

# 衍射主镜面外拼接误差分析

李韬杰<sup>1,2,3</sup>, 吴鹏<sup>2,3</sup>, 尹韶云<sup>2,3</sup>, 杨正<sup>2,3</sup>, 杜春雷<sup>2,3</sup>, 汪岳峰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国人民解放军陆军工程大学电子与光学工程系, 河北 石家庄 050000;

<sup>2</sup>中国科学院重庆绿色智能技术研究院集成光电研究中心, 重庆 400714;

<sup>3</sup>跨尺度制造技术重庆市重点实验室, 重庆 400714

**摘要** 多子镜拼接的方法可实现大口径菲涅耳衍射透镜制作, 但拼接误差会对光学系统的成像质量造成影响。通过衍射光线追迹和波前恢复的方法, 正向得到了子镜沿自身  $x'$  轴倾斜、 $y'$  轴倾斜、 $z'$  轴平移等面外误差与对应波前误差 Zernike 系数的数据库。利用数据库基于反向传播神经网络优化算法反向建立波前误差 Zernike 系数与对应面外误差的非线性耦合映射模型, 可实现通过输入 Zernike 系数完成对面外误差耦合扰动情况的快速求解, 运用带有符号的数值判定面外误差的大小及方向。对该模型进行模拟数值计算, 验证了该方法的精度及可靠性, 为衍射拼接主镜的共面检测、装调提供理论依据。

**关键词** 成像系统; 衍射拼接主镜; 面外拼接误差; 反向传播神经网络; 耦合扰动

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0211002

## Piston and Tip-Tilt Error Analysis of Segmented Diffractive Lens

Li Taojie<sup>1,2,3</sup>, Wu Peng<sup>2,3</sup>, Yin Shaoyun<sup>2,3</sup>, Yang Zheng<sup>2,3</sup>, Du Chunlei<sup>2,3</sup>, Wang Yuefeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic and Optical Engineering, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang, Hebei 050000, China;

<sup>2</sup>System Integration Center of Optics and Electronics, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China;

<sup>3</sup>Chongqing Key Laboratory of Multi-Scale Manufacturing Technology, Chongqing 400714, China

**Abstract** The large-caliber Fresnel diffraction lens can be produced by the multiple segmented lens splicing method, yet the splicing error has effects on the image quality of the optical system. The database of piston and tip-tilt error and corresponding wavefront error Zernike coefficient of the segmented lens along its own  $x'$  axis tilt,  $y'$  axis tilt,  $z'$ -axis piston is obtained by means of diffractive ray tracing and wavefront reconstruction method. The nonlinear coupling mapping model of the Zernike coefficient and the corresponding piston and tip-tilt error is established with the database based on back-propagation neural network optimization algorithm. We can accomplish the quick solution to the piston and tip-tilt error coupling disturbance by inputting the Zernike coefficients, and determine the magnitude and direction of the piston and tip-tilt error by the symbol of values. The model is simulated numerically, the accuracy and reliability of the analytical method are verified. This work provides theoretical basis for the coplanar detection and adjustment of the segmented diffractive lens.

**Key words** imaging systems; segmented diffractive lens; piston and tip-tilt error; back-propagation neural network; coupling disturbance

**OCIS codes** 110.3000; 090.1970; 080.1753

## 1 引 言

空间望远镜为了实现静止轨道对地米级观测,

要求其光学系统口径大( $\geq 20$  m)<sup>[1]</sup>、质量轻。薄膜衍射透镜由于具有轻质、柔性易折叠、面形公差宽松等优点<sup>[2]</sup>, 越来越多地被用于大型望远主镜。受工

收稿日期: 2017-08-29; 收到修改稿日期: 2017-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(61605208, 61475199)、中国科学院国防科技创新基金(CXJJ-15M061)、航天专用技术预研项目(30502010203)

作者简介: 李韬杰(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事衍射光学成像研究。E-mail: xrwlitaojie@163.com

导师简介: 汪岳峰(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事微纳光学研究。E-mail: wyf\_gx110@sina.com(通信联系人)

艺条件所限,采用多子镜拼接实现大口径薄膜衍射透镜是当下行之有效的途径之一。国外在该领域研究起步较早;美国空军实验室激光光学研究中心对单口径光子筛式衍射主镜成像特性进行研究并研制出样机<sup>[3-5]</sup>,验证了衍射主镜望远镜的可行性;美国国防部高级研究计划局的“云纹计划”提出利用多个口径约 1 m 的子镜拼接成直径 10 m 的薄膜菲涅耳衍射主镜<sup>[6]</sup>;利弗莫尔国家实验室已经研制出 5 m 口径玻璃基底的拼接菲涅耳衍射主镜验证样机<sup>[7]</sup>;Ball Aerospace & Technologies 公司设计出子镜圆周排列的折叠式薄膜基底拼接菲涅耳衍射主镜样机<sup>[8]</sup>。但是,以上研究都没有给出具体的拼接误差装调方法及拼接理论参考。国内方面:中国科学院微电子研究所报道了单口径光子筛在应用方面的相关进展<sup>[9-10]</sup>;中国科学院光电技术研究所报道了玻璃基质菲涅耳衍射透镜拼接误差的分析工作<sup>[11]</sup>,该方法只能计算由光轴向外连续孔径的拼接误差,不能对离轴子镜的拼接误差展开分析;中国科学院长春光学精密机械与物理研究所报道了光子筛的面内平移误差研究工作<sup>[12]</sup>,该方法适用于共面条件下衍射透镜的面内平移误差修正。相位型光子筛效率较低,适合于强光目标成像应用(如太阳黑子、日珥成像),在静止轨道对地高分遥感观测应用中,菲涅耳相位型衍射主镜效率更高,因此,本文以拼接菲涅耳型衍射主镜为研究对象。目前国内尚没有菲涅耳型衍射主镜离轴子镜面外拼接误差的相关报道。

拼接主镜完善共面之前,子镜可能同时存在多个自由度的拼接误差。采用灵敏度矩阵计算机辅助装调的方法<sup>[13-14]</sup>,迭代次数多、时效性不强,在差分矩阵和拼接误差解耦合时 2 次引入的线性近似同样会对结果产生影响。本文基于反向传播(BP)神经网络优化算法<sup>[15]</sup>,利用其优异的非线性数值逼近能力,通过面外拼接误差随机赋值建立起波前 Zernike 系数与面外拼接误差的映射模型。利用衍射光线追迹和 Zernike 多项式波前恢复正向得到面外拼接误差所对应的波前 Zernike 系数,再通过 BP 神经网络反向求解波前误差 Zernike 系数对应的子镜位姿,在增强时效性的同时,提高了解析非线性耦合误差的计算精度,对拼接主镜的共面装调具有实际应用意义。

## 2 面外拼接误差分析

图 1 为薄膜衍射拼接主镜结构图,该结构为参考美国“云纹计划”子镜排布的缩比模型,对于理论

研究不失一般性。共由 2 圈子镜组成,每圈含 18 个子镜。主镜中心  $O$  为全局坐标系原点,虚线表示薄膜衍射主镜的二元衍射结构的环带分布方向。拼接主镜焦距  $f=2400$  mm,内圈小子镜半径  $r=36$  mm、中心距主镜中心  $l_r=230$  mm,外圈大子镜半径  $R=56$  mm、中心距主镜中心  $l_R=340$  mm,工作波长  $\lambda=0.55 \mu\text{m}$ ,以平行光沿  $z$  轴正方向入射。

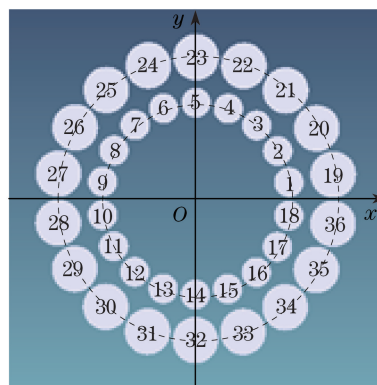


图 1 衍射拼接主镜示意图

Fig. 1 Schematic of segmented diffractive lens

单个子镜面外拼接误差如图 2 所示,每个子镜以自身中心  $O'$  为原点建立局部坐标系,局部坐标系各坐标轴与主镜全局坐标系相应坐标轴平行。 $A(x_A, y_A, z_A)$  为入射光线在入射空间点的坐标,  $B(x_B, y_B, z_B)$  为入射光线与镜面交点坐标,  $C(x_C, y_C, z_C)$  为出射光线与焦平面交点坐标,  $F$  为焦点。虚线表示光线理想情况下会聚于焦点,实线表示子镜存在面外拼接误差时,光线发生偏折。 $\alpha$  为子镜沿局部坐标系  $x'$  轴倾斜角,  $\beta$  为子镜沿局部坐标系  $y'$  轴倾斜角,  $\Delta z$  为子镜沿局部坐标系  $z'$  轴平移量。当子镜产生这 3 个方向的面外拼接误差时,不同子镜之间不再共面,会令本该会聚于焦点的光线偏折到焦点以外,对最终的主镜像质产生影响。

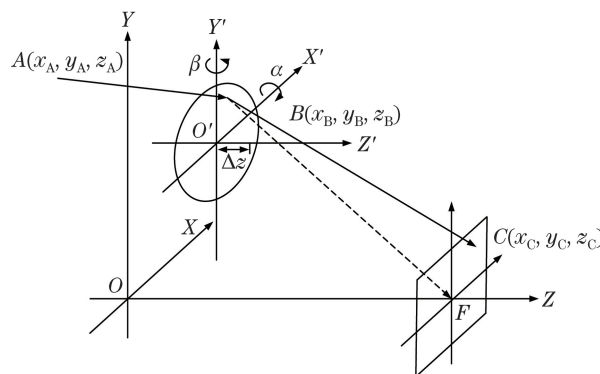


图 2 子镜光路示意图

Fig. 2 Light path of segmented lens

面外拼接误差分析流程如图 3 所示。

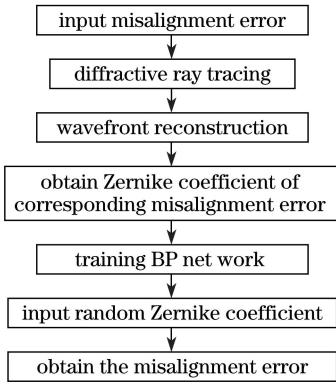


图 3 子镜面外拼接误差分析流程图

Fig. 3 Flow chart of piston and tip-tilt error analysis of segmented lens

### 2.1 衍射光线追迹

根据衍射光线追迹公式<sup>[16]</sup>,对于已知入射方向余弦 $(\omega, \epsilon, \psi)$ 的单色光,可以得到出射光的方向余弦 $(\omega', \epsilon', \psi')$ :

$$\begin{cases} \omega' = \omega + T \cos \alpha + \mu \frac{\partial \varphi}{\partial x} \\ \epsilon' = \epsilon + T \cos \beta + \mu \frac{\partial \varphi}{\partial y} \\ \psi' = \psi + T \cos \gamma \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $\varphi$ 为衍射拼接主镜对应位置的相位函数<sup>[17]</sup>, (1)式中参数 $\mu, T$ 的解析如下:

$$\begin{cases} \mu = m \frac{\lambda}{\lambda_0} \\ T = -b + \sqrt{b^2 - c} \\ b = \omega \cos \alpha + \epsilon \cos \beta + \psi \cos \gamma + \mu \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cos \alpha + \mu \frac{\partial \varphi}{\partial y} \cos \beta \\ c = \mu^2 \left[ \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] + 2\mu \left( \omega \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) \end{cases}, \quad (2)$$

式中参数 $m$ 表示衍射级次, $\lambda$ 表示实际工作波长, $\lambda_0$ 表示衍射拼接主镜的设计波长。

$$\begin{cases} \cos \alpha = \frac{\frac{\partial S}{\partial x}}{\sqrt{\left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial S}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial S}{\partial z} \right)^2}} \\ \cos \beta = \frac{\frac{\partial S}{\partial y}}{\sqrt{\left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial S}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial S}{\partial z} \right)^2}}, \quad (3) \\ \cos \gamma = \frac{\frac{\partial S}{\partial z}}{\sqrt{\left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial S}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial S}{\partial z} \right)^2}} \end{cases}$$

式中 $S(x, y, z) = 0$ 为衍射面方程,子镜均为平面; $\cos \alpha$ 表示面法向量沿 $x$ 轴方向余弦; $\cos \beta$ 表示面法向量沿 $y$ 轴方向余弦; $\cos \gamma$ 为面法向量沿 $z$ 轴方向余弦。入射光和出射光与衍射面的交点同为 $B(x_B, y_B, z_B)$ ,根据空间直线对称式方程得到出射光的光线方程:

$$\frac{x - x_B}{\omega'} = \frac{y - y_B}{\epsilon'} = \frac{z - z_B}{\psi'}. \quad (4)$$

利用出射光线方程与高斯像面 $z = f$ 相交,即可得到与像平面相交的各条光线的点坐标 $C(x_C, y_C, z_C)$ :

$$\begin{cases} x_C = \frac{\omega'}{\psi'}(f - z_B) + x_B \\ y_C = \frac{\epsilon'}{\psi'}(f - z_B) + y_B \\ z_C = f \end{cases}. \quad (5)$$

### 2.2 面外拼接误差方向的标定

当子镜绕 $x', y'$ 轴倾斜时, $B(x_B, y_B, z_B)$ 为全局坐标系下该点的坐标, $B'(x'_B, y'_B, z'_B)$ 为 $B(x_B, y_B, z_B)$ 点在局部坐标系下该点的坐标, $B''(x''_B, y''_B, z''_B)$ 为加入面外拼接误差后局部坐标系下的坐标,关系式如下:

$$\begin{bmatrix} x''_B \\ y''_B \\ z''_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_B \\ y'_B \\ z'_B \end{bmatrix}. \quad (6)$$

当点 $B''(x''_B, y''_B, z''_B)$ 发生平移时坐标变为 $B'''(x'''_B, y'''_B, z'''_B)$ ,其中 $x'''_B = x''_B, y'''_B = y''_B, z'''_B = z''_B + \Delta z$ ,将 $B'''$ 坐标代入全局坐标系后,利用(5)式即可求得带有面外拼接误差的光线与像面的交点坐标。如表1所示,选择6个位置的子镜,分别赋予不同方向和大小的一面外拼接误差,Conf 1、5、9、19、30、33分别对应图1中相应序号子镜,追迹点列图如图4所示。

表 1 各子镜位置与对应误差类型及数值

Table 1 Position of segmented lens and corresponding error type and value

Segmented number	Segmented origin	Error type	Value
Conf 1	(227.1, 39.3)	$\alpha / \mu\text{rad}$	100
Conf 5	(0.7, 230.5)	$\beta / \mu\text{rad}$	200
Conf 9	(-226.9, 40.7)	$\beta / \mu\text{rad}$	-400
Conf 19	(335.0, 58.0)	$\beta / \mu\text{rad}$	200
Conf 30	(-219.3, -259.8)	$\alpha / \mu\text{rad}$	300
Conf 33	(115.3, 319.8)	$\Delta z / \mu\text{m}$	-50

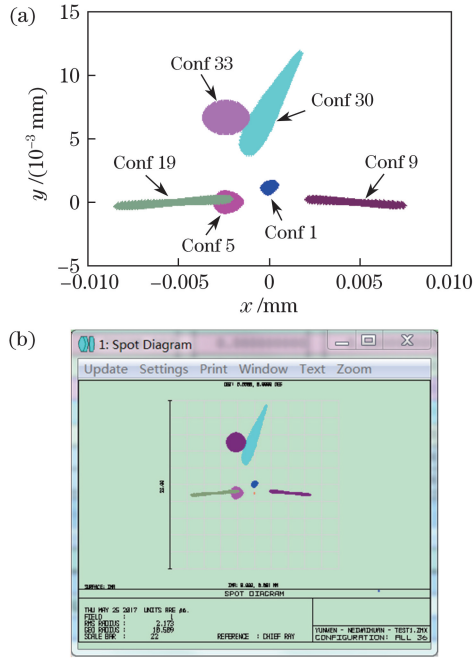


图 4 (a)失调子镜点列图;(b)对应的 ZEMAX 结果  
Fig. 4 (a) Spot diagram of disorder segmented lens;  
(b) corresponding results of ZEMAX

子镜的面外拼接误差方向赋值方法遵循右手定则,右手拇指指向为所绕旋转轴正方向,子镜沿四指指向旋转时角度为“+”,反之“-”;沿  $z$  轴产生平移误差  $\Delta z$  时,沿  $z$  轴正方向移动符号为“-”,沿  $z$  轴负方向移动符号为“+”。至此,通过带有误差信息的点列图对子镜面外拼接误差方向进行了标定。

### 2.3 面外拼接误差波前 Zernike 系数求解

根据子镜面发生面外拼接误差后的坐标,以及追迹得到的像面点坐标  $C(x_c, y_c, z_c)$  能够得到沿  $x, y$  方向带有拼接误差的波前斜率,将波前斜率代入模式法波前恢复矩阵<sup>[18]</sup>,如(7)式等号左边的 Zernike 多项式矩阵,对波前斜率的采样点在光瞳处进行归一化,得到  $\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_M$ 。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} Z_1(\mathbf{r}_1) & \frac{\partial}{\partial x} Z_2(\mathbf{r}_1) & \dots & \frac{\partial}{\partial x} Z_N(\mathbf{r}_1) \\ \frac{\partial}{\partial x} Z_1(\mathbf{r}_2) & \frac{\partial}{\partial x} Z_2(\mathbf{r}_2) & \dots & \frac{\partial}{\partial x} Z_N(\mathbf{r}_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial}{\partial x} Z_1(\mathbf{r}_M) & \frac{\partial}{\partial x} Z_2(\mathbf{r}_M) & \dots & \frac{\partial}{\partial x} Z_N(\mathbf{r}_M) \\ \frac{\partial}{\partial y} Z_1(\mathbf{r}_1) & \frac{\partial}{\partial y} Z_2(\mathbf{r}_1) & \dots & \frac{\partial}{\partial y} Z_N(\mathbf{r}_1) \\ \frac{\partial}{\partial y} Z_1(\mathbf{r}_2) & \frac{\partial}{\partial y} Z_2(\mathbf{r}_2) & \dots & \frac{\partial}{\partial y} Z_N(\mathbf{r}_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial}{\partial y} Z_1(\mathbf{r}_M) & \frac{\partial}{\partial y} Z_2(\mathbf{r}_M) & \dots & \frac{\partial}{\partial y} Z_N(\mathbf{r}_M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} W(\mathbf{r}_1) \\ \frac{\partial}{\partial x} W(\mathbf{r}_2) \\ \vdots \\ \frac{\partial}{\partial x} W(\mathbf{r}_M) \\ \frac{\partial}{\partial y} W(\mathbf{r}_1) \\ \frac{\partial}{\partial y} W(\mathbf{r}_2) \\ \vdots \\ \frac{\partial}{\partial y} W(\mathbf{r}_M) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中  $Z_N(\mathbf{r}_M)$  为对应的 Zernike 多项式,  $a_N$  为 Zernike 多项式系数,  $W(\mathbf{r}_M)$  为波前像差。应用最小二乘法拟合求解各对应项的 Zernike 系数,根据 M-P 广义逆可得 Zernike 系数解为

$$\mathbf{a} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{s}. \quad (8)$$

通过获得的 Zernike 系数,得到恢复的波前像差

$$\bar{W}(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^N a_j Z_j(\mathbf{r}). \quad (9)$$

根据 Maréchal 判据,整个拼接主镜波前误差均方根(RMS)小于  $\lambda/14$  时,可以认为主镜的成像是完善的<sup>[19]</sup>。对于所有子镜,在以共主光轴和共焦点为参考基准的前提下,如果每个子镜的波前误差 RMS 都小于  $\lambda/14$ ,则整体拼接主镜即是完善成像的,利用斯特列尔比可计算得到子镜单独具有某种面外拼接误差时的边界范围。任意倾斜角度都可由子镜绕  $x'$  轴、 $y'$  轴方向旋转的叠加来表示。图 5 是带有倾斜误差的波前图,表 2 是 MATLAB 与 ZEMAX 的倾斜误差对比结果,可以看出,吻合效果很好,所得到的含有面外拼接误差信息的波前 Zernike 系数准确有效。

表 2 ZEMAX 与 MATLAB 倾斜误差对比

Item	ZEMAX/ $\lambda$		MATLAB/ $\lambda$	
	Peak-valley	RMS	Peak-valley	RMS
Inner segmented	0.0536	0.0129	0.0538	0.0129
Outer segmented	0.1744	0.0437	0.1786	0.0447

应当注意,ZEMAX 多重组态仿真结果分别以各个组态的主光线为参考,在发生面外误差时,所追迹的点列图符合实际情况可以满足方向标定,但是波前误差计算需要用单一组态主镜对子孔径进行归一化处理才能得到。本文算法能够将 2 种情况高效地结合在一起。

经过计算单个子镜的斯特列尔比,不同位置的子镜单独存在某一种面外拼接误差时的边界值如表 3 所示。

### 3 面外拼接误差 BP 神经网络求解

当子镜发生旋转的同时会带来沿  $z'$  轴方向的平移误差,同时发生沿  $x', y'$  轴旋转时,将给平移误差带来更加复杂的非线性变化。对于非线性方程组的求解,如果初始值设定不够合理,特别是在实际应用中由于装配误差、面形误差因素的引入,非线性方程组可能存在求解失败的情况。

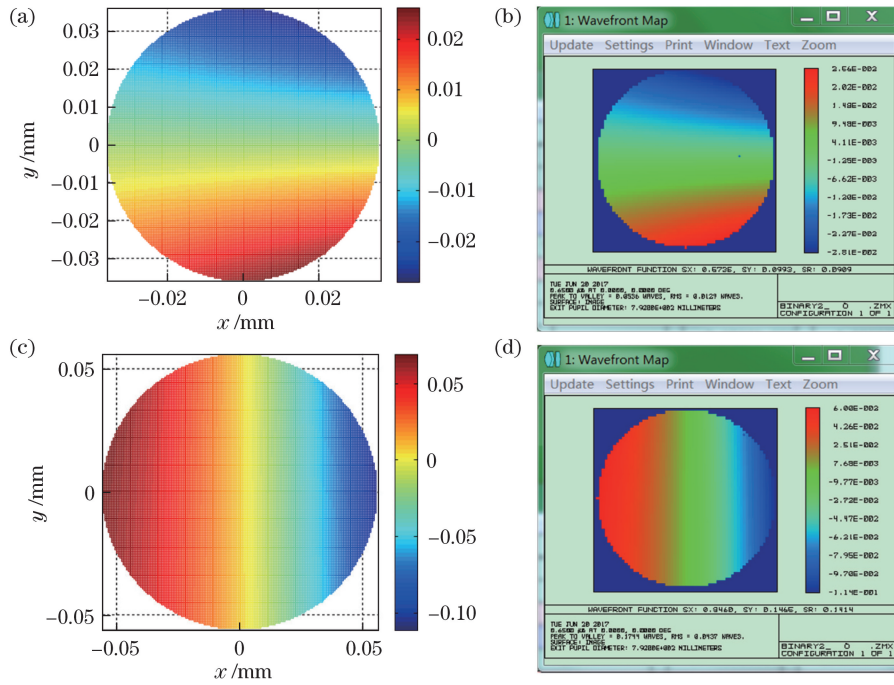


图 5 子镜倾斜误差计算结果。(a)1号子镜沿  $x'$ 轴倾斜  $100 \mu\text{rad}$ 时的波前像差;(b)与(a)图对应的 ZEMAX 计算结果;  
 (c)19号子镜沿  $y'$ 轴倾斜  $100 \mu\text{rad}$ 时的波前像差;(d)与(c)图对应的 ZEMAX 计算结果  
 Fig. 5 Calculated results of tilt error of single segmented lens. (a) Wavefront aberration of segmented 1 tilted by  $x'$  axis with  $100 \mu\text{rad}$ ; (b) results of ZEMAX corresponding to Fig. (a); (c) wavefront aberration of segmented 19 tilted by  $y'$  axis with  $100 \mu\text{rad}$ ; (d) results of ZEMAX corresponding to Fig. (c)

表 3 子镜面外拼接误差边界范围

Table 3 Boundary range of piston and tip-tilt error of segmented lens

Unit	$\alpha / \mu\text{rad}$	$\beta / \mu\text{rad}$	$\Delta z / \mu\text{m}$
Inner segmented	-550-550	-550-550	-65-65
Outer segmented	-160-160	-160-160	-28-28

神经网络对映射有优异的非线性数值逼近能力、高度稳健性和容错能力<sup>[20]</sup>,因此,提出基于 BP 神经网络解析面外拼接误差的算法。如图 6 所示,建立一个 37 项的输入层、一个隐含层、一个 3 项的输出层共包含 3 层的前馈神经网络。输入层为含有面外误差信息的 37 项 Zernike 系数,隐含层使用 Sigmoid 非线性传递函数,输出层为对应的 3 项面外误差。经过神经网络的自组织、自学习,最终实现对训练好的神经网络输入 37 项 Zernike 多项式系数,即可快速求解出面外拼接误差的大小及方向,避免了因推导计算公式时求解超定方程所产生的误差,以及计算机编程的复杂操作。

### 3.1 训练 BP 神经网络

同时对子镜存在的  $\alpha$ 、 $\beta$  及  $\Delta z$  拼接误差在表 3 的区间内进行随机赋值,通过波前恢复得到对应输出的波前 Zernike 系数,生成 60000 组训练样本和 50 组测试样本。使用训练样本对 BP 神经网络进行

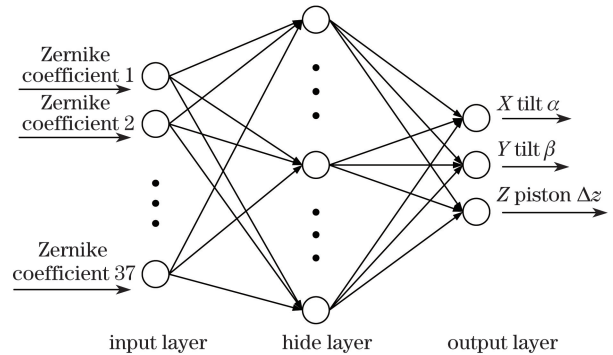


图 6 BP 神经网络结构图

Fig. 6 Diagram of BP neural network structure

训练,目标训练精度定为  $4 \times 10^{-7}$ ,通过训练好的神经网络对测试样本进行拟合测试,内外圈子镜面外拼接误差拟合结果分别如图 7、8 所示。

测试结果如表 4 所示。经过反向求解波前 Zernike 系数和面外拼接误差的数据训练,无噪声情况下 BP 神经网络具备子镜波前误差与面外拼接误差的映射能力,满足精度要求。外圈子镜计算精度高于内圈子镜,主要是由于外圈子镜的面外拼接误差允许范围小,灵敏度高,其不同面外拼接所对应的波前误差类型相对单一。

### 3.2 噪声数值模拟

在实际检测子镜波前时,环境温度、空气扰动、

仪器震动等因素都会给波前检测带来不确定的测试噪声且难以量化,从而影响实际检测结果。根据波前传感器如ZYGO干涉仪的测试精度指标,像素点峰值误差为0.5 nm,约为 $\lambda/1200$ ,系统完善成像条

件为 $\lambda/14$ ,可得测量误差精度约为1%,为验证BP神经网络模型对冗余误差的适应能力,给波前Zernike系数添加3%随机测试噪声。加入噪声后内外圈子镜拟合结果分别如图9、10所示。

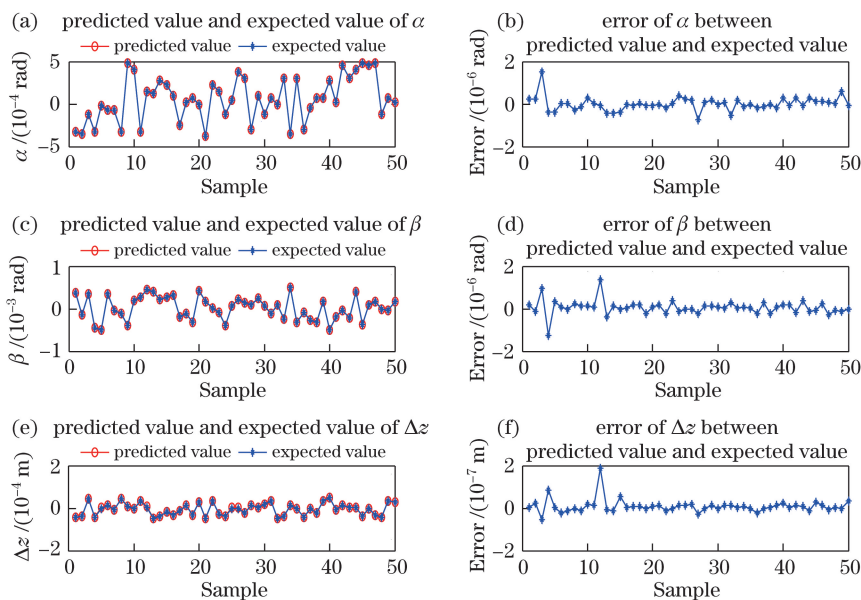


图7 内圈子镜无噪声

Fig. 7 Inner segmented lens without noise

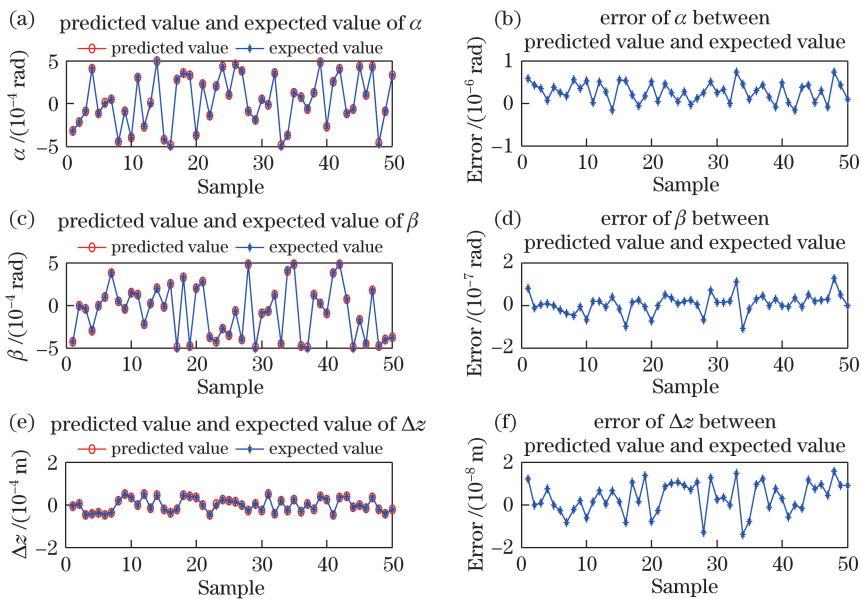


图8 外圈子镜无噪声

Fig. 8 Outer segmented lens without noise

表4 BP神经网络拟合误差

Table 4 Fitting error of BP neural network

Index	RMS of inner segmented lens		RMS of outer segmented lens	
	Without noise	With 3% noise	Without noise	With 3% noise
$\alpha / \text{rad}$	$3.3 \times 10^{-7}$	$2.9 \times 10^{-5}$	$2.3 \times 10^{-7}$	$2.1 \times 10^{-5}$
$\beta / \text{rad}$	$3.4 \times 10^{-7}$	$2.0 \times 10^{-5}$	$4.5 \times 10^{-8}$	$1.2 \times 10^{-5}$
$\Delta z / \text{m}$	$3.3 \times 10^{-8}$	$3.4 \times 10^{-6}$	$7.4 \times 10^{-9}$	$2.8 \times 10^{-6}$

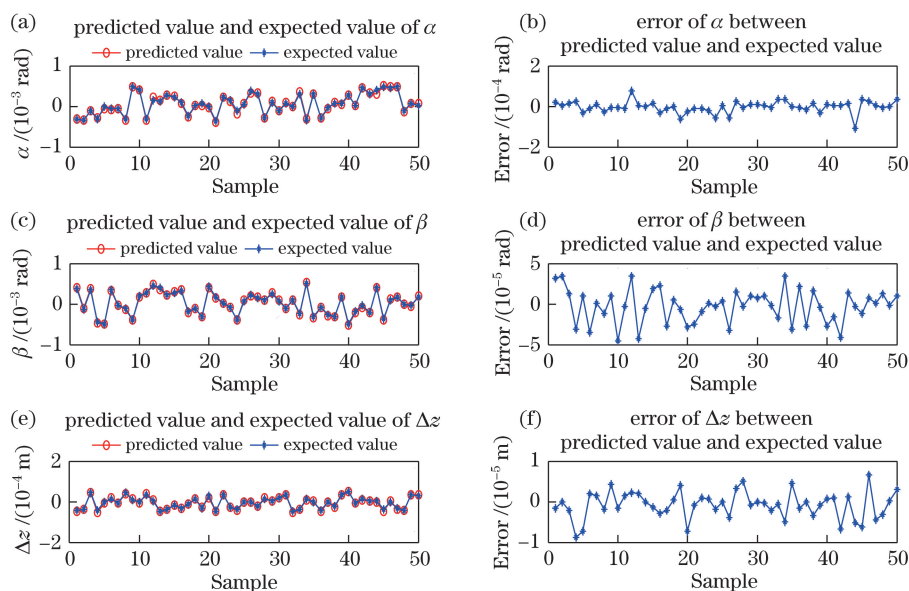


图 9 内圈子镜添加噪声

Fig. 9 Inner segmented lens with noise

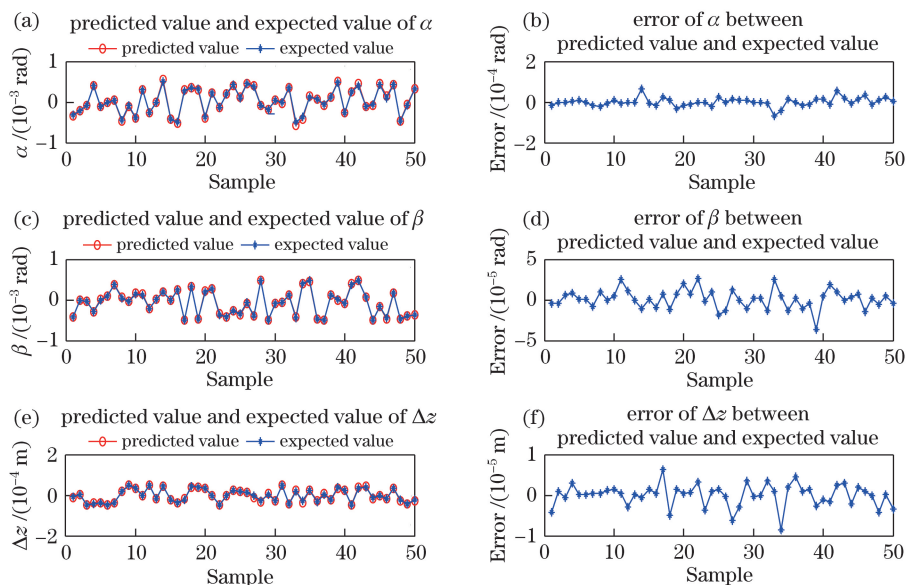


图 10 外圈子镜添加噪声

Fig. 10 Outer segmented lens with noise

由表 4 数据可以看出,给神经网络添加了 3% 的随机噪声后,拟合误差变大,但是与无噪声的情况总体趋势基本一致,不影响方向的判断,因此可以通过减小训练数据步长的方式继续提高精度。图 9、10 验证了该 BP 神经网络对复杂情况的适应能力,其可以用于指导衍射拼接主镜的实际装调。

## 4 结 论

通过光线在焦平面的追迹点列图实现了衍射拼接主镜子镜面外拼接误差方向的标定,利用失调子镜波前 Zernike 系数进行波前拟合,实现了对面外拼

接误差大小的判定。本文算法整合了 ZEMAX 2 种模型的功能,在保证精度的前提下提高了分析效率。基于 BP 神经网络优化算法建立了波前 Zernike 系数和面外拼接误差的非线性映射关系模型,可实现 3 个面外拼接误差随机失调情况下的快速求解。数据显示,外圈子镜的面外拼接误差允许范围比内圈子镜低,对于面外拼接误差更加敏感。经仿真验证,精度可靠,能够为透射式拼接主镜共面调节提供技术支持。本文只讨论了面外误差,而子镜在空间中存在 3 个面内平移误差,在接下来的工作中将对面内平移误差和面外拼接误差检测的衔接展开研究。

## 参 考 文 献

- [1] Early J, Hyde R, Baron R. Twenty meter space telescope based on diffractive Fresnel lens[C]. SPIE, 2004, 5166: 148-156.
- [2] Hyde R A. Eyeglass. 1. Very large aperture diffractive telescopes[J]. Applied Optics, 1999, 38(19): 4198-4212.
- [3] Andersen G. Large optical photon sieve[J]. Optics Letters, 2005, 30(22): 2976-2978.
- [4] Andersen G, Tullson D. Broadband antihole photon sieve telescope[J]. Applied Optics, 2007, 46(18): 3706-3708.
- [5] Andersen G. Membrane photon sieve telescopes[J]. Applied Optics, 2010, 49(33): 6391-6394.
- [6] Atcheson P, Stewart C, Domber J, *et al.* MOIRE: initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large lightweight optical telescopes[C]. SPIE, 2012, 8442: 844221.
- [7] Dixit S, Menapace J, Yu J, *et al.* Large-aperture diffractive optical elements for high power laser and space applications[C]. Diffractive Optics and Micro-Optics, Optical Society of America, 2004: DSuA2.
- [8] Waller D, Campbell L, Domber J L, *et al.* MOIRE primary diffractive optical element structure deployment testing[C]//Proceedings of the 2nd AIAA Spacecraft Structures Conference, 2015: 536-545.
- [9] Xie C Q, Zhu X L, Li H L, *et al.* Feasibility study of hard-x-ray nanofocusing above 20 keV using compound photon sieves[J]. Optics Letters, 2010, 35(23): 4048-4050.
- [10] Zhang Y C, Xie C Q. Differential-interference-contrast digital in-line holography microscopy based on a single-optical-element[J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 5015-5018.
- [11] Wang L H, Wu S B, Yang W, *et al.* Analysis of stitched fresnel lens segmented mirrors miss-adjustment error[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0712002.
- [12] Jin G, Yan J L, Liu H, *et al.* Flat-stitching error analysis of large-aperture photon sieves[J]. Applied Optics, 2014, 53(1): 90-95.
- [13] Zhang B, Zhang X H, Han C Y. Algorithm for misalignment determination in computer-aided alignment of optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(3): 273-277.
- 张斌, 张晓辉, 韩昌元. 光学系统计算机辅助装调中的一种优化算法[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 273-277.
- [14] Jiang Z Y, Li L, Huang Y F, *et al.* Computer-aided alignment method of segmented primary mirror system[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(7): 1858-1861.
- 姜震宇, 李林, 黄一帆, 等. 拼接子镜系统计算机辅助装调研究[J]. 光子学报, 2009, 38(7): 1858-1861.
- [15] Hopfield J J, Tank D W. "Neural" computation of decisions in optimization problems[J]. Biological Cybernetics, 1985, 52(1): 141-152.
- [16] 金国藩, 严瑛白, 郭敏贤, 等. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 201-204.
- [17] Yan S H. Design of diffractive micro-optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 137-140.
- 颜树华. 衍射微光学设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 137-140.
- [18] Cubalchini R. Modal wave-front estimation from phase derivative measurements [J]. Journal of the Optical Society of America, 1979, 69(7): 972-977.
- [19] Born M, Wolf E. Principles of optics (Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light)[M]. 7<sup>th</sup> ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016: 438.
- [20] 王永骥, 涂健. 神经网络控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.