

文章编号 1004-924X(2009)10-2365-06

光学加工中高频误差对散射损失比的影响

戴一帆, 吴冬良, 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:以光学系统主镜为研究对象,分析了中高频误差对散射损失比的影响。根据光学镜面面形误差近似高斯平稳随机过程特征,结合 Harvey-Shack 散射理论和统计光学理论,建立了光学镜面中高频误差 RMS 与散射损失比(RSL)之间的数学关系模型,并利用实际加工数据进行了仿真验证。研究表明,RSL 随着中高频误差 RMS 的增加近似呈指数规律增加,同时在聚焦范围内,理论分析与仿真计算结果非常吻合。在中频误差和高频误差 RMS 值分别 $<\lambda/63$ 时,对 RSL 的影响均 $<1\%$,结果可为中高频误差的修正提供理论支持。

关键词:光学主镜;中频误差;高频误差;散射损失比;误差均方根

中图分类号:TQ171.68 **文献标识码:**A

Influence of mid-and-high frequency errors from optical processing on ratio of scattering loss

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

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

Abstract: In view of a primary mirror of an optical system, the influence of the mid-and-high frequency errors on the Ratio of Scattering Loss (RSL) was analyzed. On the basis of the statistical optics theory and Harvey-Shack scatter theory, a mathematical model of the relationship between the Root-mean Square (RMSs) of mid-and-high frequency errors and the RSL was established by assuming the surface errors as a stationary Gaussian random process, and the numerical computation and actual surface profile data of the model were validated. It is found that the RSL increases almost in exponential form with the increase of RMS and the mathematical model agrees with the simulation results very well within the focused radius. The influence of the mid-and-high frequency errors on the RSL is less than 1% when the RMSs of the mid-and-high frequency errors are less than $\lambda/63$ respectively. The analysis results provide the support for correction of the mid-and-high frequency errors.

Key words: optical primary mirror; mid-frequency error; high-frequency error; ratio of scattering loss; root-mean square

收稿日期:2008-11-17;修订日期:2008-12-23.

基金项目:国家重大基础研究项目和国家自然科学基金资助项目(No. 50775215)

1 引言

激光束在传输过程中,由于空气、浮尘等介质的影响会产生漫反射、散射等光学效应,使得目标处能量出现损失;同时由于光学镜面加工误差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,远场光强分布发生变化,也会影响远场光斑质量^[1],导致要求范围内的能量出现损失。通过分析光学加工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]。针对激光束传输过程中由于空气等介质的影响产生的漫反射、散射从而出现的能量损失问题,相关研究文献^[3-5]很多,但是针对光学加工误差引起的散射损失却鲜有涉及,尤其是中高频误差对散射损失比(Ratio of Scattering Loss, RSL)的影响少有报道。本文根据光学加工误差引起远场光强分布发生改变来分析加工误差对 RSL 的影响,进而分析中高频误差对 RSL 的影响。由于光学加工误差引起的远场能量损失一般由光学表面散射引起,因此,通过分析表面散射函数的改变就可以得到光学镜面中高频误差对 RSL 的影响。

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 RSL 指标的影响,对提高光学系统的光学性能,建立光学加工误差评价方法具有重要意义。

2 光学加工误差对 RSL 的影响

表面散射能够描述为由粗糙表面带来的随机相位变化对系统有效光瞳函数产生影响的衍射过程。在分析光学镜面形误差引起的散射影响的各种理论中,Rayleigh-Rice 理论主要适用于超光滑表面,也就是表面均方根 $\sigma \ll \lambda$ (其中 λ 为激光波长),Beckmann-Kirchhoff 理论虽然适用于粗糙表面,但因为有近轴假定,当入射角度较大时,会出现理论与试验不相符合的情况,Harvey-Shack 理论则从线性系统理论出发,提出了适用于任何入射角度的表面散射理论。

假设光学表面是随机的、各向同性的以及各态历经的,同时表面高度服从高斯分布^[6-7]。传统的光学传递函数定义为光瞳函数的归一化自相关函数,因此散射表面传递函数^[6]表示为:

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

其中, C_s 为二维表面自协方差函数, σ_s 为表面高度分布函数方差, l 为表面自相关函数的相关长度;采用的标量坐标都利用波长 λ 正则化,即 $\hat{x} = x/\lambda, \hat{y} = y/\lambda$ 及 $\hat{C}_s = C_s/\lambda, \hat{\sigma}_s = \sigma_s/\lambda, \hat{l} = l/\lambda$ 。

根据自协方差定义可知,当距离接近于 0 时,自协方差函数接近于 σ^2 ,等效传递函数接近于 1;而当距离变得无限远时,自协方差函数接近于 0,等效传递函数近似等于 $\exp[-(4\pi\sigma_s)^2]$ 。因此散射表面等效传递函数可以看作是常数部分和钟形部分之和^[6],如图 1(a)所示,此时式(1)可表示为:

$$H_s(\hat{x}, \hat{y}) = A + BQ(\hat{x}, \hat{y}), \quad (2)$$

其中, $A = \exp[-(4\pi\sigma_s)^2]$ 和 $B = 1 - \exp[-(4\pi\sigma_s)^2]$ 分别表示镜向反射总体反射能和总体积分散射能, $Q(\hat{x}, \hat{y}) = \{ \exp[(4\pi)^2 \hat{C}_s] - 1 \} / \{ \exp[(4\pi\sigma_s)^2] - 1 \}$ 。

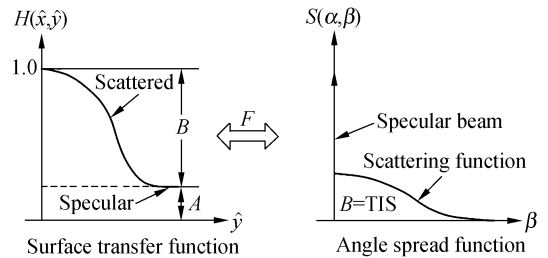


图 1 表面传递函数及相应的角扩散函数

Fig. 1 Surface transform function and angle spread function

由于角扩散函数 $S_s(\alpha, \beta; \hat{r})$ 和表面传递函数 $H_s(\hat{x}, \hat{y})$ 互为傅里叶变换,因此散射表面角扩散函数可表示为两部分傅里叶变换之和,即:

$$S_s(\alpha, \beta; \hat{r}) = A \cdot \delta(\alpha, \beta; \hat{r}) + S(\alpha, \beta; \hat{r}), \quad (3)$$

其中, $S(\alpha, \beta; \hat{r}) = B \cdot \mathcal{F}[Q(\hat{x}, \hat{y})]$ 为散射函数。

根据式(2)可知,传递函数常数分量变换成 δ 函数,钟形分量变换成钟形散射函数,如图 1(b)所示。因此光学镜面将入射光散射成衰减的镜面反射光束,边缘环绕着散射光晕。

对于具有广义平稳随机过程特征的随机相位误差 $\phi(x, y)$,其结构函数只与坐标差 $\Delta x = x_1 - x_2$ 和 $\Delta y = y_1 - y_2$ 有关^[8],可以用随机相位的归一化自相关函数 $\gamma_\phi(\Delta x, \Delta y)$ 来表示,从而平均光学传递函数(OTF)可表示为:

$$H_s(v_U, v_V) = \exp\{-\sigma_\phi^2[1 - \gamma_\phi(\lambda f v_U, \lambda f v_V)]\}. \quad (4)$$

其中, (v_U, v_V) 为频域坐标。根据 Harvey-Shack 散射理论关于镜面分量和散射分量的分析, 结合式(2)可将式(4)表示为:

$$H_s(v_U, v_V) = \exp(-\sigma_\phi^2) + \exp(-\sigma_\phi^2)\{\exp(\sigma_\phi^2 \gamma_\phi) - 1\}, \quad (5)$$

上式中的第一项为镜面分量, 第二项为散射分量。对第二项进行傅里叶变换即可得到光学加工误差的角扩散函数(Angle Spread Function, ASF)。

$$S(\alpha, \beta; \hat{r}) = \mathcal{F}\{\exp(-\sigma_\phi^2)[\exp(\sigma_\phi^2 \gamma_\phi) - 1]\}. \quad (6)$$

从式(2)和式(4)来看, 求解粗糙表面对入射光的散射损失影响可以通过分析散射分量的分布情况或者分析散射分量占入射激光能量的百分比来进行。结合式(6)可知, 分析散射分量角扩散函数分布即可获知由光学表面误差引起的散射损失。

散射损失比 RSL 定义为半径 R 外的散射能量占输入总能量的百分比, 记为:

$$\text{RSL} = [1 - \exp(-\sigma_\phi^2)] \cdot \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^R S(\alpha, \beta; r) r dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^0 S(\alpha, \beta; r) r dr d\theta}. \quad (7)$$

针对高斯分布的光学加工误差, 相应的自相关函数为高斯型, 此时由式表示的角扩散函数对应的 N 阶近似可写为:

$$S(\alpha, \beta; r) = \sum_{n=1}^N \frac{\pi \omega^2 \exp(-\sigma_\phi^2) \sigma_\phi^{2n}}{n \cdot n!} \exp\left(-\frac{\pi^2 r^2 \omega^2}{n \lambda^2 L^2}\right), \quad (8)$$

相应的散射损失比 RSL 为:

$$\text{RSL} = [1 - \exp(-\sigma_\phi^2)] \cdot \sum_{n=1}^N (A_n \cdot B_n) / \sum_{n=1}^N A_n, \quad (9)$$

其中, $A_n = \frac{\exp(-\sigma_\phi^2) \sigma_\phi^{2n}}{n \cdot n!}$, $B_n = \exp\left(-\frac{\pi^2 R^2 \omega^2}{n \lambda^2 L^2}\right)$, ω 为面形误差自相关函数宽度。

由式(9)可知, 散射损失比 RSL 指标主要与波前误差均方根 RMS(用 σ_ϕ 表示)有关。因此为了减少波前畸变引起的散射损失, 重点在于降低相位误差 σ_ϕ 的大小。同时为了保证 RSL 的计算精度, 相应的角扩散函数近似项数要满足一定条件。

下面通过加工实例数据对比理论分析和仿真结果, 相应的分析结果如图 2 所示。

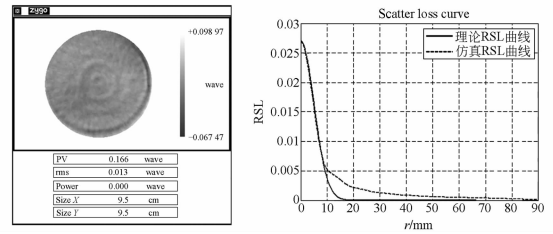


图 2 RSL 理论分析和仿真计算结果

Fig. 2 Theoretical and simulation results on RSL

从图 2 可以看出, 理论 RSL 曲线与仿真 RSL 曲线相比, 散射光强分布中心所占能量分布情况基本相同, 只是外围能量分布有所不同, 这可能与实际加工误差并不完全表现为高斯分布有关。

3 中高频误差对 RSL 的影响

由于光学加工误差可表示为低频、中频和高频三部分, 即:

$$\phi_s(x, y) = \phi_L(x, y) + \phi_M(x, y) + \phi_H(x, y), \quad (10)$$

因此光学表面自相关函数为:

$$\Gamma_1(x_1, y_1; x_2, y_2) = E\{\exp[(j\phi_{L_1} - j\phi_{L_2}) + \dots + (j\phi_{M_1} - j\phi_{M_2}) + (j\phi_{H_1} - j\phi_{H_2})]\}, \quad (11)$$

其中, 低频、中频和高频误差是根据光学镜面大小、去除函数宽度以及测量间隔来进行划分的, 主要用于光学镜面误差修正。

假定随机变量 $\phi_1 = \phi(x_1, y_1)$ 和 $\phi_2 = \phi(x_2, y_2)$ 之间是相互独立的, 那么, 根据 Harvey-Shack 散射理论, 相应的 ϕ_1 、 ϕ_2 中的低频、中频以及高频误差之间也是相互独立的。因此, 根据式(11)可得:

$$\Gamma_1(\Delta x, \Delta y) = \exp\left\{-\frac{1}{2}(D_{\phi_L} + D_{\phi_M} + D_{\phi_H})\right\}, \quad (12)$$

其中, $\Delta x = x_2 - x_1$, $\Delta y = y_2 - y_1$, D_ϕ 为结构函数。

与全频段相比可得:

$$D_\phi = D_{\phi_L} + D_{\phi_M} + D_{\phi_H}, \quad (13)$$

根据文献[8]可知:

$$D_\phi(\Delta x, \Delta y) = 2\sigma_\phi^2[1 - \gamma_\phi(\Delta x, \Delta y)], \quad (14)$$

于是屏的平均 OTF 为:

$$H_s(v_U, v_V) = \exp\{-\sigma_{\phi_L}^2 [1 - \gamma_{\phi_L}(\lambda f v_U, \lambda f v_V)]\} \cdot \exp\{-\sigma_{\phi_M}^2 [1 - \gamma_{\phi_M}(\lambda f v_U, \lambda f v_V)]\} \cdot \exp\{-\sigma_{\phi_H}^2 [1 - \gamma_{\phi_H}(\lambda f v_U, \lambda f v_V)]\}. \quad (15)$$

从式(15)可以看出,各频段误差对 OTF 的影响具有迭乘效果,因此,根据 Harvey-Shack 散射理论以及统计光学理论,各频段误差对 OTF 的影响为:

$$H_{st}(v_U, v_V) = \exp(-\sigma_{\phi_i}^2) + \exp(-\sigma_{\phi_i}^2) [\exp(\sigma_{\phi_i}^2 \gamma_{\phi_i}) - 1], \quad (16)$$

其中, $i=L, M, H$ 分别表示低频、中频以及高频。

同样可以认为上式中的第一项为镜面分量,第二项为散射分量。对第二项进行傅里叶变换即可得到各频段误差的角扩散函数。

$$S_i(\alpha, \beta; r) = \mathcal{F}\{\exp(-\sigma_{\phi_i}^2) [\exp(\sigma_{\phi_i}^2 \gamma_{\phi_i}) - 1]\}. \quad (17)$$

分析各频段误差对角扩散函数能量分布的影响即可得到各频段误差引起的能量损失比。

同样,这里针对高斯型面形误差,分析各频段误差对 RSL 的影响规律。鉴于各频段误差之间互不相关,相应的低频、中频以及高频误差对应的角扩散函数 N 阶近似可表示为:

$$S_i(\alpha, \beta; r) = \sum_{n=1}^N \frac{\exp(-\sigma_{\phi_i}^2) \sigma_{\phi_i}^{2n}}{n!} \cdot \frac{\pi \omega_i^2}{n} \exp\left(-\frac{\pi^2 r^2 \omega_i^2}{n \lambda^2 L^2}\right), \quad (18)$$

相应的散射损失比 RSL 表示为:

$$RSL_i = [1 - \exp(-\sigma_{\phi_i}^2)] \cdot \sum_{n=1}^N (A_{n_i} \cdot B_{n_i}) / \sum_{n=1}^N A_{n_i}, \quad (19)$$

其中, $A_{n_i} = \frac{\exp(-\sigma_{\phi_i}^2) \sigma_{\phi_i}^{2n}}{n \cdot n!}$, $B_{n_i} = \exp\left(-\frac{\pi^2 R^2 \omega_i^2}{n \lambda^2 L^2}\right)$, ω_i 为光学镜面各频段误差自相关函数宽度。

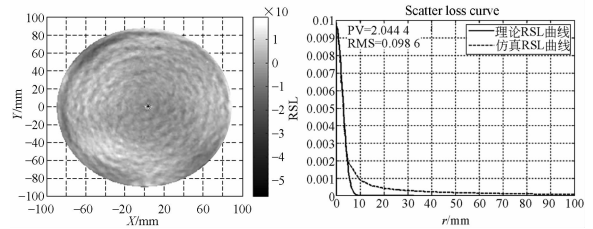
综合上述分析可知,全频段误差对应的 OTF 是各频段误差对应的 OTF 的乘积,不过,经分析,全频段误差对应的 RSL 与各频段误差对应的 RSL 之间却不存在相乘关系,也不存在相加关系,ASF 亦如此。因此下面通过加工实例分析光学镜面各频段误差对 RSL 的影响。

4 仿真分析

针对不同类型的光学系统,各频段划分是不同的,比如 NIF 和光刻系统划分标准就不一样,

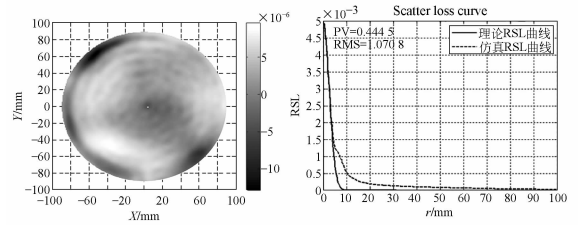
因此可以根据光学镜面大小、去除函数宽度等从加工方面进行频段划分,从而可以有效地用来指导加工。

通过分析大量的 $\phi 100$ mm 和 $\phi 200$ mm 口径的光学镜面修形情况,最终将低频段误差定义为波长 > 15 mm 的误差段,高频段误差定义为波长 < 3 mm 的误差段,中频段误差则介于两者之间。



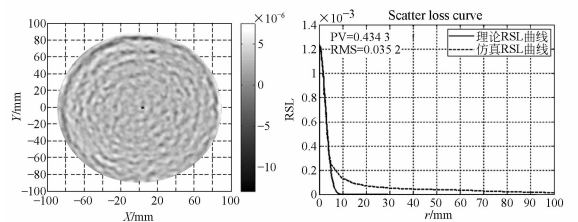
全频段误差

Full frequency error



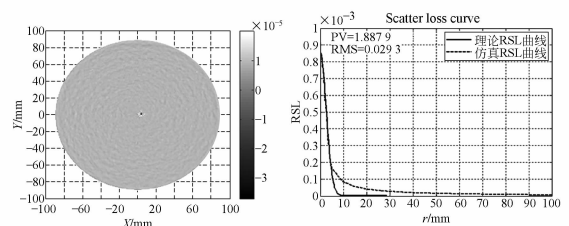
低频误差

Low-frequency error



中频误差

Mid-frequency error



高频误差

High-frequency error

图 3 光学镜面各频段误差对 ASF 和 RSL 的影响
Fig. 3 Influence of various frequency errors of optical mirror on ASF and RSL

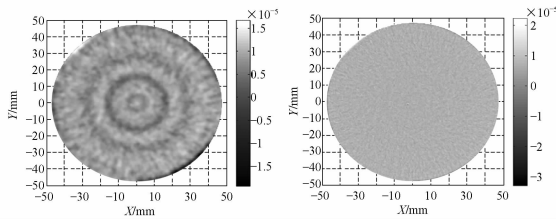
下面通过实例分析光学镜面各频段误差对散射损失比 RSL 的影响,相应的分析结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,光学镜面各频段误差对应的理论与仿真 RSL 曲线在较小范围内几乎重合,并且绝大部分能量均聚焦此较小范围,说明光强分布中心的能量分布几乎相同。

由于离子束 (IBF)、磁流变 (MRF) 等确定性加工比较容易满足面形误差 RMS 值要求,因此,下面分析 IBF、MRF 抛光前后光学镜面中高频误差对 RSL 的影响,相应的分析结果如图 4 所示。

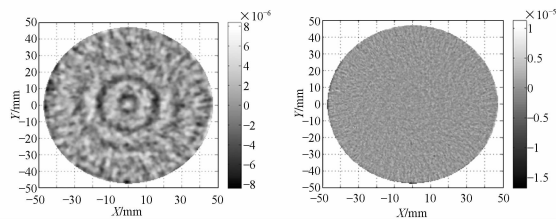
其中第一次加工误差表示经离子束抛光后的面形误差,第二次加工误差表示在离子束加工误差基础上经磁流变抛光后的面形误差。

相应的微晶玻璃加工误差特征如表 1 所示。



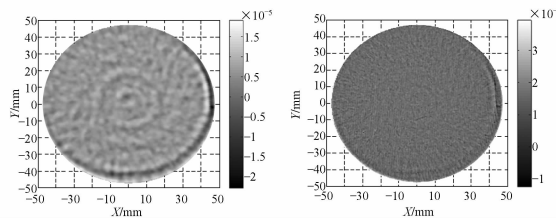
初始误差

Origin error



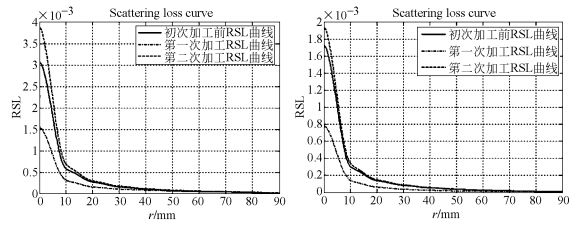
第一次加工误差

The first fabrication error



第二次加工误差

The second fabrication error



(a) 中频误差

(b) 高频误差

(a) Mid-frequency errors (b) High-frequency errors

图 4 各频段误差对 RSL 的影响

Fig. 4 Influence of various frequency errors on RSL

表 1 微晶玻璃经 IBF、MRF 加工前后的误差特征
Tab. 1 Error characteristics of microcrystal before and after polishing by IBF and MRF

顺序 误差	加工前误差 (单位:λ)	第一次加工 (单位:λ)	第二次加工 (单位:λ)
中频误差	RMS=0.004 4	RMS=0.003 1	RMS=0.005 0
高频误差	RMS=0.003 3	RMS=0.002 2	RMS=0.003 5

从图 4 和表 1 可以看出,经 IBF 加工后中高频误差 RMS 精度均有一定的提高,相应的 RSL 曲线有所下降,说明 IBF 对中高频误差具有一定的修形效果,但不能完全去除,而经 MRF 加工后中高频误差 RMS 精度在 IBF 加工误差基础上有所变差,使得相应的 RSL 曲线有所增大,不过,从 MRF 加工结果来看,边缘误差很大,这是由加工过程中对边缘误差处理不够好而导致的。

根据式 (19) 可知,为了使光学加工误差对散射损失比的影响小于某一特定值,相应的 RMS 值大小如表 2 所示。

表 2 面形误差 RMS 对应的 RSL 误差表

Tab. 2 Surface errors RMS corresponding RSL errors

RSL	1% ₀	2% ₀	1% ₀	3% ₀	5% ₀
特征					
RMS	λ/200	λ/140	λ/63	λ/36	λ/28

从表 2 可以看出,为了使散射损失比 $RSL \leq 1\%$,应控制相应的加工误差 $RMS \leq \lambda/63$,要满足 $RSL \leq 1\%$ 时,则应控制相应的加工误差 $RMS \leq \lambda/200$ 。因此,根据 RSL 设计要求以及加工误差分布特点,计算各频段误差相应的 RMS 值,从而可以根据得到的各频段误差 RMS 值要求,为光学镜面提供加工要求。

5 结 论

通过利用全频段加工误差对散射损失比 RSL 的影响来分析光学镜面中高频误差对 RSL 的影响时发现,相应的各频段误差对 OTF 的影响具有乘积效应。通过理论分析和仿真计算可知,在一定计算范围内,相应的 RSL 曲线几乎重合,说明光强分布中心的能量分布基本相同。即

参考文献:

- [1] 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 XRD beamline toroidal focusing mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(1):26-30. (in Chinese)
- [2] 吴吟平. 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] 魏山城,韩雪云. 激光在大气中传输时吸收损耗的计算[J]. 应用激光, 2007, 27(3):231-233.
WEI SH CH, HAN X Y. The calculation of laser transmitting absorption loss in atmosphere[J]. *Applied Laser*, 2007,27(3):231-233. (in Chinese)

作者简介:



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

在近似条件下以及聚焦范围内,光学加工误差 RMS 与 RSL 之间的关系模型是正确的,能广泛应用于各类大型望远系统以及强激光系统主镜的散射分析中。根据 OTF 表达式得到相应的各频段误差对应的 RSL 表达式,进而根据设计要求得到面形误差 RMS 值。在中频误差和高频误差 RMS 值分别 $< \lambda/63$ 时,对 RSL 的影响均 $< 1\%$,从而为光学镜面误差修正提供技术支持。

- [4] GREENWOOD D P. Performance projections for laser beam power to space[J]. *SPIE*,1992,1628: 301-313.
- [5] 毛天鹏,周东方,牛忠霞,等. 微波大气吸收衰减特性分析及分层数值算法[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(10):1321-1324.
MAO T P,ZHOU D F,NIU ZH X, *et al.*. Absorption and attenuation characteristic of microwave in atmosphere and delaminating algorithm[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004,16(10): 1321-1324. (in Chinese)
- [6] JAMES E H, ANITA K. Scattering effects from residual optical fabrication errors [J]. *SPIE*,1995, 2576:155-174.
- [7] RICHARD B. The influence of random wavefront errors on the imaging characteristics of an optical system[J]. *Optica Acta*,1971,18(9):683-694.
- [8] GOODMAN J W. *Statistical Optics* [M]. New York:A Wiley- Interscience Publication, 1985.

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

王贵林(1974—),男,湖北荆州人,博士,副教授,分别于 1996 年、1998 年和 2002 年于国防科技大学获得学士、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