镜在工作过程中,随着俯仰角的变化,主镜所受重力与光轴的夹角在不断的变化,主镜在主镜室中的位置也会随之产生微小的改变。在主镜光轴竖直和主镜光轴水平两种极限情况下对主镜、支撑和定位系统进行有限元分析,关注主镜的平移和倾斜情况。分析结果(见表 2 和图 10)表明,当主镜光轴竖直时,主镜沿 Z 轴方向平均位移-2 325.943 nm,绕 X 轴、Y 轴的倾斜可以忽略;当主镜光轴水平时,主镜沿 Y 轴方向平均位移-355.863 nm,绕 X 轴、Y 轴倾斜可以忽略,满足设计要求。

表 2 主镜在不同状态下的平均刚体位移和旋转角度
Tab. 2 Displacements and rotation angle of primary mirror in different states

主镜状态	光轴竖直	光轴水平
X 方向平均刚体位移/nm	0.015	-0.003
Y 方向平均刚体位移/nm	0.152	-355.863
Z 方向平均刚体位移/nm	-2325.943	-0.017
绕 X 轴旋转角度/(")	-0.000	0.001
绕 Y 轴旋转角度/(")	-0.000	-0.000
绕 Z 轴旋转角度/(")	0.207	-2.298



(a) 光轴竖直时 (b) 光轴水平时
(a) Optical axis is vertical (b) Optical axis is level

图 10 主镜在不同状态下的位移和倾斜情况

Fig. 10 Displacement and trend of primary mirror in different states

4.2 系统的谐振频率

根据设计目标,侧向定位机构应该可以限制主镜在底支撑面上的 T_X, T_Y, R_Z 3 个自由度。分别对无侧向定位系统的主镜、支撑系统和有侧向定位系统的主镜、支撑系统的有限元模型进行模态分析,按照实际情况对系统施加全约束的边界条件,计算出两种情况下整个主镜支撑系统的前 3 阶谐振频率(见表 3)。计算结果表明,侧向定位机构很大程度的限制了主镜在底支撑面上的 3 个自由度,且 1 阶谐振频率(见图 11)大于 10 Hz,满足设计要求。

表 3 主镜支撑系统的前三阶谐振频率

Tab. 3 First three resonant frequencies of primary mirror support system

阶数	振型描述	无定位系统时的 谐振频率/Hz	有定位系统时的 谐振频率/Hz
1	沿 Y 轴平动	0.6	13.6
2	绕 Z 轴转动	0.7	20.8
3	沿 X 轴平动	2.0	31.9

4.3 镜面面形精度

根据设计目标,侧向定位系统不应该产生影

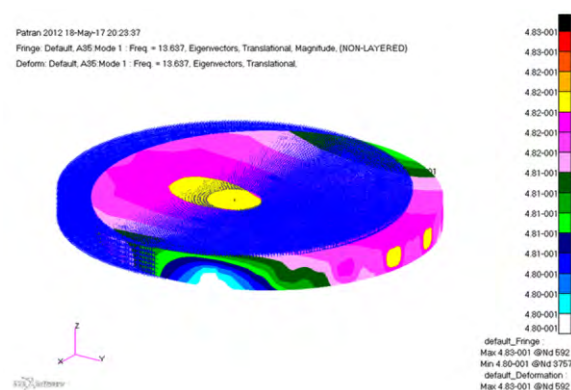


图 11 有定位系统时的主镜一阶谐振

Fig. 11 First order resonance of primary mirror with positioning system

响主镜面形。在主镜俯仰角在 0° (光轴竖直), $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ (光轴水平) 的情况下,分别对不带侧向定位系统的主镜支撑系统和带有侧向定位系统的主镜支撑系统进行在重力作用下的静力学分析,并计算镜面面形的均方根(Root Mean Square, RMS)(结果见表 4 和图 12)。图 13、图 14

表 4 主镜在不同俯仰角下的镜面面形 RMS 值

Tab. 4 RMS values surface profile of primary mirror under different pitching angles

主镜 俯仰 角/ $^\circ$	无定位系统 时面形精度 RMS_1 /nm	有定位系统 时面形精度 RMS_2 /nm	影响率/% $\frac{ RMS_2 - RMS_1 }{RMS_1}$
0	11.1	11.1	0
30	16.3	16.2	0.6
45	19.4	19.2	1.0
60	23.8	23.5	1.3
90	27.0	26.4	2.2

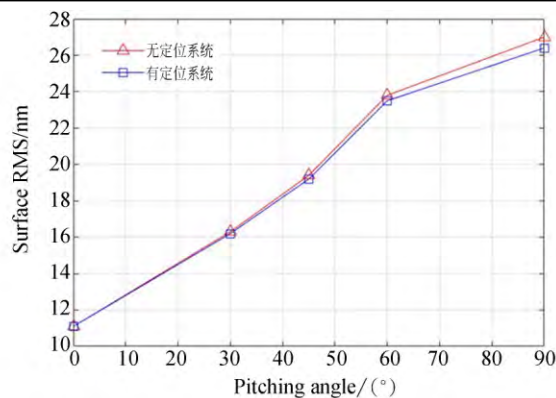
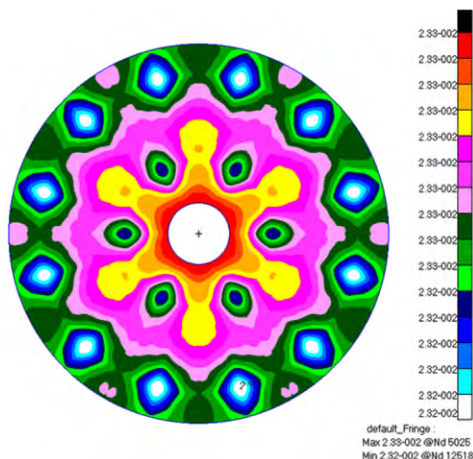
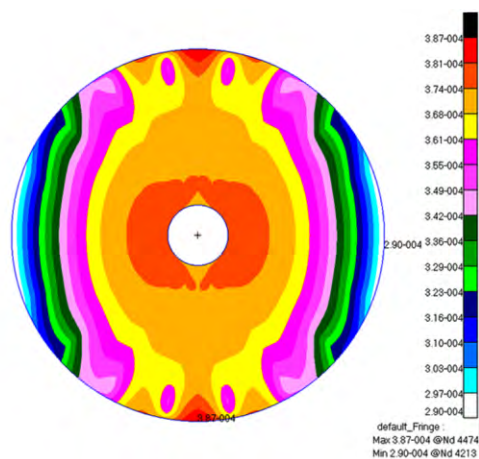


图 12 主镜在不同俯仰角下的镜面面形 RMS 值

Fig. 12 RMS values of surface profile of primary mirror under different pitching angles

图 13 俯仰角 0° 时的主镜面形云图Fig. 13 Deformation of primary mirror surface profile with slope angle of 0° 图 14 俯仰角 90° 时的主镜面形云图Fig. 14 Deformation of primary mirror surface profile when angle of slope is 90°

分别为主镜俯仰角在 $0^\circ, 90^\circ$ 带有侧向定位系统情况下的主镜面形云图。计算结果表明,有侧向定位机构时主镜面形的 RMS 值稍有提高,影响率最大为 2.2%,不超过 5%,可认为定位机构对主镜面形精度有所提高,但并不明显,满足设计要求。

5 结 论

本文针对某 2 m 口径主镜提出了基于运动学原理的大口径主镜侧向定位方法,并设计了一

套主镜侧向定位系统方案。通过有限元分析计算,在侧向定位系统作用下,主镜光轴水平时,主镜沿 Y 轴方向平均位移 -355.863 nm ,绕 X 轴、Y 轴倾斜可以忽略;主镜组件系统的一阶谐振频率达到 13.6 Hz;侧向定位系统对主镜面形有较小程度的提高,设计满足要求。

该主镜侧向定位系统设计方案对 2 m 及以上口径的大口径望远镜主镜(包括轻量化镜、弯月镜等结构)的支撑和定位系统的设计具有较高的工程指导意义。

参考文献:

- [1] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 327-336.
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 327-336. (in Chinese)
- [2] 程景全. 天文望远镜原理和设计——射电、红外、光学、X 射线和 γ 射线望远镜[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
CHENG J Q. *Principles of Astronomical Telescope Design*[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2003. (in Chinese)
- [3] BELY P Y. *The Design and Construction of Large Optical Telescopes*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- [4] 赵宏超, 张景旭, 杨飞, 等. 30 m 望远镜三镜系统

- 运动学接口设计及分析[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0312003.
ZHAO H C, ZHANG J X, YANG F, *et al.*. Kinematic coupling design and analysis for 30 m telescope tertiary mirror system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0312003. (in Chinese)
- [5] KRABBENDAM V L. The large synoptic survey telescope concept design overview [J]. *SPIE*, 2008, 7012: 701205.
- [6] 陈晓丽, 王彬, 杨秉新. 大口径超轻型反射镜定位和支撑方案研究[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(3): 15-20.
CHEN X L, WANG B, YANG B X. Study of positioning and mounting scheme of large aperture ultra-light space reflector[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(3): 15-20. (in Chinese)

- [7] 杨飞, 张景旭. 大口径望远镜主镜中心定位机构研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(3): 032202.
YANG F, ZHANG J X. Central hub radial support of primary mirror in large aperture telescope[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(3): 032202. (in Chinese)
- [8] 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.
SHAO L, WU X X, CHEN B G, *et al.*. Passive support system of light-weighted SiC primary mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1380-1386. (in Chinese)
- [9] 王富国, 杨洪波, 赵文兴, 等. 1.2 m SiC 主镜轻量化设计与分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 85-91.
WANG F G, YANG H B, ZHAO W X, *et al.*. Lightweight design and analysis of a 1.2 m SiC primary mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 85-91. (in Chinese)
- [10] 申永胜. 机械原理教程[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
SHEN Y SH. *Theory of Machines and Mechanisms*[M]. 2nd ed.. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [11] YODER JR P R. *Opto-Mechanical Systems Design*[M]. 3rd ed.. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [12] 范磊. 2 m 级地基望远镜 SiC 主镜轻量化设计及支撑技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2013.
FAN L. *Research on the Lightweight Design and Support of the 2m-SiC Primary Mirror for Ground-Based Telescope*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [13] 闫勇, 王栋, 金光. 大口径 SiC 反射镜组件研制技术[J]. 光电工程, 2010, 37(6): 108-112.
YAN Y, WANG D, JIN G. Design and fabrication technology of large aperture SiC mirror assembly[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(6): 108-112. (in Chinese)

作者简介:



原 帅(1991—),男,河南林州人,2014 年于华中科技大学获得学士学位,主要从事地基大口径望远镜主镜支撑系统的结构设计和分析。E-mail: yuansam@foxmail.com

通讯作者:



王富国(1979—),男,山东单县人,博士,研究员,硕士生导师,主要研究方向为大型望远镜光机系统的设计与仿真。E-mail: wfg109@163.com