内通道轴向风速对强激光相位特性的影响

胡小川,贺也洹,吴 双,张 彬

(四川大学 电子信息学院,四川 成都 610065)

摘 要:针对内通道传输过程中激光束相位特性的变化,建立了内通道中光场-流场的耦合仿真模型,通过引入湍流相位屏模拟了内通道中湍流扰动对传输光束波前相位的影响。在此基础上,定量计算了不同轴向风速条件下内通道传输光束的波前相位特性,并结合自适应波前校正模型,分析了激光束经内通道传输后的波前校正效果。研究结果表明,随着轴向风速的增大,激光束波前相位中的高频成分呈现出先增大后减小的趋势,经自适应波前校正后的光束质量也呈现出类似趋势,且当轴向风速约为 0.65 m/s 时畸变波前中的高频成分最多,经波前校正后的光束质量最差。该模型能够为激光控制系统的设计和性能评估提供一定参考。

关键词:传输通道; 气体热效应; 湍流; 相位特性; 高频相位

中图分类号:TN248;O439 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.0806003

Effect of axial wind speed in inner propagation channel on phase characteristics of high-power lasers

Hu Xiaochuan, He Yehuan, Wu Shuang, Zhang Bin

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: According to the phase distortion of laser beam in inner propagation process, a simulation model for the laser beam interacting with the fluid of the inner channel was established, in which the phase distortion caused by the thermal effects was taken into account and the influence of turbulence disturbance of the inner channel on the wavefront phase was simulated by introducing the method of phase screen. The phase characteristics of laser beams propagating through the inner channel on the conditions of different axial wind speeds was discussed in detail in terms of wavefront power spectral density, and the correction effect of laser beam propagation through the inner channel was further analyzed using the adaptive wavefront correction model. The results show that, with the increase of axial wind speed, the high frequency component of the wavefront phase increases at first and then decreases, and the beam quality gets worse at first and then becomes better. Particularly, the high frequency component of the wavefront phase increases most quickly and the beam quality degrades most

收稿日期:2015-12-15; **修订日期**:2016-01-23

基金项目:中国科学院自适应光学重点实验室基金(LAOF201303);苏州大学省级重点实验室开放课题(KJS1404)

作者简介:胡小川(1990-),男,硕士生,主要从事变形镜热效应、光束传输与控制等方面的研究。Email:hu_xiaochuan@sina.com

导师简介:张彬(1969-),女,教授,博士生导师,博士,主要从事高功率激光技术、光束传输变换和控制、非线性光学等方面的研究。Email:zhangbinff@sohu.com

significantly when the axial wind speed is about 0.65 m/s. This model provides a qualitative reference for the laser beam control system design and performance evaluation.

Key words: propagation channel; thermal effect of gas; turbulence; phase characteristics; high-frequency phase

0 引 言

激光束在作用于目标之前，经过的整个传输通道包括激光内通道和外部大气通道，其中内通道是光束控制系统的导光光路。激光在内通道传输时，传输通道内气体受到高能激光的非均匀加热，从而出现气体密度和折射率的起伏变化，进而使激光束在内通道传输过程中发生相位畸变，最终降低了激光到达远场时的能量集中度[1]。为减少激光在内通道中传输时产生的气体热效应，国内外通常采用的改善方法主要有两种：一种是向管道内注入低吸收系数的气体，并在定向器出口处安装气帘；第二种方法则是向管道内注入低吸收系数的气体，并对其进行轴向吹风，进而通过强制对流的方法排出气体吸收的能量。第一种方法由于需要安装气帘等装置，致使光学系统复杂度大大增加。相较于前者，采用第二种方法所使用的系统要简单实用得多，但当有气流存在时，管道内的流场和光场耦合热效应会变得非常复杂，并且会引起湍流运动[2]，形成更为复杂的气体介质折射率分布，从而进一步对光束质量影响。目前对于内通道中气体热效应问题，国外已开展了大量的理论及实验研究。然而，由于某些特殊原因，国外在这方面研究中所采用的具体方法、模型参数等都很难获得。

激光束在内通道中传输时，产生的气体介质热效应包括热晕和湍流两种，而目前国内主要是针对热晕进行研究。从自适应光学的角度来看，热晕对波前相位的影响主要体现在中低频部分，因而可采用自适应光学技术进行波前补偿校正[3]。但是，气体的湍流效应也会对光束波前相位造成影响[4]，且影响主要体现在自适应光学技术难以校正的高频部分，因此有必要对内通道中的小尺度湍流扰动进行研究。

为此，文中在建立内通道中光场-流场的耦合仿真模型的基础上，通过引入湍流相位屏的方法模拟内通道中湍流扰动对激光束波前相位的影响。与此同时，定量计算了不同轴向风速条件下，内通道中传输光束波前相位特性的变化规律，进而利用基于滤波函数的自适应校正预估模型，模拟变形镜对畸变波前的校正作用，并对其校正效果进行分析。

1 内通道传输模型

在仿真过程中，首先通过光传输计算得到通道内的光强分布，并将其加载到流场控制方程中，然后再通过流场计算得到通道内气体介质对传输光场相位特性的影响。通过多次迭代计算，最终得到经内通道传输后的光场分布。

1.1 光场-流场耦合控制方程

在进行流场分析时，由于通道中气体流速较低，气体密度分布的变化主要由温度变化引起，因此先采用密度为常量的不可压缩流模型对通光前通道内的流场分布进行稳态分析，再使用随温度和压强变化的理想气体状态方程来计算通光后气体的密度分布。

$$Mp=\rho RT \tag{1}$$

式中：M 为气体摩尔质量；p 为气体压强；ρ 为气体密度；R 为普适气体常数；T 为绝对温度。

在各向同性介质中，光传输方程可以表示为：

$$\nabla_r^2 A-2ik\frac{\partial A}{\partial z}+k^2\left(\frac{n^2}{n_0^2}-1\right)A=0 \tag{2}$$

式中：∇_r^2 为微分算子；A 为光强复振幅；$k=2\pi/\lambda$ 为波数；λ 为激光波长；z 为光传输方向；n_0、n 分别为通光前、后的气体折射率，且有 $n=n_0+\Delta n$。

在激光内通道传输过程中，气体的折射率变化主要与温度的非均匀分布有关，即：

$$\Delta n=n_T\Delta T \tag{3}$$

式中：$n_T=\mathrm{d}n/\mathrm{d}T$ 为折射率温度系数；ΔT 为气体温度变化。

1.2 光场-流场仿真模型

文中通过 Fluent 和 Matlab 软件相结合的方式进

行仿真分析。一方面,使用 Fluent 软件中的 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行流场计算并导出相关数据;另一方面,利用 Matlab 软件处理 Fluent 导出的温度、风速数据并进行光传输计算,然后将计算后的光强数据导入 Fluent 进行流场分析,计算流程如图 1 所示。

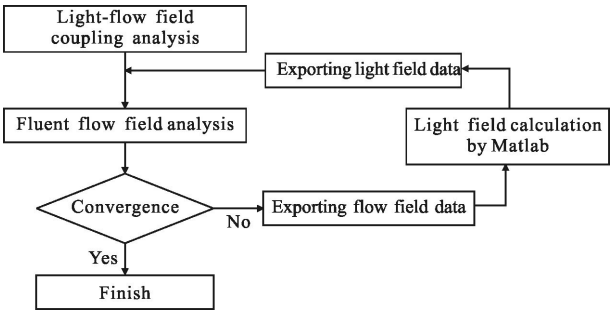


图 1 Fluent-Matlab 交互仿真流程图

Fig.1 Flow chart of interactive simulation by Fluent-Matlab

通常根据内通道中气流的雷诺数是否超过临界值来判断气流是否为湍流。雷诺数定义为:

$$\mathrm{Re}=\frac{VL}{v} \tag{4}$$

式中:V 为截面的平均速度;L 为特征长度;v 为气体的运动粘度。当 Re>2 320 时,可认为管内为湍流,湍流动能可由管流经验公式得到:

$$k=\frac{3}{2}(v_{\mathrm{avg}}I)^2 \tag{5}$$

式中:v_{avg} 为平均流速;I 为湍流强度,且 $I=0.16(\mathrm{Re})^{-1/8}$。此外,湍流耗散率 ε 可以表示为:

$$\varepsilon=C_{\mu}^{3/4}\frac{k^{3/2}}{l} \tag{6}$$

式中:经验常数 $C_{\mu}=0.09$,湍流长度尺度 $l=0.07\,\mathrm{L}$。

1.3 湍流相位屏

根据塔塔尔斯基(Tatarski)关于湍流中光波的传输理论,湍流折射率结构常数可表示为[5]:

$$C_n^2=a^2\times\frac{\varepsilon^{3/2}}{\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}\times M^2 \tag{7}$$

式中:a^2 为常数,在实验中测量其值约为 2.8;ε 为湍能耗散率;$\partial v/\partial z$ 为轴向风速随垂直高度的梯度;M 为虚折射率梯度,在文中可忽略湿度的影响,M可表示为:

$$M=-77.6\times10^{-6}\frac{p}{T^2}\left(\frac{\partial T}{\partial z}+0.98\times10^2\right) \tag{8}$$

式中:p 为压强。

由此,根据 Fluent 导出的温度、风速数据即可计算出相应位置的折射率结构常数,再根据功率谱反演法[6]即可构建湍流相位屏。

2 数值模拟与分析

典型的内通道传输光路如图 2 所示。其中,气动窗口是利用气体射流的方法来维持光腔与大气环境之间的压差,光阑用于限制激光束进入传输通道的尺寸,其余反射镜等元件则用于控制光束的传输及变换。

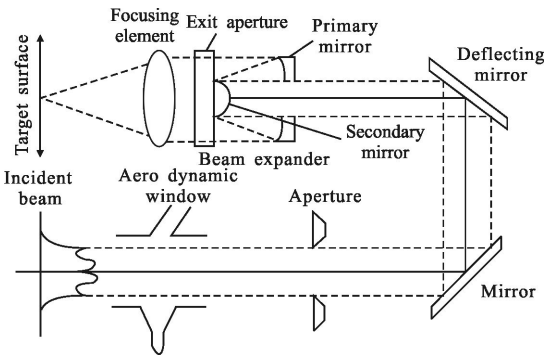


图 2 典型的内通道传输光路

Fig.2 Typical transmission light path in the inner channel

2.1 计算模型

为便于分析而又不失一般性,文中以图 3 所示的直圆形管道为例进行分析。

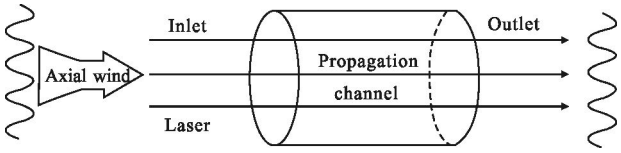


图 3 直圆形管道示意图

Fig.3 Schematic illustration of the cylindrical channel

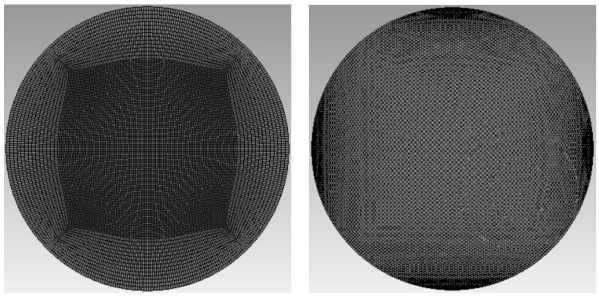
计算中考虑重力因素对气体介质的影响,并认为气流从管道一端进入后从另一端流出;管壁采用恒温边界条件,忽略管道与周围环境的热交换。假定管道长度为 $L=1\,\mathrm{m}$,直径为 $d=0.25\,\mathrm{m}$,传输过程中在管道内进行轴向吹风,且吹风方向与光束传输方向相同,有关气体参数如表 1 所示。

表 1 内通道中气体参数

Tab.1 Properties of gas in inner propagation channel

Absorption coefficient /m^{-1}	Density /$kg\cdot m^{-3}$	Heat capacity at constant pressure /$J\cdot(kg\cdot K)^{-1}$	Standard pressure /kPa	Universal constant /$J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}$	Molar mass /$g\cdot mol^{-1}$
6.5×10^{-5}	1.17	1 006	101.325	8.31	29

如图 4(a)所示,文中在建模时流场界面采用了“O 型”网格划分法,与图 4(b)所示的 Volume Sweep 网格划分法相比, 该方法在保证网格分布尽可能规则的同时,优化了近壁面处的网格分布,从而能提高网格质量,获得更好的计算效果。



(a) “O 型”网格划分 (b) Sweep 网格划分

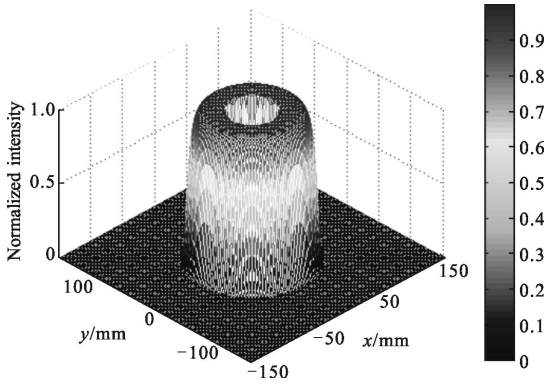
(a) "O type" meshing method (b) Sweep meshing method

图 4 两种不同的网格划分方法

Fig.4 Two different meshing methods

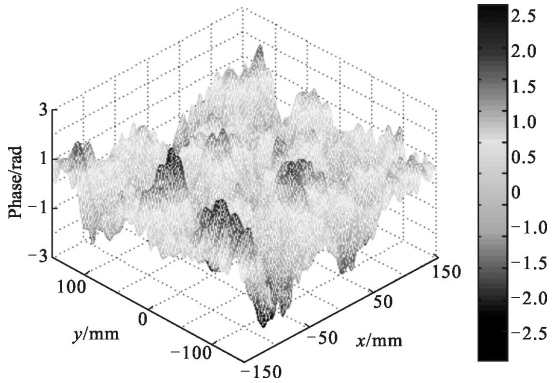
2.2 仿真结果

假设入射光为环状光束,波长 λ=1.315 m,光功率密度 $I_0=1\times10^4$ W/cm^2,内径 w_1=0.027 5 m,外径 w_2=0.075 m,其初始光强及相位分布如图 5 所示。



(a) 光强分布

(a) Distribution of light intensity



(b) 相位分布

(b) Distribution of phase

图 5 初始光场分布

Fig.5 Distribution of initial light field

通光 2 s 后,管内流场基本稳定,图 6 给出了轴向风速分别为 1 m/s 和 10 m/s 时, 轴向截面上气体的温度分布。

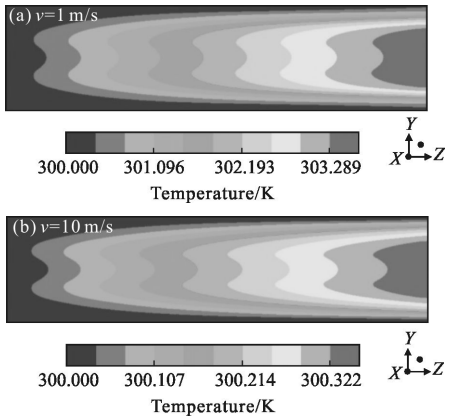
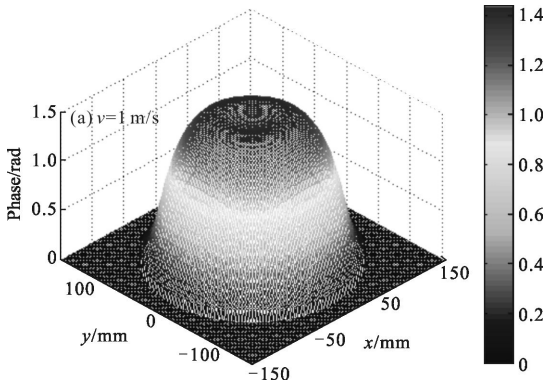


图 6 温度分布

Fig.6 Distribution of temperature

从图 6 可以看出,轴向风速越大,通道内的温升越低, 且通道内的温度分布与入射激光的光强分布有关。此外,由于强制吹风会致使热量沉积在通道出口的位置,从而导致出口处的最高温升高于入口。图7



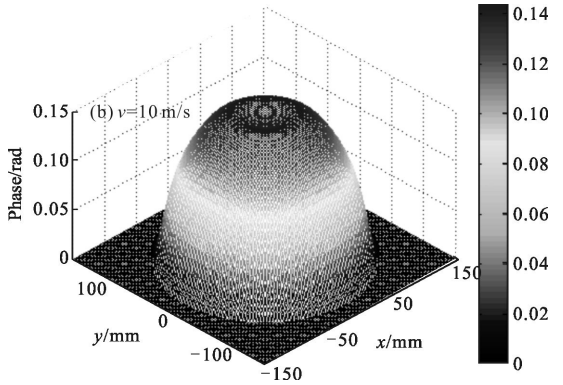


图 7 光程差分布

Fig.7 Distribution of optical path difference

进一步给出了出口处气体热效应引起的光程差分布。不难发现,使用轴向吹风的方式有助于排出气体介质吸收的激光能量,从而减小通道内的热效应。

然而,在轴向吹风过程中会形成湍流,并对内通道中的光束波前产生影响。为了明确激光束经内通道传输后的相位特性变化,图 8 比较了不同条件下,光束传输 1 m 后,其波前相位的 PSD 分布。

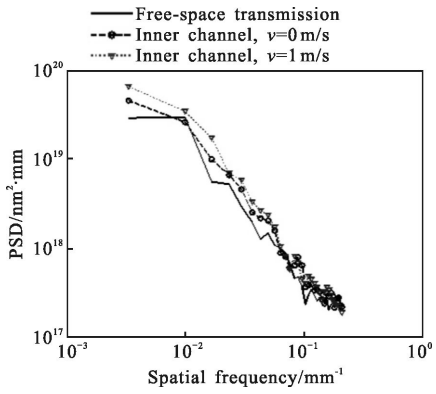


图 8 不同情况下波前相位的 PSD 分布

Fig.8 PSD distribution of the wavefront phase in different conditions

从图 8 可以看出，激光束在内通道传输过程中产生的波前畸变比自由传输更加明显，当轴向风速为 1 m/s 时,光束波前位相中的低频成分明显多于没有轴向吹风的情况，而二者在高频部分的差异并没有低频部分这么明显，但都明显高于自由传输时的情况。

在自适应光学中，波前相位中的高频成分与自适应校正效果密切相关[7]。文中采用高频增长比来描述经内通道传输后，波前位相中高频成分的增长趋势,其定义为：

$$\eta=\frac{g}{g_0} \tag{9}$$

式中:g 表示激光束经内通道传输后其波前位相中的高频成分;g_0 表示激光束经自由传输后其波前相位中的高频成分;η 为高频增长比,η 值越大，表明在内通道传输过程中引入的高频相位畸变越多。由此,图 9 给出了不同轴向风速条件下,激光束经内通道传输后,高频增长比的变化规律,图中当轴向风速为 10 m/s 时 η 约为 1.19。

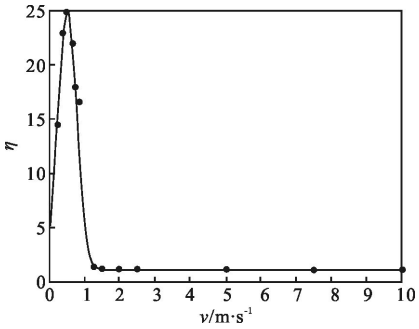


图 9 不同风速情况下的高频增长比

Fig.9 Variation of high-frequency with different wind speeds

从图 9 可以看出,激光束经内通道传输后,畸变波前相位中高频成分随着轴向风速的增加呈现出先增大后减小的规律。这是因为随着轴向风速的增加,内通道内气体介质的温度逐渐降低；当轴向风速较小时,气体介质的温度较高,此时气体温度的非均匀分布是决定湍流强度的主要因素；随着轴向风速的增加,风速对湍流的影响逐渐增大,当轴向风速达到一定程度时，管道内气体温度与风速共同作用对湍流强度的影响到达最大值;而后,随着轴向风速的进一步提高,气体温度逐渐减小,内通道内湍流强度也随之减弱。

2.3 对自适应校正效果的影响

文中采用参考文献[8]中的滤波函数模型来模拟变形镜对畸变波前的校正作用,该模型表示为：

$$H(\rho)=1-\exp[-0.693\times(2d\rho)^{21.972\,0b+3.466\,2}] \tag{10}$$

式中:d 为驱动器间距;b 为交连值。按照现有变形镜的常规参数,文中假设变形镜驱动器间距 d 为 15 mm,交连值 b 为 0.06。

文中利用基于桶中功率的 β 因子对激光光束质量进行评价,β 值越小,表明光束质量越好[9]。由此,图 10 给出了不同轴向风速条件下,激光束经变形镜

校正后远场光束质量 β 值，计算中激光束经自由空间传输及波前校正后的远场光束质量 β 值为 1.34。

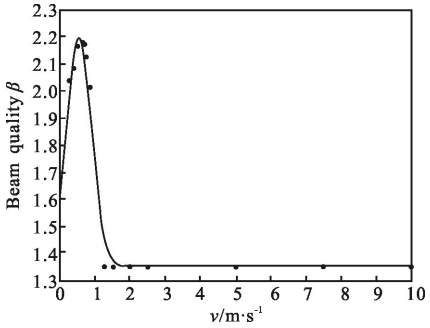


图 10 不同风速情况下的光束质量

Fig.10 Variation of beam quality with different wind speeds

从图 10 可以看出，随着轴向风速的增大，远场光束质量基本呈现出先变差再变好的趋势。对比图9和图 10 可以发现，自适应校正效果与激光束经内通道传输后波前相位中的高频增长比有关，即内通道传输过程中引入的高频相位畸变会对光束质量造成影响，且难以使用自适应光学技术进行校正。

3 结 论

文中基于 Fluent 和 Matlab 软件建立了激光内通道传输模型，并通过引入湍流相位屏的方法反映了内通道传输过程中湍流扰动对传输光束波前相位的影响。在此基础上，使用基于滤波函数的变形镜波前校正模型对经内通道传输后的激光束进行校正预估，分析了内通道中轴向风速对光束质量的影响。

研究结果表明：与自由空间传输相比，高功率激光束在内通道传输过程中，由于气体热效应及湍流运动的影响，激光束波前相位会发生明显畸变，随着轴向风速的增大，畸变波前中产生的高频成分呈现出先增多后减小的规律，自适应波前校正效果也随之变化。针对文中所用计算模型(激光功率密度 I_0=1×10^4 W/cm^2；环状光束内径 w_1=0.0275 m，外径 w_2=0.075 m；通道长度 L=1 m，直径 0.25 m，通道内介质为空气)，当轴向风速约为 0.65 m/s 时畸变波前中的高频增长比最大，即此经波前校正后的光束质量最差。在工程应用中，应根据实际情况控制内通道中的吹风条件，从而获得更高质量的输出光束。

参考文献：

[1] Sun Yunqiang, Xi Fengjie, Chen Hongbin, et al. Design and analysis on gas curtain of beam path indoor [J]. ***Laser & Optoelectronics Progress***, 2011, 48(5): 94-99. (in Chinese)
孙运强, 习锋杰, 陈洪斌, 等. 内通道气帘的设计与分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(5): 94-99.

[2] Zhang Hongjian, Wei Hongyan, Jia Rui, et al. Effects factors of imaging system resolution in slant atmospheric turbulence [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44 (5): 1569-1573. (in Chinese)
张洪建, 韦宏艳, 贾锐, 等. 斜程大气湍流中成像系统分辨率的影响因素研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1569-1573.

[3] Yang Huizhen, Liu Rong, Liu Qiang. Model wavefront-sensorless adaptive optics system based on eigenmodes of deformable mirror [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(12): 3639-3644. (in Chinese)
杨慧珍, 刘荣, 刘强. 基于变形镜本征模的模型式无波前探测自适应光学系统 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3639-3644.

[4] Liao Tianhe, Liu Wei, Gao Qiong. Turbulence of different waveform laser propagation in atmosphere [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(S): 41. (in Chinese)
廖天河, 刘伟, 高穹. 不同形状激光波束在大气中传输的湍流效应[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(S): 41.

[5] Tatarskii V I. Wave Propagation in Turbulent Medium [M]. New York: McGraw-Hill, 1961: 285.

[6] Mcglamery B L. Restoration of turbulence-degraded images [J]. ***JOSA***, 1967, 57(3): 293-296.

[7] Harvey J E, Callahan G M. Wavefront error compensation capabilities of multi-actuator deformable mirrors [C]//SPIE, 1978, 141: 50-57.

[8] Ma Xuemei, Han Kai, Zhang Bin. Prediction for wavefront correction effect of discrete deformable mirror based on filter function [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2014, 34 (1): 101002. (in Chinese)
马雪梅, 韩开, 张彬. 基于滤波函数的分立变形镜波前校正效果预估[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 101002.

[9] Lv Baida, Ji Xiaoling, Luo Shirong, et al. Parametric characterization of laser beams and beam quality[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2004, 33(1): 14-17. (in Chinese)
吕百达, 季小玲, 罗时荣, 等. 激光的参数描述和光束质量[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(1): 14-17.