

# 高精度光学平板在三点支撑下自重变形的研究

武东城 高松涛 吴志会 彭石军 曲 艺 苏东奇 苗二龙

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室超精密光学工程研究中心, 吉林 长春 130033

**摘要** 影响高精度光学元件重要的因素之一是支撑结构。主要研究了在三点支撑下, 自重变形量与口径和厚度的关系。采用数值分析、有限元法(FEM)模型与实验验证相结合的方法完成对三点支撑下自重变形量的研究。采用薄板理论推导了在三点支撑下, 重力变形与口径、厚度的关系; 采用有限元法分析了一系列不同厚度、不同口径的平面镜自重变形大小; 利用实验验证了模型的正确性。在薄板理论模型基础上, 完善了自重变形与不同材料、口径、厚度、形状的变形函数, 为快速计算出三点支撑下的自重变形提供理论依据。

**关键词** 光学器件; 三点支撑; 自重变形; 有限元法

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1212001

## Gravity Deformation of High-Precision Optical Flat under Three-Point Support

Wu Dongcheng Gao Songtao Wu Zhihui Peng Shijun  
Qu Yi Su Dongqi Miao Erlong

*Engineering Research Center of Extreme Precision Optics, State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

**Abstract** Support structure is one of the most important factor of high-precision optical components. The relationship between the gravity deformation and caliber and thickness under three-point support is studied. The combination of numerical analysis, finite element method (FEM) and experimental validation is used to complete support under its own gravity deformation of three-point support. Firstly, using sheet theoretical to derivate the relationship between the gravity deformation and caliber, thickness under three-point support; and then, using the FEM analysis of the gravity deformation plane mirror size in a range of different thicknesses and calibers. Finally, the correctness of the model is validated by experiment. Under the basic of the sheet theoretical, the relationship between the gravity deformation and material, caliber, thickness and form is established completely, and it provides theoretical basis for quickly work out the gravity deformation under three-point support.

**Key words** optical devices; three-point support; self-weight deformation; finite element method

**OCIS codes** 120.3620; 200.4560; 240.6700; 080.3620

## 1 引 言

高精度光刻投影物镜是大规模集成电路中关键核心部件, 对于其光学元件的要求极尽严苛。光学镜片的加工和检测要求均方根值(RMS)往往达到1~2 nm以内, 这就要求装配和检测工装引入的误差越小越好。对于支撑检测过程, 很多人做了相关的研究, 提出了许多支撑方式并且研究了不同的支撑方式对引入的误差大小做了细化<sup>[1-2]</sup>。不同的支撑方式因重力会引入不同的元件变形, 导致在检测过程中无法精确测量元件本身的真实面形, 最终造成光学系统本身的波像差增大, 降低成像质量, 无法满足光刻需求<sup>[3-5]</sup>。

由于不同的支撑方式会引入不同的镜面自重变形, 研究人员在支撑方式上进行了很多的研究工作来寻求最佳的支撑方式, 以减小自重变形对光学元件本身面形的影响<sup>[6-7]</sup>。雷江等<sup>[8]</sup>通过有限元建模的方式研究

收稿日期: 2015-05-21; 收到修改稿日期: 2015-06-30

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205)

作者简介: 武东城(1989—), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事精密光学检测技术方面的研究。E-mail: hitwdc@163.com

了两种光学材料在不同的支撑点数下,对光学元件面形如何变化的规律;谭凡教等<sup>[9]</sup>则通过有限元法分析了不同的重力倾角方向下,镜面变形的规律;田伟等<sup>[10]</sup>则研究了三点支撑情况下镜面变形通过旋转去除三叶进而满足物镜需要;Slocum A 等<sup>[11]</sup>研究了不同的支撑结构刚度、不同预紧力在重力作用下的变形大小,提出合理的最优支撑结构尺寸。

尽管研究人员在支撑方式和如何去除因支撑引入的重力变形<sup>[12]</sup>等方面做了很多研究工作。但是,很少有人研究重力变形与光学元件本身的尺寸和厚度有何种关系。对于薄板和中厚板均有相对应的变形理论,但是,这些求解的结果较复杂,通用性不是很高。当遇到具体问题时,往往要进行复杂的有限元分析,费时费力。对于大量的光学元件,急需完善薄板和中厚板下自重变形的规律,寻求简单通用的解析解,方便快速地获得自重变形量大小,为快速估计变形大小提供理论依据。

本文在薄板理论的指导下,采用有限元方法分析了平面镜在不同材料、厚度、口径、形状下,三点支撑引入的自重变形的变化规律。寻求新的模型来完善薄板理论模型,扩大薄板理论的适用范围。

## 2 三点支撑系统有限元分析模型

### 2.1 三点支撑下自重变形的理论分析

平面镜在三点支撑下,分析其受力挠性变形,一般将平面镜材料(熔石英)近似为弹性材料,在理论计算上,一般根据透镜的口径与厚度大小进行划分,对于口径  $D$  较大,而厚度  $h$  较小,需要将透镜当成薄板分析;反之,薄板理论会出现问题,需要作为中厚板分析,此时求解应用弹性力学三维分析问题<sup>[13-14]</sup>。

对于三点支撑来说,按照薄板理论,每个点分担的面积与变形的关系如下<sup>[15]</sup>

$$\delta_{\text{RMS}} = \gamma_n \frac{q}{k} \left( \frac{A}{N} \right)^2, \quad (1)$$

式中  $\delta_{\text{RMS}}$  是变形量的均方根值,  $A$  是板的面积,  $N$  是支撑点数,  $q$  是载荷强度,  $k$  是板的弯曲刚度,  $\gamma_n$  是支撑效率(此时,三点支撑,  $\gamma_3 = 1.19 \times 10^{-3}$ )

$$q = \rho' h, \quad (2)$$

$$k = \frac{E \times h^3}{12(1 - \nu^2)}, \quad (3)$$

$$A = \pi \times \left( \frac{D}{2} \right)^2, \quad (4)$$

式中  $h$  为圆板厚度,  $\rho'$  为比重,  $E$  为弹性模量,  $\nu$  为泊松比,  $D$  为直径。

$$\delta_{\text{RMS}} = \frac{D^4}{h^2} \times \frac{\gamma_3 \times 12 \times \pi^2 \times (1 - \nu^2) \times \rho'}{E \times 2^4 \times N^2}, \quad (5)$$

即

$$\delta_{\text{RMS}} \propto \frac{D^4}{h^2} = \left( \frac{D}{h} \right)^2 \times D^2, \quad (6)$$

$$R = \frac{D}{h} \rightarrow \delta_{\text{RMS}} \propto R^2 \times D^2. \quad (7)$$

薄板理论用于薄镜子可以获得很高精度的解,对于多点支撑结构,由于轴对称性的破坏,无法求得连续的分析解,只能求得三角级数解。具体的解算结果在其他文章中已经有所介绍。根据上式公式可知, RMS 与口径  $D$  的四次方成正比,与厚度  $h$  的平方成反比;进一步换算可知,与径厚比  $R$  的平方成正比,与口径  $D$  的平方成正比。但这理论只适用于薄板,对于中厚板会存在偏差。

### 2.2 有限元模型建立

分析的平面镜采用三点支撑设计是基于精确约束设计理论即运动学设计,保证检测支撑结构具有运动确定、元件变形较小、检测重复性精度高的原则,在检测加工领域具有广泛应用<sup>[16-17]</sup>,可以基本上满足物镜系统的严苛需求。平面镜的材料选用几种常见的光学玻璃材料作比对,口径大小从(25~300 mm)变化,厚度变化为(5~50 mm),轴向三点均匀分布支撑平面镜,侧面有三点用于限位,保证平面镜不会滑落,采用有限元分析的实验镜采用进口熔石英平面镜进行模拟和验证,模拟的材料参数如表 1 所示。具体的有限元分析模型和支撑结构如图 1 所示。

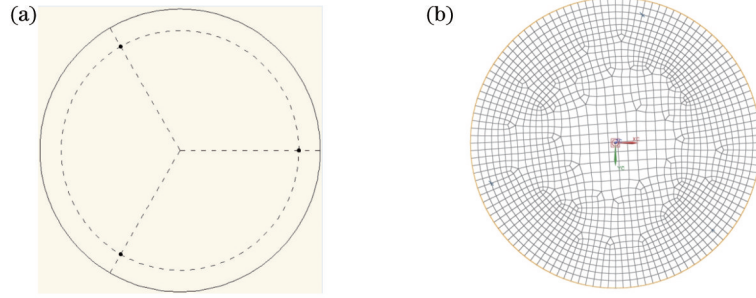


图 1 (a) 平面镜三点支撑; (b) 有限元网格划分

Fig.1 (a) Plane mirror under three-point support; (b) FEM meshing

表 1 镜子(熔石英)材料参数表

Table 1 Material parameter of lens (fused quartz)

Material	Young's modulus $E$ /GPa	Poisson ration	Density $\rho$ /(kg/m <sup>3</sup> )
Fused silica	72.7	0.16	2201

重力作用变形在三点支撑下,口径的变化、厚度的不同均会引入光学元件不同的变形大小,而侧方位的限位支撑没有产生夹持力,所以对计算结果没有影响。对于有限元的划分,网格划分越细,计算结果越准确,但同时也是以牺牲内存和时间作为代价。因此,在网格划分上,采用3 mm的8节点六面体作为等参单元,保证了获得较高的精度,三点接触为法向接触,网格划分完成,根据厚度和半径的不同,最多生成24450个单元。

### 3 三点支撑有限元模型结果分析

#### 3.1 有限元仿真

采用有限元法(FEM)对相同材料的玻璃透镜进行三点支撑下仿真模拟,求解因重力变形而引入的面形变化。对于光刻物镜这样高精度的光学元件来说,重力变形导致其光学性能降低的标准主要是波面误差大小,根据面形的峰谷值(PV)和RMS来评价。根据预先设定的各个口径及不同厚度,依次进行有限元仿真。提取有限元分析后的镜面节点信息,通过最小二乘法进行拟合,得到镜面面形的Zernike系数,将其导入Metropro软件内,得到其三点支撑下,每个不同的口径、不同厚度的PV值与RMS值。有限元仿真的三点支撑云图与Zernike系数得到的平面镜变形图如图2所示,平面镜口径为300 mm,厚度为60 mm。

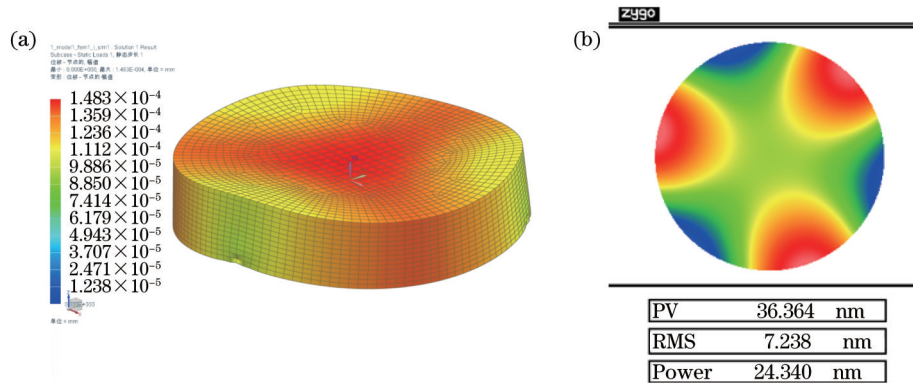


图 2 平面镜三点支撑下(a)有限元模型及(b)面形

Fig.2 Plane mirror (a) FEM model and (b) surface shape under three-point support

#### 3.2 仿真结果分析

根据之前推导的薄板理论(7)式可知,三点支撑下的RMS值变化与厚度的平方成反比,与口径的4次方成正比;考虑径厚比,可以得出与径厚比的平方成正比,与口径的平方成正比,但这只是针对薄板理论,对于不同的厚度与口径关系,下面会具体给出。

##### 3.2.1 变形量与不同材料的关系

在光机系统中,光学元件材料本身对于支撑重力变形的影响是由其自身的固有性质来决定的。一般制

造大口径的光学元件,选取的玻璃材料应具有高的比刚度值  $\kappa = E/\rho$ , 来保证镜片具有较好的抗弯刚度来减小结构变形。因此,在表2中选取了常用的几种玻璃材料,分别建立相同口径与厚度的光学平板来分析其变形大小。

表2 常用玻璃材料参数表

Table 2 Material parameter of common glasses

Material	$E$ /GPa	$\nu$	$\rho$ /(Kg/m <sup>3</sup> )
Fused silica	72.7	0.16	2201
Zerodur	91	0.243	2530
CaF <sub>2</sub>	89.9	0.26	3180
ULE	67.7	0.17	2200
K9	81.32	0.209	2530

根据表2的具体材料参数,可以计算每种材料的比刚度,具体结果如表3所示。

表3 常用玻璃材料的比刚度

Table 3 Specific stiffness of common glasses

Material	Fused silica	Zerodur	CaF <sub>2</sub>	ULE	K9
$\kappa$	33.03	35.97	28.27	30.77	32.14

从表3可以得知,相同的形状和结构尺寸的镜片,采用三点支撑时,具有较大比刚度值的 Zerodur、Fused silica、K9玻璃产生的自重形变较小。采用口径为 300 mm,厚度为 10 mm 的玻璃平板,对上述 5 种玻璃材料建立有限元模型,分析其三点支撑下自重变形大小,具体模拟结果如表4所示。

表4 常用玻璃材料的支撑形变

Table 4 Gravity deformation of lens

Material	Fused silica	Zerodur	CaF <sub>2</sub>	ULE	K9
rms/nm	178.4	168.8	215.6	191.7	186.3

通过有限元计算,得出与之前相同的分析结果,为了减小支撑下自重形变,应该选取比刚度较大的玻璃材料。

### 3.2.2 变形量与不同口径、不同厚度的关系

建立有限元模型,仿真了口径分别为:50、100、150、200、250、300 mm,厚度变化为:5、10、15、20、25、30、35、40、45、50 mm,在三点支撑下平面镜变形大小的规律,如图3所示。

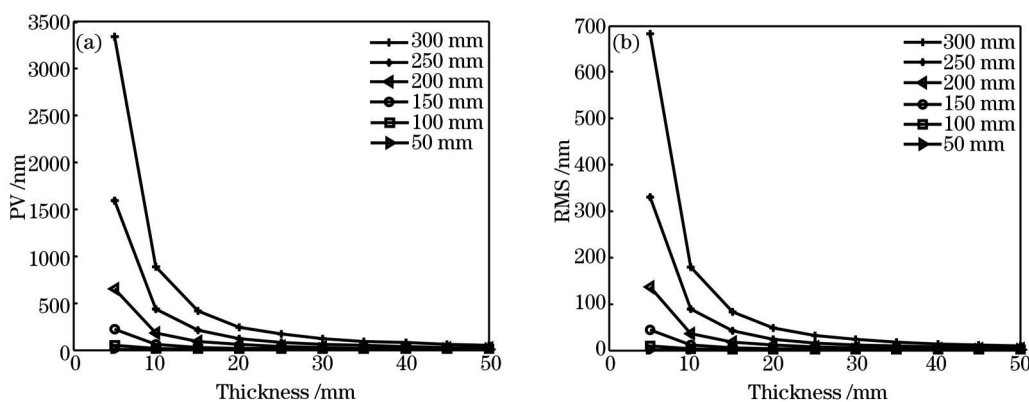


图3 平面镜在三点支撑下的(a)PV值变化; (b) RMS值变化

Fig.3 (a) Plane mirror's PV; (b) plane mirror's RMS under three-point support

通过对上面 RMS 值的拟合研究,获得如下对应口径与厚度的拟合方程

$$\delta_{RMS1} = 1.828 \times 10^{-6} \times \frac{300^4}{h^{1.913}}, \quad (8)$$

$$\delta_{RMS2} = 1.828 \times 10^{-6} \times \frac{250^{3.99}}{h^{1.891}}, \quad (9)$$

$$\delta_{\text{RMS3}} = 1.828 \times 10^{-6} \times \frac{200^{3.989}}{h^{1.87}}, \quad (10)$$

$$\delta_{\text{RMS4}} = 1.828 \times 10^{-6} \times \frac{150^{3.989}}{h^{1.85}}, \quad (11)$$

$$\delta_{\text{RMS5}} = 1.828 \times 10^{-6} \times \frac{100^{3.97}}{h^{1.792}}, \quad (12)$$

$$\delta_{\text{RMS6}} = 1.828 \times 10^{-6} \times \frac{50^{3.954}}{h^{1.707}}. \quad (13)$$

对比拟合方程,随着口径的减小,厚度对RMS值的影响越来越大,并且很大程度上背离了薄板理论下的二次方的关系。通过上面的拟合公式,可以较简洁快速地得出任意厚度下,产生的变形量大小。

### 3.2.3 不同口径与重力变形量的关系

针对薄镜子,固定镜子本身厚度为5 mm,研究随着口径的变化:25、50、75、100、125、150、175、200、225、250、275、300 mm,重力变形量是否与理论结果相一致。通过除去刚体位移后,计算可得平面镜变形的PV和RMS随着口径的变化关系如图4所示。

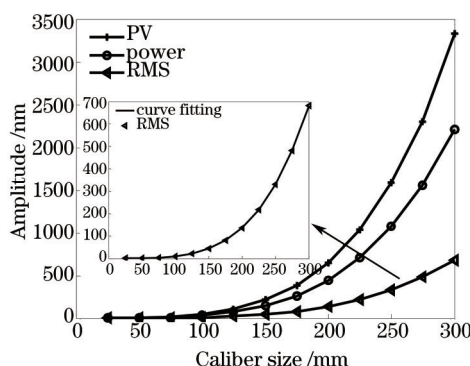


图4 厚度为5 mm下的不同口径大小重力变形

Fig.4 Gravity deformation of different caliber sizes at thickness of 5 mm

将厚度为5 mm下的RMS值进行曲线拟合得到如下公式

$$\delta_{\text{RMS}} = 1.828 \times 10^{-6} \times \frac{D^{3.972}}{5^{1.815}}. \quad (14)$$

根据上式的拟合公式,可以得出对于一定的厚度,口径与自重变形近似成四次方的关系,具体数值应该视具体厚度和口径来确定。

### 3.2.4 不同径厚比与重力变形的关系

为了探究径厚比与重力变形的关系,在口径为300 mm的镜子下,改变厚度,得到不同的径厚比随着厚度的变化对PV和RMS值的变化关系。如图5所示。

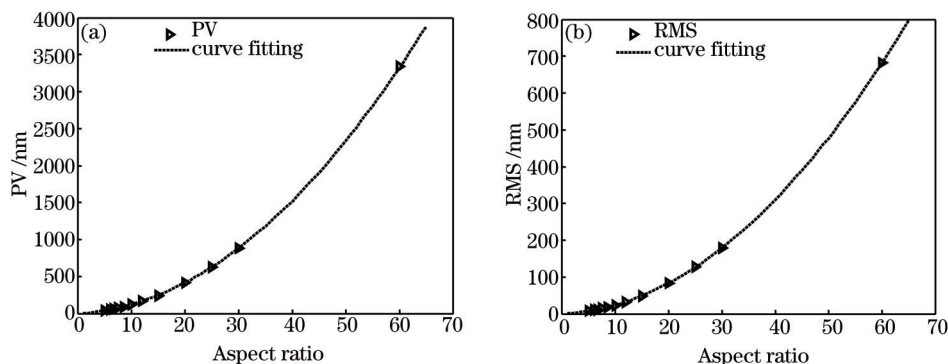


图5 不同径厚比与重力变形的关系。(a) PV; (b) RMS

Fig.5 Relations of aspect ratio and gravity deformation. (a) PV; (b) RMS

对于口径300 mm,不同的径厚比R变化趋势随着径厚比增大成二次函数的关系,通过最小二乘法拟合得到拟合曲线,拟合函数为

$$\delta_{\text{RMS}} = 1.828 \times 10^{-6} \times R^{1.915} \times 300^{2.0857} \quad (15)$$

此时,根据之前的推导应该为口径的平方才对,但是,考虑到厚度对自重变形影响较大,所以,对径厚比归一化后,口径的阶数就会大于平方。同时,模拟计算了径厚比为60时的PV、RMS值,将其具体值代入拟合曲线内,得到完美的匹配。因此,可以借助拟合曲线来为以后不同的径厚比在三点支撑下重力变形大小数值作出预测。拟合结果与理论计算得出的平方关系很相近,这也在一定程度上证明了理论的正确性。同时也可以根据300 mm口径的公式反推出任意口径的 $\delta_{\text{RMS}}$ 表达式,进而建立起每个口径对应的径厚比与面形的变化关系曲线,方便以后预测在三点支撑下的变形大小值。

### 3.2.5 相同径厚比下口径与自重变形的关系

之前对于不同径厚比,得出与理论计算相似的结果,证明了每个口径下都可以计算出对应的均方根值与径厚比的关系曲线。对于相同的径厚比,分析了径厚比分别为:5、10、15、20、25下,不同口径大小对重力变形引入的变形量,如图6所示。

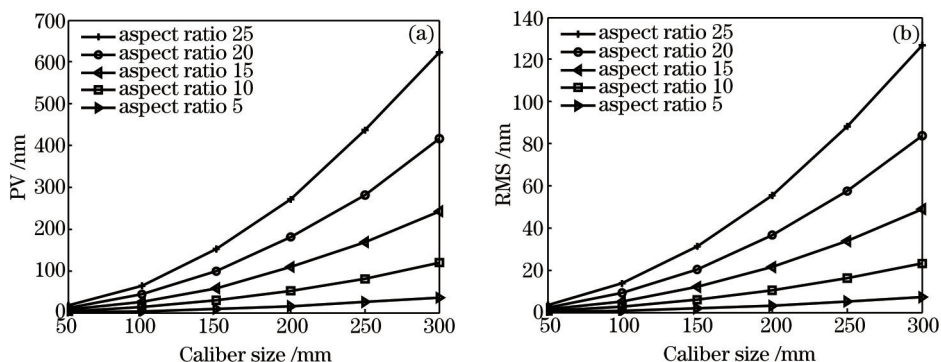


图6 相同径厚比、不同口径与自重变形的关系。(a) PV; (b) RMS

Fig.6 Relation of caliber size and gravity deformation under the same aspect ratio. (a) PV; (b) RMS

根据公式可知,在薄板理论情况下, $\delta_{\text{RMS}}$ 值与径厚比 $R$ 的平方成正比,与口径的平方成正比。因此在固定径厚比的前提下,可以得出RMS值与口径是二次函数的关系。通过对相同径厚比的计算结果进行数据拟合,可得下面的拟合公式如下

$$\delta_{\text{RMS1}} = 1.828 \times 10^{-6} \times 5^{2.318} \times D^{2.01}, \quad (16)$$

$$\delta_{\text{RMS2}} = 1.828 \times 10^{-6} \times 10^{2.102} \times D^{2.02}, \quad (17)$$

$$\delta_{\text{RMS3}} = 1.828 \times 10^{-6} \times 15^{2.038} \times D^{2.03}, \quad (18)$$

$$\delta_{\text{RMS4}} = 1.828 \times 10^{-6} \times 20^{2.008} \times D^{2.04}, \quad (19)$$

$$\delta_{\text{RMS5}} = 1.828 \times 10^{-6} \times 25^{2.008} \times D^{2.02}. \quad (20)$$

根据拟合结果可以发现,随着径厚比的增大,变形量与径厚比、口径逐渐成平方的关系;当径厚比越小,径厚比的影响作用就越大,占的比重也越大。

### 3.2.6 变形量与不同形状的关系

对于薄板理论来说,变形量与板厚的平方成反比,板的厚度在一定程度上决定了变形量的大小。除均匀的等厚平板外,其他结构形式的光学镜片实际上为变厚度板。等厚平板的厚度 $h$ 可以表示为

$$h = \frac{V}{S} = \frac{4V}{\pi D^2}, \quad (21)$$

式中 $V$ 为镜子的体积, $S$ 为镜片在横截面的投影面积。

由上式的厚度定义<sup>[18]</sup>,可以得出不同结构形式下的平均径厚比 $\bar{R}$ 为:

$$\bar{R} = \frac{\pi D^3}{4V}. \quad (22)$$

对于圆口径光学元件,其形状基本分为:平板、平凸、双凸、平凹、双凹及弯月这几种形式。平板元件是基本形式,其他结构形式的光学元件均可看成是通过改变平板上下面的曲率半径演变而来。

当采用相同的镜片材料,保持相同的中心厚的前提下,构建具体的结构形式及参数,建立有限元模型分

析各种结构形式镜片在三点支撑下自重形变量的变化。具体的结构参数及有限元模拟结果如表5所示。

表5 不同形状透镜(熔石英)的结构参数与形变量

Table 5 Structural parameters and the gravity deformation of the different shape of the lens(fused silica)

Form	$D$ /mm	$h$ /mm	$R_{top}$ /mm	$R_{low}$ /mm	RMS /nm
Flat	300	40	$\infty$	$\infty$	14.086
Plano-convex	300	40	$\infty$	572.5	25.683
Double-convex	300	40	572.5	1130	30.562
Plano-concave	300	40	$\infty$	572.5	9.014
Double-concave	300	40	572.5	572.5	7.497
Positive-meniscus	300	40	1130	572.5	10.469
Negative-meniscus	300	40	572.5	1130	16.011

当透镜的形状改变时,质量分布和厚度会发生变化,进而将影响透镜本身的结构刚度,最终导致透镜在三点支撑下的重力形变量的差异。根据上表计算的结果,可以清楚地看到,当具有相同中心厚的前提下,三点支撑自重形变量的大小关系为:双凸(30.562 nm)大于平凸(25.683 nm)大于负弯月(16.011 nm)大于平板(14.086 nm)大于正弯月(10.469 nm)大于平凹(9.014 nm)大于双凹(7.497 nm)。

通过透镜的形状可以看出,双凸形透镜的边缘较薄,而中心较厚,质量主要集中在中心轴线附近,因此其刚度最差;双凹形透镜的边缘厚度相比之下最厚,而质量大部分分布在镜片边缘,其刚度最好。因此,对于不同形状的透镜其三点支撑下自重变形规律均可等中心厚平板相比较,判断其形变量大小。

至此,根据上述的最小二乘拟合与有限元模型相结合,对于薄板与中厚板相结合,得出不同材料、不同厚度、不同口径、不同形状透镜对于三点支撑下自重形变量的变化关系,在很大程度上简便了日后的计算工作。

#### 4 旋转支撑法验证有限元模型的正确性

为了验证上述建立的有限元模型的正确性,选取了日常检测中的一片口径为302 mm,厚度为20 mm的平面镜,采用旋转支撑法<sup>[12,19]</sup>求取三点支撑引入的变形支撑数据。图7、图8为旋转支撑法获得的面形,需要将平面镜本身的真实面形与支撑面形分开,而旋转支撑法分离出的只有旋转非对称项部分(即三点支撑引入的形变量)。

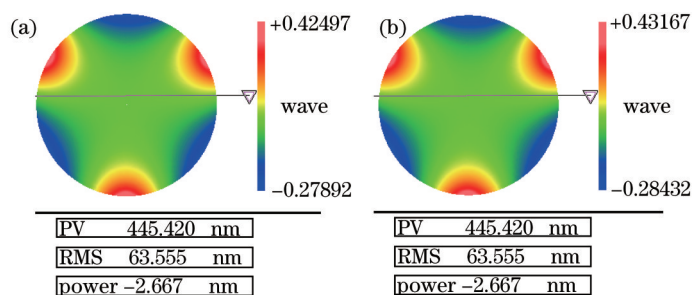


图7 (a) 0°支撑测量面形(63.555 nm); (b) 30°支撑测量面形(62.871 nm)

Fig.7 (a) 0°mounted testing profile (63.555 nm); (b)30°mounted testing profile (62.871 nm)

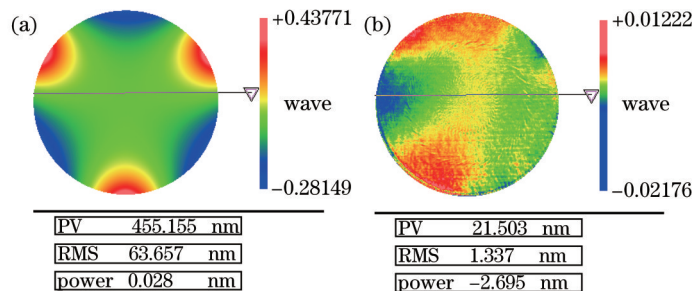


图8 (a) 支撑面形(63.657 nm); (b)真实面形(1.337 nm)

Fig.8 (a) Mounted profile (63.657 nm); (b) real profile (1.337 nm)

因此,对于支撑引入的旋转对称项依旧存在于元件测量面形中,这就会造成较大的误差。这也是为什么要分析在何厚度与口径下,三点支撑引入的误差较大,导致不能达到较高的面形加工精度的原因。

利用有限元模拟仿真,目前只模拟到 Zernike 前 36 项,而高阶项相对于低阶来说影响较小,故没有必要将更多高阶项模拟出来。因此,通过提取支撑旋转非对称项的前 36 项 Zernike 系数与理论模拟的结果进行对比,如图 9 所示。

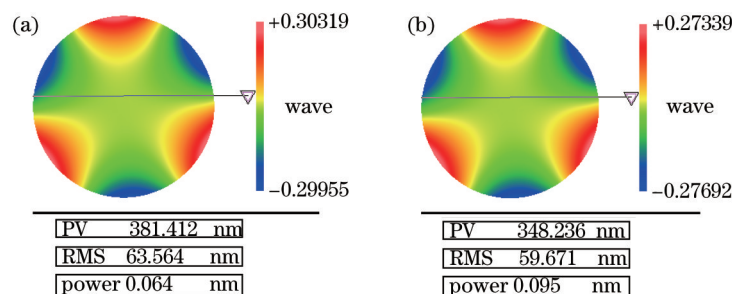


图 9 (a) 实验三点支撑数据(63.564 nm); (b) 模拟三点支撑数据(59.671 nm)

Fig.9 (a) Experimental data under three-point support (63.564 nm); (b) simulation data under three-point support (59.671 nm)

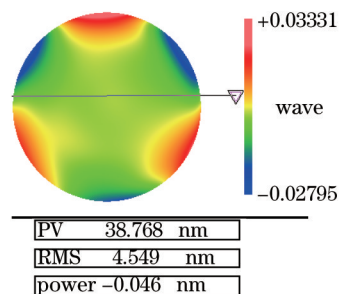


图 10 实验与模拟三点支撑数据的面形残差(4.549 nm)

Fig.10 Residual surface shape between experiment and simulation under three-point support (4.549 nm)

通过将实验与模拟数据点对点相减,可以得出模拟与实验的残差数据,如图 10 所示。获得的残差面形约为实验支撑面形的 7%。模拟的三点支撑结果与实验测量的结果存在一定的误差。

误差的来源主要分为两部分:一部分为系统误差,另一部分为支撑误差。系统误差的主要来源是干涉仪内部的系统误差<sup>[20]</sup>;温度误差,空气扰动,振动等。支撑误差主要包括:1) 三点支撑的位置不同,对结果的影响会有很大的干扰;2) 模拟过程中的三点组成的三角形是理想等边三角形,而实际支撑中不可能得到理想的三角形,这也会造成分析与实验的不吻合;3) 实验中的三点不可能处于绝对的同一直线上,因此,三点支撑产生的变形也不会完全相同。

这些误差的具体分析在其他文章<sup>[12]</sup>中有具体的描述,在此只是简单的分析了实验中可能引入的误差。通过实验旋转支撑法得出的支撑变形与利用有限元建立模型模拟出的结果吻合度较高,因此有理由相信模拟结果的正确性。

## 5 结 论

对于三点支撑自重变形大小的定量分析,采用了数值分析、有限元模型与实验验证相结合的方法,最后利用实验验证了有限元算法的正确性。以薄板理论为基础,扩展到中厚板,构建有限元模型,具体分析变形量与材料、口径、厚度、形状的关系。建立了不同材料、口径、厚度、形状与自重变形量的具体拟合函数,进一步完善了薄板理论模型,方便了科研人员准确评估三点支撑变形大小程度,为后期大量的光学元件的加工和检测提供了理论技术参考。

## 参 考 文 献

1 Malvick A J. Theoretical elastic deformations of the steward observatory 230 cm and the optical sciences center 154 cm mirrors[J]. Appl Opt, 1972, 11(3): 575-585.



- 2 Wu Qingwen, Lu E, Wa Jiaqi, *et al.*. Study on the surface figure changes of primary mirror centrally supported under gravity load [J]. Optics and Precision Engineering, 1996, 4(4): 23-28.  
吴清文, 卢 镠, 王家骥, 等. 自重作用下中心支撑主反射镜面形变化研究[J]. 光学精密工程, 1996, 4(4): 23-28.
- 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 P R Yoder. Opto-Mechanical Systems Design[M]. Boca Raton: The Chemical Rubber Company Press, 2006: 460-461.
- 5 Cho M K, Price R S, Moon I K. Optimization of the ATST primary mirror support system[C]. SPIE, 2006, 6273: 63731E.
- 6 Fan Lili, Zhang Jingxu, Jiang Hao, *et al.*. Design of the primary mirror support of equatorial telescope[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 476-479.  
范李立, 张景旭, 姜 皓, 等. 极轴式望远镜主镜支撑设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 476-479.
- 7 Wang Xiangjing, Chen Jiexiang, Zhang Yi, *et al.*. The application of APDL and UIDL in the primary mirror support optimization[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(11): 86-87.  
王相京, 陈结祥, 张 毅, 等. APDL 和 UIDL 在主镜支撑优化中的应用[J]. 机械设计与制造, 2009(11): 86-87.
- 8 Lei Jiang, Jiang Shilei, Cheng Gang. Deformation of high-accuracy photo lithographic objective lens[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(2): 12-14.  
雷 江, 蒋世磊, 程 刚. 高精度光刻物镜的变形研究[J]. 光电工程, 2005, 32(2): 12-14.
- 9 Tan FanJiao, Qiao YanFeng, Li YaoBin, *et al.*. FEM mechanical analysis for primary mirror self-weight deformation of photo-electronic theodolite[J]. Optical Instruments, 2007, 29(6): 65-68.  
谭凡教, 乔彦峰, 李耀斌, 等. 光电经纬仪主镜系统自重变形的有限元分析[J]. 光学仪器, 2007, 29(6): 65-68.
- 10 Tian Wei, Wang Ping, Wang Rudong, *et al.*. Simulation and experimental research of 193 nm projection lithography lens supporting[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0816002 .  
田 伟, 王 平, 王汝冬, 等. 193 nm 光刻投影物镜单镜支撑仿真分析及实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0816002.
- 11 Slocum A. Kinematics couplings are view of design principles and application[J]. Int J Mach Tools & Manuf, 2010, 50(4): 310-327.
- 12 Wang Ping, Tian Wei, Wang Rudong, *et al.*. Rotating chuck lest for removing chuck error of optical surface[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0812004.  
王 平, 田 伟, 王汝冬, 等. 旋转支撑法去除元件面形测量的夹持误差[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0812004.
- 13 Wang Wugui, Fu Mingfu. Advances in the research of nonlinear theory of moderately thick shells[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2000, 22(1): 10-16.  
江五贵, 扶名福. 中厚板壳非线性理论的研究进展[J]. 南昌大学学报(工科版), 2000, 22(1): 10-16.
- 14 Wang Rudong, Wang Ping, Tian Wei, *et al.*. Design and analysis of compensation of large aperture optical element for gravity deformation [J]. Chinese Optics, 2011, 4(3): 260-264.  
王汝冬, 王 平, 田 伟, 等. 大口径光学元件重力变形补偿的设计分析[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 260-264.
- 15 胡企千. 大型光学镜子的结构、支撑及重力变形计算方法[J]. 光学机械, 1983, 17(6): 29-44.
- 16 Culpepper M L, Kartik M V, Dibiasio C. Design of integrated eccentric mechanisms and exact constraint fixtures for micro-level repeatability and accuracy[J]. Precis Engng, 2005, 29(1): 65-80.
- 17 Chen Xu, Yuan Wenquan, Feng Yutao, *et al.*. Study of the error of the reference lens in absolute spherical testing and the thermal deformation model establishment[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0212002.  
陈 旭, 袁文全, 冯玉涛, 等. 绝对检验参考镜误差分析与热变形模型建立[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0212002.
- 18 Wang Baoxu. Optomechanical Structure Design and Analysis for Large Aperture Reference Spherical Lens[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010, 37(8): 2029-2034.  
汪宝旭. 大口径球面标准镜头光机结构设计与分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012: 30-45.
- 19 Zhang Yanwei, Su Dongqi, Sui Yongxin, *et al.*. Absolute testing of rotationally asymmetric surface deviation with the method of rotation-averaging and compensation[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0708007.  
张艳微, 苏东奇, 隋永新, 等. 基于旋转平均补偿算法的旋转非对称面形绝对检测[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0708007.
- 20 Miao Erlong, Zhang Jian, Gu Yongqiang, *et al.*. Measurement error analysis of high precision Fizeau interferometer for lithography projection objective[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2029-2034.  
苗二龙, 张 建, 谷勇强, 等. 用于光刻投影物镜检测的高精度菲佐干涉仪误差分析[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2029-2034.

栏目编辑: 韩 峰