第 41 卷 第 11 期/2021 年 6 月/光学学报 研究论文

光学学报

大口径 SiC 轻量化主镜的优化与有限元分析

王从敬[1,2]，王东[1,2]，黄鑫[1,2]，王晶[1*]

[1]中国科学院长春光学精密机械与物理研究所天基动态快速光学成像技术重点实验室，吉林 长春 130033；

[2]中国科学院大学材料科学与光电技术学院，北京 100049

摘要 为达到高度轻量化的目的，以口径为 1000 mm 光电经纬仪的扇型 SiC 轻量化主镜为研究对象。通过对主镜背部加强筋的厚度、背部半封闭型面板的厚度和主镜的总厚度进行优化，使主镜的体积和质量均减小。建立三维模型后，利用有限元软件 Abaqus 建立有限元模型，得到有限元仿真结果后对主镜进行变形分析。利用 Zernike 多项式对主镜变形数据进行拟合，得到主镜的面形误差方均根(RMS)值。仿真结果表明，在满足主镜面形精度设计要求的情况下，优化后主镜的质量为 62.78 kg，相比初始质量(89.36 kg)下降 30%，主镜的径厚比由 8.58 提高至 11.44。当光轴水平时，利用四维干涉仪对扇型轻量化主镜进行面形检测，主镜面形误差 RMS 值的检测结果为 18.22 nm。

关键词 光学设计；光电经纬仪；主反射镜；轻量化设计；有限元；Zernike 多项式

中图分类号 TH743 **文献标志码** A **doi**：10.3788/AOS202141.1122002

Optimization and Finite Element Analysis of Large-Aperture SiC Lightweight Primary Mirror

Wang Congjing[1,2], Wang Dong[1,2], Huang Xin[1,2], Wang Jing[1*]

[1] *Key Laboratory of Space-Based Dynamic & Rapid Optical Imaging Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*;

[2] *School of Material Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract In order to achieve a high degree of light weight, a sector-shaped SiC light-weight primary mirror of a 1000 mm photoelectric theodolite is taken as the research object and optimized design. By optimizing the thickness of the ribs on the back of the main mirror, the thickness of the semi-closed back panel and the total thickness of the main mirror, the volume and quality of the main mirror are reduced. After the three-dimensional model is established, the finite element model is established using the finite element software Abaqus, and the deformation analysis of the primary mirror is performed after the finite element simulation results are obtained. The Zernike polynomial is used to fit the deformation data of the primary mirror, and the root mean square (RMS) value of the surface error of the primary mirror is obtained. The simulation results show that the mass of the optimized main mirror is 62.78 kg, which is 30% lower than the initial mass (89.36 kg), and the diameter-to-thickness ratio of the main mirror is increased from 8.58 to 11.44 when the design requirements of the main mirror surface accuracy are met. When the optical axis is horizontal, a four-dimensional interferometer is used to detect the surface shape of the fan-shaped lightweight main mirror, and the detection result of the RMS value of the main mirror surface error is 18.22 nm.

Key words optical design; electro-optic theodolite; primary mirror; lightweight design; finite element; Zernike polynomial

OCIS codes 220.4830; 120.4570; 120.4640; 110.6770

收稿日期：2020-11-26；**修回日期**：2020-12-30；**录用日期**：2021-01-08

基金项目：中国科学院战略高技术创新基金(GORC-19-13)

* **E-mail**：wangjing@ciomp.an.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引 言

光电经纬仪在靶场光学测量设备中占有重要的地位，其能够实时测量目标的飞行情况并记录运动参数、飞行姿态和飞行动作。光电经纬仪具有电视、红外和激光的多种测量跟踪手段，可以将光学信息转换为数字信息，测量结果准确且不易受干扰。随着光电测量技术的发展，光电经纬仪在国防领域中的应用也更加广泛。其中主镜在光电经纬仪中占有重要的地位，其面形精度决定了成像质量的高低[1-2]。目前，科研人员对数据采集处理的要求越来越高，使得光电经纬仪朝着大口径、高精度和高分辨率的方向发展[3-5]。但大口径随之带来的是主镜面形精度的降低，成像质量更易受到自重、承载和温差的影响[6]，因此为了提高主反射镜的成像质量，有必要对主镜进行轻量化设计。国内学者对经纬仪的主镜及其支撑结构进行了大量研究，王忠善[7]利用 BP (Back Propagation)神经网络对天基大口径单体反射镜的结构参数进行了优化，并利用多学科优化软件 Isight、有限元处理软件 Patran 和面形处理软件 MATLAB 等建立一种高效且自动化的反射镜柔性支撑结构参数优化方法；范磊[8]在对 SiC 轻量化主镜进行设计的同时，综合考虑了主镜加工的实际过程，使用有限元模型对被动支撑结构和主动支撑结构的支撑效果分别进行了讨论；谢军[9]采用接触有限元法建立了更准确的主镜有限元分析模型，并采用拓扑优化方法实现了经纬仪跟踪架的大幅度轻量化设计；苏燕芹[10]采用有限元法对口径为 30 m 的 TMT(Thirty Meter Telescope)三镜系统中的组件结构进行了研究，使得三镜系统的性能达到 TMT 指标的要求。当对主镜的材料进行选择时，相比于传统的光学材料微晶玻璃，SiC 具有导热性好、比刚度大以及易于加工等优点，因此相比于微晶玻璃具有更好的性能以满足主镜轻量化设计的要求。目前，SiC 主镜轻量化孔的主要形状有扇型、三角型、圆型和蜂窝型，以及拓扑优化所形成的不规则孔。主镜的背部结构也有开放型、半封闭型和全封闭型，每种结构各有优缺点。

本文以口径为 1000 mm 光电经纬仪的扇型 SiC 轻量化主镜为研究对象，设计符合要求和工作特点的主镜支撑结构，并对主镜的轻量化结构进行优化。建立三维模型后，使用有限元软件建立轻量化主镜及支撑结构的有限元模型，接着对轻量化主镜在支撑结构作用下的重力变形进行分析，最后结合干涉仪的面形检测结果验证主镜及支撑结构满足工程需求。

2 基本参数与原理

2.1 主反射镜的参数

主镜材料为 SiC，材料的参数如表 1 所示[11]。该主镜为 1000 mm 有效通光口径的反射镜，轮廓直径为 1030 mm，中心孔直径为 170 mm，主镜的曲率半径为 3750 mm，边缘厚度为 120 mm。主镜加工后的面形误差方均根(RMS)不大于 $\lambda/40$，要求支撑后的主镜面形误差 RMS 不大于 $\lambda/30$ ($\lambda=632.8$ nm)。

表 1 SiC 的物理性质

Table 1 Physical properties of SiC

Density /(g·cm^{-3})	Elasticity modulus /GPa	Poisson ratio	Bending strength /MPa
3.05	392	0.25	100

2.2 Zernike 多项式拟合法

反射镜的面形误差指光学镜面的理想面形与实际面形之间的偏差，其为衡量反射镜成像质量的重要指标之一。目前，对于反射镜面形误差拟合的常用方法为 Zernike 拟合法，该方法首先通过有限元模型进行结构分析以得到主镜镜面上各节点的变形数据，然后利用 Zernike 多项式来拟合得到主镜面形值。在直角坐标系中，Zernike 多项式的表达形式为

$$Z=\sum_{i=1}^{n}C_i f_i(x,y), \tag{1}$$

式中：C_i 为 Zernike 多项式的第 i 个系数；$f_i(x,y)$ 为 Zernike 多项式在点(x,y)处第 i 个的基底函数。

现有 n 个节点，受力后第 i 个节点在 z 方向的畸变值用 $Z_i(x_i,y_i)$来表示，令

$$q_{ij}=f_j(x_i,y_i),$$
$$(i=1,2,\cdots,n,j=1,2,\cdots,m,n>m)。 \tag{2}$$

将(2)式代入(1)式，得到方程组

$$\begin{cases} q_{11}C_1+q_{12}C_2+\cdots+q_{1m}C_m=Z_1 \\ q_{21}C_1+q_{22}C_2+\cdots+q_{2m}C_m=Z_2 \\ \vdots \\ q_{n1}C_1+q_{n2}C_2+\cdots+q_{nm}C_m=Z_n \end{cases}。 \tag{3}$$

采用正交分解(QR)法对(3)式进行求解，可以求得 Zernike 多项式中的 m 个系数。本文使用前

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

36 项系数对主镜面形误差进行拟合。

3 主镜及支撑结构的有限元分析

3.1 主镜模型

轻量化孔的主要形状有三角型、四边型、六边型、圆型和扇型，以及拓扑优化所形成的不规则孔。不规则孔是由拓扑优化方法计算得到的，不具有普遍适用性，而且加工较为繁琐，一般带有中心孔的主镜轻量化孔通常选择扇型孔。轻量化主镜的背部结构有开放型、半封闭型和全封闭型。综合考虑各种结构的优缺点，主镜最终选用扇型轻量化孔，背部采用半封闭型结构。使用三维建模软件 UG 来创建反射镜的实体模型，可以同时得到模型的质心位置、质量和体积等几何量。扇型轻量化主镜的三维模型如图 1 所示。由于 SiC 轻量化主镜具有较好的性能，为了进一步减少主镜的质量，需要对主镜背部加强筋的厚度及主镜的总厚度进行优化。

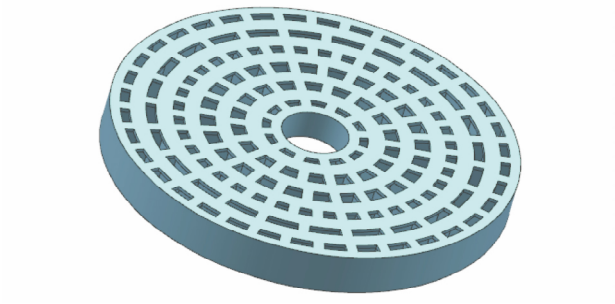

图 1 扇型轻量化主镜的三维模型示意图

Fig. 1 Three-dimensional model of fan-shaped lightweight primary mirror

3.2 主镜支撑方案

主反射镜的支撑结构是主镜成像质量最重要的影响因素之一，为了保证光电经纬仪在工作过程中的精度和系统的稳定性，需要合理地设计光电经纬仪的主镜支撑结构以减小主镜在工作过程中的受力变形，从而提高主镜的面形精度和成像质量。主镜支撑结构中起主要支撑作用的是轴向支撑和径向支撑[12]，支撑形式包括主动支撑和被动支撑两种[13]。由于主动支撑的制造成本较高，所需空间较大，多用于 2 m 以上的大口径经纬仪的主镜支撑，因此口径为 1 m 的主镜采用被动支撑的形式。由于浮动支撑的形式会使主镜在受力变形的过程中发生平移和倾斜，不会发生面形畸变，所以不会影响反射镜镜面的成像质量，因此主镜的支撑结构采用浮动支撑的形式。

轴向支撑采用传统的机械 Whiffletree 支撑[14]，机械 Whiffletree 支撑的定位原理是利用运动学轴向三点进行定位。使用三角摇板机构或等臂杠杆机构可以使轴向支撑点数目呈 2 倍或 3 倍的增长，一般最多扩展为 54 个支撑点。为了保证主镜的面形精度，需要计算轴向支撑的最少支撑点数，表达式为

$$N=\left(\frac{0.375D^2}{t}\right)\cdot\left(\frac{\rho g}{E\delta}\right)^{0.5},\tag{4}$$

式中：N 为最少支撑点数；D 为反射镜的直径；E 为材料的弹性模量；δ 为支撑后反射镜所允许的最大面形误差值；ρ 为材料的密度；t 为反射镜的总厚度；g 为重力加速度[15]。

经过计算可知，最少支撑点数为 7.27，由于底支撑的支撑点处会对主镜产生支撑力，因此支撑点处的主镜表面会发生“印透效应”。支撑点位于主镜加强筋的交汇处，此处的局部刚度最大，但是支撑点数目取决于局部印透的变形量，而不是主镜的镜面变形量。根据上述阐述，考虑机械 Whiffletree 支撑的特点以及 SiC 材料本身的硬脆性，支撑点数目扩展为 9，采用内外两圈（内圈 3 点，外圈 6 点）进行分布，轴向支撑的各支撑点均采用内径为 80 mm 和外径为 100 mm 的环形支撑垫。由于 SiC 材料本身具有硬脆性，使轴向支撑点分布在加强筋的交汇处可以提高主反射镜的支撑刚度，轴向支撑结构与支撑点分布如图 2 和图 3 所示。

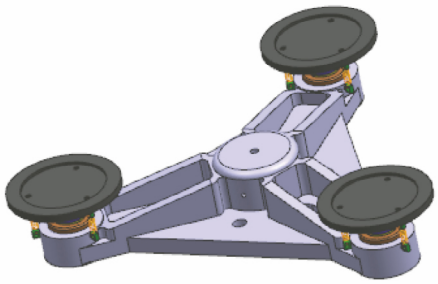

图 2 轴向支撑的模型

Fig. 2 Axial brace model

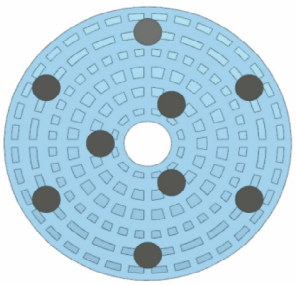

图 3 支撑点的分布示意图

Fig. 3 Distribution diagram of support points

对于口径为 1 m 的轻量化主镜，由于 SiC 材料具有很好的刚度，所以在中心孔处利用芯轴挑起进

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

行径向支撑，具体情况如图 4 和图 5 所示。

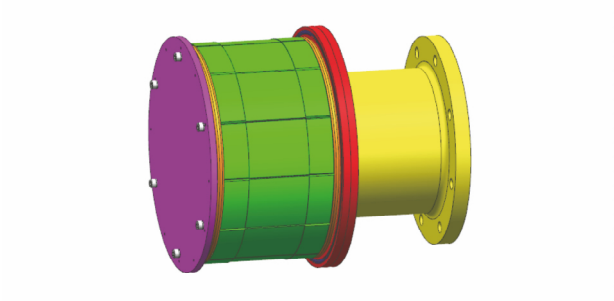

图 4 径向支撑的模型

Fig. 4 Radial brace model

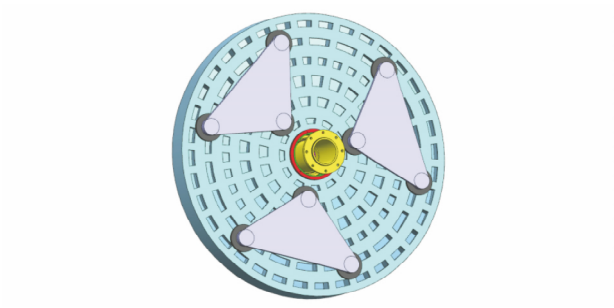

图 5 支撑结构的分布示意图

Fig. 5 Distribution diagram of support structures

3.3 有限元模型与仿真结果分析

在未对有限元分析结果产生影响的前提下，将三维模型进行简化后导入有限元分析软件中，从而建立有限元仿真模型。为了保证分析结果的精确性，需要改变网格密度并进行多次计算，直至分析结果趋于稳定，则表明计算结果达到收敛[16]。该有限元模型主要由主镜、轴向支撑、径向支撑和底板组成。对于直接与主镜接触的支撑结构，采用非线性接触的方法进行建模[17]。环形支撑垫与主镜之间采用摩擦接触。径向支撑利用芯轴进行中心支撑，对芯轴与主镜进行绑定约束。最后对主镜和支撑结构施加载荷和边界条件，载荷即为重力。由于主镜结构较为复杂，六面体网格划分会耗费大量的时间与精力，此时建议使用四面体网格。主镜室的有限元模型如图 6 所示。

在重力的作用下，当光轴指向天顶时，仅有轴向支撑对主镜产生作用。根据经验公式可知，轴向支撑点的内外圈初始优化半径分别为 $0.4227R$ 和 $0.8165R$，其中 R 为主镜的外轮廓半径。由计算可得，内外圈初始优化半径分别为217.69 mm和 420.49 mm，优化后内圈支撑点的半径为 170 mm，外圈支撑点的半径为 420 mm，此时扇型轻量化主镜的面形精度 RMS 值为 4.42 nm。经过理论分析可知，

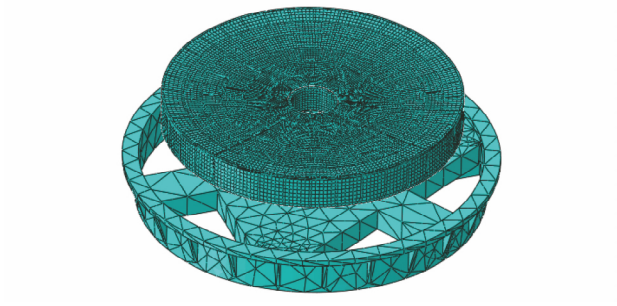

图 6 主镜室的有限元模型

Fig. 6 Finite element model of primary mirror chamber

光轴竖直的情况下，每个支撑点所受的力为 $G/9$（G 为主镜受到的重力），底支撑垫与主镜背部接触的最小面积占支撑垫总面积的 3/4，此时主镜的质量为 89.36 kg。经过计算可知，支撑垫上的最大应力为 0.0459 MPa，有限元分析结果表明主镜模型的最大应力点位于与支撑点位置相对应的主镜内部的加强筋上，应力最大值为 0.0652 MPa，远小于 SiC 材料的抗弯强度 100 MPa，所以主镜不会发生破损，主镜背部的应力云图如图 7 所示。

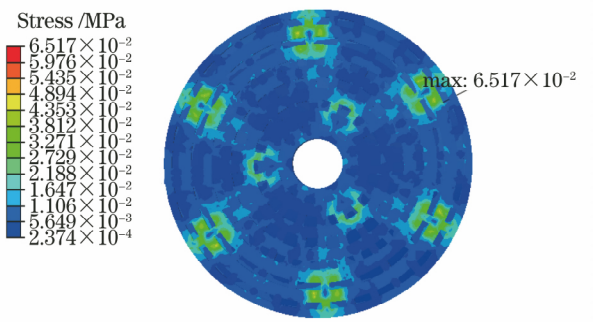

图 7 光轴竖直的应力云图

Fig. 7 Stress nephogram of optical axis vertical

当光轴倾斜 45°时，此时轴向支撑和径向支撑都会对主镜产生作用力，主镜的面形精度 RMS 值为 6.08 nm。主镜的最大应力点位于主镜背部中心孔附近的加强筋处，应力最大值为 0.0763 MPa，远小于 SiC 材料的抗弯强度 100 MPa，主镜面背部的应力云图如图 8 所示。

当光轴处于水平状态时，在径向支撑的作用下此时扇型轻量化主镜的面形精度 RMS 值为 6.88 nm。经过有限元分析，此时主镜的最大应力点在中心孔附近，最大应力值为 0.103 MPa，远小于 SiC 材料的抗弯强度 100 MPa，主镜面的应力云图如图 9 所示。

3.4 主镜的优化与仿真分析

首先对主镜背部的加强筋厚度进行优化，减小主镜背部的加强筋厚度，主镜背部半封闭型面板的

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

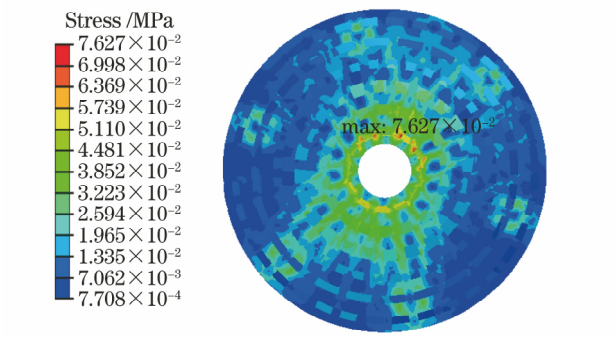

图 8 光轴为 45°的应力云图

Fig. 8 Stress nephogram with optical axis of 45°

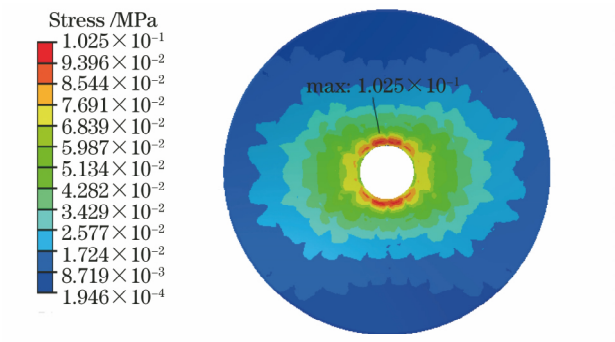

图 9 光轴水平的应力云图

Fig. 9 Stress nephogram of optical axis horizontal

厚度随之改变，从而得到不同结构参数的主镜模型。建立有限元模型，分析相同的支撑条件下不同结构参数的主镜面形误差，结果如表 2 所示，其中 t_1 为加强筋厚度，RMS 1 为光轴水平的主镜面形精度，RMS 2 为光轴倾斜 45°的主镜面形精度，RMS 3 为光轴竖直的主镜面形精度，m 为主镜的质量。

表 2 主镜在不同情况下的对比分析

Table 2 Comparative analysis of primary mirror in different situations

t_1 /mm	RMS 1 /nm	RMS 2 /nm	RMS 3 /nm	m /kg
8	6.88	6.08	4.42	89.36
6	7.11	6.21	4.72	75.38
4	7.71	6.74	5.32	60.66

从表 2 可以看到，当加强筋厚度由 8 mm 减小为 6 mm 时，主镜的面形精度略有下降；当加强筋的厚度变为 4 mm 时，主镜的面形精度下降幅度较大，考虑到后续还要对主镜的径厚比进行优化，因此加强筋的厚度选为 6 mm，此时主镜的总质量为 75.38 kg。

为了提高主镜的径厚比，需要对主镜的总厚度进行优化，主镜背部的加强筋厚度为 6 mm，主镜的初始总厚度为 120 mm。当总厚度不同时，主镜面形误差的分析结果如图 10 所示，其中 t 为主镜总厚度。

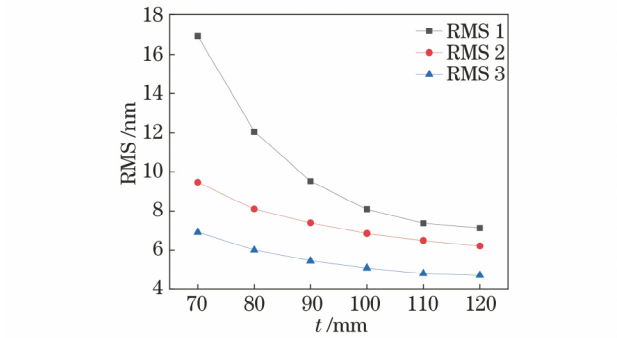

图 10 主镜的面形误差曲线

Fig. 10 Surface error curves of primary mirror

从图 10 可以看到，随着主镜总厚度的减小，主镜的面形精度逐渐下降，主镜的与径厚比逐渐升高且增幅不断变大。经过综合考虑，优化后的主镜总厚度选用 90 mm，此时主镜的质量为 62.78 kg，相比于初始质量(89.36 kg)，主镜的质量下降了 30%，径厚比由 8.58 提高至 11.44。

当光轴竖直时，主镜的最大应力点位于与支撑点位置相对应的主镜内部的加强筋上，应力最大值为 0.0746 MPa，主镜面的位移云图如图 11 所示。当光轴倾斜 45°时，主镜的最大应力点位于主镜背部中心孔附近的加强筋处，应力最大值为 0.0684 MPa，主镜面的位移云图如图 12 所示。

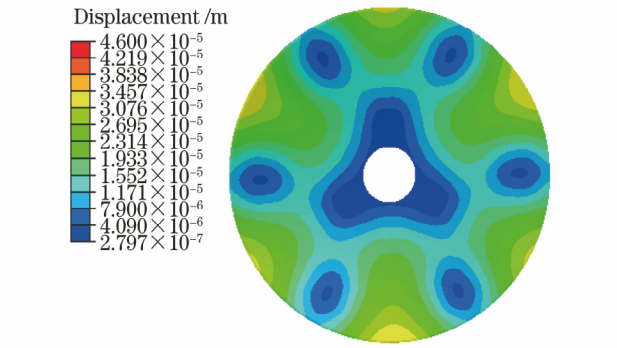

图 11 光轴竖直的位移云图

Fig. 11 Displacement nephogram of optical axis vertical

当光轴处于水平状态时，主镜的最大应力点在中心孔附近，最大应力值为 0.107 MPa，远小于 SiC 材料的抗弯强度 100 MPa，主镜面的位移云图如图 13所示。主镜的最大应力值均远小于 SiC 材料的抗弯强度 100 MPa，所以主镜不会发生破裂。

主镜的面形精度随俯仰角变化的规律可表示为

$$\delta_a = \sqrt{(\delta_A \sin\alpha)^2 + (\delta_R \cos\alpha)^2}, \tag{5}$$

式中：δ_a 为主镜的镜面变形量；δ_A 为光轴水平的镜面误差；δ_R 为光轴竖直的镜面误差；α 为光轴偏离竖直方向的角度，当光轴竖直时，$\alpha = 0°$[18]。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

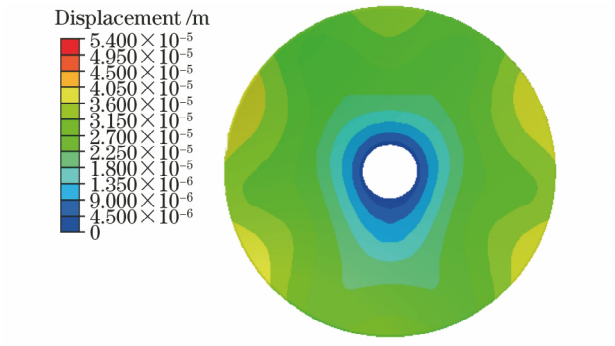

图 12 光轴为 45°的位移云图

Fig. 12 Displacement nephogram with optical axis of 45°

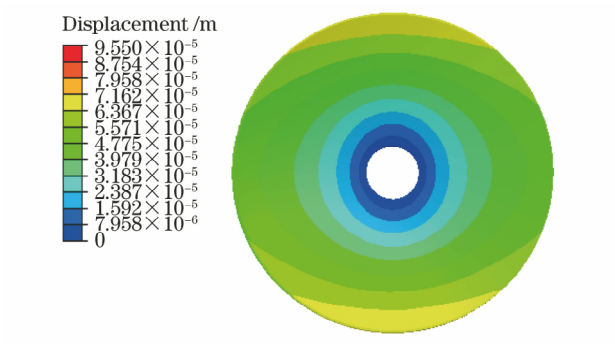

图 13 光轴水平的位移云图

Fig. 13 Displacement nephogram of optical axis horizontal

综上所述，当光轴指向天顶时，此时径向支撑未起到作用，而在轴向支撑的作用下主镜共有 9 个支撑点，受力较均匀，则主镜的面形精度较容易保持；当光轴偏离竖直方向时，主镜的面形精度逐渐增大直至光轴水平，在径向支撑的作用下主镜支撑点数目逐渐减少，此时主镜受力变形较大。如果光轴水平时，主镜的面形精度满足要求，可以认为整个工作过程中主镜的面形精度都满足要求。

4 实验与结果

传统的小口径主镜采用先对裸镜进行加工再安装支撑结构的方法，但对于口径为 1000 mm 的主镜，由于支撑方式的改变对主镜的面形精度影响较大，所以采用在支撑结构作用下进行修磨的方式进行检测，效果更好，主镜的支撑结构在修磨的过程中需要进行多次精修或精调[18]。在主镜装调和检测的过程中，需要不断调整主镜室中心、高精度回转台中心以及芯轴中心，使三者中心重合后，则完成了主镜室的装配。当调整完毕后，即可利用四维干涉仪进行主镜面形误差的检测。由于现有条件的限制，只能检测出光轴水平的主镜面形误差，扇型轻量化主镜的 PV 值(峰谷值)为 222.49 nm，RMS 值为 18.22 nm，即 $\lambda/34$，主镜面形的检测结果如图 14 所示。在三维建模软件及导入的有限元模型中，主镜面形均为理想镜面，此时未考虑主镜的制造误差(RMS 不大于 $\lambda/40$)，因此有限元模型所考虑的影响因素只有重力和支撑结构所产生的作用力，而实验检测结果为重力和支撑结构对主镜的作用力以及主镜制造过程中所产生的面形误差综合作用的结果。

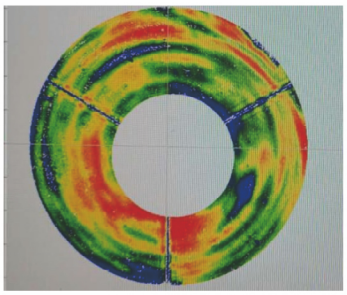

图 14 主镜面形的检测结果

Fig. 14 Test result of primary mirror surface

5 结 论

以 SiC 轻量化主镜为研究对象，主镜背部采用扇型轻量化孔和半封闭型面板。通过优化主镜背部轻量化加强筋的厚度、面板厚度以及主镜的总厚度来减小主镜的质量和体积，通过三维建模软件和有限元分析软件来建立主镜室的有限元模型，对优化前后扇型轻量化主镜在支撑结构作用下的镜面面形精度进行对比分析。在满足主镜面形精度设计要求的情况下，优化前后主镜的质量从 89.36 kg 下降至 62.78 kg，减小了 30%，主镜的径厚比由 8.58 提高至 11.44。当光轴水平时，使用干涉仪对扇型轻量化主镜进行面形检测，主镜面形误差 RMS 值的检测结果为 18.22 nm，即 $\lambda/34$。实验检测结果为重力和支撑结构对主镜的作用力以及主镜制造过程中所产生的面形误差综合作用的结果，满足支撑后主镜面形误差 RMS 不大于 $\lambda/30$ 的工程设计要求。

参 考 文 献

[1] Xie J, He F Y, Wang J, et al. Simulation and optimization of axial supporting structures for theodolite primary mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(S1): S118001.
谢军, 何锋赟, 王晶, 等. 经纬仪主镜轴向支撑结构仿真与优化[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): S118001.

[2] San X G, Sun N, Zhuo R S, et al. Design of supporting structure for primary mirror of large aperture theodolite [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(12): 3111-3117.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

伞晓刚，孙宁，卓仁善，等. 大口径光电经纬仪主反射镜支撑结构设计[J]. 光学 精密工程，2013，21(12)：3111-3117.

[3] Liu S，Hu R，Li Q，et al. Topology optimization-based lightweight primary mirror design of a large-aperture space telescope[J]. Applied Optics，2014，53(35)：8318-8325.

[4] Tan Y F. Research on ground-based large-aperture telescope mount and thermal control for primary mirror[D]. Beijing：University of Chinese Academy of Sciences，2018：67-88.

谭玉凤. 地基大口径望远镜结构设计及主镜热控研究[D]. 北京：中国科学院大学，2018：67-88.

[5] Zhang J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. Chinese Optics，2012，5(4)：327-336.

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.

[6] Yang J W，Huang Q L. Optimized design of structure parameters for large-aperture mirrors[J]. Chinese Space Science and Technology，2011，31(4)：77-83.

杨佳文，黄巧林. 大口径反射镜结构参数优化设计[J]. 中国空间科学技术，2011，31(4)：77-83.

[7] Wang Z S. Research on structure optimization of large aperture monolithic space-based mirror and its mounting technology[D]. Beijing：University of Chinese Academy of Sciences，2019：45-53.

王忠善. 天基大口径单体反射镜结构优化及其支撑技术研究[D]. 北京：中国科学院大学，2019：45-53.

[8] Fan L. Research on the lightweight design and support of the 2 m-SiC primary mirror for ground-based telescope[D]. Beijing：University of Chinese Academy of Sciences，2013：65-76.

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]. 北京：中国科学院大学，2013：65-76.

[9] Xie J. Research on structural design and weight reduction of theodolite based on contact and vibration simulation[D]. Beijing：University of Chinese Academy of Sciences，2017：29-104.

谢军. 基于接触和振动仿真的经纬仪结构设计及轻量化研究[D]. 北京：中国科学院大学，2017：29-104.

[10] Su Y Q. Research on TMT tertiary mirror system Rotator assembly structure technique[D]. Beijing：University of Chinese Academy of Sciences，2014：65-78.

苏燕芹. TMT 三镜系统 Rotator 组件结构技术研究[D]. 北京：中国科学院大学，2014：65-78.

[11] Wang F G，Yang H B，Zhao W X，et al. Lightweight design and analysis of a 1.2 m SiC primary mirror[J]. Optics and Precision Engineering，2009，17(1)：85-91.

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.

[12] Dai X L，Xian H，Tang J L，et al. Designing of lateral support system for an 8 m active thin mirror[J]. Acta Optica Sinica，2015，35(6)：0622004.

戴晓霖，鲜浩，唐金龙，等. 8 m 能动薄主镜侧支撑设计[J]. 光学学报，2015，35(6)：0622004.

[13] Li H Z，Zhang Z D，Wang J L，et al. Active surface-profile correction of 620 mm thin-mirror based on flotation support[J]. Acta Optica Sinica，2013，33(5)：0511001.

李宏壮，张振铎，王建立，等. 基于浮动支撑的 620 mm薄反射镜面形主动校正[J]. 光学学报，2013，33(5)：0511001.

[14] Shao L，Wu X X，Chen B G，et al. Passive support system of light-weighted SiC primary mirror[J]. Optics and Precision Engineering，2015，23(5)：1380-1386.

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.

[15] Sun Q，Gong X F. Design of large-aperture primary mirror based on hybrid optimization method[J]. Acta Optica Sinica，2020，40(22)：2212001.

孙奇，宫雪非. 基于混合优化方法的大口径主镜设计[J]. 光学学报，2020，40(22)：2212001.

[16] Zhao T J，Qiao Y F，Sun N，et al. Surface deformation of theodolite primary mirror under the support system[J]. Chinese Optics，2017，10(4)：477-483.

赵天骄，乔彦峰，孙宁，等. 经纬仪主镜在支撑系统下的面形变化[J]. 中国光学，2017，10(4)：477-483.

[17] Shi Y P，Zhou Y R. Detailed ABAQUS finite element analysis examples[M]. Beijing：China Machine Press，2006：125-163.

石亦平，周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京：机械工业出版社，2006：125-163.

[18] Yang L B，Li Y H，Wang J，et al. Alignment of Φ1000 mm primary mirror for photoelectric tracking system[J]. Optics and Precision Engineering，2018，26(7)：1633-1641.

杨立保，李艳红，王晶，等. 光电跟踪系统Φ1000 mm 主镜的装调[J]. 光学 精密工程，2018，26(7)：1633-1641.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net