

文章编号: 0253-2239(2005)02-152-5

# 跟踪抖动对激光湍流大气传输光束扩展的影响<sup>\*</sup>

黄印博 王英俭

(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 合肥 230031)

**摘要:** 对发射系统的跟踪抖动对激光湍流大气传输光束扩展的影响进行了数值分析, 并且得到了跟踪抖动对光束扩展影响的定标关系。由此定标关系可知, 当系统衍射角  $\sigma_0$  较大时, 跟踪抖动对光束扩展的影响比较小; 但是当系统衍射角  $\sigma_0$  较小时, 特别是在湍流效应较弱的情况下, 抖动的影响非常显著, 此时光束扩展主要是由系统抖动项所决定的。通常在湍流效应较弱时, 系统跟踪抖动对光束扩展的影响相对较大, 随湍流效应的不断增强, 湍流扩展逐渐起主导作用, 而系统跟踪抖动对光束扩展的影响相对逐渐减小。因此, 由此定标关系可以定量了解不同条件下系统衍射、系统跟踪抖动以及湍流效应对光束扩展影响的大小, 并为系统优化设计提供定量的科学依据。

**关键词:** 大气光学; 跟踪抖动; 数值模拟; 光束扩展

中图分类号: TN012 文献标识码: A

## The Effect of Tracking Jitter on the Beam Spreading Induced by Atmospheric Turbulence

Huang Yinbo Wang Yingjian

(Center for Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

**Abstract:** By using numerical simulation, we analyzed the effect of the transmitting system's tracking jitter on the beam spreading induced by atmospheric turbulence. The scaling relations that describe the effect of tracking jitter on the beam spreading are obtained. When the angle radius of the diffraction spots the first dark ring is big, the effect is relatively small. But when the angle radius is small, especially for turbulent effects being weak, the effect on the beam spreading is very distinct, and the magnitude of the beam spreading is mainly dependent on the jitter item of the scaling relations. In general, when turbulent effects are weak, the effect of tracking jitter is relatively distinct. However, with turbulent effects being gradually strong, gradually the magnitude of the beam spreading is mainly dependent on the turbulence item of the scaling relations. Therefore, through these scaling relations, we can quantitatively learn the effect of diffraction of transmitting system, tracking jitter and turbulent effects on beam spreading under different conditions. Moreover, we can obtain the scientific basis for the practical engineering systems' optimization design.

**Key words:** atmospheric optics; tracking jitter; numerical simulation; beam spreading

## 1 引 言

激光大气传输湍流效应导致的光束扩展与激光通过湍流大气传输后的光强下降紧密关联, 是激光大气传输研究和实际工程应用中的重要问题<sup>[1~3]</sup>。数值模拟及实验结果均表明<sup>[4]</sup>, 在不考虑发射系统传输光束的抖动时, 激光湍流大气传输焦平面处 83.9% 环能量半径的扩展符合  $\beta^2 = \beta_0^2 + A(D/r_0)^2$  的定标关

系(发射孔径遮拦比  $\epsilon$  为 0.5 时, 拟合参量  $A \approx 0.9$ ),  $\beta, D, r_0$  分别为衍射极限倍数(定义为空心束 83.9% 环能量半径与理想情况实心光束的艾里斑半径之比)、发射孔径及大气相干长度。在实际发射系统中光束的抖动是不可避免的, 特别是在光学跟踪瞄准系统中, 由于跟踪残余误差带来的跟踪抖动将会使传输光束发生漂移及扩展, 并可能导致目标靶面的光强低

<sup>\*</sup> 国家 863 计划激光技术领域、中国科学院合肥研究院物质计算科学中心资助课题。

作者简介: 黄印博(1976~), 男, 河北唐山人, 博士研究生, 主要从事激光大气传输的物理及数值模拟分析工作。  
E-mail: ybhuang@aiofm.ac.cn.

收稿日期: 2004-04-02; 收到修改稿日期: 2004-06-11

于可探测阈值,甚至使光斑脱离靶面等,这些效应对众多激光工程应用产生严重的影响。

通常认为引起光束扩展的各种扰动源是相互独立的,因此当考虑发射系统跟踪抖动的影响时,可在原定标关系的基础上增加抖动引起的扩展项  $B(\sigma_i/\sigma_0)^2$ ,即  $\beta^2 = \beta_0^2 + A(D/r_0)^2 + B(\sigma_i/\sigma_0)^2$ 。另外,在对激光大气传输光束扩展的评价中,经常采用 83.9% 的环围能量半径。但在实际应用系统中,发射系统一般都是有遮拦的即发射光束为环状光束,而且遮拦比越大,艾里斑外的能量比重就越多。这样,83.9% 环围能量半径就更多地包含了较低强度分布区域,从而过低地估计了实际作用效果。1/e 是最常用的一个物理或工程参量的参考比例,63.2% 的环围能量即是占光斑总能量的  $(1.0 - 1/e) \times 100\%$ 。数值分析表明,采用 63.2% 的环围能量半径评价激光大气传输光束能量的集中度更为合理<sup>[3]</sup>。因此,文中将着重采用 63.2% 的环围能量半径就跟踪抖动对光束扩展的影响进行评价,同时给出 83.9% 环围能量半径光束扩展的定标关系,并进行对比分析。

## 2 数值模拟方法及计算参量

激光传输方程采用傍轴近似的标量波动方程,利用相屏法求解<sup>[5~7]</sup>,计算网格点数为 256,横向抽样网格间距  $\Delta x = 1.2 \text{ cm}$ ,传输步数即相屏数为 20。主要计算参量:发射光束为平台光束<sup>[4]</sup>,波长  $\lambda = 1 \text{ }\mu\text{m}$ ,遮拦比  $\epsilon = 0.5$ ,水平大气传输聚焦至 1.0 km 处。对实心平台光束真空传输而言,衍射光斑的第一暗环半径  $\sigma_0$  ( $1.22\lambda/D$ ,也称为发射系统的衍射角)为  $2.67 \text{ }\mu\text{rad}$ 。发射系统初始光束质量  $\beta_0$  (定义为空心束 63.2% 环围能量半径与理想情况实心束 63.2% 的环

围能量半径之比)分别为 2.3、5.3。在实际的光学跟踪瞄准系统中,自适应光学(Adaptive optics, AO)系统与捕获跟踪和瞄准(Acquisition tracking and pointing, ATP)系统在最佳匹配参量下,捕获跟踪瞄准系统的跟踪精度小于  $10 \text{ }\mu\text{rad}$ <sup>[8]</sup>,因此,如下分别选取系统单轴跟踪误差  $\sigma_i$  为 0、2.5  $\mu\text{rad}$ 、5.0  $\mu\text{rad}$ 、7.5  $\mu\text{rad}$  ( $i = x, y$ ,通常假定抖动是各向同性的,系统跟踪误差  $\sigma = \sqrt{2}\sigma_i$ ),并就不同系统跟踪抖动对激光湍流大气传输光束扩展的影响进行数值分析。

## 3 数值结果及分析

当考虑系统跟踪误差时,文中所有的数值结果均为 100 次传输的长曝光统计结果。如图 1 为两种初始光束质量、不同跟踪抖动条件下 63.2% 环围能量半径随湍流效应的变化。在不考虑系统抖动时,光束扩展符合  $\beta^2 = \beta_0^2 + A(D/r_0)^2$  的定标关系,而且拟合参量  $A$  为 1.0;在考虑系统抖动时,保持参量  $A$  的值不变,并着重考察拟合参量  $B$  的变化。如图 1 所示,不同系统跟踪抖动条件下,光束扩展均较好的符合  $\beta^2 = \beta_0^2 + (D/r_0)^2 + B(\sigma_i/\sigma_0)^2$  的关系,各抖动条件下相应的拟合参量  $B$  的值如表 1,其平均值为 7.1。实际上拟合参量  $B$  的差异对总的光束扩展量  $\beta$  的影响很小,因此 63.2% 环围能量半径的光束扩展完全可以采用  $\beta^2 = \beta_0^2 + (D/r_0)^2 + 7.1(\sigma_i/\sigma_0)^2$  的关系。

表 1 不同跟踪抖动、初始光束质量条件下拟合参量  $B$  的值 ( $\sigma_0 = 2.67 \text{ }\mu\text{rad}$ )

		Table 1 Value of the fitting parameter $B$ with different $\sigma_i$ and $\beta_0$ ( $\sigma_0 = 2.67 \text{ }\mu\text{rad}$ )			
		$2.5$	$5.0$	$7.5$	
$B$	$\beta_0 = 2.3$	7.67	7.02	6.71	$\bar{B} = 7.1$
	$\beta_0 = 5.3$	8.14	6.53	6.40	

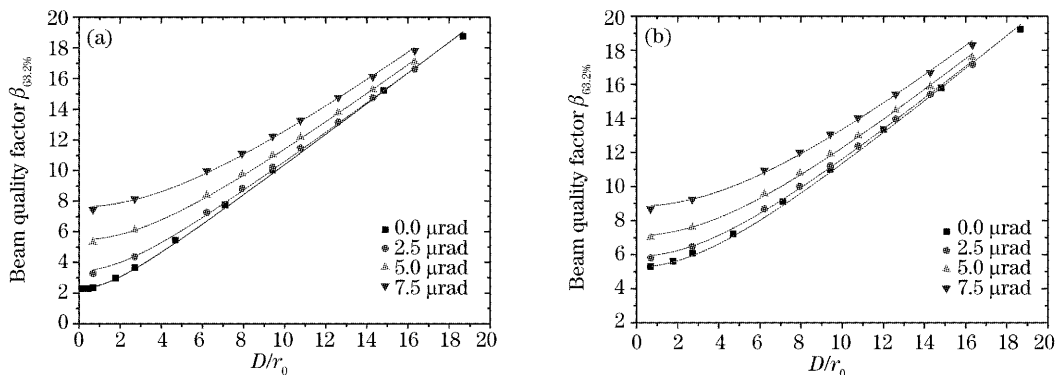


图 1 不同跟踪抖动条件下初始光束质量  $\beta_0 = 2.3$  (a),  $\beta_0 = 5.3$  (b) 时的光束扩展 ( $\sigma_0 = 2.67 \text{ }\mu\text{rad}$ )

Fig. 1 Beam spreading for  $\beta_0 = 2.3$  (a),  $\beta_0 = 5.3$  (b) with different tracking jitters ( $\sigma_0 = 2.67 \text{ }\mu\text{rad}$ )

图 2 是不同湍流效应下关系式

$$\beta^2 = \beta_0^2 + \left(\frac{D}{r_0}\right)^2 + 7.1\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0}\right)^2$$

右边三项的对比。在不同初始光束质量及跟踪抖动条件下,当  $D/r_0 < 2.0$  时,光束扩展主要是由初始光束质量项及系统抖动项所决定的,抖动越大光束扩展量越大,而湍流扩展项的影响相对较小;但随湍流效应的增强,其对光束扩展的影响逐渐增大,当  $2.0 < D/r_0 < 8.0$  时,湍流扩展项与初始光束质量项、系统抖动项对光束扩展的影响基本相当;当  $D/r_0 > 8.0$  时,湍流扩展项的影响更为显著,并且对光束扩展起主要作用。由图 1 也可看出,在  $D/r_0 < 2.0$  时,不同跟踪抖动条件下光束扩展的差别相对较大,而在  $D/r_0 > 8.0$  时,随湍流效应的增强,各抖动条件下光束扩展的差别逐渐减小。

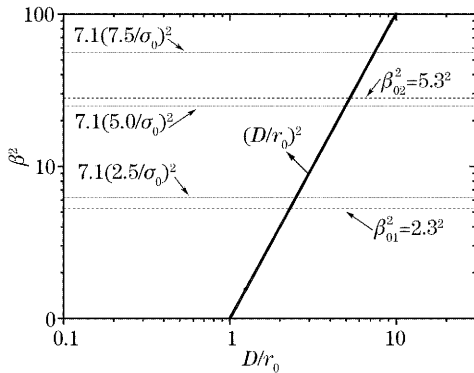


图 2 不同湍流效应下各光束扩展项的比较  
Fig. 2 Comparison of beam spreading items with different turbulence effects

另由图 3 可知,湍流效应较弱如  $D/r_0 < 2.0$  时,对  $\beta_0$  为 2.3 的发射光束而言,系统抖动对光束扩展的影响是比较大的,如单轴跟踪误差为  $\sigma_i = 7.5 \mu\text{rad}$  时,光束扩展约为没有抖动时的 3.4 倍;对  $\beta_0 = 5.3$  的发射光束而言,  $\sigma_i = 7.5 \mu\text{rad}$  时,光束扩展约为没有抖动

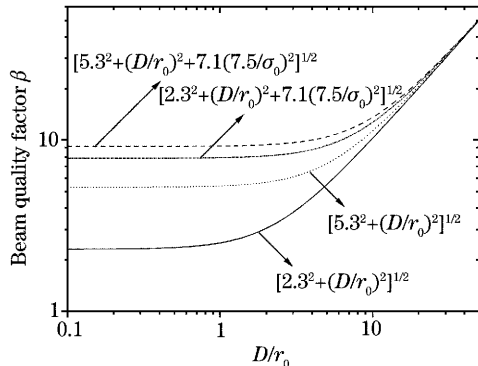


图 3 考虑与不考虑抖动时光束扩展的比较  
Fig. 3 Value of beam spreading with and without jitter

时的 1.8 倍,即在湍流效应较弱时,发射系统初始光束质量越好,系统抖动对光束扩展的影响越明显,但当湍流效应较强时,光束扩展主要是由湍流效应的强度所决定的,随湍流效应的进一步增强,不同初始像差、不同跟踪抖动条件下光束扩展的差别越来越小。

由于系统抖动扩展项  $B(\sigma_i/\sigma_0)^2$  是与发射波长、传输孔径等相关的,因此,如下选择较短的发射波长( $\sigma_0 = 1.29 \mu\text{rad}$ ,传输距离为 2.1 km,相屏数为 42,两种发射波长下光束菲涅耳数相同),即在系统衍射角减小,而其它计算条件不变的情况下,就系统跟踪抖动对激光湍流大气传输光束扩展的影响进行深入地分析(为考察系统抖动扩展项相对其它光束扩展项的变化,初始光束质量仍然分别为 2.3、5.3)。如图 4,在不考虑系统跟踪抖动时,63.2% 环围能量半径的光束扩展仍然符合  $\beta^2 = \beta_0^2 + (D/r_0)^2$  的定标关系,而系统跟踪抖动对光束扩展的影响则较好地符合  $\beta^2 = \beta_0^2 + (D/r_0)^2 + 6.4(\sigma_i/\sigma_0)^2$  的关系,各抖动条件下相应的拟合参量  $B$  的值如表 2,其平均值为 6.4。

表 2 不同跟踪抖动初始光束质量条件下拟合参量  $B$  的值( $\sigma_0 = 1.29 \mu\text{rad}$ )

Table 2 Value of the fitting parameter $B(\sigma_0 = 1.29 \mu\text{rad})$				
$\sigma_i/\mu\text{rad}$	2.5	5.0	7.5	
$\beta_0 = 2.3$	6.85	6.54	6.37	$\bar{B} = 6.4$
$\beta_0 = 5.3$	6.33	6.26	6.22	

如图 5,不同传输波长下的初始光束质量相同,但在系统衍射角  $\sigma_0$  减小时,系统跟踪抖动对光束扩展的影响更为显著。当  $D/r_0 > 5.0$  时,湍流扩展项与系统抖动项对光束扩展的影响相当;当  $D/r_0 > 15.0$  时,湍流扩展项的影响才对光束扩展起主要作用;由图 6 也可看出,随  $\sigma_0$  的减小系统抖动对光束扩展的影响更为明显。另外,当湍流效应较强,光束扩展主要由湍流扩展项所决定时,随湍流效应的进一步增强,不同跟踪抖动条件下光束扩展的差别相比图 3 是比较慢的减小的,这由图 4 与图 1 的对比也可看出。另由图 3、图 6 的对比可知,图 6 中当  $\sigma_i = 7.5 \mu\text{rad}$  时,两种初始光束质量下光束扩展的差别更小,这主要是因为湍流效应较弱时,系统抖动项相对初始光束质量项对光束扩展的影响更大,光束扩展主要是由系统抖动项决定的,而在湍流效应较强时,光束扩展主要是由湍流效应的强度所决定的,初始光束质量项相比另外两项对光束扩展的影响较小。

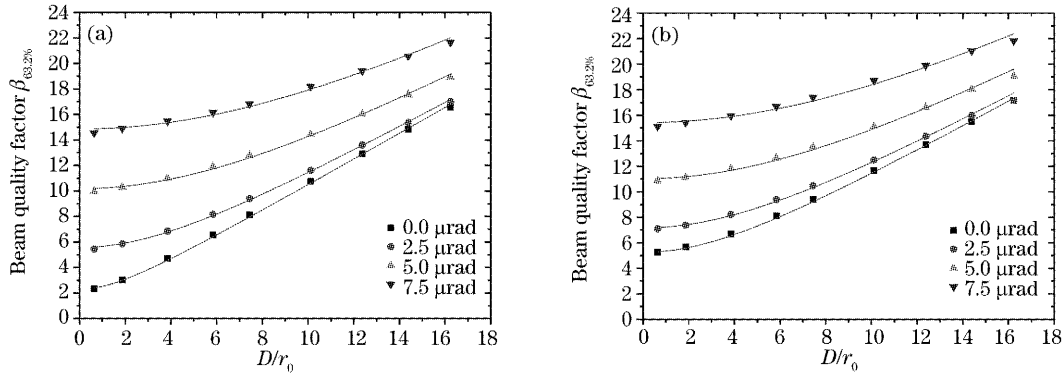


图 4 不同跟踪抖动条件下初始光束质量  $\beta_0 = 2.3$  (a),  $\beta_0 = 5.3$  (b) 时的光束扩展 ( $\sigma_0 = 1.29 \mu\text{rad}$ )

Fig. 4 Beam spreading for  $\beta_0 = 2.3$  (a),  $\beta_0 = 5.3$  (b) with different tracking jitters ( $\sigma_0 = 1.29 \mu\text{rad}$ )

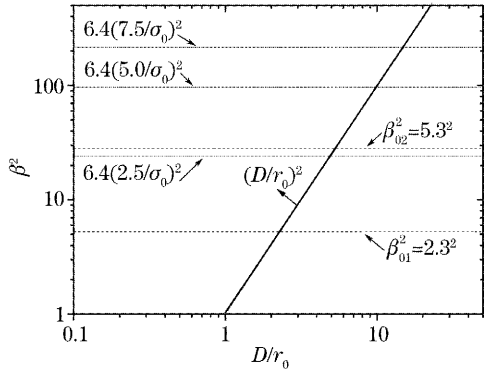
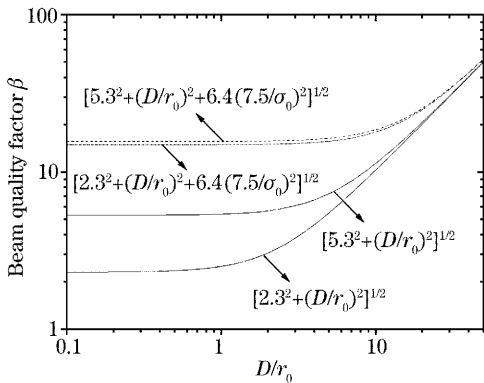


图 5 不同湍流效应下各光束扩展项的比较

Fig. 5 Comparison of beam spreading items with different turbulence effects



考虑与不考虑抖动时光束扩展的比较

Fig. 6 Value of beam spreading with and without jitter

另外,在表 1 及表 2 中拟合参量  $B$  的值是有所差异的,这主要是由数值计算误差及结果拟合误差带来的。在较强的湍流效应、较大的系统跟踪抖动条件下,光束扩展比较严重,为了避免焦平面上的光斑偏出有限的计算网格范围,因此需要选取较大的网格间距,文中是考虑到这种情况而确定的网格间距。但是,在较小的抖动条件下,光束扩展相对较小,焦平面上的光斑在整个网格范围内所占的比例

较小,这就会影响到数值计算的精度,而数值结果微小的差异都会对拟合参量  $B$  带来相对较大的差别,特别是在抖动较弱的情况。但是,拟合参量的这些差异对总的光束扩展量  $\beta$  的影响其实是很小的,因此,文中不同的系统衍射角下的光束扩展完全可以采用  $\beta^2 = \beta_0^2 + (D/r_0)^2 + 6.8(\sigma_i/\sigma_0)^2$  的定标关系。由此关系可知,当系统衍射角增大如  $\sigma_0 = 7.73 \mu\text{rad}$ ,而其它计算条件不变时,即使当  $\sigma_i$  达到  $7.5 \mu\text{rad}$ ,抖动扩展项也仅为  $2.57^2$ ,即系统跟踪抖动对光束扩展的影响很小。此时,光束扩展主要是由湍流扩展项所决定的,当湍流效应较弱如  $D/r_0 < 3.0$  时,不同抖动条件下的光束扩展才有所差别。

在对激光大气传输光束扩展的评价中,习惯上采用 83.9% 的环围能量半径。因此,如下也给出了系统跟踪抖动对 83.9% 环围能量半径光束扩展影响的结果。在不考虑系统抖动时,光束扩展较好的符合  $\beta^2 = \beta_0^2 + 0.9(D/r_0)^2$  的关系;在考虑系统抖动时,其符合  $\beta^2 = \beta_0^2 + 0.9(D/r_0)^2 + 5.2(\sigma_i/\sigma_0)^2$  的关系。上式中拟合参量  $A$ 、 $B$  分别为 0.9、5.2,与 63.2% 环围能量半径光束扩展的定标关系相比,拟合参量  $A$ 、 $B$  的值均偏小,这是因为环围能量的范围取得越大,其光束扩展受扰动因素的影响相对越不显著。

## 4 结 论

本文就发射系统的跟踪抖动对激光湍流大气传输光束扩展的影响进行了数值分析。结果表明,在不考虑系统抖动时,63.2% 环围能量半径的光束扩展符合  $\beta^2 = \beta_0^2 + (D/r_0)^2$  的定标关系;考虑系统抖动时,光束扩展符合  $\beta^2 = \beta_0^2 + (D/r_0)^2 + 6.8(\sigma_i/\sigma_0)^2$  的定标关系。系统跟踪抖动对光束扩展的影响,需要结合关系式中三项的对比进行分析。当系统衍射角  $\sigma_0$  较大

时,跟踪抖动对光束扩展的影响比较小;但是当系统衍射角  $\sigma_0$  较小时,特别是在湍流效应较弱的情况下,抖动的影响非常显著,此时光束扩展主要是由系统抖动项所决定的。通常,在湍流效应较弱时,系统跟踪抖动对光束扩展的影响相对较大,随湍流效应的不断增强,湍流扩展逐渐起主导作用,而系统跟踪抖动对光束扩展的影响相对逐渐减小。系统跟踪抖动对 83.9% 的环围能量半径光束扩展的影响则符合  $\beta^2 = \beta_0^2 + 0.9(D/r_0)^2 + 5.2(\sigma_i/\sigma_0)^2$  的关系。此外,文中还需要结合所能承受的计算条件对数值计算参量的选取,如适当的减小网格间距、增加相屏数、增大计算网格点数等进行深入地讨论,以进一步减小数值计算误差给拟合结果带来的影响,在此基础上进行更充分地数值计算(如考虑更强的湍流效应及更大范围的初始光束质量等),并结合大量的实验结果,通过统计分析以寻求更具有普适性的定标关系。

### 参 考 文 献

- 1 Tatarski V. I. *Wave Propagation in a Turbulent Medium* [M]. Wen Jingsong, Song Zhengfang, Zeng Zongyong *et al.*. Transl.. Beijing: Science Press, 1978 (in Chinese)  
塔塔尔斯基 著. 湍流大气中波的传播理论[M]. 温景嵩,宋正方,曾宗泳等译. 北京:科学出版社,1978
- 2 Strohbehn J W. *Laser Beam Propagation in the Atmosphere* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978
- 3 Wang Yingjian. *Some Study on the Laser Propagation in the Atmosphere and its Phase Compensation* [D]. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, 1996 (in Chinese)  
王英俭. 激光大气传输及其相位补偿的若干问题探讨[D]. 中国科学院安徽光学精密机械研究所,1996
- 4 Shi Xiaoyan, Wang Yingjian, Huang Yinbo. Numerical analysis on the uniform focused beam spreading induced by the atmosphere turbulence at different obscuring ratio [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(12): 1181~1183 (in Chinese)  
石小燕,王英俭,黄印博. 发射系统遮拦比对均强聚焦光束光斑扩展的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(12): 1181~1183
- 5 Wang Yingjian, Wu Yi. Numerical simulation of propagation of diffuse reflection light of extended object[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(8): 1470~1472 (in Chinese)  
王英俭,吴毅. 扩展物体漫反射光传输及成像的数值模拟研究[J]. *光学学报*, 1998, **18**(8): 1470~1472
- 6 Huang Yinbo, Wang Yingjian, Rao Ruizhong *et al.*. Numerical calculation of the scaling parameter for adaptive optics compensation for thermal blooming effects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12): 1461~1464 (in Chinese)  
黄印博,王英俭,饶瑞中 等. 热晕效应相位补偿定标参量的数值分析[J]. *光学学报*, 2002, **22**(12): 1461~1464
- 7 Yinbo Huang, Yingjian Wang, Zhiben Gong. Numerical analysis of the scaling parameter of adaptive compensation for thermal blooming effects[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4926**: 146~149
- 8 Jiang Wenhan, Wang Chunhong, Ling Ning *et al.*. 61 Element adaptive optical system[J]. *J. Quant. Electron.*, 1998, **15**(2): 193~199 (in Chinese)  
姜文汉,王春红,凌宁 等. 61 单元自适应光学系统[J]. *量子电子学报*, 1998, **15**(2): 193~199