

变形镜的结构参数对其疲劳寿命的影响

罗 帅, 陈丽霞, 张 彬

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 在自适应波前校正过程中,变形镜(DM)受驱动器循环机械驱动作用会产生疲劳累积损伤。利用 DM 的影响函数和最小二乘法对波前校正过程进行模拟,采用有限元方法分析了 DM 在波前校正过程中的应力分布,并结合 Miner 疲劳累积损伤理论,计算了 DM 的疲劳寿命。在此基础上,重点讨论了 DM 结构参数对影响函数和 DM 疲劳寿命的影响。研究表明,对于给定的畸变波前,当 DM 极头数相同时,极头采用三角形排布方式时 DM 的交连值最小,疲劳寿命最长;极头采用正方形排布方式时 DM 的交连值最大,疲劳寿命最短。此外,当极头间距增大时,DM 交连值会随之减小,致使 DM 的疲劳寿命变长。当极头间距相同时,增大极头半径和缩短极头长度会使 DM 的交连值变小,DM 的疲劳寿命也会变短。极头间距变化对 DM 疲劳寿命的影响程度大于极头半径和长度;当极头间距一定时,不同的排布方式对应的极头数目不同,DM 的极头数越多,疲劳寿命就越短。

关键词 自适应光学; 变形镜; 疲劳寿命; 有限元分析; 结构参数; 交连值

中图分类号 TP273.2; O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1001003

Influence of Structural Parameters of Deformable Mirror on Its Fatigue Life

Luo Shuai, Chen Lixia, Zhang Bin

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract The cumulative fatigue damage of deformable mirrors (DMs) is generated due to the action of the circular mechanical drive of the actuators in the process of adaptive wavefront correction. The wavefront correction process of the DM has been simulated by the least squares method and the influence function of the DM, and the corresponding stress distribution of the DM in the wavefront correction process has also been analyzed by the finite element method. Additionally, the fatigue life of the DM has further been calculated with the Miner cumulative fatigue damage theory. On this basis, the influences of the structural parameters of the DM on the influence function and the fatigue life of the DM have been discussed. The results show that the coupling coefficient of the DM is minimal and the fatigue life is the longest when the poles are distributed in the triangular arrangement for the given distorted wavefront and the equal number of poles of the DM. However, the coupling coefficient of the DM is maximal and the fatigue life is the shortest when the poles are distributed in the square arrangement. Furthermore, the coupling coefficient of the DM decreases with the increasing pole spacing, resulting in the increasing fatigue life of the DM. Meanwhile, the coupling coefficient and the fatigue life of the DM decrease with the increasing pole radius and the decreasing pole length when the pole spacing is fixed. On the whole, the influence of the pole spacing on the fatigue life of the DM is more significant than that of the pole radius and length. Furthermore, for the given pole spacing, the number of the poles varies with pole distribution manners and the fatigue life of the DM decreases with the increasing number of poles.

Key words adaptive optics; deformable mirror; fatigue life; finite element analysis; structural parameters; coupling coefficient

OCIS codes 010.1080; 110.1080; 230.4040; 220.1080

收稿日期: 2017-03-29; **收到修改稿日期:** 2017-06-09

基金项目: 科技部创新人才推进计划(2014RA4051)、苏州大学省级重点实验室开放课题(KSJ1404)

作者简介: 罗 帅(1992—),男,硕士研究生,主要从事变形镜疲劳损伤等方面的研究。E-mail: 529951343@qq.com

导师简介: 张 彬(1969—),女,博士,教授,主要从事高功率激光技术、光束传输变换和控制、非线性光学等方面的研究。

E-mail: zhangbinff@sohu.com(通信联系人)

1 引 言

自适应光学系统通常由三部分组成,即波前传感器、计算控制处理器和波前校正器,变形镜(DM)作为最常用的波前校正器,通过改变反射镜面的形貌来补偿波前相位畸变^[1],是自适应光学系统中的关键器件,其性能直接影响整个系统的波前校正能力。变形镜在使用过程中的性能退化受到人们的广泛关注。已有研究表明,变形镜在波前校正的过程中,驱动器会对镜面产生非均匀的机械驱动作用,导致镜面产生非均匀的应力分布^[2]。在驱动器的循环驱动作用下,变形镜镜面内部原子的平衡会被逐渐打破^[3],从而产生一定的缺陷,导致变形镜材料性能退化,最终出现疲劳损伤。在随机畸变波前的校正过程中,变形镜受变幅应力循环作用后会产生疲劳损伤,根据疲劳累积损伤理论,可对元件在变幅应力循环作用下的疲劳寿命进行有效预测。目前,工程上广泛采用 Miner 理论来计算元件的疲劳寿命,该理论计算模型不仅简单实用,而且精度较高。由 Miner 理论可知,当元件发生疲劳损伤时,荷载循环的次数近似等于元件的疲劳寿命^[4-5]。

除了通光孔径和表面面形精度外,变形镜的面形影响函数与交连值也是表征其性能的重要指标。随着变形镜结构参数的变化,面形影响函数与交连值会发生相应变化,不仅影响变形镜的校正能力^[6],还会影响其疲劳寿命。19 世纪初,人们逐渐开始对材料的疲劳特性展开研究,迄今为止,已在机械工程和航空等领域开展了大量的研究^[7-8]。在光学领域内,于善猛等^[9]对空间光学系统中光学元件的疲劳寿命进行了研究,陈丽霞等^[2]利用有限元分析方法研究了变形镜的疲劳损伤特性以及影响变形镜疲劳寿命的主要因素。然而,目前鲜有关于变形镜结构参数对其疲劳寿命影响的报道。本文利用有限元分析软件 ANSYS,建立了变形镜在校正畸变波前过程中的应力分析模型,根据 Miner 疲劳累积损伤理论,对变形镜的疲劳寿命进行仿真计算,并通过改变变形镜的结构参数,重点分析变形镜的结构参数与交连值的关系,以及变形镜的结构参数对疲劳寿命的影响。

2 理论模型

2.1 变形镜的影响函数模型

在自适应光学系统中,变形镜作为一种典型的波前校正器件,是自适应光学系统的重要组成部分,其校正性能主要由面形影响函数决定。影响函数表示仅由单一驱动器驱动时镜面所产生的形状^[10],可由高斯函数近似表示为^[11]

$$I_i(x, y) = \exp\left[\ln b \cdot \frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{d^2}\right], \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

式中 (x_i, y_i) 为第 i 个驱动器的位置坐标; d 为驱动器的间距; b 为交连值,表示相邻驱动器中心的影响函数值,与变形镜镜面、驱动器的刚度和配置形状有关^[12]。单个驱动器产生的形变量很小且相互独立,因此,整个变形镜的镜面面形可视为每个驱动器作用产生的镜面面形的线性叠加^[13],而权值即为各个驱动器的等效控制电压,由此得到的变形镜面形 $W(x, y)$ 为

$$W(x, y) = \sum_{i=1}^n V_i \cdot I_i(x, y), \quad (2)$$

式中 V_i 为第 i 个驱动器的等效控制电压。

假设待校正波前为 $\phi(x, y)$ 时,变形镜对 $\phi(x, y)$ 进行校正的目标驱动电压控制方程为

$$\phi(x, y) = \sum_{i=1}^n V_i \cdot I_i(x, y). \quad (3)$$

在对波前进行拟合的过程中,难以对(3)式中的控制电压 V_i 进行解析求解,通常是在误差允许范围内寻求最优解,从而使变形镜构造波前 $W(x, y)$ 最大程度地接近待校正波前 $\phi(x, y)$ 。于是,经变形镜校正后的残余波前可以表示为

$$R(x, y) = \phi(x, y) - \sum_{i=1}^n V_i \cdot I_i(x, y). \quad (4)$$

采用最小二乘法对畸变波前进行拟合^[14],以残余波前 $R(x, y)$ 作为目标函数,使其方差取极小值,即可得到变形镜各驱动器的控制电压矩阵。

2.2 疲劳模型

材料在应力或应变的反复作用下所发生的性能退化称为疲劳,通常特指会导致材料开裂或者破坏的性能退化。疲劳寿命是指材料结构在机械驱动作用下由完好直至破坏所需循环荷载的次数或者时间。变形镜在实际工作中主要受到变幅应力循环作用,因而可以根据 Miner 疲劳累积损伤理论对变形镜的疲劳寿命进行估算。

在机械驱动作用下,一个循环荷载作用对元件造成的损伤可表示为

$$D = \frac{1}{N}, \quad (5)$$

式中 N 为对应于当前荷载水平 S 的疲劳寿命。

在等幅荷载下, n 个循环造成的损伤为

$$D = \frac{n}{N}. \quad (6)$$

当 $D=1$ 时,元件将发生疲劳破坏,此时,元件的平均疲劳寿命等于荷载的循环次数。

在变幅荷载下,假设元件受到 m 个不同的应力水平作用,在应力水平 S_i 下达到破坏的循环次数为 N_i ,设 D 为元件最终破坏时累积损伤的临界值,则应力 S_i 每对元件作用一次的损伤为 D/N_i ,经过 n_i 次循环后,对材料造成的总损伤为 $n_i D/N_i$ 。当各级应力对材料的总损伤综合到达临界值 D 时,元件即发生破坏,因此有

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = 1. \quad (7)$$

在疲劳寿命的计算中,通常采用雨流计数法^[15]来计算应力循环次数。常思伟等^[16]根据 Miner 疲劳累积损伤理论和雨流计数法对齿根进行弯曲疲劳寿命仿真分析。利用上述疲劳模型对文献[16]中的齿根进行疲劳寿命复算,得到的疲劳寿命结果与文献一致,证实了该方法的正确性和有效性。

2.3 变形镜模型

变形镜通常由镜面、极头、驱动器和基座 4 部分组成,其基本结构如图 1 所示。极头为变形镜镜面与驱动器之间的连接单元,极头的材料与镜面相同;驱动器的材料通常为压电陶瓷;基底材料为 Si,其基本物理特性参数为:材料密度为 $2329 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,比热容为 $733 \text{ J}\cdot\text{kg}\cdot\text{K}^{-1}$,导热系数为 $173.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,热膨胀系数为 $4.15 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,杨氏模量为 130.91 GPa ,泊松比为 0.266 。以 61 单元变形镜模型为例进行仿真计算,变形镜尺寸为 $\Phi 220 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$,极头尺寸为 $\Phi 8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,间距为 25 mm 。

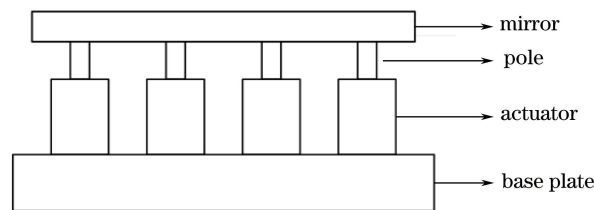


图 1 变形镜的基本结构

Fig. 1 Fundamental structure of DM

3 变形镜疲劳寿命分析

以随机相位屏构建的相位分布为待校正波前,根据变形镜的影响函数模型,利用最小二乘法对畸变波前进行拟合,求得变形镜各驱动器的控制电压。利用有限元方法对机械驱动作用下变形镜的应力分布进行仿真,得到机械应力荷载谱后,利用疲劳分析软件并结合材料的疲劳参数计算变形镜的疲劳寿命。具体仿真流程如图 2 所示。

当变形镜的结构和参数发生改变时,其交连值也会随之改变。当交连值变化时,根据(1)式可知,变形镜的影响函数也会发生相应的变化。通过拟合畸变波前可得到不同的驱动器等效控制电压,进而计算出变形

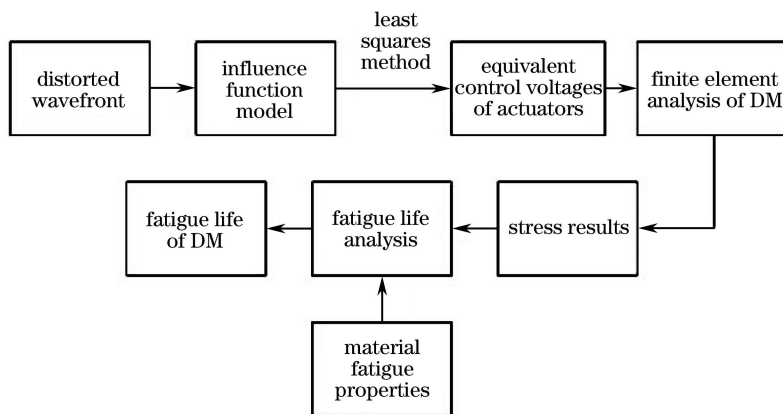


图 2 仿真流程图

Fig. 2 Flowchart of the simulation

镜相应的等效应力和疲劳寿命。

待校正波前如图 3(a)所示,通过仿真计算得到的变形镜拟合面形如图 3(b)所示。

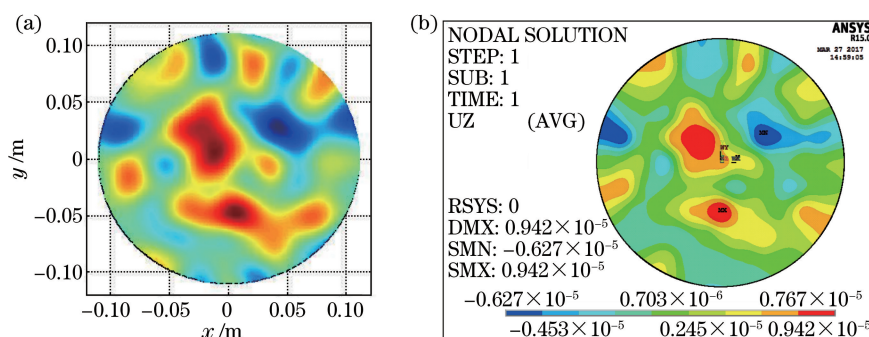


图 3 (a)畸变波前;(b)变形镜拟合面形

Fig. 3 (a) Distorted wavefront; (b) fitting surface shape of DM

由图 3 可以看出,通过计算拟合得到的变形镜面形分布与待校正波前分布基本一致,此时,变形镜的等效应力分布及其对应的疲劳寿命云图如图 4 所示。

由图 4 可知,变形镜表面的最大等效应力约为 24.60 MPa,位于 47 号极头与镜面连接处;从疲劳寿命云图中可以看出,变形镜的对数寿命最小为 9.70,也位于 47 号极头与镜面连接处,对应于图 3(b)变形镜中产生形变量最大的位置。疲劳寿命的计算结果通常用对数疲劳寿命 $\lg N$ 来表示,参考轴数据为 10 的指数,单位为次。图 4 中的计算结果与文献[2]中所报道的变形镜等效应力和疲劳寿命量级一致,得出的变形镜疲劳特性也一致,说明计算结果正确有效。

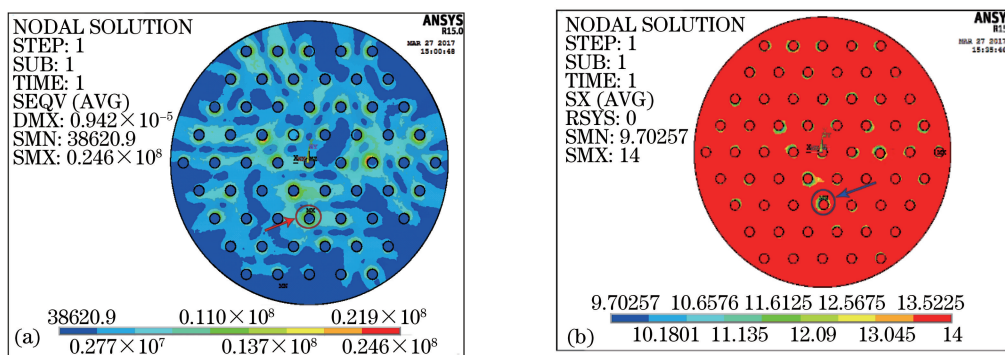


图 4 变形镜的(a)等效应力分布与(b)疲劳寿命云图

Fig. 4 (a) Equivalent stress distribution and (a) fatigue life nephogram of DM

3.1 极头排布方式对变形镜疲劳寿命的影响

根据本文变形镜模型,首先比较了极头间距为 25 mm、半径为 4 mm 和长度为 10 mm 时,在不同的极头排布方式下变形镜的交连值、影响函数和疲劳寿命。变形镜极头常见的排布方式有三角形、圆形和正方形,如图 5 所示。

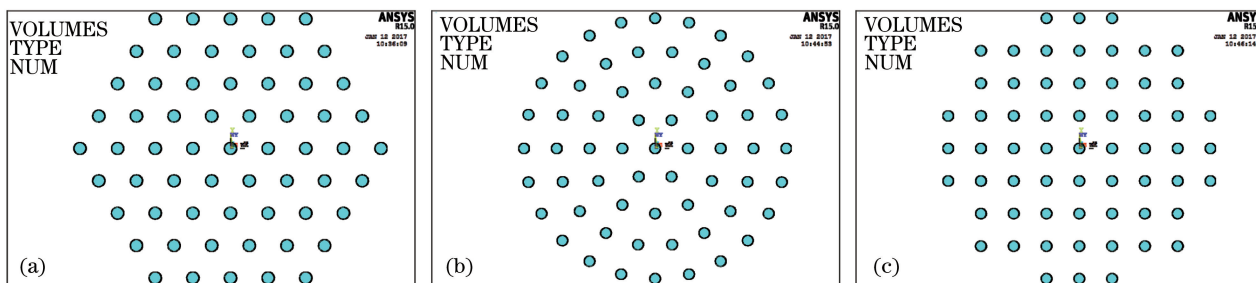


图 5 极头常见的排布方式。(a)三角形排布;(b)圆形排布;(c)正方形排布

Fig. 5 Common arrangements of poles. (a) Triangular arrangement; (b) circular arrangement; (c) square arrangement

极头分别采用图 5 所示的排布方式,通过计算单个极头驱动对变形镜面形的影响,拟合得到影响函数中的交连值 b 。经计算,不同极头排布方式下单个极头归一化的影响函数曲线如图 6 所示,交连值如表 1 所示。

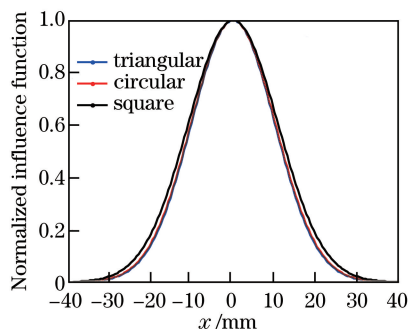


图 6 单个极头归一化影响函数曲线

Fig. 6 Normalized influence function curves of single pole

表 1 不同极头排布方式对应的交连值

Table 1 Coupling coefficients of different arrangements of poles

Arrangement of poles	Coupling coefficient
Triangular	0.048
Circular	0.052
Square	0.072

由图 6 和表 1 可知,在三角形极头排布方式下,变形镜的交连值最小,单个极头驱动对变形镜的影响最小;在正方形极头排布方式下,变形镜的交连值最大,单个极头驱动对变形镜的影响最大;在圆形极头排布方式下,变形镜的交连值居中。

根据影响函数模型计算得到驱动器控制电压后,进一步分析比较了变形镜极头在 3 种排布方式下对应的最大等效应力与疲劳寿命,如表 3 所示。

由表 2 可知,三角形排布方式所产生的变形镜表面最大等效应力值最小,疲劳寿命最大;正方形排布方式所产生的最大等效应力值最大,疲劳寿命最小;圆形排布方式下,最大等效应力值和疲劳寿命居中。

表 2 不同排布方式对应的最大等效应力与疲劳寿命

Table 2 Maximum equivalent stress and fatigue life with different arrangements of poles

Arrangement of poles	Maximum equivalent stress of DM /MPa	Logarithmic fatigue life
Triangular	24.60	9.70
Circular	25.40	9.54
Square	26.20	9.45

3.2 极头间距对变形镜疲劳寿命的影响

当变形镜口径给定时,极头间距会影响极头的密度。根据(1)式可知,间距是影响函数中的重要参数,因此,极头间距的变化必然会引起影响函数和镜面应力分布的变化。为了研究极头间距对变形镜影响函数和疲劳寿命的影响,当极头半径为 4 mm、长度为 10 mm 时,分别计算了 3 种排布方式下不同极头间距时的交连值、变形镜表面的最大等效应力和疲劳寿命,结果如图 7 所示。

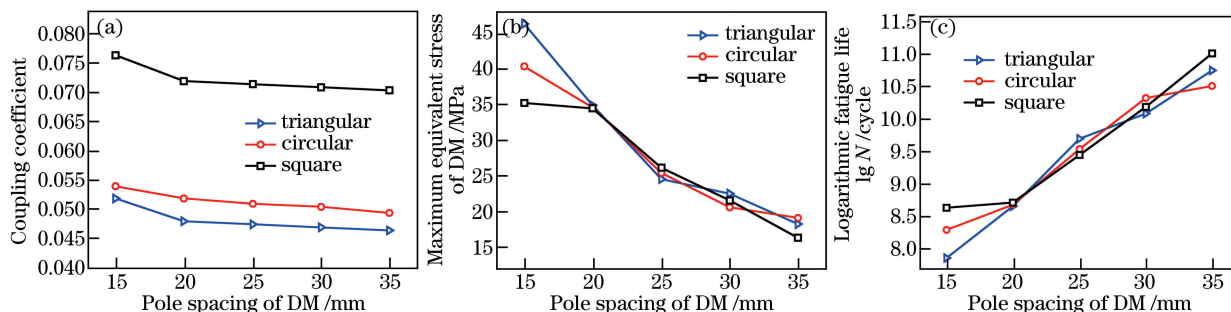


图 7 不同极头间距对应的变形镜。(a)交连值;(b)最大等效应力;(c)疲劳寿命

Fig. 7 Deformable mirrors with different pole spacings. (a) Coupling coefficient; (b) maximum equivalent stress; (c) fatigue life

由图 7(a)可知,随着极头间距的增大,变形镜的交连值逐渐减小,表明相邻极头间的影响逐渐减小,单个极头驱动对镜面的影响也会减小。由图 7(b)、(c)可知,随着极头间距的增加,变形镜的最大等效应力会逐渐减小,变形镜的疲劳寿命则会随之变长。分析其原因在于:极头间距逐渐增大,而极头的形状不变,交连值逐渐减小,根据(1)式可知,变形镜的面形影响函数会逐渐减小,也就是说变形镜在驱动器作用下所产生的形变会逐渐变小,因此,变形镜的等效应力也会逐渐变小,疲劳寿命逐渐变长。此外,在相同的间距下,采用不同的极头排布方式时,所需的极头数目有所不同。变形镜所需的极头数越多,其表面应力越大,疲劳寿命就越短。具体来说,当极头间距为 15 mm 时,采用三角形排布时所需的极头数最多,变形镜的疲劳寿命最短;采用正方形排布时所需的极头数最少,变形镜的疲劳寿命最长。由于极头会对镜面产生一定的约束作用,极头间距越小,极头数目越多,会增加变形镜表面面形的起伏,使相邻极头间的相对位移增大,导致变形镜表面的应力增大、疲劳寿命变短。因此,在设计变形镜极头间距时,应当同时考虑不同排布方式下极头数目对变形镜的影响。

3.3 极头半径对变形镜疲劳寿命的影响

极头半径直接决定了极头与镜面的接触面积,极头半径的变化会影响极头对镜面施加的作用力,从而影响变形镜的影响函数和疲劳寿命。当极头间距为 25 mm、长度为 10 mm 时,分别计算了 3 种排布方式下不同极头半径所对应的变形镜的交连值、最大等效应力和疲劳寿命,结果如图 8 所示。

从图 8(a)可以看出,随着极头半径的增大,变形镜交连值逐渐减小,表明相邻极头间的影响逐渐减小,而极头间距是给定的,因此,影响函数也会逐渐减小。当极头采用三角形和圆形排布方式时,变形镜的交连

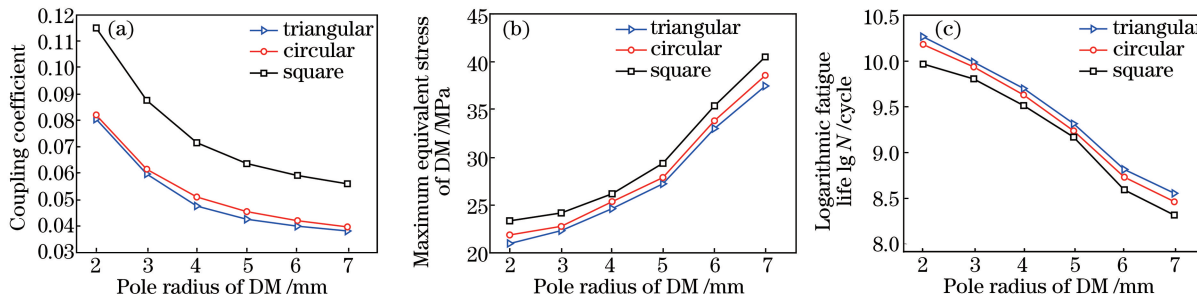


图 8 不同极头半径对应的变形镜。(a)交连值;(b)最大等效应力;(c)疲劳寿命

Fig. 8 Deformable mirrors with different pole radii. (a) Coupling coefficient; (b) maximum equivalent stress; (c) fatigue life

值相近;当极头采用正方形排布方式时,变形镜的交连值相对较大。分析图 8(b)、(c)可知,随着极头半径的增大,变形镜表面的最大等效力逐渐变大,疲劳寿命逐渐变短。此外,当极头半径在一定范围内(如 6 mm)时,变形镜疲劳寿命的变化速率逐渐增大;当极头半径超过一定范围(如 6 mm)时,变形镜的疲劳寿命变化有所变缓。

3.4 极头长度对变形镜疲劳寿命的影响

极头是连接镜面与驱动器的关键部分,极头长度的变化必然会导致驱动器对镜面施加的作用力发生变化,使影响函数发生变化,进而使镜面的应力分布发生变化,最终影响变形镜的疲劳寿命。当极头间距为 25 mm、半径为 4 mm 时,分别计算了 3 种排布方式下不同极头长度所对应的变形镜的交连值、最大等效力和疲劳寿命,结果如图 9 所示。

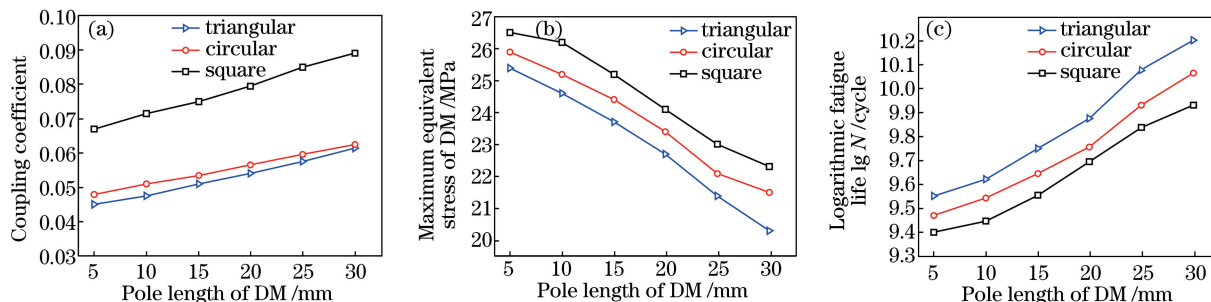


图 9 不同极头长度对应的变形镜。(a)交连值;(b)最大等效力;(c)疲劳寿命

Fig. 9 Deformable mirrors with different pole lengths. (a) Coupling coefficient; (b) maximum equivalent stress; (c) fatigue life

由图 9(a)可知,随着极头长度的增加,交连值逐渐增大,表明相邻极头间的影响逐渐增大,由于极头的间距始终不变,因此,影响函数会逐渐增大。当极头采用三角形和圆形排布方式时,变形镜的交连值相近;当极头采用正方形排布方式时,变形镜的交连值相对较大。由图 9(b)、(c)可知,随着极头长度的增大,变形镜表面的最大等效力值逐渐减小,疲劳寿命随之逐渐增大。此外,当极头长度在一定范围(如 25 mm)内时,其变化速率逐渐增加;当极头长度超过一定范围(如 25 mm)后,其变化速率变缓。

对比图 7(c)、图 8(c)和图 9(c)可知,改变极头的间距,会使变形镜的疲劳寿命产生约 3 个量级的变化;改变极头的半径,变形镜的疲劳寿命约变化 1.5 个量级;改变极头的长度,变形镜的疲劳寿命变化范围还不到 1 个量级。由此可见,极头间距对变形镜疲劳寿命的影响程度远大于极头的长度和半径对变形镜疲劳寿命的影响。当极头间距小于 20 mm 时,变形镜极头数大于 100,但其疲劳寿命小于 $10^{8.5}$ 。然而,当极头间距大于 20 mm 时,变形镜的疲劳寿命迅速增长,甚至可达到 10^{11} 以上。但是随着极头数的迅速减少,变形镜校正畸变波前的能力也会降低。因此,当对变形镜校正能力要求不高时,极头间距最好大于 20 mm 但不超过 35 mm。当极头半径超过 5 mm 时,变形镜疲劳寿命的减小速率增大,且疲劳寿命低于 10^9 ,所以极头半径最好控制在 5 mm 以内。对变形镜校正能力要求较高时,则可通过选取合理的极头间距和半径来尽量延长变形镜的疲劳寿命。此外,极头长度对变形镜疲劳寿命的影响相对较小,因而采取合理的极头长度即可。

4 结 论

利用有限元分析方法,建立了变形镜在校正畸变波前过程中的应力分析模型,结合 Miner 疲劳累积损伤理论,分析了变形镜的疲劳特性。重点分析了变形镜的结构参数与交连值、影响函数之间的关系,以及这些参数对疲劳寿命的影响。研究表明:在相同的畸变波前下,变形镜的结构参数会对影响函数和疲劳寿命产生不同的影响。针对本文的变形镜模型及参数,通过分析比较可以得出以下结论:1)不同的极头排布方式下,若极头的数目相同,则采用三角形排布方式为最佳,变形镜表面等效力最小,疲劳寿命最长;2)随着极头间距的增大,变形镜交连值会逐渐减小,影响函数也逐渐变小,导致变形镜表面的等效力减小,疲劳寿命变长,在对变形镜波前校正能力要求不高的前提下,极头间距可控制在 20~35 mm 之间;3)在相同极头间

距下,变形镜采用不同的极头排布方式时,所需要的极头数目不同,极头数目越多,变形镜表面的等效应力越大,疲劳寿命越短;4)随着极头半径的增大或极头长度的缩短,变形镜的交连值会逐渐减小,致使变形镜的表面应力增大,疲劳寿命变短。针对本文的变形镜模型参数,极头半径应当控制在 5 mm 内,并适当增加极头的长度即可。在诸多结构参数中,变形镜的疲劳寿命受极头间距的影响程度大于极头半径和长度。因此,在对变形镜进行优化设计时,不仅需要考虑变形镜的校正能力,还应综合考虑各参数对变形镜疲劳寿命的影响。其中,变形镜结构以三角形排布方式较优,并需要优先考虑极头间距,其次考虑极头半径和长度对变形镜疲劳寿命的影响。

参 考 文 献

- [1] Lin Xudong, Xue Chen, Liu Xinyue, *et al.* Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics[J]. Chinese Optics, 2012, 5(4): 337-351.
林旭东, 薛陈, 刘欣悦, 等. 自适应光学波前校正器技术发展现状[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 337-351.
- [2] Chen Lixia, Hu Xiaochuan, Zhang Bin, *et al.* Fatigue damage characteristics of deformable mirrors for wavefront correction[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(11): 1105002.
陈丽霞, 胡小川, 张彬, 等. 波前校正变形镜的疲劳损伤特性[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1105002.
- [3] Xu Jinquan, Guo Fengming. Mechanism of fatigue damage evolution and the evolution law[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(2): 40-46.
许金泉, 郭凤明. 疲劳损伤演化的机理及损伤演化律[J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 40-46.
- [4] Yao Weixing. Fatigue life prediction of structure[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 75-80.
姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 75-80.
- [5] Ni Kan. Advances in stochastic fatigue cumulative damage theory[J]. Advances in Mechanics, 1999, 29(1): 43-65.
倪侃. 随机疲劳累积损伤理论研究进展[J]. 力学进展, 1999, 29(1): 43-65.
- [6] Peng Jiaqi, Hu Xiaochuan, Chen Lixia, *et al.* Effect of structural parameters of deformable mirrors on phase characteristics of high-power laser[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0514001.
彭家琪, 胡小川, 陈丽霞, 等. 变形镜结构参数对高功率激光相位特性的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0514001.
- [7] Zhang Ming, Li Zhiyong, Cui Shuai, *et al.* Analysis on contact fatigue life of aerospace bearing[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(6): 938-941.
张明, 李志勇, 崔帅, 等. 航空航天轴接触疲劳寿命分析[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(6): 938-941.
- [8] Mi Chengji, Gu Zhengqi, Wu Wenguang, *et al.* Fatigue life analysis of rear axle housing of mining dump truck under random load[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(12): 103-109.
米承继, 谷正气, 伍文广, 等. 随机荷载下矿用自卸车后桥壳疲劳寿命分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(12): 103-109.
- [9] Yu Shanmeng, Liu Ju, Jiang Fan, *et al.* Fatigue study for processing of space optical remote-sensor primary mirror[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(7): 771-775.
于善猛, 刘巨, 江帆, 等. 空间光学传感器主镜加工过程中疲劳寿命研究[J]. 光子学报, 2012, 41(7): 771-775.
- [10] Tyson R K. Using the deformable mirror as a spatial filter: Application to circular beams[J]. Applied Optics, 1982, 21(5): 787-793.
- [11] Ma Xuemei, Han Kai, Zhang Bin. Prediction for wavefront correction effect of discrete deformable mirror based on filter function[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0101002.
马雪梅, 韩开, 张彬. 基于滤波函数的分立变形镜波前校正效果预估[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0101002.
- [12] Zhou Renzhong. Adaptive optics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996: 252-257.
周仁忠. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 252-257.
- [13] Tyson R K, Byrne D M. The effect of wavefront sensor characteristics and spatiotemporal coupling on the correcting capability of a deformable mirror[C]. SPIE, 1980, 228: 21-25.
- [14] Yang Huafeng, Liu Guilin, Rao Changhui, *et al.* Spatial frequency analysis of wavefront compensation capabilities of deformable mirror[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(11): 1845-1848.
杨华峰, 刘桂林, 饶长辉, 等. 变形镜波前补偿能力的空间频域分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(11): 1845-1848.
- [15] Zhao Xiaopeng, Jiang Ding, Zhang Qiang, *et al.* Application of rain-flow counting method in the analysis of load spectrum[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(3): 67-73.
赵晓鹏, 姜丁, 张强, 等. 雨流计数法在整车载荷谱分析中的应用[J]. 科学导报, 2009, 27(3): 67-73.

- [16] Chang Siwei, Zhao Xiangfei, Wang Baochao, *et al.* Fatigue analysis and simulation of gear based on ANSYS/FE-SAFE [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical, 2013, 26(3): 86-88.
常思伟, 赵向飞, 王宝超, 等. 基于 ANSYS/FE_SAFE 的齿轮弯曲疲劳仿真分析[J]. 机电产品开发与创新, 2013, 26(3): 86-88.