

doi:10.3788/gzxb20184702.0205002

大口径薄膜衍射主镜面形误差仿真分析

李韬杰^{1,2,3}, 吴鹏^{2,3}, 杨正^{2,3}, 尹韶云^{2,3}, 杜春雷^{2,3}, 汪岳峰¹

(1 中国人民解放军陆军工程大学 电子与光学工程系, 石家庄 050000)

(2 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)

(3 跨尺度制造技术重庆市重点实验室, 重庆 400714)

摘 要:以理想坐标面为参考面,建立了大口径薄膜衍射主镜面形误差与波前误差的关系模型.首先建立了子镜面形误差模型;其次根据导出的子镜波前误差与大口径薄膜衍射主镜波前误差关系式,分别讨论了边缘褶皱面形和球面面形两种形变情况下不同区域子镜的形变允许范围;最终通过全体子镜的波前误差反向拟合 Zernike 多项式,得到了不同形变情况下主镜的低阶像差类型.研究结果可为成像系统的像差校正提供理论依据,对大口径薄膜衍射主镜的夹持装配有参考意义.

关键词:衍射光学;薄膜;参考面;面形误差;波前误差

中图分类号:O435

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)02-0205002-10

Large Aperture Membrane Diffractive Lens Deformation Error Analysis

LI Tao-jie^{1,2,3}, WU Peng^{2,3}, YANG Zheng^{2,3}, YIN Shao-yun^{2,3}, DU Chun-lei^{2,3}, WANG Yue-feng¹

(1 Department of Electronic and Optical Engineering, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

(2 System Integration Center of Optics and Electronics, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chongqing 400714, China)

(3 Chongqing Key Laboratory of Multi-scale Manufacturing Technology, Chongqing 400714, China)

Abstract: Based on the ideal coordinate surface, a model of large aperture membrane diffractive lens and wavefront aberration was established. Firstly, the model of segmented lens deformation error was built. Secondly, according to the wavefront aberration relationship between segmented lens and large aperture membrane diffractive lens, the deformation error accuracy limitations of the large aperture membrane diffractive lens by segmented lens of different regions was investigated. The edge wrinkle sag and sphere sag were demonstrated. At last, taking wavefront aberration of all segmented lens to fit the Zernike polynomial, the lower order aberration were obtained. This work can provide references for correcting image system aberration and assembling large aperture membrane diffractive lens on engineering.

Key words: Diffractive optics; Membrane; Coordinate surface; Deformation error; Wavefront aberration

OCIS Codes: 050.1965; 050.1970; 110.3000; 080.0080

0 引言

若要实现静止轨道米级分辨率对地遥感观测,望远主镜的口径需要大于 20 m^[1].传统反射式拼接主镜受面密度大、拼接公差紧等因素制约,使得大口径反射式拼接主镜载荷的搭载发射和在轨展开面临非常大的技术挑战.欧美多国近年来相继启动了薄膜衍射主镜技术的研究计划^[2-4],薄膜衍射主镜由薄膜基底的衍射光学元件组成,具有面密度小、公差宽松、易折叠展开等优点,有望用于实现 10 m 以上口径的光学遥感载荷.

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61605208,61475199),中国科学院 GF 创新基金(No.CXJJ-15M061),航天专用技术预研项目(No.30502010203)资助

第一作者:李韬杰(1982-),男,博士研究生,主要研究方向为衍射光学成像.Email: xrwlitaojie@163.com

导师(通讯作者):汪岳峰(1963-),男,教授,博导,主要研究方向为微纳光学.Email: wyf_gx110@sina.com

收稿日期:2017-09-08; **录用日期:**2017-11-13

<http://www.photon.ac.cn>

大口径薄膜衍射主镜能够克服传统反射式望远主镜缺点,但同时存在着影响成像质量的误差来源,如各子镜单元之间的拼接误差^[5]、衍射微结构的加工误差^[6]、基底的形变误差^[7]等.文献[8]报道了美国“云纹计划”开展的薄膜衍射拼接主镜的成像验证试验结果,相关理论分析和拼接方法均无详细描述.国内长春光学精密机械与物理研究所^[9-10]、成都光电所^[11]等单位开展了基于理想面形情况下的小口径衍射主镜拼接方位误差的分析工作,给出了定性描述.目前,国内鲜有关于面形误差对大口径薄膜衍射主镜成像质量影响的相关报道.

由于大口径薄膜衍射主镜工作方式透射式,不易像反射式主镜那样采用光路自准直检测,也很难采用同等口径(10m)的标准反射镜进行测量,因此其面形误差对像质的影响较难监测和评估.本文以理想坐标面为参考面,运用 Zernike 多项式拟合薄膜面形,以较为精确地反映被测面与参考面之间的面形偏差,结合大口径薄膜衍射主镜分块的结构特点,利用单个子镜波前误差与主镜波前误差的关系,建立不同区域子镜面形误差对主镜成像质量影响的关系模型.分别讨论了主镜不同区域子镜边缘褶皱和球面形变两种代表类型的限制范围,并分析了主镜的低阶像差类型.

1 大口径薄膜衍射主镜结构

薄膜衍射主镜结构如图 1,该结构为参考美国“云纹计划”设置子镜位置的缩比模型,对于理论研究不失一般性.薄膜衍射主镜由两圈子镜组成,每圈有 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.主镜焦距 $f=2\ 400\ \text{mm}$,内圈小子镜半径 $r=36\ \text{mm}$,小子镜中心与主镜中心距离 $l_r=230\ \text{mm}$,外圈大子镜半径 $R=56\ \text{mm}$,大子镜中心与主镜中心距离 $l_R=340\ \text{mm}$,工作波长 $\lambda=0.55\ \mu\text{m}$,外圈子镜外接圆半径 $R_T=396\ \text{mm}$.

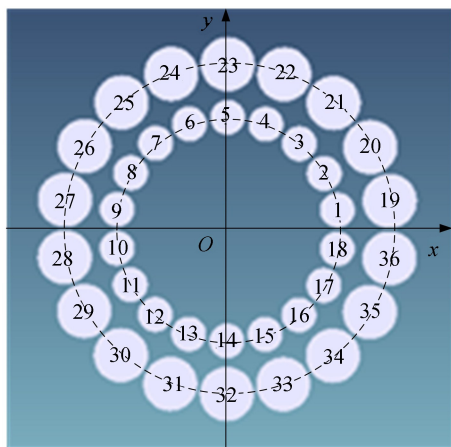


图 1 薄膜衍射主镜示意图

Fig.1 Schematic of membrane diffractive lens

2 理论分析

如图 2,沿 y 轴方向的虚线为主镜理想坐标参考面,沿 y 轴方向的曲线表示偏离参考面的实际面形, d 表示通光口径. $A(x_a, y_a, z_a)$ 点表示光线在实际面形上的交点, $B(x_b, y_b, z_b)$ 点表示光线在理想参考面上的交点,经过 B 点的光线传输到达焦点 F ,经过 A 点的光线偏离焦点 F 到达 $I(x_i, y_i, z_i)$ 点.当面形发生变化时,实际面形相对于参考面的偏差会产生波前误差从而引起像质退化.

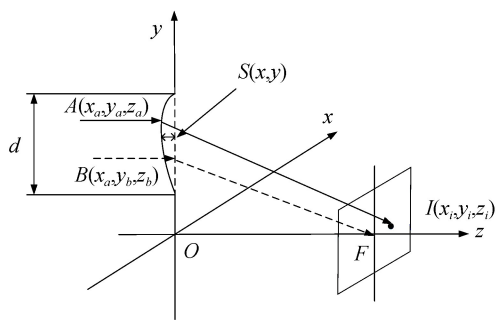


图 2 子镜薄膜形变光路

Fig.2 Light path of sub aperture membrane deformation

2.1 薄膜面形

面形的检测通常需要激光追踪仪、三坐标机等比较精密昂贵的仪器,对实验条件要求较高.同时薄膜夹持装配过程中导致形变的不确定因素较多,面形函数复杂^[12-13],也难以直接给出统一的表达式.利用 Zernike 多项式在单位圆区域内正交的性质,可得关系式

$$\begin{bmatrix} Z_0^0(x_1, y_1) & Z_1^{-1}(x_1, y_1) & Z_1^1(x_1, y_1) & \cdots & Z_n^m(x_1, y_1) \\ Z_0^0(x_2, y_2) & Z_1^{-1}(x_2, y_2) & Z_1^1(x_2, y_2) & \cdots & Z_n^m(x_2, y_2) \\ Z_0^0(x_3, y_3) & Z_1^{-1}(x_3, y_3) & Z_1^1(x_3, y_3) & \cdots & Z_n^m(x_3, y_3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_0^0(x_N, y_N) & Z_1^{-1}(x_N, y_N) & Z_1^1(x_N, y_N) & \cdots & Z_n^m(x_N, y_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{i(00)} \\ C_{i(1-1)} \\ C_{i(11)} \\ \vdots \\ C_{i(nm)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_i(x_1, y_1) \\ S_i(x_2, y_2) \\ S_i(x_3, y_3) \\ \vdots \\ S_i(x_N, y_N) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $Z_n^m(x_N, y_N)$ 为美国 OSA 标准排列的 Zernike 多项式, $C_{i(nm)}$ 为第 i 个子镜对应项的系数, $S_i(x_N, y_N)$ 为第 i 个子镜面上任意一点相对于参考面沿矢高方向的偏差量.根据面形偏差量,利用最小二乘法求得

$C_{i(mm)}$,从而得到具体的面形公式为

$$\Omega(x, y) = \sum C_{1(mm)} Z_n^m(x_N, y_N)_1 + \sum C_{2(mm)} Z_n^m(x_N, y_N)_2 + \dots \sum C_{i(mm)} Z_n^m(x_N, y_N)_i \quad (2)$$

式中, $Z_n^m(x_N, y_N)_i$ 为第 i 个孔径坐标所对应的多项式。

由于变形量需要自行构建数据,综合考虑面形代表性以及计算量等因素,本文只对两种面形的分布样式展开分析。波前误差拟合流程见图 3。通过输入偏离参考面的偏差数据来拟合镜子的表面面形如图 4,有了相应的面形公式,就可以进一步考察面形所对应的波前误差是否满足成像要求,进而判定面形误差的允许范围。

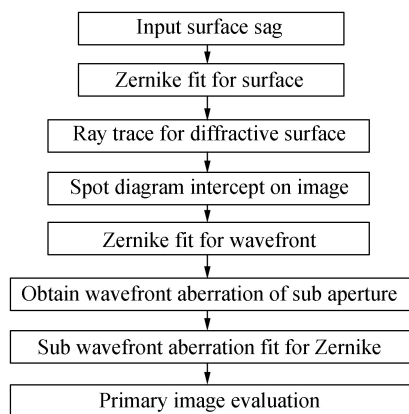


图 3 复杂面形下波前误差拟合流程

Fig.3 Wavefront aberration fitting process for complicated surface

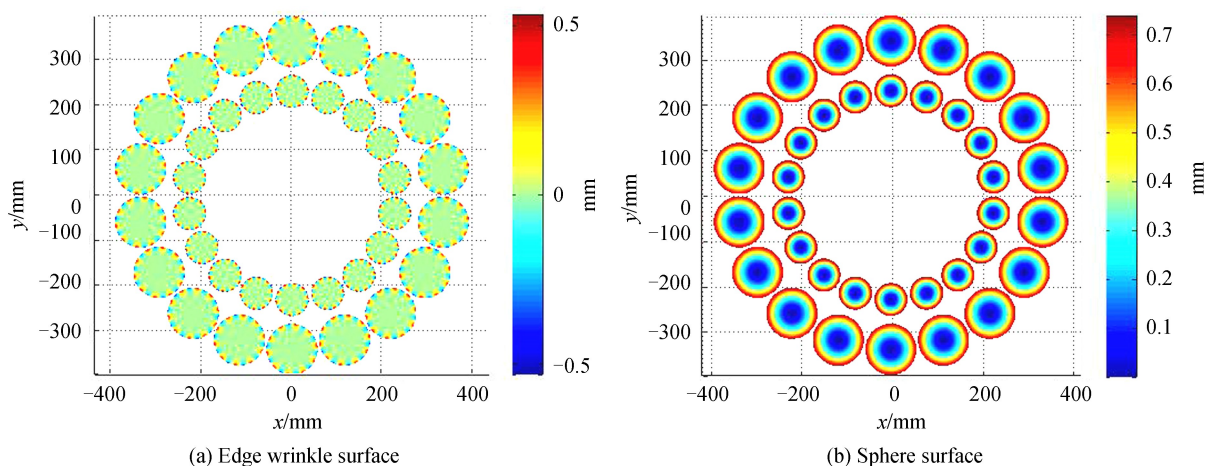


图 4 衍射主镜面形

Fig.4 Surface of diffractive lens

2.2 薄膜形变波前误差

当薄膜衍射子镜单元很薄(数十微米)且厚度均匀、面形误差变化比较平缓时,由薄膜折射造成的对波前误差的贡献可以忽略不计,对波前误差的贡献主要来自衍射面局部表面倾斜而造成的局部出射光线方向偏差,下面只研究衍射面形所带来的波前误差贡献。根据衍射面追迹公式(3)^[14],当已知入射单色光的方向余弦,就能够得出经过衍射面的出射光方向余弦,即

$$\begin{cases} \omega' = \omega + T \cos \alpha + \mu \frac{\partial \varphi}{\partial x} \\ \xi' = \xi + T \cos \beta + \mu \frac{\partial \varphi}{\partial y} \\ \psi' = \psi + T \cos \gamma \end{cases} \quad (3)$$

式中, φ 为衍射面对应坐标点的位相^[15], (ω, ξ, ψ) 为入射光方向余弦, (ω', ξ', ψ') 为出射光方向余弦, $\mu = m\lambda/\lambda_0$, m 为衍射级次, λ 为实际波长, λ_0 为设计工作波长, $T = -b + \sqrt{b^2 - c}$, 其中参数 b, c 表达式为

$$\begin{cases} b = \omega \cos \alpha + \xi \cos \beta + \psi \cos \gamma + \mu \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cos \alpha + \mu \frac{\partial \varphi}{\partial y} \cos \beta \\ c = \mu^2 \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] + 2\mu \left(\omega \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \xi \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\cos \alpha$ 为面形法向量沿 x 轴的方向余弦, $\cos \beta$ 为面形法向量沿 y 轴的方向余弦, $\cos \gamma$ 为面形法向量沿 z 轴的方向余弦, 即

$$\begin{cases} \cos \alpha = \frac{\partial \Omega}{\partial x} / \sqrt{\left(\frac{\partial \Omega}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Omega}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Omega}{\partial z}\right)^2} \\ \cos \beta = \frac{\partial \Omega}{\partial y} / \sqrt{\left(\frac{\partial \Omega}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Omega}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Omega}{\partial z}\right)^2} \\ \cos \gamma = \frac{\partial \Omega}{\partial z} / \sqrt{\left(\frac{\partial \Omega}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Omega}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Omega}{\partial z}\right)^2} \end{cases} \quad (5)$$

入射光和出射光与衍射面的交点同为 $A(x_a, y_a, z_a)$, 根据空间直线方程可得到出射光的光线方程为

$$\frac{x - x_a}{\omega'} = \frac{y - y_a}{\xi'} = \frac{z - z_a}{\psi'} \quad (6)$$

式(6)与焦平面相交, 即可求出与焦平面相交光线所有的坐标点 $I(x_i, y_i, z_i)$, 通过焦平面各条光线的点坐标采用“模式法”得到各个子镜的波前误差信息^[16-17], 便可分析薄膜衍射主镜不同区域发生形变时对成像质量造成的影响。

2.3 子镜波前误差与主镜波前误差关系

薄膜衍射主镜总波前误差与子镜波前误差关系式为

$$W_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n(r^2 + R^2)} \sqrt{r^2(W_{\text{RMS}(r)_1}^2 + W_{\text{RMS}(r)_2}^2 + \dots + W_{\text{RMS}(r)_n}^2) + R^2(W_{\text{RMS}(R)_1}^2 + W_{\text{RMS}(R)_2}^2 + \dots + W_{\text{RMS}(R)_n}^2)}} \quad (7)$$

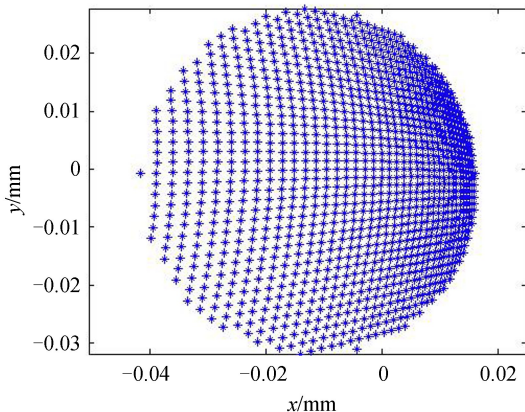
式中 W_{RMS} 为薄膜衍射主镜总波前误差, n 为每圈子镜个数, r 为内圈子镜半径, R 为外圈子镜半径, $W_{\text{RMS}(r)_n}$ 为内圈第 n 个子镜波前误差, $W_{\text{RMS}(R)_n}$ 为外圈第 n 个子镜波前误差, 式(7)详细推导过程见附录。

根据 Maréchal 判据^[18], 当主镜波前误差 RMS 值满足 $\leq \lambda/14$ 条件时即可认为主镜是完善成像的。由式(7)可以得出薄膜衍射主镜总波前误差与各个子镜波前误差之间的关系, 当每个子镜波像差 RMS 值均为 $\lambda/14$ 时, 主镜波像差 RMS 即为 $\lambda/14$, 以此为边界条件, 求解发生变形的子镜在满足主镜成像条件下的形变允许范围。

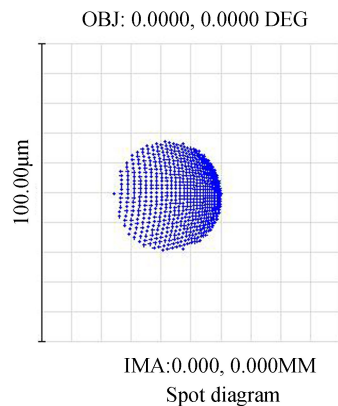
3 仿真实验与分析

根据追迹理论进行仿真建模, 薄膜厚度为 $20 \mu\text{m}$, 首先讨论球面变形, 内外圈子镜取相同曲率半径 $r = -8749 \text{ mm}$, 图5和图6是使用 MATLAB 与 ZEMAX 得到的点列图、波前误差仿真结果对比, 像面点列图形式和幅值大小基本一致。通过表1波前 PV 和 RMS 值数据对比可以看出, 本文方法与 ZEMAX 仿真的结果吻合较好, 表明计算模型具有较高的可靠性。

当子镜发生球面形变时, 同一环带上的子镜波像差数值基本相同, 各个子镜波面绕主镜光轴呈轴对称形貌分布。相同曲率半径 $r = -8749 \text{ mm}$ 条件下, 内圈子镜满足波像差 RMS 小于 $\lambda/14$ 时, 外圈子镜波像差 RMS 大于 $\lambda/14$, 超过了主镜完善成像的允许范围。根据表2, 当曲率半径为 $r = -47170 \text{ mm}$ 时, 外圈子镜波像差 RMS 小于 $\lambda/14$, 内圈子镜波像差 RMS 远远小于 $\lambda/14$ 。表明外圈子镜的形变允许范围要低于内圈子镜的形变允许范围, 即外圈子镜相对于内圈子镜对形变更加敏感, 面形保持平整的要求更高。



(a) Spot diagram of spherical surface



(b) Results of ZEMAX corresponding to Fig.(a)

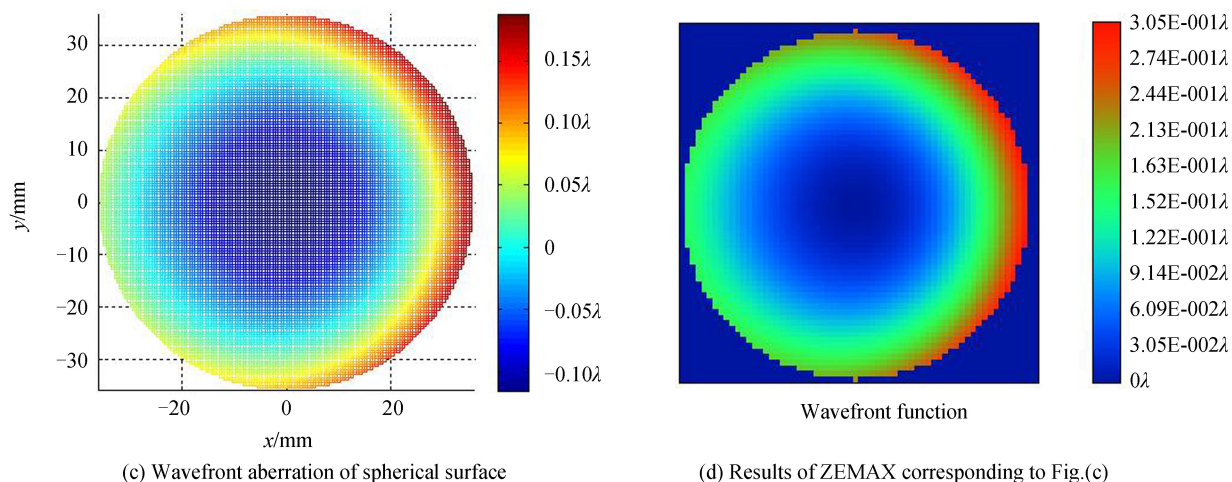


图 5 1号子镜波前计算

Fig.5 Wavefront calculated results of 1st sub aperture

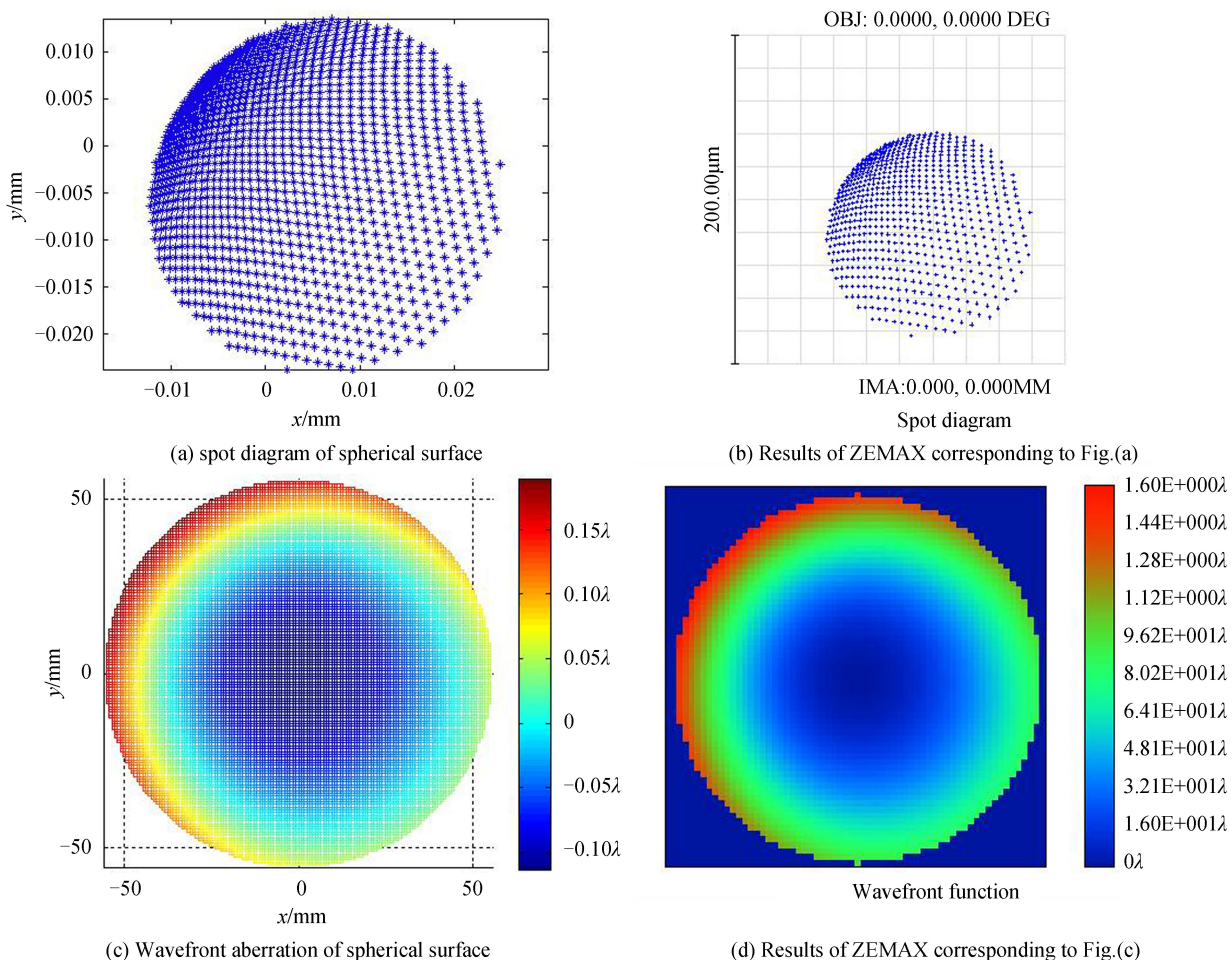


图 6 25号子镜波前计算

Fig.6 Wavefront calculated results of 25th segmented lens

根据表 1 和表 2 中的数据,子镜发生球面变形的情况下,若要令所有子镜波前误差都小于 $\lambda/14$,外圈子镜需满足 $PV \leq 0.0332 \text{ mm}$,内圈子镜需满足 $PV \leq 0.074 \text{ mm}$,此时各个子镜的形变量可以满足大口径薄膜衍射主镜完善成像的条件。

表 1 曲率半径 $r = -8\ 749\ \text{mm}$ 时不同子镜 ZEMAX 和 MATLAB 波前误差对比结果Table 1 Wavefront aberration comparison of different segmented lens by radius of curvature $r = -8\ 749\ \text{mm}$ between ZEMAX and MATLAB

Configure number	Aberration	ZEMAX	MATLAB	ΔW
Configure 1 (227.117, 39.322)	PV	0.3046 λ	0.3031 λ	0.0015 λ
	RMS	0.0722 λ	0.0714 λ	0.0008 λ
Configure 7 (-147.612, 177.028)	PV	0.3029 λ	0.3041 λ	0.0012 λ
	RMS	0.0719 λ	0.0717 λ	0.0002 λ
Configure 19 (335, 58)	PV	1.6055 λ	1.6072 λ	0.0017 λ
	RMS	0.3814 λ	0.3827 λ	0.0013 λ
Configure 25 (-217.729, 261.119)	PV	1.6031 λ	1.6018 λ	0.0013 λ
	RMS	0.3798 λ	0.3827 λ	0.0029 λ

表 2 曲率半径 $r = -47\ 170\ \text{mm}$ 时不同子镜 ZEMAX 和 MATLAB 波像差对比结果Table 2 Wavefront aberration comparison of different segmented lens by radius of curvature $r = -47\ 170\ \text{mm}$ between ZEMAX and MATLAB

Configure number	Aberration	ZEMAX	MATLAB	ΔW
Configure 1 (227.117, 39.322)	PV	0.0573 λ	0.0562 λ	0.0011 λ
	RMS	0.0136 λ	0.0132 λ	0.0004 λ
Configure 7 (-147.612, 177.028)	PV	0.0569 λ	0.0564 λ	0.0005 λ
	RMS	0.0135 λ	0.0133 λ	0.0002 λ
Configure 19 (335, 58)	PV	0.3019 λ	0.3017 λ	0.0002 λ
	RMS	0.0715 λ	0.0710 λ	0.0005 λ
Configure 25 (-217.729, 261.119)	PV	0.3014 λ	0.3028 λ	0.0014 λ
	RMS	0.0712 λ	0.0710 λ	0.0002 λ

图 7 中 $F\#$ 的定义为主镜焦距与外圈子镜外接圆直径的比值, 曲线为内、外圈子镜在保持自身波前误差 RMS 小于 $\lambda/14$ 情况下, 球面形变的矢高随主镜 $F\#$ 的变化, 随着 $F\#$ 增大, 球面形变矢高的允许范围逐渐增大, 呈近似线性关系, 增大的速度随 $F\#$ 增大略微加快。

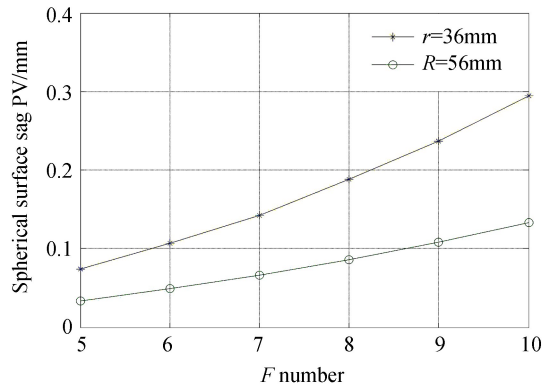
图 8 为 1 号子镜边缘褶皱面形以及对应的波前误差、内圈子镜变形区域尺寸(由边缘向子镜中心延伸约 9 mm, 周期褶皱横向跨度约 20 mm, 纵向 PV = 2 mm)、外圈子镜变形区域尺寸(由边缘向子镜中心延伸约 12 mm, 周期褶皱横向跨度约 30 mm, 纵向 PV = 2 mm)。由表 3 可以看出在偏差量 $PV \leq 2\ \text{mm}$ 范围内, 子镜波前均满足波前误差远远小于 $\lambda/14$ 。

通过与球面变形的结果对比可知, 波前误差的大小主要取决于发生变形区域面积的大小, 即使在面形 PV 起伏较大情况下, 只要发生形变的区域不是很大, 就不会对波前误差造成很大的影响, 球面形变虽然起伏很小, 但是整体都发生了偏移, 所以对波前误差影响很大。

表 3 子镜边缘褶皱变形对应的波前误差值

Table 3 Wavefront aberration corresponding to edge wrinkle surface of segmented lens

Wavefront aberration	Edge wrinkle surface sag PV = 2 mm			
	Configure 1	Configure 7	Configure 19	Configure 25
PV	0.1208 λ	0.0845 λ	0.1987 λ	0.1428 λ
RMS	0.0136 λ	0.0104 λ	0.0228 λ	0.0175 λ

图 7 球面形变矢高 PV 值随 $F\#$ 变化关系曲线Fig.7 Relationship between F number and spherical surface sag PV

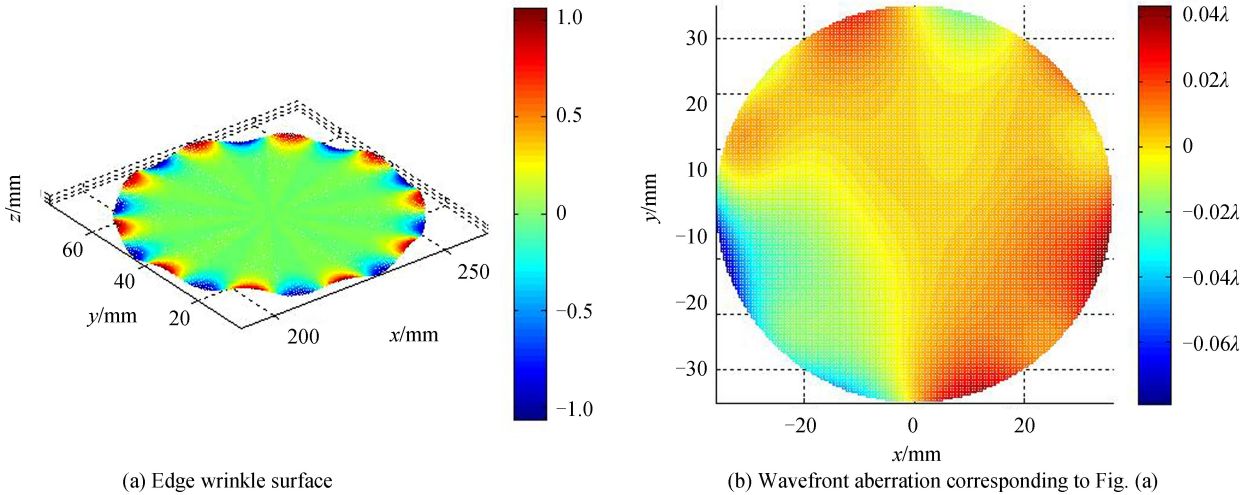


图8 1号子镜波前计算结果

Fig.8 Wavefront calculated results of 1st segmented lens

因此在实际安装薄膜时需要注意,边缘一定要夹紧,防止由于边缘松弛造成中央大面积变形.必要情况下,为确保中央大部分区域稳定及平整,可以容忍因边缘施力不均匀而造成的小区域变形所带来的影响,从而达到满足成像质量的面形要求.

图9(a)、(b)分别为子镜球面形变和边缘褶皱形变时的主镜波前误差图.球面变形是均匀对称的,因此子镜波前误差绕主镜中心呈圆周对称分布趋势;各个子镜边缘褶皱变形趋势与主镜中心的相对位置略有变化,因此不同位置的子镜形变时,其褶皱所对应波前误差与主镜中心的相对位置会略有差别,造成波前误差不会严格按照绕主镜中心圆周对称分布.

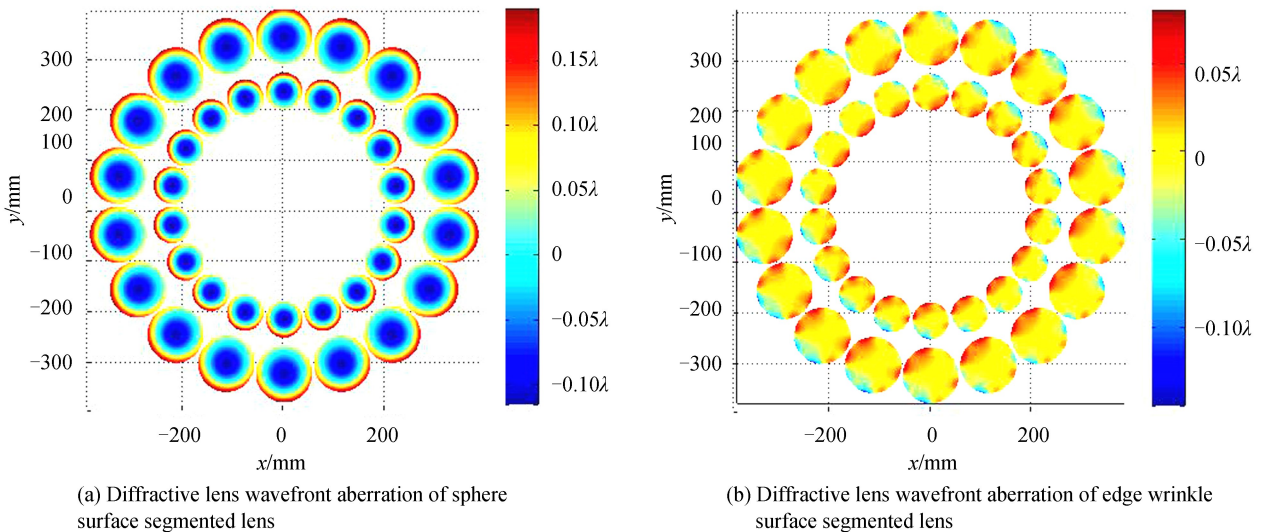


图9 子镜不同面形时衍射主镜波前误差

Fig.9 Diffraction lens wavefront aberration of different surface segmented lens

利用构成主镜的全部子镜的波前误差对按照 OSA 规则排列的 Zernike 多项式进行拟合,恢复得到主镜波前误差主要低阶像差的 Zernike 系数,实现了主镜像差类型的判定.

由图10(a)、(b)可以看出,当子镜面形变化在文中所述的允许范围内时,子镜球面形变对主镜所造成的低阶像差类型主要包含 Z_1 、 Z_5 、 Z_{13} 、 Z_{25} ,子镜边缘褶皱形变对主镜所造成的低阶像差类型主要包含 Z_1 、 Z_5 、 Z_{12} 、 Z_{13} 、 Z_{24} 、 Z_{25} ,具体像差表达式见表4.对于后端的成像系统,可根据不同的变形类型,针对不同像差进行校正.这里应当注意:由于主镜区域是离散的,恢复得到的主镜高阶像差类型不唯一且数值很小可以忽略,但是数值较大的低阶像差类型是固定的,可以作为后端成像系统像差校正的参考.

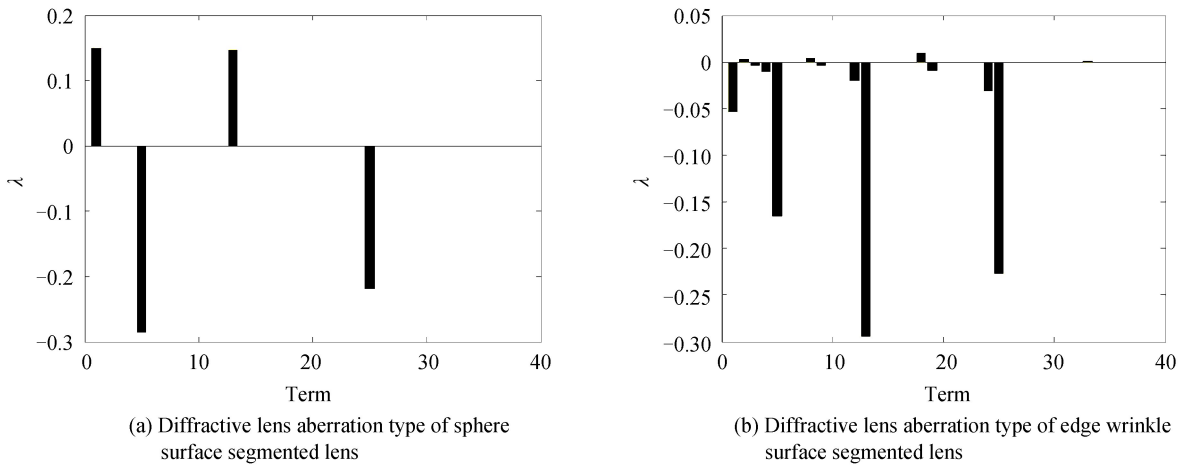


图 10 衍射主镜像差类型

Fig.10 Aberration type of diffractive lens

表 4 像差类型

Table 4 Aberration type

Term	Polynomial
Z_1	$2(y)$
Z_5	$\sqrt{6}(x^2 - y^2)$
Z_{12}	$\sqrt{5}(6(x^2 + y^2)^2 - 6(x^2 + y^2) + 1)$
Z_{13}	$\sqrt{10}(x^2 - y^2)(4x^2 + 4y^2 - 3)$
Z_{24}	$\sqrt{7}(20(x^2 + y^2)^3 - 30(x^2 + y^2)^2 + 12(x^2 + y^2) - 1)$
Z_{25}	$\sqrt{14}(x^2 - y^2)(15x^4 + 15y^4 + 30x^2y^2 - 20x^2 - 20y^2 + 6)$

4 结论

本文提出了一种透射式大口径薄膜衍射主镜面形误差的分析方法,并就边缘褶皱面形和球面面形两种情况展开了数值模拟计算.发生球面形变时,外圈子镜面形偏差量需满足 $PV \leq 0.0332 \text{ mm}$,内圈子镜面形偏差量需满足 $PV \leq 0.074 \text{ mm}$,此时主镜低阶像差类型包含 Z_1 、 Z_5 、 Z_{13} 、 Z_{25} .发生边缘褶皱变形时,子镜面形偏差量 PV 在 2 mm 以内可以满足成像要求,此时主镜低阶像差类型包含 Z_1 、 Z_5 、 Z_{12} 、 Z_{13} 、 Z_{24} 、 Z_{25} .子镜边缘褶皱变形相对于球面变形对主镜所造成的像质退化更为迟钝.该方法可以为大口径薄膜衍射主镜的工程化应用提供参考.

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] 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, **844221**: 1-14.
- [3] ANDERSON G. Membrane photon sieve telescopes[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(33): 6391-6394.
- [4] DEBA P, ETCHETO P, DUCHON P. Preparing the way to space borne Fresnel imagers-space scenarios optical layouts [J]. *Experimental Astronomy*, 2011, **30**:123-136.
- [5] TANDY JR W D, ATCHESON P, DOMBER J, *et al.* MOIRE gossamer space telescope-testing challenges and solutions [C].54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2013, 1458: 1-9.
- [6] BRITTEN J A, DIXIT S N. Large-aperture fast multilevel Fresnel zone lenses in glass and ultrathin polymer films for visible and near-infrared imaging applications[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(11): 2312-2316.
- [7] TANDY JR W D, CAMPBELL L, COPP T, *et al.* MOIRE gossamer space telescope-membrane analysis[C]. National Harbor, Maryland Spacecraft Structures Conference, 2014, 1367: 1-13.
- [8] DAVID W, CAMPBELL L, DOMBER J, *et al.* MOIRE primary diffractive optical element structure deployment testing [C]. 2nd AIAA Spacecraft Structures Conference, 2015, 1836: 1-10.
- [9] JIN Guang, YAN Jun-liang, Liu Hua, *et al.* Flat-stitching error analysis of large-aperture photon sieves[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(1): 90-95.
- [10] LIU Hua, LU Zhen-wu, YAN Yong. Large aperture diffractive telescope tolerance analysis and measurement[J]. *Acta*

Photonica Sinica, 2013, **42**(10):1203-1207.

刘华,卢振武,闫勇. 大口径衍射望远镜系统公差分析及测量[J].光子学报,2013, **42**(10):1203-1207.

- [11] WANG Li-hua, WU Shi-bin, YANG Wei, *et al.* Analysis of stitched fresnel lens segmented mirrors miss-adjustment error[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(7): 0712002.
汪利华,吴时彬,杨伟,等. 拼接菲涅耳透镜子镜失调误差分析[J]. 光学学报, 2016, **36**(7): 0712002.
- [12] JENKINS C H, HAUGEN F, SPICHER W H. Experimental measurement of wrinkling in membranes undergoing planar deformation[J].*Experimental Mechanics*, 1998, **38**(2): 147-152.
- [13] PAPPA R S, GIERSCH L R, QUAGLIAROLI J M. Photogrammetry of a 5m inflatable space antenna with consumer digital cameras[J].*Experimental Techniques*, 2010, **25**(4): 21-29.
- [14] JIN Guo-fan, YAN Ying-bai, WU Min-xian, *et al.* Binary optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998, 201-204.
金国藩,严瑛白,邬敏贤,等. 二元光学[M].国防工业出版社,1998, 201-204.
- [15] YAN Shu-hua. 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.
- [16] NOLL R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1976, **66**: 207-211.
- [17] CUBALCHINI R. Modal wavefront estimation from Phase derivative measurements[J].*Journal of the Optical Society of America A*, 1979, **69**(5): 927-934.
- [18] BORN M, WOLF E. Principles of optics (electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light seventh edition)[M]. Beijing, Publishing House of Electronics Industry, 2016: 438.

附录

式(7)推导过程中出现的各项参数的物理意义详见表5.

表5 参数定义

Table 5 Parameter and definition

Parameter	Definition
W_{RMS}	Wavefront aberration of primary
n	Sub aperture numbers of each circle
m	Sampling numbers of inner sub aperture
N	Sampling numbers of primary
ΔW_i	Wavefront aberration of i th sample
ΔW_{r_i}	Wavefront aberration of i th sampling point of inner sub apertures
ΔW_{R_j}	Wavefront aberration of j th sampling point of outer sub apertures
r	Radius of inner sub apertures
R	Radius of outer sub apertures
ρ	Ray density
N_r	Sampling numbers of inner sub apertures
N_R	Sampling numbers of outer sub apertures
$W_{RMS(r>n)}$	Wavefront aberration of n th inner sub aperture
$W_{RMS(R>n)}$	Wavefront aberration of n th outer sub aperture

对于拼接主镜而言,其波前误差可以利用光瞳内各采样点对应光线的波前误差均方根计算得到,即

$$W_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=N} \Delta W_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=m} \Delta W_{r_i}^2 + \sum_{j=N-m} \Delta W_{R_j}^2}{N}} \quad (8)$$

此时波前误差的计算不受子镜区域离散的限制,可以根据各个子镜区域内的光线统一计算.定义光线的面密度公式为

$$\rho = \frac{N}{n\pi(r^2 + R^2)} \quad (9)$$

则主镜波前误差公式(8)可以进一步推导为

$$\begin{aligned} &= \sqrt{\frac{\rho\pi r^2}{N} \times \frac{\sum_{i=m} \Delta W_{r_i}^2}{\rho\pi r^2} + \frac{\rho\pi R^2}{N} \times \frac{\sum_{j=N-m} \Delta W_{R_j}^2}{\rho\pi R^2}} \\ &= \sqrt{\frac{r^2}{n(r^2 + R^2)} \times \frac{\sum_{i=m} \Delta W_{r_i}^2}{\rho\pi r^2} + \frac{R^2}{n(r^2 + R^2)} \times \frac{\sum_{j=N-m} \Delta W_{R_j}^2}{\rho\pi R^2}} \end{aligned} \quad (10)$$

$$= \sqrt{\frac{1}{n(r^2 + R^2)}} \cdot \sqrt{r^2 \left[\left(\frac{\Delta W_{r1}^2}{N_r} + \dots \frac{\Delta W_{r1}^2}{N_r} \right) + \dots \left(\frac{\Delta W_{rk}^2}{N_r} + \dots \frac{\Delta W_{rm}^2}{N_r} \right) \right] + R^2 \left[\left(\frac{\Delta W_{Rm+1}^2}{N_R} + \frac{\Delta W_{Rm+1}^2}{N_R} \right) + \dots \left(\frac{\Delta W_{Rk}^2}{N_R} + \dots \frac{\Delta W_{RN}^2}{N_R} \right) \right]} \quad (11)$$

对于每个子镜的波前误差,有

$$W_{\text{RMS}(r)}^2 = \left(\frac{\Delta W_{rk}^2}{N_r} + \dots \frac{\Delta W_{rm}^2}{N_r} \right) \quad (12)$$

$$W_{\text{RMS}(R)}^2 = \left(\frac{\Delta W_{Rk}^2}{N_R} + \dots \frac{\Delta W_{RN}^2}{N_R} \right) \quad (13)$$

将式(12)、(13)代入式(11)进一步化简即可最终得到主镜总波前误差与各个子镜波前误差关系式(7).