

文章编号: 0258-702X(2002)04-0339-04

自适应扩束系统控制“飞行光束”聚焦特性

赵全忠, 程兆谷, 蒋金波, 刘翠青, 柴雄良, 黄惠杰

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 提出了一种应用自适应扩束系统解决“飞行光束”聚焦特性的方法, 分析了系统的工作原理及调节特性。数值模拟结果表明, 自适应扩束系统能够实现“飞行光束”聚焦特性亦即焦点位置与焦斑大小的控制。

关键词 飞行光束, 扩束系统, 自适应控制, Rayleigh 长度, 聚焦特性, 光束质量因子

中图分类号 TN 209 文献标识码 A

Controlling the Focusing Characteristics of Flying Optics through an Adaptive Beam Expander

ZHAO Quan-zhong, CHENG Zhao-gu, JIANG Jin-bo,
LIU Cui-qing, CHAI Xiong-liang, HUANG Hui-jie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract An adaptive beam expander to control the focusing characteristics of flying optics, was proposed and its operating principle and adjusting characteristics were analyzed. The simulation results indicate that the adaptive beam expander can be used to control the focusing length and spot size.

Key words flying optics, beam expander, adaptive control, Rayleigh range, focusing characteristics, beam propagation factor

1 引 言

在大功率激光远程运输过程(如激光加工、大型激光工程空间滤波器等)中,“飞行光束”导光系统由于具有较大的灵活性而被广泛采用。由于聚焦镜沿激光光轴作大尺寸移动,其范围达十余米或更长,使实际焦距、焦斑和焦深产生较大变化,这对运输的激光质量产生重要影响。因此“飞行光束”聚焦特性的研究成为国际激光界关注的一个热点问题。“飞行光束”聚焦特性主要包括实际焦距与几何焦距(理想平行光焦距)的差异、焦斑大小和焦深的变化。“飞行光束”聚焦特性对诸如激光加工、大型激光工程空间滤波器、激光打靶、激光空间飞行器等激光应用产生极其重要的影响。理论与实验上研究并解决这一关键问题,对激光技术及其应用具有十分重要的意

义^[1]。

为了改善“飞行光束”的聚焦特性,采用反射式扩束望远镜系统对光束进行准直、扩束以减小发散角是众所周知的方法。若要使经扩束聚焦后的焦距、焦斑大小和焦深保持基本不变,并使扩束系统具有调节功能,以获得不同的扩束比。传统的机械调节法通过调节两镜的相对位置来获得不同的扩束比,对调节装置的机械加工精度要求很高,而且由于调节的只有两镜之间的距离一个变量,还不能完全控制聚焦后的焦距和焦斑大小两个变量。本文提出了一种压力控制调节的反射式扩束系统,通过改变注入反射镜的压力改变反射镜的曲率半径,从而改变其焦距实现对扩束比的调节,并最终控制聚焦后的焦距、焦斑大小和焦深保持基本不变。

收稿日期 2001-07-06;收到修改稿日期 2001-10-22

基金项目 国家自然科学基金(批准号 69978022)和中国科学院仪器研制资助项目。

作者简介 赵全忠(1974—)男(满族),辽宁辽阳人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士生,主要从事激光应用工程方面的研究。E-mail: sionzqz@163.net

2 “飞行光束”聚焦特性

对于高功率激光器输出的激光束,一般为高阶模或混合模高斯光束,其光场振幅和相位分布复杂,等相位波面不一定是球面,一般不能采用常规的 q 参量及 $ABCD$ 定律来描述^[21]。但借助高阶模或混合模的高斯光束的光束质量因子 $M^2(M)$,可得高阶模或混合模高斯光束与基模高斯光束的关系,即

$$w_m = Mw_0 \tag{1}$$

$$\theta_m = M\theta_0 \tag{2}$$

$$Z_R = \frac{\pi w_m^2}{M^2 \lambda} \tag{3}$$

其中, w_m, θ_m 为高阶模或混合模高斯光束的束腰半径与发散半角, w_0, θ_0 为基模高斯光束的束腰半径与发散半角, Z_R 为 Rayleigh 长度, $M^2(M)$ 为光束质量因子, λ 为激光波长。

文献[1]将某一特定谐振腔的 Rayleigh 长度 Z_R 取代 q 参量虚部的光斑尺寸 w , 推导出了高阶模或混合模高斯光束成像变换(束腰成像)的 q 参量

$$\frac{1}{q_m} = -\frac{i}{Z_{R_m}} \quad \text{或} \quad q_m = Z_{R_m} i \tag{4}$$

这样,将(4)式代入 $ABCD$ 定律可得

$$\begin{cases} B + CZ_R Z'_{R_m} = 0 \\ AZ_{R_m} = DZ'_{R_m} \end{cases} \tag{5}$$

式(5)为用瑞利长度表示的高阶模或混合模高斯光束光腰物像变换关系。其中 Z_{R_m} 表示入射高斯光束的瑞利长度, Z'_{R_m} 表示聚焦后高阶模或混合模高斯光束的瑞利长度。

图1为典型的“飞行光束”聚焦系统简化模型(反射式聚焦系统经等效后亦可简化为此模型),在飞行光程内,聚焦镜沿光轴方向前后移动。其传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & z - z_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

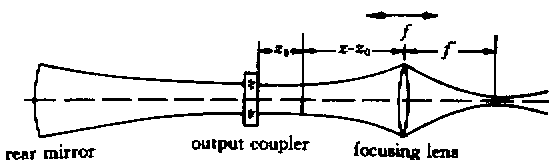


图1 “飞行光束”聚焦系统模型

Fig. 1 Model of focusing system for flying optics

$$\begin{bmatrix} 1 - \frac{f'}{f}(z - z_0) - \frac{f'}{f}(z - z_0) + f' \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{(z - z_0)}{f} \end{bmatrix} \tag{6}$$

这里 Z_0 处为激光器输出光腰, f 为聚焦镜几何焦距, f' 为聚焦镜的实际焦距。

联立(5)(6)二式,可以求得高阶模或混合模“飞行光束”聚焦特性,包括:实际焦距 f' 与几何焦距 f 之差 Δf , 焦斑半径 w' 和焦深 h 为

$$\Delta f = f^2(z - z_0 - f) \left[Z_R^2 + (z - z_0 - f)^2 \right] \tag{7}$$

$$w'^2 = \frac{\lambda}{\pi} \cdot M^2 f^2 Z_R \left[Z_R^2 + (z - z_0 - f)^2 \right] \tag{8}$$

$$h = f^2 Z_R \left[Z_R^2 + (z - z_0 - f)^2 \right] \tag{9}$$

这里焦深 h 定义为:光斑尺寸变化到焦点尺寸 $\sqrt{2}$ 倍时的轴向距离,即经聚焦后高斯光束的新的瑞利长度。

从公式(7)~(9)可得出如下重要结论:

(1)在不考虑谐振腔片(尤其是输出耦合镜)以及激光工作物质(例如晶体、玻璃、气体等)热效应的情况下,高斯光束经透镜或非球面反射镜聚焦后,其焦距变化 Δf 和焦深与 TEM_{mn} 模的阶数无关,只与其 Rayleigh 长度、几何焦距和聚焦镜与光腰的相对位置有关。

(2)焦斑直径与高斯光束的质量因子 M 成比例增长。

(3)人们极为关注的是,当聚焦镜沿光轴位置作大尺度移动时,实际焦距的变化。由公式(7)可知,当聚焦镜位置 z 处于 $z = Z_R + (z_0 + f)$ 时, Δf 达到极大值 Δf_{\max}

$$\Delta f_{\max} = f^2 / 2Z_R \tag{10}$$

3 自适应扩束系统

3.1 系统模型及工作原理

图2为自适应扩束系统模型,由发射望远镜系统和加工头两部分组成。发射望远镜系统固定不动,加工头沿光轴大范围移动。其中 M_1, M_2 为压力变形镜, M_3, M_4 为平面反射镜, M_5 为抛物面聚焦镜。其工作原理如下:激光加工时,在计算机控制下,加工头沿光轴移动并把位置信号传递给计算机,计算机通过压力控制系统改变 M_1, M_2 的曲率半径,使扩束比发生变化,以保证聚焦焦距、焦斑尺寸在误差允许范围内保持不变。

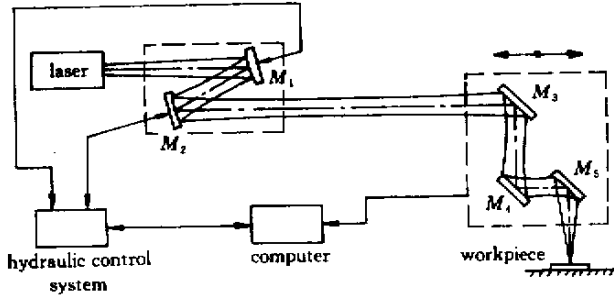


图 2 自适应扩束系统原理图

Fig.2 Sketch of adaptive beam expander

3.2 系统的调节特性

在不计倾斜入射光的成像误差的情况下,图 2 的反射镜聚焦系统可以等效为图 3 的薄透镜聚焦系统。图 3 中 M_1, M_2, M_5 的焦距分别为 f_1, f_2, f_5 ; L_1 为初始入射激光束束腰到 M_1 的距离, L_3 为最终出射激光束束腰(实际焦点)到 M_5 的距离, L_2 为 M_1 与 M_2 之间的距离, L 为加工头移动范围,即飞行距离。

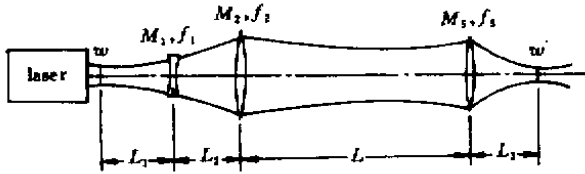


图 3 系统薄透镜等效图

Fig.3 Thin lens equivalence for the system

图 3 所示系统的光束传输矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_5 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (11)$$

在式(11)中 f_1, f_2 为变量,随变形镜的曲率半径变化而变化, L 为飞行距离,也是变量。其他参量在实际应用中均为已知数,这样可求得包含未知数 f_1, f_2 和 L 的矩阵元素 A, B, C, D 。

对于圆形腔镜输出的激光,其瑞利长度 Z_R 完全由谐振腔决定^[3],即

$$Z_R = L \frac{[g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)]^{1/2}}{(g_1 + g_2 - 2g_1 g_2)} \quad (12)$$

所以由式(12)可求得谐振腔输出光束的 Rayleigh 长度,又由式(3)可求得聚焦后的 Rayleigh 长度 Z'_{R_m} ,

将式(11)中的矩阵元素 A, B, C, D 以及 Z_{R_m}, Z'_{R_m} 代入式(5)可以得到包含 f_1, f_2, L 三个变量的方程组,由 Mathcad 编程^[4],可求得 f_1, f_2 随 L 的变化情况,也就是压力变形镜的调节特性。

以混合模高功率激光加工为例,选取聚焦镜的焦距 $f_5 = 130 \text{ mm}$,实际焦距 $L_3 = 128 \text{ mm}$,聚焦后的焦斑 $w' = 0.15 \text{ mm}$,光束质量因子 $M^2 = 4$,由公式(9)可得聚焦后的焦深为 1.667 mm 。经数值模拟,可以得到变形镜 M_1 与 M_2 的焦距 f_1 和 f_2 随飞行距离 L 的变化曲线如图 4 所示。从图 4 可以看到,加工头的行程(飞行距离)可达 50 m ,在飞行距离范围内 f_1 和 f_2 的调节曲线较平滑,易于实现控制。

扩束系统中扩束比(放大率)是一个重要的参量,扩束比的定义如下^[2]

$$M_T = -\frac{f_2}{f_1} \quad (13)$$

图 5 是扩束比随飞行距离的变化曲线,由图可见,随飞行距离的增大,扩束比增大,两者基本呈线性关系。也就是说,通过扩束比的变化实现了对焦

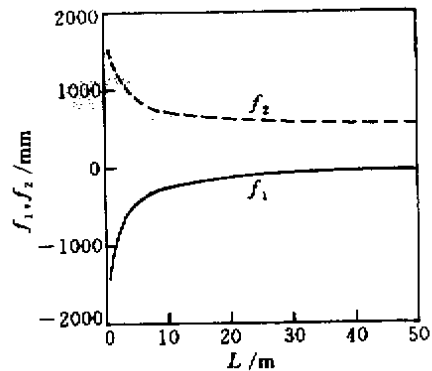


图 4 变形镜焦距 f_1, f_2 随飞行距离的变化曲线

Fig.4 Change of focusing length f_1 and f_2 with the change of flying distance

点位置和焦斑大小的控制。可见,若压力变形镜的响应速度、面形变化在误差允许范围内,就可以实现稳定的聚焦。

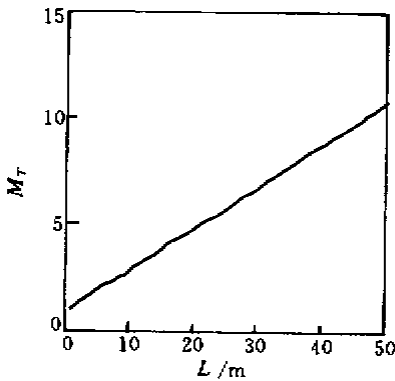


图5 扩束比(放大率)随飞行距离的变化曲线

Fig.5 Change of magnification with the change of flying distance

4 自适应镜

M_1, M_2 是带有集成水冷装置的铜反射镜,文献[5,6]中均提出了压力变形镜的模型,其典型结构如图6所示,通过控制进出水量来控制镜内腔的水压,使直径为 $2R$ 的镜面受压变形,变形程度可以用镜面表面点离静止位置的偏差 $u(r)$ 来表示

$$u(r) = \frac{3 \cdot p \cdot (1 - \mu^2)}{16 \cdot E \cdot d^3} \cdot (R^2 - r^2)^2 \quad (14)$$

其中 $u(r)$ 为 r 位置上表面点离静止位置的偏差, r 为距板中心位置, R 为镜面半径, d 为镜面厚度, p 为单位面积压力, E 为所用镜面材料的弹性模量, μ 为所用镜面材料的泊松比。

镜面预先加工成一球面,受水压后其轴截面曲线为

$$w'(r) = a - (R_1^2 - r^2)^{1/2} + \frac{3 \cdot p \cdot (1 - \mu^2)}{16 \cdot E \cdot d^3} \cdot (R^2 - r^2)^2 \quad (15)$$

其中 R_1 为基球面半径, a 为常数,表示基球球心位置,其余参数如式(14)。

在文献[6,7]中,对水压自适应镜做了详细的讨论,对压力变形后镜面相对于球面作了波像分析,分析表明,压力自适应镜用于红外激光系统是合适的。

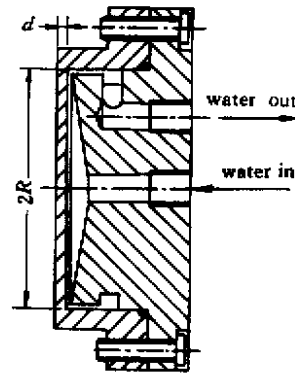


图6 压力自适应镜模型

Fig.6 Model of pressure adaptive mirror

5 结 论

本文在对高阶模或混合模“飞行光束”聚焦特性进行研究的基础上,提出了应用压力自适应扩束系统来解决“飞行光束”聚焦特性的问题。数值模拟结果表明,自适应扩束系统能够实现“飞行光束”焦点位置与焦斑大小的控制。

参 考 文 献

- 1 Cheng Zhaogu, Jiang Jinbo, Li Xianqin *et al.*. Focus characteristics of long distance flying optics [J]. *Science in China (Series A)*, 2000, **43**(9) 980 ~ 987
- 2 R. Iffländer, H. Weber. Focusing of multimode laser beams with variable beam parameters [J]. *Optica Acta*, 1996, **33**(8):1083 ~ 1090
- 3 James T. Luxon, David E. Parker, John Karkheck. Waist location and Rayleigh range for higher-order mode laser beams [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(13) 2088 ~ 2090
- 4 Song Zheng, Lin Yong, Wang Baodong *et al.*. *Mathcad 7.0 Introduction and Its Engineering Applications* [M]. Beijing: People's Communication Press, 1999 (in Chinese)
- 5 Keming Du, P. Loosen, H. Kochmann. Properties of a high-power CO₂-laser with an adaptive mirror [J]. *Opt. Comm.*, 1994, **106** 269 ~ 277
- 6 M. Bea, A. Giesen, H. Huegel. On-line control of the focus geometry by coupled adaptive system [J]. *Laser und Optoelektronik*, 1994, **26**(2) 43 ~ 49
- 7 Zhang Yaoning, Ku Geng, Cheng Zhuhai *et al.*. The focus variable mirror with varying pressure in the flexible focus variable system [J]. *Chinese J. Lasers (中国激光)*, 1998, **A25**(11) 998 ~ 1002 (in Chinese)