

文章编号: 1002-2082(2008)06-0940-04

神光-Ⅲ 诊断包瞄准指示器光学系统的设计和研究

谢正茂^{1,2}, 董晓娜¹, 闫亚东¹, 何俊华¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 介绍采用瞄准指示器提高诊断包瞄准精度的方法。基于高斯光束薄透镜变换原理分析由单模光纤耦合输出的激光经过瞄准指示器的光学系统后的传输特性, 提出近轴放大率是影响瞄准指示器像方光斑大小的主要因素。设计一个以光纤耦合输出激光为光源, 工作波长为 635 nm, 总长小于 100 mm, 瞄准距离 (600~1 500) mm, 在靶心处相应光斑大小为 (46.2~71.9) μm 的神光-Ⅲ 诊断包瞄准指示器光学系统。该激光光学系统采用 3 片普通光学玻璃, 其中固定组由正负分离的 2 片玻璃组成, 变焦组为单片负透镜。最后利用点扩散函数和波像差进行质量评价, 结果表明该光学系统设计指标达到技术要求。

关键词: 瞄准指示器; 光纤耦合; 变焦距; 神光-Ⅲ; 光学设计

中图分类号: TN249

文献标志码: A

Optical system design of alignment pointer for SG-Ⅲ diagnostics

XIE Zheng-mao^{1,2}, DONG Xiao-na¹, YAN Ya-dong¹, HE Jun-hua¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The method of improving the accuracy of the diagnostics with alignment pointer is introduced. The transmission characteristics of the laser coupled by the single-mode fiber and passing through the optical system of the alignment pointer were analyzed based on the transformation principle of Gaussian beam thin lens. The paraxial magnification is the major factor to affect the spot size in image space of the alignment pointer. The optical system of the alignment pointer for SG-Ⅲ diagnostic package was designed, whose illumination source was a fiber laser, working wavelength was 635 nm, total length was less than 100 mm, target distance varied from 600 mm to 1 500 mm, and spot was located at the center of the target and its size was 46.2 μm ~71.9 μm . The optical system includes three normal glasses, in which the fixed group is composed of two separate positive-negative glasses, and the zoom group is a negative lens. The quality of the optical system was evaluated by the point spread function and wavefront aberration. The results show that the optical system meets the design specification.

Key words: alignment pointer; fiber coupling; variofocus; SG-Ⅲ; optical design

引言

神光-Ⅲ 装置进行惯性约束聚变(ICF)打靶实验时, X 光成像仪和光谱仪等诊断包必须精确瞄准靶心以确保测量数据的准确性。如何提高诊断包瞄

准精度是一项具有重要意义的研究课题。目前实现诊断包精确瞄准的方法是给诊断包内安置 2 个规格一致、可以输出高质量基模高斯光束的瞄准指示器, 在瞄准指示器的指示作用下通过视觉监视及位

收稿日期: 2007-10-17; 修回日期: 2007-10-27

基金项目: 国防科技重点实验室基金资助项目(51448030105ZK1801)

作者简介: 谢正茂(1982-), 男, 江西赣县人, 硕士研究生, 主要从事光学系统设计。E-mail: minrycn@163.com

置调节辅助机构进行精确瞄准。该方法在美国NIF (national ignition facility)装置中得到了广泛的应用,并使得诊断包瞄准的精度最高可达到 $25\ \mu\text{m}^{[1-2]}$ 。目前NIF公开的资料中关于诊断包瞄准指示器光学系统的阐述非常有限,因此神光-Ⅲ装置诊断包瞄准指示器光学系统必须立足于自主设计。该光学系统设计的难点在于目标靶只有 $\Phi 400\ \mu\text{m}$,因此为了保证瞄准精度,对瞄准指示光在靶心处的光斑质量及尺寸细微度提出了非常高的要求。另一方面,受到诊断包搭载平台(DIM)空间的限制要求,整个瞄准指示器具有小巧的体积,以便嵌入到诊断包内。此外为了在不同距离处能够对靶心实现精确瞄准,该指示器还必须具有变焦功能。基于以上分析,本文设计了一种用于神光-Ⅲ诊断包瞄准指示器的光学系统,该光学系统以半导体连续激光器作为光源,由单模光纤耦合输出一束近似于理想的基模高斯光束,利用变焦物镜实现基模高斯光束的连续变换,在不同距离的靶心上得到直径为几十微米的圆形光斑,满足了神光-Ⅲ诊断包高精度瞄准的要求。

1 瞄准指示器工作原理

瞄准指示器由激光器、光纤耦合与传输系统、变焦光学系统及位置调节装置组成。诊断包在瞄靶前必须离线预调,以保证2个指示器发出的激光束交汇于诊断包的观测轴线上,如图1所示。

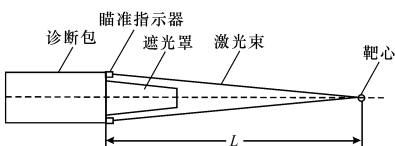


图1 瞄准示意图

Fig. 1 Diagram of alignment

假设诊断包要对准距离为 L 的靶心,则预调的方法如下:

将2套瞄准系统对称固定在诊断包上,其中一台通电后,发出一条红色的、方向性好的低功率指示光,通过瞄准调节装置指向目标靶心,对另外一束指示光进行调节,使其光斑与第一束光斑在目标靶心中心处重合。至此,2套瞄准指示器发出的光束已经交汇于诊断包观测轴线上的某一距离 L 处。离线预调完成之后,将诊断包与瞄准指示器光学系统的相对位置进行固定,通过诊断包搭载平台(DIM)进入靶室,在监视设备及DIM精密位置调

节结构的辅助下,如果2光束在诊断包观测轴线上的交点与靶室内实际靶心相重合,则说明瞄准成功。由于诊断包的工作距离不是一成不变的,所以针对不同工作距离必须重新进行离线预调,然后再进行实际瞄准。

2 瞄准指示器光学系统

2.1 初始结构

瞄准指示器光学系统由正、负光组组合而成,其结构如图2所示。变焦过程中,固定组与单模光纤输出端的相对位置 L 保持不变,通过移动中间负光组镜使光纤输出激光的束腰成像于像方不同距离处。

图2(a)的像距为无穷远,此时移动组与固定组之间的间隔为 d_0 。图2(b)是移动组移动距离 Δd 后的像距 l'_2 ,可由高斯公式求得:

$$\frac{1}{l'_1} - \frac{1}{l_1} = \frac{1}{f'_1} \quad (1)$$

$$l_2 = l'_1 + d \quad (2)$$

$$d = d_0 + \Delta d \quad (3)$$

$$\frac{1}{l'_2} - \frac{1}{l'_1 + d} = \frac{1}{f'_2} \quad (4)$$

由(1)~(4)式可以解得束腰的像从无穷远处到某一有限距离 B 处的移动量 Δd 。式中 f'_1 和 f'_2 分别为前组和后组的焦距, L 为物镜正组和光纤输出末端之间的距离^[3]。

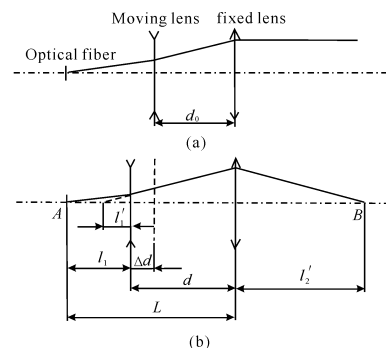


图2 变焦原理

Fig. 2 Principle of inner vario focus

2.2 高斯光束变换特性

在激光光学系统中,经常使用普通光学系统来实现高斯光束变换,比如倒置的望远镜用于激光扩束^[4]与准直,里斯特显微物镜用于激光会聚^[5]等。

由于本光学系统中激光由单模光纤耦合输出,故将输出光视为理想高斯光束,其束腰半径为 ω_{01} 。

图3为高斯光束通过瞄准指示器光学系统的变换示意图。其中变焦物镜前、后组透镜的焦距分别为 f'_1 和 f'_2 ,2组透镜的间隔为 d ,高斯光束经薄透镜物像变换公式为

$$1 - l'_i/f'_i = \frac{1 + l_i/f'_i}{(1 + l_i/f'_i)^2 + (z_{oi}/f'_i)^2} \quad (5)$$

$$z'_{oi}/f'_i = \frac{z_{oi}/f'_i}{(1 + l_i/f'_i)^2 + (z_{oi}/f'_i)^2} \quad (6)$$

式中: l_i 和 l'_i 分别为物方和像方光束束腰到第 i ($i=1,2$)透镜到相应主面的距离; z_{oi} 和 z'_{oi} 为高斯光束在物方和像方的瑞利距离。对变焦物镜的前负组和后正组依次应用(5)式和(6)式计算得到 $z_{o2} = z'_{o1}$ 。经过推导和整理后,得到像方束腰位置 l'_2 和瑞利距离 z'_{o2} 为

$$l'_2 = l'_f - \frac{(l_1 - l_f)f'_f}{(l_1 - l_f)^2 + z_{o1}^2} \quad (7)$$

将 $z_{o1} = \pi\omega_{01}^2/\lambda$, $z'_{o2} = \pi\omega_{02}^2/\lambda$ 代入(6)式中得到束腰聚焦比为

$$\gamma = \frac{\omega_{01}}{\omega'_{02}} = \frac{1}{f'_f} [(l_1 - l_f)^2 + z_{o1}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中: f'_f 为变焦物镜系统的合成焦距; l_f 和 l'_f 分别为物方和像方焦点位置。变焦时束腰聚焦比 γ 将连续变化,从而在像方束腰处得到大小不同的细小光斑。

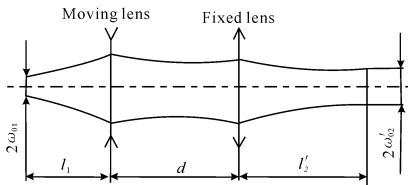


图3 高斯光束变换

Fig. 3 Transformation of Gaussian beam

3 设计实例

3.1 技术要求

神光-Ⅲ诊断包瞄准指示器光学系统技术要求是:

- 1) 工作波长 $\lambda=635\text{ nm}$;
- 2) 总长 L 小于100 mm,最大口径20 mm;
- 3) 可变焦,激光经变焦物镜后在(600~1 500) mm 处的光斑大小为(46~72) μm ,光斑大小连续可调。

由(8)式可知光束在像方束腰处的光斑大小 $2\omega'_{02}$ 主要取决于单模光纤的内芯径 $2\omega_{01}$ 及束腰聚焦比 γ 。由于本系统中 $z_{o1}^2 \ll (l_1 - l_f)^2$,所以 $\gamma \approx \beta$ (β 为光学系统的近轴放大率)。单模光纤的内径 $2\omega_{01}$ 已经确定,为了满足设计指标中对光斑大小的要

求,只需要在优化设计中光学系统近轴放大率 β 进行控制,利用 ZEMAX 中 Paraxial Gaussian Beam^[6]分析功能实时验证在指定像面处的光斑大小,从而为下一步优化提供参考。关于像差校正需要注意以下几点:

1) 本光学系统是一个激光光学系统,不校正色差;

2) 激光由单模光纤输出,光纤内芯径大约为 $9.2\ \mu\text{m}$,故可视作轴上物点。但是在校正单色像差时,为了获得更好的加工和装配性能,必须设置一定的轴外小视场来参与像差的校正;

3) 通光孔径的大小对高斯光束的变换会有影响,如果光孔的直径比高斯光束的光斑大得多,可认为光束不受限制,否则会产生衍射效应。研究表明时; $a/\omega > 1.5$ 时(a 为通光半径; ω 是按振幅减小 e 倍的水平确定的基模光斑半径),衍射效应可以忽略不计^[7]。综合考虑以上因素,确定本系统主要校正的像差是轴上点球差,轴上点球差对激光光学系统的影响相关文献都做了比较深入的研究,必须得到重视^[8]。同时对于激光光学系统来说,按照普通光波的像差平衡理论进行像差校正是可行的^[9]。

3.2 设计结果

经过光学设计软件 ZEMAX 反复优化得到光学设计结果,该变焦光学系统的变焦镜组是单片负透镜,其材料为 ZF6,固定镜组由正负分离的2片透镜组成,材料分别为 ZF6 和 ZK11。这样的结构使得轴上点及近轴区域内的球差得到较好的校正^[10]。图4为光学系统结构图,光纤端面与固定组最后一个面之间的距离为100 mm,其相对位置在整个使用过程中是固定的,通过调节移动负组使光纤输出激光的束腰成像在瞄准点上。

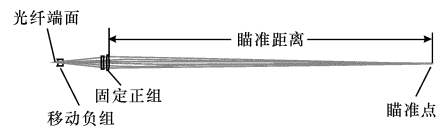


图4 光学系统

Fig. 4 Optical system

当瞄准距离为600 mm时,物距即光纤端面距离移动负组5.37 mm;瞄准距离为1 500 mm时,物距为20.36 mm。整个光学系统最大通光口径处为20 mm。该光学系统是一个激光光学系统,故采用点扩散函数(PSF)和波像差进行质量评价。图5(a)和(b)分别为物距5.37 mm和20.36 mm时,在0视场的点扩散函数(PSF)。图6(a)和(b)为不同物距时系统在0视场和轴外小视场的波像差。实验结

果表明,该物镜在不同物距上的球差及轴外小视场的彗差得到很好的校正并达到衍射极限。

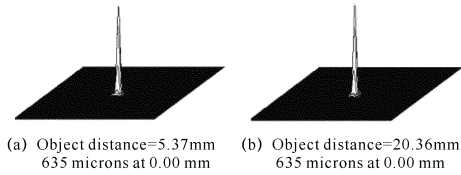


图5 点扩散函数

Fig. 5 Point spread function

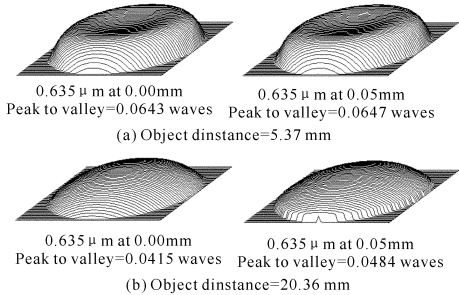


图6 波像差

Fig. 6 Wavefront aberration

当物距在(5.37~20.361)mm之间连续变化时,单模光纤输出激光将会聚于不同距离的瞄准点处,相应光斑大小与近轴放大率之间的关系见表1所示。

表1 光斑直径与近轴放大率的关系

Table 1 Spot diameter versus paraxial magnification

光纤束腰直径/ μm	9.2	9.2
焦距 f' /mm	48.29	107.02
瞄准距离/mm	600	1 500
近轴放大率	-5	-7.66
靶面光斑直径/ μm	46.2	71.9

由表1可知,当瞄准距离为(600~1 500)mm时,在瞄准点上相应光斑直径大小为(46.2~71.9) μm ,该结果在设计要求的(46~72) μm 范围之内,并且光斑直径的大小与束腰直径之间的比值与近轴放大率基本吻合。

4 结论

基于单模高斯光束通过变焦物镜传输特性设计的神光-Ⅲ 诊断包瞄准指示器光学系统采用3片普通玻璃透镜,在(0.6~1.5)m的调焦距离内得到(46.2~71.9) μm 的高质量瞄准指示光,满足了神光-Ⅲ 诊断包高精度瞄准的需要。此外,由于该激光光学系统具有光束质量好、可变焦、体积小、质量

小、成本低等优点,因此在其他高精度瞄准领域也具有广泛的应用和推广价值。

参考文献:

- [1] Le BRETON J P, ALOZY E, BOUTIN J Y, et al. Laser integration line target diagnostics first results [J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77 (10): 530-536.
- [2] ROSCH R, BOUTIN J Y, Le BRETON J P, et al. X-ray with grazing-incidence microscopes developed for the LIL program [J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(3): 3710-3714.
- [3] 安连生. 应用光学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2002.
AN Lian-sheng. Applied optics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002. (in Chinese)
- [4] 郝沛明,袁立银,李玮玮,等. 激光扩束器光学系统设计[J]. 光子学报, 2006, 35(6): 850-853.
HAO Pei-ming, YUAN Li-yin, LI Wei-wei, et al. Design of optical system for laser beam expander [J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35 (6): 850-853. (in Chinese)
- [5] 邱锦辉,廖廷娣. 高斯光束经李斯特物镜的聚焦特性[J]. 激光杂志, 1990, 11(5): 230-231.
QIU Jin-hui, LIAO Ting-di. Characteristics of Gaussian beam through List microscope objective [J]. Laser Journal, 1990, 11 (5): 230-231. (in Chinese)
- [6] CERAY J M. Introduction to lens design with practical ZEMAX example [M]. New York: Willmann-Bell Inc., 2003.
- [7] 张平,叶飞. 激光光学系统的设计[J]. 激光杂志, 1990, 11(1): 14-18.
ZHANG Ping, YE Fei. Design of laser optical system [J]. Laser Journal, 1990, 11(1): 14-18. (in Chinese)
- [8] 江恒,杨坤涛. 激光光学系统设计中球差对像方束腰的影响[J]. 激光与红外, 2006, 36(2): 128-130.
JIANG Heng, YANG Kun-tao. Effect of spherical aberration on the image beam waist in the design of laser optical system [J]. Laser and Infrared, 2006, 36 (2): 128-130. (in Chinese)
- [9] 李庆辉,拜丽萍. 激光光学系统的球差[J]. 光电工程, 2002, 29(2): 20-23.
LI Qing-hui, BAI Li-ping. Spherical aberration of laser optical system [J]. Opto-Electronic Engineering, 2002, 29(2): 20-23. (in Chinese)
- [10] 翟学锋,董晓娜,王国富,等. 水下变焦镜头的设计[J]. 应用光学, 2007, 28(4): 416-420.
ZHAI Xue-feng, DONG Xiao-na, WANG Guo-fu, et al. Design of underwater zoom lens [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28 (4): 416-420. (in Chinese)