

文章编号 1004-924X(2009)02-0292-09

非球面成形致动器排布方法的研究

曾春梅^{1,2}, 余景池^{1,2}

(1. 苏州大学 江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;

2. 苏州大学 现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)

摘要: 为了实现超薄球面镜的非球面成形, 提出了一种采用非球面梯度法求致动器排布初始解的方法。给出了该方法的理论依据、排布方法以及计算非球面度梯度的两种公式; 以一大大口径离轴超薄非球面镜为例, 用非球面度梯度的两种计算公式分别求出了致动器排布初始解, 完成了非球面成形的有限元分析, 得到了满足面形精度 RMS 值为 21.09 nm 的最终解; 最后, 介绍了致动器排布的优化步骤, 比较了非球面梯度法、正方形法和环形法的差异。结果显示, 用非球面度梯度平均值公式求出的初始解与最终解最接近, 符合非球面度梯度变化率与致动器面密度的关系, 而通过优化还能进一步减少致动器数量和面形残差。在相同面形精度下, 非球面梯度法排布的致动器个数约为正方形和环形排布的 1/2 或更少; 在相同致动器个数下, 非球面梯度法排布的面形残差 RMS 值约为正方形和环形排布的 1/3 或更小。结果表明, 非球面梯度法更适合在非球面成形领域用于求解致动器排布初始解。

关键词: 非球面成形; 致动器排布; 非球面度梯度; 有限元法

中图分类号: TH75; TH703 **文献标识码:** A

Research of actuator arrangements for shaping aspheric surfaces

ZEN G Chun-mei, YU Jing-chi

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China; 2. Modern Optical Technology Institute, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: In order to shape aspheric surfaces for ultra-thin spherical mirrors, a new method for the initial solutions of actuator arrangements solved by asphericity gradient was presented. The theoretical analysis, arrangement method and two formulas for calculating the asphericity gradient were given. As shaping an off-axis large-aperture aspheric mirror for example, the initial solutions of actuator arrangements were obtained by two formulas above, respectively. By using Finite Element Method (FEM), the deformation analysis of shaping aspheric surfaces with form error of 21.09 nm was accomplished, and the final solutions were given. Moreover, the optimizations of actuator arrangements were discussed. Finally, three kinds of methods for actuator arrangements were compared with each other. The results indicate that the initial solution based on average value of asphericity gradient is most similar to the final solution, which is in accord with the relation between the change rate of asphericity gradient and the surface density of actuator arrangements. The optimization can reduce the number of actuators and can improve the form error further. Under the same form error, the number

收稿日期: 2008-02-22; 修订日期: 2008-05-08.

基金项目: 江苏省高校自然科学基金计划资助项目 (No. 05 KJ A14003)

of actuators by the aspheric gradient method is 1/2 or less than that by the square and circular methods; under the same actuator numbers, the RMS of form error by the aspheric gradient method is about 1/3 or less than that by the square and circular methods. These data reported here show that the aspheric gradient method is suitable to solve an initial solution of actuator arrangements in the field of shaping aspheric surfaces.

Key words: shaping aspheric surface; actuator arrangement; asphericity gradient; Finite Element Method (FEM)

1 引言

非球面成形可借助主动光学技术将超薄球面镜弹性变形为非球面镜^[1-2],该方法避开了大口径非球面镜的加工难题。要实现这一设想,致动器的排布至关重要。研究致动器排布的目的在于减少致动器的数量,增大致动器之间的间距。致动器个数少,可以减轻质量,降低制造和发射成本;排布间距大,则有利于致动器结构设计以及整个支撑系统的结构设计。由于非球面成形时球面镜的初始面形误差远大于利用主动光学进行面形控制的薄膜型反射镜^[3-4]或轻质镜^[5-6]的初始面形误差,这就决定了在非球面成形中,致动器的排布密度、个数以及加载的力或位移都会大于后者,也决定了致动器排布首先要解决的是达到所需精度的面形,其次才是考虑对综合了加工误差、重力和温度变化等像差的校正能力。可以肯定的是,在非球面成形研究中,致动器的个数远多于薄膜型反射镜,可以在保证面形精度的前提下,同时实现对加工、重力、温度等误差的校正。

在传统的主动光学应用里,比如变形镜和薄膜型反射镜,典型的致动器排布有直角排布(正方形排布)、径向排布(环形排布)、三角形排布等,且以径向排布的综合拟合能力最强^[7]。本文提出了一种求解致动器排布初始解的新方法——非球面梯度法,讨论了该方法的理论依据和计算公式,借助一个计算实例,进行有限元分析和面形拟合,研究了致动器排布的优化步骤,完成了最终优化方案,通过与正方形排布和环形排布的比较,分析了它们各自在致动器个数、面形残差校正等方面的差异。

2 致动器排布的非球面梯度法及公式

从材料力学可知,在小挠度变形里,力和变

形是线性关系,可以使用叠加原理,即:多个载荷(力)作用下产生的变形,等于各个载荷(力)单独作用所产生的变形的叠加。因此,非球面度梯度的变化率越小,越接近线性变化,则外加载荷的个数越少,致动器面密度越小;反之,非球面度梯度的变化率越大,偏离线性变化越大,则外加载荷的个数越多,致动器面密度越大。非球面梯度法就是计算出最接近球面成形为非球面的变形量的梯度(即非球面度梯度)分布,按梯度变化率越大,致动器面密度越大的思想,预先排好致动器的位置,求出致动器排布的初始解。当非球面度梯度等高线之间增量相等时,可知等高线间隔小处,非球面度梯度变化率大;而间隔大处,非球面度梯度变化率小。如果在等增量的梯度线上布点,就可以实现非球面梯度法的思想。为验证这一方法,可对一实例按非球面梯度法求出致动器排布初始解,通过有限元分析,得到变形数据,计算面形残差,并通过优化步骤得到满足面形要求的最终的致动器排布。

非球面梯度公式暂定为球面相对于非球面的变形量对剩下的两个方向求导的均方根和平均值,即:

$$\sqrt{((\partial(x_{\text{spher}} - x_{\text{aspher}})/\partial y)^2 + ((\partial(x_{\text{spher}} - x_{\text{aspher}})/\partial z)^2)/2}, \quad (1)$$

$$(|\partial(x_{\text{spher}} - x_{\text{aspher}})/\partial y| + |\partial(x_{\text{spher}} - x_{\text{aspher}})/\partial z|)/2. \quad (2)$$

下面通过对两种公式的分析讨论,选择其中最合适的作为求解致动器排布的非球面度梯度公式。

3 实例分析及结果

3.1 离轴球面镜参数

以成形一个离轴的非球面镜为例,最终成形的二次非球面公式为:

$$x_{\text{spher}} = \frac{c(y^2 + z^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(y^2 + z^2)}}, \quad (3)$$

其中, $c = 1/R_0$, $R_0 = 9\,757\text{ mm}$, $k = -0.986$ 。

镜体厚度为 4 mm, 要求实现面形精度 $\lambda/30$ (其中 $\lambda = 632.8\text{ nm}$), 即 $2.109\,3 \times 10^{-5}\text{ mm}$ 。边界上允许有 3% 的面积不参与面形评价。

表 1 是根据文献[2]的方法算出的最接近球面参数, 即超薄球面镜的参数, 其中 a 、 b 分别为球心在 x 轴和 y 轴上的坐标, R 为最接近球面半径。超薄球面镜 Y 和 Z 方向尺寸如图 1 所示。图 2 为最接近球面相对于非球面的初始面形误差 P-V 图。

表 1 最接近球面参数(单位: mm)

Tab. 1 Parameters of best fitting sphere(Unit: mm)

R	a	b	初始 RMS	初始 P-V
9 975.62	9 975.77	- 11.59	0.107 5	0.494 8

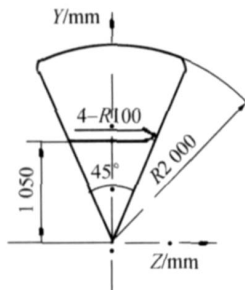


图 1 离轴球面镜

Fig. 1 Sketch map of an off-axis spherical mirror

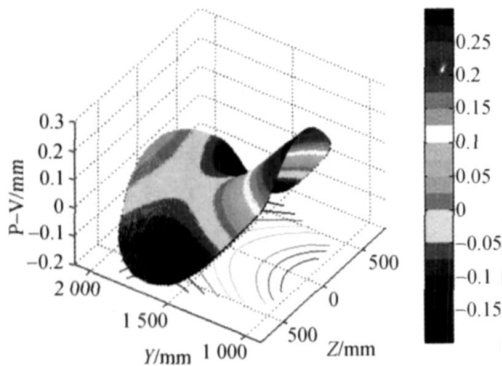


图 2 初始面形误差 P-V 图

Fig. 2 P-V plot of initial form error

3.2 有限元建模^[8]

根据上述计算结果在有限元软件里 (Msc.

Patran) 建模。离轴球面镜的材料特性和建模后的有限元参数如表 2 所示。边界条件是控制 3 个点的 x 方向位移为零, 再分别控制另外两个点的 y 和 y 、 z 方向的位移为零。外加载荷采用在 X 方向的强制位移, 根据有限元建模得到的全部节点坐标重新拟合面形, 求出面形残差均方根最小时各节点与非球面在矢高 X 方向的偏离量。将各节点的 X 方向偏离量减去定位节点的偏离量即为理想的强制位移量。

表 2 离轴球面镜有限元建模参数

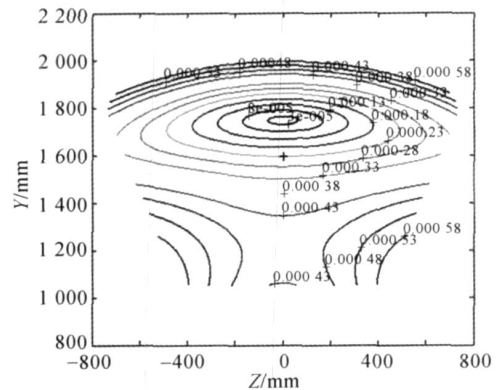
Tab. 2 Model parameters of off-axial spherical mirror for FEM

球面镜材料	Zerodur	节点数	91 841
弹性模量 (10^9 N/m^2)	90.3	四边形单元数	91 214
泊松比	0.24	三角形单元数	56

3.3 用均方根非球面度梯度公式求致动器排布初始解及非球面成形的有限元分析

用

$\sqrt{((\partial(x_{\text{spher}} - x_{\text{aspher}})/\partial y)^2 + ((\partial(x_{\text{spher}} - x_{\text{aspher}})/\partial z)^2)/2}$ 画出非球面度梯度的等高线图 (图 3)。图 3 中梯度增量为 5×10^{-5} 。从图上看, Y 值越大, 非球面梯度线分布越密, 其梯度变化率越高。在排布致动器时, 这些区域的致动器间隔应该相对较小。



点时,RMS 值达到精度要求(如图 6 和图 7)。从加载图上看,是在图 4 的基础上增加了边界和某些空白区的致动器点。

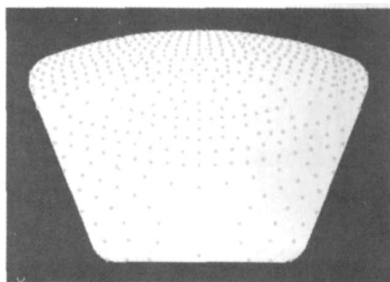


图 4 致动器排布初始解(N=417)

Fig. 4 Initial solution of actuator arrangement (N=417)

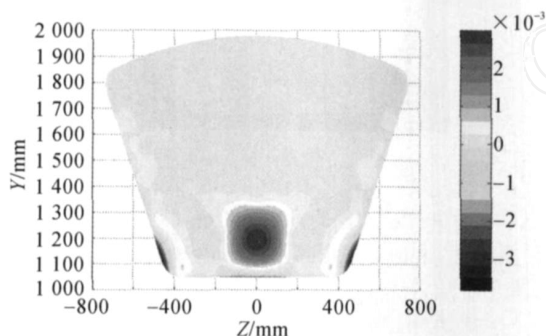


图 5 面形残差图(N=417)

Fig. 5 Form error distribution (N=417)

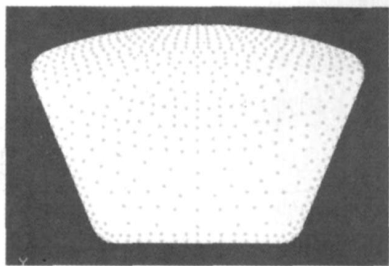


图 6 致动器排布图(N=507)

Fig. 6 Actuator arrangement(N=507)

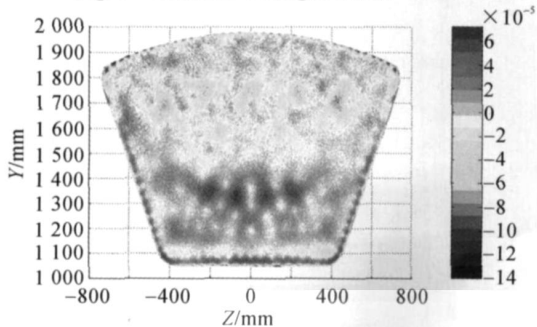


图 7 面形残差图(N=507)

Fig. 7 Form error distribution(N=507)

在图 7 的基础上经过优化(后面详细阐述),得到满足面形精度的致动器排布结果(如图 8 和图 9)。表 3 是分析数据汇总。

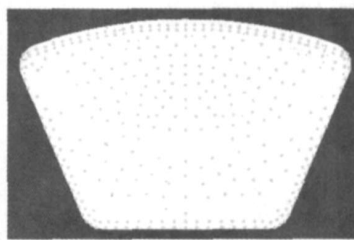


图 8 致动器排布图(N=349)

Fig. 8 Actuator arrangement(N=349)

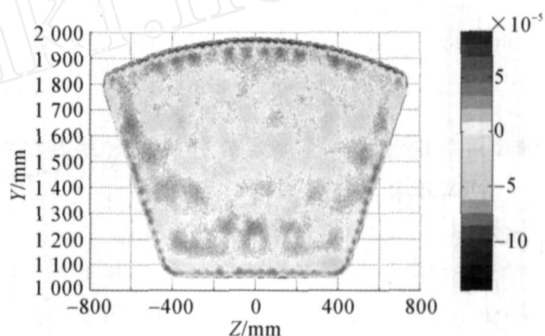


图 9 面形残差图(N=349)

Fig. 9 Form error distribution(N=349)

表 3 形变后的面形残差分析结果

Tab. 3 Form errors after deformation

致动器个数	RMS(mm)	P-V (mm)
417(初始解)	5.6734×10^{-5}	6.7725×10^{-4}
507	2.1064×10^{-5}	2.1213×10^{-4}
349(最终解)	2.0894×10^{-5}	2.3659×10^{-4}

从以上结果看,用均方根梯度公式求出的初始解和最终解在致动器个数和排布上差别较大,虽然看起来似乎是因为超薄镜所取梯度增量太小,致使致动器排布过密,但是在重新设置梯度增量(譬如 7×10^{-5})得到的梯度等高线图(如图 10)上,仍然发现非球面度梯度分布和最终解(如图 8)两者之间较大的差异,不符合非球面度梯度变化率越大,致动器排布密度越大的推断。对最终解而言,上半区的非球面度梯度等高线分布过密,而下半区的非球面度梯度等高线分布又过于稀疏。因此,可以认为非球面梯度的均方根公式不适用于求解致动器排布的初始解。另外,边界

上的致动器分布很难全部用非球面梯度来确定，应该根据边界形状采用均匀排布的方法。

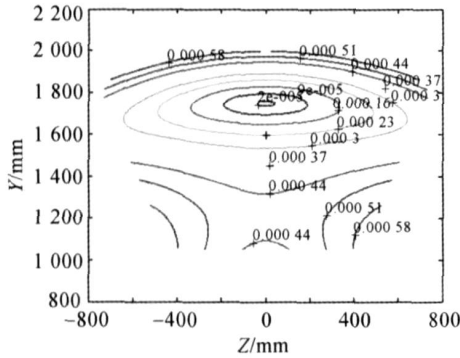


图 10 非球面度梯度等高线图(均方根)

Fig. 10 Contour plot of asphericity gradient (Root Mean Square)

3.4 用平均值非球面度梯度公式求致动器排布初始解及非球面成形分析

以 $(|\partial(x_{spher} - x_{aspher})/\partial y| + |\partial(x_{spher} - x_{aspher})/\partial z|)/2$ 平均值非球面度梯度公式得到梯度等高线图如图 11, 梯度增量为 7×10^{-5} , 由此得到的致动器排布初始解如图 12(a), 且同梯度线上致动器间隔约为 70 mm。为图 12(a)的边界加上致动器排布(见图 12(b)加方框部分)。这个边界排布来自于图 8。面形残差 P-V 如图 13 所示。

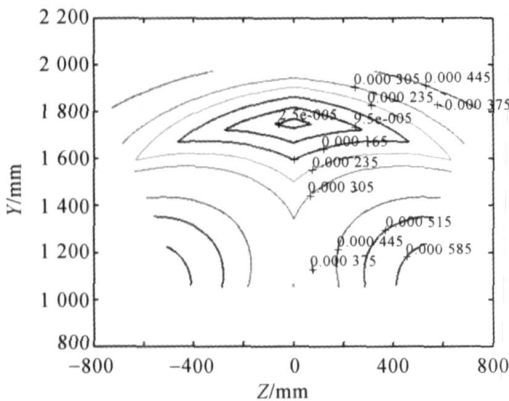
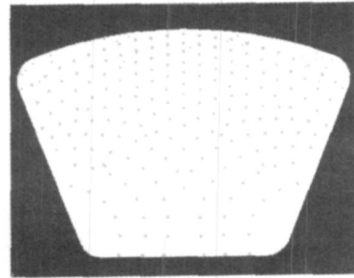


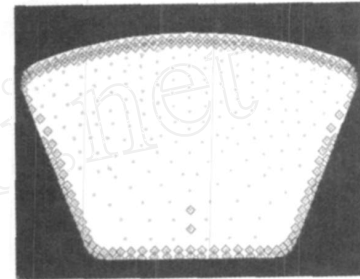
图 11 非球面度梯度等高线(平均值)

Fig. 11 Contour plot of asphericity gradient (Mean)

图 13 中显示下半部致动器间隔太大。减小下半部分梯度增量到 $0.000\ 05$, 重新排布致动器(如图 14), 面形残差 RMS 值降至 $2.209\ 2 \times 10^{-4}$ mm(如图 15)。经过最后的优化, 得到满足面形的致动器排布结果和面形残差图(如图 16、图 17)。



(a)



(b)

图 12 致动器排布初始解(a)和(b)

Fig. 12 Initial solutions (a) and (b) of actuator arrangements

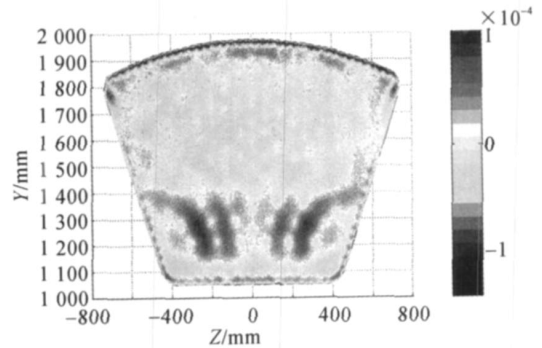


图 13 面形残差图(N=348)

Fig. 13 Form error distribution(N=348)

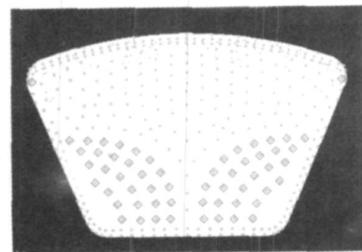


图 14 致动器排布图(N=366)

Fig. 14 Actuator arrangement(N=366)

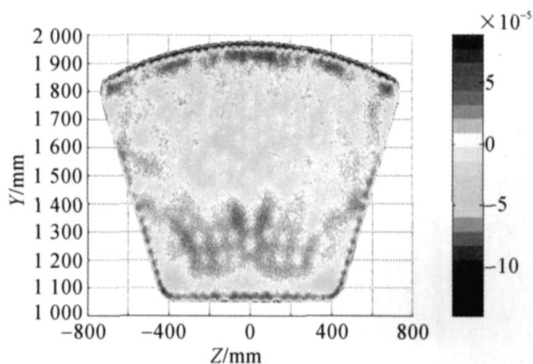


图 15 面形残差图(N=366)

Fig. 15 Form error distribution(N=366)

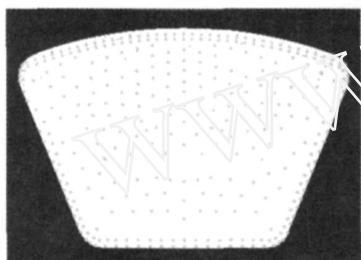


图 16 致动器排布图(N=340)

Fig. 16 Actuator arrangement(N=340)

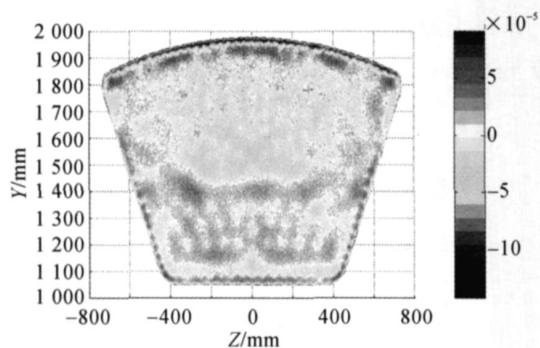


图 17 面形残差图(N=340)

Fig. 17 Form error distribution(N=340)

以上分析结果汇总在表 4。

表 4 形变后面形残差分析结果

Tab. 4 Form errors after deformation

致动器个数	RMS(mm)	P-V(mm)
348(初始解)	$2.629\ 9 \times 10^{-5}$	$2.436\ 1 \times 10^{-4}$
366	$2.209\ 2 \times 10^{-5}$	$2.290\ 6 \times 10^{-4}$
340(最终解)	$2.108\ 7 \times 10^{-5}$	$2.346\ 6 \times 10^{-4}$

与均方根非球面度梯度公式相比,平均值非球面度梯度公式得到的初始解与最终解更接近。在初始解的基础上做了少量的修改就达到面形精度,排布结果符合非球面度梯度变化率与致动器加载密度的关系。所以比较而言,平均值非球面度梯度公式更适合在非球面成形领域求取致动器排布初始解。另外,边界的排布、梯度增量和间隔选择也很重要,需进一步进行优化。

3.5 致动器排布优化的研究

以 3.3 节均方根非球面度梯度公式得到的致动器排布如图 6(N=507)为例,说明优化的一般步骤。

3.5.1 去边界

去边界就是一部分边界区域不参与面形评价。以去除 3% 面积为例,球面镜上半径在 1 978.6 mm 以外的区域将不参与面形的拟合如图 18。去边界既可以是在边界上计算出不参与面形评价的区域,将边界上的致动器向中心移动,重新对致动器进行排布;也可以不调整致动器,只是在面形拟合时去掉边界上的点。因为边界上面形残差比较大,因此去除边界可以明显地减少面形残差,间接地减少了致动器的数量。以图 6 为例,若不去边界,面形残差 RMS 值为 $3.245\ 3 \times 10^{-5}$ mm,若去 3% 边界,面形残差 RMS 值为 $2.106\ 4 \times 10^{-5}$ mm。本例的优化计算选择第一种方法,即将致动器向中心移动。

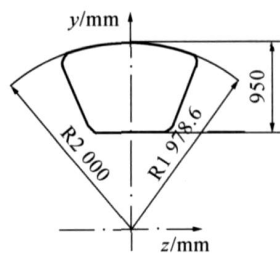


图 18 球面镜去边界示意图

Fig. 18 Sketch map of spherical mirror after removing edge

3.5.2 调整边界致动器

调整边界致动器就是在保持或提高面形精度的基础上,将边界上的致动器调整为环形的两排,然后逐一增加同一环带上致动器间距和环带之间的间距,以达到减少致动器的目的。图 19 是对图 6 上边界致动器调整后的结果,致动器个数从 507

减少为 453, 面形残差 RMS 变为 $2.104 1 \times 10^{-5}$ mm。

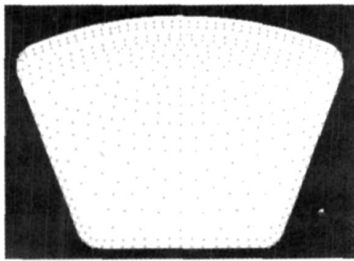


图 19 调整边界后致动器排布 ($N = 453$)

Fig. 19 Actuator arrangement after adjusting boundary ($N = 453$)

3.5.3 调整梯度增量和间距

调整梯度增量就是根据面形残差图,适当增大或减少梯度增量,以适应面形的校正。调整间距就是适当增大或减小同一梯度线上致动器之间的距离。根据初始解的梯度增量和间距设置,图 20 是对上边界致动器调整后的结果,致动器个数从 453 减少为 378,面形残差 RMS 为 $2.148 2 \times 10^{-5}$ mm。

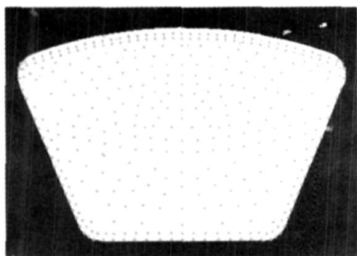


图 20 调整梯度增量和间距后的致动器排布 ($N = 378$)

Fig. 20 Actuator arrangement after adjusting gradient increment and space ($N = 378$)

3.5.4 修正位移量

修正位移量就是在所有正的强制位移量上加一个修正量,所有负的强制位移量再减去一个修正量。这是因为面形精度要求是 $2.109 3 \times 10^{-5}$ mm,不是一个绝对的零点,所以强制位移量可进行微量修正,以降低面形残差。经试算,最好的修正量是 4.5×10^{-6} mm,此时面形残差 RMS 从 $2.109 3 \times 10^{-5}$ mm 下降为 $2.078 3 \times 10^{-5}$ mm。从结果看,修正位移量适用于面形的精确修正。

3.5.5 去除无效点

去除无效点就是设定单点约束力阈值,将有

限元分析报告里小于该阈值的致动器加载点去除,以达到减少致动器个数的目的。分析结果表明,合理的单点约束力阈值应该在 0.1 N 以下。对于本例,当单点约束力阈值为 0.06 N 时,致动器个数从 378 减少为 349,面形残差 RMS 为 $2.089 4 \times 10^{-5}$ mm,致动器排布和面形残差图分别为图 8 和图 9。以上优化分析的面形残差数据见表 5。

表 5 优化分析

Tab. 5 Optimization analysis

致动器个数	优化步骤	RMS(mm)	P-V (mm)
507	/	$3.245 3 \times 10^{-5}$	$8.337 0 \times 10^{-4}$
507	去边界	$2.106 4 \times 10^{-5}$	$2.121 3 \times 10^{-4}$
453	调整边界致动器	$2.104 1 \times 10^{-5}$	$2.281 2 \times 10^{-4}$
378	调整梯度增量和间距	$2.148 2 \times 10^{-5}$	$2.290 6 \times 10^{-4}$
378	修正位移量	$2.078 3 \times 10^{-5}$	$2.346 6 \times 10^{-4}$
349	去除无效点	$2.089 4 \times 10^{-5}$	$2.365 9 \times 10^{-4}$

3.6 与正方形、环形排布的比较

选取致动器的正方形排布和环形排布做非球面成形的有限元分析。正方形排布和环形排布的初始解都采用强制位移点均布的形式。在初始解的基础上经过优化步骤,达到面形精度要求的正方形和环形排布结果如图 21、图 23 所示。

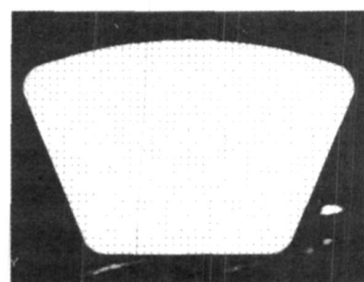


图 21 致动器排布图(正方形)

Fig. 21 Actuator arrangement (Square)

以上分析结果集中在表 6。从结果看,按正方形和环形均匀排布致动器,满足面形精度的致动器个数远大于非球面梯度法排布结果 ($N = 340$),是后者的两倍多。这说明尽管经过优化,这两种方法里大多数致动器的排布仍然是不合理的,并没有起到有效的作用,而且致动器间距较小,不利于工程应用。另外,以同样数目致动器

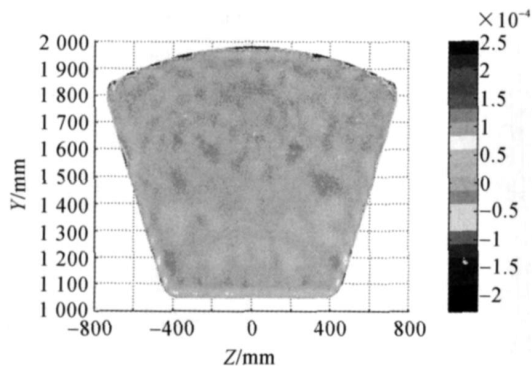


图 22 面形残差图(正方形)

Fig. 22 Form error distribution (Square)

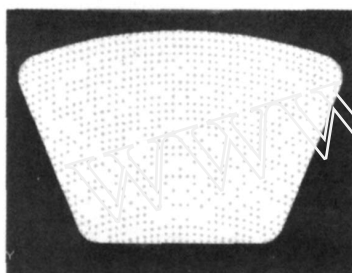


图 23 致动器排布图(环形)

Fig. 23 Actuator arrangement(Circular)

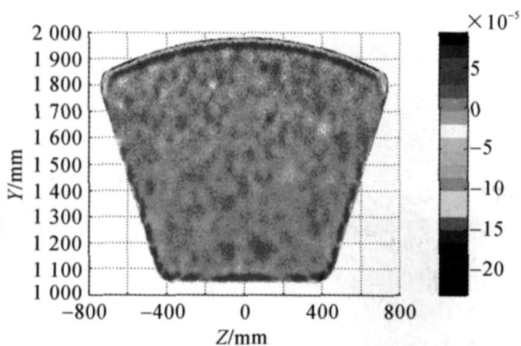


图 24 面形残差图(环形)

Fig. 24 Form error distribution(Circular)

($N = 340$)进行正方形和环形均匀排布,其变形后的面形残差 RMS 分别为 7.5316×10^{-5} mm 和 9.6799×10^{-5} mm,如图 22、图 24 所示,远没有达到所需精度(见表 6),是非球面梯度法结果的 3 倍多(见表 4)。因此,无论从致动器个数和还是对面形的校正能力上看,非球面梯度排布都比正方形和环形均匀排布具有更显著的优势。

表 6 正方形和环形排布分析结果

Tab. 6 Analysis of square and circular arrangements for actuators

致动器排布方法	致动器个数	RMS(mm)	P-V(mm)
正方形	697	2.0855×10^{-5}	4.7802×10^{-4}
环形	848	2.0927×10^{-5}	3.2478×10^{-4}
正方形	340	7.5316×10^{-5}	1.1559×10^{-3}
环形	340	9.6799×10^{-5}	1.0206×10^{-3}

4 结 论

本文针对非球面成形,提出了一种致动器排布的新方法——非球面梯度法。通过对实例的有限元分析,验证了平均值非球面度梯度公式是用于排布致动器初始解的最佳公式,用该公式求出的致动器排布初始解与最终解最接近,而且致动器排布结果也符合非球面梯度法的思想,即梯度变化率越大,致动器面密度越大。致动器排布的一系列优化工作可以进一步减小面形残差和致动器个数。通过比较可知,在相同的面形精度下,非球面梯度法排布的致动器个数约为正方形和环形排布的 1/2 或更小;在相同的致动器个数下,非球面梯度法排布的面形残差 RMS 值约为正方形和环形排布的 1/3 或更小。非球面梯度法排布比正方形和环形排布具有更明显的优势,它是非球面成形领域用于求解致动器排布初始解的理想方法。

参考文献:

[1] ZENG CH M, YU J CH. Research on the mechanism of shaping an aspherical mirror [J]. *SPIE*, 2005, 6149 :61492X.
 [2] 曾春梅,余景池. 计算超薄镜最接近球面的非球面梯度法及有限元分析[J]. *光学技术*, 2008, 34(3) : 323-327.

ZENG CH M, YU J CH. Aspherical grads method for calculating best fitting sphere of ultra-thin mirror and finite element analysis [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(3) :323-327. (in Chinese)
 [3] 叶露. 主动调节刚性支撑薄膜型反射镜面形调整机构的研究[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(2) :201-204.
 YE L. Micro-move devices for supporting and ad-

- justing large membrane mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10 (2) :201-204. (in Chinese)
- [4] 齐迎春,金光,许艳军. 空间薄膜反射镜面形设计及优化[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(6) :818-823.
QI Y CH, JIN G, XU YJ. Design and optimization for shape of space membrane mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6) :818-823. (in Chinese)
- [5] 吴清彬,陈时锦,董申. 参数优化方法在轻质反射镜结构设计中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2003, 11(5) :466-471.
WU Q B, CHEN SH J, DONG SH. Optimization of parameters structural design of lightweight reflector[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5) :466-471. (in Chinese)
- [6] 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 G Q, MA W L. The finite element analysis for large-aperture lightweight mirror mount [J]. *Opto Electronic Engineering*, 2001, 28 (5) : 14-17. (in Chinese)
- [7] 曾志革,凌宁,饶学军. 能动薄镜面的有限元分析[J]. *光电工程*, 1995, 22(2) :8-19.
ZENG ZH G, LING N, RAO XJ. Analysis for the finite element of the active thin mirror surface [J]. *Opto Electronic Engineering*, 1996, 22 (2) :8-19. (in Chinese)
- [8] 刘兵山,黄聪. *Patran 从入门到精通* [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.
LIU B SH, HUANG C. *Patran* [M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese)

作者简介:



曾春梅(1971-),女,四川自贡人,博士研究生,工程师,主要从事非球面成形的有限元分析及非球面加工与检测方面的研究。E-mail: chunmei_zeng@suda.edu.cn

导师简介:



余景池(1943-),男,浙江温州人,工学硕士,研究员,博士生导师,主要从事非球面加工与检测技术的研究。E-mail: yujc@suda.edu.cn

下期预告

一种基于临界角法检焦系统的设计

郝贤鹏^{1,2},任建岳¹,邹振书¹

(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)

利用临界角法检焦具有分辨力高、损失光能小、结构简单、系统调试容易的特点,利于实现亚微米级检焦系统的设计。根据菲涅尔公式,并通过合理假设,利用高斯光学公式可以得到离焦误差信号的计算公式。实验采用单光路临界角法,利用 He-Ne 激光器、临界角棱镜、四象限光电探测器、信号采样电路、数据采集卡等元器件组成离焦检测系统,实现离焦信号的提取;通过数字滤波、归一化处理等技术得到离焦误差信号(FES),以此获得 FES 的大小和变化趋势与离焦量的关系曲线。实验表明,临界角法探焦系统静态分辨力 < 15 nm、线性范围可达 ± 4 mm,满足亚微米级检焦系统的设计要求。