

# 激光变倍准直扩束系统设计

王培芳 向阳 高健 王继凯

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 激光准直扩束系统可应用在激光测距,激光切割,空间光学激光干涉仪等各个领域。其主要作用是通过改善激光束的空间发散角,提高光束的准直性,使激光束达到对孔径的要求。基于无焦变倍原理运用Zemax软件模拟设计了一激光准直扩束系统,入射激光波长为1064 nm,发散角小于5 mrad,入射直径为1 mm,准直扩束系统的扩束比4~24倍连续可调,可实现压缩光束的发散角(出射光发散角可压缩至0.208 mrad),扩大光斑尺寸,达到对激光准直和扩束的目的。不同倍率下波像差最大均方根(RMS)值为 $0.1769\lambda$ ,均小于 $\lambda/4$ ,满足像质评价要求。此设计结构简单,易于加工装调,具有较高的实际应用价值。

**关键词** 光学设计; 准直扩束; 无焦变倍; Zemax; 激光

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0922007

## Design of Collimating and Beam Expanding Laser System

Wang Peifang Xiang Yang Gao Jian Wang Jikai

*School of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Engineering,  
Changchun, Jilin 130022, China*

**Abstract** Collimating and beam expanding laser system can be used in laser distance, laser cutting, space optics, laser interferometer and other fields. The main function of this system is aimed to reach the requirements of the system aperture through reducing the spatial divergence angles of the laser beam and then improving the beam collimation. Based on the principle of non-focus zoom and with the help of analog of Zemax software, a collimating and beam expanding system is introduced: the wavelength of incident laser is 1064 nm; the value of divergence angle is less than 5 mrad; the diameter of incidence is 1 mm; the ratio of beam expanding is continually 4~24, which can help to reduce the beam divergence angle (the minimum angle is 0.208 mrad) and expand the spot size. With different ratios of the system, the root mean square (RMS) value of maximum wave aberration is  $0.1769\lambda$  (less than  $\lambda/4$ ), which meets the requirements for image quality evaluation. The advantages of this system are simple, easily installed and adjusted, and also widely used in different projects.

**Key words** optical design; collimating and beam expanding; afocal zoom; Zemax; laser

**OCIS codes** 220.2740; 120.4570; 080.2740

## 1 引言

由于激光具有光能量集中、方向性和单色性好等特点,激光准直扩束系统<sup>[1]</sup>被广泛的应用在激光测距<sup>[2]</sup>,激光切割,空间光学,激光干涉仪,激光制导等各个领域。激光器输出方向性极好的细激光束,有着0.2~5 mrad极小发散角<sup>[3]</sup>;在精密测量中,还需采取办法进一步提高其准直性,改变激光光斑大小。激光准直扩束系统能进一步压缩发散角和扩大光斑尺寸。而目前为止大扩束比的准直扩束系统扩束比为定值,且大都采用反射式扩束系统<sup>[4]</sup>,反射式扩束系统采用非球面反射镜<sup>[5]</sup>的结构,具有加工难度大,不易调整等特点。目前还有一种利用衍射型台阶化面型近似二次非球面的激光扩束方案<sup>[6]</sup>,对典型的束腰半径为2 mm的高斯光束,实现了2.8倍的理论扩束比,这种方法采用了近似非球面的衍射型元件,加工难度大,理论计算复杂,不易实现。本文基于无

收稿日期: 2015-05-26;收到修改稿日期: 2015-06-15

作者简介: 王培芳(1988—),女,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: 841620983@qq.com

导师简介: 向阳(1968—),男,博士,教授,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: xyciom@163.com(通信联系人)

焦变倍原理设计了一激光准直扩束系统,结构简单,易于加工装调,具有较高的实际应用价值。

## 2 无焦变倍准直扩束原理

无焦变倍准直系统是由前固定组、变倍组和补偿组<sup>[7]</sup>透镜组合而成。由于系统是非成像系统,因此无需后固定组。在三组元透镜组合<sup>[8]</sup>而成的无焦变倍准直扩束系统中,当变倍组移动时,其放大率会有所变化。这时若通过移动补偿组,使变倍组的像点恰与补偿组的前焦点重合,则此时的光学系统仍然是一个无焦系统<sup>[9]</sup>,并且出射光束口径会通过这两组透镜的移动而发生变化。一般情况,三组元透镜组可采用“正—负—正”、“负—正—负”或“负—负—正”等形式。与“负—正—负”和“正—负—正”相比,“负—负—正”具有组合长度短和可快速变倍的优点。下面详细介绍“负—负—正”结构的无焦变倍原理。系统结构如图1所示:其中 $L_1$ 为前固定组; $L_2$ 为变倍组; $L_3$ 为补偿组。 $d_1$ 为前固定组 $L_1$ 与变倍组 $L_2$ 之间的间隔; $d_2$ 为变倍组 $L_2$ 与补偿组 $L_3$ 之间的间隔; $d_{13}$ 为前固定组 $L_1$ 与补偿组 $L_3$ 之间的间隔<sup>[10]</sup>。

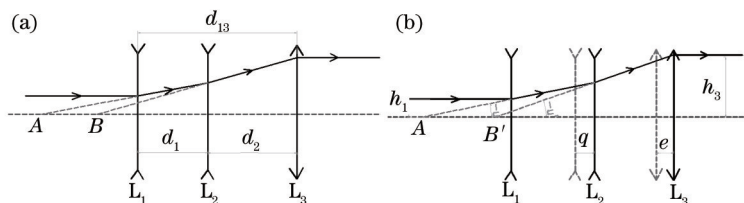


图1 无焦变倍扩束系统原理图。(a)定焦系统;(b)变焦系统

Fig.1 Afocal zoom beam expander system schematic. (a) Fixed focus system; (b) varifocal system

在图1(a)中,系统已然是一个倍率一定的无焦系统,其中,A点是前固定组 $L_1$ 的像点,也是前固定组 $L_1$ 的像方焦点、变倍组 $L_2$ 的物点;B点是变倍组 $L_2$ 的像点,也是补偿组 $L_3$ 的物点,它刚好和 $L_3$ 的物方焦点重合。在图1(b)中,通过移动变倍组 $L_2$ ,可实现变倍,此时变倍组 $L_2$ 的像点移动到了 $B'$ 点。

设变倍组 $L_2$ 相对于起始位置的移动量为 $q$ ,补偿组 $L_3$ 相对于起始位置的移动量为 $e$ ,则在满足无焦系统的前提下,变倍组 $L_2$ 的垂轴放大倍率可根据牛顿公式用下式表述:

$$m_2(q) = -\frac{f_2'}{x} = -\frac{f_2'}{-f_1' + d_1 + q - f_2'} = \frac{f_2'}{f_1' + f_2' - (d_1 + q)}, \quad (1)$$

式中 $q$ 在变倍组 $L_2$ 向右移动为正、向左移动为负。

由变倍组 $L_2$ 的物象关系可得

$$\frac{1}{-[f_3' - e - (d_2 - q)]} - \frac{1}{-(-f_1' + d_1 + q)} = \frac{1}{f_2'}. \quad (2)$$

化简上式得到补偿组 $L_3$ 的移动量

$$e = \frac{f_1' f_2' - (d_1 + q) f_2'}{f_1' + f_2' - (d_1 + q)} + f_3' - d_2 + q, \quad (3)$$

式中 $e$ 在补偿组 $L_3$ 向右移动为正、向左移动为负。

令入射光的半径为 $h_1$ ,出射光的半径为 $h_3$ ,则

$$\begin{cases} h_1 = (-f_1') \tan(-u) = f_1' \tan u \\ h_3 = f_3' \tan(-u') = -f_3' \tan u' \\ \frac{\tan u'}{\tan u} = \frac{1}{m_2(q)} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $u$ 是变倍组 $L_2$ 的物方孔径角; $u'$ 是变倍组 $L_2$ 的像方孔径角。

令系统的扩束比为 $M$ ,则

$$M = \frac{h_3}{h_1} = -\frac{f_3'}{f_1' m_2(q)}. \quad (5)$$

根据(1)式、(3)式和(5)式,便可得到变倍组 $L_2$ 与补偿组 $L_3$ 相对前固定组 $L_1$ 的移动规律。若 $f_1'$ 、 $f_2'$ 、 $f_3'$ 、

$d_1$ 、 $d_2$  已知的情况下,将设计要求的扩束比  $M$  代入到(5)式,即可得出  $m_2(q)$ ;再把  $m_2(q)$  代入到(1)式,便可得出变倍组  $L_2$  的移动量  $q$ ;最后将  $q$  值代入到式(3)中,便得出了补偿组  $L_3$  的移动量  $e$ 。当扩束倍率变化时,重复上述过程,便可得出变倍组  $L_2$  与补偿组  $L_3$  相对于前固定组  $L_1$  的移动量,从而设计出满足变倍比的激光变倍准直扩束系统。

### 3 激光变倍准直扩束系统的参数指标:

激光波长:  $\lambda = 1064 \text{ nm}$  ;

入射激光发散角:小于  $5 \text{ mrad}$  ;

入射激光束直径:  $D = 1 \text{ mm}$  ;

系统扩束倍率:4~24倍连续可调;

#### 3.1 根据无焦变倍原理,选择起始状态,并计算 $f'_1$ 、 $f'_2$ 、 $f'_3$ 、 $d_1$ 、 $d_2$ 值

以最小扩束比  $M=4$  为起始状态,并根据实验室已有透镜,选取  $f'_1 = -28.42$ 、 $f'_2 = -24.45$ 、 $f'_3 = 51.34$ 。由(5)式可知,  $M = -\frac{f'_3}{f'_1 m_2} = -\frac{51.34}{-28.42 m_2} = 4$ ,解得  $m_2 = 0.45$ 。再由高斯公式物象关系公式  $l_2 = \frac{1 - m_2}{m_2} f'_2 = -(-f'_1 + d_1)$ ,  $l'_2 = (1 - m_2) f'_2 = -(f'_3 - d_2)$ ,将  $m_2$ 、 $f'_1$ 、 $f'_2$ 、 $f'_3$  代入解得  $d_1 = 1.46$ 、 $d_2 = 37.88$ 。

综上,以扩束比  $M=4$  为起始状态的各组员参数为:  $f'_1 = -28.42$ 、 $f'_2 = -24.45$ 、 $f'_3 = 51.34$ 、 $d_1 = 1.46$ 、 $d_2 = 37.88$ 。

当  $M=8$  时,根据(5)式可求得,  $m_2(q) = 0.26$ ,再根据(1)式,将  $m_2(q)$  的值代入得到变倍组  $L_2$  的移动量  $q = 53.95$ ,再通过(3)式得到补偿组  $L_3$  的移动量  $e = 48.48$ 。因此,  $d'_1 = d_1 + q = 55.41$ 、 $d'_2 = d_2 + e - q = 32.41$ 。

重复上述过程,可得到扩束比4~24倍率时的  $d_1$ 、 $d_2$  的值,如表1所示。

表1 不同扩束比时的  $d_1$ 、 $d_2$  值

Table 1  $d_1$ ,  $d_2$  values at different beam expander ratios

	$M=4$	$M=8$	$M=12$	$M=16$	$M=20$	$M=24$
$d_1$	1.46	37.88	109.56	163.50	218.80	273.13
$d_2$	37.88	32.41	30.57	29.65	29.09	28.72

采用理想光学系统仿真结构如图2所示。

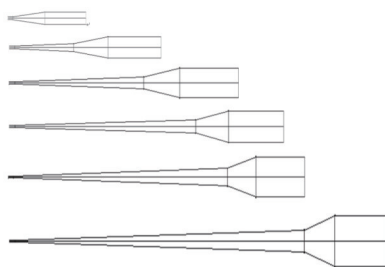


图2 光学仿真结构图

Fig.2 Optical simulation chart

通过上述分析所得的数据可知,由上述计算所得的各组员参数作为初始结构数据是可以实现扩束比为  $M=4\sim 24$  的激光变倍准直扩束系统的设计目的。

#### 3.2 变倍扩束系统设计

用实际透镜来替换理想透镜,并经过反复优化,并进行了加工样本的校对,且给出了机械安装口径余量后得到最终结果数据如表2所示,  $M=4$ 、 $M=8$ 、 $M=12$ 、 $M=16$ 、 $M=20$ 、 $M=24$  的光学结构图和在  $50 \text{ m}$  处的接收面光线分布如图3所示。由于激光变倍扩束系统属于小像差系统,一般用波像差对成像质量进行评价。由于是扩束系统,在整个光学系统后端加入一个理想透镜对其聚焦,观察其波像差,对其进行像质评价。各倍率下的波像差如图3所示。

表2 激光变倍准直扩束系统数据

Table 2 Zoom collimated laser beam expander data

	Radius	Thickness	Glass
	Infinity	5.000	
	7.600	4.000	Zf1
	5.485	2.600	
	5.237	9.400	K9
	1.710	Variable1	
	-3279.413	5.000	Zf1
	22.509	Variable2	
	97.615	15.000	K9
	-52.848	50000.000	

$M$	4	8	12	16	20	24
Variable1	1.002	49.61	97.876	145.515	192.261	237.869
Variable2	53.694	40.613	36.273	34.158	32.955	32.217

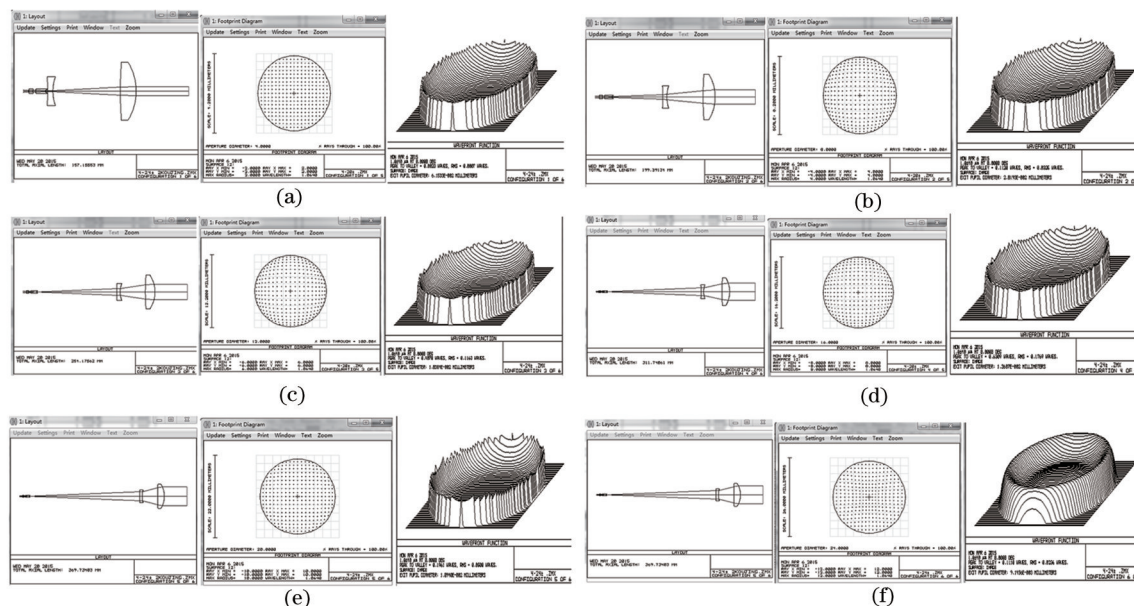


图3 不同倍率时的三元透镜位置,接收面光斑以及波像差。(a)  $M=4$ ; (b)  $M=8$ ; (c)  $M=12$ ; (d)  $M=16$ ; (e)  $M=20$ ; (f)  $M=24$

Fig.3 Tripipellant lens position, receiving surface and wavefront aberration spot at different magnifications.

(a)  $M=4$ ; (b)  $M=8$ ; (c)  $M=12$ ; (d)  $M=16$ ; (e)  $M=20$ ; (f)  $M=24$

由图可知,不同扩束倍数下的激光光束光斑均匀,最大均方根(RMS)值为  $0.1769\lambda$ ,波像差均小于  $\lambda/4$ ,满足像质评价要求。

### 4 光学系统公差分析

运用Zemax软件对光学系统进行公差分析,在给定一定公差的基础上,蒙特卡罗分析的20个随机镜头中,90%镜头在输出光线角度像差基于Y方向的余弦值小于0.00057271,50%镜头在输出光线角度像差基于Y方向的余弦值小于0.00042847,10%镜头在输出光线角度像差基于Y方向的余弦值小于0.00021887。系统的公差是合理的。如果让光学系统的性能继续提高,需要重复加紧分析报告中敏感的公差。确定的公差参数进行整理如表3所示。

表3 光学系统公差参数表

Table 3 Optical system tolerance parameters

Tolerance	Front R	Back R	Thickness	Decenter X	Decenter Y	Tilt X	Tilt Y
Lens 1	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.1$	$\pm 0.1$
Lens2	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.1$	$\pm 0.1$
Lens3	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.1$	$\pm 0.1$
Lens4	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.05$ mm	$\pm 0.1$	$\pm 0.1$

## 5 实验结果

图4即为激光准直扩束系统实物图。

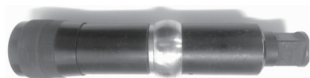


图4 激光准直扩束系统实物图

Fig.4 Collimated laser beam expander physical map

由于1064 nm激光不可见,为了实验简单直观明了采用635 nm的可见指示激光在短距离内进行实验,由于在短距离内两不同波长的激光的扩束倍数近似相等,所以可以用指示激光近距离的光斑大小反应1064 nm激光的扩束比。图5即为635 nm指示激光经过此准直扩束系统在不同倍率下50 mm处的激光光斑大小。

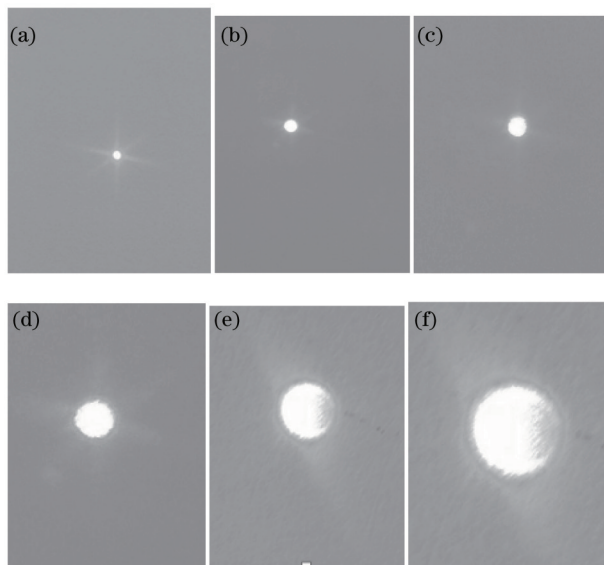


图5 不同倍率下指示激光光斑大小。(a)  $M=4$ ; (b)  $M=8$ ; (c)  $M=12$ ; (d)  $M=16$ ; (e)  $M=20$ ; (f)  $M=24$

Fig.5 Indicate laser spot size at different magnifications. (a)  $M=4$ ; (b)  $M=8$ ; (c)  $M=12$ ; (d)  $M=16$ ; (e)  $M=20$ ; (f)  $M=24$

## 6 结 论

首先说明了变焦光学系统与无焦变倍原理的区别,基于无焦变倍原理设计了一种激光变倍准直扩束系统,扩束比在4~24倍内可以连续变化。此系统结构简单,未采用非球面也达到了激光扩束系统的像质要求。设计结构简单,镜片数少,选用材料普通廉价,故可用于便携式短距离激光测距,激光干涉仪等低功率激光器领域。通过调节变倍扩束系统的扩束比,得到适合的出射激光的发散角和光斑大小。并对设计的系统进行了公差分析,在给定公差的基础上系统90%以上镜头在输出光线角度像差基于Y方向的余弦值小于0.0006,公差较松,便于实际加工。

### 参 考 文 献

- 1 Li Liangyu, Li Changchun, Li Yinzhun, *et al.*. Design of laser expanding systems for multi-wave length[J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(8): 714-716.  
李良钰,李常春,李银柱,等.多波长激光扩束系统的设计[J].中国激光,2001,28(8):714-716.
- 2 Wang Li, Xu Antao, Wang Ying. Development of laser and laser ranging[J]. Journal of Jiaozuo University, 2007, 21(4): 55-56.  
王 丽,许安涛,王 瑛.激光器的发展及激光测距的方法[J].焦作大学学报,2007,21(4):55-56.
- 3 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.  
郁道银,谈恒英.工程光学[M].北京:机械工业出版社,2006.
- 4 Kong Xianglei, Hao Peiming. Optical design of zoom beam system[J]. Applied Optics, 2001, 22(5): 7-11.  
孔祥蕾,郝沛明.变焦扩束系统的光学设计[J].应用光学,2001,22(5):7-11.

- 5 Jia Yong, Gao Yunguo. A switch zoom design for reflective laser beam expander[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022003.  
贾 勇, 高云国. 反射式激光扩束器的切换变倍技术[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1022003.
- 6 Gong Hailong, Liu Zhihui, Li Guojun, *et al.*. Fidelity study of diffractive laser beam expander[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0902006.  
龚海龙, 刘志辉, 李国俊, 等. 衍射型激光扩束器的保真度研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0902006.
- 7 Sun Changku. Laser Measurement Technology[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2001.  
孙长库. 激光测量技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2001.
- 8 Xiao Zexin. Engineering Optics Design[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008.  
萧泽新. 工程光学设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- 9 Liu Huanbao, An Zhiyong, GaoYuhan, *et al.*. Design of a varifocal beam expander system[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2010, 33 (4): 19-20.  
刘焕宝, 安志勇, 高瑀含, 等. 一种激光变焦扩束光学系统设计[J]. 长春理工大学学报, 2010, 33(4): 19-20.
- 10 Li Bo. Optical design of target range UV telescope system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1016001.  
李 博. 靶场紫外望远系统光学设计[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1016001.

栏目编辑: 韩 峰