

多级共焦抛物面反射式激光扩束系统光学设计

陈和¹, 孙雨婷¹, 檀望舒^{1*}, 陈思颖¹, 张寅超¹, 郭磐¹, 王立福¹, 蒋广翔¹, 李鑫^{2**}¹北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;²中国人民解放军军事医学科学院, 北京 100850

摘要 激光扩束系统可以扩大激光光束直径、压缩空间发散角,被广泛应用在激光测距、大气探测等领域。为了压缩激光扩束系统的外形尺寸,减小出射与入射光束之间的距离,设计了一种由多个共焦离轴抛物面镜组构成的多级反射式激光扩束系统。根据设计指标,计算了多级反射式激光扩束系统的系统参数,使用ZEMAX光学设计软件对单组扩束系统和两个多级扩束系统进行了仿真和公差分析,对比了单组扩束系统和多级扩束系统的尺寸和公差。结果表明,在比较宽松的公差范围内,多级扩束系统能够在更短距离上的高倍激光扩束。

关键词 光学设计; 激光扩束系统; 多级; 反射式; 离轴抛物面镜

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1322001

Optical Design of Multi-Stage Confocal Parabolic Reflection Laser Beam Expander

Chen He¹, Sun Yuting¹, Tan Wangshu^{1*}, Chen Siying¹, Zhang Yinchao¹, Guo Pan¹,
Wang Lifu¹, Jiang Guangxiang¹, Li Xin^{2**}¹Key Laboratory of Photoelectric Imaging Technology and Systems, Ministry of Education, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;²Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100850, China

Abstract The laser beam expander, which can expand the beam diameter and compress the divergence angle, is widely used in laser ranging, atmospheric detection, and other fields. In order to compress the external dimensions of the laser beam expander and reduce the distance between the output beam and the input beam, a multi-stage reflection laser beam expander composed of multiple confocal off-axis parabolic mirrors is proposed in the paper. According to the design requirements, the system parameters of the multi-stage reflection laser beam expanders are calculated. A single-group beam expander and two multi-stage beam expanders are simulated, and their tolerances are analyzed by ZEMAX optical design software. The dimensions and tolerances of the single-group beam expander and the multi-stage beam expanders are compared. The results show that the multi-stage beam expander can achieve high-magnification laser beam expansion in a shorter distance within a relatively loose tolerance range.

Key words optical design; laser beam expander; multi-stage; reflection; off-axis parabolic mirrors

1 引言

激光具有能量集中、方向性好、单色性好的特点^[1],被广泛应用在激光测距、大气探测及空间光学各个领域^[2-4]。但一方面,激光器出射的激光存在一定的发散角^[5],不能满足远距离传输的要求;另一方面,在一些应用场景中需要改变激光束在目标位置的光斑尺寸,所以需要激光光束进行准直扩束^[6]。

目前广泛应用的激光扩束系统有两类,一类是透射式激光扩束系统,另一类是反射式激光扩束系统。对于透射式激光扩束系统,色差是不可避免的,而且随着透镜通光孔径的增大,球差、慧差等与透镜口径有关的像差也会增大,需要通过设计复杂结构来校正各种像差^[7],而且由于适用于红外波段、紫外波段的光学透镜材料较少,透射式光学系统更适合口径较小、波段不宽的情况。另一方面,反射式激光扩束系统能够通过

收稿日期: 2021-12-10; 修回日期: 2022-01-03; 录用日期: 2022-01-13

基金项目: 中国博士后科学基金(2020M680369)

通信作者: *tanws@bit.edu.cn; **285454981@qq.com;

镀膜获得很高的反射率^[8],也可以通过引入非球面消除系统中的球差等像差^[9],更适合大口径、宽波段的应用场景。

反射式激光扩束系统包括同轴^[10]和离轴^[11]两种结构。常用的同轴系统是无焦卡塞格林系统,其光学结构较短,系统中无实焦点,避免了聚焦造成的空气击穿。离轴扩束系统有离轴卡塞格林系统和离轴格里高利系统等,可以避免中心遮拦问题,进而提高光能利用率。由于常用的离轴扩束系统激光光路的折转角度较小,主副镜之间水平距离较大,装调所需的镜筒很长,不适用于一些需要在很短的水平距离内进行扩束的情况。此外,受到离轴抛物面镜加工工艺的限制,离轴扩束系统通常适用于小口径、离轴量不大的扩束系统中。

本文提出了一种多级共焦抛物面反射式激光扩束系统的设计方法,该方法首先基于三级像差理论确定了单组扩束系统的初始结构,消除单组扩束系统的球差、慧差等像差,该结构无中心遮拦,能够实现两次激光光路的 90° 折转。同时,利用多个单组扩束系统构成多级扩束系统可减小主镜的离轴量,有利于在短距离内实现高倍扩束,实现系统的小型化。在多级扩束系统中,通过调节各级扩束系统的位置关系可以改变出射激光与入射激光之间的距离,提高系统的灵活性与实用性。

2 多级扩束系统设计原理

本文所设计的多级反射扩束系统由多组共焦抛物面反射扩束系统串联而成,本节将介绍单组扩束系统的工作原理,并以两级扩束系统为例,介绍多级共焦抛物面反射扩束系统的工作原理和优势。

2.1 单组扩束系统

单组扩束系统由共焦同轴放置的两抛物面反射镜组成^[12],一束平行于光轴的光入射到抛物面反射镜副镜上,激光光路旋转 90° 后入射光进入抛物面反射镜主镜表面,再旋转 90° 后激光平行于光轴射出,其原理如图 1 所示。图中 f 和 R 分别为抛物面反射镜的焦距和顶点处曲率半径, h 为视场离轴量, d 为出射光束与入射光束之间的距离, O 为顶点,数字 1, 2 分别代表主镜与副镜。

二次曲面的标准面的矢高为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}}, \quad (1)$$

式中: c 为曲率(半径的倒数); r 为镜头单位下的径向坐标; k 为圆锥系数。

在式(1)中,当 $k = -1$ 时,二次曲面的面型为抛物面。抛物面与其任一截平面的交线为抛物线,其顶点处的曲率半径 R 与焦距 f 满足以下关系:

$$R = 2f. \quad (2)$$

该抛物线的方程与焦距 f 有关,表达式为

$$y^2 = 4fx. \quad (3)$$

对于满足式(2)、(3)的抛物面反射镜,当入射激光在其焦点正上方,即入射点与抛物面顶点的水平距离

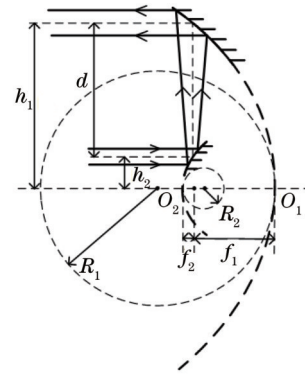


图 1 共焦抛物面反射扩束镜原理图

Fig. 1 Principle diagram of confocal parabolic reflection beam expander

为 f 时,根据式(3)计算得出射光高度 h (即视场离轴量)为

$$h = 2f. \quad (4)$$

图 1 中主镜与副镜共焦同轴,二者顶点距离 O_1O_2 为焦距 f_1 与 f_2 之和,其表达式为

$$O_1O_2 = f_1 + f_2. \quad (5)$$

若激光入射位置在抛物面反射镜焦点正上方,且主镜与副镜的位置关系满足式(5),激光光路即可实现 90° 的折转,该系统的扩束倍数 M 为

$$M = \frac{f_1}{f_2}. \quad (6)$$

根据式(6),当入射激光的束腰半径为 r_0 时,经该单组扩束系统扩束后,出射激光的束腰半径 r_1 为

$$r_1 = Mr_0 = \frac{f_1}{f_2} r_0. \quad (7)$$

在该单组扩束系统中,激光在主、副镜上的入射点均在焦点的正上方,激光光路在主镜和副镜上均实现 90° 折转,根据式(4)计算出射激光与入射激光之间的距离 d ,即

$$d = h_1 - h_2 = 2f_1 - 2f_2. \quad (8)$$

综上所述,当两抛物面反射镜共焦同轴放置、二者顶点距离为焦距之和且激光入射到副镜上的位置在焦点正上方时,能够实现两次激光光路的 90° 折转,此时出射光和入射光平行且方向相反,且系统扩束倍数为主副镜焦距的比值。

此扩束系统的激光光路无实际焦点,可避免光能量集中造成的系统损伤,且中心无遮挡,可实现较高的光能利用率。

2.2 多级扩束系统

第 2.1 节所述的单组扩束系统可以实现激光的任意倍数扩束,但是根据式(4)和式(6),当需要对激光进行高倍扩束时,主镜的离轴量需要远大于副镜的离轴量,且出射激光和入射激光的距离很远,加工难度、制造成本、系统体积也会随之增大。所以,当扩束倍数较大时,可采用反射镜改变光路方向,通过多级扩束来降低抛物面离轴量,减小系统体积,实现高倍扩束。

系统中使用的反射镜为双平面反射镜,射入双平面反射镜的激光与出射激光的夹角是两反射镜的夹角的 2 倍,当其作为一个刚体转动时,出射激光和入射激光的夹角是不变的。

通过增加串联的扩束系统的数量能够实现激光的高倍数扩束,多级扩束系统的扩束倍数为各级扩束倍数的积:

$$M = \prod_{i=1}^n M_i, \quad (9)$$

式中: M_i 为各级扩束系统的扩束倍数。

以两级扩束系统为例,若各级扩束系统的扩束倍率相差不大,系统工作原理如图 2 所示。一束平行于光轴的激光在第一级扩束系统(由抛物面反射镜 1、2 构成)中进行两次 90° 的光路旋转后平行射出,通过两个双平面反射镜 3、4 改变光路方向,将激光射入第二级扩束系统(由抛物面反射镜 5、6 构成)中,经过扩束后,出射激光与入射激光光路平行,且方向相反。通过改变两扩束镜组之间的距离可改变出射激光与入射激光的距离 Δl 和系统总长度 L 。

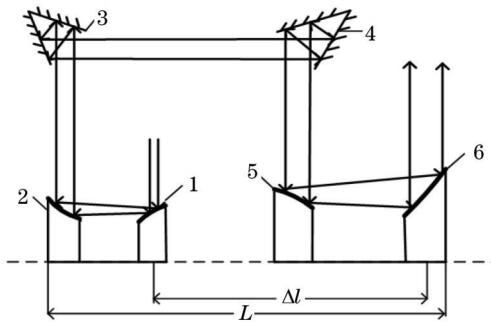


图 2 两级扩束系统 1 的扩束原理

Fig. 2 Beam expansion principle of two-stage beam expander 1

通过调节各级扩束系统之间的距离可以改变出射激光和入射激光之间的距离,提高系统的灵活性和实用性。当第二级扩束系统的扩束倍数大于第一级扩束系统时,调整离轴抛物面镜的摆放方式能够压缩外形尺寸,其工作原理与上述系统相同,结构如图 3 所示。

虽然多级扩束系统使用的镜片数量较多,但考虑到实际加工的方法,增加镜片的数量不会对成本有很

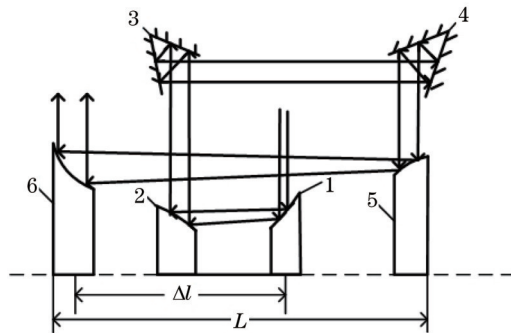


图 3 两级扩束系统 2 的扩束原理

Fig. 3 Beam expansion principle of two-stage beam expander 2

大的影响。离轴抛物面镜的加工方法^[13]通常有两种:一种方法为将大尺寸抛物面母镜切割,获得离轴抛物面镜,此方法适合口径小、离轴量不大的情况;另一种方法为单件加工,即修整毛坯尺寸到所需口径,再使用机器修磨成所需面型。如果采用母镜切割方式加工离轴抛物面镜,可使用一组两镜系统加工出两个扩束倍数相同的单组扩束系统,该方式加工成本低;如果采用单件加工方法,则可根据具体需求分配各级系统的扩束倍数。

2.3 像差计算

反射式系统不存在色差,因此只需要对 5 种单色像差^[14]进行分析,分别是球差、慧差、像散、场曲和畸变,各像差表达式为

$$S_I = \sum hP + \sum h^4 K, \quad (10)$$

$$S_{II} = \sum yP - J \sum W + \sum h^3 yK, \quad (11)$$

$$S_{III} = \sum \frac{y^2}{h} P - 2J \sum \frac{y}{h} W + J^2 \sum \phi + \sum h^2 y^2 K, \quad (12)$$

$$S_{IV} = \sum \frac{\Pi}{h}, \quad (13)$$

$$S_V = \sum \frac{y^3}{h^2} P - 3J \sum \frac{y^2}{h^2} W +$$

$$J^2 \sum \frac{y}{h} \left(3\phi + \frac{\Pi}{h} \right) - J^3 \sum \frac{1}{h^2} \Delta \frac{1}{n^2} + \sum h y^3 K, \quad (14)$$

式中: n 为物空间折射率; $P = \left(\frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{u}} \right) \Delta \frac{u}{n}$, u 为物距;

$$W = \frac{\Delta u}{\Delta \frac{1}{n}} \Delta \frac{u}{n}; \Pi = \frac{\Delta(nu)}{nn'}, n'$$

为像空间折射率; $\phi = \frac{1}{h} \Delta \frac{u}{n}$; $K = -\frac{e^2}{R^3} \Delta n$, e 为二次曲面的偏心率; J 为拉格朗日不变量。

对于本文中的单组反射式扩束系统, $n_1 = n'_2 = 1$, $n'_1 = n_2 = -1$, $u_1 = u'_2 = 0$, $u'_1 = u_2 = h_1/f'_1 = h_2/f'_2$, 拉格朗日不变量 $J=0$, 且抛物面反射镜满足条件 $e_1^2 = e_2^2 = 1$, e_1, e_2 分别为主镜、次镜的二次曲面的偏心率。

利用上述参数求解中间参数 P, W, ϕ, K , 再代入式(10)~(14)进行求解, 得出 $S_I = S_{II} = S_{III} = 0$ 。每个单组扩束系统的球差、慧差、像散为零, 且均存在一定的场曲和畸变, 此时的场曲、畸变表达式为

$$S_{IV} = \frac{2}{R_1} \left(1 - \frac{h_1}{h_2} \right), \quad (15)$$

$$S_V = \frac{h_1}{R_1^3} (y_1^3 + y_2^3). \quad (16)$$

根据式(15), 只有当主镜和副镜的离轴量相等时场曲 $S_{IV}=0$, 这种情况无法实现扩束, 此系统的场曲始终存在; 根据式(16), 系统的畸变也始终存在。本文中的多级扩束系统是由各级反射式扩束系统组合而成, 所以具有单组扩束系统的优点, 即各级系统中不存在球差、慧差等像差, 而整个系统的场曲和畸变在视角角

存在的情况下如何变化需要通过 ZEMAX 光学仿真软件进行分析。

3 系统仿真与分析

激光扩束系统的基本要求为能够实现激光的准直扩束,为验证扩束系统的基本功能及其他性能指标是否符合要求,基于相同的系统设计指标,本文使用 ZEMAX 光学设计软件对单组扩束系统结构和两级扩束系统的两种结构(图 2、图 3)分别进行仿真,从出射激光与入射激光的距离、系统的总长度等方面对三种系统进行对比,并判断各系统能否实现激光准直扩束的基本要求,之后对这三种系统进行公差分析,提出对各系统元件的光学加工和装配的要求,最终分析多级扩束系统的优势与劣势。

根据激光器出射激光的参数,以及入射激光波段和扩束倍率的要求,设计一个 9 倍的反射式激光扩束系统,设计指标如表 1 所示。

3.1 仿真设计

根据第 2.1 节所述扩束系统的工作原理计算系统

表 1 扩束系统的设计指标

Table 1 Design indexes of beam expanders

Parameter	Value
Wavelength of incident laser / μm	0.9-1.7
Divergence angle of incident laser / mrad	2
Waist radius of incident laser / mm	0.5
Magnification	9 \times
RMS (root-mean-square) wavefront error	<0.02 λ

参数,假设各系统中副镜的曲率半径均为 20 mm,根据式(6)可以计算出主镜曲率半径,由式(2)、(4)可计算出抛物面镜的离轴量。

图 4 为使用 ZEMAX 光学设计软件对三种扩束系统进行仿真后的三维布局图,表 2 为三种扩束系统的入射激光与出射激光距离 Δl 、系统总长度 L 的对比。从图 4 和表 2 中可知,当扩束倍数相同时,单组扩束系统的系统长度 L 及出射与入射激光之间的距离最大,两级扩束系统 2 的系统长度 L 最小,出射与入射激光之间的距离也最小。

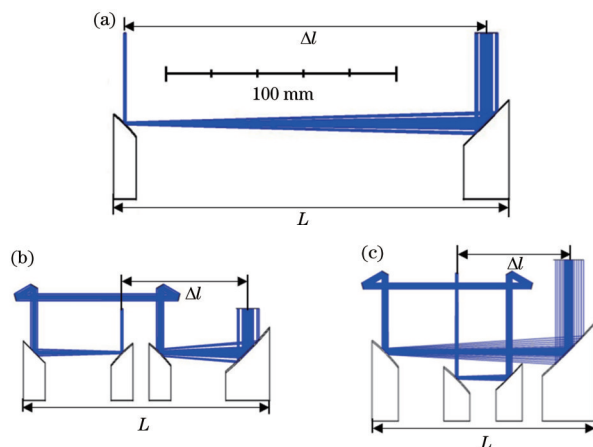


图 4 扩束系统三维布局图。(a)单组扩束系统;(b)两级扩束系统 1;(c)两级扩束系统 2

Fig. 4 3D layouts of beam expanders. (a) Single-group beam expander; (b) two-stage beam expander 1; (c) two-stage beam expander 2

表 2 三种扩束系统的体积大小

Table 2 Dimensions of three beam expanders

Beam expander	Δl / mm	L / mm
Single-group beam expander	160	170
Two-stage beam expander 1	55	95
Two-stage beam expander 2	25	85

表 3 为三种结构的各元件参数、出射光束发散角和光斑口径大小。从表 3 中可知,当各系统的副镜曲率半径相同时,单组扩束系统的主镜离轴量最大,两级扩束系统 1 的主镜离轴量最小,三种系统都能够实现激光的准直扩束功能。

扩束系统可扩大激光光束口径、压缩发散角,当入射激光为高斯激光时,其像面光束能量分布情况应符合高斯分布。如图 5 所示,三种扩束系统的像面照度分布情况为成像面上中心的照度最大,边缘照度逐渐

降低,到与像面中心距离相同的位置照度相同,这符合高斯分布规律。

考虑到系统 RMS 波前的设计要求,三个系统的仿真结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出三种扩束系统各波长对应的 RMS 波前均小于 0.02 λ ,符合扩束系统的基本设计要求。

综上所述,单组扩束系统及两级扩束系统的两种结构都能压缩发散角、扩大光束口径,满足反射式扩束系统的基本要求,而两级扩束系统可以大幅度压缩外形尺寸,减小抛物面镜的离轴量。

3.2 像质评价

根据第 2.3 节介绍的像差理论,本系统主要存在的像差为场曲和畸变,使用 ZEMAX 光学设计软件查看三种扩束系统在中心波长处的场曲和畸变,如图 7、图 8 所示,图中 A、B、C 分别表示单组扩束系统、两级扩束系统 1 和两级扩束系统 2。

表 3 三种扩束系统参数
Table 3 Parameters of three beam expanders

Beam expander	Single-group beam expander (9×)		Two-stage beam expander 1 (first stage: 3×; second stage: 3×)				Two-stage beam expander 2 (first stage: 2×; second stage: 4.5×)			
	PM	SM	PM of first stage	SM of first stage	PM of second stage	SM of second stage	PM of first stage	SM of first stage	PM of second stage	SM of second stage
Curvature radius /mm	180	20	60	20	60	20	40	20	90	20
Off-axis amount /mm	180	20	60	20	60	20	40	20	90	20
Divergence angle of output beam /mrad	0.2234		0.2234				0.2233			
Waist radius of output beam /mm	4.5178		4.5205				4.5080			

Notes: PM represents primary mirror; SM represents secondary mirror.

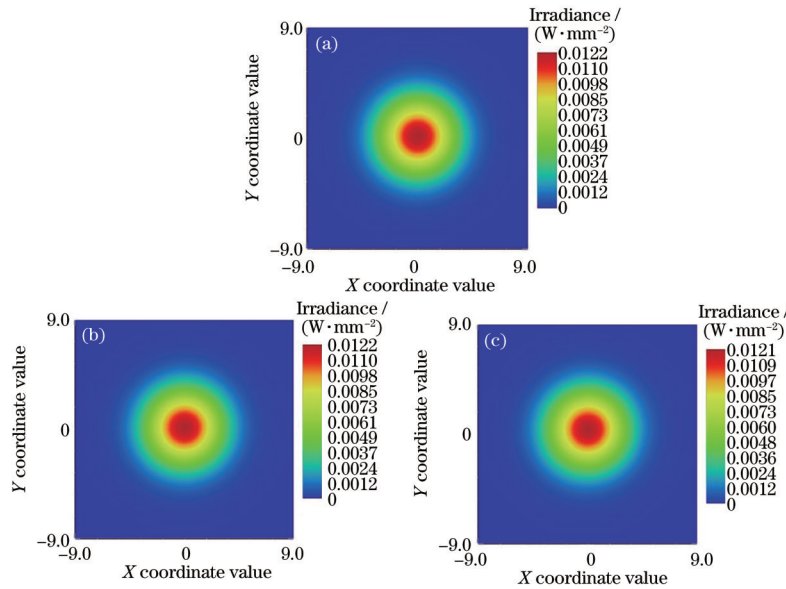


图 5 扩束系统的像面照度分布情况。(a)单组扩束系统;(b)两级扩束系统1;(c)两级扩束系统2

Fig. 5 Illumination distributions of image plane of beam expanders. (a) Single-group beam expander; (b) two-stage beam expander 1; (c) two-stage beam expander 2

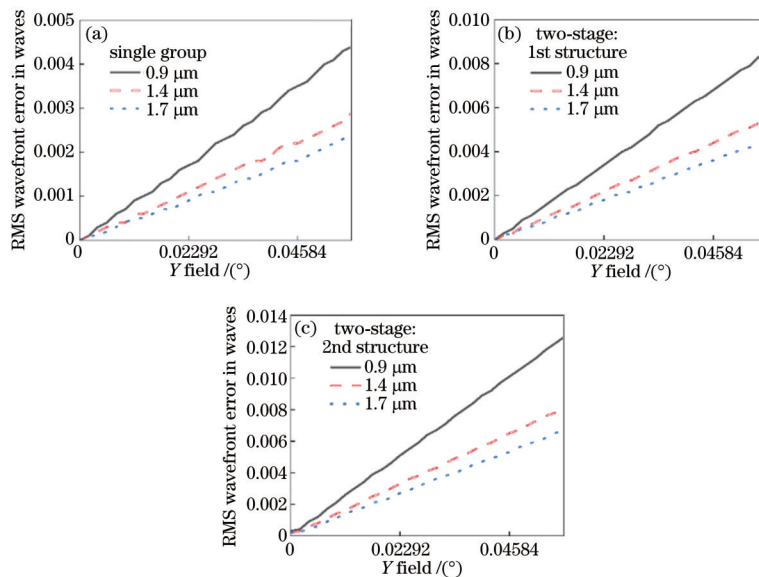


图 6 系统 RMS 波前误差。(a)单组扩束系统;(b)两级扩束系统1;(c)两级扩束系统2

Fig. 6 RMS wavefront errors of system. (a) Single-group beam expander; (b) two-stage beam expander 1; (c) two-stage beam expander 2

从图 7 中可以看出,在视场相同的情况下,单组扩束系统的场曲相对较小,两级扩束系统的场曲略大,三者场曲的数值均在 ± 0.004 的范围内,可认为其符合系统设计要求。

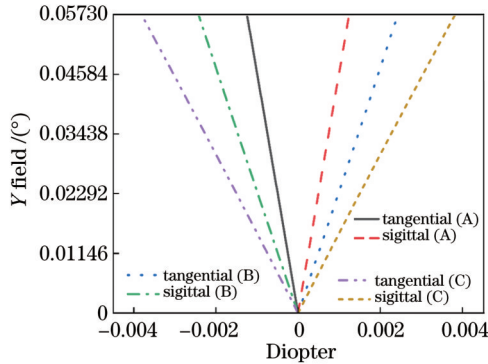


图 7 扩束系统场曲示意图
Fig. 7 Field curves of beam expanders

从图 8 中可以看出,单组扩束系统的畸变最小,两级扩束系统的畸变略大,三者畸变的绝对值均小于 2%,可认为其符合系统设计要求。

3.3 公差分析

由于抛物面反射镜对光轴失准的敏感度高,镜片加工或安装所引起的光束偏移问题对激光加工影响很大,所以对该系统进行公差分析很有必要^[15]。使用 ZEMAX 光学设计软件对该系统进行公差分析,以

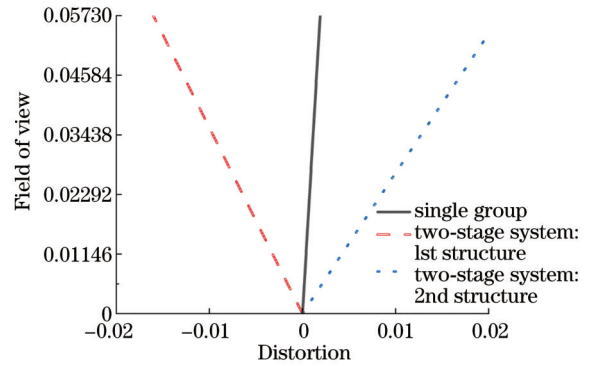


图 8 扩束系统畸变示意图
Fig. 8 Distortion of beam expanders

RMS 波前小于 0.02λ 作为系统公差评定标准,使用灵敏度法对系统进行公差分析。

设置一定的相对宽松的初始公差之后,使用蒙特卡罗分析 100 组镜头得到的结论为 80% 以上的镜头满足 RMS 波前小于 0.02λ 的系统设计要求,因此可以进一步收紧公差要求,以提高系统性能。通过公差分析得到的系统公差的一种分配方式如表 4 所示,抛物面镜的各自由度在允许的误差范围内能够满足扩束系统的加工和装配要求。表 4 中的 TRAD、TTHI 等均为公差操作数,TRAD 为表面曲率半径公差,TTHI 为厚度或位置公差,TUDX、TUDY、TUTX 和 TUTY 分别代表坐标间断的 X、Y 方向的偏心公差和倾斜公差,TIRR 为表面不规则度公差。

表 4 扩束系统的公差参数表
Table 4 Tolerance parameters of beam expanders

Parameter	Single group beam expander (9×)		Two-stage beam expander 1 (first stage: 3×; second stage: 3×)				Two-stage beam expander 2 (first stage: 2×; second stage: 4.5×)			
	SM	PM	SM	PM	SM	PM	SM	PM	SM	PM
TRAD /mm	±0.06	±0.06	±0.02	±0.02	±0.02	±0.02	±0.02	±0.02	±0.02	±0.02
TTHI /mm	±0.06	±0.06	±0.02	±0.03	±0.03	±0.03	±0.03	±0.03	±0.03	±0.03
TUDX /mm	±0.04	±0.05	±0.01	±0.01	±0.02	±0.02	±0.01	±0.01	±0.02	±0.02
TUDY /mm	±0.04	±0.05	±0.01	±0.01	±0.02	±0.02	±0.01	±0.01	±0.02	±0.02
TUTX / (°)	±0.05	±0.06	±0.02	±0.02	±0.02	±0.02	±0.02	±0.02	±0.03	±0.03
TUTY / (°)	±0.05	±0.06	±0.02	±0.02	±0.02	±0.02	±0.02	±0.02	±0.03	±0.03
TIRR	±0.06	±0.06	±0.02	±0.02	±0.02	±0.02	±0.02	±0.02	±0.02	±0.02

从表 4 的各系统公差参数可知,单组扩束系统的公差容限最大,两级扩束系统 2 次之,而两级扩束系统 1 对公差要求最严格。同时,由两级扩束系统的公差数据可知,两级扩束系统的第二种结构比第一种结构对公差的要求低,更适合加工和装调。

综上所述,单组扩束系统和多级扩束系统能够满足系统的设计指标,压缩激光发散角,实现激光扩束。相比于多级扩束系统,单组扩束系统结构最简单,RMS 波前小,对系统公差要求更宽松,但体积最大;而多级扩束系统能够调整出射与入射激光的距离,减小抛物面镜的离轴量,有利于实现系统的小型化,在需要

进行短距离高倍扩束时,多级扩束系统比单组扩束系统的应用前景更广泛。

4 结 论

提出了一种多级共焦抛物面反射式激光扩束系统的设计方法,该系统由多个共焦离轴抛物面反射镜组构成。利用共焦抛物面反射镜组在一定条件下可实现激光光路的 90° 折转,基于三级像差理论对两镜反射系统的结构参数进行计算,由结果可知,该系统可以消除球差、慧差、像散等单色像差。利用 ZEMAX 光学设计软件对单组扩束系统和两级扩束系统的两种结构进行

仿真和公差分析,结果表明:多级扩束系统不仅能够实现扩束系统的基本功能,而且可以调整出射与入射激光的距离,减小系统的体积,对实现系统的小型化、提高其灵活性与实用性有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Yuan X C, Zayats A V. Laser: sixty years of advancement[J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(5): 050101.
- [2] 邵禹, 王德江, 张迪, 等. 单光子激光测距技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(10): 1011020.
Shao Y, Wang D J, Zhang D, et al. Research progress of single photon laser ranging technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011020.
- [3] Dequal D, Agnesi C, Sarrocco D, et al. 100 kHz satellite laser ranging demonstration at Matera Laser Ranging Observatory[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(2): 26.
- [4] 高航, 周洁, 胡健, 等. 基于激光雷达探测的三维风场变分反演算法[J]. *光学学报*, 2021, 41(20): 2028002.
Gao H, Zhou J, Hu J, et al. Variational retrieval algorithm for three-dimensional wind field based on lidar detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(20): 2028002.
- [5] Ou Y, Zhang B, Yin K, et al. Hyperspectral imaging for the spectral measurement of far-field beam divergence angle and beam uniformity of a supercontinuum laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9822-9828.
- [6] Kochanenko G P, Simonova G V, Makogon M M, et al. Designing a beam expander for dual-wave laser fluorescence lidar[J]. *Journal of Optical Technology*, 2012, 79(4): 217-219.
- [7] 康俊, 崔自若, 朱坪, 等. 超短超强激光装置中消色差技术的研究与进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(9): 090001.
Kang J, Cui Z R, Zhu P, et al. Research progress of achromatic technology in ultra-short and ultra-intense laser facility[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(9): 090001.
- [8] 王银河, 宋光辉, 李文龙, 等. 紫外固化铝增强型椭球反射镜光学薄膜设计及镀制方法[J]. *中国照明电器*, 2021(7): 35-38.
- Wang Y H, Song G H, Li W L, et al. Ultraviolet cure aluminum enhanced ellipsoid reflector optical film design and coating[J]. *China Light & Lighting*, 2021(7): 35-38.
- [9] 禹静, 蒋威伟, 沈小燕. 自由曲面镜片波前像差扩束-缩束拼接技术[J]. *光子学报*, 2019, 48(8): 0822002.
Yu J, Jiang W W, Shen X Y. Wavefront aberration beam expansion-shrinkage splicing technology of free-form surface lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(8): 0822002.
- [10] Beiting E J, Smith K A. An on-axis reflective beam expander for pulsed dye laser cavities[J]. *Optics Communications*, 1979, 28(3): 355-358.
- [11] 胡必龙, 李伟, 王道, 等. 离轴格里高利系统中失调对远场时空特性影响[J]. *光学学报*, 2021, 41(21): 2126003.
Hu B L, Li W, Wang X, et al. Misalignment effect on far-field spatio-temporal characteristics in off-axis Gregorian system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(21): 2126003.
- [12] Sandstrom L G, Willis L J, Sparrold S W, et al. Reflective optical beam conditioners with integrated alignment features: EP3743238A1[P/OL]. 2021-10-27 [2021-12-09]. <https://patents.google.com/patent/EP3743238A1>.
- [13] 钱煜, 潘君骅. 离轴抛物面镜的单件加工技术[J]. *光学技术*, 1998, 24(3): 47-48.
Qian Y, Pan J H. Abaxial parabolic mirror unit processing technique[J]. *Optical Technology*, 1998, 24(3): 47-48.
- [14] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 12-14.
Pan J H. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 12-14.
- [15] 罗曦, 陈培锋, 王英. 离轴 90° 抛物面镜焦斑特性分析[J]. *光学学报*, 2009, 29(3): 682-687.
Luo X, Chen P F, Wang Y. Analysis of 90° off-axis parabolic mirror focal spot characteristic[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 682-687.