

文章编号: 1002-2082(2008)03-0347-04

基于伽利略结构的二级激光扩束系统的设计

郑 盼, 杨应平, 郜洪云, 陶 艳

(武汉理工大学, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 针对高倍率扩束系统设计要求(即轴上和轴外像差都得到较好的校正),从三级像差理论出发,设计了一种新型的 $40\times$ 高倍率激光扩束系统。该系统是基于简单的伽利略结构并通过二级扩束系统来实现的,系统包括 4 片透镜,通过引入 2 个二次非球面、2 个反射镜或 1 个棱镜来折叠光路。利用 CODE V 光学设计软件给出了该系统的光学结构参数和外形结构图,并进行了像质评价。结果表明,该系统结构简单,设计难度小,成本较低,像质好,性能优良,是一种可以被广泛采用的高倍率激光扩束系统。

关键词: 光学设计;像差理论;高倍率;二级扩束;非球面

中图分类号: TN243

文献标志码: A

Design of two-level laser beam expander based on Galilean structure

ZHENG Pan, YANG Ying-ping, GAO Hong-yun, TAO Yan

(Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: A new laser beam expander with magnification of $40\times$ as well as on-axis and off-axis aberration corrected properly, was designed based on the third-order aberration theory. This system is realized by two-step beam expanding based on a simple Galilean structure. The beam path of the system is folded by four lenses, two second-order aspheric surfaces and two mirrors (or a prism). The optical mechanical parameters, outline drawing and image evaluation are given by the aid of optical design software CODE V. This system features simple design and structure, low cost, high image quality and good performance.

Key words: optical design; aberration theory; high-magnification; two-step beam expanding; aspheric surface

引言

目前,激光扩束系统在诸如激光雷达、全息照相、激光测距以及光通讯等领域有着十分广泛的应用,其主要作用是通过改善激光束的空间发散角,使光束的准直性进一步得到改善,并使其满足孔径要求^[1-2]。在激光发射系统中,为了增大作用距离,就要提高发射系统发散角的精度,可利用扩束器压缩空间发散角来实现。然而,发射系统精度要求越

高,对扩束器的扩束倍率要求也越高,这使得高倍率激光扩束系统的研究越来越重要。

高倍率激光扩束系统要求轴外和轴上像差都得到较好地校正,设计起来较困难。虽然反射型扩束系统可以做到较大的扩束倍率,也有相应的结构来解决中心遮拦以及能量损失的问题,如文献[3]中所述,但其制造加工以及装调仍然较困难。而折射型扩束系统设计、加工、调节都较简单,故一般选

收稿日期:2007-11-29; 修回日期:2007-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60471024)

作者简介:郑盼(1984—),女,湖北天门人,硕士研究生,主要研究方向是光学系统设计和光电仪器。

E-mail:panda61378358@163.com

用折射型扩束系统。

通常采用透镜系统设计高倍率激光扩束系统,传统的设计思想都是利用物镜组和目镜组分别校正像差,重新分配光焦度,通过增加透镜元件数目,引入双胶合面或非球面来实现高倍率扩束^[4]。这使得现有的一些高倍率扩束系统存在以下缺点:

- 1) 透镜元件数目多,激光束光能损耗变大;
- 2) 引入双胶合面,限制了扩束器的使用范围。

因为胶合面容易被激光破坏,在强激光下不能使用,实际上只能用于小功率的 He-Ne 激光器^[5];

3) 非球面的数目多,兼或采用高次非球面。这不仅增加了制造和加工难度,同时也增加了系统的成本^[6-7]。

此外,采用物镜组和目镜组分别校正像差,需要重新分配光焦度,在初始结构计算上较麻烦,增加了设计难度。

本文针对以上问题,从三级像差理论出发,采用多级扩束思想,用简单的伽利略结构作为子扩束系统,通过 2 级扩束实现高倍率扩束系统的设计。该系统是分别设计 2 个子扩束系统,然后将其对接,在子系统间添加 2 块平面反射镜或 1 个棱镜进行光路折回,缩短了筒长。该系统仅用了 4 片透镜和 2 个二次非球面实现了 40× 的扩束倍率,具有结构简单,设计难度较小和成本较低等优点。此外,带有二次非球面的伽利略结构制造加工技术已较成熟^[5],这在降低了设计难度和加工成本的同时增加了系统的实用性。

1 设计方案

1.1 子扩束系统的选型

折射型扩束系统有 2 种基本结构,即开普勒扩束器和伽利略扩束器,如下图 1(a)和 1(b)所示。其中,图 1(a)中前组透镜的后焦点 F'_1 与后组透镜的前焦点 F_2 重合;图 1(b)中前组透镜的前焦点 F_1 与后组透镜的前焦点 F_2 相重合。

实际应用中,除空间滤波必须采用开普勒结构外,一般采用伽利略结构,这种结构不仅结构简单,能缩小外形尺寸,而且在强功率激光束的场合,由于通过负目镜时光束发散,故可避免因正目镜会聚而产生的空气击穿现象和透镜的损伤^[8]。一般低倍率的扩束系统都采用伽利略结构来设计。此外,在光学系统中引入非球面可有效提高像质并减少透镜数量^[9-10],且带有非球面的伽利略扩束系统加工技术已较成熟。所以,本文设计的扩束系统子系统

采用的是伽利略结构,且最后一面为二次非球面。

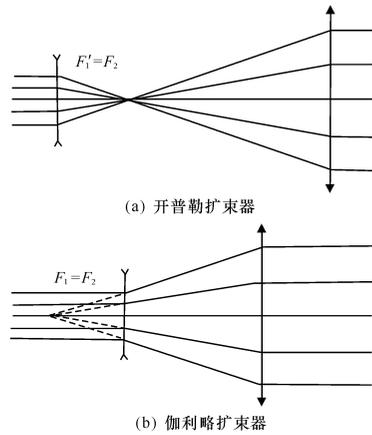


图 1 折射型扩束器基本结构

Fig. 1 Refractive beam expander

1.2 结构参数及非球面系数的求解

根据三级像差理论和扩束系统光学特性^[11],一级子系统的 2 个透镜都采用球差极小值公式:

$$W^\infty = W_0 - 2.35 \bar{u}_1 \quad (1)$$

式中 $\bar{u}_1 = f'/l$, l 为物距。选定材料,计算出材料对应波长的折射率,根据折射率可以求出 P_0 和 Q_0 。在规化条件下,单透镜结构参数与透镜弯曲系数 Q 的关系如下式^[11]:

$$\begin{cases} Q = Q_0 - \frac{W^\infty - W_0}{1.67} \\ c_2 = \frac{1}{r_2} = Q + 1 \\ c_1 = \frac{1}{r_1} = \frac{1}{n-1} + \frac{1}{r_2} \end{cases} \quad (2)$$

对于前面的负透镜,物距为无穷远,故 $W^\infty = W_0$,代入 (2) 式,可求得透镜曲率半径 $c_1 = \frac{1}{n-1} + Q_0 + 1$, $c_2 = Q_0 + 1$;对于第 2 个正透镜, $l = f'$,所以 $\bar{u}_1 = -1$,代入 (1) 式和 (2) 式,求出其 2 个面的曲率半径 $c_3 = \frac{1}{n-1} + Q_0 + \frac{402}{167}$, $c_4 = Q_0 + \frac{402}{167}$ 。最后进行焦距缩放和透镜加厚^[12],确定系统各个面的半径、透镜厚度和光学间隔 d 。

子扩束系统的球差系数为

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \sum S_{1球} + S'_{1非} \\ \sum S_{1球} &= \sum hp \\ S'_{1非} &= h_4^4 K \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: h 为各个面光线的入射高度; h_4 为非球面

面上的光线入射高度。且有:

$$p = \left(\frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \right)^2 \Delta \frac{u}{n}, k = -\frac{e^2}{R_4^3} \Delta n \quad (4)$$

式中: R_4 为非球面顶点曲率半径; e^2 为二次曲面的偏心率。要求该子扩束系统球差校正为零^[11-12], 则必须满足 $S_1 = 0$, 利用(3)式和(4)式, 得出:

$$e^2 = \frac{R_4^3}{h_4^4 \Delta n} \sum S_{1球} = \frac{R_4^3}{h_4^4 \Delta n} \sum h p \quad (5)$$

按照(1)式和(2)式求出透镜各个面的曲率, 然后进行相应的焦距缩放以及透镜加厚, 得出结构参数(r, d, n), 再进行光线追迹, 计算出边缘光线在每个面上的入射角 u , 出射孔径角 u' 和各个面的 h , 代入(4)式, 求出每个面的 p 值, 代入(5)式即可以求出子系统非球面偏心率 e^2 。

按照上述方法可以求出 2 个子扩束系统的结构参数和非球面偏心率 e_1^2 和 e_2^2 , 只要将这 2 个子系统合理对接, 就可得到所需要的高倍率扩束系统。

2 设计实例

本文以 Continuum 公司的 Nd : YAG 激光器为例来设计扩束系统, 光束发散角为 0.5 mrad, 光束直径为 4 mm。材料均选用 K9 玻璃, 对 1.064 μm 波长, 其折射率 n 为 1.506 194。为获得 40 \times 的扩束倍率, 这里取一级子扩束系统的倍率 $m_1 = 5$, 二级子系统的扩束倍率 $m_2 = 8$ 。

取一级扩束系统透镜 1 的焦距 $f'_1 = -14.5$ mm, 依次可以计算出系统所用的 4 个透镜的光焦度, 然后计算出系统的结构参数。由于反射镜和棱镜在激光器系统中不会影响该系统成像质量, 所以, 在 2 个扩束系统之间添加 2 块平面反射镜或者 1 个棱镜可实现光路折叠, 获得较紧凑的结构形式。光路折叠后, 最小筒长可以缩短至 302 mm, 系统结构图如图 2 和图 3 所示。

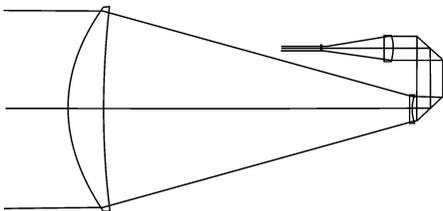


图 2 用 2 块反射镜实现折叠的光路图

Fig. 2 Beam path of folding system with two mirrors

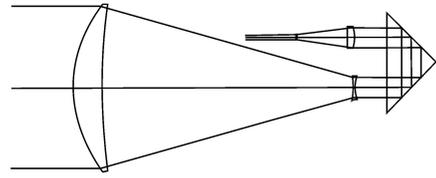


图 3 用棱镜实现折叠的光路图

Fig. 3 Beam path of folding system with a prism

通过 CODEV 软件分别优化 2 个子扩束系统, 然后对接并整体优化, 得出该系统最终结构参数如下表 1 所示。

表 1 扩束系统的结构参数

Table 1 Structure parameters of beam expander system

Surface	Type	Radius/mm	Thickness/mm	Glass	Conic constant
STO	Sphere	-10.465 2	0.6	K9	
2	Sphere	25.056 281	51.193 14		
3	Sphere	-146.801 941	8.014 477	K9	
4	Asphere	-29.899 79	3		-0.392 4
5	Sphere	-28.369 732	1.5	K9	
6	Sphere	69.567 8	252.433 828		
7	Sphere	-559.822 573	28.712 471	K9	
8	Asphere	-126.819 778			-0.415 3

由于激光扩束系统是小像差系统, 所以一般用波像差和光学传递函数(MTF)来评价系统的成像质量。视场 0 mrad, 0.35 mrad 和 0.5 mrad 的波像差和系统 MTF 传递函数曲线分别如图 4 和图 5 所示。图 4 中相应的评价参数如表 2 所示。从图 4 和表 2 可以看出, 该系统在 0.5 mrad 视场内, 波像差均小于 $\lambda/50$; 从图 5 可看出, 各个视场的传递函数曲线都非常接近衍射极限。综上所述, 该扩束系统达到了较高的成像质量。

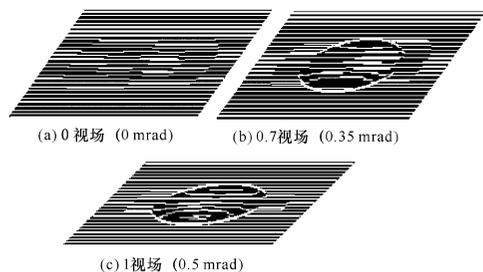


图 4 不同视场波像差

Fig. 4 Wave aberration at different FOV

表2 各个视场波像差值

Table 2 RMS and P-V of three FOVs

视场/mrad	RMS/ λ	P-V/ λ
0	0.000	0.001
0.35	0.002	0.009
0.5	0.002	0.012

注:P-V(即peak to valley)代表波像图的波峰到波谷的值,其单位为波长数。

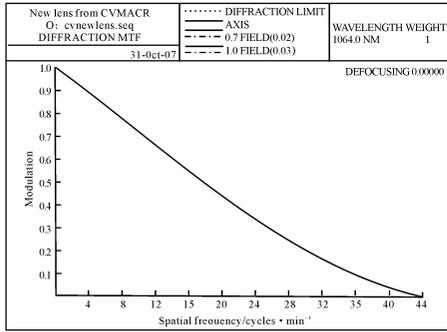


图5 调制传递函数曲线

Fig. 5 Curve of modulation transfer function

3 结论

本文采用简单的带有二次非球面的伽利略结构作为子系统,通过2级扩束来实现激光束的高倍率扩束。该系统仅用了4片透镜和2个二次非球面来实现40×的扩束倍率。设计结果表明:系统成像质量接近衍射极限。此外,该系统还具有结构简单,设计难度小,成本低的优点,是一种可以被广泛采用的高倍率激光扩束系统。

参考文献:

[1] GENTRY B M, CHEN H, LI S X. Wind measurements with 355 nm molecular Doppler lidar [J]. Optics Letters, 2000, 25(17): 1231-1233.

[2] SHEALY D L, CHAO S H. Geometric optics-based design of laser beam shapers [J]. Optical Engineering, 2003, 42(11): 3123-3138.

[3] 孔祥蕾, 郝沛明. 消除中心遮拦的反射式激光扩束新方案[J]. 量子电子学报, 2002, 19(3): 205-209.

KONG Xiang-lei, HAO Pei-ming. New method to remove central shade for reflecting laser beam expan-

der [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2002, 19(3): 205-209. (in Chinese)

[4] 郝沛明, 袁立银, 李玮玮, 等. $\Phi 300$ 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 $\Phi 300$ laser beam expander [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006, 35(6): 850-853. (in Chinese)

[5] 郝沛明, 纪玉峰, 冯玉萍. 伽利略非球面透镜扩束器[J]. 量子电子学报, 1997, 11(4): 380-384.

HAO Pei-ming, JI Yu-feng, FENG Yu-ping. Galilean beam expander with an aspherical lens [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1997, 11(4): 380-384. (in Chinese)

[6] GAO Hong-yun, FU Ru-lian, ZHUO Ran-ran. Novel high magnification zoom laser beam expander. Optoelectronics Letters, 2006, 2(6): 39-41.

[7] 郝洪云, 熊涛, 杨长城. 中波红外连续变焦光学系统[J]. 光学精密工程, 2007, 15(7): 1038-1043.

GAO Hong-yun, XIONG Tao, YANG Chang-cheng. Middle infrared continuous zoom optical system [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(7): 1038-1043. (in Chinese)

[8] 樊丽娜, 朱爱敏, 刘琳, 等. 激光扩束望远镜的光学设计[J]. 红外, 2007, 28(8): 20-22.

FAN Li-na, ZHU Ai-min, LIU Lin, et al. Optical design of laser beam expanding telescope [J]. Infrared, 2007, 28(8): 20-22. (in Chinese)

[9] 张良. 中波红外变焦距系统的光学设计[J]. 应用光学, 2006, 27(1): 32-34.

ZHANG Liang. Optical design for middle infrared zoom system [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(1): 32-34. (in Chinese)

[10] 王灵杰, 张新, 杨皓明, 等. 超紧凑型红外折反式光学系统设计[J]. 应用光学, 2007, 28(3): 288-291.

WANG Ling-jie, ZHANG Xin, YANG Hao-ming, et al. Design of a compact infrared catadioptric system [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(3): 288-291. (in Chinese)

[11] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.

ZHANG Yi-mo. Applied optics [M]. Beijing: Press of Mechanical Industry, 1982. (in Chinese)

[12] JOSEPH M G. Lens design [M]. Richmond: Willman-Bell Inc., 2002.