

文章编号: 0258-7025(2004)01-0062-03

“飞行光学”焦移研究

赵全忠, 程兆谷, 高海军

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 基于焦移传输理论, 推导了“飞行光学”中焦移、相对焦移的表达式, 分析了“飞行距离”、瑞利长度和聚焦镜焦距对“飞行光学”中焦移、相对焦移的影响。

关键词 几何光学; 焦移; 相对焦移; 飞行光学

中图分类号 O 435 **文献标识码** A

Research on the Focal Shift in Flying Optics

ZHAO Quan-zhong, CHENG Zhao-gu, GAO Hai-jun

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

Abstract Base on the propagation theory of focal shift, the analytical expression of focal shift and relative focal shift were deduced. The effects of flying distance, Rayleigh range and the focal length of focusing lens (or mirror) on focal shift were also discussed.

Key words geometrical optics; focal shift; relative focal shift; flying optics

二十年来, 人们对焦移效应进行了大量的研究^[1~5]。由于焦移的存在, 使聚焦光强的极大值点不与几何焦点重合, 而要更靠近光阑透镜一些。这一问题对激光精密加工、强激光聚焦以及光学系统设计等有着重要的实际意义。

在激光焊接、激光切割、激光雕刻等加工中, “飞行光学”导光系统由于具有轻便灵活的特点而被广泛采用。另外, 近年来又兴起了新的研究热点——激光推进技术^[6], 即利用激光作为动力源, 把飞行器送入太空轨道。带有聚焦镜的飞行器也是对“飞行光学”导光系统的应用^[7~10]。但“飞行光学”中焦移效应的研究却未见报道。本文在文献^[4]焦移传输理论的基础上, 对“飞行光学”中的焦移现象进行了详细的研究。

2 高斯光束焦移传输

图 1 为高斯光束焦移传输示意图。对于图 1 的高斯光束有

$$\begin{cases} w = w_0 \sqrt{1 + (z/Z_R)^2} & (1a) \\ R = z[1 + (Z_R^2/z^2)] = z + (Z_R^2/z) & (1b) \\ Z_R^2 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} & (1c) \end{cases}$$

w_0 为高斯光束束腰半径, Z_R 为瑞利长度, R 为与光轴相交于 z 点的等相面曲率半径, w 为与光轴相交于 z 点的等相面上的光斑半径。由图 1 可知

$$R = z + \Delta z \quad (2)$$

式(2)表明了波前 Σ 的圆心不是位于 $z = 0$ 的束腰平面上, 而是位于 $z = -\Delta z$ 的平面上。由式(1b)及式(2)可得

$$\Delta z = Z_R^2/z \quad (3)$$

Δz 即为众所周知的焦移, 而 $\Delta z/z$ 称为相对焦移。文献^[4]推导了相对焦移及其传输的表达式

$$\begin{cases} \Delta z/z = 1/(\pi N_w)^2 & (4a) \\ \Delta z'/z' = 1/(\pi N_w')^2 & (4b) \\ \frac{\Delta z/z}{\Delta z'/z'} = \left(\frac{N_w}{N_w'}\right)^2 = \left(\frac{R'}{R}\right)^2 = M_L & (4c) \end{cases}$$

其中 N_w, N_w' 分别为传输前后的菲涅耳数, 且有

收稿日期: 2002-07-22; 收到修改稿日期: 2002-10-22

作者简介: 赵全忠(1974, 1—), 男, 辽宁人, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事激光应用工程方面的研究。E-mail: zhqz@163.com

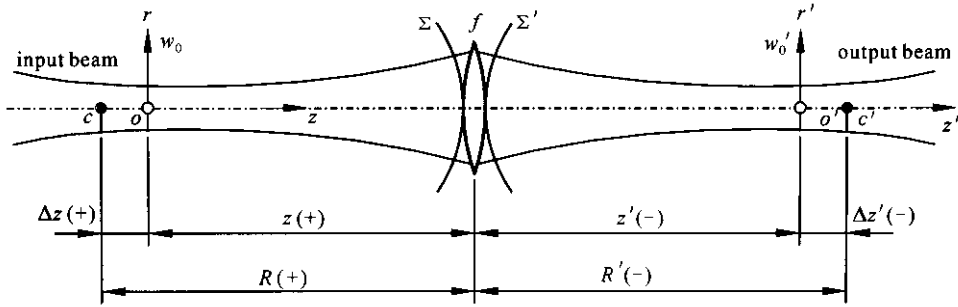


图 1 轴对称光学系统对高斯光束的聚焦((+)和(-)为符号规则)

Fig. 1 Gaussian beam focused by an axisymmetric optical system. (+) and (-) are indicators of the sign convention

$$\begin{cases} N_w = w^2/\lambda R & (5a) \\ N_{w'} = w'^2/\lambda R' & (5b) \end{cases}$$

$$z' = \frac{f(z^2 + Z_R^2)(zf - z^2 - Z_R^2)}{Z_R^2 f^2 + (zf - z^2 - Z_R^2)^2} \quad (8)$$

当 $z = f$ 时, $\Delta z'/z' = f^2/Z_R^2$, $\Delta z' = -f^3/Z_R^2$ 以及 $z' = -f$, 这与文献[4]的结论一致。

当 $z = 0$ 时(束腰在透镜前表面上), 焦移 $\Delta z'$, 相对焦移 $\Delta z'/z'$ 以及聚焦后的束腰位置 z' 达到极大值, 且 $z' = -Z_R^2 f / (Z_R^2 + f^2)$, $\Delta z' = -f^3 / (Z_R^2 + f^2)$, $\Delta z'/z' = f^2 / Z_R^2$. 当谐振腔 g 参数恒定时, $Z_R^2 \equiv \frac{\pi w_0^2}{\lambda} = \frac{\pi W_0^2}{M^2 \lambda}$, W_0 为多模高斯光束束腰半径且 $W_0 = M w_0$, 即谐振腔 g 参数恒定时, 基模高斯光束与多模高斯光束瑞利长度相等。所以, 公式(6)~(8)同样适用于多模高斯光束。

2 “飞行光学”焦移

在“飞行光学”中, 聚焦镜沿光轴移动, 使得输入光腰到聚焦镜的距离 $z(+)$ 为变量。在 z 为变量的情况下, 推导聚焦后的绝对焦移、相对焦移表达式, 并研究其在“飞行光学”中的变化规律, 将对激光精密加工等激光应用具有十分重要的意义。

2.1 “飞行光学”焦移推导

基于第 1 节高斯光束焦移的传输, 经过推导可得“飞行光学”中以“飞行距离” z 为自变量的下列函数: 焦移 $\Delta z'$, 相对焦移 $\Delta z'/z'$ 以及聚焦后的束腰位置 z' 的表达式

$$\Delta z' = \frac{Z_R^2 f^3 (z^2 + Z_R^2)}{(zf - z^2 - Z_R^2) [Z_R^2 f^2 + (zf - z^2 - Z_R^2)^2]} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta z'}{z'} = \frac{Z_R^2 f^2}{(zf - z^2 - Z_R^2)^2} \quad (7)$$

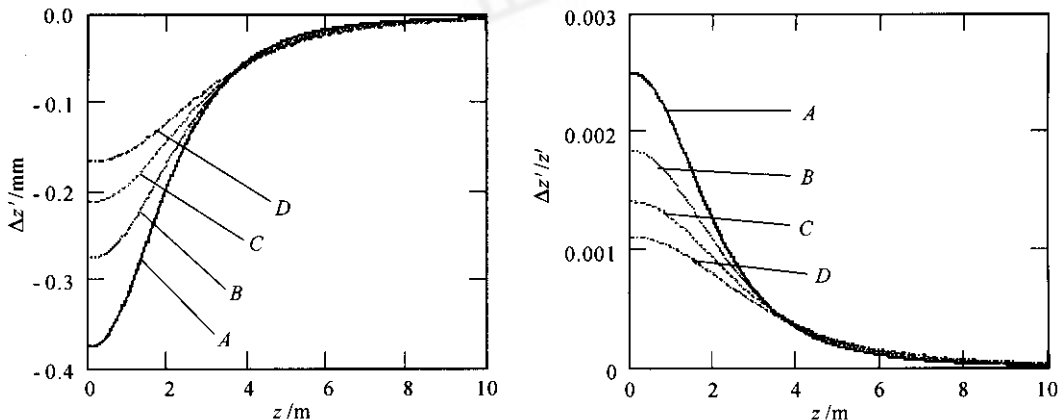


图 2 焦移、相对焦移在不同瑞利长度下随“飞行距离”的变化

Fig. 2 Change of focal shift and relative shift with Rayleigh range as parameter

万方数据

A: $Z_R = 3$ m; B: $Z_R = 3.5$ m; C: $Z_R = 4$ m; D: $Z_R = 4.5$ m

加剧,这就意味着对同一谐振腔输出不同功率高斯光束的瑞利长度 Z_R 是不同的^[12]。图 2 为瑞利长度 Z_R 分别为 3 m, 3.5 m, 4 m 和 4.5 m 时,焦移、相对焦移随“飞行距离”的变化趋势。

由图 2 可知,随着“飞行距离” z 的增大,焦移 $|\Delta z'|$, 相对焦移 $\Delta z'/z$ 减小,当“飞行距离”趋于无穷大时,焦移(绝对值)、相对焦移趋于零;在各曲线

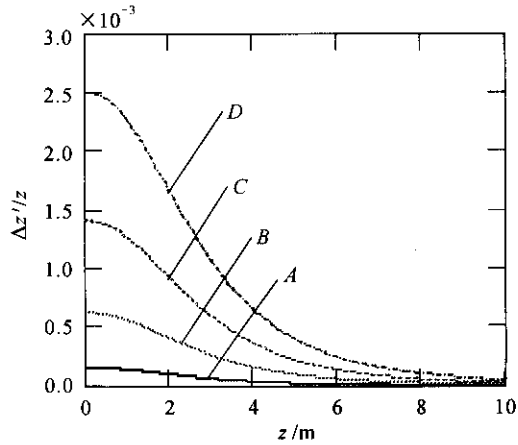
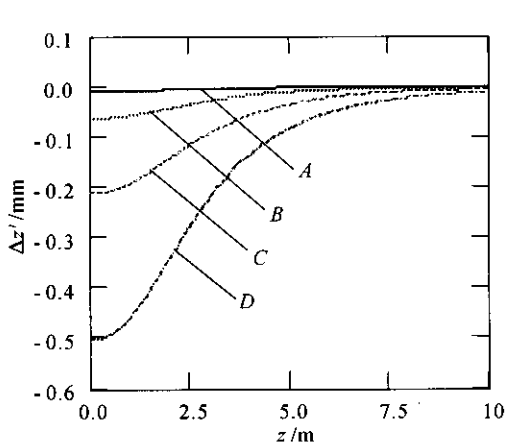


图 3 焦移、相对焦移在不同焦距下随“飞行距离”的变化

Fig. 3 Change of focal shift and relative shift with focal length of focusing mirror as parameter

A: $f = 50$ mm; B: $f = 100$ mm; C: $f = 150$ mm; D: $f = 200$ mm

3 结 论

推导了“飞行光学”中焦移、相对焦移的表达式,分析了瑞利长度和聚焦镜焦距对“飞行光学”中焦移、相对焦移的影响,结果表明,随“飞行距离”的增大,焦移(绝对值)、相对焦移减小,当“飞行距离”趋于无穷大时(绝对值),焦移、相对焦移趋于零;随瑞利长度的增大,有两种变化趋势,在各曲线交点之前,焦移(绝对值)、相对焦移减小,在各曲线交点之后,焦移(绝对值)、相对焦移增加;随聚焦镜焦距的增大,焦移(绝对值)、相对焦移增大。

参 考 文 献

- 1 Yajun Li, Emil Wolf. Focal shift in focused truncated Gaussian beams [J]. *Opt. Comm.*, 1982, **42**(3):151~156
- 2 M. Parker Givens. Focal shifts in diffracted converging spherical waves [J]. *Opt. Comm.*, 1982, **41**(3):145~148
- 3 William H. Carter. Focal shift and concept of effective Fresnel number for a Gaussian laser beam [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **21**(11):1989~1994
- 4 Yajun Li. Propagation of focal shift through axisymmetrical

交点之前,随瑞利长度的增大,焦移 $|\Delta z'|$, 相对焦移 $\Delta z'/z$ 减小,在各曲线交点之后,情况则相反。

2.2.2 聚焦镜焦距对焦移、相对焦移的影响

图 3 是聚焦镜焦距取值不同时,焦移、相对焦移随“飞行距离”的变化趋势。焦移(绝对值)、相对焦移随“飞行距离”的变化规律与图 2 相同;而随聚焦镜焦距 f 的增大,焦移 $|\Delta z'|$, 相对焦移 $\Delta z'/z$ 增大。

optical system [J]. *Opt. Comm.*, 1993, **95**(1,2,3):13~17

- 5 C. J. R. Sheppard, P. Török. Dependence of focal shift on Fresnel number and angular aperture [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(23):1803~1804
 - 6 D. Appell. High-power laser beam launches fuel-less craft [J]. *Laser Focus World*, 1998, (3):90~91
 - 7 Cheng Zhaogu, Jiang Jinbo, Li Xianqin *et al.*. Focus characteristics of long distance flying optics [J]. *Science in China*, 2000, **A43**(9):980~987
 - 8 Chih-Han Fang, Mao-Hong Lu. Analysis on depth of focus on flying optics [J]. *Opt. Eng.*, 1998, **37**(5):1505~1513
 - 9 H. Haferkamp, H. Schmidt, D. Seebaum. Beam delivery using adaptive optics for material processing applications with high power CO₂ laser [C]. *SPIE*, 1993, **2062**:61~68
 - 10 M. Bea, A. Giesen, H. Hugel. On-line control of the focus geometry by coupled adaptive systems [J]. *Laser und Optoelektronik*, 1994, **26**(2):43~49
 - 11 Thomas F. Johnston, Jr.. Beam propagation (M^2) measurement made as easy as it gets: the four-cuts method [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(21):4840~4850
 - 12 Cheng Zhaogu, Cheng Ya, Wang Runwen *et al.*. Thermal distortion of ZnSe output coupler with HR coatings in high-power transverse flow CO₂ lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(1):78~82
- 程兆谷,程 亚,王润文等.高功率横流 CO₂ 激光器高反膜耦合窗口 ZnSe 热变形理论和实验研究[J]. *光学学报*, 1995, **15**(1):78~82