第 3 卷　第 6 期　　中国光学与应用光学　　Vol. 3　No. 6
2010 年 12 月　　Chinese Journal of Optics and Applied Optics　　Dec. 2010

文章编号　1674-2915(2010) 06-0644-05

1 m口径主反射镜支撑系统的优化设计

孙　宁[1,2]

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 应用有限元法并借助有限元分析软件建立了主镜的三维实体有限元模型, 对 1 m 主镜的支撑系统进行了优化设计。分析比较了两种常用主镜侧支撑结构, 优化确定了轴向支撑半径、侧支撑方式和侧支撑点位置。分析计算显示主镜处于不同俯仰角位置时的最大面形精度 RMS 值为 5. 3 nm, 满足设计指标要求, 该有限元优化设计方法和过程不受主镜直径及厚度的影响, 适用于平面、球面、非球面甚至异形面主镜的设计。结果表明了所设计的支撑系统方案的合理性与可行性。

关　键　词: 主反射镜; 支撑系统; 有限元分析; 轴向支撑; 侧支撑
中图分类号: TH745　　**文献标识码**: A

Optimal design of support system for a 1 m diameter primary mirror

SUN Ning[1,2]

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033*, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039*, China)*

Abstract: The support system of a one-meter primary mirror was optimally designed by the finite element method. For the analysis, the 3D solid finite element model was estabilished by the finite element software. Two kinds of lateral support structures were compared, then the axial support-ring radius, lateral support form and the lateral support position were determined after the optimum design. The mirror deformations with different pitching angles were calculated, and the maximum Root-mean-square(RMS) value of the surface deformation is 5. 3 nm. Obtained results satisfy the design requirement and show that the support system is reasonable and feasible. This optimal method of finite element and calculated process are independence on the diameter and thickness of the primary mirror, and are also useful for the designs of primary mirrors in the planar form, spherical form and allotype form.

Key words: primary mirror; support system; finite element analysis; axial support; lateral support

收稿日期: 2010-07-22; **修订日期**: 2010-09-24
基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目

1　引　言

在光电经纬仪的望远镜系统中, 主反射镜是光电测量设备的关键部件, 其面形对光学系统的成像质量起着决定性的作用。主镜支撑系统合理与否, 在一定程度上影响着主镜的面形以及望远镜的成像质量。当望远镜处于不同俯仰角时, 主镜的自重方向与主镜光轴夹角也不同, 因此支撑系统必须包括轴向支撑和侧支撑两部分。早在上世纪 60 至 70 年代, 就有了经典的平板理论和动态应力释放法等被用于预先分析支撑系统对主镜面形的影响[1~4]。随着光学技术的不断发展, 人们对光电经纬仪的口径要求越来越大, 主镜的口径、重量也随之增大, 用传统经验对大口径镜面进行设计存在很大风险[5]。目前采用较多的方法是有限元法, 该方法能够建立精确的主镜模型, 准确计算出主镜在支撑系统和重力作用下的变形。

本文采用有限元分析法对某经纬仪 1 m 口径主反射镜的轴向支撑和侧支撑进行优化设计, 并计算得出了主镜在工作状态时的镜面变形情况[6~9]。

2　主镜参量

该平背式非球面主反射镜材料为微晶玻璃 (Zerodur), 材料的主要物理性质如表 1 所示。主镜面为抛物面, 通光口径为 Φ1 000 mm, 外径为 Φ1 030 mm, 中心孔直径为 Φ172 mm, 工作时主镜镜面面形精度 RMS 值优于 λ/30 (λ = 632.8 nm)。

表 1　Zerodur 物理性质

Tab. 1　Properties of Zerodur

密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比
2.53 ×10^3	90.6	0.24

3　支撑方案

在大口径光电经纬仪望远系统中, 为保证主镜的面形精度, 必须采用合理的主镜支撑系统, 尽可能减小主镜工作时的镜面变形。为避免将主镜室的结构变形传递到主镜上, 主镜支撑一般采用浮动支撑, 如使用重锤平衡杠杆支撑或液压支撑等。本文涉及的主镜, 采用的是中心轴定位及 whiffle-tree 轴向支撑与重锤平衡杠杆侧支撑相结合的支撑系统。该支撑系统仅将主镜室变形中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, 引起望远镜的指向准确度误差, 而不会对面形精度产生影响[10]。

该反射镜的径厚比 < 10∶1, 且不等厚, 因此传统的平板理论解析法已不再适用, 而动态应力释放法需对边界条件做很多的简化。近些年工程结构分析设计中得到广泛应用的有限元法的基本思想是将连续的求解区域离散为有限个按照一定方式相互连接在一起的单元组合体, 每个单元体与其相邻的单元通过共有的节点相连。节点应力、应变和弯矩可以通过虚功原理进行计算。采用有限元法, 借助 Ansys 等有限元分析软件, 可以准确地建立支撑系统下主镜的数学模型, 完成主镜轴向支撑点和侧向支撑位置、支撑方式的优化设计, 并计算出主镜的镜面变形。该方法不受主镜的径厚比、厚度变化及镜面形状的影响[10~12]。

4　轴向支撑

轴向支撑引起主镜镜面最大变形出现在主镜光轴竖直向上时的位置, 即重力方向与主镜背面垂直, 在此位置对主镜轴向支撑进行优化设计。

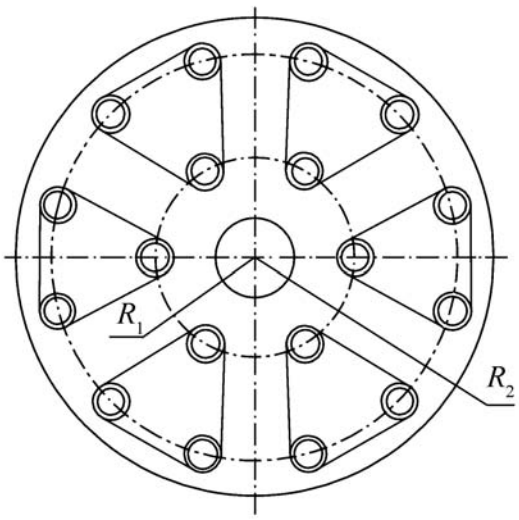

图 1　轴向支撑点排列布局

Fig. 1　Configuration of axial support points

根据经验并考虑加工装调,选取双圈 18 点的支撑方式,支撑点分布排列方案如图 1 所示。每个支撑点均采用外径为 Φ 80 mm、内径为Φ 60 mm的环形支撑垫。

建立主镜实体模型后,约束主镜中心孔上节点径向位移,限制主镜背部支撑垫区域向主镜背部方向的位移,对支撑圈半径进一步优化。根据经验公式[11],双圈优化初始半径分别为 $R_1 = 0.4227R_0$, $R_2 = 0.8165R_0$。优化后获得支撑半径的最优值为 $R_1 = 214.4$ mm, $R_2 = 438.4$ mm。

此时主镜镜面变形云图如图 2 所示,镜面面形精度 RMS = 2.3 nm。

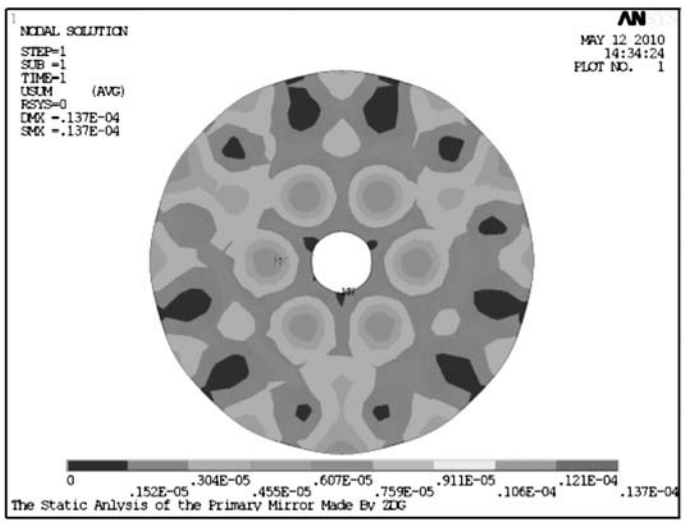

图 2 轴向支撑引起的主镜变形云图

Fig. 2 Mirror deformation diagram due to axial support

5 侧支撑

侧支撑引起主镜镜面最大变形出现在主镜光轴水平时的位置,即重力方向与主镜中心轴垂直,在此位置对两种常用主镜侧支撑进行优化设计和方式选择。

一种常用主镜侧支撑方式是作用于主镜外圆柱面,如图 3 中(a) 所示。主镜中心孔处由芯轴定位,6 组杠杆平衡重锤机构对主镜进行侧支撑,支撑盘为弧形圆盘,与主镜外圆柱面浮动接触,在正、倒镜时分别有 3 组机构起作用。同侧 3 组机构在工作时提供给主镜的支撑力在重力方向上的分力是相等的,且均处于主镜质心面内(定义经过主镜质心并平行于主镜背面的平面为质心面)。

建立主镜实体模型后,在主镜外圆柱面上与

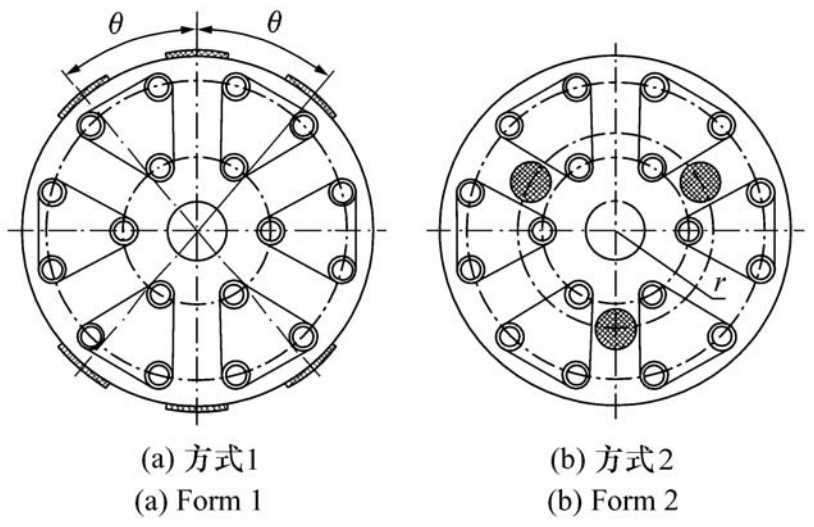

图 3 两种侧支撑方式

Fig. 3 Two kinds of lateral support manners

侧支撑垫相接触处的 3 个区域施加均匀分布压力 p,对左右两组侧支撑偏角 θ进一步优化。支撑垫尺寸长 180 mm、宽 100 mm,取偏角初始值 $\theta_0 = 45°$,优化结果为 $\theta_1 = 42°$。此时主镜镜面变形云图如图 4 所示,镜面面形精度 RMS = 9.5 nm。

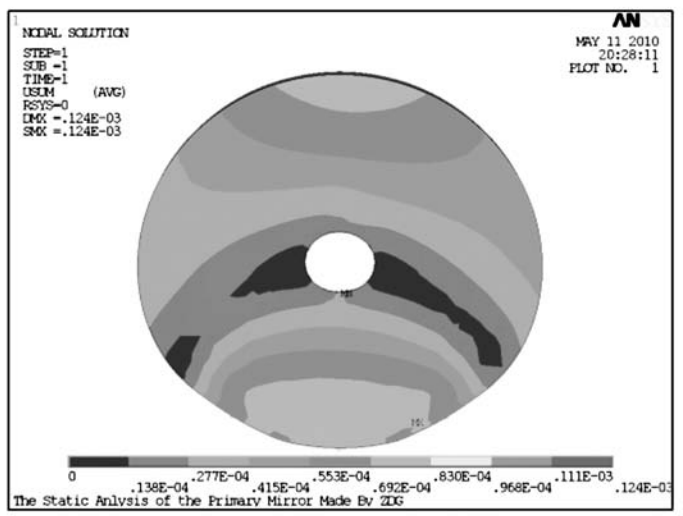

图 4 第一种侧支撑引起的主镜变形云图

Fig. 4 Mirror deformation diagram of the first lateral support

另一种主镜侧支撑方式为作用于主镜背部所开盲孔内圆柱面,如图 3(b) 所示。主镜中心孔处由芯轴定位,主镜背部均布有 3 个盲孔,3 组重锤平衡杠杆机构对主镜进行侧支撑,正、倒镜时均起作用。3 组机构提供给主镜的支撑力相等,均竖直向上并处于主镜质心面内。

建立主镜实体模型后,在主镜背部 3 个盲孔支撑区域内施加轴承力,对 3 个均布盲孔所在圆周半径 r 进一步优化。盲孔内径为 Φ 116 mm,取圆周半径初始值 $r_0 = 300$ mm,优化结果为 $r_1 = 286.8$ mm。此时主镜镜面变形云图如图 5 所示,

面形精度 RMS = 5. 3 nm。

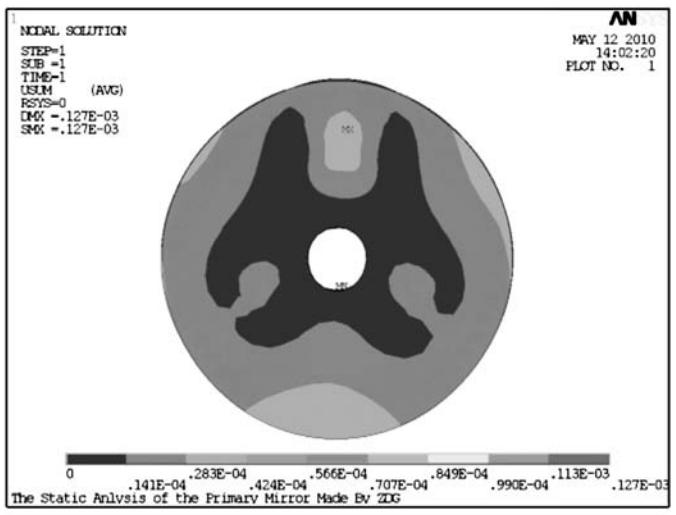

图 5　第二种侧支撑引起的主镜变形云图

Fig. 5　Mirror deformation diagram of the second lateral support

比较图 4 和图 5 可以发现, 第二种侧支撑方式的效果要明显好于第一种, 并且由于第一种侧支撑位于主镜外侧, 使主镜室外径尺寸大于第二种, 设备重量也相应增大。因此, 本文选择第二种侧支撑结构为主镜进行支撑。

在芯轴以及优化后的底支撑、侧支撑的综合支撑系统作用下, 对主镜在不同工作角度时的镜面面形精度进行分析, 结果如图 6 所示。该经纬仪处于工作状态时由重力和支撑系统引起的主镜最大面形精度 RMS 值为 5. 3 nm。要求该主镜加工后面形精度 RMS 值为 λ/40(λ= 632. 8 nm) , 即

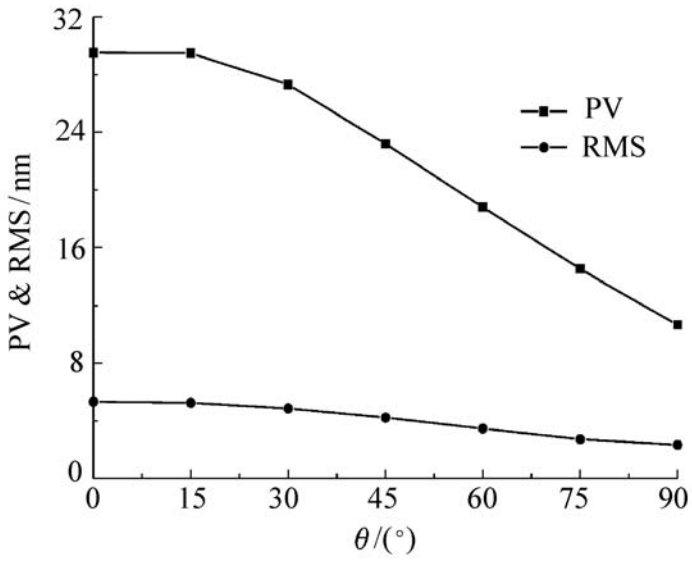

图 6　各工作角度镜面面形精度

Fig. 6　Mirror deformation precision due to axial support

15. 82 nm, 两者叠加后可以得到主镜工作状态时镜面面形精度最大 RMS 约为 16. 68 nm, 即 λ/37. 9, 满足优于 λ/30 的要求。

6　结　论

借助有限元分析软件, 建立了主镜实体模型, 分析比较了两种侧支撑方式, 确定了轴向支撑点位置和侧支撑方式、侧支撑点位置, 分析计算得出了主镜处于工作状态时最大面形精度 RMS 值, 以此判断支撑系统合理与否。该有限元优化设计方法和过程不受主镜直径及厚度的影响, 对于平面、球面、非球面甚至异形面主镜均适用。

参考文献:

[1] MALVICK A J, PEARSON E T. Theoretical elastic deformations of a 4-m diameter optical mirror using dynamic relaxation [J]. *Appl. Opt.*, 1968, 7(6): 1207-1212.

[2] SELKE L A. Theoretical elastic deflections of a thick horizontal circular mirror on a ring support[J]. *Appl. Opt.*, 1970, 9(1): 149-153.

[3] SELKE L A. Theoretical elastic deflections of a thick horizontal circular mirror on a double-ring support[J]. *Appl. Opt.*, 1970, 9(6): 1453-1456.

[4] NELSON J E, LUBLINER J, MAST T S. Telescope mirror supports: plate deflections on point supports[J]. *SPIE*, 1982, 332: 212-228.

[5] 徐加慧, 夏立新, 陈诚. 基于有限元法的主镜底支撑的优化[J]. 机械设计与制造, 2004(3): 67-69.
XU J H, XIA L X, CHEN CH. Optimization analysis for the underside support of the primary mirror by the finite element method[J]. *Machinery Design Manufacture*, 2004(3): 67-69. (in Chinese)

[6] MACK B. Deflection and stress analysis of a 4.2-m diameter primary mirror of an altazimuth-mounted telescope[J]. *Appl. Opt.*, 1980, 19(6): 1000-1010.

[7] 丁福建, 李英才. 反射镜浮动支撑的应力与变形分析及支撑参量的优化[J]. 光子学报, 1998, 27(11): 1041-1045.
DING F J, LI Y C. The stress and strain analysis of main reflector with uniform pressure support and support angle optimi-

zation[J] . *Acta Photonica Sinica*, 1998, 27(11) : 1041-1045. (in Chinese)

[8] 李福, 阮萍, 赵葆常. 重力作用下平面反射镜变形研究[J] . 光子学报, 2005, 34(2) : 272-275.
LI F, RUAN P, ZHAO B CH. Study on the surface deformation of flat reflector under gravity load[J] . *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(2) : 272-275. (in Chinese)

[9] 惠彬, 李景镇, 裴云天, 等. 大口径折反射式光学系统的光机结合分析[J] . 光子学报, 2006, 35(7) : 1117-1120.
HUI B, LI J ZH, PEI Y T, *et al*. . Integrated analysis of optics and mechanics in larger aperture catadioptric optical system [J] . *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(7) : 1117-1120. (in Chinese)

[10] 吴小霞, 杨洪波, 张景旭, 等. 大口径球面支撑系统的优化设计[J] . 光子学报, 2009, 38(1) : 129-132.
WU X X, YANG H B, ZHANG J X, *et al*. . Optimal design of support system for the large-aperture sphere mirror[J] . *Acta Photonica Sinica*, 2009, 35(7) : 1117-1120. (in Chinese)

[11] 郭疆, 何欣. 大口径空间遥感相机主反射镜支撑设计[J] . 光学 精密工程, 2008, 16(9) : 1642-1647.
GUO J, HE X. Design of support for primary mirror of space remote sensing camera[J] . *Opt. Precision Eng.* , 2008, 16 (9) : 1642-1647. (in Chinese)

[12] 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 F G, YANG H B, ZHAO W X, *et al*. . Lightweight design andanalysis of a 1. 2 m SiC primary mirror[J] . *Opt. Precision Eng.* , 2009, 17(1) : 85-91. (in Chinese)

[13] WILSON R N. *Reflecting Telescope Optics* Ⅱ, *Manufacture, Testing, Alignment, Modern Techniques*[M] . Berlin: Springer, 1999: 242-259.

作者简介: 孙 宁(1974—) , 男, 吉林辽源人, 副研究员, 主要从事主镜支撑系统方面的研究。

E-mail: nicolas1974@ sina. com