

文章编号: 0253-2239(2007)11-1992-5

基于 Harvey-Shack 表面散射理论的光学误差测量

杨 智 戴一帆 王贵林

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

摘要: 基于散射理论,不同频段的光学表面制造误差会对光学性能产生不同的影响,而常用的光学设计软件一般没有考虑。为此利用小波变换对误差进行了频段分割;然后基于 Harvey-Shack 表面散射理论,从频段误差的角度对光学表面的光学性能进行了评价,同时基于小波变换的特点,当光学性能不满足要求时,找到了需重点控制的频段误差在光学表面发生的区域,从而对下一步的加工进行指导。最后以一块口径 500 mm 的大镜实测数据及设计要求“在 0.33 mrad 内环绕能量大于 70%”进行了实验验证。结果表明,利用此方法能有效的建立“表面频段误差-光学评价-光学加工”三者之间的联系。

关键词: 光学测量;小波;Harvey-Shack 表面散射理论;光学评价

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Measure of Optical Errors Based on Harvey-Shack Surface Scattering Theory

Yang Zhi Dai Yifan Wang Guilin

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

Abstract: Scattering effects from optical fabrication errors of different frequency-segment limit the optical performance. But there lacks appropriate optical design software to account for these effects. In order to solve this problem and guide fabrication, Wavelet transform is used to separate errors; and then Harvey-Shack surface scatter theory is used to specify optical surface. Because of wavelet-transform's character, the corresponding region of crucial frequency segment error is also found when the optical performance cannot satisfy demand, thereby guiding fabrication. Finally, there is an experimental validation via measurement data of an aperture $\phi=500$ mm mirror and design demand “the enclosed energy requirement of 70% in a 0.33 mrad enclosed region”. The experimental results show the method can set up a direct relation between frequency-segment errors, optical specification and optical fabrication effectively.

Key words: optical measurement; wavelet; Harvey-Shack surface scattering theory; optics evaluation

1 引 言

当光线射到光学元件表面,特别是粗糙表面时会发生散射,其中高频误差主要引起大角度散射,中频误差主要引起小角度散射,从而影响光学系统的性能^[1]。瑞利-莱斯(Rayleigh-Rice)理论^[2]主要用于超光滑表面,贝克曼-基尔霍夫(Beckmann-Kirchoff)理论^[3]虽然适用于粗糙表面,但因有近轴假定,当入射角度较大时,会出现理论与实验不相符合的情况^[4],Harvey-Shack 理论^[5,6]基于线性系统理论,适用于任何入射角度的表面散射理论。

基于 Harvey-Shack 理论,可以从频段误差的角度对光学表面的光学性能进行评价。看是否符合光学性能指标的要求。当其光学性能不能满足设计要求时,要有针对性地消除或减少频段误差,使光学性能满足要求。已提出能消除特定频段误差加工进行指导的小波评价方法^[7],其中基于功率谱密度特征曲线的方法主要思路是将美国劳伦斯-利弗莫尔实验室提出的功率谱密度特征曲线与实际光学表面的功率谱密度曲线进行比较,当不满足要求时,找到不合格的频率点,利用二维连续小波变换找到这一频率对应

作者简介: 杨 智(1978-),男,湖南娄底人,博士研究生,主要从事信息光学方面的研究。E-mail: sun8_1@163.com

导师简介: 戴一帆(1966-),男,博士,教授,主要从事精密工程方面的研究。E-mail: dyf@nudt.edu.cn

收稿日期: 2006-12-22; 收到修改稿日期: 2007-04-06

的区域,从而对下一步加工进行指导。然而因为其中用到了特定的评价曲线,在实际的操作中可能并不适合任意的加工镜面;而基于二维离散小波变换的方法虽然脱离了这一特征曲线,在进行评价时只能通过比较两次加工的小波分析结果,无形中又与光学性能脱离了联系。假如结合 Harvey-Shack 理论与小波理论,则可能从普遍的意义建立“表面频段误差-光学评价-光学加工”之间的联系,也给现有的光学设计-光学加工提供一条新思路。

在现有的光学设计中,如 Zemax、OSLO、Codev 等常用软件都没有考虑特定频段误差对光学性能的影响,美国宇航局的“光学表面分析软件”^[8](Optical surface analysis code, OSAC)虽然能建立频段误差与光学性能指标之间的联系,但因其基于贝曼-基尔霍夫理论,无形中就具有近轴假定,在视场比较大的场合不能适用,且又是内部软件,很难获得;而现有的光学加工方法中,如通常的计算机控制光学表面成形技术,当有中高频误差控制要求时,一般是利用大的抛光盘对全表面再加工,直到符合光学性能要求为止。显然,其中也不考虑特定的频段误差和此频段误差在光学表面发生的相应区域。本方法,当镜面不符合光学性能要求时,能找到需要重点控制的频段误差和这一频段的对应区域,从而指导加工,提高了加工效率。

2 原 理

2.1 表面误差的小波分割

为对加工进行指导,即找到不同频段的对应区域,采用离散小波变换来对误差进行处理。与通过滤波器的方法相比,小波变换具有“由粗及精”的多分辨分析特征,更符合实际工作的需要。

光学元件表面是二维面,比较合适的处理方法是采用二维小波变换。假设原始误差信号为 S ,对其作二维离散小波变换(包括分解和重构),就第一层而言: $S=A_1+D_1$,其中 A_1 为低通滤波后,重构而得的逼近信号, D_1 为经高通滤波后,重构而得的细节信号,也就是得到了两个不同频段的信息(为简单起见,细节信号只考虑对角细节)。

在此基础上,对第二层进行分析得: $A_1=A_2+D_2$,同理, A_2 为逼近信号, D_2 为细节信号。所以 $S=A_2+D_2+D_1$,可见原始信号根据频段的不同被分为了三段,即进行了误差在频域的二进分割。当分析层数增加时,可以类推下去,如图 1 所示。

可以看出,二进频段分割与口径的大小无关,从

而脱离了目前光学表面低、中、高频段范围不统一的问题,具有较广的适应性。

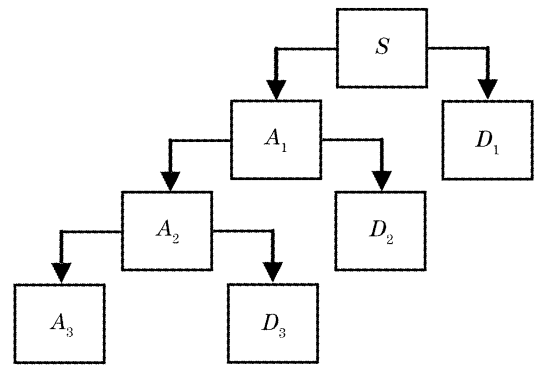


图 1 重构信号成份

Fig. 1 Reconstructed signal components

2.2 基于 Harvey-Shack 理论的光学评价

当入射光垂直入射到光学表面(一般可假定为随机的、各向同性,高度服从高斯分布),散射表面传递函数为^[5]

$$H_s(\hat{x}, \hat{y}) = \exp \left\{ (-4\pi\hat{\sigma}_s)^2 \left[1 - \hat{C}_s \left(\frac{\hat{x}}{\hat{l}}, \frac{\hat{y}}{\hat{l}} \right) / \hat{\sigma}_s^2 \right] \right\}, \quad (1)$$

其中 $\hat{C}_s \left(\frac{\hat{x}}{\hat{l}}, \frac{\hat{y}}{\hat{l}} \right)$ 为二维表面自相关函数, $\hat{x} = x/\lambda$, $\hat{y} = y/\lambda$, $\hat{l} = l/\lambda$, l 为相关长度, $\hat{\sigma}_s = \sigma_s/\lambda$, λ 为入射光波长, σ_s^2 为表面高度分布函数的均方值。

设表面误差由低频、中频和高频组成,则有

$$H_s = H_L \cdot H_M \cdot H_H, \quad (2)$$

其中 H_L 为表面低频散射传递函数, H_M 为表面中频散射传递函数, H_H 为表面高频散射传递函数,以 L、M 及 H 下标分别代替(1)式中的 s 下标,即可得入射光垂直入射光学表面时 H_L 、 H_M 及 H_H 的表达式。

同理,当用小波进行频段分割时(以图 1 中的三层为例),有

$$H_s = H_{D_1} \cdot H_{D_2} \cdot H_{D_3} \cdot H_{A_3}, \quad (3)$$

其中 H_{D_1} 为 D_1 频段的表面传递函数,以 D_1 代替(1)式中的 s 下标可得其表达式。 D_2 、 D_3 及 A_3 频段类似。

当求出散射表面传递函数(在各频段的表面传递函数求出基础上,一般会减去镜面分量),对其做傅里叶变换,便可得到角谱空间的角扩展函数,由归一化的角扩展函数积分可得环绕能(Enclosed energy)这一光学性能评价指标。

2.3 与光学加工的联系

针对设计要求,当不满足光学性能要求时,参考各频段散射传递函数对应的光学性能图,找到需重

点控制的频段误差,再回到小波分割的分析结果,就可找到这一频段误差在光学表面发生的相应区域。然后以这些区域作为加工的反馈,便可有针对性地消除或减少此频段误差,最大程度地改善光学表面的光学性能。

当再加工完毕,如还是不能满足光学性能要求,则重复以上过程,直到满足光学性能要求为止。其整个分析过程如图 2 所示。

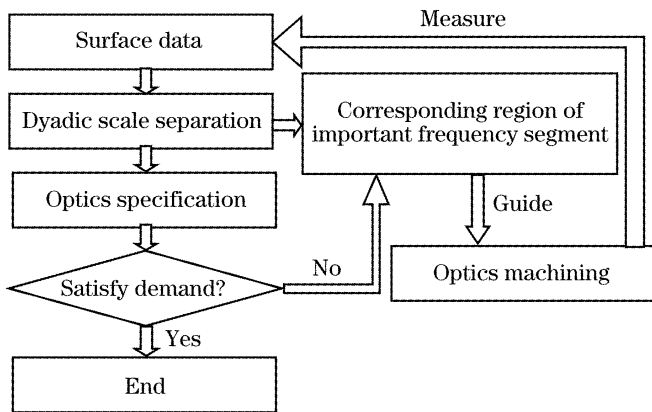


图 2 分析方法示意图

Fig. 2 Sketch map of analysis method

3 实 验

实验对一块口径 500 mm、 f 数为 1 的大型球面镜用干涉仪进行了测量, CCD 阵列有效像素为 512 pixel \times 512 pixel, 采样周期 $\Delta = 1$ mm/pixel, 波长为 632.8 nm。干涉仪测量结果如图 3 所示(取中心 85% 范围区域)。

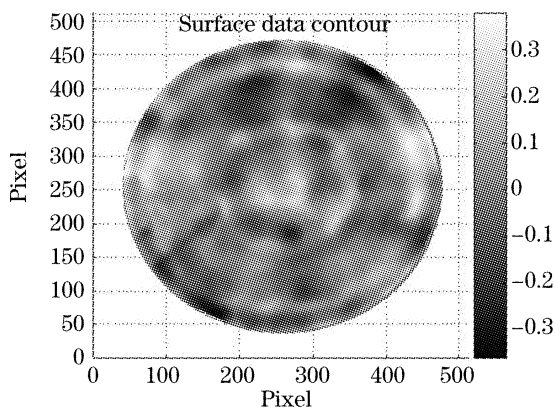


图 3 表面数据

Fig. 3 Surface data contour

首先进行频段误差分割。当信号的采样率满足尼奎斯特(Nyquist)要求时,信号的最高频率为 $f_{\max} = 1/(2\Delta) = 0.5$ mm⁻¹。离散小波变换二分频段,对第一层: $A_1: 0 \sim 0.25$ mm⁻¹, $D_1: 0.25 \sim 0.50$ mm⁻¹,依次类推,到第四层: $S = D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + A_4$, 频段误差范围如表 1 所示(为直观起见,频率用倒数即空

间波长表示)。由表 1 可见, D_4 空间波长已到 32 mm, 接近劳伦斯-利弗莫尔实验室提出的大镜中低频范围分界点 33 mm^[9]。

通过考察表面误差分布数据,依据相似性原则,选用 bior3.7 小波作为基本小波作二维离散小波变换,其分析结果如图 4 左侧所示。对每一个频段误差,取平行横轴的过中心截线作为估计均方根 σ 、相关长度 l 的分析数据。均方值表达式为

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n)]^2, \quad (4)$$

其中 N 为采样点数, $x(n)$ 为误差。将误差数据代入(4)式可得到 σ^2 值。对于相关长度,通过考察每一个频段误差过中心截线实际的归一化自相关函数,当归一化自相关函数下降到 $1/e$ 时得相关长度 l 的值(即图 4 右侧中 L 值),每一个频段误差对应的 σ^2 、 l 值如表 1 所示。

图 1 误差频段范围及相应的均方值、相关长度

Table 1 Range of different frequency segment, corresponding variance and correlation length

	Range of frequency segment / mm	Mean square $\sigma^2 / \mu\text{m}^2$	Correlation length $l / \mu\text{m}$
D_1	2~4	9.34×10^{-10}	1000.2
D_2	4~8	1.08×10^{-8}	2000.5
D_3	8~16	3.98×10^{-7}	3000.7
D_4	16~32	1.52×10^{-6}	5001.2
A_4	32~	4.27×10^{-3}	23005.3

假设波长 632.8 nm 的单色光垂直入射此单一散射表面。将表 1 中每一个频段的 σ^2 、 l 及相应的自相关函数代入(1)式、(3)式即可得表面散射传递函数,再做傅里叶变换,便可得到角谱空间的角扩展函数,由角扩展函数积分便可得到环绕能。因一般成像在方形 CCD 上,所以对中心方形区域积分的环绕能作为光学性能评价指标,如图 5 所示。

由图 5 可见,随着频段降低,其对光学性能的影响越小,如最低的 A_4 频段,环绕能已集中在 $56 \mu\text{rad}$ 内,影响已经很小了。假设设计要求是在 0.33 mrad 内环绕能大于 70%(设散射面是一个单反射面成像光学系统,不考虑像差和衍射对像质的影响,此指标与成像 CCD 的像素大小有关),可见此光学表面不符合要求,而 D_1 频段误差是需重点控制的频段。从图 4 的小波分析结果,可找到 D_1 频段在表面的分布区域,如图 4(a)左侧,即达到指导加工的目的。针对不同的加工方法,一般就有不同的局域消除方式,譬如数控抛光,一般可依据对应区域大小适当选择抛光盘及均匀抛光的方式达到局域频段误差消除的目的。

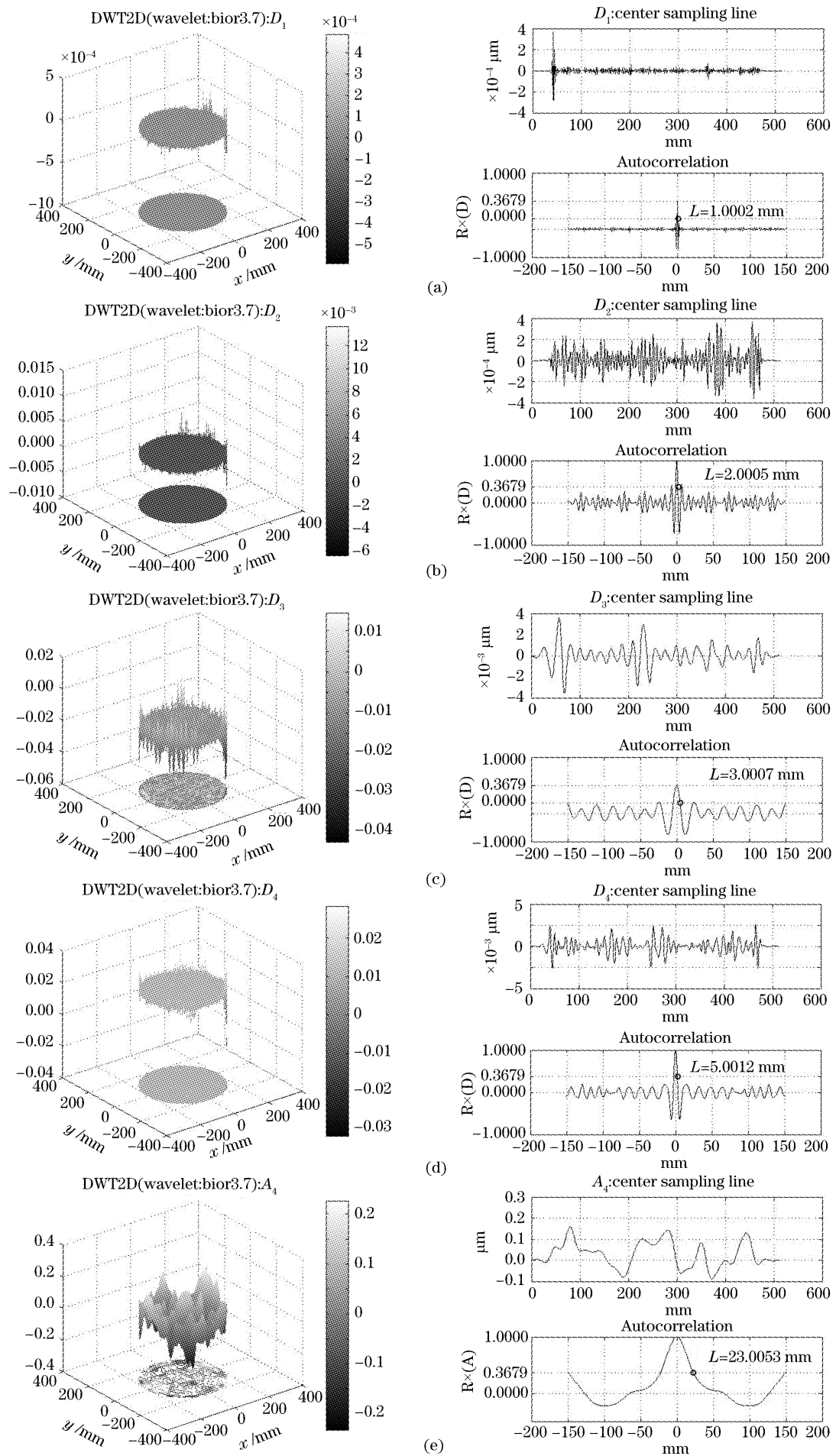


图 4 不同频段小波分析结果及相应的相关长度计算. (a) D_1 , (b) D_2 , (c) D_3 , (d) D_4 , (e) A_4

Fig. 4 Wavelet analysis result and correlation length calculation. (a) D_1 , (b) D_2 , (c) D_3 , (d) D_4 , (e) A_4

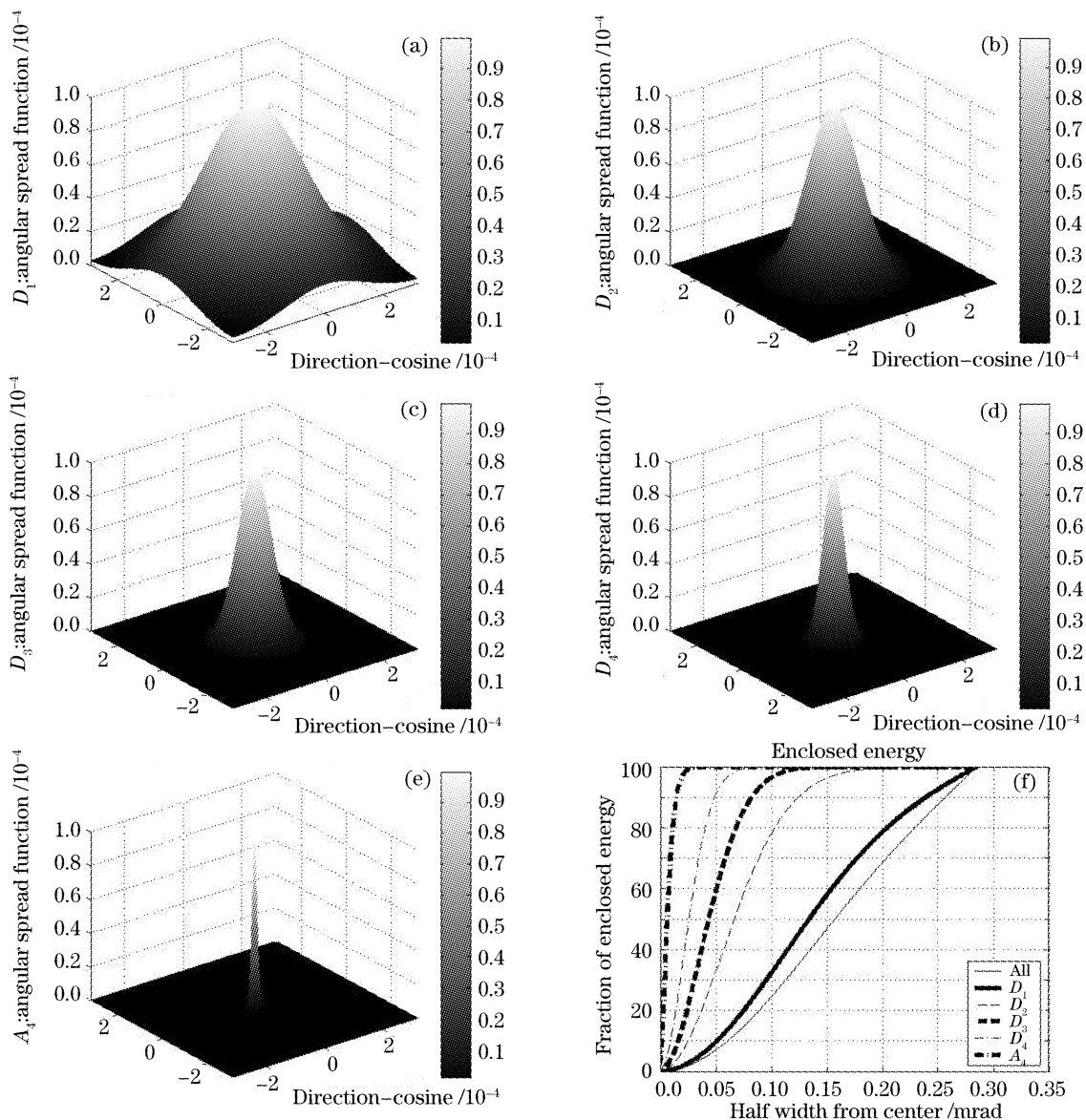


图 5 频段误差角扩展函数(a) D_1 , (b) D_2 , (c) D_3 , (d) D_4 , (e) A_4 及环绕能对比(f)

Fig. 5 Angular spread function (a) D_1 , (b) D_2 , (c) D_3 , (d) D_4 , (e) A_4 and enclosed energy (f)

4 结 论

基于 Harvey-Shack 散射理论及小波理论,建立了“表面频段误差-光学评价-光学加工”三者之间的联系,给光学设计-光学加工提供一条新思路。并以一块口径 500 mm 的大镜测量数据及设计要求“在 0.33 mrad 内环绕能大于 70%”对整个过程进行了仿真,实验结果证实,该方法是有用的。当散射表面是光学系统中的一部分,一般具有不同的波长和不同的视场,且还需考虑像差、衍射对光学性能的影响。然而,整个分析过程一致,仅需对散射表面传递函数表达式做些改变。

参 考 文 献

1 R. J. Noll. Effect of mid and high spatial frequencies on optical

- performance[J]. *Opt. Engng.*, 1979, **18**: 137~142
- 2 S. O. Rice. *Symposium on the Theory of Electromagnetic Waves; Reflection of Electromagnetic Waves from Slightly Rough Surfaces* [M]. Interscience publishers, 1951. 351
- 3 P. Beckmann, A. Spizzichino. *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces* [M]. Artech House, 1987
- 4 K. A. O'Donnell, E. R. Mendez. Experimental study of scattering from characterized random surfaces[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1987, **4**(7): 1194~1205
- 5 James E. Harvey, Anita Kotha. Scattering effects from residual optical fabrication errors[C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2576**: 155~174
- 6 James E. Harvey, Cynthia L. Vernold. Modifying the Harvey-Shack surface scatter theory[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3426**: 326~332
- 7 Yang Zhi, Dai Yifan, Wang Guilin. The use of wavelet in specifying optics[C]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(1): 44~46
- 8 R. J. Noll, P. Glenn, J. Osantowski. Optical surface analysis code (OSAC)[C]. *Proc. SPIE*, 1982, **362**: 78~85
- 9 J. K. Lawson, C. R. Wolfe, K. R. Manes *et al.*. Specification of optical components using the power spectral density function [C]. *Proc. SPIE*, 1995, **2536**: 38~50