

400 mm 跟踪望远镜结构设计和分析

孙敬伟, 吴小霞, 吕天宇, 李剑锋

(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: 针对主镜口径为 400 mm 口径的跟踪望远镜的设计要求, 提出了一种有效的结构形式。首先确定了望远镜的光学结构形式和系统参数, 并将整个系统分成了几个主要组成部分。接着着重确定了主镜室的结构形式, 通过优化最佳支撑位置确定了主镜的支撑结构; 同时确定了次镜室以及三翼梁的结构。然后运用有限元建模、分析的方法, 重点分析了反射镜的面形精度受重力变形和温度变化的影响, 进行了整个望远镜系统的刚度分析和温度变化对主次镜间隔的影响。保证了主镜在极限情况下面形 $RMS < 30/\lambda$, 整个系统具有较好的刚度和环境适应性。分析结果表明, 反射镜支撑结构以及整个系统的设计均达到了设计要求, 可以为类似结构提供一定的指导。

关键词: 400 mm 跟踪望远镜; 支撑结构; 有限元分析; 面形精度

中图分类号: TH751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2568-08

Design and analysis of the 400 mm tracing telescope structure

Sun Jingwei, Wu Xiaoxia, Lv Tianyu, Li Jianfeng

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

Abstract: According to the design requirement of the 400 mm -aperture tracing telescope, one effective structure was introduced. Firstly, the telescopic structural style and system parameters were determined, and the whole system was divided into several main constituents. Secondly, the structure of the primary mirror cell was emphatically fixed, and the support structure of the primary mirror was determined according to the optimization of the best support positions, and the structures of the secondary mirror support and three-beam were designed. Thirdly, with method of finite element model and analysis, the primary mirror surface figures caused by the gravity and temperature change were intensively studied, and the stiffness of the whole telescopic system and the contribution of the primary mirror and secondary mirror separation caused by the change of temperature were analyzed. The mirror surface figure RMS was less than 0.033 wavelength in the ultimate state and the stiffness and temperature adaptability of the whole system were assured. The analysis results indicate that the design requirement of the mirror support structure and the whole system are achieved, and the direction for similar structure is provided here.

Key words: 400 mm tracing telescope; support structure; element finite analysis; surface figure

收稿日期: 2013-12-12; 修订日期: 2014-01-10

基金项目: 中国科学院三期创新工程专项基金(O65X32C060)

作者简介: 孙敬伟(1983-), 男, 博士, 主要从事机械设计制造以及大口径望远镜系统装调检测方面的研究。

Email: blizzardsjw@163.com

0 引言

随着光电探测和望远镜技术的不断发展^[1-3],中等口径的跟踪望远镜已经被广泛应用于精确制导、预警、探索监测和跟踪等多种军事和民用领域的系统中,跟踪望远镜观测性能的优劣直接影响了整个观测成像系统的成像精度和各项性能。针对该口径主镜的支撑方法和装调方法既不同于大口径反射镜^[4-6]复杂的支撑结构和装调过程^[7-11],也不同于小口径^[12]相对简单的定位和支撑,作为跟踪望远镜系统最重要的组成部分,该尺寸反射镜的支撑方法和能达到的面形精度的研究具有重要的意义。支撑结构的主要作用在于保证反射镜在任意角度的重力作用下都具有良好的面形,以及抵抗检测所处室温环境及实际工作所处的大范围的温度差异^[13-15]的能力。除了主镜的支撑外,整个跟踪望远镜系统还需要考虑次镜的支撑、主体框架的结构等。整个系统随俯仰状态而产生的变形以及受温度影响而导致的主次镜间隔误差也对望远镜的成像质量具有重要的影响。

文中针对主镜口径为 400 mm 跟踪望远镜系统进行了一系列的研究和相关分析。首先针对成像对反射镜提出的允差要求,进行了支撑位置的优化、支撑结构设计,并且针对次镜系统进行了设计;接着针对整个望远镜系统的结构进行有限元建模分析,重点分析了不同俯仰状态和温度变化时主镜面形的变化情况,证实了主镜结构无论处于何种工况下都能保证主反射镜处于较佳的工作状态;然后对整个系统的刚度和环境适应性进行了相应的验证,证实了系统结构的合理性。此文能为该口径望远镜的系统设计和支撑技术提供有益的指导。

1 系统的光机结构组成

1.1 光学结构和参数

跟踪望远镜系统采用 Cassegrain 反射式光学系统。该系统采用抛物面主镜和双曲面次镜实现宽波段、长焦距的全天时目标跟踪。光学系统共有 4 片光学元件:保护玻璃、主镜、次镜、滤光片,其中主镜、次镜皆为反射元件,保护玻璃、衰减片为透射元件。保护玻璃是为实现密封作用而设置的,它安放在次镜前。而滤光片安放在相机之前,为了实现不同波段的

控制。其光学系统组成如图 1 所示,系统参数见表 1。

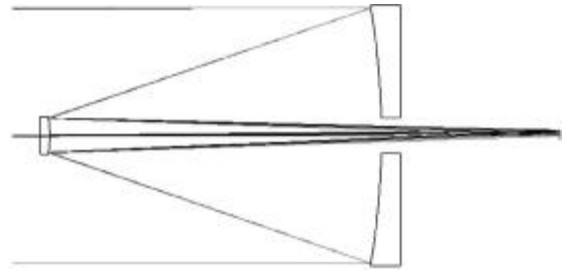


图 1 光学系统

Fig.1 Optical system

表 1 系统参数

Tab.1 System parameters

Parameters	Value
Pure aperture	400
Abscured ratio	0.137 5
Field of view/(°)	9.5
Focal length	6 000
Waveband/ μm	0.9-1.7
Image surface dimension	640×512
RMS wavefront error	$< \lambda/10$

1.2 系统结构设计原理

整个系统的外形尺寸初步设计为 $\varphi 522 \text{ mm} \times 1294.5 \text{ mm}$,质量 386 kg,它主要包含主镜筒、遮光筒、密封组件、主镜室、次镜室、三翼梁、调光组件以及相机调焦组件等,整个系统的设计采用模块化思想,即分别设计每个组件的结构,将这些结构作为一个整体安装调试完成后再将整个系统进行整合,这些组件共同实现系统要求的功能,整个系统的结构示意图如图 2 所示。

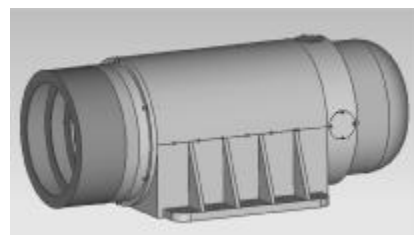


图 2 系统结构示意图

Fig.2 Structure scheme of telescope system

设计要重点考虑的是主镜支撑及主镜室结构设计、次镜室结构及其连接结构三翼梁,另外还要考虑减小视场内的杂散辐射。前两者主要影响的是系统光学元件主次镜的面形精度,后者主要目的是提高效率。表 2 所示为系统的主要组成结构和选用的材

料。由于不同材料的力学性能和热胀系数不尽相同,为了满足系统对于像质的要求,既要保证选用的材料具有较大的比刚度,还要考虑不同材料之间热胀的不同可能引入的局部应力,以及对主次镜面形以及间隔的影响。表 3 所示为选用的几种主要材料的机械性能和热学性能。

表 2 系统主要组成列表

Tab.2 Systematic main constitution listing

Number	Name	Material
1	Mirror cylinder	HT300
2	Primary mirror cell	HT300
3	Secondary mirror cell	Q235
4	3 wing beam	Q235
5	Primary mirror	K4
5	Secondary mirror	Zerodur
6	Mandrel	4J42

表 3 不同材料对应的机械性能和热学性能

Tab.3 Mechanical character and thermology behavior of different materials

Material	Density /t·mm ⁻³	Young's ratio/MPa	Poisson ratio	Coefficient of thermal conductivity /W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	Thermal exp. coef 10 ⁻⁶ /K
HT300	7.34E-9	130 000	0.24	45	11.1
Q235	7.86E-9	212 000	0.288	43	11.3
45	7.81E-9	200 100	0.26	48	11.59
40Cr	7.82E-9	211 000	0.277	44	12
K4	2.50E-9	71 440	0.211	1.13	4.2
Zerodur	2.54E-9	96 000	0.24	1.6	0.1
2A12	8.10E-9	141 000	0.26	155	1.5
4J42	8.18E-9	150 000	0.25	10.4	5.6

1.3 主镜室组件结构设计

主镜作为跟踪望远镜系统最大的光学部件,它的支撑对整个系统是至关重要的,而整个主镜连同支持结构共同安装在主镜室内,构成整个主镜室组件,图 3 所示为主镜室组件的结构示意图。

主镜光轴作为系统最初的基准,为后续的系统联调提供基准,要实现好的系统性能必须保证次镜的光轴和主光轴重合,这就要求主镜光轴必须是稳定的,因此对主镜支撑的分析至关重要。主镜连同支撑结构共同放置在主镜室里,主镜室则通过一定的止口结构和主体框架实现同心连接,因此主镜室必须具备一定的抗变形能力。主镜一旦装调完成后就

利用锁死机构固定,成为后续装调的基准。

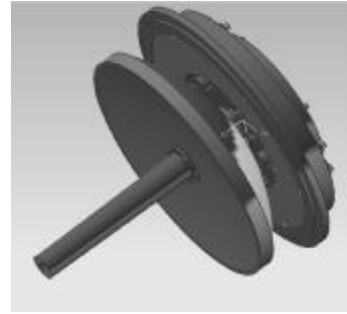


图 3 主镜室结构示意图

Fig.3 Structure scheme of primary mirror cell

主镜室组件作为整个系统最重要最复杂的系统,它共包含以下组成部分:底支撑组件、芯轴组件、主镜、主镜室、遮光筒等。其中底支撑组件和芯轴组件分别实现主镜轴向和径向的支撑。遮光筒的主要作用为消除光学系统本身带来的杂散辐射,减少杂散噪声对成像质量的干扰。下面重点分析确定具体的支撑结构和支撑位置。

1.3.1 支撑形式和支撑位置的确定

反射镜支撑的基本原则是以最少的支撑点使反射镜在复杂的环境下变形最小。反射镜的支撑形式包括轴向支撑、径向支撑和万向支撑等。对于轴向支撑的位置优化,主要考虑反射镜光轴竖直时镜子由于自重变形的 RMS。在理想的支撑设计中,三点定位是首选方案,对于口径比较大的反射镜通常采用浮动支撑。由于圆形对称原则,轴向支撑必须沿周向 120° 均布,因此优化的主要参数为支撑点距离镜子重心的距离,即最佳支撑半径。除轴向支撑外,径向支撑同样也需要进行位置的优化。它的优化主要考虑将径向支撑力通过反射镜中性面的重心,这就避免了引入倾覆力矩,给镜面引入不利的影。径向支撑还需要考虑和轴向支撑的位置耦合关系。除上述两种支撑形式外,如果采用万向支撑,则位置优化要兼顾前面轴向和径向最佳支撑位置的优化过程。

Hall 给出了圆盘反射镜最少支撑点数 N 的经验公式:

$$N = \frac{1.5r^2}{t} \sqrt{\frac{\rho g}{E\delta}} \quad (1)$$

式中: r 为圆盘直径; t 为圆盘厚度; δ 为最大自重变形; ρ 为材料密度; g 为重力加速度; E 为弹性模量。反射镜满足最大变形小于 $\lambda/30$ 时,由此公式计算得到 $N=2.8$,

所以从理论上讲,反射镜应取 3 点支撑方案。

确定了支撑点数后需要进行支撑位置的优化。此时不针对主镜的支撑形式,仅仅针对主镜模型,将其 3 点底支撑位置全约束,分析光轴竖直状态下,主镜的面形情况。并将全约束的位置沿径向方向进行调整,将分析结果绘制成图表形式,如图 4 所示。

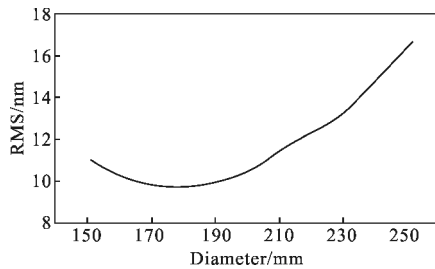


图 4 支撑直径和面形曲线图

Fig.4 Diagram of supporting diameter and surface figure

分析结果可知:对于该尺寸的主镜,3 点最优的支撑的直径为 178 mm。这种结果符合支撑理论,当支撑的直径过小时,镜子边缘产生塌边现象,干扰了主镜面形的整体效果;而支撑直径过大,则导致了主镜中心部分的塌陷。因此 3 点支撑存在一个最优的支撑位置,此时光轴竖直状态,主镜的面形可达到 $RMS=9.7\text{ nm}$, $\sigma < \lambda/60$ (RMS) ($\lambda=633\text{ nm}$), 远远优于对主镜面形的要求。

1.3.2 主镜支撑结构设计

主镜支撑结构设计主要考虑反射镜在加工、检测和使用状态下重力作用下的面形精度以及温度变化时给镜面面形带来的误差。通过理论分析配合实际结构确定反射镜支撑的大体结构形式,然后利用有限元分析工具进行结构参数的微调 and 面形的验证。

支撑结构刚度大,反射镜易满足重力变形要求,但过高的支撑刚度会使反射镜系统在温度发生变化时,由于反射镜材料与支撑材料热膨胀系数的不匹配,导致温变时的热应力对镜面面形精度造成不利影响。为此在反射镜支撑结构中要设置一定的柔性环节,使反射镜具有更好的热尺寸稳定性。当温度发生变化时,由于支撑材料的热胀系数通常较大,将随温度的升高或降低产生比反射镜大的膨胀或收缩。

图 5 所示为整个支撑结构示意图,其中的支撑结构为 3 点底支撑配合设置的柔性支撑芯轴作为侧支撑实现,柔性芯轴能通过自身的变形消弱镜室的热变形对反射镜面形精度的影响。此外,当支撑结构

存在一定的工艺误差时,可将其机械变形进行卸载,同样降低了支撑结构工艺误差对反射镜面形精度的影响,提高了反射镜的环境适应能力。

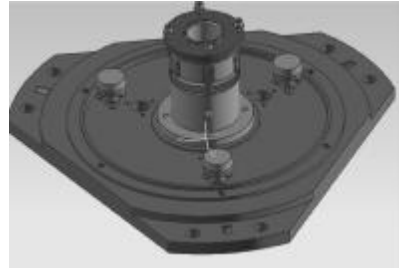


图 5 支撑结构示意图

Fig.5 Structure scheme of primary mirror support structure

1.4 次镜室和三翼梁支撑结构设计

系统的次镜作为光线转折的过渡部分,安装在次镜室内,通过三个安装腿固定位置。次镜室则通过三翼梁和外圆环进行连接,外圆环固定在主镜筒的前端。出于减少遮拦的考虑,三翼梁需设计的较薄,它成为系统较薄弱的环节,它的谐振会对系统产生直接影响。而在三翼梁结构满足刚度的同时,还需要保证光学的性能要求。为了适应光学装调的要求,次镜室需要具备偏心 and 倾斜的调整功能,用于次镜光轴和主光轴重合的调整过程,进而保证整个系统的波像差要求。图 6 所示为采用的次镜室组件的结构布局图。一旦调整完成后,点胶锁死其位置,防止因震动等原因导致次镜的位置发生改变。为了减弱杂散辐射,在次镜前端设置次镜遮光筒。遮光筒既要减小对主镜遮挡的负面影响,又要增加对杂散辐射的抑制。综合考虑将遮光筒设置在次镜室的外圆周,通过螺钉连接。



图 6 次镜室及三翼梁结构示意图

Fig.6 Structure scheme of secondary mirror cell and 3-beam

2 主要指标分析

为了分析系统的整体性能以及各个关键指标,

采用有限元软件 Patran 将整个系统建立有限元模型如图 7 所示。有限元模型包含主镜筒结构、主镜室、芯轴组件、主镜、三翼梁、次镜、保护玻璃、前遮光筒以及后续圆筒等部件，其中次镜口径较小并且厚度较厚，因此将其视为刚体，忽略其面形的影响，选用质量点代表，它通过 MPC 和三翼梁组件相连，为方便三翼梁尺寸的修改，三翼梁选用壳单元建模，通过 MPC 实现壳单元和实体单元的过渡。芯轴组件中的柔性环用弹簧单元代替并通过 MPC 实现二者 U_x 、 U_y 方向的相关。整个模型共包含了 31 252 个单元以及 41 426 个节点以及 25 个 MPC。

为了后面的热分析，在有限元模型建立完成后，就对不同的组件赋予不同的材料属性。其中主镜筒组件选用 HT300，刚度较好，热胀系数较大。出于经济状况的考虑，最大口径的主镜选用热胀系数较大的 K4 来实现。次镜的口径较小，因此选用微晶作为其材料。为了较好的热匹配，主镜的支撑组件选用 4J42 来避免引入局部的应力。次镜室、三翼梁等结构选用的材料为 Q235。

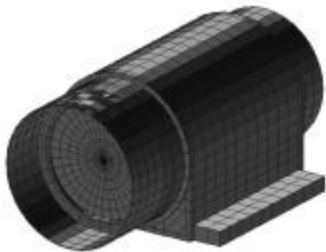


图 7 系统有限元模型
Fig.7 Systematic finite element model

2.1 精度分析

400 mm 口径的主镜作为系统最大的光学元件，它的支撑状态对于系统性能有着最直接的影响。主镜支撑的刚度要求主镜从光轴水平一直到光轴竖直的整个 90°的俯仰状态面形精度满足小于 $\lambda/30$ (RMS) ($\lambda=633$ nm)。

将整个主镜室组件作为分析的重点，对这个模型单独进行分析。整个模型包括主镜、底板、底支撑、芯轴和主镜室。其中底支撑安装在前面分析优化的最佳支撑点，芯轴由于具有柔性功能，因此将其建成实体单元后利用 MPC 和中心轴进行连接，整个模型如图 8 所示。

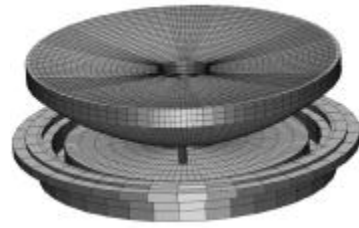


图 8 主镜室有限元模型
Fig.8 Finite element model of primary mirror cell

由于主镜室和主镜筒的后圆面相连，因此根据实际情况将主镜筒安装孔处节点作为固定点限制其 6 个自由度为零，在该工况条件下改变重力方向分析主镜在不同俯仰状态下面形的变化情况，两个极端情况为光轴竖直和水平状态。分析结果显示当光轴竖直时， $PV=20.9$ nm, $RMS=4.65$ nm, Z 向平均刚体位移 $Z=-2.99e-4$ mm。球面曲率半径变为 1200.004 mm。光轴水平时， $PV=9.2$ nm, $RMS=1.7$ nm, Y 向平均刚体位移 $Y=-1.08e-3$ mm。两种极限状态下主镜的面型都远远优于系统要求，并且刚体位移和曲率半径的变化都在微米量级，可以认为支撑结构是合理可靠的。图 9 所示为光轴竖直和光轴水平状态的镜面变形情况。

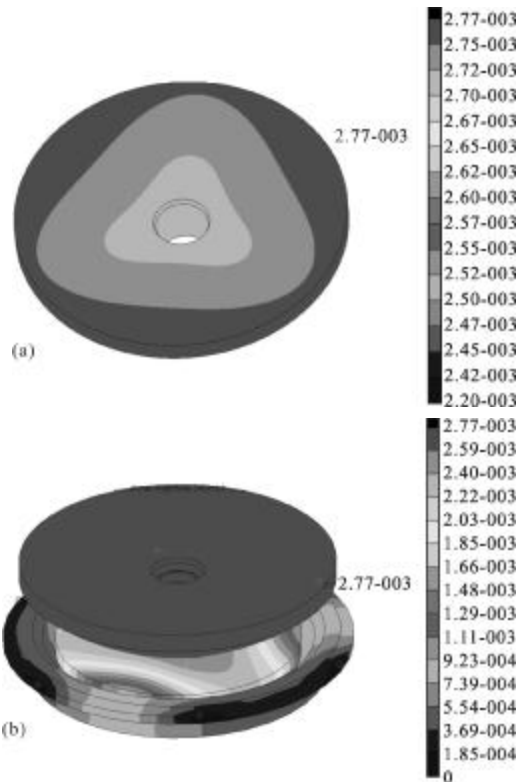


图 9 3 点支撑光轴竖直主镜和主镜室的变形云图
Fig.9 Primary mirror and primary mirror cell deformation plots with 3 supports when the optical axis is vertical

分析结果表明：底支撑和芯轴完全实现了轴向和径向支撑力的解耦，二者不会相互干扰，两者共同作用保证了主镜在不同俯仰状态下都可以实现极佳的面型，因此这种结构完全满足主镜支撑的要求。

2.2 刚度分析

针对整个望远镜模型，采用同样的边界条件，分别分析重力方向和系统光轴平行以及垂直的两种工况下，系统整体的变形情况。得到的变形云图如图 10 所示，无论处于何种工作状态，系统的最大变形都没有超过 0.005 mm，而极限位置满足系统要求说明了整个系统在任何俯仰状态下都不会产生较大的变形，符合系统的刚度要求。为进一步确认短波红外系统的刚度，分析系统的谐振频率，得到一阶谐振达到 136.4 Hz，证明系统的刚度满足要求。

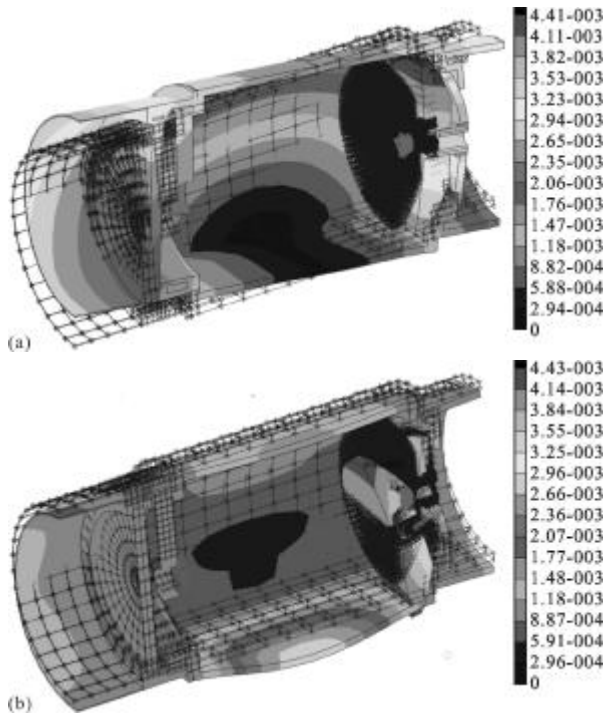


图 10 光轴竖直以及光轴水平时系统变形云图

Fig.10 System deformation plots when the optical axis is vertical and horizontal

2.3 环境适应性分析

除了对刚度的要求外，系统对温度适应性也是短波红外系统能否正常观测的重要指标。系统的工作温度为 20℃，而环境温度为 -40~60℃，变化温度为 100℃。温度的变化对观测系统主要有两方面的影响：对主镜面形的影响以及对主次镜间隔的影响。前者主要影响系统的波像差，后者则会导致像面的位置改变。

2.3.1 主镜室受温度影响

考虑到主镜采用的材料是 K4，芯轴组件中和主镜直接粘接的粘接圈的材料选择对于主镜的支撑面型具有十分重要的作用。粘接圈采用 45 号钢时，分析温度从标准环境温度 20℃降低到极限的 -40℃时，球面曲率半径变为 1199.685 mm，PV=1.67 mm，RMS=0.308 mm。考虑产生如此大的波形差以及曲率半径变化较大的原因主要有两部分：一个是中心粘接垫和镜子热匹配不好，温度变化时镜子中心受到粘接圈的挤压而产生局部应力；另一个是底支撑如果采用粘接，会导致温度变化时底部产生局部应力影响面型。

为了改善这种情况，选用热胀系数和 K4 相近的 4J42，其他边界条件完全不变，温度从标准环境温度 20℃降低到极限的 -40℃时，新的球面曲率半径变为 1200.004 mm，PV=20.9 nm，RMS=4.65 nm。该面型满足系统对于主镜面型的要求。考虑其原因，首先在于粘接圈和主镜的热胀系数相近，并且径向的开槽消去了一部分热不匹配引入的局部应力，同时将底支撑改为杆单元放开了底板和主镜热胀系数不同导致将局部应力引入底支撑内。

图 11 所示为整个主镜室在温度降低 60℃时的变形云图，因此最大变形发生在芯轴的上边缘，最大变形量为 0.054 mm。而主镜由于和粘接圈的胶结，在主镜粘接处和粘接圈的变形量相近。由于底支撑和芯轴的解耦，主镜没有和底板进行直接连接，有效地隔绝了温度降低导致的局部应力。该分析证明在温度发生大范围变化时，主镜面型依然能维持在较好的范围，这对于实际观测具有十分重要的指导意义。

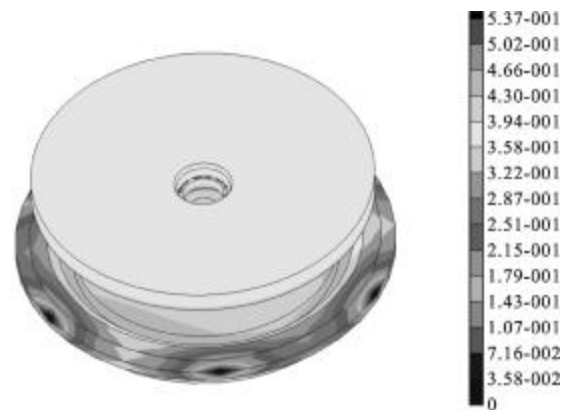


图 11 温度变化 60℃时主镜室变形云图

Fig.11 Primary mirror cell deformation nephogram when temperature changed 60℃

2.3.2 系统受温度影响

跟踪系统由于采用了筒式结构,其受温度变化影响是十分巨大的,因此下面重点分析温度变化对主次镜间隔的影响以考察整个系统环境适应性。光学设计以及系统的安装、调整等过程可以认为系统处于标准的环境温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而使用过程的温度范围则变化为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于主体结构采用筒式结构,受温度变化影响较大,需要通过分析确定其影响。图 12 所示为温度从标准环境温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化到极限温度 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,整个系统的变形情况。由于温度降低导致的刚体收缩使主次镜同时向镜筒移动,比较关心的是主次镜间隔随温度变化后的干扰情况,这会直接影响相机调焦的行程以及系统像质的好坏。表 4 所示为主镜和次镜在温度变化了 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的刚体位移情况。

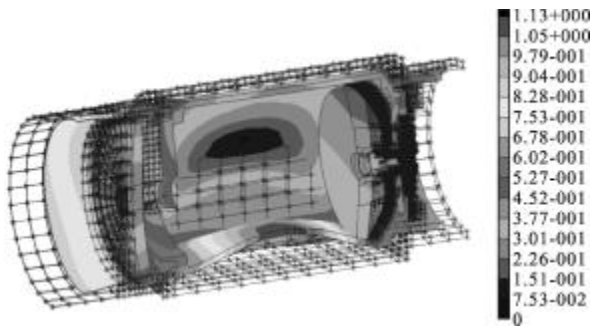


图 12 温度变化 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的系统的变形云图

Fig.12 System deformation nephogram when temperature changed $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

表 4 主次镜随温度变化 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的刚体位移情况

Tab.4 Rigid body translation of primary mirror and secondary mirror when temperature changed $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Translation/mm	X	Y	Z
Primary mirror	-0.217 5	-0.000 2	0.116 56
Secondary mirror	0.088 93	0.000 000 62	0.544 59

当温度是标准的 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,主、次镜间距为 520 mm ; 当温度降低到 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,由于主体钢结构的收缩,次镜沿轴向变化了 0.54 mm ,而主镜沿轴向的刚体位移为 0.12 mm ,因此主次镜的间隔变为 $520-(0.54-0.12)=519.58\text{ mm}$ 。这会导致像面移动,成像质量受到影响,为了抵消这种影响,需利用相机的调焦实现像质的改善。通过计算可得需要相机的调焦量为

30 mm ,通过结构设计可实现。

3 结 论

文中针对主镜口径为 400 mm 的跟踪望远镜,从反射镜的支撑结构设计开始,确定反射镜的支撑形式以及整个主镜室的结构分布,还确定了次镜室的结构以及次镜室和三翼梁的连接,接着重点分析了跟踪望远镜三个方面的性能指标:精度、刚度和环境适应性。通过有限元建模分析验证了主镜支撑结构的合理以及整个系统的相关性能。分析结果显示 400 mm 口径的反射镜选用的支撑结构,既满足了不同俯仰角度下重力导致镜面面形变化的要求,还能保证在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度变化范围内,面形始终维持在较好的状态。整个跟踪望远镜具备了良好的抗重力变形的刚度和热尺寸稳定性,因温度变化导致的主次镜间隔完全可以通过离焦量的控制得以消除。设计和分析结果表明,反射镜支撑结构以及整个系统的设计均达到设计要求,可以为类似的结构提供一定的指导。其结构对于中等口径的望远镜研究具有很好的借鉴和指导意义。

参考文献:

- [1] Cheng Jingquan. Principles of Astronomical Telescope Design [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003: 61-68. (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: 61-68.
- [2] Zhang Jingxu. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescopes[J]. Chinese Optics, 2012, 5(4): 327-337. (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, 5(4): 327-337
- [3] Yoder J R, Paul R. Opto-Mechanical Systems Design [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 1993: 407-470.
- [4] Ye Weinan, Dong Jihong. Optimized design of lightweight structural parameters for large-aperture primary mirror [J]. Chinese Optics, 2012, 5(3): 222-226. (in Chinese)
叶伟楠, 董吉洪. 大口径主镜轻量化结构参数的优化设计[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 222-226.
- [5] Shao Liang, Yang Fei, Wang Fuguo, 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)
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.
- [6] Zhang Yuanyuan, Jing Wei, Cheng Yuntao, et al. Design and finite element analysis of $\Phi 510$ mm SiC ultra-lightweight mirror [J]. Opt Precision Engineering, 2012, 20(8): 1718-1724. (in Chinese)
张媛媛, 敬畏, 程云涛, 等. $\Phi 510$ mm SiC 超轻量化反射镜的设计与有限元分析 [J]. 光学 精密工程, 2012, 20(8): 1718-1724.
- [7] Fan Lei, Zhang Jingxu, Shao Liang, et al. Axial support for large aperture primary mirror based on hydraulic Whiffle-tree [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(8): 2126-2131. (in Chinese)
范磊, 张景旭, 邵亮, 等. 采用液压 Whiffle-tree 的大口径主镜径向支撑 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2126-2131.
- [8] Xu Hong, Guan Yingjun. Structural design of 1 m diameter space mirror component of space camera [J]. Opt Precision Engineering, 2013, 21(6): 1488-1495. (in Chinese)
徐宏, 关英俊. 空间相机 1m 口径反射镜组件结构设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6): 1488-1495.
- [9] Han Guangyu, Cao Lihua, Gao Yunguo, et al. Supporting and assembling for primary mirrors of 1 m aperture telescope [J]. Opt Precision Engineering, 2012, 20(9): 1922-1928. (in Chinese)
韩光宇, 曹立华, 高云国, 等. 1 m 望远镜主反射镜的支撑和装配[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(9): 1922-1928.
- [10] Guo Wancun, Wu Qingwen, Yang Jinsong, 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)
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.
- [11] Chen Wei, Ding Yalin, Hui Shouwen, et al. Design of kinematic mount for SiC scanning reflective mirror [J]. Chinese Optics, 2012, 5(2): 161-167. (in Chinese)
陈伟, 丁亚林, 惠守文, 等. 碳化硅扫描反射镜支撑结构设计[J]. 中国光学, 2012, 5(2): 161-167.
- [12] Xu Xinxing, Wang Bin, Qiao Jian, et al. Lightweight design of mirror in fast-steering mirror system [J]. Chinese Optics, 2012, 5(1): 35-40. (in Chinese)
徐新行, 王兵, 乔健, 等. 快反系统中平面反射镜的轻量化设计[J]. 中国光学, 2012, 5(1): 35-40.
- [13] Zhou Chao. Opto-mechanical design for a cryogenic IR system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(8): 2092-2096. (in Chinese)
周超. 低温红外系统光机结构设计 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2092-2096.
- [14] Wu Xiaoxia, Wang Minghao, Ming Ming, et al. Calibration of thermal distortion for large aperture SiC lightweight mirror [J]. Opt Precision Engineering, 2012, 20(6): 1243-1249. (in Chinese)
吴小霞, 王鸣浩, 明名, 等. 大口径 SiC 轻量化主镜热变形得定标[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(6): 1243-1249.
- [15] Yang Shihai. Detection and suppression of oil pad nonlinear disturbance for large optical telescope [J]. Opt Precision Engineering, 2013, 21(2): 408-415. (in Chinese)
杨世海. 大口径光学望远镜油垫非线性干扰的检测与抑制 [J]. 光学 精密工程, 2013, 21(2): 408-415.