

文章编号 1004-924X(2009)11-2705-07

光学加工中高频误差对环围能量比的影响

吴冬良,戴一帆,王贵林

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

摘要:以大型光学系统主镜为研究对象,基于经典标量衍射理论分析了中高频误差对环围能量比(FEE)的影响。根据光学镜面面形误差近似为高斯平稳随机过程以及全频段面形误差对光强分布和 FEE 的影响,建立了光学镜面中高频误差梯度均方根(GRMS)与 FEE 之间的数学关系模型,进行了仿真分析并利用实际面形误差数据进行了验证。研究表明,FEE 随着中高频误差 GRMS 的增加近似呈指数规律衰减,同时各频段误差将无误差时对应的光强分布边缘部分能量转移到光强分布的中心以及更宽范围,并且随着中高频误差的增大,能量转移曲线出现反复振荡。结果表明,在特定光学口径下,中高频误差 GRMS 值分别 <12 nm/mm 以及 30 nm/mm 时,中高频误差对 FEE 的影响均 $<5\%$,可用于控制中高频误差对 FEE 的影响,为中高频误差的进一步修形提供理论支持。

关键词:光学主镜;中频误差;高频误差;环围能量比;梯度均方根

中图分类号:TQ171.684 **文献标识码:**A

Influence of mid-and-high frequency errors in optical processing on fractional encircled energy

WU Dong-liang, DAI Yi-fan, WANG Gui-lin

(School of Mechatronics Engineering and Automation,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: With respect to the primary mirror of a large optical system, the influence of mid- and-high frequency errors on the Fractional Encircled Energy (FEE) based on classical scalar diffraction theory was analyzed. With the relation between full frequency errors and FEE, the mathematical model between the Gradient Root-mean Square (GRMS) errors of mid- and-high frequency errors and FEE was established by assuming that the surface error is a stationary Gaussian random progress. The numerical computation and actual surface profile data of the model were validated. It is found that the FEE almost declines in an exponential form with the increase of GRMS of the mid- and-high frequency errors, and the various frequency errors transform the edge energy of the ideal intensity distribution to the centre and wider domain of the intensity distribution. The energy transfer curve oscillates with the increase of the GRMS. It is concluded that the influence on FEE is less than 5% when the GRMS of the mid- and-high frequency errors are less than 12 nm/mm and 30 nm/mm, respectively, under the special optical diameter, and obtained results can be used to control the influence of mid-and-high fre-

收稿日期:2008-10-30;修订日期:2008-12-02.

基金项目:国家重大基础研究资助项目;国家自然科学基金资助项目(No. 50975277)

quency errors on the FEE and can provide a support for the further finishing and figuring of the optical surface profile.

Key words: primary mirror; mid-frequency error; high-frequency error; Fractional Encircled Energy (FEE); Gradient Root-mean Square (GRMS)

1 引言

高聚能光学系统是以发射光学系统为研究对象,通过两级扩束将入射光束输出到远场靶面上,实现准直扩束,减小发散角;然后通过聚焦光学系统将光束大部分能量聚焦到一个直径很小的焦斑内,实现强激光高聚能要求的光学系统^[4]。这类系统将光束尽可能聚小的能力主要取决于所使用光学镜面的加工误差,包括设计误差和制造误差。其原因在于激光束在传输过程中,光学镜面加工误差会对激光束进行相位调制,使得波前相位发生畸变,导致光束传播方向发生改变,进而使得远场光强分布发生变化,导致要求范围内的能量出现变化,从而影响光束的远场分布特性,进而影响到远场光斑质量^[5]。一般情况下,光学加工误差表现为近高斯或高斯型平稳随机过程,因此分析高斯型中高频误差对光学镜面环围能量比(Fractional Encircled Energy, FEE)指标的影响,对提高光学系统的性能,建立中高频误差评价方法具有重要意义。万敏^[1]等分析了光学加工中的几类误差对光束质量因子 β 的影响,并通过对正弦形误差的分析发现,相位误差的低频部分形成了远场能量分布的中心核,而边翼由高频部分所形成。通过分析光学面形误差对远场光束质量的影响,可以有效分析光学系统的性能^[2]。根据文献^[3]可知, FEE 的大小关键在于面形误差梯度均方根。由于研究面形误差对光束质量的文献比较多,但针对中高频误差对 FEE 影响的相关研究却鲜有涉及,因此,本文重点分析中高频误差对 FEE 的影响。

2 物理模型

以发射望远镜系统为研究对象,光路如图 1 所示。从激光器输出的激光束经过一级扩束系统

后自由传输距离 z_1 到达二级扩束系统的次镜,再经过二级扩束主镜输出距离 z_2 至远场靶面上,从而实现准直扩束,减小发散角。

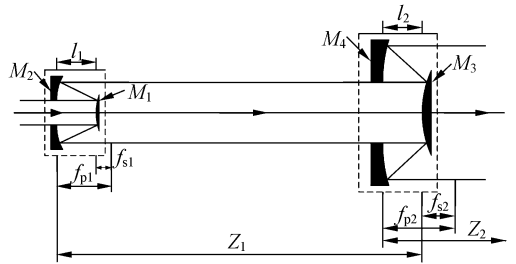


图 1 发射光学系统光路图

Fig. 1 Structure of optical transmitting system

这里只考虑二级扩束主镜的制造误差来分析其对远场 FEE 的影响,假设其他光学元件均是理想的,并忽略装调误差影响,同时假设激光器输出光束为高斯光束,其复振幅 E_1 分布可写成:

$$E_1(x_1, y_1, q_1) = A_1 \cdot \exp\left(\frac{ik(x_1^2 + y_1^2)}{2q_1}\right), \quad (1)$$

其中 $A_1 = -iA_0 z_0 / q_1$, $q_1 = z - iz_0$, z_0 为瑞利距离。

3 光学面形误差对 FEE 的影响

光束经过两级扩束后到达二级扩束主镜的出射面,其复振幅 E_2 分布可表示为^[6]:

$$E_2(x_2, y_2) = A_2 \cdot \exp\left(ikL + \frac{ik(x_2^2 + y_2^2)}{2q_2}\right), \quad (2)$$

其中 $(AB; CD)$ 为光学系统 $ABCD$ 矩阵^[7], $A_2 = -iA_0 z_0 / (Aq_1 + B)$, $q_2 = (Aq_1 + B) / (Cq_1 + D) = a + ib$ 。

随机相位屏被认为是光学“簿”,即在坐标 (x, y) 处入射的光线在同一坐标出射。假设无误差时系统光瞳函数为 $A(x, y)$,则放入随机相位屏后修正的光瞳函数为误差对原光瞳函数的相位调制,可表示为:

$$P(x, y) = A(x, y) \exp \{ ikW(x, y) \}, \quad (3)$$

式中 k 为波数, $W(x, y)$ 为波前畸变误差。

根据经典标量衍射理论, 远场光强分布可通过 Collins 衍射积分得到^[6]。由于加工误差 $W(x, y)$ 对光束具有相位调制作用^[8], 根据变量替换 $f_x = x_3/\lambda z_2, f_y = y_3/\lambda z_2$, 远场复振幅 E_3 分布可表示为:

$$E_3(f_x, f_y) = \frac{\exp(ikz_2)}{i\lambda z_2} \exp\{i\lambda z_2 \pi(f_x^2 + f_y^2)\} \cdot \mathcal{F}\left\{P(x_2, y_2) \exp\left[\frac{ik}{2z_2}(x_2^2 + y_2^2)\right]\right\}, \quad (4)$$

从而远场光强分布为:

$$I(f_x, f_y) = (1/\lambda z_2)^2 \cdot \mathcal{F}\{H_0(u, v) \bar{H}_s(u, v)\}, \quad (5)$$

式中 $H_0(u, v), \bar{H}_s(u, v)$ 的定义见文献[3]。

不考虑光学系统像差等固定误差, 则有:

$$H_0(u, v) = A_3 \cdot \exp\left\{\frac{k(u^2 + v^2)(b^2 + (a + z_2)^2)}{4bz_2^2}\right\}, \quad (6)$$

其中 $A_3 = -\pi A_0^2 z_0^2 (a^2 + b^2) / [kb((Az + B)^2 + (Az_0)^2)]$ 。

根据文献[3], 在一阶近似条件下, 假定面形误差梯度函数 W_x, W_y 为 0 均值高斯随机过程^[8], 方差分别为 $\sigma_{\Delta x}^2$ 和 $\sigma_{\Delta y}^2$ 。若两梯度相关系数 $\rho = 0$, 同时 $\sigma_{\Delta x} = \sigma_{\Delta y}$, 则有 $\sigma_{\Delta}^2 = 2\sigma_{\Delta x}^2 = 2\sigma_{\Delta y}^2$, 从而有:

$$\bar{H}_s(u, v) = \exp\left\{-\frac{1}{4}k^2\sigma_{\Delta}^2(u^2 + v^2)\right\}, \quad (7)$$

根据文献[3]可知, 针对高斯入射光束和回转对称光学镜面, 取极坐标为 $\rho^2 = \lambda^2 z_2^2 (f_x^2 + f_y^2)$, 则半径 r 内的环围能量比 FEE 可表示为

$$FEE(r) = 1 - \exp\left\{\frac{kbr^2}{b^2 + (a + z_2)^2 - kz_2^2 b \sigma_{\Delta}^2}\right\}, \quad (8)$$

从式(8)可以看出, FEE 主要取决于波前相位误差的均方根梯度 σ_{Δ} 。在固定 GRMS 值时, FEE(r) 随环围计算半径的增加按指数规律增加, 最终趋近于 1; 在固定环围半径 r 时, FEE(r) 随 GRMS 的增加按指数规律衰减, 最终趋近于 0。

4 中高频误差对 FEE 的影响

根据 Harvey-Shack 理论, 假定光学镜面由

互不相关的低频、中频和高频误差所组成^[9], 且各频段误差分布与全频段误差分布相同, 即:

$$W_F(x, y) = W_L(x, y) + W_M(x, y) + W_H(x, y), \quad (9)$$

根据式(7)以及文献[3]可得:

$$\bar{H}_s(u, v) = E\{\exp[ik(W_{L_1} - W_{L_2}) + ik(W_{M_1} - W_{M_2}) + ik(W_{H_1} - W_{H_2})]\}, \quad (10)$$

假定随机变量 $W_1 = W(x, y)$ 和 $W_2 = W(x - u, y - v)$ 之间是相互独立的, 那么, 相应的 W_1, W_2 中的低频、中频以及高频误差之间也是相互独立的, 从而有:

$$\begin{aligned} \bar{H}_s(u, v) &= E\{\exp[ik(W_{L_1} - W_{L_2})]\} \cdot \\ &E\{\exp[ik(W_{M_1} - W_{M_2})]\} \cdot \\ &E\{\exp[ik(W_{H_1} - W_{H_2})]\}, \quad (11) \end{aligned}$$

相应的一阶近似表达式为:

$$\begin{aligned} \bar{H}_s(u, v) &\approx E\{\exp[ik(uW_{L_x} + vW_{L_y})]\} \cdot \\ &E\{\exp[ik(uW_{M_x} + vW_{M_y})]\} \cdot \\ &E\{\exp[ik(uW_{H_x} + vW_{H_y})]\}, \quad (12) \end{aligned}$$

其中误差梯度函数定义为 $W_{ix}(x, y) = \partial W_i(x, y) / \partial x, W_{iy}(x, y) = \partial W_i(x, y) / \partial y, i = L, M, H$ 。

式(12)可视为两随机变量 $W_{ix}(x, y), W_{iy}(x, y)$ 和的特征函数。假设 $W_{ix}(x, y), W_{iy}(x, y)$ 是零均值高斯随机过程, 方差分别为 σ_{ix}^2 和 σ_{iy}^2 , 从而有

$$\begin{aligned} \bar{H}_s(u, v) &= \exp\left\{-\frac{1}{2}k^2(u^2\sigma_{L_x}^2 + v^2\sigma_{L_y}^2 + 2\rho_L uv\sigma_{L_x}\sigma_{L_y}) - \right. \\ &\frac{1}{2}k^2(u^2\sigma_{M_x}^2 + v^2\sigma_{M_y}^2 + 2\rho_M uv\sigma_{M_x}\sigma_{M_y}) - \\ &\left. \frac{1}{2}k^2(u^2\sigma_{H_x}^2 + v^2\sigma_{H_y}^2 + 2\rho_H uv\sigma_{H_x}\sigma_{H_y})\right\}, \quad (13) \end{aligned}$$

假设各频段对应的两随机变量是不相关的, 即 $\rho_L = \rho_M = \rho_H = 0$, 则:

$$\begin{aligned} \bar{H}_s(u, v) &= \exp\left\{-\frac{1}{2}k^2(u^2\sigma_{L_x}^2 + v^2\sigma_{L_y}^2) - \right. \\ &\frac{1}{2}k^2(u^2\sigma_{M_x}^2 + v^2\sigma_{M_y}^2) - \left. \frac{1}{2}k^2(u^2\sigma_{H_x}^2 + v^2\sigma_{H_y}^2)\right\}, \quad (14) \end{aligned}$$

特别地, 若 $\sigma_{L_x} = \sigma_{L_y}, \sigma_{M_x} = \sigma_{M_y}, \sigma_{H_x} = \sigma_{H_y}$, 则 $\sigma_{L\Delta}^2 = 2\sigma_{L_x}^2, \sigma_{M\Delta}^2 = 2\sigma_{M_x}^2, \sigma_{H\Delta}^2 = 2\sigma_{H_x}^2$, 从而有

$$\bar{H}_s(u, v) = \exp\left\{-\frac{1}{4}k^2(\sigma_{L\Delta}^2 + \sigma_{M\Delta}^2 + \sigma_{H\Delta}^2)(u^2 + v^2)\right\}, \quad (15)$$

根据文献[9]可知,相应的光学镜面各频段误差对应的均方根存在如下关系:

$$\sigma_F^2 = \sigma_L^2 + \sigma_M^2 + \sigma_H^2, \quad (16)$$

根据式(7)和式(15)可知,在光学镜面各频段误差之间互不相关情况下,满足如下关系:

$$\sigma_{F\Delta}^2 = \sigma_{L\Delta}^2 + \sigma_{M\Delta}^2 + \sigma_{H\Delta}^2, \quad (17)$$

那么,对于高斯光束,将式(6)和式(15)代入式(5)可得远场光强分布为:

$$I(f_x, f_y) = A_4 \cdot \exp\left\{\frac{4z_2^2 b \pi^2 (f_x^2 + f_y^2)}{k(b^2 + (a + z_2)^2 - kz_2^2 b \sigma_{F\Delta}^2)}\right\}, \quad (18)$$

其中 A_4 为与 σ_Δ 有关的常数。

同样地,对于回转对称情形,取极坐标为 $\rho^2 = \lambda^2 z_2^2 (f_x^2 + f_y^2)$,则半径 r 内的 FEE 可表示为:

$$\text{FEE}(r) = 1 - \exp\left\{-\frac{kbr^2}{b^2 + (a + z_2)^2 - kz_2^2 b \sigma_{F\Delta}^2}\right\}, \quad (19)$$

根据式(7)、式(8)、式(15)和式(19)可知,不同频段误差对 $\bar{H}_s(u, v)$ 具有迭乘作用,但对 FEE 不存在如此关系。

从式(19)可以看出,FEE 主要取决于波前相位误差的均方根梯度 σ_Δ ,同时可知,在固定面形误差 GRMS 值时,FEE(r)随环围计算半径的增加按指数规律增加,最终趋近于 1;在固定环围半径 r 时,FEE(r)随 GRMS 的增加按指数规律衰减,最终趋近于 0,且能量集中度指标随 GRMS 的增大显著下降。

5 仿真分析

文献[8]、[10]指出,与焦斑大小紧密联系的是面形误差的梯度均方根,它直接决定着焦斑的大小,进而影响到环围能量比 FEE 的大小。

利用 Zygo 干涉仪 GPI-1000 测量口径 $\phi 100$ mm 95%区域的平面镜并分析面形误差对 FEE 的影响,系统参数为:激光波长 $\lambda = 632.8$ nm,激光束宽 $\omega_0 = 3$ mm,一级扩束主镜 M_2 焦距 $f_{p_1} = 150$ mm,次镜 M_1 的焦距 $f_{s_1} = 50$ mm,二级

扩束主镜 M_4 的焦距 $f_{p_2} = 800$ mm,次镜 M_3 的焦距 $f_{s_2} = 200$ mm,并且 $z_1 = 3.5$ m,发射距离 $z_2 = 3$ km,相应的面形误差、梯度分布、FEE 曲线、能量转移图以及能量转移曲线如图 2 所示。其中能量转移分布为有误差时对应的光强分布与无误差时对应的光强分布之差,用来表示光学加工误差对光强分布的影响,即光强分布变化情况;能量转移曲线则是通过将光学镜面总面积分成 N 等份来分析能量转移分布中的能量变化情况,采用累积方法计算能量转移分布而得,其中数据为正表示对应的面积内有外部能量转移进入,而数据为负则表示对应的面积内有能量向外转移。

从图 2 可以看出,中频误差和低频误差对应的 PV 值比高频误差 PV 值小很多,不过由于中高频误差变化相对较快,使得相应的中高频误差梯度均方根(GRMS)值反而比低频误差 GRMS 值还要大,因而使得高频误差对应的理论 FEE 曲线与仿真和理想(指无误差)FEE 曲线相差较大,不过其余情况下 FEE 曲线之间相差不大,并且几乎重合。由能量转移图可以看出,低频误差主要影响光强分布的中心,将无误差时对应的光强分布边缘部分能量转移到光强分布中心,使得仿真 FEE 曲线较理想 FEE 曲线增加得快,到了一定范围后,相应区域的能量总和基本趋于平稳,同时光强分布边缘有部分能量转移到有效计算半径(指光学镜面计算半径)以外,从而造成能量出现损失。从等面积 FEE 曲线来看,低频误差对能量转移的影响明显是将核心外围的能量转移到核心处,同时部分能量转移到更宽的范围;高频误差对光强分布的影响则较复杂,从能量转移图可以看出,相应的光强分布之差出现反复振荡,不过总体来说,中心区域的能量总和随计算范围的增加相对有所增加,同时出现小幅振荡,在增大到一定程度时,随着计算半径的持续增大,相应区域能量总和逐渐下降,直到有效计算半径范围时仍大于理想光强分布对应的区域能量总和,说明有效计算半径范围以外有部分能量转移到有效计算半径范围以内,从而使得等面积 FEE 曲线始终 > 0 。中频误差对光强分布和 FEE 的影响则介于低频误差和低频误差对光强分布以及 FEE 的影响之

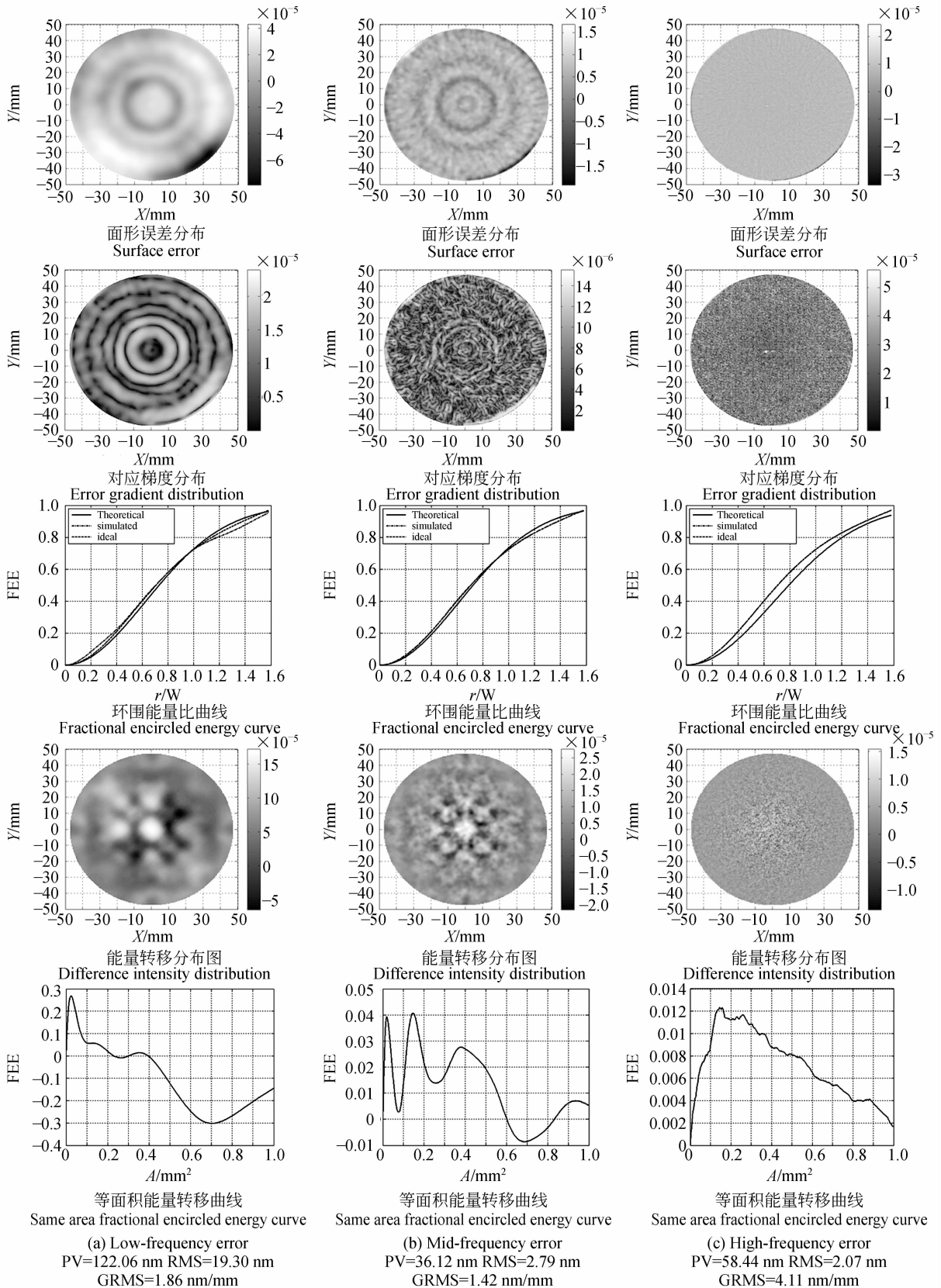


图 2 光学镜面各频段误差对应的光强分布以及 FEE 曲线

Fig. 2 Intensity distributions on various frequency errors of optical mirror and their FEE curves

间,并且振荡幅度较高频误差振荡幅度要大,同时有效计算半径范围以外的能量也有部分转移到有效半径范围以内。

本文针对各频段误差分别分析了不同 GRMS 值对 FEE 的影响,所采用的加工数据为一块微晶平面玻璃经离子束 (IBF) 和磁流变 (MRF) 加工前后所得的数据,通过滤波得到各频

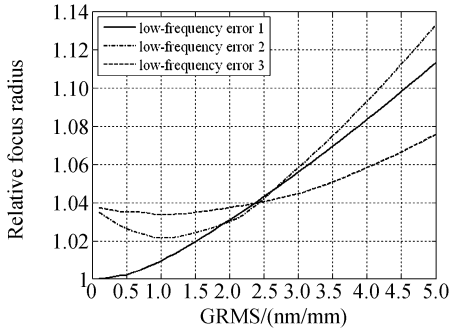
段误差,并对各频段误差进行比例处理,得到不同的 GRMS 值,进而分析不同 GRMS 值对 FEE 的影响,相应的分析结果如图 3 所示。

其中图 3(a)表示原始误差,图 3(b)表示经 IBF 加工后的误差数据,图 3(c)表示在图 3(b)的基础上经 MRF 加工后的误差数据。

从图 3 可以看出,不同加工阶段面形误差各频段误差对 FEE 的影响不同,不过总体变化趋势基本相同。文献[6]表明,一般分析面形误差对 80% 环围能量对应的光斑半径的影响即可。通过统计知识可知,在低频面形误差 $GRMS \leq 3 \text{ nm/mm}$ 、中频面形误差 $GRMS \leq 12 \text{ nm/mm}$ 和高频面形误差 $GRMS \leq 30 \text{ nm/mm}$ 时,各频段误差对 84% 环围半径的影响均 $< 5\%$,由此,可以根据面形误差对 FEE 的总影响要求,进而分配不同频段误差相应的影响大小,并根据各频段误差对 FEE 的影响规律,得出各频段误差相应的 GRMS 值要求,为光学镜面的面形误差修正提供支持。

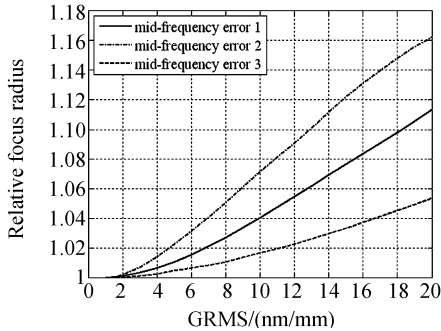
6 结 论

根据全频段误差对 FEE 的影响来分析中高频误差对 FEE 的影响发现,两者表达式完全相同。由各频段误差对应的 PV、RMS 值可知,中高频误差对应的幅值一般比低频误差幅值小,不过由于中高频误差变化相对较快,相应的 GRMS 值可能比低频误差 GRMS 值还要大,从而使得中高频误差可能比低频误差对 FEE 的影响还要大。通过分析光学镜面包含的中高频误差对 FEE 的影响来看,各频段误差均将中心外围能量转移到光强分布的核心,同时中心外围部分能量转移到更宽范围,并且随着中高频误差的增大,能量转移曲线出现反复振荡。对于口径 $\phi 100 \text{ mm}$ 的镜面,在中频误差 $GRMS \leq 12 \text{ nm/mm}$ 和高频误差 $GRMS \leq 30 \text{ nm/mm}$ 时,各频段误差对 84% 环围半径的影响均小于 5%,其他口径情况可依此类推,从而为光学镜面面形误差修正提供支持。



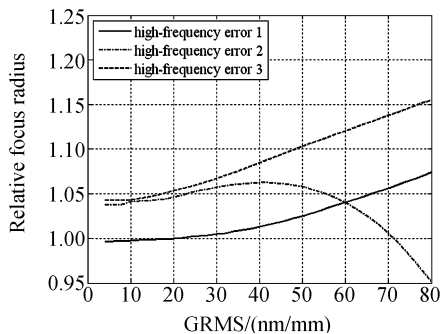
(a) 低频误差

(a) Low-frequency errors



(b) 中频误差

(b) Mid-frequency errors



(c) 高频误差

(c) High-frequency errors

图3 各频段误差不同 GRMS 值对 84% 环围半径的影响

Fig. 3 Influence of various GRMS with various frequency errors on 84% FEE Radius

参考文献:

- [1] 万敏,苏毅,张卫,等. 光学器件面形误差对光束质量的影响[J]. 光学学报,2002,22(4):495-500.
WAN M, SU Y, ZHANG W, *et al.*. Influence of surface error on beam quality in optics elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(4):495-500. (in Chinese)
- [2] 吴晗平. 激光光束质量的评价与应用分析[J]. 光学精密工程,2000,8(2):128-132.
WU H P. Evaluation and applied analysis of laser beam quality [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(2):128-132. (in Chinese)
- [3] 吴冬良,戴一帆,王贵林,等. 光学面形误差对环围能量比的影响[J]. 光学精密工程,2007,15(9):1328-1335.
WU D L, DAI Y F, WANG G L, *et al.*. Influence of optical surface error on encircled energy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9):1328-1335. (in Chinese)
- [4] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
YANG L. *Advanced Optical Manufacturing Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [5] 黄志刚,董晓浩,高飞,等. X射线衍射和散射光束线环面聚焦镜的面形精度与像差分析[J]. 光学精密工程,2004,12(1):26-30.
HUANG ZH G, DONG X H, GAO F, *et al.*. Slope error and aberration analysis for XRDX beamline toroidal focusing mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1):26-30. (in Chinese)
- [6] 吕百达. 激光光学:激光束的传输变换和光束质量控制[M]. 第2版. 成都:四川大学出版社,1992.
LÜ B D. *Laser Optics: Laser Beam Propagation and Beam Quality Control* [M]. 2th ed. Chengdu: Sichuan University Press, 1992. (in Chinese)
- [7] 李有宽,陈栋泉,杜祥琬. 发射光学系统分析[J]. 强激光与粒子束,2000,12(1):15-18.
LI Y K, CHEN D Q, DU X W. Analysis of optical transmitting system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(1):15-18. (in Chinese)
- [8] WILLIAMS W, AUERBACH J, HUNT J, *et al.*. *NIF optics phase gradient specification* [R]. UCRL-ID-127297, 1997.
- [9] HARVEY J E, KOTHA A. Scattering effects from residual optical fabrication errors [J]. *SPIE*, 1995, 2576:155-174.
- [10] LAWSON J K, AUERBACH J M, ENGLISH R E, *et al.*. NIF Optical Specifications-The Importance of the RMS Gradient [J]. *SPIE*, 1999, 3492: 336-343.

作者简介:



吴冬良(1978—),男,江西丰城人,博士研究生,2002年、2004年于国防科技大学分别获得学士和硕士学位,主要从事光学镜面面形误差评价。E-mail: kd-wdl789@163.com



王贵林(1974—),男,湖北荆州人,博士,副教授,1996年、1998年和2002年于国防科技大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要研究方向为精密工程与计算机控制。E-mail: guilin74811@nudt.edu.cn

导师简介:



戴一帆(1966—),男,江苏南京人,博士,教授,1988年于国防科技大学获得学士学位,1995年于莫斯科航空学院获得博士学位,主要研究方向为精密工程与计算机控制。E-mail: dyf@nudt.edu.cn