

大口径旋转偏摆棱镜径向支撑优化设计

李安虎^{1,2} 李志忠¹ 孙建锋² 卞永明¹ 刘立人²

(¹ 同济大学机械工程学院, 上海 201804
² 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 支撑方式对大型光学元件的镜面变形及应力集中具有重要影响。以大口径、非均匀质量分布、二维旋转棱镜为研究对象,综述了多点支撑和面支撑方式,提出了可调分段面支撑方法,并给出具体的方案设计。系统地分析了面支撑方式下棱镜的运动过程,得到最危工况。采用两步优化方法对该工况下的支撑夹角进行优化,优化后棱镜运动过程中的最大变形峰谷值与最大等效力值相比优化前分别减小了7.40%和11.45%,支撑效果得到了明显改善,验证了该支撑方式的合理性及可行性。

关键词 光学器件;径向支撑;有限元分析;两步优化;扫描镜

中图分类号 TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1212005

Optimization Design of Radial Support for Large-Aperture Rotating and Tilting Prism

Li Anhu^{1,2} Li Zhizhong¹ Sun Jianfeng² Bian Yongming¹ Liu Liren²

(¹ College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China
² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The supporting way is crucial to the deformation and stress concentration of any optical elements. As the large-aperture prism is characterized with non-uniform quality, rotating and tilting motion, an adjustable segment-surface support way is proposed, and its specific program is designed. This paper analyzes the motion process under this support and gets the most dangerous condition. The optimization of the supporting angle under the condition is also made by the two-step optimization method, as a result, the maximum deformation peak-to-valley (PV) value and von Mises stress value in dynamic process have respectively decreased by 7.40% and 11.45% after optimization, which validates the feasibility and rationality of the optimized support way.

Key words optical devices; radial support; finite element analysis; two-step optimization; scanner

OCIS codes 120.4570; 120.4800; 120.5800; 230.5480

1 引言

大口径棱镜广泛应用于精密光束的扫描、对准及跟踪,通常需要采用特殊的支撑方式以满足高精度光束的控制要求^[1,2]。相关研究提出了很多大型光学单元的支撑方法,研究重点集中在两个方面:镜子的支撑方式及优化。对大口径棱镜而言,径向支撑方法是决定其自重变形的重要因素,选择合理的支撑方法至关重要^[3,4]。常用径向支撑方法主要有

多点支撑、面支撑、水银管支撑、链条及钢带支撑以及挠性支撑等,这些支撑方法在大口径反射镜、天文望远镜的支撑安装中得到了成功应用^[5,6]。同时,国内外学者提出了许多大型光学单元支撑的优化方法。Myung K. Cho^[7]使用最小二乘算法对镜子的支撑位置进行优化;吴小霞等^[8]球面反射镜的支撑系统进行优化,确定支撑圈数、支撑半径和支撑点排列组合;Martin等^[9]对多镜望远镜(MMT)主镜的

收稿日期: 2012-07-03; **收到修改稿日期**: 2012-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(50805107)、上海市自然科学基金(12ZR1433400)、中央高校基本科研业务费专项资金、中科院空间激光通信及检验技术重点实验室开放课题和上海市杨浦区人才发展专项基金(鼎元资金)资助课题。

作者简介: 李安虎(1974—),男,博士,副教授,主要从事精密机械与光学测试等方面的研究。

E-mail: yfliah@yahoo.com.cn

支撑力进行了优化;Malvick^[10]通过点支撑与带支撑的优化组合来改善大型镜子的支撑效果。

在前期研究中提出的级联双棱镜扫描方案由两个相同的楔形棱镜组成,棱镜光轴水平放置,具有口径大、质量分布不均匀和旋转偏摆运动等特点^[11]。显然,水银管支撑、链条支撑及钢带支撑等支撑方法显然无法满足棱镜的运动要求,而挠性支撑又由于在运动过程中存在光轴抖动而无法保证系统扫描精度。理论上,多点支撑可以满足棱镜旋转及偏摆运动的使用要求,但是对于大口径棱镜,尤其是宽径比较小时,多点支撑将给棱镜带来较大的应力集中及镜面变形^[12]。与多点支撑相比,全面接触支撑由于增大了支撑面积可以有效地改善应力集中,但是又难以实现加工。此外,相关文献研究主要针对大口径镜子的静态或准静态^[13](缓慢运动)支撑方法,很少考虑动态过程中表面变形及应力集中的变化情况。因此,建立有效的大口径运动棱镜径向支撑结构具有重要的工程意义。

2 分析模型及径向支撑

2.1 分析模型

级联双棱镜由两个几何参数相同的楔形棱镜组成,采用复合联动的方法控制折射光束的精确指向,其中粗扫描由力矩电机控制双棱镜组件在外镜框中旋转运动来实现,精扫描由直线电机驱动外镜框组件的偏摆运动来实现^[11]。由于两个楔形棱镜总成的几何参数及运动方式相同,为了简化分析过程,仅分析了单个棱镜总成,如图1所示。棱镜绕光轴整周旋转,最大旋转速度为 $60^\circ/\text{s}$,并在主截面法向方向 $0^\circ\sim 10^\circ$ 偏摆。设定棱镜的薄端朝上为旋转运动的起始位置,棱镜平面侧与光轴垂直位置为偏摆起始位置。

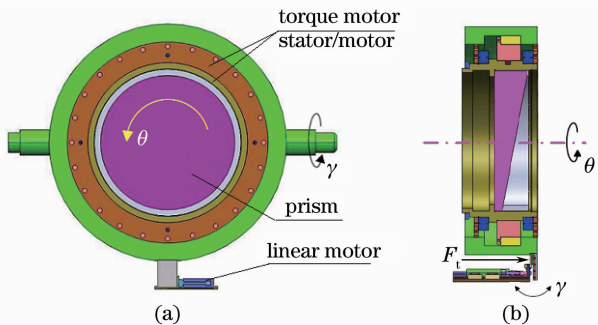


图1 运动模型。(a)主视图;(b)剖视图
Fig.1 Motion model. (a) Principal view;
(b) section view

棱镜的几何外形为:直径 $\Phi=600\text{ mm}$,通光口径 $\Phi_1=500\text{ mm}$,楔角 $\beta=10^\circ$,薄端厚度 $d=30\text{ mm}$,文中以棱镜通光口径 Φ_1 内镜面变形(文章后面简称为棱镜变形)波峰波谷(PV)值及等效应力值作为棱镜应变及应力的评估指标。涉及的部件材料属性如表1所示。

表1 材料性能
Table 1 Material properties

Terms	Material	Density $\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Elastic modulus E / GPa	Passion ratio μ
Prism	K9	2530	81.32	0.209
Arc pad	Nylon 66	1050	28.3	0.4

2.2 多点支撑

点支撑方式可以由不同的支撑点数目与支撑点位置来组合实现,不同的点支撑方式会给棱镜带来不同的应力集中及表面变形。然而,棱镜变形与点支撑方式的对应关系十分复杂。前期研究中,借助有限元软件对不同的点支撑方式进行静力学分析。分析结果表面:棱镜的应力集中随着支撑点数目的增加而减少;然而棱镜的变形与支撑点的数目或位置之间并不完全呈现规律的对应关系。本文选择3点支撑、6点支撑、9点支撑及12点支撑四种典型情况举例说明。如图2所示,支撑点在径向均匀分布,并都布置在距离棱镜平面侧 20 mm 的同一平面内,

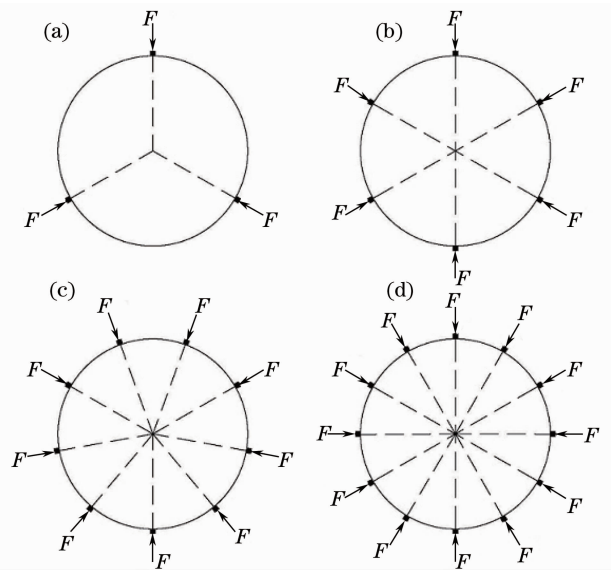


图2 多点支撑。(a)3点支撑;(b)6点支撑;
(c)9点支撑;(d)12点支撑

Fig.2 Multi-point support. (a) Three-point support; (b) six-point support; (c) nine-point support; (d) twelve-point support

各支撑点上都施加一定的预紧力以确保支撑紧固，棱镜两侧添加轴向位移约束。

采用静力学分析方法，棱镜的变形及等效应力分析结果如表 2 所示。随着支撑点数目的增加(即支撑面积的增大)，棱镜的等效应力值越小；然而，棱镜的变形 PV 值并不符合这一规律，例如相比 6 点支撑，9 点支撑及 12 点支撑下棱镜的镜面变形更大。

表 2 几种多点支撑棱镜表面变形及等效应力结果对比

Table 2 Results comparisons of the surface deformation and the maximum von Mises stress for multi-point supporting prism

Support way	Deformation		von Mises stress /Pa
	d_{PV}/nm	ϵ_{RMS}/nm	
Three-point	150.33	57.48	1.0×10^6
Six-point	67.13	22.61	533830
Nine-point	99.01	47.37	309040
Twelve-point	87.37	44.07	214718

2.3 可调分段面支撑

由上节结论可知，增大支撑面积有利于改善棱镜应力集中情况，面支撑相对多点支撑可以有效的增大棱镜支撑面积，然而全圆周面接触方式加工难以实现，因此，提出一种可调分段面支撑方法，分段面数目可以根据实际情况进行选择。使用三面支撑，其结构在镜框内沿圆周方向对称布置，其中一个面支撑结构布置在棱镜厚端，另两个面支撑结构沿棱镜主截面对称分布，相对于棱镜中心成支撑角度 $\alpha = 120^\circ$ ，如图 3 所示。每个面支撑结构由螺钉与弧形尼龙块组成，尼龙块弧面对应的圆心角为 12° 。由于镜框的内径 Φ_N 比棱镜直径 Φ 大 1 mm，通过调节螺钉可以改变棱镜与镜框的装配松紧程度。安装棱镜时，向外调节螺钉，增大棱镜与支撑面的间隙；紧固棱镜时，向内调节 3 个螺钉，三弧形尼龙块压紧棱镜，保证棱镜旋转及偏摆过程稳固支撑。通过调节三个调节螺钉还可以对棱镜光轴进行细微调节。

有限元模型中，棱镜与弧形垫片采用 Solid95

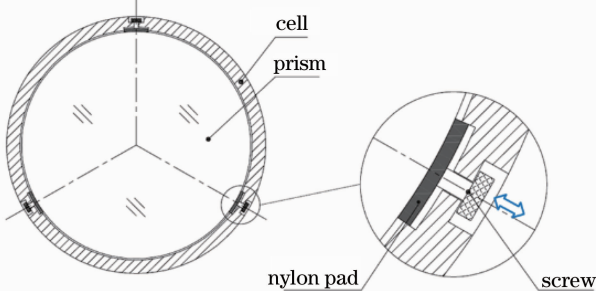


图 3 三面支撑

Fig. 3 Three segmental surfaces support way

单元，棱镜两侧最外圈节点添加轴向位移约束，弧形垫片与棱镜之间添加 Multipoint Constraint 算法面面柔性接触。采用静力学分析方法，棱镜变形 PV 值为 41.93 nm，均方根(RMS)值为 19.54 nm，棱镜等效应力为 0.11 MPa。

相比多点支撑，面支撑下棱镜的应力集中与表面变形都得到了很大程度的改善。对于 K9 玻璃材质，其抗拉强度达到 28 MPa，抗压强度更是达到 630 MPa，但是因为玻璃在制造过程中不可避免的在表面产生肉眼看不见的裂纹，又称格里菲思裂纹，使得实际断裂强度远小于理论值^[14]。对于玻璃材质，造成其破损的一般为冲击载荷，此时玻璃的强度等级要小于理论值两个数量级以上^[14]。大口径旋转偏摆棱镜由于质量分布不均匀而引起棱镜偏心，运动过程中将对棱镜形成一定的冲击。为了提高系统扫描精度以及保证棱镜支撑安全，需对棱镜的支撑方式做进一步优化设计。

3 基于面支撑的优化方法

3.1 重心位置分析

楔形棱镜质量分布不均匀，旋转过程中重心位置偏离旋转轴，将产生离心加速度。以棱镜平面侧圆心为坐标系原点，光轴为 Z 轴，棱镜主截面法向方向为 Y 轴，建立坐标系。棱镜旋转初始位置，即棱镜薄端朝上位置，重心计算可表示为

$$x_c = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} = \frac{\sum v_i x_i}{\sum v_i}, \quad y_c = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i} = \frac{\sum v_i y_i}{\sum v_i},$$

$$z_c = \frac{\sum m_i z_i}{\sum m_i} = \frac{\sum v_i z_i}{\sum v_i}. \quad (1)$$

求出棱镜的重心坐标为 (0 mm, -47.86 mm, 45.67 mm)，棱镜的重心偏移光轴 47.86 mm。当棱镜以 $60^\circ/s$ 速度旋转时，将产生大小为 0.05 m/s^2 、方向随重心位置规律变化的离心加速度。

3.2 旋转过程分析

旋转过程中，棱镜重心位置不断变化，必须分析棱镜在整个旋转过程中的镜面变形与应力分布情况。

使用有限元软件 ANSYS 对棱镜进行参数化建模，通过改变棱镜的旋转角度 θ 得到棱镜在不同旋转位置的变形情况，棱镜变形 PV 值与旋转角度 θ 关系如图 4 所示。曲线沿 $\theta = 180^\circ$ 位置对称分布，并在 $\theta = 90^\circ$ (或 $\theta = 270^\circ$) 附近 PV 值最小， $\theta = 180^\circ$ 时 PV 值最大。

当旋转角度 $\theta = 180^\circ$ 时，即棱镜薄端朝下，棱镜

变形 PV 值最大,为最危工况。该工况下的表面变形及应力集中情况如图 5 所示,棱镜变形 PV 值为

42.09 nm,RMS 值为 19.52 nm,棱镜的等效应力为 0.19 MPa。

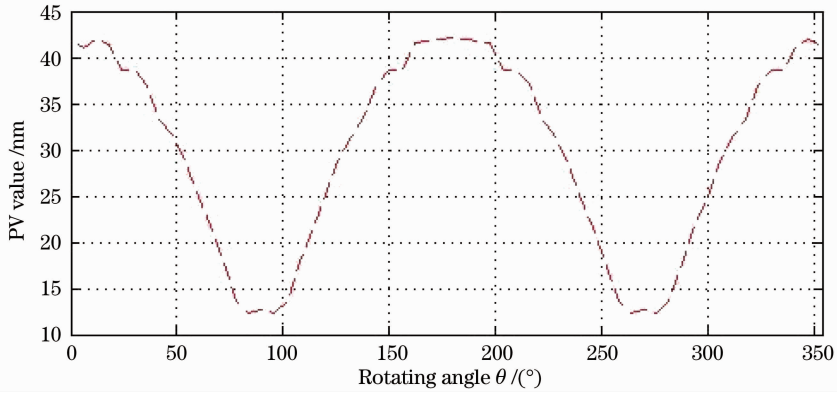


图 4 旋转过程 PV 值变化曲线

Fig. 4 Curve of PV values during the rotating process

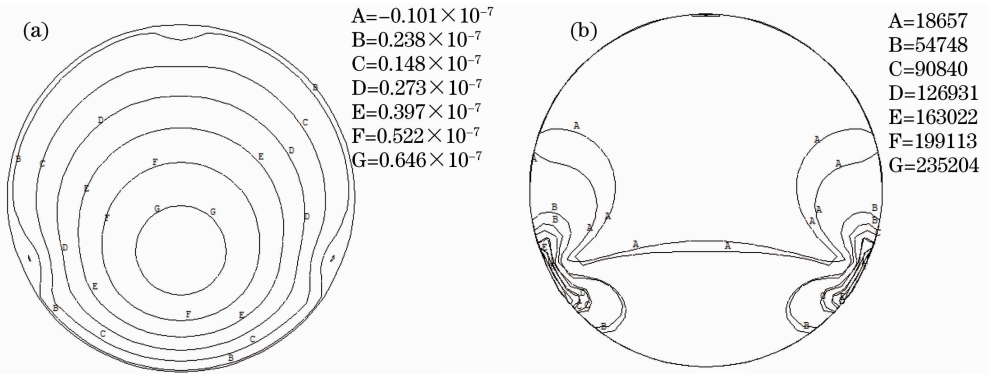


图 5 (a)轴向变形及(b)等效应力矢量图

Fig. 5 (a) Axial deformation and (b) von Mises stress counters

3.3 支撑夹角优化

棱镜自重变形还与支撑夹角 α 有关,为了进一步改善棱镜的支撑效果,对最危工况下(旋转角度 $\theta=180^\circ$)的支撑角 α 进行优化,如图 6 所示。采用两步优化方法:第一步使用 DV SWEEPS 算法^[15]得到变形 PV 值与支撑角 α 的对应关系;第二步基于第一步优化结果,使用 First-Order 优化算法^[15]获取全局最优值。

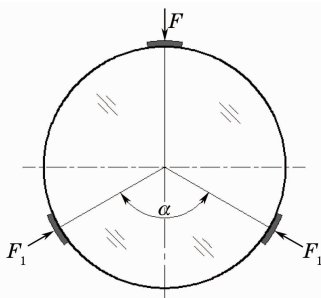


图 6 支撑夹角优化

Fig. 6 Optimization of support angle

第一步:支撑角 α 为设计变量,棱镜变形 PV 值为目标函数,为了避免引起其它工况的变形 PV 值变化过大,设计变量 α 搜索范围设定为 $120^\circ \pm 10^\circ$, DV SWEEPS 优化数学模型为

$$\begin{aligned} \min f_1(\alpha) &= d_{PV}(\alpha, \theta), \quad \theta = 180^\circ \\ \text{s. t.} \quad &\alpha \in [110^\circ, 130^\circ], \end{aligned} \quad (2)$$

式中 \min 为最小值,s. t. 为约束条件。

DV SWEEPS 为等步长搜索方法,在设计空间内完成扫描分析,得到棱镜变形 PV 值随支撑角 α 的变化趋势,为第二步的 First-Order 优化算法提供初始优化序列,缩短设计变量的搜索范围。迭代步长选为 1° ,得到 20 组设计序列,使用 Matlab 软件将这 20 组 PV 值进行拟合,变形 PV 值与支撑角 α 的关系如图 7 所示,当支撑角度 $\alpha=123^\circ$,PV 值最小为 40.68 nm。

第二步: First-Order 优化算法是基于目标函数对设计变量的敏感程度的优化方法,在每次迭代中计算梯度来确定搜索方向,因此它的计算精度高、占

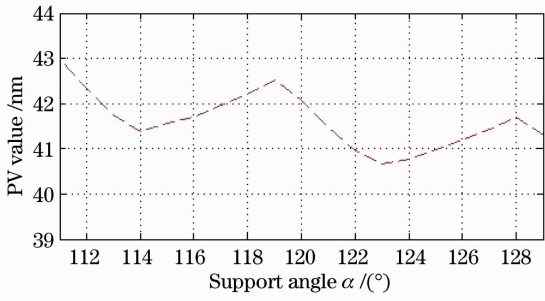


图7 支撑角 α 优化序列

Fig. 7 Optimization series of support angle α

用时间也相对较多。基于第一步优化结果,将 $\alpha = 123^\circ$ 作为优化初值,并将搜索范围设为 $123^\circ \pm 1^\circ$,优化数学模型为

$$\begin{aligned} \min f_2(\alpha) &= d_{PV}(\alpha, \theta), \quad \theta = 180^\circ \\ \text{s. t. } \alpha &\in [122^\circ, 124^\circ]. \end{aligned} \quad (3)$$

优化结果为:当支撑角 $\alpha = 123.46^\circ$ 时,平面侧轴向变形 PV 值最小为 40.27 nm。

3.4 优化前后结果对比

分析结果表明:优化后最危工况下棱镜的最大应力为 0.17 MPa,相比优化前减小 11.45%,棱镜的变形 PV 值为 40.27 nm, RMS 值为 19.51 nm,相比优化前分别减小 7.40% 和 7.66%。

图 8 为优化前、后棱镜旋转过程中的支撑结果对比分析,其中图 8(a)为棱镜变形 PV 值对比分析,图 8(b)为棱镜的等效应力对比分析。旋转过程中,优化后棱镜的变形 PV 值与等效应力值都有一定减小,尤其是 $\theta = 180^\circ$ (最危工况)附近,优化后棱镜的变形与应力集中都得到明显改善。优化后的支撑方式可以改善棱镜旋转过程中的支撑状况,因此该优化方法是合理可行的。

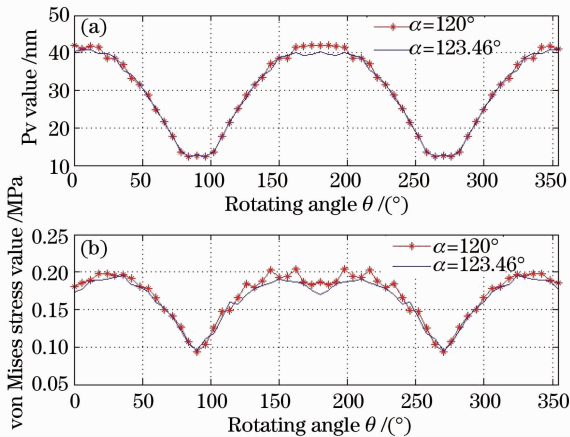


图8 优化前后结果对比。(a)PV 值;(b)等效应力

Fig. 8 Result comparisons before and after optimization.

(a) PV values; (b) von Mises stress

4 偏摆运动分析

本装置需要同时满足粗精耦合扫描功能,考虑到粗扫描时棱镜旋转范围远大于精扫描时的偏摆范围,首先进行了棱镜旋转运动的优化分析,得到了旋转最危工况时的变形情况并对支撑方法进行了优化。

为了实现光束的精密扫描,棱镜需要在 $0^\circ \sim 10^\circ$ 范围内偏摆,图 9(a)为棱镜的偏摆运动模型,图 9(b)为棱镜有限元模型。对棱镜进行参数化建模,使用 DV SWEEPS 算法分析支撑角度优化前、后($\alpha = 120^\circ, 123.49^\circ$)棱镜偏摆过程中的自重变形及等效应力。

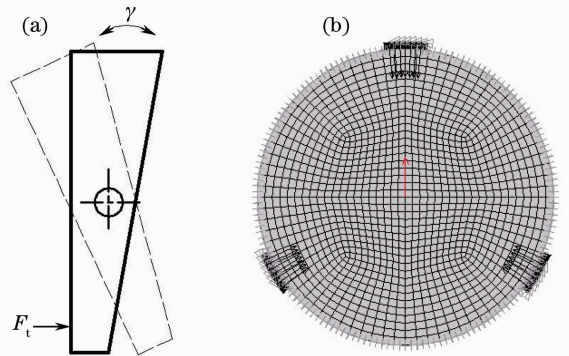


图9 (a)运动模型;(b)有限元模型

Fig. 9 (a) Motion model; (b) finite element model

分析结果如图 10 所示,图 10(a)描述了支撑夹角优化前、后的棱镜变形 PV 值对比情况,图 10(b)为优化前、后的棱镜等效应力值对比情况。优化后棱镜偏摆过程中的变形 PV 值及等效应力值相比优化前都有一定减小,优化后的棱镜支撑更加合理。

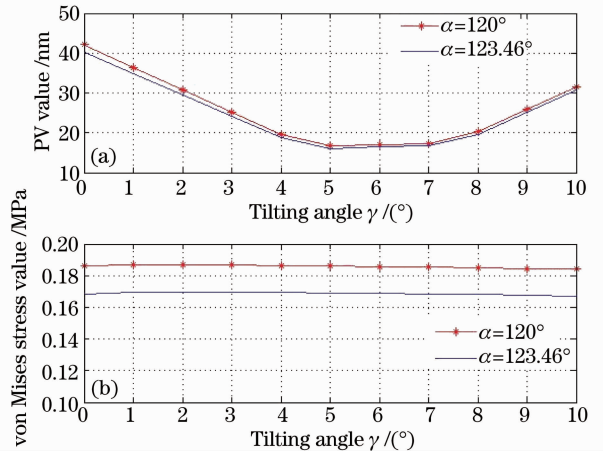


图10 优化前后结果对比。(a) PV 值;

(b)等效应力值

Fig. 10 Result comparisons before and after optimization.

(a) PV values; (b) von Mises stress values

因此,优化设计出的支撑方式对大型旋转偏摆棱镜是合理可行的。

5 结 论

研究了大口径、质量分布不均匀、旋转及偏摆棱镜的支撑方法。通过对传统支撑方法的讨论,提出了可调分段面支撑方法,并使用两步优化方法对棱镜最危工况的径向支撑进行优化。优化后,棱镜运动过程中最危工况下的变形 PV 值与 RMS 值分别减小 7.40% 和 7.66%,等效应力值降低 11.45%。

分析结果表明,优化后的支撑方法不仅能满足大口径运动棱镜的支撑要求,而且可以有效地改善棱镜在旋转偏摆过程中的支撑效果,两步优化法对大口径旋转偏摆楔形棱镜的支撑优化是合理有效的。此外,该优化方法对于其他光学元件结构优化设计具有很好的借鉴意义。

参 考 文 献

- 1 Liu Liren, Wang Lijuan, Sun Jianfeng *et al.*. An integrated test-bed for PAT testing and verification of inter-satellite lasercom terminals[C]. *SPIE*, 2007, **6709**: 41~45
- 2 Ding Fujian, Li Yingcai. The stress and strain analysis of main reflector with uniform pressure support and support angle optimization [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **11**(27): 1041~1045
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数的优化[J]. *光子学报*, 1998, **11**(27): 1041~1045
- 3 Zhang Dejiang, Liu Liren, Xu Rongwei *et al.*. Finite element analysis for wavefront error of lenses induced by gravity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 538~541
张德江,刘立人,徐荣伟等. 透镜自重变形引起波像差的有限元分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 538~541
- 4 Zhong Xianyun, Fan Bin, Zeng Zhige *et al.*. Design simulation and optimization for the flexible displacement support structure based on $\varphi 1.8$ m lightweight reflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0322002

- 钟显云,范斌,曾志革等. $\varphi 1.8$ m 轻质镜能动磨盘技术抛光的柔性限位支撑设计仿真与优化分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0322002
- 5 A. Farah, M. Pedrayes, E. Ruiz *et al.*. Structure analysis of the primary mirror support for the TIM using computer-aided finite element method[C]. *SPIE*, 2000, **4004**: 568~575
- 6 Wang Guofu. Study on the influence of temperature and support style to the 1.2 m SiC primary mirror surface figure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 933~936
王富国. 温度和支撑方式对 1.2 m SiC 主镜面形的影响分析[J]. *光子学报*, 2011, **40**(6): 933~936
- 7 M. K. Cho. Optimization strategy of axial and lateral supports for large primary mirrors[C]. *SPIE*, 1994, **2199**: 841~851
- 8 Wu Xiaoxia, Yang Hongbo, Zhang Jingxu *et al.*. Optimal design of support system for the large-aperture sphere mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 129~132
吴小霞,杨洪波,张景旭. 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
- 9 H. M. Martin, S. P. Callahan, B. Cuerden *et al.*. Active supports and force optimization for the MMT primary mirror[C]. *SPIE*, 1998, **3352**: 412~423
- 10 A. J. Malvick. Theoretical elastic deformation of the steward observatory 230-cm and the science center 154-cm mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(3): 575~585
- 11 Li Anhu, Jiang Xuchun, Sun Jianfeng *et al.*. Laser coarse-fine coupling scanning method by steering double prisms[J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(3): 356~364
- 12 L. Arnold. Uniform-load and actuator influence functions of a thin or thick annular mirror; application to active mirrors support optimization[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(7): 1095~1106
- 13 M. Laslandes, M. Ferrari, E. Hugot *et al.*. In-flight aberrations corrections for large space telescopes using active optics[C]. *SPIE*, 2010, **7739**: 3A1~3A12
- 14 Sakka Sumio, Takahasi Katsuaki, Kagamino Teruo. Glass Handbook[M]. Jiang Guodong *et al.* Transl.. Beijing: China Architecture & Building Press, 1985. 523~529
作花济夫,镜野照雄,高桥克明. 玻璃手册[M]. 蒋国栋等译. 北京:中国建筑工业出版社,1985. 523~529
- 15 S. Moaveni. Finite Element Analysis—ANSYS Theory and Application [M]. Wang Song *et al.* Transl.. 3rd edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1985. 323~329
莫维尼. 有限元分析—ANSYS 理论与应用[M]. 王崧等译. 第 3 版. 北京:电子工业出版社,2008. 323~329

栏目编辑:韩峰