©2015《中国激光》杂志社

消旋K镜反射镜支撑结构设计

张 岩 张景旭 陈宝刚 王富国 徐 伟

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 100876

摘要 针对地平式望远镜消旋K镜系统中子反射镜支撑问题,设计了一种三点底支撑及芯轴侧支撑的联合支撑方法,并对该支撑结构展开了深入的仿真分析与实验研究。根据圆形反射镜径厚比与反射镜自重变形的关系,确定了反射镜的厚度。根据反射镜运动学安装原理,设计了柔性底支撑加芯轴侧支撑的结构,芯轴侧支撑环具有柔性切槽,柔性环节确保底支撑与侧支撑应力互不干涉。通过有限元软件Ansys建立反射镜参数化模型,优化了三点底支撑及侧支撑粘结位置,并且分析了反射镜支撑面形精度。进行了反射镜粘接实验,搭建了反射镜面形检测实验平台,进行了反射镜支撑面形精度检测实验。实验结果表明:反射镜面形精度均方根(RMS)值为12 nm、峰谷值(PV)为76 nm,接近仿真分析结果。实验结果验证了消旋K镜反射镜的支撑结构具有正确性与可行性,并满足系统设计要求。

关键词 光学设计; 地平式望远镜; K镜; 支撑结构; 参数化模型; 面形精度

中图分类号 TH743 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.062203

Design of Support Structure for K Mirror

Zhang Yan Zhang Jingxu Chen Baogang Wang Fuguo Xu Wei

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 100876, *China*

Abstract Aiming at the problem of support structure for K mirror in Alt-az telescope, the union support structure which includes three-point bottom support and side support is designed, and the experimental study about support structure is completed. According to the relation of radius-thickness ratio and shape change, the thickness of mirror is determined. Based on kinematics mount principle of mirror, the bottom and side support structure is designed, and the structure includes flexibility hinge which ensure that the support stress is not interference. Then, the parameter model of K mirror is established by Ansys software, the points of support position are optimized, and root mean square (RMS) of mirror surface diguer is obtained. Finally, the splice experiment is promoted, and platform of detection experiment is constructed. Experimental results indicate that the RMS of mirror is 12 nm, the peak valley (PV) of mirror is 76 nm, the experimental results are close to the simulation results. It can certify that the support structure of K mirror is validity and feasibility, and it accords with the design requirements of K mirror system.

Key words optical design; Alt-az telescope; K mirror; support structure; parameter model; surfare figure

OCIS codes 220.4880; 200.4560

1 引 言

消旋K镜装置于地平式望远镜Coude光路中,用以消除由望远镜俯仰轴、方位轴运动带来的像方视场旋转,K镜在理论上可成完善像,对系统的光学成像不会带来额外的像差,适用于从可见光到热红外波段范围的光学系统。K镜主要由K1、K2、K3平面反射镜以及其支撑结构、调整机构、精密回转轴系和相应的控制系统组成。为满足其与系统光路对准的要求,K镜系统设置多自由度微调机构,并具备可调可锁定功能。其中K1、K3镜具有两维倾斜调整能力,K镜轴系组件具备两维平移调整功能,K镜基座具备两维倾斜调整功能。

收稿日期: 2015-01-12; **收到修改稿日期**: 2015-01-28; **网络出版日期**: 2015-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(11403023)

作者简介: 张 岩(1988—),男,硕士,助理研究员,主要从事大口径望远镜光机结构设计方面的研究。

E-mail: zhangfirstyan@126.com

小口径反射镜支撑、调整环节是消旋K镜系统中的关键技术点之一。国内外相关学者对小口径反射镜的支撑技术有一定的研究成果，A.Brunelli等[1]对K镜消旋系统子反射镜采用六杆柔性支撑结构，面形精度具有较好的检测结果，但存在粘结点不易控制、柔性铰链不易加工等问题；李宗轩等[2]针对大口径空间反射镜，设计了一种Cartwheel型柔性支撑结构，取得了较好的支撑效果，具有一定的参考价值，但结构较为复杂，还有进一步优化空间。谭进国等[3]根据反射镜运动学定位原理，研究了一种小口径反射镜中心支撑结构，并对反射镜的轻量化问题展开了一定的研究，支撑结构具有一定的环境适应性；陈洪达等[4]针对空间反射镜，利用等强度原理设计了一种轻量化结构，并对支撑结构的模态及面形进行了详细的分析；付亮亮等[5]研究了长圆形小型反射镜的支撑方法，设计了柔性支撑结构，并通过了动力学验证，其具有较好的动态特性；李志来等[6]对长条形反射镜支撑结构进行研究，并通过有限元软件对支撑结构进行了优化分析；此外，宋强、郭鹏及王富国等分别对反射镜的支撑结构及面形精度分析评价等技术展开了一定的研究[7-13]。本文主要对K镜反射镜的支撑结构进行详细的分析研究。

2 K镜基本结构

设计的消旋K镜系统位于2 m望远镜Coude光路中M6镜之后，望远镜主光路依次通过系统中的K1反射镜、K2反射镜、K3反射镜，如图1所示。其中：K1、K3反射镜为320 mm×220 mm椭圆形镜，镜面法线方向与K镜回转轴夹角为60°；K2反射镜为口径190 mm圆形镜，镜面法线与K镜回转轴垂直。

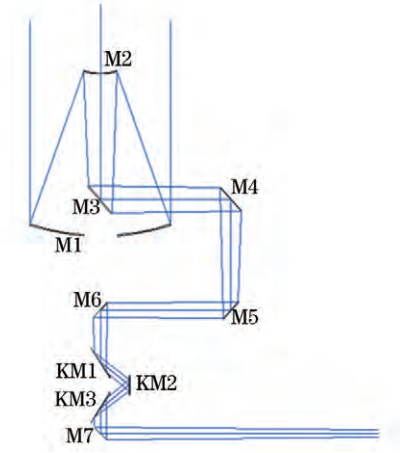


图1 望远镜主光路图

Fig.1 Light path of Alt-az telescope

2.1 反射镜厚度

消旋K镜系统子反射镜材料的选择主要考虑材料的物理性能、材料光学的可加工性能以及材料的稳定性、安全性等因素，反射镜材料选用了比刚度大、热畸变小的微晶玻璃，其自身综合性能较好，加工工艺成熟，面型抛光周期短。反射镜的径厚比决定了反射镜的动静态刚度，根据Roberts等研究的其径厚比(D/t)与自重变形的关系，可知圆形反射镜自重变形的经验公式为：

$$\delta=\frac{3\rho g a^4}{16Et^2}=\frac{3\rho g r^2 D^2}{256E}, \tag{1}$$

式中δ为反射镜最大自重变形(m)，ρ为材料密度(kg/m^3)，g为重力加速度，α为反射镜半径(m)，r为反射镜的径厚比，D为反射镜直径(m)，E为材料的弹性模量(Pa)。

从(1)式中可以看出，反射镜的自重变形与材料的比刚度(E/ρ)的一次方成反比，与平面镜的径厚比以及平面镜口径的平方成正比。对于K2(直径190 mm)镜，以面形精度均方根(RMS)小于等于1/60λ(λ = 632.8 mm)为目标来计算，则：

$$\frac{3\rho g r^2 D^2}{256E}\leqslant 1/60\lambda\,. \tag{2}$$

计算可得，反射镜的径厚比r≤9.1/1，即反射镜的厚度t≥22 mm。按照上述计算方式，最终确定K1、K3

反射镜厚度为40 mm，K2反射镜厚度为25 mm。

2.2 反射镜支撑结构

K镜系统三块子反射镜均需位于密封腔内，并且对至少两块反射镜具有两维角度调整及锁紧功能，K镜具体结构布局如图2所示。

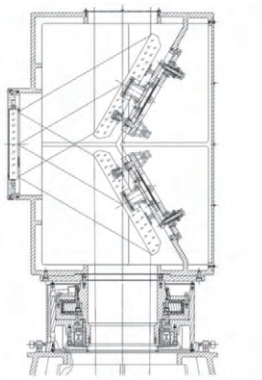


图2 消旋K镜系统光机结构图

Fig.2 Mechanical structure of K mirror

K镜系统中K1、K3反射镜采用三点底支撑及中心轴侧支撑的联合支撑结构，K2反射镜采用较为简单的三点侧支撑结构，如图3、图4所示。消旋K镜系统中K2反射镜为口径190 mm圆形镜，支撑方式相对较为简单，三个粘结点各成120° 均匀分布于反射镜侧面中心位置。

图3中反射镜三个底支撑粘结衬垫通过柔性杆固定于支撑底座上，侧支撑粘结环(中心粘结区)通过弹性膜片结构连接于芯轴之上，反射镜底部及底部中心孔内预留有底支撑与侧支撑粘接位置接口，必须注意反射镜质心需要在侧支撑粘结环中心面上，以避免平面镜反射面在侧支撑作用下形变过大而影响支撑面形精度。底支撑限制了反射镜的两维旋转及一维平移，侧支撑限制了反射镜的两维平移及一维旋转，底支撑与侧支撑结构实现了对反射镜的运动学安装固定，符合平面镜安装的kinematic原理。衬垫材料均选用与微晶玻璃热胀系数相近的铟钢。通过底支撑杆及侧支撑环的柔性环节，不仅能够消除温度变化过程对子镜支撑系统面形精度的影响，同时可以避免在装配过程中由应力造成镜面形精度的降低。

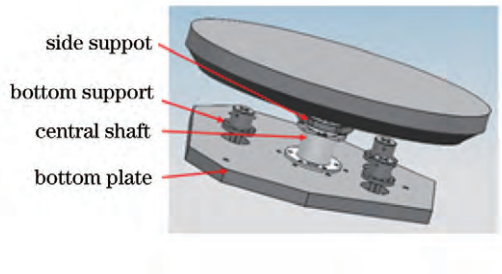


图3 K1和K3反射镜支撑结构图

Fig.3 Support structure of K1 and K3 mirror

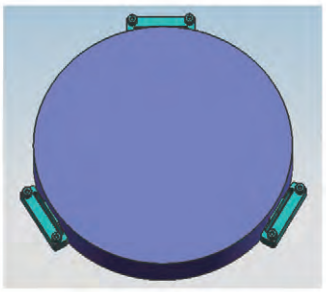


图4 K2反射镜支撑结构图

Fig.4 Support structure of K2 mirror

3 反射镜支撑面形分析

3.1 支撑点位置优化

K1、K3反射镜底支撑点坐标共有三个独立参数X_1，X_2，Y_2，作为优化变量，如图5所示，使用有限元仿真软件Ansys建立反射镜的参数化模型，并在支撑点处施加位移约束，以镜面RMS最低为目标函数，对支撑点位置坐标的三个参数进行优化，如图6、图7所示，得到优化值为：反射镜X_1=83，X_2=68，Y_2=32，三点支撑下反射镜面形精度为7.5 nm。椭圆镜的形状决定了该支撑方法中三点底支撑的位置，如果换成八角形或其他形状的反射镜，相应的底支撑位置需要重新建模分析，但分析原理相同。

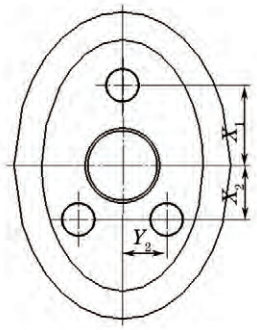


图5 反射镜支撑点位置参数

Fig.5 Position parameters of the support points

3.2 反射镜支撑面形精度分析

利用有限元分析软件建立K1、K3反射镜支撑模型，有限元模型中包括微晶反射镜、底支撑柔性杆及粘结衬垫、芯轴粘结环及中心支撑套筒、支撑底座等几部分，如图8、图9所示。模型建立完毕后，进行热变形分析，分析工况为20 ℃温差，求解反射镜的面形精度值，分析结果。反射镜面形精度RMS值：10.5 nm，峰谷值(PV)：58 nm。分析结果满足系统设计的反射镜面形精度需要达到1/40 λ 的要求。

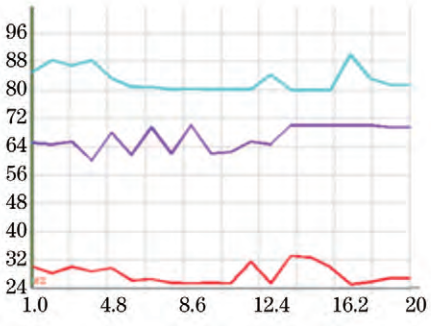


图6 反射镜支撑点位置优化

Fig.6 Position optimization of the support points for K mirror

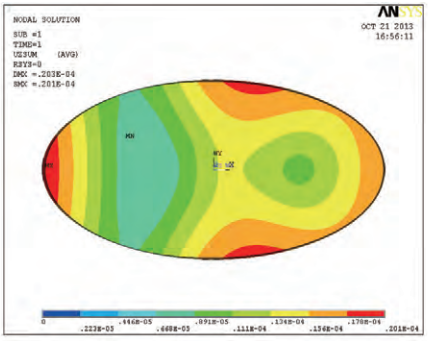


图7 三点底支撑方式下反射镜面形

Fig.7 Shape change in the condition of three-point support for mirror

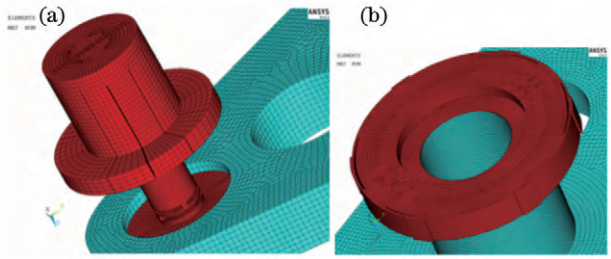


图8 反射镜支撑结构有限元模型。(a) 底支撑结构模型; (b) 侧支撑结构模型

Fig.8 Ansys model of support structure for K mirror. (a) Model of bottom support structure; (b) model of side support structure

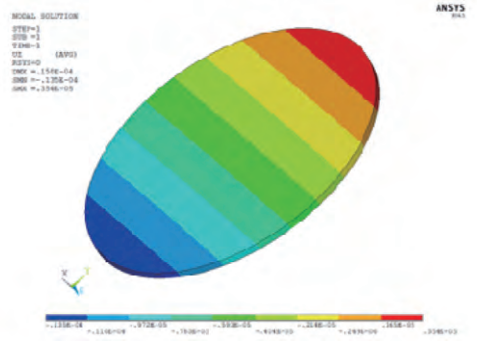


图9 反射镜面形分析云图

Fig.9 Shape change of the K mirror

4 反射镜面形检测实验

为了验证消旋K镜系统子反射镜支撑结构的正确性及可行性,开展了反射镜支撑面形检测实验。反射镜及支撑结构件均按照设计方案各加工一套,如图10所示。反射镜面形加工至约1/10 λ时粘接支撑结构件,支撑件安装过程中按照预定的装配顺序进行,反射镜底支撑粘结衬垫及侧支撑粘结环均使用82-1光学结构胶粘结于反射镜背部预留的粘接点,为保证粘接强度及粘接效果,胶层粘结厚度控制在约为0.08~0.1 mm范围之内[14]。图11所示为反射镜及其支撑组件装配后的情况。



图10 反射镜及支撑结构件

Fig.10 Mirror and the parts of support structure

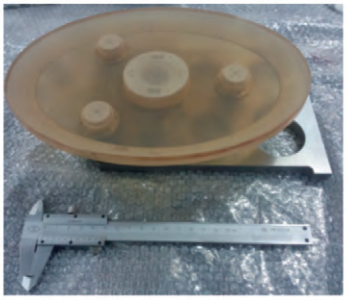


图11 反射镜支撑结构组装图

Fig.11 Assembling state of support structure for mirror

反射镜表面进一步精加工并完成镀膜后,安装好底支撑杆、侧支撑中心轴及底座等反射镜支撑组件,并使用干涉仪对反射镜面形精度进行检测,反射镜面形云图如图12所示,检测结果如图13所示。

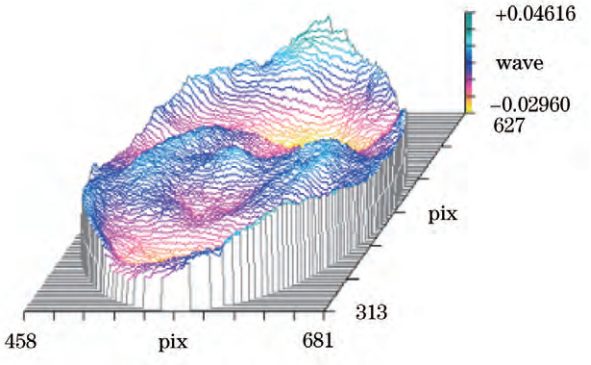


图12 反射镜面形检测图

Fig.12 Mirror detection state of the shape change

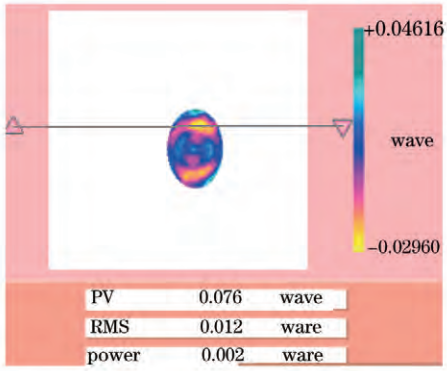


图13 反射镜面形精度检测结果

Fig.13 Mirror detection result of the shape change

反射镜面形RMS值为0.012 μm、约为1/50 γ,PV值为0.076 μm。从检测实验结果中可以看出,反射镜面形精度的实际检测值对比仿真分析值相差约10%。考虑到反射镜支撑结构件的加工精度、反射镜粘结过程中的一些不确定因素,反射镜面形精度的实际检测值没有达到理想状况,但结果基本可以验证支撑方法的正确性及可行性。

5 结 论

主要对地平式望远镜消旋K镜系统中子反射镜的支撑结构展开了深入的探讨和研究,并设计了一种三点柔性底支撑与中心轴柔性侧支撑的联合支撑方法,支撑结构符合平面镜安装的kinematic运动学原理,该支撑方法不是仅限于椭圆形反射镜的支撑,一般对于口径小于500 mm的中小型平面反射镜,只要进行合理的结构布局,均可使用该支撑方法。通过有限元仿真分析方法与反射镜面形检测实验对支撑方法进行了分析验证,实验结果表明在20 ℃温差下,反射镜支撑面形精度RMS值可保证优于1/50 λ,满足于系统设计指标所提出的1/40 λ的要求。由于支撑结构件的加工精度、反射镜粘结过程中的不确定因素等问题的存在,实验结果没有达到理想效果。在后续的工作中,还需要对支撑结构中柔性铰链部分的优化以及反射镜粘结胶层厚度的控制方法等方面的工作展开深层次的研究,以上几方面改善对反射镜的面形精度的提升有着较大的影响。

参 考 文 献

1 A Brunelli, M Bergomi, M Dima, *et al*.. Tips & tricks for aligning an image derotator[J]. SPIE, 2012, 8446: 84464L.

2 Li Zongxuan, Chen Xue, Zhang Lei, *et al*.. Design of Cartwheel flexural support for a large aperture space mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0622003.
李宗轩, 陈 雪, 张 雷, 等. 大口径空间反射镜Cartwheel型柔性支撑设计[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0622003.

3 Tan Jinguo, He Xin, Fu Liangliang. Support technique in centre of minitype reflector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(6): 1070-1074.
谭进国, 何 欣, 付亮亮. 小型反射镜中心支撑技术[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1070-1074.

4 Chen Hongda, Chen Yonghe, Shi Tingting, *et al*.. Lightweight and mounting design for primary mirror in space camera [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(2): 535-540.
陈洪达, 陈永和, 史婷婷, 等. 空间反射镜的轻量化及支撑设计研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 535-540.

5 Fu Liangliang, He Xin, Lian Fenghui. Design and analysis of minitype reflected mirror supporting structure project[J]. Optical Technique, 2008, 34(4): 532-534.
付亮亮, 何 欣, 廉凤慧. 小型反射镜支撑方案的设计与分析[J]. 光学技术, 2008, 34(4): 532-534.

6 Li Zhilai, Xu Hong. Design of rectangular space mirror and its support structure[J]. Opt Precision Eng, 2011, 19(5): 1039-1047.
李志来, 徐 宏. 长条形空间反射镜及其支撑结构设计[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(5): 1039-1047.

7 San Bing. Design and Research on Minitype Reflector Assemblies in Space Optical Remote Sensor[D]. Ji Lin: Jilin University, 2014: 35-45.
伞 兵. 空间光学遥感器小型反射镜组件结构设计与研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2014: 35-45.

8 Guo Peng, Zhang Jingxu, Yang Fei, *et al*.. Optimum design of support structure for 2 m telescope's K mirror[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(6): 1914-1919.
郭 鹏, 张景旭, 杨 飞, 等. 2 m 望远镜K镜支撑结构优化设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1914-1919.

9 An Qichang, Zhang Jingxu, Yang Fei. Area structural function collapse with Randon transformation[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0423001.
安其昌, 张景旭, 杨 飞. Randon变换在区域结构函数坍陷中的应用[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0423001.

10 Yang Fei, An Qichang, Zhang Jingxu. Mirror surface figure evaluation based on power spectral density[J]. Chinese Optics, 2014, 7(1): 156-162.
杨 飞, 安其昌, 张景旭. 基于功率谱的反射镜面形评价[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 156-162.

11 Wang Fuguo, An Qichang. Evaluation of mirror surface figures for TMT based on SlopeRms[J]. Opt Precision Eng, 2014, 22(5): 1171-1175.
王富国, 安其昌. 30 m望远镜三镜镜面面形误差的斜率均方根评价[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(5): 1171-1175.

12 Wang Fuguo. Evaluation of mirror surface figures for TMT based on SlopeRms[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(9): 092202.
王富国. 30 m望远镜三镜底支撑的优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 092202.

13 Song Qiang, Yang Baoxi, Yuan Qiao, *et al*.. Study on large convex aspherical lens testing[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41 (4): 0408003.
宋 强, 杨宝喜, 袁 乔, 等. 30 m大口径凸非球面面形检测方法研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0408003.

14 Paul R Yoder., Jr. Opto-Mechanical Systems Design[M]. Beijing: China Machine Press, 2013: 360-361.
约德. 光机系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 360-361.

栏目编辑: 韩 峰