

用于 ICF 焦斑形态控制的能动反射镜 拟合波面能力研究*

曾志革 凌宁 姜文汉

(中国科学院光电技术研究所, 成都双流350信箱, 610209)

摘要 用能随时改变镜面面形的能动反射镜控制并产生适于各种需要的焦斑形态。由于对焦斑形态的控制取决于能动反射镜对激光波前的拟合能力, 通过计算机仿真, 对能动反射镜在不同驱动器数量和排布方式时拟合给定波面(由几何变换法给出)的能力进行了研究。计算结果表明, 采用自适应光学技术能在焦面上形成 ICF 实验所需要的光斑形态。

关键词 焦斑形态控制 自适应光学 能动反射镜 拟合波面能力

ICF (惯性约束聚变) 物理实验需要在焦面形成多种光斑形状和光强分布, 例如均匀照明的焦斑和焦线等。采用自适应光学技术中的能动反射镜来改变波面位相的方法可实现这一目的^[1,2]。能动反射镜面后一定数量的驱动器产生大小不同的力或位移, 推动并改变反射面形达到改变光束位相的目的。由于它采用反射方式, 且可随时调整镜面面形并在较长时间内保持面形, 因此具有传输效率和破坏阈值高以及适应性好等优点。能动镜能否产生特定表面形状所需的位相取决于它对波面形状的拟合能力。拟合能力与能动镜驱动器的数量、排布方式以及反射镜面的物理参数有关。本文对能动镜拟合波面的能力同驱动器数量以及排布方式的关系进行了计算和分析。

1 原理

见图1, 对复振幅为 $a(x, y)$ 的瞳面光波, 由夫琅和费衍射式给出远场复振幅分布

$$A(u, v) = \frac{1}{i\lambda f} \exp(ikz) \exp\left(\left(\frac{ik}{2f}\right)(u^2 + v^2)\right) \cdot \iint_{\Sigma} a(x, y) \left[\exp[i\varphi_0(x, y)] \exp[i\varphi_x(x, y)] \exp\left(-\frac{ik}{f}(ux + vy)\right) \right] dx dy \quad (1)$$

式中, (x, y) 和 (u, v) 分别为瞳面和焦面上的直角坐标系, λ 为光波长, $k = 2\pi/\lambda$, f 为透镜焦距, Σ 为瞳面尺寸, $\varphi_0(x, y)$ 为包含了光学系统静态误差的光波初始位相, 可由波面测量传感器(S-H)测出, $\varphi_x(x, y)$ 为需要能动镜加入的位相。

焦面光强分布表示为

$$I(u, v) = |A(u, v)|^2 \quad (2)$$

入射光波通过能动镜和聚焦透镜后在靶面形成焦斑。从式(1)、(2)中可知, 当光路参数已定时, 焦面的光强只与位相分布 $\varphi(x, y) + \varphi_0(x, y)$ 有关。只要变化能动镜面形就可改变光波位相从而得到不同的焦斑形态。根据几何坐标变换法和 stationary phase method^[3,4], 只要

* 国家863激光技术领域资助项目。
1997年10月28日收到原稿, 1997年12月14日收到修改稿。
曾志革, 男, 1967年5月生, 助研, 在读博士。

$\varphi(x, y)$ 在 (x, y) 区域连续可导, 满足 $\partial u(x, y) / \partial y = \partial v(x, y) / \partial x$, 可推导出要加入的位相唯一解为

$$\varphi(x, y) = \frac{k}{f} \int_0^x u(x_1, y) dx_1 - \varphi_0(x, y) \tag{3}$$

$$\varphi(x, y) = \frac{k}{f} \int_0^y v(x, y_1) dy_1 - \varphi_0(x, y)$$

以表1所示系统参数将方形截止的六阶方形超高斯光束变换为公式(4)所示焦面上方形的规一化均匀焦斑, 即

$$\tilde{I}(u, v) = \begin{cases} 1 & (|u| \leq u_0, |v| \leq v_0) \\ 0 & (|u| > u_0, |v| > v_0) \end{cases} \tag{4}$$

(u, v) 和 (x, y) 间的关系由入射光强同焦面光强能量传播守恒来确定^[3]。经推导, 需要能动反射镜产生的位相表示为

$$\varphi(x, y) = \frac{k}{f} \left\{ \frac{u_0}{p(x_0)} \int_0^x p(x_1) dx_1 + \frac{v_0}{p(y_0)} \int_0^y p(y_1) dy_1 \right\} \tag{5}$$

其中 $p(t) = \int_{-t}^t I(t_1) dt_1$, 与积分区域内的瞳面光强分布有关。

表1 系统参数

Table 1 System parameters

wave length	1.06 μ m
laser aperture ($2x_0 \times 2y_0$)	220mm \times 220mm (rectangle)
size of focal spot ($2u_0 \times 2v_0$)	300 μ m \times 300 μ m (rectangle)
original incident beam's intensity distribution	$I(x, y) = \exp \{-2[(x/w_x)^6 + (y/w_y)^6]\}$
focus lens	$f/D = 7$

通过计算, 图2所示的原始光强分布在焦面上形成的光强分布如图3所示, 最终需要能动镜形成如图4所示的波面。现考虑不同的能动镜能否产生图4的位相。

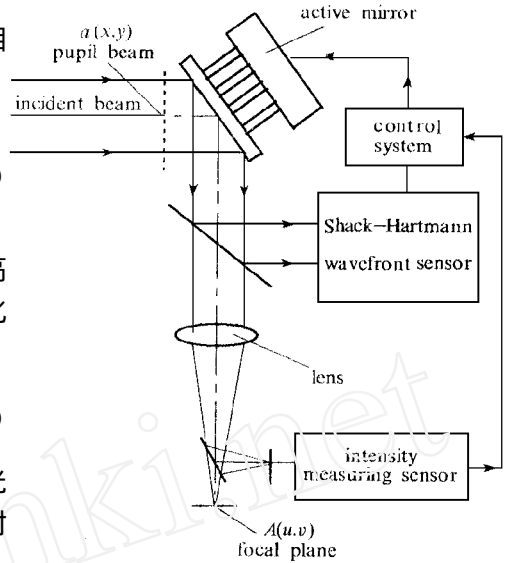


Fig 1 The principle of controlling beam profile
图1 焦斑形态控制

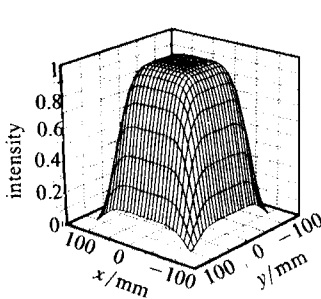


Fig 2 Beam intensity distribution at mirror
图2 瞳面入射光强分布

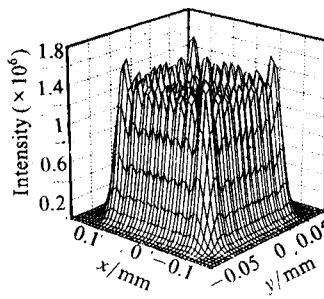


Fig 3 Computed intensity profile at focal plane
图3 计算的焦斑强度

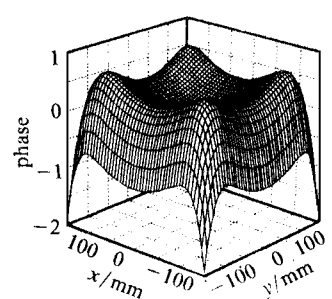


Fig 4 Needed phase produced by active mirror
图4 需要能动镜产生的位相

2 能动镜对波面的拟合能力研究

能动镜是本系统的核心, 它由一定数量驱动器产生大小不同的力或位移, 从而改变镜面面形以达到改变光束相位的目的。它可以定期调整面形, 并在较长时间内保持面形。根据系统性能参数对驱动器的排布方式和几何位置进行了研究, 得到能动镜可能的四种驱动器布局如图5所示。由于镜面在光路中成45°放置, 镜面为长方形。所有驱动器作用于镜面产生的变形构成了能动镜复杂的面形。设驱动器的影响函数可表示为高斯形状 $f(r) = \exp[-(|r|/w_0)^\alpha]$, α 为高斯指数, w_0 为特征宽度, r 为距驱动器作用点的距离, w_0 和 α 大小取决于驱动器间距、镜面刚度等因素。此处采用经验参数 $\alpha=2.2$, $w_0=9.165\text{mm}$ 。

镜面要产生的表面形状表示为

$$g(|r_i|) = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N [f(r_i, R_j) C_j] = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N \left\{ \exp\left[-\left(\frac{|r_i - R_j|}{w_0}\right)^\alpha\right] C_j \right\} \quad (6)$$

其中, M 为能动镜面上的采样点数量, N 为驱动器数量, r_i 为镜面上第 i 个采样点的坐标, R_j 为第 j 个驱动器的坐标, C_j 为第 j 个驱动器的驱动量。以矩阵形式表示为

$$g_i = A_{ij} \times C_j \quad (i = 0 \dots M, j = 0 \dots N) \quad (7)$$

采用奇值分解 (SVD) 法求解就可解得驱动量 $C_j = (C_1, C_2, \dots, C_N)^T$, ($j = 0 \dots N$)。对于镜面上任一点 r_j , 有对应的 A_{ij} , 并可求出带有拟合误差的镜面实际面形 $g'_i = A_{ij} \times C_j$, ($i = 0 \dots M, j = 0 \dots N$)。

拟合误差可表示为 $[(N+1)^{-1} \sum_{i=0}^N (g'(r) - g(r))]^{1/2}$ 。对加入能动镜拟合误差后焦面光强的质量采用两个指标来判定: 拟合出光波振幅的均方差同理论计算值的比值 (M_{uv}) 和光能效率 (η), 后者定义为焦斑有效区域内的能量集中度同入射光总能量之比。

$$M_{uv} = \left(\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [|A(u_m, v_n)| - \sqrt{I_N(u_m, v_n)}]^2 \right)^{1/2} / \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_N(u_m, v_n) \quad (8)$$

$$\eta = \left[\int_{-u_0}^{u_0} \int_{-v_0}^{v_0} I(u, v) du dv \right] / \left[\int_{-x_0}^{x_0} \int_{-y_0}^{y_0} I(x, y) dx dy \right] \times 100\% \quad (9)$$

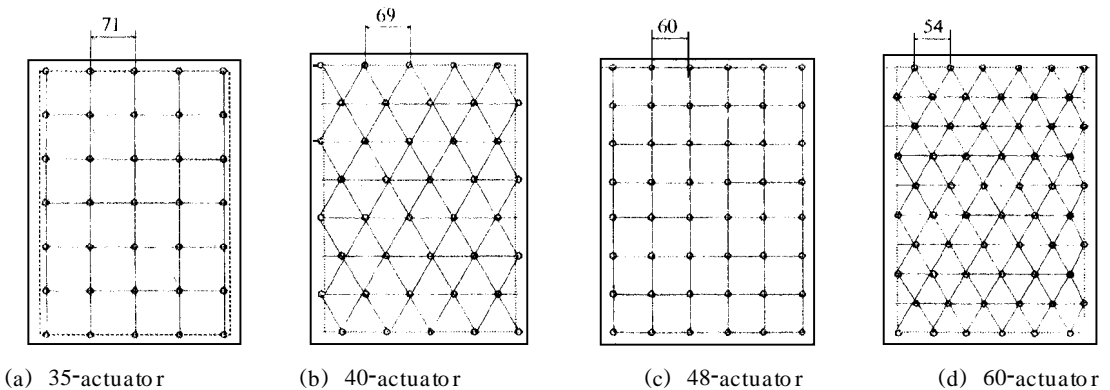


Fig 5 Several numbers and arrangements of actuators
图5 几种不同的驱动器数量和排布方式

按图5所示能动镜的不同数量和排布方式对所需的波面 (图4) 进行了拟合计算, 加入拟合误差后能动镜的实际面形和在焦面产生的光强分布分别见图6和图7, 计算结果见表2。

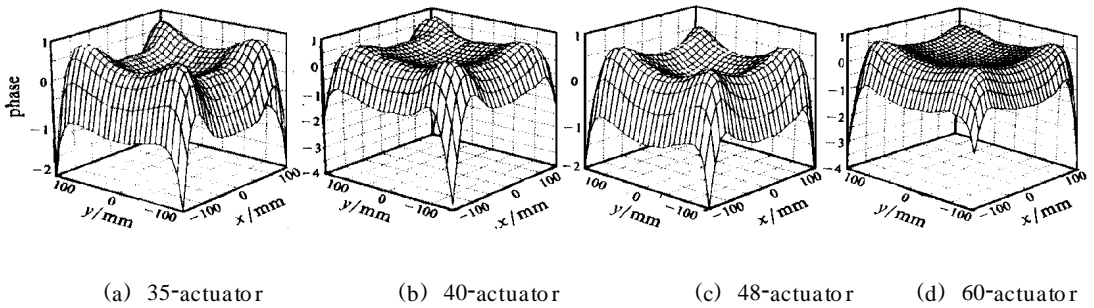


Fig. 6 Surface profiles produced by four arrangements for fitting wave-front

图6 能动反射镜四种排布产生的位相分布

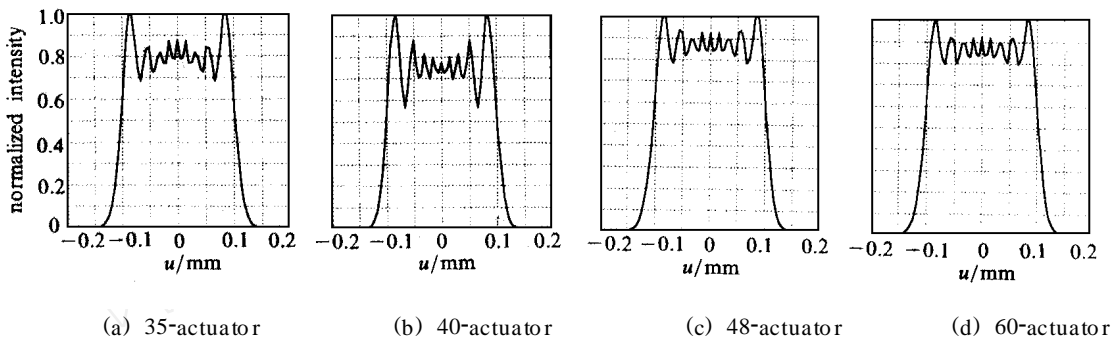


Fig. 7 Normalized intensity of four arrangements for fitting wave-front

图7 四种排布产生的焦面归一化光强分布

表2 能动反射镜四种排布对给定波面的拟合能力

Table 2 The capability of four arrangements for active mirror to fitting wavefront ($\lambda = 1.00\mu\text{m}$)

No	actuator number	arrangement	fitting error: $\text{rms}(\lambda)$	M_{uv}	η
1	35	rectangle	0.021293	0.071456	91.09%
2	48	rectangle	0.012763	0.095204	91.18%
3	40	triangle	0.018575	0.062939	91.21%
4	60	triangle	0.015813	0.065385	91.23%

从拟合出的位相图和计算结果可以看到: 48个驱动器直角排布方式的拟合误差最小; 由于三角排布方式的非对称性, 使得能动镜拟合出的波面也是非对称的; 虽然60个驱动器三角排布方式的拟合误差也较小, 但相对于48个驱动器直角排布方式来说, 驱动器数量的增加将增大工作难度和强度。因此, 从以上计算结果, 有48个驱动器直角排布方式的能动镜对波面具有较好的拟合能力, 在实际应用中可选择该驱动器的排布方式和数量。

综上所述, 本文对具有不同驱动器数量和不同排布方式的能动镜拟合特定波面的能力进行了研究。由于能动反射镜对给定波面存在拟合误差, 焦斑光强分布较理论计算变差。要形成方形的均匀焦斑, 在四种排布中, 采用有48个驱动器方形排布的能动镜时对给定波面具有较好的拟合能力, 在能动反射镜有拟合误差时仍能产生同理论值相接近的焦面光强分布。

参考文献

- 1 Nemoto K, Fujii T, Goto N, and Nayuki T. Transformation of a laser beam intensity profile by a deformable mirror. *Optics Letters*, 1996, **21** (3): 168
- 2 Yoon G Y, Jitsuno T, Nakatsuka M, and Kato Y. Laser beam shaping by the wavefront control using deformable mirror. *Proceedings of 3rd Symposium on Laser Spectroscopy*, 1995, **3** (4): 221
- 3 Bryngdahl O. Geometrical transformations to optics. *JOSA*, 1974, **64** (8): 1092
- 4 Roberts N C. Multilevel computer-generated hologram with separable phase functions for beam shaping. *App Opt*, 1992, **31** (17): 3198
- 5 Malyak P H. Two-mirror unobscured optical system for reshaping the irradiance distribution of a laser beam. *App Optics*, 1992, **31** (22): 4377
- 6 Perez-Illarbe M J, Nieto-Vesperinas M, and Navarro R. Phase retrieval from experimental far-field intensity data. *JOSA*, 1990, **A7** (3): 434

INVESTIGATION OF FITTING CAPABILITY OF ACTIVE MIRROR FOR CONTROLLING ICF'S FOCAL PROFILE

Zeng Zhige, Ling Ning, Jiang Wenhan

Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 350, Shuanliu, Chengdu, 610209

ABSTRACT Laser beam's profile at focal plane can be controlled using active mirror in ICF system because the beam's profile has strong relationship with the surface of active mirror, the surface of active mirror can be changed at any time and maintained for a long time. In this paper, the capabilities of fitting given wavefront (computed by Geometric Transformation Method) at conditions of different actuator numbers and different arrangements have been investigated by computer simulation. The computing results present that the needed laser profile can be obtained by adaptive optical technology.

KEY WORDS controlling focal profile, adaptive optics, active mirror, wavefront fitting capability.