文章编号　1004-924X(2017)10-2591-08

2 m SiC 反射镜柔性被动支撑系统

王富国*，乔　兵，张景旭
（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 2 m SiC 反射镜在地基望远镜中的应用，结合 SiC 反射镜热膨胀系数大、重量轻的特点，设计了柔性被动支撑系统。该系统底支撑 whiffletree 结构中的支撑杆采用柔性细杆，侧支撑杆采用柔性铰链结构，从而使底支撑系统和侧支撑系统分别起支撑作用，不但保证了主镜良好的位置误差和形状误差还很好地消除了装配应力和热应力。对在支撑系统作用下反射镜进行了静力学分析、热力学分析和模态分析，并通过面形检测和主镜倾斜与平移检测验证了分析结果。检测显示：反射镜面形(RMS)达到 λ/40（光轴竖直）和 λ/16（光轴水平），主镜指向不同俯仰角时最大倾斜变化量为 8″，偏心为 0.070 7 mm，基本与分析结果吻合，达到了设计要求，表明这种柔性支撑系统具有很好的工程应用能力。

关　键　词：SiC 反射镜；柔性；被动支撑系统；whiffletree；A-frame
中图分类号：TH743；TH703　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20172510.2591

Flexible passive support system for 2 m SiC reflective mirror

WANG Fu-guo*, QIAO Bing, ZHANG Jing-xu

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: wfg109@163.com*

Abstract: To apply SiC mirror in a ground-based telescope, a flexible passive support system was designed on its high thermal expansion coefficient and high rigidity. In this system, a thin and long flexible rod was used in the axial support whiffletree structure and a flexure joint rod wad used in the lateral support structure. By which, the axial support structure and the lateral support structure could support the system respectively. This structure not only allows the primary mirror to be a good position and a shape but also easily eliminate assemble stress and thermal stress. The static analysis, thermal analysis and modal analysis for the mirror were performed under the support system, and then the analytical results were verified by a surface test, mirror inclination test and a displacement test. The test result of the primary mirror shows that the surface error(RMS) is λ/40(the optical axis is vertical) and that (RMS) is λ/16 (the optical axis is horizontal), the maximum inclination change of the primary mirror at different pitch angles is 8 "and the displacement is 0.070 7 mm. The test results are basically consistent with the analysis results, meeting the design requirements. It shows that this

收稿日期：2017-04-28；**修订日期**：2017-06-06.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(No. 11403023)

flexible passive support system has good engineering feasibility.

Key words: SiC reflective mirror; flexible; passive support system; whiffletree; A-frame

1 引 言

随着国内大口径 SiC 反射镜制造能力的不断增强,大口径 SiC 反射镜以其接近净尺寸成型的轻量化能力开始在地基望远镜中得到应用,国内外众多学者开展了相关研究。国外用于红外观测的 HERSCHEL 空间望远镜口径为 3.5 m,质量为 210 kg,六点底支撑,面形 WFE 达到 5.3 μm。国内长春光机所邵亮针对 1.2 m SiC 反射镜进行了被动支撑的仿真分析,经实验验证,支撑系统引起的面形误差 RMS 小于 13 nm;郭万存针对某 2 mSiC 反射镜的主动支撑进行了优化设计,经主动校正其面形 RMS 达到了 19 nm;吴小霞设计了一款用于地基望远镜的 4 m 量级 SiC 反射镜,并开展了其主动支撑系统设计。目前,在大口径 SiC 反射镜的制造与应用方面国内已领先于国外[1-5]。

本文在国内外相关研究的基础上,针对某 2 m SiC 反射镜在地基望远镜中的应用,结合 SiC 反射镜热膨胀系数大、重量轻的特点,运用有限元分析和实验验证相结合的方法,开展了 SiC 反射镜柔性被动支撑系统的研究。

2 柔性支撑系统设计

柔性支撑系统一方面可以消除由于反射镜热膨胀系数大带来的影响;另一方面可以消除加工误差和装配应力带来的影响,使主镜室和支撑系统的变形不会传递到反射镜上。同时,柔性支撑系统必须满足反射镜自由度为零的条件,即反射镜既不过约束也不欠约束,其谐振频率并不会降低。柔性支撑系统设计的基本思想是:底支撑组件和侧支撑组件独立作用,底支撑仅卸载主镜的轴向重力,侧支撑组件仅卸载侧向重力。底支撑约束主镜的 z 向平动(光轴方向为+Z 向)、x 向转动和 y 向转动,侧支撑约束主镜的 x 向平动、y 向平动和 z 向转动。支撑杆具有很强的轴向刚度,而其他方向的刚度比较弱。

2.1 底支撑系统设计

底支撑系统采用 18 点 whiffletree 支撑结构。相对于其他的 whiffletree 支撑结构,一方面,该结构的平衡梁和三角板等主要承力部件采用轻量化的全加工结构,可以有效地控制该机构的平衡点;另一方面,支撑杆采用细长杆,这种简单的细长杆按照经典的材料力学原理即可进行力学性能计算和强度校核,且易于进行有限元模拟分析。

经分析计算,外圈支撑力为 194.8 N,内圈支撑力为 154.2 N。经有限元分析得知,底支撑组件中支撑杆的柔性对温度影响比较敏感,柔性越大,由于温度变化对镜面面形造成的影响越小,因此在满足不失稳及一定安全性的前提下,支撑杆的柔性要尽量小。

望远镜在大范围调转时会产生一定的离心力作用在支撑杆上,望远镜的最大调转角速度是 10 (°)/s,支撑杆距离水平轴约 600 mm,因此对应的线速度是 0.1 m/s,离心力为:

$$F=\frac{MV^2}{R}. \tag{1}$$

根据式(1)可以求出作用在支撑杆上的离心力是 7 N。在已知支撑力和支撑杆长度的前提下,进行不同直径的强度校核(见表 1)。

表 1 柔性环节不同直径时的屈服压力

Tab.1 Yield pressures of flexure-hinge in different diameters

细长杆长度/mm	细长杆直径/mm	屈服时的压力/N
180	4.0	202.21
180	4.5	323.91
180	5.0	493.86
180	5.5	721.48
180	6.0	1021.9

从安全性、工艺性和加工性等方面考虑,支撑

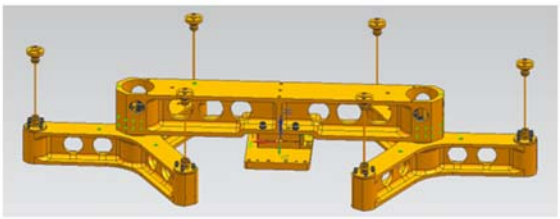

图 1 底支撑系统的结构图

Fig.1 Structure diagram of axial support system

杆的直径取为 4.5 mm，图 1 是底支撑系统的结构图。

2.2　侧支撑系统设计

对于大口径反射镜来说，侧支撑一般都是离散形式，A-frame 以及下文中的侧支撑形式，侧支撑点和侧支撑力都是离散的。当因侧支撑点数少而造成面形不符合要求和局部应力较大时，考虑增加侧支撑点数，SOFIA 采用的 A-frame 形式和 SOAR 采用的六个切向杆形式均来源于图 6 所示的最基本的柔性支撑形式[8]。因此基于这种思想，结合 SOFIA 和 SOAR 的侧支撑形式，这里提出了 6 个 A-frame 的侧支撑形式，拓扑形式如图 2 所示。

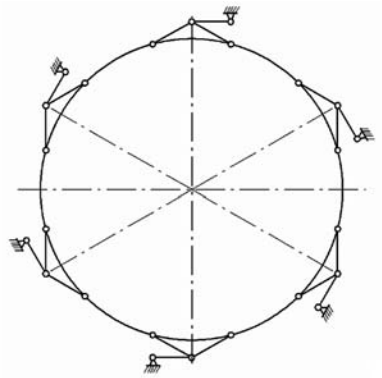

图 2　六 A-frame 侧支撑形式示意图

Fig. 2　Schematic diagram of lateral support system with six A-frames

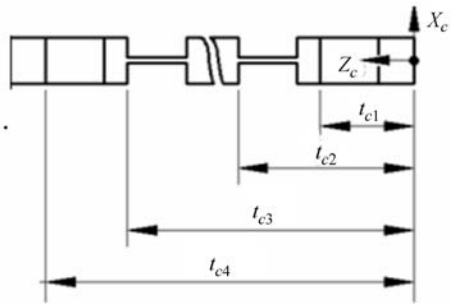

图 3　柔性铰链简化示意图

Fig. 3　Schematic diagram of flexure-hinge

为了减小温度变化产生的应力对镜面面形的影响，实现与底支撑系统的解耦，侧支撑系统的柔性铰链必须具有两个方向的柔性，且在轴向则是刚性的。为避免产生局部应力集中现象，柔性铰链常常设计成圆角形，由于柔性铰链部分的长度 $L \gg R$，所以这里使用矩形柔性铰链代替圆角形柔性铰链建模。

柔性铰链的柔度（刚度）是用来评价其性能的最重要的参数之一，所以复杂柔性铰链的柔度计算显得尤为重要。根据柔铰的功能可知，一个单轴柔铰必须在其输入力的方向具有较好的刚性，而在另外两个方向上的刚度则越小越好，以图 3 所示的柔性铰链为例。

首先建立单个柔性片的柔度矩阵。经简化，柔性杆的每一段可以视为一段等截面梁，以梁受力端为坐标原点建立坐标系，其柔度矩阵可表示为：

$$C_{\text{beam}}=\begin{bmatrix} \frac{l^3}{3EI_y} & & & & \frac{l^2}{2EI_y} & \\ & \frac{l^3}{3EI_x} & & -\frac{l^2}{2EI_x} & & \\ & & \frac{l}{EA} & & & \\ & -\frac{l^2}{2EI_x} & & \frac{l}{EI_x} & & \\ \frac{l^2}{2EI_y} & & & & \frac{l}{EI_y} & \\ & & & & & \frac{l}{GI} \end{bmatrix}. \tag{2}$$

单个柔性片柔度矩阵建立完成后，根据每个柔性片的方向和位置进行组合，最后得到整个柔性杆的柔度矩阵：

$$\begin{aligned}\mathbf{C}_c=&\mathbf{Ad}_g^{\mathrm{T}}(0,0,t_{c1},0,0,0)\mathbf{C}_{\text{beam}}(t,2r,l)\mathbf{Ad}_g(0,0,t_{c1},0,0,0)+\mathbf{Ad}_g^{\mathrm{T}}(0,0,t_{c2},0,0,0)\mathbf{C}_{\text{beam}}(2r,t,l)\mathbf{Ad}_g(0,0,t_{c2},0,0,0)+\mathbf{Ad}_g^{\mathrm{T}}(0,0,t_{c3},0,0,0)\\&\mathbf{C}_{\text{beam}}(2r,t,l)\mathbf{Ad}_g(0,0,t_{c3},0,0,0)+\mathbf{Ad}_g^{\mathrm{T}}(0,0,t_{c4},0,0,0)\mathbf{C}_{\text{beam}}(t,2r,l)\mathbf{Ad}_g(0,0,t_{c4},0,0,0),\end{aligned} \tag{3}$$

其中 $\mathbf{Ad}_g(x,y,z,\alpha,\beta,\gamma)$ 为伴随变换矩阵，表达式为：

$$\mathbf{Ad}_g=\begin{bmatrix}\mathbf{R} & \\ \mathbf{TR} & \mathbf{R}\end{bmatrix}, \tag{4}$$

式中：R 是 3×3 旋转矩阵，为原坐标系各轴单位方向向量在新坐标系下的坐标；$\mathbf{T}$ 是反对称移动矩阵，为原坐标系原点在新坐标系下的坐标。在这组柔性杆的轴线交点处建立总体坐标系，其总柔度矩阵 $\mathbf{C}$ 为：

$$\mathbf{C}=\mathbf{Ad}_g^{\mathrm{T}}(0,0,t_z,0,0,0)\mathbf{C}_z\mathbf{Ad}_g(0,0,t_z,0,0,0)+\mathbf{Ad}_g^{\mathrm{T}}(0,0,t_c,0,\frac{\pi}{2},0)\mathbf{C}_c\mathbf{Ad}_g(0,0,t_c,0,\frac{\pi}{2},0). \tag{5}$$

柔度矩阵中，**C**(3,3)为沿镜面轴向方向的柔度，而 **C**(1,1)为侧向柔度，**C**(2,2)为两个柔性杆所在平面的法向柔度。反射镜沿径向方向的热膨胀是通过法向柔度消除的，因此优化目标为在其他方向柔度尽量低的情况下使法向柔度最大。设 f_1 为镜面轴向方向柔度与侧向柔度之和，f_2 为法向柔度，这是两个相互矛盾的目标。多目标优化时可以通过理想点法使各分目标尽可能接近各自的理想值。在设计可行空间中选取两个极限情况：轴向和侧向柔度之和取最低值 $f_{1\min}$ 和法向柔度取最高值 $f_{2\max}$，即两个分目标的理想点。优化目标函数设为：

$$f=\left(\frac{f_1-f_{1\min}}{f_{1\min}}\right)^2+\left(\frac{f_2-f_{2\max}}{f_{2\max}}\right)^2. \tag{6}$$

根据制造工艺和结构空间限制，增加以下几何尺寸约束：

$$\begin{cases}0.5\leqslant t\leqslant 2\\ 1\leqslant l\leqslant 5\\ 2\leqslant r\leqslant 6\end{cases}. \tag{7}$$

通过 Matlab 的序列二次规划算法对优化问题求解，可以得到最优解。最优解位于约束边界条件上，即目标函数在边界内无极值点。根据这种优化方法可以得到柔性铰链的结构参数，取整后铰链宽度为 1 mm，长度为 10 mm。按照优化结果设计侧支撑结构，如图 4 所示。

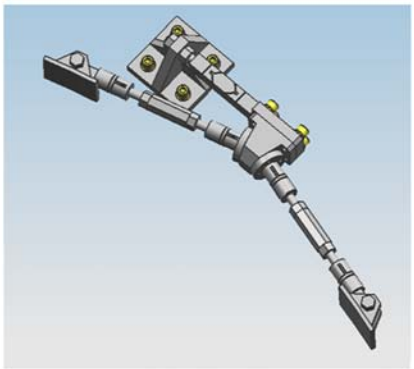

图 4　侧支撑结构图

Fig. 4　Structure diagram of lateral support

3　有限元分析

3.1　静力学分析

利用有限元软件建立主镜支撑系统的有限元模型，为了使计算结果更加准确，全部采用手工划分网格。主镜和主镜室属于壳体类零件，采用壳单元划分，其他零件则采用五面体和六面体的体单元划分，有限元模型如图 5 所示。

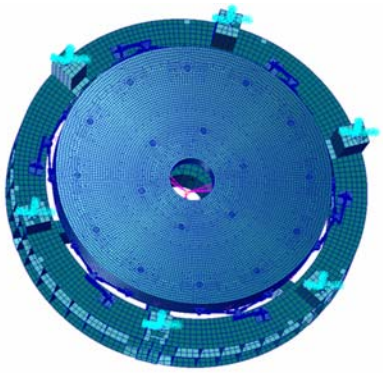

图 5　主镜支撑系统的有限元模型

Fig. 5　Finite Element Model(FEM) of primary mirror support system

约束主镜室与四通连接处的节点，在主镜光轴水平和主镜光轴竖直两种工况下，分别分析主镜在重力作用下的面形，结果如表 2 所示。图 6 为主镜光轴竖直时的变形云图，图 7 为主镜光轴水平时的变形云图。从分析结果看，主镜在支撑结构作用下的面形达到了设计要求。

表 2　主镜在重力作用下的面形误差

Tab. 2　Surface profile errors of primary mirror with gravity

	PV/nm	RMS/nm
主镜光轴竖直	72	14.0
主镜光轴水平	192	38.5

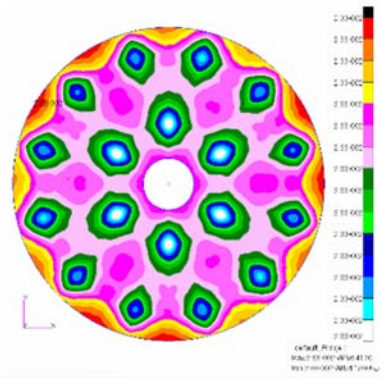

图 6　主镜光轴竖直时的面形云图

Fig. 6　Deformation of primary mirror surface profile when optical axis is vertical

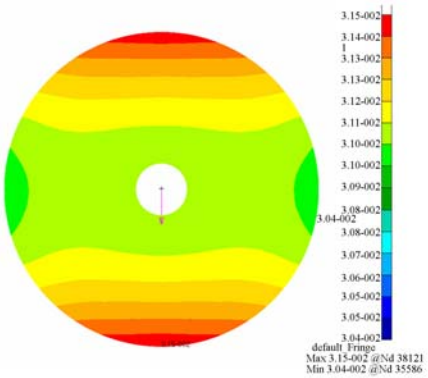

图 7　主镜光轴水平时的面形云图

Fig. 7　Deformation of primary mirror surface profile when optical axis is horizontal

利用该模型进行温度影响分析，分析主镜在 10 ℃温差时的镜面变形。分析结果表明在 10 ℃温差时，主镜面形的 RMS 变化量为 2.3 nm，说明由于支撑结构和主镜的热膨胀系数不相等带来的影响很小，在可接受的范围之内。

上述分析均是在主镜处于两个极限位置，即水平状态和竖直状态时的镜面面形情况；而望远镜实际工作时，这两个极限位置是不会出现的，大部分时间望远镜的指向在 30°～75°，因此需要分析主镜在一般状态下的面形情况。

为了清晰地表达望远镜的状态，需要定义一个坐标系，明确主镜在坐标系中的位置。坐标系采用直角坐标系，原点为主镜反射面的中心，光轴正方向为 Z 轴，主镜的一条半径为 X 方向，按照右手坐标系，确定 Y 轴的方向，实际上 Y 轴沿另一条半径，并且这两个半径相互垂直，如图 8 所示。

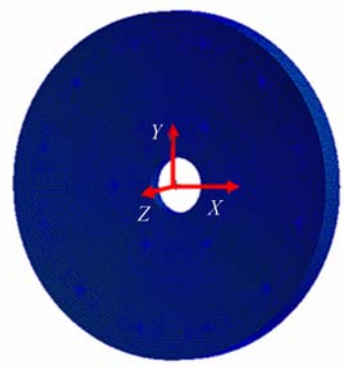

图 8　主镜在坐标系中的位置

Fig. 8　Position of primary mirror in coordinate system

按照图中的坐标系分析计算主镜指向不同仰角时的面形和刚体位移，分析结果如表 3 所示。

表 3　主镜指向不同仰角时的面形和刚体位移

Tab. 3　Surface profile errors and displacements of primary mirror in different pitch angles

Angle /(°)	PV /nm	RMS /nm	Average displacement		
			x/nm	y	z
0	52.1	11.6	0.17	0.098 nm	0.041 mm
15	88.7	14.7	0.21	0.020 mm	0.038 mm
30	121.3	20.8	0.26	0.039 mm	0.035 mm
45	145.9	27.0	0.29	0.055 mm	0.028 mm
60	161.6	32.1	0.29	0.067 mm	0.020 mm
75	166.8	35.3	0.27	0.075 mm	0.010 mm
90	168.9	36.4	0.23	0.078 mm	2.6 nm

从表 3 可以看出，主镜在光轴水平时的面形值误差大；光轴竖直时，镜面面形误差最小；其余俯仰角时，镜面面形误差均小于光轴水平时的面形误差。最大刚体位移发生在主镜光轴水平状态，也就是说侧支撑杆的柔性对主镜的刚体位移影响比较大。

3.2　热力学分析

一般情况下，温度变化带来的热载荷只引起较小的位移，但是却可以导致很大的应力，这种应力足可以破坏镜面面形，甚至会造成镜面本身的破裂，特别是对于大口径主镜，这种问题更加突出。

分析热变形影响时，一般不考虑重力作用。假设主镜在室温 20 ℃时的面形误差是理想值，则可以分析整个系统在 30 ℃的面形误差，相当于给反射镜及其支撑系统施加一个恒定的温度场。因为温度的影响是线性的，其他温差可以由此求出，按照这种思路求得 30 ℃时的主镜 PV＝19.2 nm，RMS＝1.78 nm。该值即为 10 ℃温差对面形误差的影响。从结果可以看出，支撑系统对面形影响不大，温度适应性也比较好。

3.3　模态分析

主镜支撑系统另一个重要的特征是谐振频率，谐振频率影响主镜的稳定性以及控制系统的精度。利用有限元模型分析主镜室组件的谐振频率，约束主镜室和四通连接处的 3 个节点，计算结果如表 4 所示。

表 4　主镜室组件的谐振频率

Tab. 4　Resonance frequencies of primary mirror cell assembly

阶数	1	2	3	4
频率/Hz	57.3	86.0	90.2	108.2

从表中可知，一阶谐振频率满足设计要求，其振型为一维平动。

4　实验验证

4.1　面形检测

主镜面形检测是衡量主镜支撑系统性能最重要的手段之一，检测装置如图 9 所示。主镜检测包括主镜垂直检测（光轴竖直）和水平检测（光轴水平），利用 4D 干涉仪和全息图（Computer-Generated Hologram，CGH）补偿器进行检测，干涉图如图 10 和图 11 所示。经检测，主镜在光轴竖直时的面形达到 RMS＝λ/40，在光轴竖直时 RMS＝λ/16。检测结果与分析结果基本吻合。

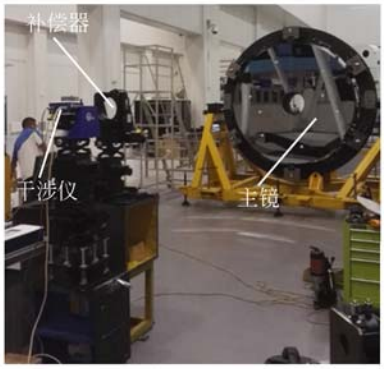

图 9　主镜水平检测装置图

Fig. 9　Photo of measurement setup of primary mirror surface when optical axis is horizontal

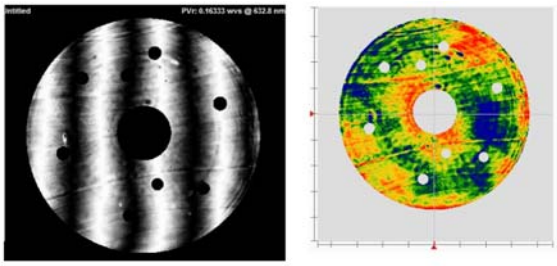

图 10　光轴竖直时主镜面形的检测结果

Fig. 10　Surface measuring result of primary mirror when optical axis is vertical

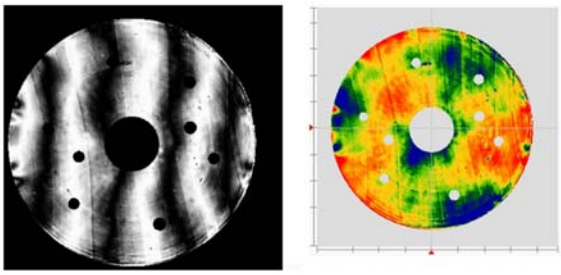

图 11　光轴水平时主镜面形的检测结果

Fig. 11　Surface measuring result of primary mirror when optical axis is horizontal

4.2　主镜倾斜与平移检测

为了达到良好的像质，除了保证主镜面形满足设计要求之外，还要求主镜的位置精度满足要求，即望远镜在俯仰过程中，主镜的倾斜和偏心误差必须满足要求，因此在主镜背部和侧面分别设置了不同的位移传感器，用来测量主镜光轴指向不同俯仰角时的主镜位置变化。位移传感器布局

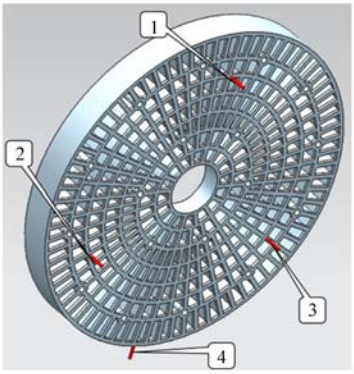

图 12　位移传感器布局图

Fig. 12　Layout of displacement sensors

表 4　不同俯仰角下各位移传感器的误差测量结果

Tab. 4　Measuring errors of displacement sensors in different pitch angles　(mm)

俯仰角/(°)	编号 1	编号 2	编号 3	编号 4
87	0.933 3	0.048 0	0.702 1	0.397 7
77	0.932 3	0.049 7	0.703 9	0.386 5
67	0.932 9	0.053 2	0.707 1	0.365 1
57	0.935 8	0.059 0	0.712 7	0.353 1
47	0.940 1	0.066 5	0.720 2	0.345 1
37	0.945 4	0.075 4	0.729 2	0.338 6
27	0.951 7	0.085 8	0.739 7	0.333 4
17	0.958 9	0.097 1	0.751 3	0.329 5
7	0.965 8	0.107 7	0.762 2	0.327 0
MAX-MIN	0.033 5	0.059 7	0.060 1	0.070 7

如图 12 所示，其中传感器 1，2，3 用来测量主镜的倾斜，传感器 4 用来测量主镜的偏心。当主镜指向不同俯仰角时，记录各个传感器的数值，如表 4 所示，然后根据各位移传感器之间的距离，计算主镜指向不同俯仰角时的最大倾斜变化量是 8″，偏心为 0.070 7 mm。

5 结　论

本文针对 2 m SiC 主镜设计了全柔性的 whiffletree 底支撑和 A-frame 侧支撑结构，该结构不但可以保证主镜良好的位置误差和形状误差，而且具有很好的温度适应性。检测结果表明，主镜的面形达到了 RMS＝λ/40（光轴竖直）和 RMS＝λ/16（光轴水平），主镜指向不同俯仰角时的最大倾斜变化量是 8″，偏心为 0.070 7 mm，检测结果基本与分析结果吻合，满足设计要求，说明这种柔性支撑系统具有很好的工程应用价值。

参考文献：

[1] 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.
SHAO L，YANG F，WANG F G，*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）

[2] 郭万存，吴清文，杨近松，等. 2 m 主镜主动支撑优化设计[J]. 红外与激光工程，2013，42(6)：1480-1484.
GUO W C，WU Q W，YANG J S，*et al.*. Optimum design of active supporting system for a 2 m primary mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*，2013，42(6)：1480-1484.（in Chinese）

[3] 李宗轩，金光，张雷，等. 3.5m 口径空间望远镜单块式主镜技术展望[J]. 中国光学，2014，7(4)：532-541.
LI Z X，JIN G，ZHANG L，*et al.*. Overview and outlook of monolithic primary mirror of spaceborne telescope with 3.5 m aperture[J]. *Chinese Optics*，2014，7(4)：532-541.（in Chinese）

[4] 吴小霞. 4 m SiC 主镜的轻量化及支撑技术[J]. 长春理工大学学报：自然科学版，2013，36(6)：10-14.
WU X X. Lightweight and support technology of a 4m SiC primary mirror[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology：Natural Science Edition*，2013，36(6)：10-14.（in Chinese）

[5] 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）

[6] 王富国，杨飞，张景旭. TMT 三镜被动支撑系统的概念设计[J]. 红外与激光工程，2013，42(5)：1269-1274.
WANG F G，YANG F，ZHANG J X. TMT tertiary mirror passive support system conceptual design[J]. *Infrared and Laser Engineering*，2013，42(5)：1269-1274.（in Chinese）

[7] 王富国，杨飞，赵宏超，等. TMT 望远镜三镜系统的研究进展[J]. 中国光学，2013，6(5)：643-651.
WANG F G，YANG F，ZHAO H CH，*et al.*. Progress in TMT M3 system[J]. *Chinese Optics*，2013，6(5)：643-651.（in Chinese）

[8] 吴小霞，郝亮，邵亮，等. 弯月薄镜的侧向支撑[J]. 光学 精密工程，2016，24(3)：553-559.
WU X X，HAO L，SHAO L，*et al.*. Lateral support of thin meniscus mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*，2016，24(3)：553-559.（in Chinese）

[9] WANG F G，AN Q C，YANG F. Evaluation of the mirror surface figure error based on the SlopeRMS[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*，2016，127(1)：39-42.

[10] FUGUO W，LINMIN Z，JIN X. Kinematic evalu-

ation of the whiffletree lateral support setup and its application for the mirror support of the TMT tertiary mirror[J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2015, 10: 15027.

[11] SEIN E, TOULEMONT Y, SAFA F, *et al.*. A Φ 3.5 m SiC telescope for HERSCHEL mission [J]. *SPIE*, 2003, 4850: 606-618.

[12] TOULEMONT Y, PASSVOGEL T, PILBRATT G L, *et al.*. The 3.5-m all-SiC telescope for HERSCHEL[J]. *SPIE*, 2004, 5487: 1119-1128.

作者简介：

王富国(1979－)，男，山东单县人，博士，研究员，博士生导师，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

张景旭(1964－)，男，吉林长春人，博士，研究员，博士生导师，主要从事大型望远镜结构总体技术的研究。E-mail：zhangjx@ciomp.ac.cn