

文章编号: 1003-501X(2011)09-0084-04

地基望远镜主镜支撑性能分析

周 超, 王 志, 赵勇志, 王志臣, 王 槐

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 主镜面型精度是地基大口径望远镜最关键的技术指标之一。为了研究主镜室以及主镜底支撑和侧支撑系统的重力变形造成的主镜面型误差, 介绍了一地基光电望远镜的主镜室及详细的主镜支撑结构, 借助于有限元法, 建立了主镜, 主镜室和支撑结构的详细有限元模型, 分析计算了主镜在支撑状态下的镜面变形情况, 并通过 ZYGO 干涉仪进行了面型检测。计算结果和实测结果对比, 说明了主镜室及其支撑结构引入的主镜面型误差大小, 同时也验证了有限元模型的正确性。

关键词: 望远镜; 主镜; 面型精度; 有限元

中图分类号: TH751

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2011.09.016

Supporting Effect Study on Primary Mirror of Ground-based Telescope

ZHOU Chao, WANG Zhi, ZHAO Yong-zhi,
WANG Zhi-chen, WANG Huai

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

Abstract: The primary mirror surface figure precision is a key factor for the large ground-based telescope. In order to study the surface figure error caused by gravity deformations of primary mirror cell, and axial and lateral supporting system, the mirror cell and mirror supporting structures for a telescope were introduced. A precise finite element model of the primary mirror, mirror cell and mirror supporting structure was established by using the finite element method. Deformation of the primary mirror surface under supporting was calculated and the surface figure was tested by ZYGO interferometer. By contrast with the calculated results and tested results, it shows the mirror surface figure error caused by the supporting structures, and verifies the correctness of the finite element model.

Key words: telescope; primary mirror; surface figure precision; finite element method

0 引 言

现代天文和军事技术的发展, 要求望远镜要不断的提高集光能力以观测更暗, 更小, 更遥远的星体和航天器。因此各国竞相研制大口径的望远镜和光电系统。

主镜作为大型望远镜的关键部件之一, 其面型精度直接决定了望远镜的成像质量。对于米级的大口径望远镜主镜, 除了加工误差和自身重力变形外, 复杂的主镜室组件(包含主镜室及其主镜支撑系统)将会产生附加的镜面面型误差。特别是随着望远镜指向俯仰角的不同, 其底支撑和侧支撑综合作用在主镜上, 使得镜子面型随之而变化, 给主镜支撑系统的设计带来困难^[1]。

国内外对大口径主镜的支撑做过很多研究。在确定主镜底支撑和侧支撑点的个数以及位置等参数时, 常常以一个裸镜进行分析, 直接在镜子背面或侧面相关节点处约束, 以此结果作为支撑结构设计的标准^[2-6]。

收稿日期: 2011-03-08; 收到修改稿日期: 2011-06-10

基金项目: 中国科学院三期创新项目; 长春光机所创新重点支撑项目

作者简介: 周超(1984-), 男(汉族), 山东泗水人。博士研究生, 主要研究光机结构系统有限元仿真工作。E-mail: zhouchaociomp@163.com。

但在确定了支撑方式以及支撑结构基本形式之后,为了检验支撑结构对于主镜支撑效果的好坏程度,只以单个裸镜的分析结果就不再令人信服。就必须对整个主镜室组件进行系统的有限元分析计算。

本文详细介绍了某望远镜的主镜支撑系统,通过对各部分之间的连接和运动关系的研究,建立了详细、准确的有限元模型,并在主镜检测状态下进行了分析计算,得出了支撑系统对主镜变形的影响。

1 望远镜主镜支撑组件的基本结构

该望远镜主镜为微晶玻璃材料的双曲面镜,其外径为 1 230 mm,通光口径 1 200 mm。根据望远镜光学系统中的设计指标要求,通过设计和优化分析初步确定出主镜的底支撑和侧支撑结构。

在支撑设计中,应尽可能减小主镜在自重下的变形,并尽量不将结构(主镜室)的变形传递到主镜上。解决这一问题的最好方法就是采用浮动支撑,如杠杆平衡重支撑和液压支撑等。对于该主镜,底支撑采用是 whiffle-tree 轴向支撑。经过优化,用分布在两个同心圆上的 18 个支撑垫被动支撑,18 点组成无定向三角板浮动支撑结构。主镜指向天顶时,主镜完全由这 18 个浮动点支撑。

侧支撑来限制主镜的径向位移。该望远镜采用传统的杠杆平衡重推拉支撑系统,中心孔芯轴定位,外边缘采用六个杠杆平衡重机构进行侧向均匀承重。在主镜处于不同仰角时,通过该机构对重力进行卸载。

该主镜支撑系统的优点是仅将主镜室变形中的平移和倾斜分量传递到主镜上,只会引起主镜的平移和倾斜刚体位移,这并不影响成像质量,只会引起望远镜的指向准确度误差。底支撑和侧支撑结构如图 1,主镜室组件系统如图 2 所示。

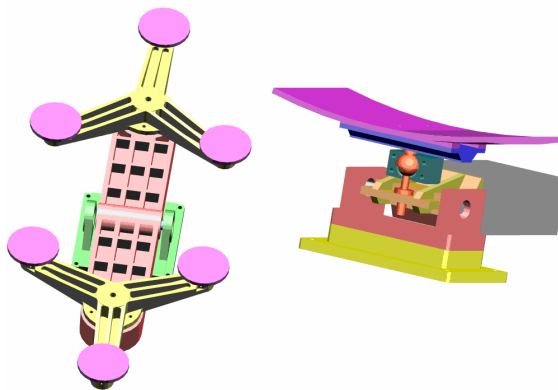


图 1 底支撑和侧支撑结构图

Fig.1 Axial support and lateral support structure

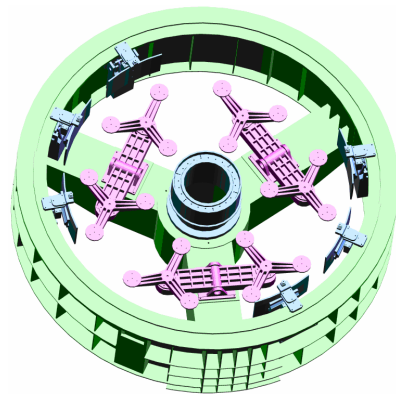


图 2 主镜室组件系统

Fig.2 Primary mirror cell assembly

2 有限元仿真分析

对光学组件需要建立十分详细的有限元模型。尤其是望远镜主镜及其支撑系统,这部分模型会对整体的分析结果有重要影响。因此我们对主镜及其支撑系统中大部分构件采用 6 面体单元详细建模。在浮动支撑结构中包含了球铰等转动环节,对其的有限元模型表达不正确的计算结果也会出现很大的误差。针对各个结构件之间的连接关系和运动关系,通过使用不同类型单元,多种多点约束(MPC),以及简化了的胶层等进行了详细描述。对底支撑和侧支撑中的转轴和杆件用梁单元(Beam 单元)来模拟,对于连接球头,由于只能传递轴向力而没有力矩,用杆单元(Rod 单元)模拟。在转轴,球头与其他件相连接的部位通过使用多点约束放开相应的转动自由度来实现。

主镜侧支撑垫是通过胶粘的方式连接到镜子周边的。而胶的模拟一直是有限元建模中的难点。很多以前的分析中人们都认为其影响不大,在分析过程中可以直接忽略,因此都直接采用节点相连来省略胶层。Gregory 关于薄层胶材料的研究提出了等效的三维应力应变方程如下^[7-10]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11}B & \frac{k_{12}k_{11}\nu B}{1-\nu} & \frac{k_{13}k_{11}\nu B}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{12}k_{11}\nu B}{1-\nu} & k_{11}B & \frac{k_{13}k_{11}\nu B}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_{13}k_{11}\nu B}{1-\nu} & \frac{k_{13}k_{11}\nu B}{1-\nu} & k_{33}B & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： B 为胶层材料的体积模量， k_{11} ， k_{12} ， k_{13} ， k_{33} 分别是不同方向上的修正系数，对于不同材料的 b/t (b 为胶层宽度， t 为胶层厚度)，可以根据表 1 进行插值计算得到。

表 1 不同 b/t 和泊松比 $\mu=0.45$ 环状胶层刚度修正系数

Table 1 Correction factors for ring bonds with various combinations of b/t ratios and Poisson's ratio

b/t	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{33}
1	0.403 6	0.671 7	0.270 4	0.143 3
2	0.510 2	0.786 6	0.525 7	0.375 0
5	0.752 1	0.926 7	0.837 2	0.851 8
10	0.878 6	0.968 5	0.930 1	0.990 7
20	0.938 3	0.985 4	0.967 5	0.999 4
50	0.975 6	0.994 4	0.987 6	0.995 2

使用这种各项异性模型，仅需要一层体单元就可以把胶层描述出来，因此在基本不增加计算量的同时很好的描述了胶层，使得分析结果更加准确。主镜室组件材料参数如表 2 所示。

表 2 主镜室组件系统材料参数表

Table 2 Material parameters for the primary mirror cell assembly

Material	Young's modulus/MPa	Density t/mm^3	Poisson's ratio
Zerodur	90 300	2.53e-9	0.24
16 Mn	206 000	7.8e-9	0.30
4J32	147 000	8.1e-9	0.25
ZTC4	111 720	4.4e-9	0.29
Bond	$\begin{bmatrix} 1 & 065.504 & 585.572 & 235.728 & 0 & 0 & 0 \\ 585.572 & 1 & 065.504 & 235.728 & 0 & 0 & 0 \\ 235.728 & 235.728 & 378.312 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 240 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 240 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 240 & 0 \end{bmatrix}$ Stiffness matrix		

主镜和主镜室组件系统的有限元模型如图 3 和图 4 所示。

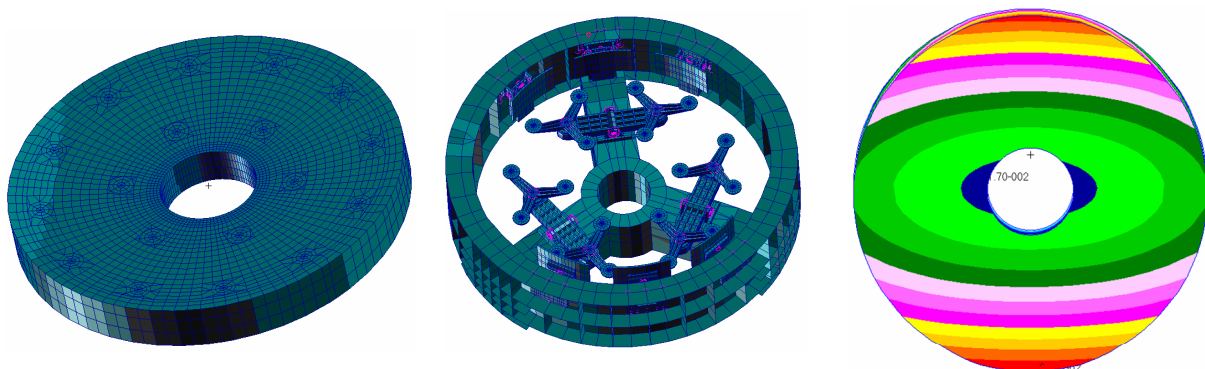


图 3 主镜有限元模型

图 4 主镜室组件有限元模型

图 5 主镜变形图

Fig.3 FEM of the primary mirror

Fig.4 FEM of the primary mirror cell assembly

Fig.5 Deformation plot of the primary mirror

我们对整个主镜室组件(包含主镜)在光轴水平状态(检测状态)下进行分析计算，约束主镜室两侧位置处

除了绕水平轴旋转之外的五个自由度,同时施加一个单位的重力加速度。在此工况下主镜的重力变形云图如图 5 所示。计算得到主镜 PV 值 57.4 nm, RMS 值 11 nm,分析过程中认为在变形之前镜面是理想的,因此计算结果可以认为是主镜室组件带来的镜面面型误差。

3 试 验

采用 ZYGO 干涉仪对主镜面型进行检测,由专门的检测支撑架对主镜室两侧支撑,使主镜处于光轴水平状态放置。在主镜加工过程中磨制到 0.1λ 和最终 0.025λ 时,分别进行了干涉仪检测,其检测结果见图 6 和表 3。

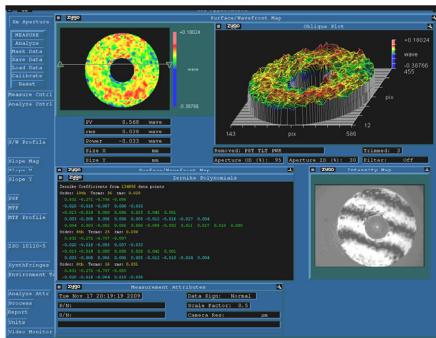


图 6 最终检测结果

Fig.6 Measurement result

表 3 面型检测结果($\lambda=632.8\text{ nm}$)

Table 3 Surface measurement results

Mirror surface RMS	RMS with supports system	Mirror surface RMS	RMS with supports system
0.1λ	0.115λ	0.025λ	0.038λ
	0.015λ		0.013λ
FEM result: RMS=11 nm= 0.017λ			

从计算结果中可以看出,有限元结果与实际检测结果相比稍微偏大,我们认为是在分析过程中由于各种约束处(MPC)的约束刚度过大引起的。

将底支撑垫和镜子背部连接重新进行计算,得出主镜 PV 值 162.6 nm, RMS 值 30.1 nm,远远大于上述分析值。说明如果望远镜在使用过程中主镜不会出现负角度位置,则主镜仅需放置在底支撑垫上,由专门的机构来压紧即可,用胶粘连接在一起会使得主镜面型质量有较大的下降。

4 结 论

文章从整体出发,对整个主镜室组件在检测状态下进行了有限元分析,得出主镜室组件引入的主镜面型误差 RMS 值为 11 nm,与实测值一致。该文打破了以往的以裸镜为研究对象计算主镜镜面面型 PV 值和 RMS 值的思想,使得结论更加符合实际情况。也间接的证明了主镜室组件设计的合理性和有限元模型的正确性。

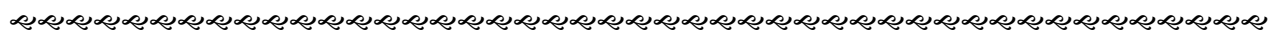
参考文献

- [1] 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.
CHENG Jing-quan. **Principle and Design of Astronomical Telescope** [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003.
- [2] 王富国, 杨洪波, 杨飞, 等. 大口径主镜轴向支撑点位置优化分析 [J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(6): 877-880.
WANG Fu-guo, YANG Hong-bo, YANG Fei, *et al.* Optimization and analysis for the axis support points position of the large aperture mirrors [J]. **Infrared and Laser Engineering**, 2007, **36**(6): 877-880.
- [3] 吴小霞, 杨洪波, 张景旭, 等. 大口径球面镜支撑系统的优化设计 [J]. 光子学报, 2009, **38**(1): 129-132.
WU Xiao-xia, YANG Hong-bo, ZHANG Jing-xu, *et al.* Optimal design of support system for the large-aperture sphere mirror [J]. **ACTA PHOTONICA SINICA**, 2009, **38**(1): 129-132.
- [4] 刘国庆, 马文礼. 大口径轻质镜支撑的有限元分析 [J]. 光电工程, 2001, **28**(5): 14-17.
LIU Guo-qing, MA Wen-li. The Finite Element Analysis for Large-Aperture Lightweight Mirror Mount [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2001, **28**(5): 14-17.

(下转第 92 页)

参考文献:

- [1] 李建军, 徐亮. 青光眼筛查的意义及方法评价 [J]. 国外医学: 眼科学分册, 2003, **27**(5): 265-270.
- [2] 闫峰, 解卫春, 郭照江. 青光眼筛查的必要性及方法评价 [J]. 医学与哲学, 2005, **26**(10): 51-53.
YAN Feng, XIE Wei-chen, GUO Zhao-jiang. Necessity and Method Evaluation of Glaucoma Screening [J]. **Medicine and Philosophy**, 2005, **26**(10): 51-53.
- [3] 魏佳, 高卫平, 贺忠江, 等. 四点视野计的研制 [J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2009, **13**(9): 1633-1636.
WEI Jia, GAO Wei-ping, HE Zhong-jiang, *et al.* Development of four-point perimeter [J]. **Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research**, 2009, **13**(9): 1633-1636.
- [4] Michael Wall. What's new in perimetry [J]. **Journal of Neuro-Ophthalmol**(S1070-8022), 2004, **24**(1): 46-55.
- [5] Weber J, Diestelhorst M. Perimetric follow-up in glaucoma with a reduced set of test points [J]. **Ger J Ophthalmol** (S0941-2921), 1992, **1**(6): 409-414.
- [6] 王欢. 四点阈值视野检查对快速筛查青光眼性视野缺损的诊断价值 [D]. 天津: 天津医科大学, 2007: 49-50.
WANG Huan. The Diagnostic Value of Rapid Screening of Glaucoma Visual Field Defect with the Perimetry of Four Points Threshold [D]. Tianjin: Tianjin Medical University, 2007: 49-50.



(上接第 87 页)

- [5] 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.
WANG Fu-guo, YANG Hong-bo, ZHAO Wen-xing, *et al.* Lightweight design and analysis of a 1.2 m SiC primary mirror [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2009, **17**(1): 85-91.
- [6] 程刚, 蒋世磊. 大口径反射镜侧支撑结构力学分析 [J]. 光电工程, 2007, **34**(3): 50-53.
CHENG Gang, JIANG Shi-lei. Mechanical analysis on the lateral support structure of large aperture mirror [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2007, **34**(3): 50-53.
- [7] MICHELS G J, GENGERG V L. Finite element modeling of nearly incompressible bonds [J]. **Proc. of SPIE**(S0277-786X), 2002, **4771**: 287-295.
- [8] 韩旭, 吴清文, 董得义, 等. 室温硫化胶层建模在透镜结构分析中的应用 [J]. 光学 精密工程, 2010, **18**(1): 118-125.
HAN Xu, WU Qing-wen, DONG De-yi, *et al.* Application of RTV adhesive modeling to structure analysis of reflective mirror [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2010, **18**(1): 118-125.
- [9] Alson E H. Analysis of adhesive bonds in optics [J]. **Proc. of SPIE**(S0277-786X), 1998, **1993**: 2-7.
- [10] Simon C F, Martin R S, Lester M C. Correlation of RTV properties to test data and its effect on the AXAF mirror performance [J]. **Proc. of SPIE**(S0277-786X), 1990, **1333**: 314-324.