主镜半主动支撑的力矩校正方法研究

刘祥意,王富国*,张景旭,范 磊,王文攀

(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:主镜支撑技术一直是大口径望远镜技术的关键技术,以 2 m SiC 轻量化主镜为研究对象,探究了通过力矩校正的半主动支撑方法,用于校正一些由于加工误差、装配误差等因素引起的一些不可预知的因素所导致的低阶波前像差。首先建立有限元仿真模型,进行仿真分析,分别在 6 处 Tripod 柔铰处施加两个方向正交的,大小为 1 Nmm 的单位校正力 *Mx* 和 *My*,共分析 12 种工况下的主镜变形情况;然后利用微小变形的线性叠加原理,分析计算该力矩校正方法对低阶波前像差的校正能力,由分析计算可知,该力矩校正方法对于加工、装配及装调过程中最常出现的倾斜和像散具有很好的校正能力,可以将初始镜面 RMS 值归一化为 1/10λ(λ=632.8 nm)的像差,分别校正到 0.687 nm 和 2.97 nm,校正能力分别为 98.9%和 95.3%,所需的最大校正力矩分别为 6.3 Nmm 和 19.9 Nmm;然后根据主镜的 whiffletree 支撑结构,设计了力矩校正结构方案;最后通过试验验证柔性薄片力矩校正结构形式的可行性,进而验证半主动支撑力矩校正方案的可行性,为半主动支撑的工程应用积累了一定的宝贵经验,具有一定的指导意义。

关键词:SiC; 主镜支撑; 力矩校正; 半主动

中图分类号:TH743 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0518003

Study on moment correction method of primary mirror semi-active support

Liu Xiangyi, Wang Fuguo*, Zhang Jingxu, Fan Lei, Wang Wenpan

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

Abstract: In the development of large ground-based telescope technology, the primary mirror support technology is always a key technology. In this paper, a semi-active support method was researched based on a 2 m SiC lightweight primary mirror, which was used to correct some unpredictable low-order wavefront aberration caused by machining error, assembly error and other factors. Firstly, the finite element simulation model was established, and the finite element simulation was carried out. An unit correction moment (1 Nmm) of *Mx* or *My*, which were two orthogonal moments, was separately applied to the 6 Tripod soft hinge, so the primary mirror deformations under a total of 12 cases of the situation were respectively analyzed. And then with the linear superposition principle of small deformation, the correction ability of the moment correction method for low order wavefront aberration was analyzed and

收稿日期:2018-12-09; **修订日期**:2019-01-20

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(11403023)

作者简介:刘祥意(1987-),男,助理研究员,博士,主要从事地基大口径望远镜的主镜支撑设计及仿真分析方面的研究。

Email: liuxiangyi107@163.com

calculated. It could be seen from the analysis that the moment correction method could correct the tilt and astigmatism very well. The initial mirror RMS value of the tilt and initial astigmatism which were normalized to 1/10λ (λ=632.8 nm), could be respectively corrected to 0.687 nm and 2.97 nm, the correction abilities were respectively 98.9% and 95.3%, and the required maximum correction moments were respectively 6.3 Nmm and 19.9 Nmm. Then, according to the whiffletree support structure of the primary mirror, a structure of the moment correction was designed with the leaf spring at the Tripod soft hinge. Finally, the feasibility of the leaf spring correction structure was verified through experiments, and the feasibility of the semi-active support scheme of moment correction was verified further. And a certain degree of engineering experience for the implementation of the moment correction method has been accumulated with high guiding significance.

Key words: SiC; primary mirror support; moment correction; semi-active

0 引 言

望远镜主镜作为望远镜系统中最关键,也是口径最大的光学元件,其支撑技术一直是地基大口径望远技术发展的核心解决问题之一[1-3]。对于小口径的主镜(1 m 口径以下)一般采用柔性的被动支撑形式[4-5],而对于 4 m 级以上的主镜一般采用主镜支撑的形式,如望远镜主镜口径为 4.2 m 的 SOAR 采用 120 点支撑形式的步进电机加螺母丝杠的主动支撑[6-7],望远镜主镜口径为 3.7 m 的 AEOS 采用 84 点支撑形式的液压主动支撑[8]、望远镜主镜口径为 4 m 的 VISTA 采用 81 点支撑的气压主动支撑[9-10]。主动支撑相对于被动支撑可以更好地解决主镜由于地球引力引起的重力变形,由于温度变化引起的热变形,由于光学加工误差导致的加工变形等低阶面形误差,但被动支撑相对于主镜支撑具有结构简单可靠、成本低、不需要复杂的控制系统等优点[11]。

对于主镜口径相对较大的望远镜,即口径为 2 m 左右的主镜,如果采用主动支撑,往往会增加望远镜制造成本,增加望远镜系统的复杂程度,而如果采用被动支撑的形式,往往由于加工误差,装配误差等因素的影响,很难达到预期的支撑效果,所以为了解决这一矛盾,可以采用半主动支撑的力矩校正方式。该支撑方式是参考 30 mTMT 拼接子镜的加工及微调机构[12-13],在传统的 whiffletree 被动支撑基础上,通过在 whiffletree 支撑末端的关节处施加校正力矩,实现各组支撑力的大小调节,从而间接实现对主镜低阶波前像差的校正。

文中以 2 mSiC 轻量化主镜的 whiffletree 被动支撑结构为研究对象,分别通过仿真分析和实验研究探索半主动支撑方式的支撑效果。

1 半主动支撑校正原理

半主动支撑校正原理如图 1 所示,通过在 whiffletree 结构分支上的平衡转动枢纽处施加力矩,打破了该处的平衡状态,使得该 whiffletree 分支上的主镜支撑力的大小得到调整,从而实现对主镜镜面面形的校正。

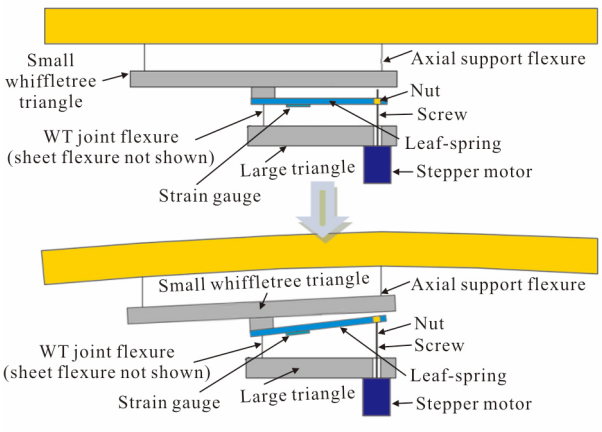


图 1 力矩校正原理图

Fig.1 Schematic of moment correction

文中以 2 mSiC 轻量化主镜为研究对象,其底支撑采用 18 点 whiffletree 支撑形式,支撑点的位置分布如图 2 所示,共分为三组 whiffletree,每组 6个

支撑点。主镜的半主动支撑的实施方法：在每个 Tripod 柔铰处施加两个方向正交的校正力矩，如图 2 所示。通过改变校正力矩的大小，改变 Tripod 上三个支撑力大小，从而实现对主镜低阶波前像差的校正。

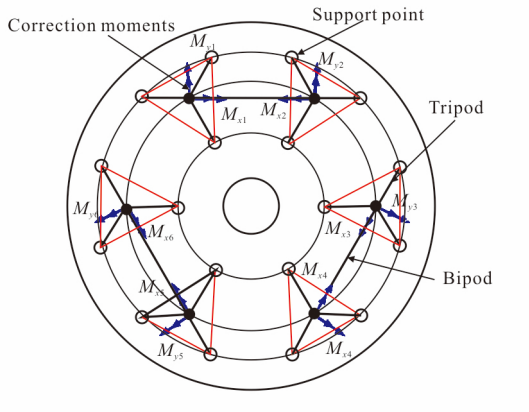


图 2 2 m SiC 轻量化主镜支撑方案简图

Fig.2 Support program diagram of 2 m SiC lightweight primary mirror

2 有限元仿真分析

2.1 有限元模型的建立及分析

利用 Patran 建立有限元分析模型，根据 2 m SiC 主镜的轻量化结构形式及特点和支撑结构的形式及特点，在建立有限元过程中，主镜采用壳单元，支撑结构采用梁单元，有限元模型如图 3 所示。

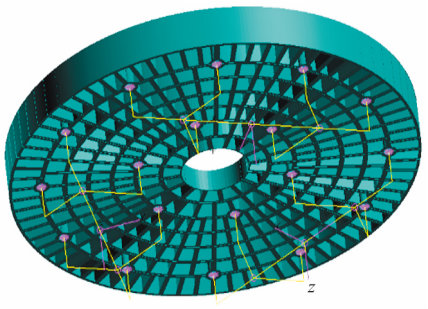


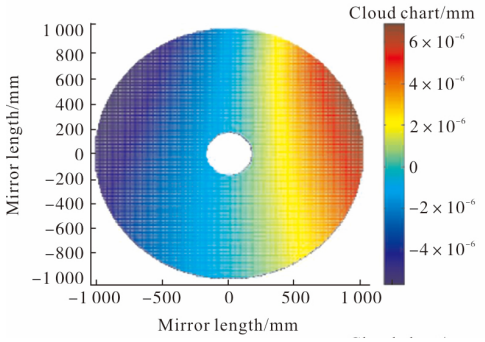
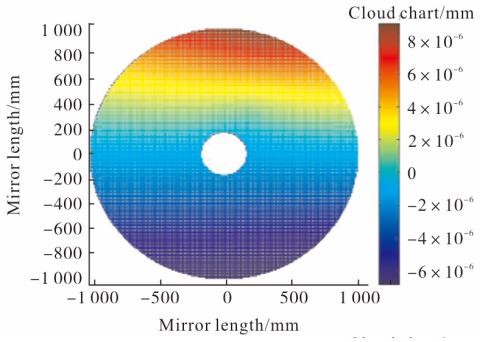
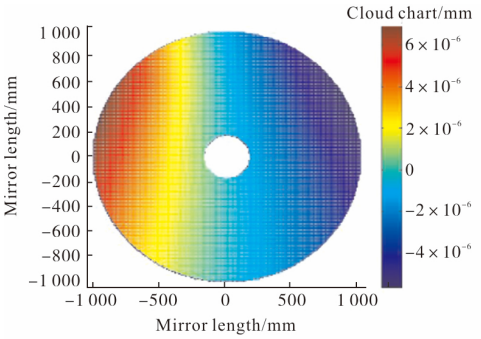
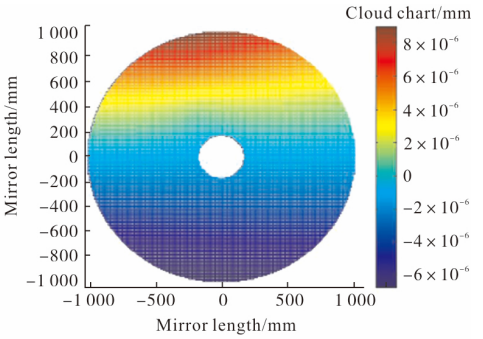
图 3 有限元分析模型

Fig.3 Finite element analysis model

为了便于力矩的施加，在 whiffletree 结构中三个 Bipod 中心处建立局部坐标系，分别在 6 处 Tripod 柔铰处，根据局部坐标系，施加两个方向正交的单位校正力矩 *Mx* 和 *My*，大小为 1 Nmm，共 12种工况[14]，通过有限元的分析计算分别得到的主镜变形云图如表 1 所示，其对应的镜面变形的 PV 值与 RMS 值如表 2 所示。

表 1 校正力矩对应的面形云图

Tab.1 Correction moment vs the mirror surface cloud

*Mx*1(left)*My*1(right)		
*Mx*2(left)*My*2(right)		

续表 1
Continued Tab.1

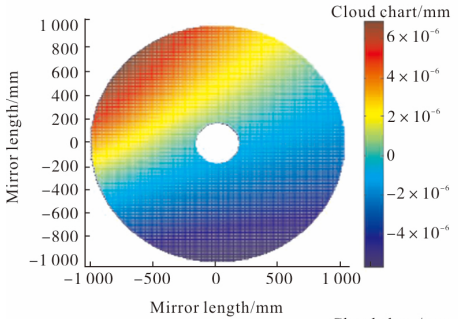
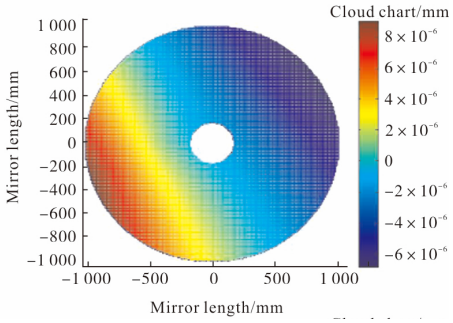
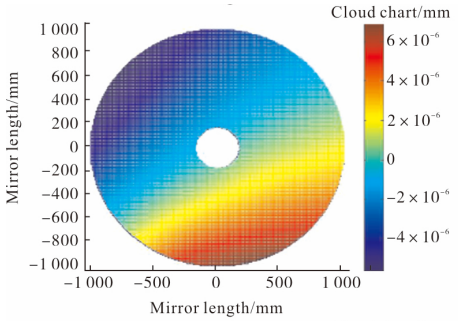
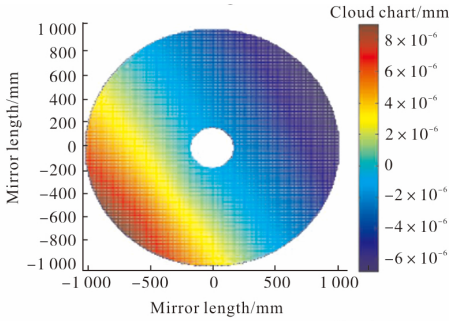
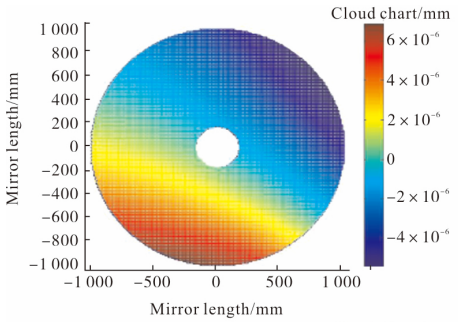
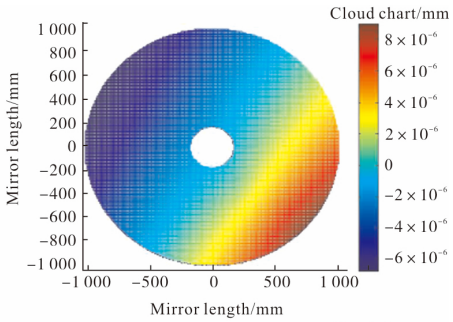
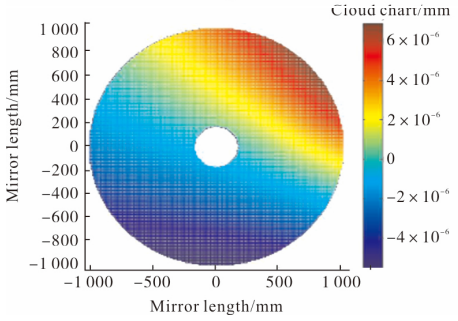
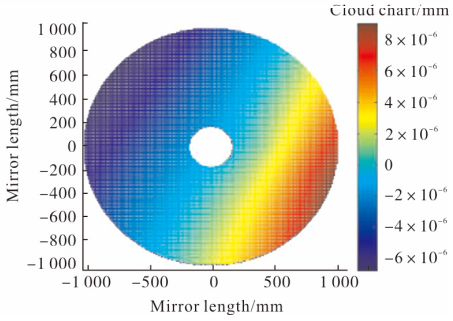
*Mx*3(left)*My*3(right)		
*Mx*4(left)*My*4(right)		
*Mx*5(left)*My*5(right)		
*Mx*6(left)*My*6(right)		

表 2 不同工况下对应的镜面面形误差

Tab.2 Mirror wavefront aberration in different working conditions

Position of *Mx* corrected torque	PV/nm	RMS/nm	Position of *My* corrected torque	PV/nm	RMS/nm
1	2.953	0.573	1	2.883	0.490
2	2.957	0.572	2	2.890	0.491
3	2.964	0.572	3	2.886	0.490
4	2.962	0.572	4	2.884	0.491
5	2.961	0.572	5	2.877	0.491
6	2.958	0.573	6	2.894	0.491

由支撑结构的旋转对称性，以及表 1 中 12 种工况所对应的主镜变形云图可知，6 处校正力矩所导致的镜面变形也具有旋转对称性，且在 6 处 Tripod 柔铰处，单位力矩 *Mx* 和 *My* 方向上的力矩导致的镜面面形误差大小基本一致，所对应的 PV 值和 RMS 值分别为 2.96、0.572、2.89、0.49 nm。

2.2 校正力矩估算

由实际的工程应用经验可知，由加工误差、装配误差等因素的影响所导致的镜面面形误差主要为低阶像散，所以校正力矩大小的估算以工程上常出现的低阶像散的校正力矩估算为例。考虑到校正力矩所导致的镜面变形为微小变形，利用变形的线性叠加原理，可以利用 12 种工况下的镜面变形去校正由于加工误差，装配误差等因素的影响所导致的镜面面形误差，其校正原理图如图 4 所示，其数学表达如公式(1)所示。

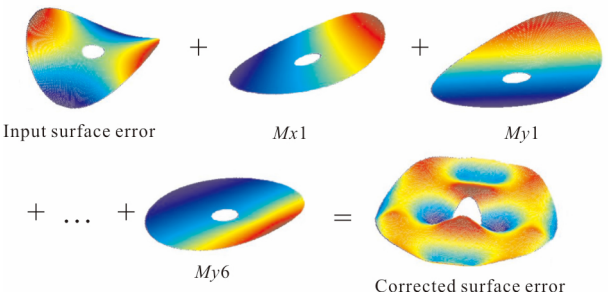


图 4 力矩校正估算原理简图

Fig.4 Principle diagram of moment correction

$$ds_{corr}=ds_0+\sum k_i ds_{Mi} \tag{1}$$

式中：ds_{corr} 为校正后的主镜镜面面形各节点的位移；ds_0 为主镜镜面的初始面形各节点位移；ds_{Mi} 为每个单位校正力矩所对应的主镜镜面面形各节点位移；k_i 为对应的拟合系数。

文中首先以初始镜面面形波前像差为像散力矩校正估算为例，将初始镜面面形的 RMS 值为归一化到 1/10λ(λ=632.8 nm)，其面形云图如图 5 所示。利用 12 种工况下的镜面变形校正归一化的标准 Zernike 一阶像散，得到的镜面面形云图如图 6 所示，其 RMS 值仅为 2.97 nm，校正能力达到 95.3%。由校正能力可以看出该力矩校正方法具有很好的校正像散的能力，表 3 为所需的各工况下所需的校正力矩的大小，其中所需的最大的校正力矩为 *My*6，大小为 20.1 Nmm。

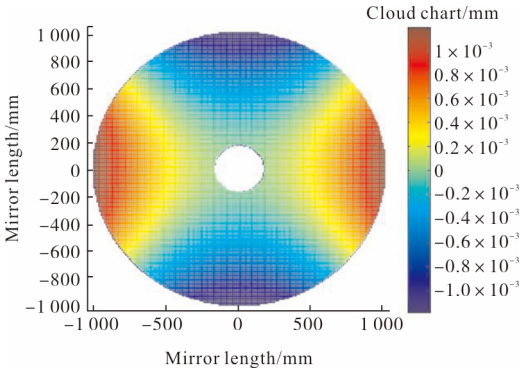


图 5 像散面形云图

Fig.5 Mirror surface cloud of astigmatism

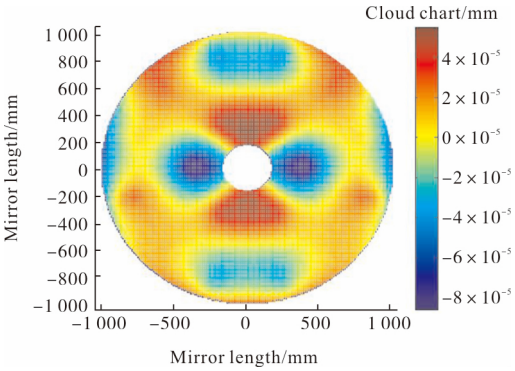


图 6 校正后的主镜面形云图

Fig.6 Mirror surface cloud after correction

表 3 各工况下所需的校正力矩大小

Tab.3 Required correction moment for each cases

Position of corrected torque	*Mx*/Nmm	*My*/Nmm
1	9.01	−14.14
2	9.36	−14.46
3	10.81	19.45
4	−17.95	−5.48
5	−19.61	−5.51
6	10.78	20.1

为了进一步研究该力矩校正方法的校正能力，分别对离焦、倾斜和初级彗差等低阶波前像差进行校正，得到各级像差校正能力如表 4 所示。从表 4 可以看出，该力矩校正方法可以很好地校正倾斜和像散，可以将初始镜面 RMS 值归一化为 1/10 的像差，分别校正到 0.687 nm 和 2.97 nm，校正能力分别能达到 98.9%和 95.3%，所需的最大校正力矩分别为

6.3 Nmm 和 19.9 Nmm；而对于离焦和彗差也具有一定的校正能力，将初始镜面 RMS 值归一化为 1/10 的像差，仅分别校正到 16.3 nm 和 21.5 nm，校正能力分别仅为 74.2%和 65.9%，其对应所需的最大校正力矩则分别为 33.7 Nmm 和 157 Nmm。

在实际工程应用中，一些由于加工误差、装配误差等因素引起的一些不可预知的因素所导致的低阶波前像差主要以离焦、倾斜、初级像散和初级彗初的耦合像差为主，可以根据公式(1)将该像差以该 12种工况下的镜面面形为基底进行最小二乘的拟合，根据拟合系数推算出 6 处 Tripod 柔铰处所需的校正力大小，进而有效的校正镜面面形。

表 4 各初级像差校正能力

Tab.4 Correction ability of initial aberrations

Aberration	Normalized RMS/nm	RMS after correction /nm	Correction ability	Maximum correction torque/Nmm
Tilt *X*	63.3	0.687	98.9%	6.30
Tilt *Y*	63.3	0.688	98.9%	6.31
Power	63.3	16.3	74.2%	33.7
Astig *X*	63.3	2.97	95.3%	20.1
Astig *Y*	63.3	2.97	95.3%	19.7
Coma *X*	63.3	21.6	65.8%	158
Coma *Y*	63.3	21.5	66.0%	157

2.3 校正力矩施加方法

由于机械结构尺寸和空间的限制，直接在 Tripod 柔铰处施加校正力矩很难实现，所以需要通过类似板簧的柔性薄片的悬臂梁结构间接实现，其结构如图 7 中的右下角的柔性薄片所示。由材料力学可知，悬臂梁的挠度与施加力的大小成正比，如公式(2)所示[15]。利用位移与力的正比关系，可以通过步进电机配合精密丝杠在柔性薄片的悬臂端输入位移，以达到在 Tripod 柔铰处输入线性变化力矩的目的。由力的传递可知，该方法在 Tripod 柔铰处除了输入力矩，还会引入额外的力 F，为了减少力 F 对 whiffletree 结构中 Bipod 的影响，可以通过增加柔性薄片的悬臂长度来实现，同时还可以增加力矩的分辨率。

$$w=\frac{Fl^3}{3EI} \tag{2}$$

式中：w 为挠度；F 为施加的力；l 为悬臂长度；EI 为弯曲刚度。

根据工程应用经验可知，最后需要校正的主镜的镜面低级像差一般不大于 1/10λ，所以力矩校正的半主动支撑至少需要具有校正 1/10λ 的像散的能力，调节精度为 2%，即要求 Tripod 柔铰处施加校力矩可达 20 Nmm，力矩的输入分辨率为 0.4 Nmm。为了减少额外引入力 F 的大小，提高校正力矩的分辨率，希望柔性薄片具有较长的悬臂长度，但由于支撑结构的实际空间结构的限制，单纯的增加悬臂的长度很难实现，故通过将柔性薄片设计成镂空结构以增加有效的悬臂长度。最终设计的悬臂有效长度为 250 mm，校正力矩效果试验方案的三维模型如图 7 所示。

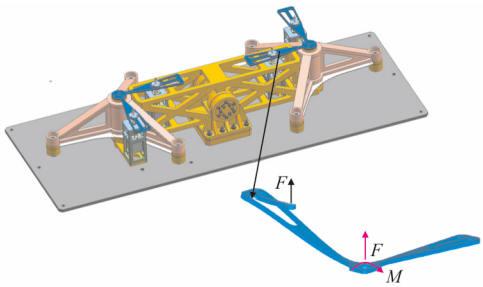


图 7 校正力矩试验模型

Fig.7 Test model of correction moment

根据力矩的分辨率 0.4 Nmm 和有效力臂长度 250 mm，确定对应力大小为 1.6×10^{-3} N。通过柔性薄片有限元的静力学仿真分析可知，1.6×10^{-3} N 的力所对应位移为 0.063 mm，如图 8 所示。悬臂端理论的行程范围为±3.15 mm。设计的柔性薄片施加力矩的机构中，丝杠的导程为 2 mm，步进电机驱动细分为 3 200，以 50为一个控制单位，则柔性薄片悬臂端对应位移分辨率为 0.0312 5 mm，且设计行程为±4 mm，满足设计要求。

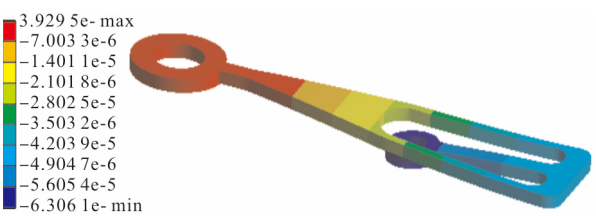


图 8 柔性薄片有限元分析结果

Fig.8 Finite element analysis result of leaf spring

3 试验验证

根据现有实验室条件，首先搭建半主动支撑的力矩校正的初步试验平台，以验证力矩校正的情况下 whiffletree 支撑点支撑力的变化情况，试验平台如图 9 所示。试验平台的组成主要包括基板、Loadcell(力传感器)、Loadcell 采集显示器、步进电机、步进电机控制器、步进电机驱动、一组 whiffletree 支撑(其中包括一个 Bipod，两个 Tripod，六个柔性支撑杆等)、柔性薄片、联轴器、消隙螺母和丝杠等。

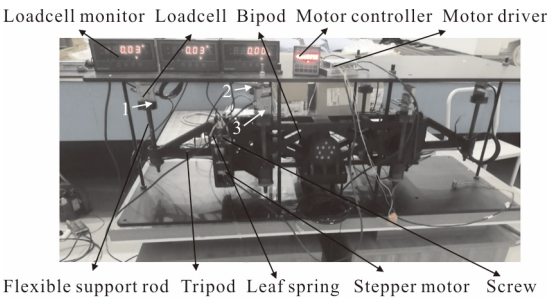


图 9 校正力矩试验平台

Fig.9 Correction moment test platform

利用搭建的试验平台，通过柔性薄片分别在 Tripod 柔铰处施加 *Mx* 和 *My* 两个方向力矩，测量 Tripod 上三个支撑力的大小变化，*Mx* 和 *My* 力矩的施加通过控制步进电机，转动丝杠实现，力矩的大小通过改变柔性薄片悬臂端的位移实现。图 10、11 分别为施加 *Mx* 和 *My* 条件下 Tripod 上三个支撑力大小随柔性薄片悬臂端位移变化的曲线，其中 LC1、LC2 和 LC3 分别为图 9 所示 1~3 所对应的 Loadcell 的测量数值，从图中的变化曲线可以看出，支撑力的大小变化与位移的变化呈线性关系。

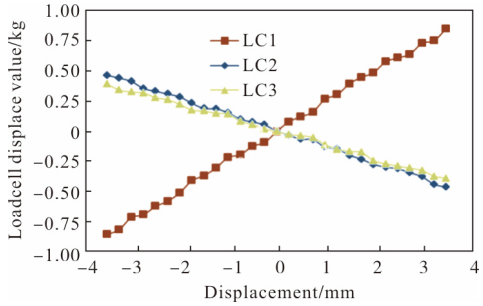


图 10 施加 *Mx* 力矩条件下各支撑力大小变化曲线

Fig.10 Variation curve of each support force under *Mx* moment

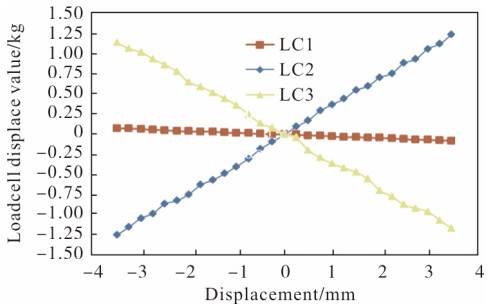


图 11 施加 *My* 力矩条件下各支撑力大小变化曲线

Fig.11 Variation curve of each support force under *My* moment

根据以上试验结果，进而可以推断，基于力矩校正的该半主动支撑方法，在力矩校正面形过程中，各支撑点的支撑力大小的变化具有很好的线性度，根据主动光学的校正原理可知，力矩校正的半主动支撑方法可以实现对镜面像差的校正。

4 结 论

文中以 2 m SiC 轻量化主镜为研究对象，探索研究了一种通过力矩校正的半主动支撑方法。首先通过有限元仿真分析，分别分析了在 6 处 Tripod 柔铰处施加两个方向正交的单位校正力矩 *Mx* 和 *My*，大小为 1 Nmm，共 12 种工况情况下的主镜变形情况；然后利用微小变形的线性叠加原理，分析计算该力矩校正方法对低阶波前像差的校正能力，由分析计算可知，该力矩校正方法可以很好地校正倾斜和像散，可以将初始镜面 RMS 值归一化为 1/10λ(λ=632.8 nm)的像差，分别校正到 0.687 nm 和 2.97 nm，校正能力分别为 98.9%和 95.3%，对应所需的最大校正力矩分别为 6.3 Nmm 和 19.9 Nmm；然后根据主镜的 whiffletree 支撑结构，设计了利用柔性薄片在 Tripod 柔铰处施加力矩校正的机械结构；最后通过试验初步验证了柔性薄片力矩校正结构形式的可行性，以及力矩校正的半主动支撑方案的可行性，为将来在真正的 2 mSiC 轻量化主镜上进行试验验证积累了一定的经验。

基于力矩校正的半主动支撑方案可以有效地校正一些由于加工误差、装配误差等因素引起的一些不可预知的因素所导致的低阶波前像差，尤其是倾斜和像散这种最常出现的低阶波前像差，从而降低相应支撑系统设计与装调的费用、提高装调的效率，在较大口径的望远镜主镜支撑方案中具有较高的工

程应用价值。

参考文献：

[1] Zhang Jingxu. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes [J]. ***Chinese Optics***, 2012, 4(5) :327-328. (in Chinese)
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, 4(5): 327-328.

[2] Bely P. The Design and Construction of Large Optical Telescopes[M]. New York: Springer, 2003.

[3] Cheng Jingquan. Principles of Astronomical telescope Design[M]. Beijing: China Science& Technology Press, 2003. (in Chinese)
程景全. 天文望远镜原理和设计 [M]. **北京: 中国科学技术出版社**, 2003.

[4] Wang Fuguo, Wu Xiaoxia, Shao Liang, et al. Review of foreign ground-based telescope primary mirror support [J]. ***Laser & Infrared***, 2012, 42(3): 237-243. (in Chinese)
王富国, 吴小霞, 邵亮, 等. 国外大型地基望远镜主镜支撑综述[J]. **激光与红外**, 2012, 42(3): 237-243.

[5] Shao Liang, Wu Xiaoxia, Chen Baogang, et al. Passive support system of light-weighted SiC primary mirror [J]. ***Opt Precision Eng***, 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.

[6] Neufeld C, Sarnik A, Sebring T A, et al. Development of an active optical system for the SOAR telescope[C]// SPIE, 2004, 5489:1052-1060.

[7] Krabbendam V L, Ruthven G P, Bennett V P, et al. Active optical system design for the 4.2 m SOAR telescope[C]// Astronomical Telescopes and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2000: 122-135.

[8] Kimbrell J E, Greenwald D. AEOS 3.67 m telescope primary mirror active control system [C]//SPIE, 1998, 3352(4): 506-507.

[9] Bennett R J. Active mirror support using pneumatic actuators[C]//SPIE, 2004, 5497: 91-102.

[10] Stobie B, Jeffers P, Stewart M, et al. VISTA M1 support system[C]//SPIE, 2010, 7733: 77332P.

[11] Kärcher H J. Mechanical principles of large mirror supports[C]//SPIE, 2010, 7733: 82.

[12] Ponslet E, Dan B, Cho M, et al. Development of the primary mirror segment support assemblies for the Thirty Meter Telescope[C]//SPIE, 2006, 6273: 627319.

[13] Lemared S, Hugot E, Challita Z, et al. Smart warping harnesses for active mirrors and stress polishing [C]// SPIE, 2016, 9912: 991267.

[14] Wu Xiaoxia, Wang Minghao, Ming Ming, et al. Calibration of thermal distortion for large aperture SiC lightweight mirror [J]. ***Opt Precision Eng***, 2012, 20(6): 1244. (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): 1244.

[15] Liu Hongwen. Advanced Mechanics of Materials [M]. Beijing: Higher Eduction Press, 1985. (in Chinese)
刘鸿文. 高等材料力学[M]. **北京: 高等教育出版社**, 1985.