

# 拼接菲涅耳透镜子镜失调误差分析

汪利华 吴时彬 杨伟 任戈

中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

**摘要** 大口径菲涅耳透镜由多个子镜拼接而成,子镜失调误差会影响拼接菲涅耳透镜的成像质量,以瑞利判据作为评价标准,根据菲涅耳透镜波前像差理论,分析了拼接菲涅耳透镜子镜各个自由度失调误差公差允限,给出了理论计算公式。分析表明:拼接菲涅耳透镜  $F$  数越大,各自由度失调误差公差允限越宽松。采用 Zemax 软件进行理论仿真,利用干涉仪对拼接波前进行实验检测,检测结果显示,拼接波前与理论计算最大误差为  $0.006\lambda$ ,验证了理论的正确性。分析结果为拼接菲涅耳透镜光机设计、检测与装调提供了理论依据与指导。

**关键词** 测量; 误差分析; 拼接衍射透镜; 菲涅耳透镜; 光学波前

**中图分类号** O435 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0712002

## Analysis of Stitched Fresnel Lens Segmented Mirrors Miss-Adjustment Error

Wang Lihua Wu Shibin Yang Wei Ren Ge

*Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China*

**Abstract** Fresnel lens with large aperture is stitched by multiple segmented mirrors, and miss-adjustment error of segmented mirror will affect imaging quality of stitched Fresnel lens. Using the Rayleigh criterion as evaluation criteria, according to Fresnel lens wave-front aberration theory, each degree of freedom allowed limit for Fresnel lens miss-adjustment error tolerance is analyzed, and the theoretical formula is given. Analysis result shows the bigger the stitched Fresnel lens  $F$ -number is, the looser each freedom degree of the miss-adjustment error tolerance limit becomes. Using Zemax software to simulate, the stitched Fresnel lens wave-front is tested by interferometer. The result shows that the maximum error between the stitched wave-front and the theoretical calculation is  $0.006\lambda$ , which verifies the correctness of the theory. The results provide a theoretical basis and guidance for design, test and alignment of the stitched Fresnel lens.

**Key words** measurement; error analysis; stitched diffraction lens; Fresnel lens; optical wave-front

**OCIS codes** 120.3620; 120.4820; 120.4570

## 1 引 言

空间望远镜光学系统要求具有分辨率高、重量轻等特点,目前空间望远镜多为反射式光学系统,口径也只有米级(小于 10 m)。随着口径的增大,反射式光学系统面临公差紧、体积大、质量大等难题,这些难题制约了反射式光学系统的空间应用<sup>[1]</sup>。

衍射透镜将浮雕微结构图形制作在只有几十微米厚的平面基底上,可以大大降低光学元件质量;同时衍射光学元件为透射型光学元件,入射光通过一个等厚的透射表面,在一个面上的路径延迟被另一个表面抵消,表面的面形误差几乎对出射光程不产生影响,这一特点使得元件面形的公差要求相对宽松<sup>[2]</sup>。在美国国防部先进研究项目局(DARPA)的支持下,美国的劳伦斯-立弗莫尔国家实验室已经研制出口径约为 5 m 的拼接型菲涅耳衍射透镜<sup>[3]</sup>,英国皇家天文台、我国的国防科学技术大学和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所也对基于衍射透镜的透镜成像系统进行了光学设计和仿真研究<sup>[4-6]</sup>。目前由于微细加工衍射透镜的口径有限,采用多个衍射透镜拼接的方法是实现大口径米级衍射透镜的有效途径。

菲涅耳透镜拼接时会存在失调误差,这些失调误差会影响光学系统的波前,最终会降低系统成像质量,

**收稿日期:** 2016-01-22; **收到修改稿日期:** 2016-03-14

**作者简介:** 汪利华(1983—),男,硕士,工程师,主要从事光学测试技术方面的研究。E-mail: lhwangky@163.com

本文根据菲涅耳透镜成像特性分析失调误差对拼接型菲涅耳透镜波前的影响,计算失调误差公差允限,根据这些分析指导拼接透镜设计、检测和装调。

## 2 理论分析

关于拼接反射镜拼接失调误差对成像质量的影响,已经有人做了大量的工作<sup>[7-9]</sup>,这些工作均以波前、点扩展函数(PSF)、光学传递函数(MTF)作为评价标准来研究拼接失调误差对反射式拼接镜成像的影响。拼接失调误差对拼接衍射透镜成像的影响与分析目前还未见报道。PSF与MTF分别在空域和频域对光学系统性能进行评价和表征,文献[10-11]的研究指出,当系统存在较大的波前误差,在一定截止频率范围仍能获得较好的调制传递函数曲线,该曲线只表达系统截止分辨力内的性能,而出瞳波前函数包含整个系统性能信息。Yaitskova N等<sup>[12-13]</sup>利用数值模拟方法计算拼接反射镜的PSF,但该方法由于受到运算量的限制,在反射镜很大时不够精确。光学系统波前函数包含了整个系统的性能信息,根据瑞利判据,系统出瞳处最长光程和最短光程差(OPD)不超过四分之一波长时,系统能完善成像。因此,以瑞利判据作为评价标准,分析拼接失调误差对拼接衍射透镜成像的影响,并对各项误差进行限定。

不失一般性,分析了由两片子镜拼接的衍射透镜,该衍射透镜为菲涅耳透镜,建立坐标如图1所示,其中XY平面与菲涅耳透镜平面平行,Z轴为光轴的方向。完整菲涅耳透镜由周期性同心圆环结构组成,当拼接菲涅耳透镜存在沿光轴Z轴方向平移失调误差、沿X和Y轴的平移对准误差以及绕X和Y轴旋转的倾斜误差时,菲涅耳透镜圆环空间位置、环带周期会发生改变,从而影响成像波前,降低成像质量。

作为成像用菲涅耳透镜采用衍射-1级,在焦点处光程差为

$$l_{\text{OPD}} = \sqrt{f^2 + r_m^2} - f, \quad (1)$$

式中 $l_{\text{OPD}}$ 为菲涅耳透镜焦点光程差, $f$ 为菲涅耳透镜焦距, $m$ 为菲涅耳透镜图形环带, $r_m$ 为菲涅耳透镜第 $m$ 个环带的半径,当波前光程差为 $m\lambda/L$ 时( $L$ 为菲涅耳透镜的台阶数),不同环带在焦点处相位一致,此时焦点处波前为0,透镜可以理想成像。

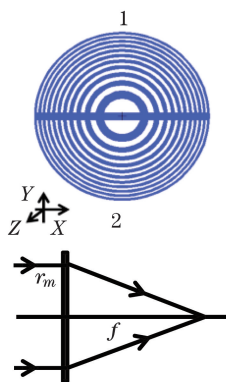


图1 两片子镜拼接菲涅耳透镜

Fig. 1 Fresnel lens stitched by two sub-apertures

### 2.1 Z轴方向误差

两片拼接菲涅耳透镜,以子镜2为基准,子镜1在Z轴方向存在失调误差,如图2所示,子镜2在焦点处波前峰谷值(PV)为0,由于子镜1到焦点的距离发生改变,从而引入波前像差,(1)式两端对焦距 $f$ 求导:

$$d_{\text{OPD}} = \left[ \frac{1}{\sqrt{1/(4F^2) + 1}} - 1 \right] df, \quad (2)$$

透镜 $F$ 数为 $f/(2r)$ , $r$ 为透镜半径。由(2)式可知,引入的波前像差与Z轴方向的平移失调误差和拼接透镜的 $F$ 数有关,拼接菲涅耳透镜波前像差与子镜Z轴方向偏移成正比,偏移越大,拼接全口径波前像差也越大。当Z轴方向偏离一个波长时,拼接透镜的波前误差随透镜 $F$ 数的变化规律如图3所示。由图3可见, $F$ 数越大,由Z轴方向偏移引起的波前误差越接近于零,也就是说, $F$ 数越大对Z轴方向的波前误差影响越小。当 $F$ 数在1到10之间时,波前误差明显呈递减趋势, $F$ 数大于10之后波前误差的变化已经很小,因此

为保证 Z 轴失调误差在可实现范围内,设计透镜时应使拼接透镜的 F 数大于 10。根据瑞利判据,为保证拼接透镜 PV 不超过四分之一波长,要求 Z 轴误差  $df$  满足:

$$df \leq \frac{\lambda}{4} / \left[ \frac{1}{\sqrt{1/(4F^2) + 1}} - 1 \right], \quad (3)$$

式中  $\lambda$  为设计波长。

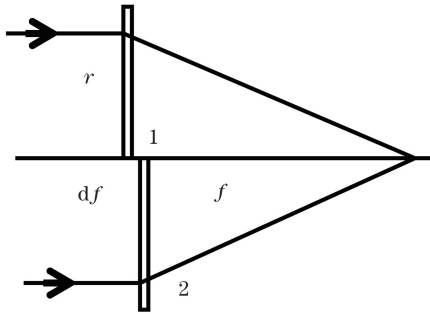


图 2 Z 轴方向失调误差

Fig. 2 Z axis miss-adjustment error

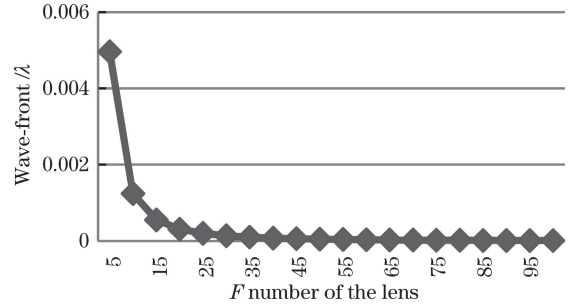


图 3 存在 Z 轴失调误差时透镜的 F 数与波前误差的关系  
Fig. 3 Relationship between F number of the lens and wave-front error with Z axis miss-adjustment

### 2.2 X/Y 轴方向平移对准误差

存在 X/Y 轴平移对准误差的拼接菲涅耳透镜如图 4 所示, X 轴平移对准误差相当于子镜 1 存在偏心, Y 轴平移对准误差相当于子镜 1 与子镜 2 的菲涅耳透镜环带不同心。

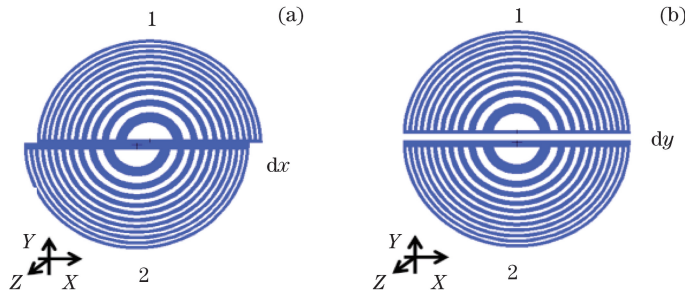


图 4 存在(a)X 轴平移对准误差和(b)Y 轴平移对准误差的拼接菲涅耳透镜

Fig. 4 Stitched Fresnel lens with (a) X axis piston error and (b) Y axis piston error

存在 Y 轴对准误差时,(1)式两端对  $r_m$  求导:

$$d_{OPD} = \frac{1}{\sqrt{4F^2 + 1}} dy, \quad (4)$$

X 轴方向对准误差为:

$$d_{OPD} = \frac{1}{\sqrt{4F^2 + 1}} dx - \frac{1}{\sqrt{4F^2 + 1}} (-dx) = \frac{2}{\sqrt{4F^2 + 1}} dx, \quad (5)$$

由(4)式和(5)式可知,随着 X/Y 轴方向平移误差的增大,拼接菲涅耳透镜波前误差 PV 也呈线性增大趋势。主镜 F 数越大,拼接菲涅耳透镜波前误差对 X/Y 轴方向的平移误差也越不敏感。当 Y 方向平移误差为一个波长时,拼接透镜的波前误差随透镜 F 数的变化规律如图 5 所示。从图 5 可以看出,当透镜 F 数大于 10 后, X/Y 轴平移引起的波前误差在不同 F 数之间的差别已经很小,因此为保证 X/Y 轴平移失调误差在可实现范围内,设计主镜时应使拼接透镜的 F 数大于 10。根据瑞利判据,为保证拼接主镜 PV 不超过四分之一波长,要求 X/Y 轴平移误差  $dx$ 、 $dy$  分别为:

$$dx \leq \frac{\lambda \sqrt{4F^2 + 1}}{8}, dy \leq \frac{\lambda \sqrt{4F^2 + 1}}{4}. \quad (6)$$

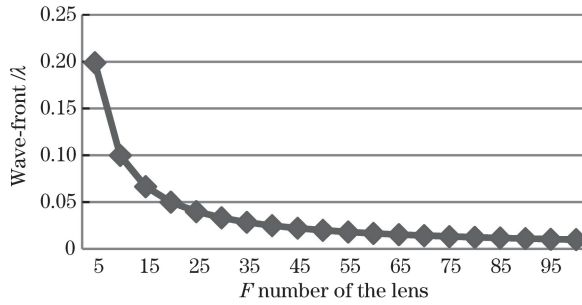


图 5 存在 X/Y 轴平移失调误差时拼接透镜波前误差与透镜 F 数的关系

Fig. 5 Relationship between wave-front error and F number of the lens with X/Y axis piston miss-adjustment error

### 2.3 X/Y 轴倾斜对准误差

绕 X 轴的倾斜误差如图 6(a)所示,此时焦点处波前光程差为

$$l_{\text{OPD}_{\theta_x}} = \sqrt{f^2 + r^2 - 2fr \sin \theta_x} - f + r \sin \theta_x, \quad (7)$$

则焦点处波前误差为

$$d_{\text{OPD}_{\theta_x}} = \sqrt{f^2 + r^2 - 2fr \sin \theta_x} + r \sin \theta_x - \sqrt{f^2 + r^2} = r [\sqrt{4F^2 + 1 - 4F \sin \theta_x} + \sin \theta_x - \sqrt{4F^2 + 1}]. \quad (8)$$

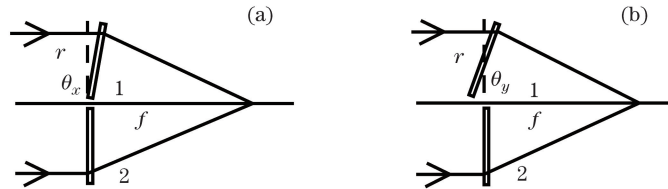


图 6 绕(a)X 轴和(b)Y 轴的倾斜误差

Fig. 6 Tilt error of (a) X axis and (b) Y axis

同理亦可求得子镜 1 绕 Y 轴旋转焦点处的波前误差:

$$d_{\text{OPD}_{\theta_y}} = \sqrt{f^2 + r^2 - 2fr \sin \theta_y} + r \sin \theta_y - \sqrt{f^2 + r^2} = r [\sqrt{4F^2 + 1 - 4F \sin \theta_y} + \sin \theta_y - \sqrt{4F^2 + 1}], \quad (9)$$

从(8)式和(9)式可知,拼接透镜子镜绕 X/Y 轴有倾斜调整误差时,焦点处波前误差不仅与倾斜角度有关,还与透镜的 F 数和半径 r 有关。当主镜的半径 r、F 数一定时,检测前通过粗装调控制子镜的 X/Y 轴方向倾斜角度在 1°范围内,拼接透镜的波前误差与 X/Y 轴倾斜角度的关系如图 7 所示,可见两者近似呈线性递增关系。当半径 r、X/Y 轴倾斜角度一定时,拼接透镜的波前误差与透镜 F 数的关系如图 8 所示,可以看出,设计拼接透镜时使透镜的 F 数大于 10,可放宽 X/Y 轴倾斜角度公差允限。令(8)式和(9)式小于四分之一波长可求出子镜绕 X/Y 轴的倾斜角度公差允限。

## 3 实验和仿真验证

根据上述理论分析,可定量计算出拼接菲涅耳透镜的公差允限,为验证理论分析,设计了口径为 40 mm、F 数为 10 的菲涅耳透镜,该透镜由两片子镜拼接而成,设计的中心波长  $\lambda$  为 0.6328  $\mu\text{m}$ 。采用上述理论分析公式计算出两片拼接透镜的公差允限,将这些公差代入 Zemax 光学设计软件,根据计算出的公差允限在 Zemax 里仿真存在失调误差的拼接透镜的波前 PV 应为  $\lambda/4$ 。

根据(3)、(6)、(9)式要求拼接菲涅耳透镜波前小于  $\lambda/4$ ,则所对应的 Z 轴方向平移公差、X/Y 轴方向平移公差允限、X/Y 轴方向倾斜公差允限如表 1 所示,将公差允限数值代入到软件中,计算得到的波前误差如表 1 第二行所示,对应误差所产生的波前如图 9 所示,从表 1 可以看出产生的波前误差与理论计算值偏差分别为 0.002 $\lambda$ 、0.006 $\lambda$  和 0.003 $\lambda$ ,表明理论公式与仿真结果吻合较好。

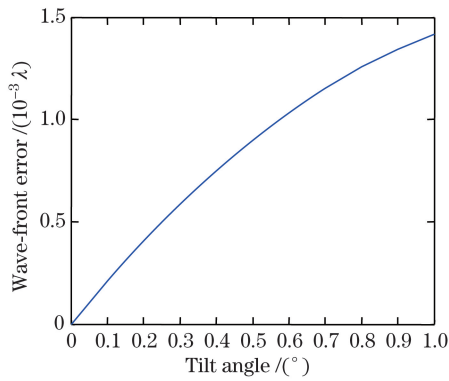


图 7 拼接透镜的波前误差与 X/Y 轴倾斜角度的关系  
Fig. 7 Relationship between wave-front error of the stitched lens and X/Y axis tilt angle

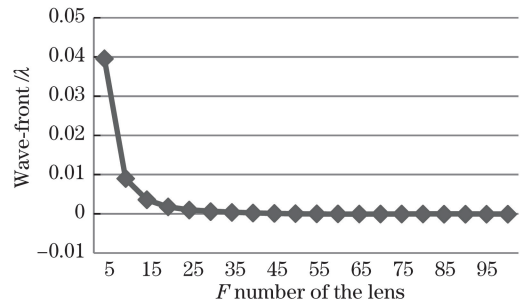


图 8 存在 X/Y 轴倾斜误差时拼接透镜的波前误差与透镜 F 数的关系  
Fig. 8 Relationship between wave-front error of the stitched lens and F number of the lens with X/Y axis tilt error

表 1 公差和波前误差允限

Table 1 Allowed limit of tolerance and wave-front error

Parameters	Z axis tolerance /mm	X/Y piston tolerance / $\mu\text{m}$	X/Y tilt tolerance /( $''$ )
Tolerance	0.127	1.6	11.25
Wave-front error / $\lambda$	0.248	0.244	0.247

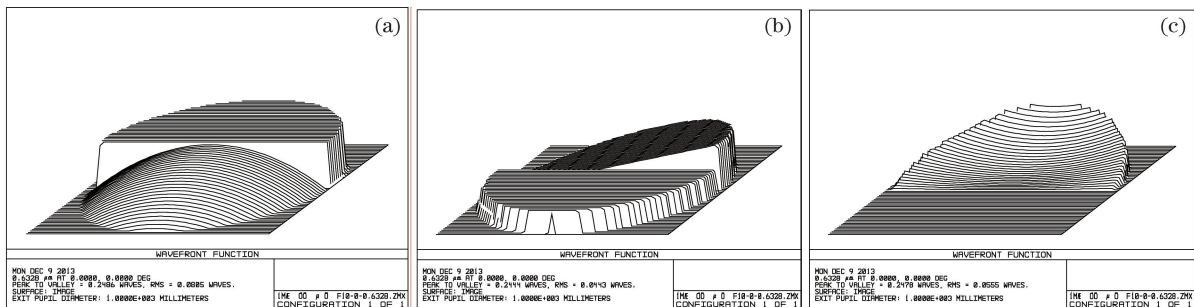


图 9 (a)Z 轴平移波前误差;(b)X/Y 轴平移波前误差;(c)X/Y 轴倾斜波前误差

Fig. 9 (a) Z axis piston wave-front error; (b) X/Y axis piston wave-front error; (c) X/Y axis tilt wave-front error

将上述口径为 40 mm、F 数为 10 的非涅耳透镜制作成两片拼接子镜,进行拼接误差允限验证实验,拼接菲涅耳透镜如图 10 所示,透镜制作在石英基底材料上。采用干涉仪自准直的方法对拼接菲涅耳透镜进行检测,检测光路如图 11 所示。

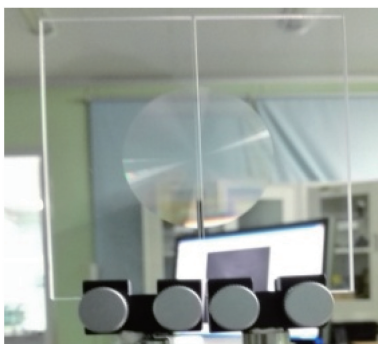


图 10 拼接菲涅耳透镜  
Fig. 10 Stitched Fresnel lens

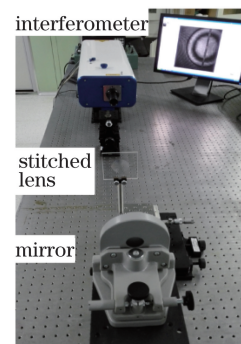


图 11 检测光路图  
Fig. 11 Optical path of test

实验前首先根据干涉仪上条纹方向和检测失调误差数据将两子镜之间的失调误差调到最小,所检测的拼接菲涅耳透镜波前如图 12 所示,此时拼接菲涅耳透镜波前 PV 为  $0.102\lambda$ 、均方根(RMS)为  $0.052\lambda$ ,将此波前数据作为理想无失调误差的波前。

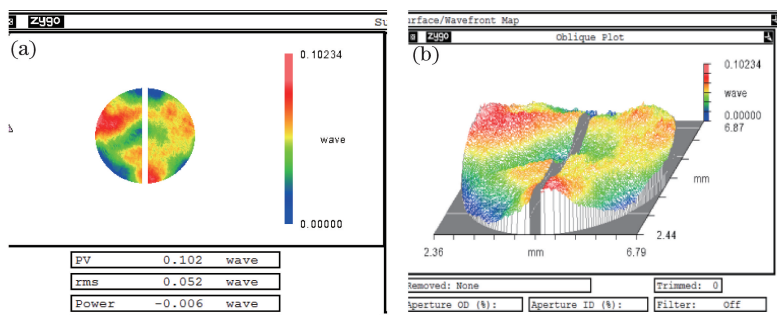


图 12 (a)没有失调误差的拼接菲涅耳透镜波前;(b)波前三维图

Fig. 12 (a) Wave-front of the stitched Fresnel lens without miss-adjustment error;  
(b) three-dimensional map of the wave-front

拼接菲涅耳透镜调好后,通过调整架调节机构依次对其中某一子镜加入 Z 轴平移误差、X/Y 轴平移误差和 X/Y 轴方向倾斜误差,所加入的误差量如表 1 第一行所示。对 Z 轴加入 0.127 mm 误差时,拼接菲涅耳透镜的波前如图 13 所示,此时波前 PV 为 0.288λ, RMS 为 0.045λ,根据(3)、(6)、(9)式计算得到的公差允限对应拼接透镜的波前 PV 的变化量,因此将直接检测得到的波前与没有失调误差的波前数据相减,得到残差波前,观察残差波前 PV 变化量是否与理论计算一致。将图 13 中存在 Z 轴平移误差的波前与图 12 中对应波前相减,得到残差波前如图 14 所示,残差波前 PV 为 0.255λ,考虑到 Z 轴在调整过程中的调整精度误差,与第二节所求的 λ/4 误差为 0.005λ,实验直接检测结果与理论计算结果一致。

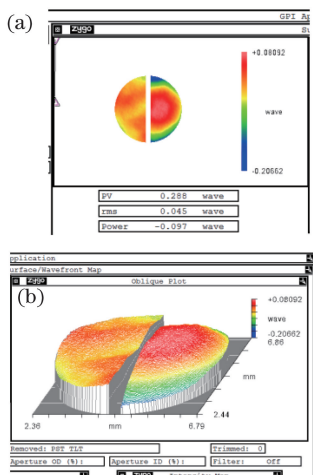


图 13 (a)存在 Z 轴平移误差的拼接菲涅耳透镜波前;  
(b)波前三维图

Fig. 13 (a) Wave-front of the stitched Fresnel lens with Z axis piston error; (b) three-dimensional map of the wave-front

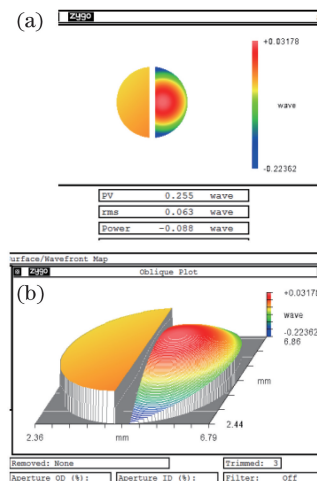


图 14 (a)存在 Z 轴平移误差时残差波前;  
(b)波前三维图

Fig. 14 (a) Residual wave-front with Z axis piston error; (b) three-dimensional map of the wave-front

与 Z 轴平移误差分析方法类似,对于 X/Y 轴的平移误差,采用干涉仪检测到的波前如图 15 所示,此时波前 PV 为 0.194λ, RMS 为 0.036λ,与无失调误差时的波前相减得到的残差波前如图 16 所示,残差波前 PV 为 0.244λ,与理论误差相差 0.006λ。

对 X/Y 轴加入倾斜误差,采用干涉仪检测到的波前如图 17 所示,波前 PV 为 0.278λ, RMS 为 0.083λ,与无失调误差时的波前相减得到的残差波前如图 18 所示,残差波前 PV 为 0.254λ,与理论误差相差 0.006λ。

根据第二节理论分析公式计算出波前误差 PV 值为 λ/4 时拼接透镜的 Z 轴平移误差、X/Y 轴方向平移误差和 X/Y 轴方向倾斜误差量,将计算出的误差量加入到仿真模型和干涉仪检测实验验证的光路中去,得到波前变化均为 λ/4 左右,与理论计算误差最大偏差为 0.006λ,从而验证了理论的正确性。上述分析方法可用于指导拼接菲涅耳透镜的设计、拼接机械的设计和装调检测过程。

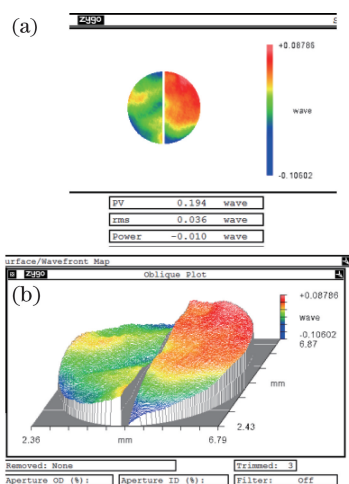


图 15 (a)存在 X/Y 轴平移误差时的拼接菲涅耳透镜波前;(b)波前三维图  
Fig. 15 (a) Wave-front of the stitched Fresnel lens with X/Y axis piston error; (b) three-dimensional map of the wave-front

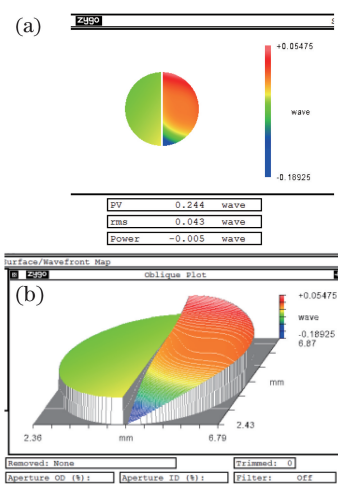


图 16 (a)存在 X/Y 轴平移误差时的残差波前;(b)波前三维图  
Fig. 16 (a) Residual wave-front with X/Y axis piston error; (b) three-dimensional map of the wave-front

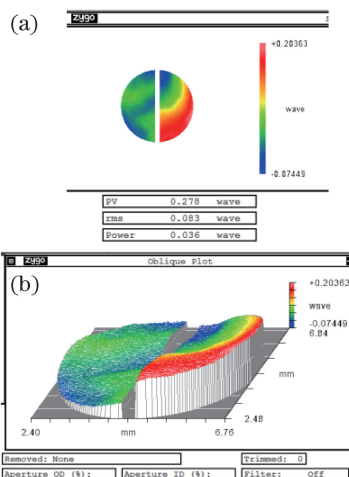


图 17 (a)存在 X/Y 轴倾斜误差时的拼接菲涅耳透镜波前;(b)波前三维图  
Fig. 17 (a) Wave-front of the stitched Fresnel lens with X/Y axis tilt error; (b) three-dimensional map of the wave-front

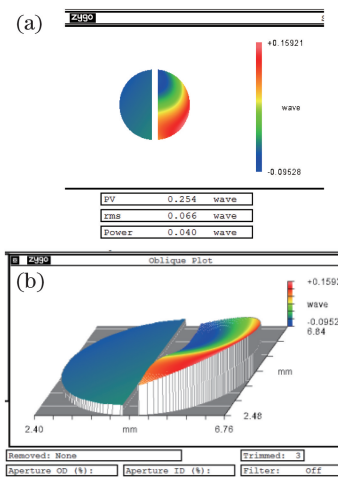


图 18 (a)存在 X/Y 轴倾斜误差时的残差波前;(b)波前三维图  
Fig. 18 (a) Residual wave-front with X/Y axis tilt error; (b) three-dimensional map of the wave-front

## 4 结 论

定量分析了拼接菲涅耳透镜各种失调误差的公差允限,分析表明,拼接菲涅耳透镜的各误差允限与透镜的  $F$  数有关, $F$  数越大,误差允限越宽松。同时 X/Y 轴倾斜误差还与透镜口径有关,随着透镜口径的增大,X/Y 轴的倾斜误差越紧。最后采用仿真和实验两种方法验证了理论的正确性,为拼接透镜机械设计和装调检测提供了理论依据。

文中分析的失调误差允限是依据瑞利判据提出的,对于具体成像系统,拼接菲涅耳透镜波前有不同要求,根据上述公式仍可计算子镜拼接失调误差允限,因此不失一般性。为了能更完整和全面地分析失调误差对成像的影响和对失调误差的限定,下一步还需要详细分析拼接失调误差对拼接菲涅耳透镜 PSF 和 MTF 的影响。

## 参 考 文 献

- 1 Zhang wei, Deng Jian, Long Funian, *et al.* Image quality evaluation for segmented mirror synthetic aperture optics[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(4): 687-691.  
张 伟, 邓 健, 龙夫年, 等. 子孔径合成光学成像系统像质评价研究[J]. 光学学报, 2008, 28(4): 687-691.
- 2 Zhang Nan, Lu Zhenwu, Li Fengyou. Optical design of diffractive telescope[J]. Laser & Infrared, 2007, 36(1): 106-108.  
张 楠, 卢振武, 李凤有. 衍射望远镜光学系统设计[J]. 激光与红外, 2007, 36(1): 106-108.
- 3 Hyde R A, Dixit S N, Weisberg A H, *et al.* Eyeglass: a very large aperture diffractive space telescope[C]. SPIE, 2002, 4849: 28-39.
- 4 Hawarden T G, Johnstone C, Johnstone G. GISMO, an ELT in space: a giant (30-m) far-infrared and sub-millimeter space observatory[C]. SPIE, 2004, 5382: 95-104.
- 5 Xu Yan, Yan Shuhua, Zhou Chunlei, *et al.* Design of hybrid reflective-diffractive telescope with very large aperture and broad bandwidth[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28(4): 579-582.  
徐 琰, 颜树华, 周春雷, 等. 宽波段超大孔径反衍望远系统设计[J]. 半导体光电, 2007, 28(4): 579-582.
- 6 Liu Hua, Lu Zhenwu, Yue Jinying, *et al.* The characteristics of compound diffractive telescope[J]. Optics Express, 2008, 16(20): 16195-16200.
- 7 Deng Jian, Zhang Wei, Zuo Baojun, *et al.* Misadjustment tolerance study of the sub-mirror's for segmented mirror synthetic aperture optics[J]. Optical Technique, 2007, 33(1): 130-133.  
邓 健, 张 伟, 左保军, 等. 拼接式合成孔径光学系统的失调误差分析研究[J]. 光学技术, 2007, 33(1): 130-133.
- 8 Long Weijun, Wang Zhili, Zhou Yanping. Imaging analysis and computer simulation of optical synthetic aperture telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(8): 1009-1014.  
龙伟军, 王治乐, 周彦平. 光学综合孔径望远镜成像分析及计算机仿真[J]. 光学学报, 2004, 24(8): 1009-1014.
- 9 Chen Rongli, Zhang Tao, Ma Zhen, *et al.* Influences of the alignment errors on image quality of large segmented mirrors [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(12): 3240-3244.  
陈荣利, 张 涛, 马 臻, 等. 拼接误差对拼接式大口径反射镜成像质量的影响[J]. 光子学报, 2009, 38(12): 3240-3244.
- 10 Wang Zhile, Zhang Wei, Long Funian. Image quality evaluation for diffraction limited optical synthetic aperture system [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(1): 35-39.  
王治乐, 张 伟, 龙夫年. 衍射受限光学合成孔径成像系统像质评价[J]. 光学学报, 2005, 25(1): 35-39.
- 11 Han Lihui, Deng Jian. The sub-mirror maladjustment error analysis of segmented mirror synthetic aperture optical system [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(7): 701-704.  
韩丽辉, 邓 健. 拼接式合成孔径光学系统的子镜失调误差分析[J]. 激光与红外, 2008, 38(7): 701-704.
- 12 Yaitskova N, Dohlen K, Dierickx P. Analytical study of diffraction effects in extremely large segmented telescopes[J]. J Opt Soc Am A, 2003, 20(8): 1563-1575.
- 13 Troy M, Chanan G. Diffraction effects from giant segmented-mirror telescopes[J]. Applied Optics, 2003, 42(19): 3745-3753.