

文章编号 1004-924X(2015)03-0617-09

## 坐标缩放激光角谱传输及在激光光学系统中的应用

王挺峰<sup>1</sup>, 刘立生<sup>1,2\*</sup>, 郭 劲<sup>1</sup>, 陈长青<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所  
激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**提出了坐标可缩放的激光传输角谱算法,用于评估激光光学系统性能并分析其系统公差。考虑 Collins 公式可用于计算激光光束在光学系统中的衍射传输过程,对该积分公式进行了坐标代换,将衍射积分公式转换为角谱传输过程,并引入坐标缩放因子,实现了目标面尺寸的自由选择,提高了激光传输计算的准确性。设计了一套激光传输系统,定义占有 86.5%桶中功率的光斑尺寸为光斑半径,用提出的算法对激光光束传输公差进行了分析。分析表明:作用距离为 90 m 时,焦面激光光斑的半径为 0.8~1.4 mm,期望值为 0.92 mm,实验测量值为 1.01 mm;作用距离为 49 m 时,焦面激光光斑的半径为 0.42~0.73 mm,期望值为 0.48 mm,实验测量值为 0.46 mm,实验结果与公差分析相符。另外,通过公差分析验证了激光光束在光学系统中的焦移现象。由角谱法对激光传输系统的理论分析与实验结果相符,证明了该方法用于激光聚焦光学系统设计的可行性。

**关键词:**激光光学系统;角谱传输;激光传输;Collins 公式;公差分析

**中图分类号:**O436.1;TN243 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152303.0617

## Angular-spectrum method with scaling factor and its applications to design of laser focus optical system

WANG Ting-feng<sup>1</sup>, LIU Li-sheng<sup>1,2\*</sup>, GUO Jin<sup>1</sup>, CHEN Chang-qing<sup>1</sup>

(1. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

*2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: liuls@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** An angular-spectrum method with a scaling factor between the observation and the source plane was proposed for the laser propagation in an optical system to evaluate its performance and to analyze its tolerance. As the laser diffraction propagation in the optical system could be calculated by the Collins integral formula, the formula coordinate was transformed and an angular spectrum method was derived by coordinate substitution. Then, a scaling factor was introduced to make the choice of the observation-plane more flexibility and the calculation of the laser propagation more accurate. A laser optical system was designed, and its tolerance was analyzed by the angular-spectrum method. The evaluating criterion was the laser spot radius in the far field, which was defined by 86.5% Power

收稿日期:2013-11-11;修订日期:2013-12-10.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室科研基金资助项目

in Bucket (PIB). Experiments show that when the radius of the laser spot is 0.8—1.4 mm in a distance of 90 m, the expected value calculated by the tolerance analysis is 0.92 mm and the measured result is 1.01 mm. Moreover, when that is 0.42—0.73 mm in the distance of 47 m, the expected value and the measured result are 0.48 mm and 0.46 mm, respectively. Both the experiment results match the data of the tolerance analysis well. The focal shift for laser propagation in the optical system was validated by the tolerance analysis. The theoretical analysis by the proposed method is verified experimentally, which confirms the feasibility proposed method in design of laser focus optical systems.

**Key words:** laser optical system; angular-spectrum propagation; laser propagation; Collins formula; tolerance analysis

## 1 引言

光束在自由空间的传输问题可由菲涅尔或夫琅和费近似得到的衍射积分公式来解决<sup>[1]</sup>,基于广义惠更斯-菲涅尔衍射积分公式的 Collins 公式运用程函概念将光束衍射效应与光学系统矩阵联系起来,作为研究激光传输的有力工具<sup>[2-4]</sup>。通过在 Collins 公式中引入光学系统像差并直接参与积分,可得激光光束在含像差光学系统中的传输特性,并借此研究激光光束通过含球差系统的聚焦特性<sup>[5-6]</sup>,分析激光光束在光学系统中的焦移现象<sup>[7-8]</sup>,获取系统 RMS 波像差与光束质量的关系<sup>[9-10]</sup>。在数值计算时,通过对 Collins 积分公式进行坐标代换将它转变为傅里叶变换形式或角谱卷积形式,以实现快速计算<sup>[11]</sup>。Schmidt 通过两种方式实现了空间坐标缩放<sup>[12]</sup>:一是两次传输变化法,二是在自由空间传输菲涅尔衍射积分公式中引入坐标缩放因子,这两种方式均是通过角谱传输实现的。在数值运算过程中,采样问题造成的计算失真及其解决方式均见有讨论<sup>[13-14]</sup>。本文借鉴自由空间传输缩放因子,在含光学系统传输的 Collins 公式中引入了坐标缩放因子。

式中:  $A, B, D$  分别为光学系统的 **ABCD** 矩阵元素,  $U(\mathbf{r}_1)$  为入射到光学系统中的激光复振幅分布。该公式很好地描述了激光在对称光学系统中的传输。

Collins 公式通过一定的坐标变换可以转变为卷积形式,再通过角谱对该积分公式进行运

$$U(\mathbf{r}_2) = e^{ikz} \frac{\exp\left[i\pi\beta\left(\frac{\mathbf{r}_2}{A}\right)^2\right]}{i\lambda B} \int_{-\infty}^{+\infty} U(\mathbf{r}_1) \exp\left[i\pi\alpha\left|\frac{\mathbf{r}_2}{A} - \mathbf{r}_1\right|^2\right] d\mathbf{r}_1. \quad (3)$$

激光光学系统设计中,利用几何光学并结合激光光学理论的设计方案已经得到了广泛的应用。其过程多为:应用光学系统的 Zernike 波像差输出获取激光传输后的光束特性,再通过  $M^2$ , Strehl 比或桶中功率评价激光光束质量<sup>[4,15]</sup>。在分析光学系统的公差时,根据不同的系统需求,通常选取 RMS 波像差,MTF 曲线以及光斑半径等作为评价指标<sup>[16]</sup>。这些评价指标在几何光学中有良好的应用,但在激光光学系统中却难以直接评估激光传输的公差要求。因此,本文在 Collins 积分公式的基础上,采用角谱计算方式,通过坐标变换来实现目标靶面尺寸及采样率选取的自由性;并以桶中功率占有 86.5% 的光斑半径作为评价标准,对激光光学系统进行了公差分析。

## 2 可变坐标激光角谱传输

Collins 公式是积分核中含有光线矩阵元的广义惠更斯-菲涅尔衍射积分公式,能够将光束的衍射效应与光线矩阵联系起来,适用于衍射面和观察面之间存在复杂光学系统的光束传输情况。Collins 公式如下<sup>[12]</sup>:

$$U(\mathbf{r}_2) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda B} \int_{-\infty}^{+\infty} U(\mathbf{r}_1) \exp\left[i\frac{k}{2B}(A\mathbf{r}_1^2 - 2\mathbf{r}_1\mathbf{r}_2 + D\mathbf{r}_2^2)\right] d\mathbf{r}_1, \quad (1)$$

算,令:

$$\alpha = \frac{A}{\lambda B}, \beta = \frac{AC}{\lambda}. \quad (2)$$

由于光学系统的 **ABCD** 矩阵元素满足  $\mathbf{AD} - \mathbf{BC} = 1$ ,将这个关系式和式(2)带入式(1)中,得到:

由式(3)可见,Collins 积分公式可以通过满足卷积运算关系来实现,将目标面坐标转换为  $Ar_2$ ,并写成卷积形式:

$$U(Ar_2) = e^{ikz} \frac{\exp(i\pi\beta r_2^2)}{i\lambda B} [U(r_1) \otimes \exp(i\pi\alpha r_1^2)]. \quad (4)$$

由卷积定理,式(4)可以通过傅里叶变换和逆傅里叶变换来实现,并在数值模拟中提高运算效

$$\left| \frac{r_2}{A} - r_1 \right|^2 = \frac{m}{A} \left( r_1 - \frac{r_2}{m} \right)^2 + \left( 1 - \frac{m}{A} \right) r_1^2 + \left( \frac{1}{A^2} - \frac{1}{mA} \right) r_2^2. \quad (5)$$

将坐标变换公式(2)带入式(5),并进行运算得:

$$U(r_2) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda B} Q_1(r_2) Q_2(r_2) \int_{-\infty}^{+\infty} U'(r_1) \left[ h \left( \frac{r_2}{m} - r \right) \right] dr_1 = \frac{e^{ikz}}{i\lambda B} Q_1(r_2) Q_2(r_2) U''(r_2), \quad (6)$$

式(6)中:

$$\begin{aligned} U'(r_1) &= U(r_1) \exp[i\pi\alpha(1 - m/A)r_1^2], \\ h \left( \frac{r_2}{m} - r_1 \right) &= \exp[i\pi\alpha m/A |r_2/m - r_1|^2], \\ Q_1(r_2) &= \exp[i\pi\beta(r_2/A)^2], \\ Q_2(r_2) &= \exp[i\pi\alpha(1/A^2 - 1/mA)r_2^2], \\ U''(r_2) &= \int_{-\infty}^{+\infty} U'(r_1) h(r_2/m - r) dr_1. \end{aligned}$$

$$U''(r_2) = \text{IFFT} \left[ f, \frac{r_2}{m} \right] \frac{iA}{am} \exp \left[ -\frac{iA}{am} f^2 \right] \text{FFT} [r_1, f] U'(r_1), \quad (8)$$

式中:FFT 表示数值运算的快速傅里叶变换,IFFT 为逆傅里叶变换,将公式(8)带入公式(6)就可得目标位置的光强分布。本文通过上述运算实现了衍射积分公式的角谱运算,利用编程完成了快速数值计算。

然后进行了坐标验证。通过傅里叶变换得频域上坐标  $\delta_1$  为:

$$\delta_1 = 1/N\delta_1 \text{ from FFT} [r_1, f].$$

再经逆傅里叶变换后,得到目标面的坐标间隔为:

$$\delta_2 = m/N\delta_1 = m\delta_1 \text{ from IFFT} [f, r_2/m].$$

$$U(r_2) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda B} \int_{-\infty}^{+\infty} U(r_1) \exp[i2\pi W(r_1)] \exp \left[ i \frac{k}{2B} (Ar_1^2 - 2r_1 r_2 + Dr_2^2) \right] dr_1, \quad (9)$$

式中,将激光复振幅变换为  $U(r_1) \exp[i2\pi W(r_1)]$ ,即可应用坐标缩放角谱算法计算含像差光束的传输。在讨论激光通过光学系统的传输时,把激光束腰置于光学系统的入瞳处,如此公式中  $U(r_1)$  不含复数项,其相位为 0,曲率半径无穷大。为了方便,下述所有分析均建立在这个简化模型上。

给出一套光学系统,该光学系统在一定距离传输时 ABCD 矩阵参数为:

率。但是该算法不能控制目标面上的采样间隔  $\delta_2$ ,  $\delta_2 = A\delta_1$ ,即  $\delta_2$  为激光源平面采样间隔的 A 倍。而在一些情况下会造成运算失真,如当激光会聚为一个小点时,计算所得目标面会很大,从而使得目标的采样间隔不够,无法清晰反应目标上的光强信息。为此引入一个坐标缩放因子  $m$ ,对源平面和目标平面的尺寸进行缩放,如下所示:

缩放后的坐标为:

$$r'_2 = r_2/m.$$

得到:

$$\begin{aligned} U''(mr'_2) &= \int_{-\infty}^{+\infty} U'(r_1) h(r'_2 - r) dr_1 = \\ &U'(r_1) \otimes h(r_1). \end{aligned} \quad (7)$$

将目标坐标转变为缩放前,由卷积定理写成:

由推导可知,光束传播目标面上的采样间隔为光源上的  $m$  倍。 $m$  的任意性实现了对目标面尺寸的任意选择,因此使光束传播运算具有很好的灵活性。

由于 Collins 公式描述的是激光在理想光学系统中的传输,其中 ABCD 矩阵对应理想近轴的光学系统。为了描述激光在实际含像差光学系统中的传输,需要添加像差项。光学系统像差可以等效在光学系统入瞳或出瞳的位置,直接将光学系统的波像差  $W(r_1)$  加入 Collins 公式,得:

$$\text{ABCD} = \begin{bmatrix} -0.0348 & 9.9667 \\ -0.1007 & 0.0954 \end{bmatrix}.$$

计算该光学系统含有一定像差时激光光束传输到目标上的光斑分布。如图 1 所示,图中为该光学系统只含彗差时,不同  $m$  情况下获取的焦面光斑分布,该彗差的 RMS 值为  $0.17\lambda$ 。从焦面光斑的分布情况可见,光学系统很明显含有彗差。从下面两幅图可见,像面坐标选取过大,有效信息变少;而像面坐标选取过小,获取的有效信息不准

确。为此,需要合理选取缩放因子,以保证信息的准确性。图 2 为该光学系统只含有像散时焦面光斑的分布情况,像散 RMS 值同样为  $0.17\lambda$ 。由对比可见,通过自由地选择目标位置坐标,该算法的计算目标表面正好包含光斑。

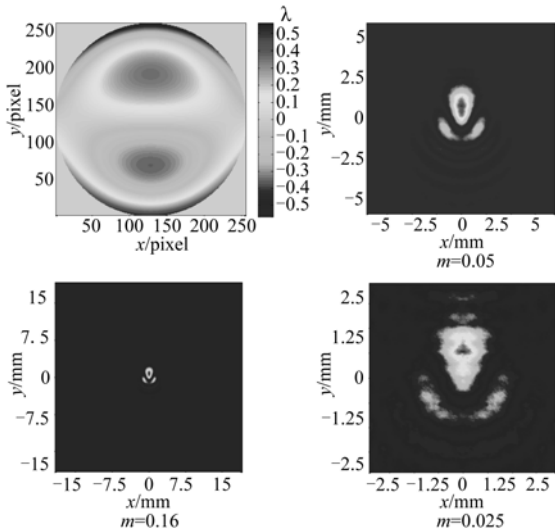


图 1 彗差波像差分布形式及不同缩放因子下激光通过含该像差光学系统后目标的光斑分布

Fig. 1 Coma wavefront errors and accordance laser spot distribution with different scaling factors

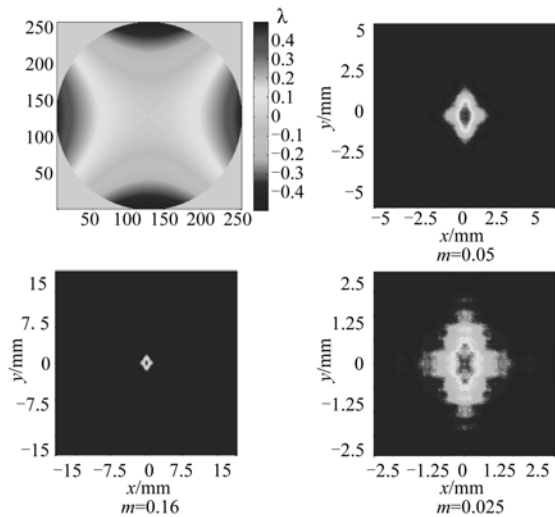


图 2 像散波像差分布形式及不同缩放因子下激光通过含该像差光学系统后目标的光斑分布

Fig. 2 Astigmatism wavefront errors and accordance laser spot distribution with different scaling factors

### 3 算法实现

#### 3.1 激光传输系统公差分析

光学系统设计软件 Zemax 可实现平面光波的

优化,但在激光光学系统设计中,Zemax 难以直接优化分析高斯光束,因此无法预知激光在一定像差下传输时所得的光强分布情况。而通过变换 Collins 公式形成的坐标缩放算法,可以评估通过含像差光学系统的激光。该计算中既包含了光学系统对激光的几何作用,也包含了孔径对激光的衍射效应。应用 Zemax 获取光学系统的像差,通过公式(9)分析在此像差下激光传输后的光斑分布情况;再应用 Zemax 分析存在系统公差时输出的波像差,可实现激光在光学系统传输时的公差分析。

图 3 为设计的一套长焦激光传输系统,该系统的发射口径为 100 mm,可将激光扩束并聚焦在 30~100 m 的位置,聚焦位置变化通过调节前后镜组的间隔实现。

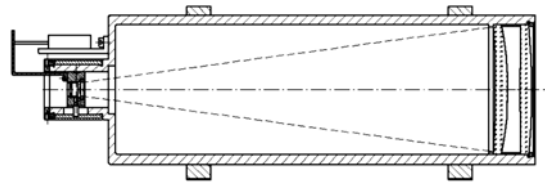


图 3 激光远场传输聚焦系统装配图

Fig. 3 Assemble framework of laser optical system with far field

系统公差分析是光学设计非常重要的一步。对系统引入一定量的公差后,在该公差下系统的 optical 质量可通过多种方式评估,例如波像差,调制传递函数(MTF)或光斑半径,但该长焦激光系统关心的是激光通过该系统后获得的焦面激光光斑尺寸及能量分布,即要求光斑尽量小。为了实现该功能,首先通过 Zemax 中 Monte Carlo 算法获取了 500 组含随机生成公差的光学镜头,然后得到这些镜头的波像差分布 W,将波像差的具体分布形式带入公式(9),计算激光通过这些像差光学系统后的焦面光斑分布,从而实现了激光通过含公差光学系统的评估。通过占有 86.5% 的桶中功率算出焦面光斑半径。为了方便描述,在此只分析作用距离为 90 m 时的激光光斑。

该光学系统的具体公差分配量如表 1 所示。光学系统分配公差后,以前后组间距作为像差补偿量,按照 Monte Carlo 计算获取 500 个随机生成的光学镜头,所得 RMS 波像差的统计结果如表 2 所示。

表2可见,在该公差分配下,系统RMS波像差小于 $0.095\lambda$ 的概率能达到90%,虽然不能完全到达衍射极限,但是这里关心的是激光通过这些光学系统后焦面光斑的尺寸分布。利用Zemax的宏命令,将这500组镜头的波像差分布写入到硬盘,逐个计算在这些像差下焦面光斑的分布情况及桶中功率,获取86.5%能量时的光斑半径。

表1 公差分配

Tab.1 Assignment of tolerances

公差类型	分配量
半径加工	2环
局部面型	0.2环
玻璃厚度及间距	$\pm 10\ \mu\text{m}$
同轴度	1'
偏心量	$\pm 10\ \mu\text{m}$
折射率	0.001

表2 公差统计结果

Tab.2 Results of tolerance analysis

概率/%	RMS波像差/ $\lambda$
90<	0.095
80<	0.079
50<	0.044
20<	0.020
10<	0.009

图4为未引入公差时,该系统波像差分布计算得到的光斑分布及桶中功率曲线,RMS波像差为 $0.003\lambda$ ,焦面光斑半径为 $0.52\ \text{mm}$ 。由于系统波像差很小,对激光焦面光斑的影响也很小。图5为公差分配造成RMS波像差为 $0.094\lambda$ 时,焦面光斑分布及其环围能力比曲线,此时光斑半径为 $1.05\ \text{mm}$ ,可见像差较大时,焦面光斑变大并弥散。

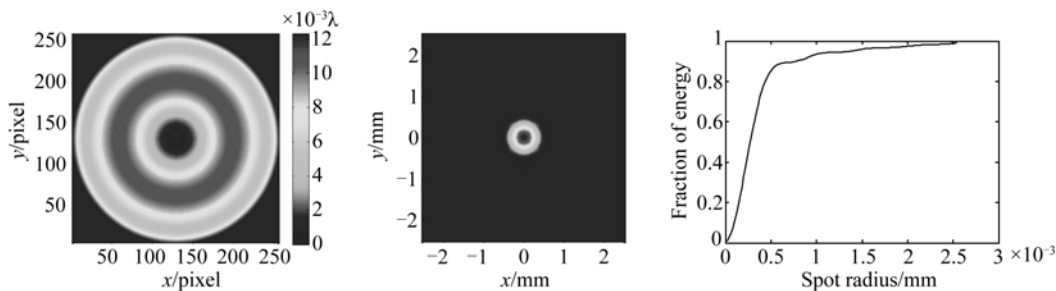


图4 未引入公差时系统波像差分布,焦面光斑分布及 PIB 曲线

Fig.4 Wavefront without tolerance, accordance laser spot distribution and PIB curve

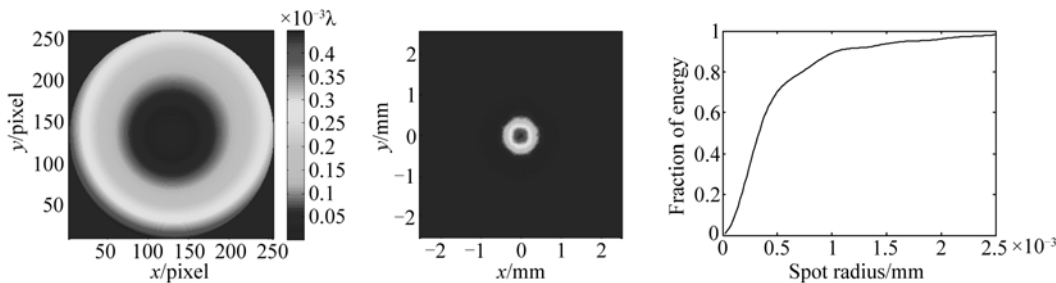


图5 引入一定公差时系统波像差分布,焦面光斑分布及 PIB 曲线

Fig.5 Wavefront with tolerance, accordance laser spot distribution and PIB curve

对随机生成的500组光学系统进行计算统计,获取光斑半径与RMS波像差值的关系曲线,如图6所示。图中点图为500组光斑半径的分布

情况,曲线为对该点图与RMS波像差值的拟合结果。从图中可见,波像差越大,焦面光斑半径越大,光斑半径与RMS波像差基本呈二次曲线关

系。由计算可知在该公差分配下,焦面光斑的半径位于 0.8~1.4 mm,其中绝大多数在 0.8~1.2 mm,其概率密度分布如图 7 所示。计算得到光斑半径的期望值约为 0.92 mm。由于光学加工及装配时公差不可避免,期望值说明了该光学系统在加工完成后能够获取的光斑半径的估计值。

应用 Zemax 做公差分析时,随机生成的光学系统按照高斯分布分配误差,理论上生成的系统波像差满足高斯分布,激光经过系统传输得到的光斑半径也应该满足高斯分布。但是由于公差分析时采用了前后镜组间距作为补偿量,使加工装配公差中的曲率半径和厚度公差得到了补偿,形成的光斑半径分布向较小的方向偏移,这也体现在图 6 和图 7 所示的光斑分布中。

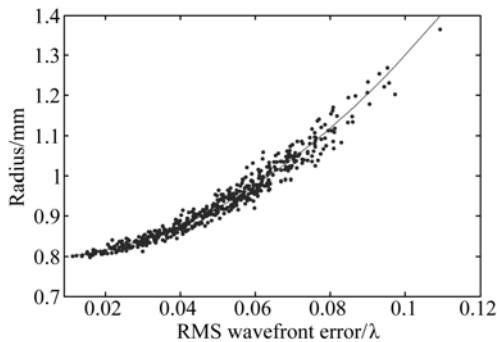


图 6 公差分析时 500 组镜头获取的焦面光斑半径与 RMS 波像差关系

Fig. 6 Relationship of radius with RMS wavefront error based on 500 optical systems in tolerance analysis

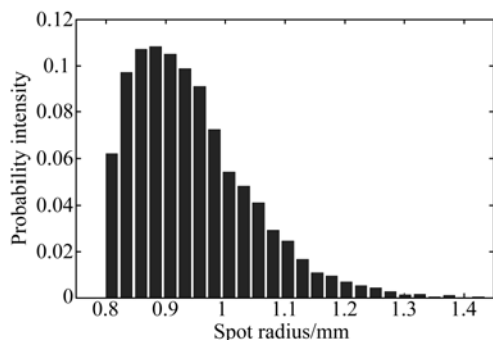


图 7 光斑半径统计分布

Fig. 7 Statistics of laser spot radii

### 3.2 补偿误差及焦移

在公差分析时,光学系统以前后镜组间距作

为补偿量,能够获取焦面光斑半径为 0.92 mm 的期望值。实际调节中,人为控制调节前后组间距,前后组调节量约为 5 mm,通过 1 000 Ω 电位移计标定调节量,可标定的调节精度为 5 μm。在此给出一 20~20 μm 的补偿误差量,分析在前后组间距补偿不到位时的光斑半径。

通过数据分析得到:补偿误差为负值时获取的焦面激光光斑半径小于正补偿误差,如图 8 所示。系统间距误差带来的是离焦像差,在 RMS 波像差值相同时,负离焦影响得到的光斑半径小于正离焦项。

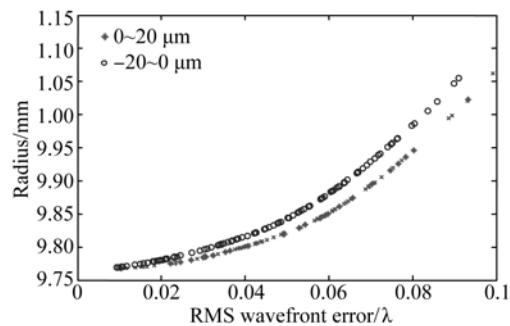


图 8 系统补偿误差带来的光斑半径变化

Fig. 8 Variation of laser spot radius with compensation error

在相同的 RMS 波像差下,不同的像差分布形式所得的光斑分布也是不同的。为了描述这个现象,给出两组 RMS 波像差均为 0.1λ,但分别为正负离焦时的波像差分布形式,如图 9 所示。Zernike 离焦系数分布为 0.089 1 与 -0.088 9,计算焦面光斑半径并获取桶中功率曲线。从曲线可见,正补偿误差时桶中功率要高于负补偿误差,这就是正负补偿误差时光斑有所区别的原因。

该现象只在激光光束传输时出现,平面波不存在该现象,其原因在于高斯光束在光学系统传输中产生的焦移现象。焦移是激光光束通过光学系统时,束腰位置不在光学系统焦点,而和系统焦点的距离,即为焦移量。通过激光光束复参数  $q$  在理想系统中的传输可计算得到激光光束的焦移量。实际应用时激光束腰一般在透镜位置,计算得到高斯光束通过透镜后的光斑半径满足关系式<sup>[4]</sup>:

$$\omega^2(z) = \left[ \left( 1 - \frac{z}{f} \right)^2 + \left( \frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right] \omega_0^2, \quad (10)$$

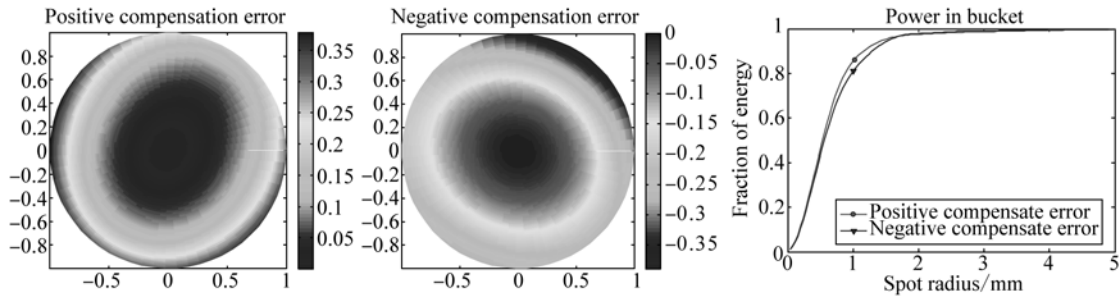


图 9 具有相同正负离焦项波像差分布及所得的光斑 PIB 曲线

Fig. 9 PIB curves with positive and negative compensation errors respectively

式中:  $z$  为透镜位置距离,  $f$  为透镜焦距,  $\tau_{\omega_0}$  为激光束腰半径。

为了求得经过透镜后光斑束腰的位置, 将式 (10) 对  $z$  求导数, 并令其结果等于零, 可得:

$$\frac{\partial \omega^2(z)}{\partial z} = 2 \times \left[ \left( 1 - \frac{z}{f} \right) \left( -\frac{1}{f} \right) + z \left( \frac{\lambda}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right] = 0.$$

求解上式可得:

$$z_0 = \frac{f}{1 + \left( \frac{\lambda f}{\pi \omega_0^2} \right)^2}.$$

对平面光传输来说, 光斑最小位置在焦距  $f$  处, 于是得到焦移量为:

$$dz = \frac{f}{1 + \left( \frac{\lambda f}{\pi \omega_0^2} \right)^2} - f,$$

上式中,  $\frac{\lambda f}{\pi \omega_0^2}$  相对 1 来说为无穷小量, 对它展开取 1 阶近似可得:

$$dz = -f^3 \left[ \frac{\lambda}{\pi \omega_0^2} \right]^2. \quad (11)$$

对该光学系统来说, 焦距约为 9 m, 激光波长为 532 nm, 激光束腰半径为 5 mm, 计算得到焦移量为 3.34 cm, 即对激光光束来说光斑半径最小位置出现在焦点前 3.34 cm, 对应前后镜组间距约为 7  $\mu$ m。当系统补偿误差为正值时, 正好使焦点位置变远, 对应前面的光斑变小, 补偿误差中的两条光斑半径曲线正好可由焦移解释。

#### 4 激光传输实验

图 10 为该光学系统加工后的激光光斑会聚实验系统。激光经过 10 倍扩束镜后直接进入光

学系统, 通过调节前后镜组间距使激光会聚在 90 m 位置附近, 通过电位移计获取调焦的相对量。

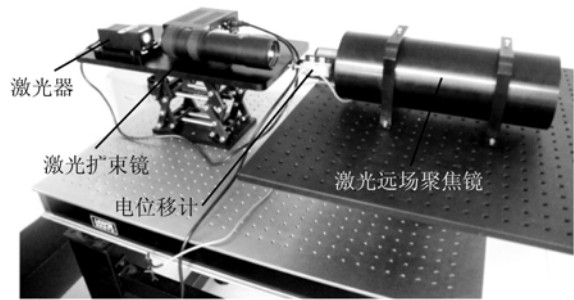


图 10 激光远场传输聚焦实验系统

Fig. 10 Experimental system for laser propagation

图 11 为激光会聚后光斑的测量结果。记录光斑的 CCD 像元尺寸为 7.4  $\mu$ m  $\times$  7.4  $\mu$ m, 对激光光斑分布做处理, 获取其归一化的强度。通过像元尺寸乘以光斑占有的像元数, 计算得到该光斑分布的桶中功率曲线, 在 86.5% 能量的光斑半径为 0.89 mm, 可见该光学系统加工之后获取的光斑半径与公差分析时的 0.92 mm 相近。

通过多组测量, 获得平均光斑半径为 1.01 mm, 符合公差分析的 0.8~1.4 mm, 证明光学系统加工时满足公差要求, 但是测量半径大于公差分析中的期望值。

90 m 激光会聚实验存在一些噪声干扰, 比如 CCD 本身像素坏点, 在图 11 中边缘突起可见; 光斑的抖动, 对多组数据平均得到光斑抖动量的均值为 575  $\mu$ m, 对应角度的抖动量为 1.3"。光斑抖动量源于激光器本身的光束稳定性和实验平台的稳定性, 由于该系统是角缩小系统, 激光器本身的

光束不稳将会被缩小,因此实验中光斑抖动主要源于实验平台的抖动。

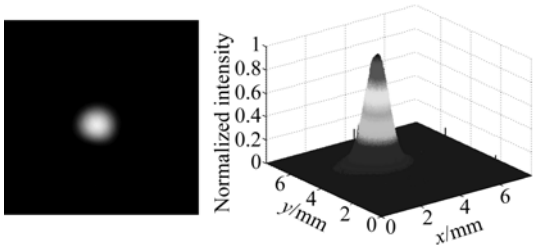


图 11 距离 90 m 时的焦面汇聚光斑实测结果  
Fig. 11 Measured laser spot distribution in 90 m

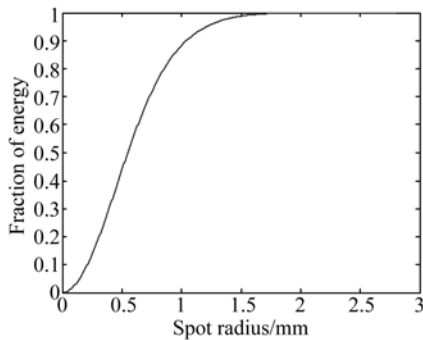


图 12 距离 90 mm 时的焦面汇聚光斑的 PIB 曲线  
Fig. 12 PIB curve of spot on focal plane in 90 mm

通过调节前后镜组间距,实现了距离为 47 m 时的激光聚焦,所记录的光斑分布情况如图 13 所示。分析光斑并获取其 PIB 曲线,如图 14 所示。在该作用距离下,通过多组测量得到光斑的平均半径为 0.46 mm。而公差分析结果显示,在该距离时光斑半径分布在 0.42~0.73 mm,期望值为 0.48 mm。由此已知获取的光斑半径小于期望值。

对比上述两组实际与理论分析可见,测量光斑与公差分析基本相符。影响测量值的因素在于前后组间距的调节误差和测量误差。实际上,多组实验测试结果均与公差分析相符,本文不再详细列举。

理论分析显示:同一个发射口径下,激光聚焦形成的光斑大小与作用距离基本成正比关系,距离越近,聚焦光斑越小,距离越远,聚焦光斑越大。两组实验也印证了这一理论。

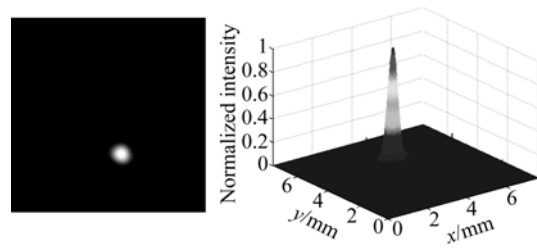


图 13 距离 47 m 时的焦面汇聚光斑实测结果  
Fig. 13 Measured laser spot distribution in 47 m

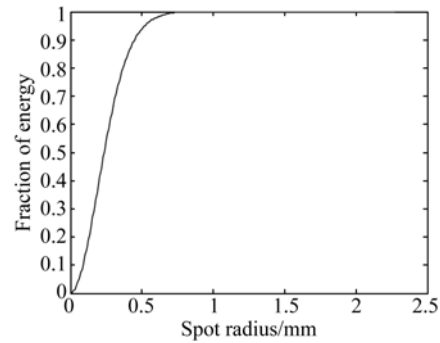


图 14 距离 47 mm 时的焦面汇聚光斑 PIB 曲线  
Fig. 14 PIB curve of spot on focal plane in 47 mm

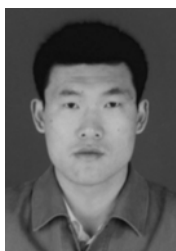
## 5 结 论

本文提出了坐标缩放的角谱激光传输算法,该算法通过快速傅里叶变换,加快运算速度并提高对目标面尺寸选取的灵活性。通过该算法分析了彗差和像散两种像差对激光传输光斑的影响,并将分析结果用于激光光学系统设计的指标评估及公差分析。在一定公差分配下,作用距离为 90 m 时,所设计光学系统的焦面激光光斑半径为 0.8~1.4 mm,实际加工光学系统得到的焦面光斑半径为 1.01 mm,实验得到的远场光斑抖动约为 1.3";作用距离为 47 m 时,焦面激光光斑半径为 0.42~0.73 mm,实测结果为 0.46 mm。两次结果与理论分析相符,证明了该算法分析激光聚集系统公差的可行性。此外文中验证了调焦误差中激光光束的焦移现象,并通过理想高斯光束复参数  $q$  传输给出了解释,实现了该算法在激光光学系统设计中的应用。

## 参考文献:

- [1] 郝道银,谈恒英. 工程光学 [M]. 北京:机械工业出版社,2011.  
YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics* [M]. Beijing: Machine Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [2] SIEGMAN A E. *Lasers* [M]. California: University Science Books, 1986.
- [3] YURA H T, HANSON S G. Optical beam wave propagation through complex optical systems [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, 4(10): 1931-1948.
- [4] 吕百达. 激光光学:激光束的传输变换和光束质量控制 [M]. 成都:四川大学出版社,1992.  
LÜ B D. *Laser Optics: Laser Beam Propagation and Beam Quality Control* [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992. (in Chinese)
- [5] 季小玲,陶向阳,吕百达. 光束控制系统热效应与球差对激光光束质量的影响 [J]. *物理学报*, 2004, 53(3): 952-960.  
JI X L, TAO X Y, LÜ B D. The influence of thermal effects in a beam control system and spherical aberration on the laser beam quality [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(3): 952-960. (in Chinese)
- [6] SINGH R K, SENTHILKUMARAN P, SINGH K. Effect of primary spherical aberration on high-numerical-aperture focusing of a Laguerre-Gaussian beam [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, 25(6): 1307-1318.
- [7] SHEPPARD C J R, TOROK P. Focal shift and the axial optical coordinate for high-aperture systems of finite Fresnel number [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, 20(11): 2156-2162.
- [8] 彭润伍. 光束聚焦特性研究:焦移,焦开关和相移 [D]. 四川:四川大学,2003.  
PENG R W. *Focusing Properties of Beams: Focal Shift, Focal Switch and Phase Shift* [D]. Sichuan: Sichuan University, 2003. (in Chinese)
- [9] 鲜浩,姜文汉. 波像差与光束质量指标的关系 [J]. *中国激光*, 1999, A26(5): 415-419.  
XIAN H, JIANG W H. The relation between wavefront aberration and the beam quality factor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1999, A26(5): 415-419. (in Chinese)
- [10] MAFUSIRE C, FORBES A. Generalized beam quality factor of aberrated truncated Gaussian laser beams [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2011, 28(7): 1372-1378.
- [11] VOELZ D. *Computational Fourier Optics* [M]. Washington: SPIE Press, 2011.
- [12] SCHMIDT J D. *Numerical Simulation of Optical Wave Propagation* [M]. Washington: SPIE Press, 2010.
- [13] XIAO Y, TANG X H, QIU Y X, et al.. Band-limited angular spectrum numerical propagation method with selective scaling of observation window size and sample number [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2012, 29(11): 2415-2420.
- [14] LIU J P. Controlling the aliasing by zero-padding in the digital calculation of the scalar diffraction [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2012, 29(9): 1956-1964.
- [15] 王卫兵,赵帅,郭劲,等. 基于 Zernike 模式的随机并行梯度下降算法的收敛速率 [J]. *中国光学*, 2012, 5(4): 407-415.  
WANG W B, ZHAO SH, GUO J, et al.. Convergence rate of stochastic parallel gradient descent algorithm based on Zernike mode [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 407-415. (in Chinese)
- [16] 明名,王建立,张景旭,等. 大口径望远镜光学系统的误差分配与分析 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1): 104-108.  
MING M, WANG J L, ZHANG J X, et al.. Error budget and analysis for optical system in large telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 104-108. (in Chinese)

## 作者简介:



王挺峰(1977—),男,山东文登人,研究员,硕士生导师,2005年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事激光应用与光电总体技术的研究。E-mail: wtfeng@sina.com

## 导师简介:



郭劲(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事光电设备、激光与物质相互作用,激光探测方面的研究工作。E-mail: guojin@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)