

反射式激光扩束器的切换变倍技术

贾 勇^{1,2} 高云国¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 反射式扩束常用于大功率的激光发射装置,但在离轴状态下,仅仅控制多组镜片之间的相对距离并不能像透射式扩束一样顺利实现变倍。从扩束望远镜系统的失调状态得到启发,提出一种两片次镜切换变倍的光学方案,针对一束 CO₂ 激光器发出的直径为 54 mm 的激光束,完成了离轴工作时 1.5 倍和 3.0 倍两个档位的扩束光学设计。仿真结果证明了扩束功能的正确性,而且与主次镜相同曲率半径下同轴使用的失调望远镜系统的调制传递函数(MTF)曲线基本吻合,对离焦量进行补偿之后的成像效果能够达到衍射极限。

关键词 光学设计;变倍扩束;激光光学;扩束器

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.1022003

A Switch Zoom Design for Reflective Laser Beam Expander

Jia Yong^{1,2} Gao Yunguo¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract Reflective beam expanders are widely used for high-power laser launchers. However, compared with refractive expander, it is harder to realize zoom effects because of off-axis. This paper focuses on a new program, using one piece of main mirror and two different secondary mirrors to change the magnification of expanders, and a system is designed to expand a CO₂ laser beam from 54 mm diameter to 81 mm (1.5×) and 162 mm (3.0×) in the state of off axis. The simulation results indicate that this kind of design is of great practicality with almost the same modulation transfer function (MTF) curves as a maladjusted telescope, having the same order of magnification with commonly used expanders. After compensating the defocus amount, the system's imaging achieves the diffractive limit.

Key words optical design; zoom expansion; laser optics; laser beam expander

OCIS codes 080.2730; 080.2740; 080.4228; 140.3070; 140.3300

1 引 言

在激光发射系统中,通常使用扩束装置来调整激光束的束散角,以期达到与探测系统跟踪精度相匹配的目的^[1]。常用的扩束装置可以大致分为折射型扩束和反射型扩束^[2],相比于折射式,反射式系统结构紧凑,容易实现大口径,无色差,而且几乎能够实现 99% 以上的能量反射,因而在航天遥感领域受

到了科研人员的长期关注^[3]。考虑到口径较大和能量吸收极少的特点,高功率激光发射设备中通常采用两片共轴使用的抛物面反射镜对激光进行准直,并将光阑适当离轴以实现扩束过程的无遮拦。但扩束并不能消除激光束的发散,当激光投射到远距离目标上时仅有限的一部分能量发挥作用;为此,需利用激光束的远程聚焦技术。因为定焦距的激光发射

收稿日期: 2012-04-09; 收到修改稿日期: 2012-05-16

基金项目: 中科院长春光机所三期创新工程(057X22C050)资助课题。

作者简介: 贾 勇(1987—),男,博士研究生,主要从事光机一体化方面的研究。E-mail: qinfengjie201@163.com

导师简介: 高云国(1955—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电仪器总体设计方面的研究。

E-mail: gaoyunguo@163.com

装置不能自动适应目标的远近变化,还需借助变焦技术调节光学系统的焦距,但设计难度大且实现起来结构复杂。

另一种实用的方法是在扩束器上附加变倍的功能,以对出射激光束散角进行一定程度的调节。这种方式除了需要对扩束器稍加改进,不需要变动设备的其他部分。当设备锁定目标之后可以切换到高倍扩束比,以压缩束散角,缩小在目标处的光斑尺寸,更大程度地利用激光能量。目前,一些反射变焦系统的专利已经问世^[4],文献[5]报道了一种利用二元光学元件实现的反射式变倍扩束。从扩束望远镜系统的失调状态得到启发,本文从应用最广泛的卡塞格林系统出发,提出了一种实用的切换变倍扩束的光学方案,并详述了设计过程。

2 无光焦度的变倍设计

扩束器最常用的是卡塞格林系统^[2],其特点是平行光入射后出射光束以平行光的方式出射,称为无光焦度系统。对于透射式光学系统,当需要调节扩束器的扩束倍率时,将3组或3组以上的透镜组配合使用就能实现无光焦度系统的变倍,文献[1]研究并实现了一个无焦连续变倍准直扩束系统。同理,多组共轴使用的反射镜片理论上也能达到这种效果,但会存在中心遮拦,不利于光束能量的充分应用。

为避开中心遮拦,将光学系统离轴使用是常用的方案。但只要设计的是无光焦度的扩束望远镜系统,其出射光束的尺寸必将按照扩束比得到放大。受此影响,在共轴使用时,变倍后的光束表现为出射光束尺寸的变化;离轴使用时,除了出射光束尺寸的变化还伴有出射光束位置的漂移(offset),如图1

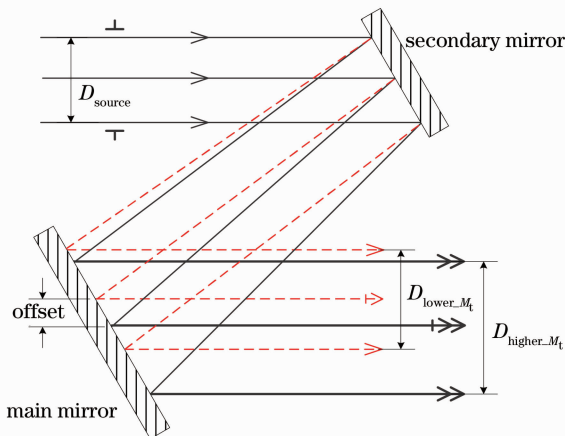


图1 不同倍率下扩束装置出射光束对比

Fig. 1 Contrast of emergent beams with different M_t

所示。由于扩束器通常只是对激光器的出射激光准直,后续还有各种复杂的光束发射装置,这种漂移会大大增加其后设备的调整负担,实用性不大。

另外,无焦系统出射光束的直径等于入射光束直径与扩束比的乘积,所以当扩束比在较大范围内变动时,出射光束的直径尺寸范围较大;而发射系统的通光孔径必将根据最大的光束直径加以设计,这样不仅增加了设备的尺寸还使得小扩束倍率的光束不能充分利用通光孔径。

3 有光焦度的变倍设计

高斯光束通过望远镜系统的变换常用于解决高斯光束的扩束、准直和发射等问题;实际应用中,为了得到最大扩束比,常使望远镜系统在离焦状态下工作^[2]。离焦状态的望远镜系统已经不再是无光焦度系统,而这样的扩束方式有自己的特点,文献[6]已有详细的论述。下面以共轴双反射镜扩束系统为例加以推导和说明。

根据矩阵光学理论,如图2所示,以RP1和RP2为参考面,光束通过主次镜系统的传递矩阵

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{r_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{r_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

得到光学系统的扩束倍率

$$M = \frac{\omega_{02}}{\omega_{01}} = \frac{1}{\sqrt{[D + Cs_{01}]^2 + C^2 Z_{01}^2}}. \quad (2)$$

由ABCD定律追迹平行于光轴的入射光,得到出射光

$$\begin{bmatrix} y_{02} \\ \theta_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{01} \\ \theta_{01} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{pmatrix} y_{01} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

得到出射光线相比于入射光线的偏移量,即出射光束尺寸与入射光束尺寸之比

$$\delta = \frac{y_{02}}{y_{01}} = A = 1 + \frac{4d^2 - 4r_1d - 2r_2d}{r_1r_2}. \quad (4)$$

根据(2)式能够得到扩束比随主次镜间距的变化图像,如图3所示。重焦状态下,两反射镜系统的扩束倍率是固定的,为两片镜子曲率半径之比 M_t ;当主次镜间距向左变化时,扩束比会相应减小,当主次镜间距变大时,扩束比先增后减。这正是共轴扩束望远镜系统失调后能够得到更大扩束比的原因,但离轴条件下的反射式扩束系统却不能如此应用。

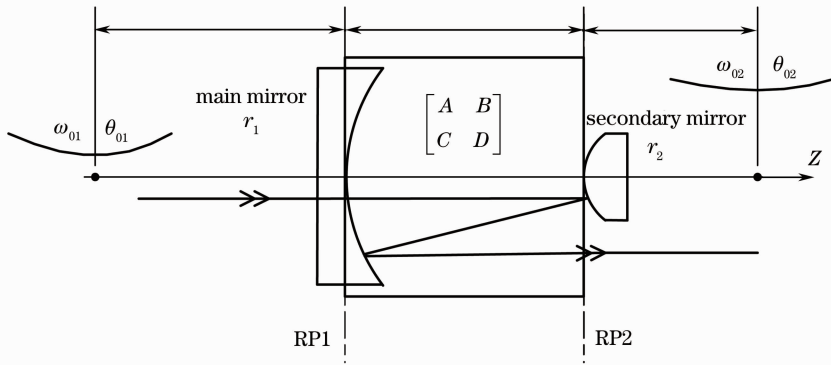


图 2 共轴双反射镜扩束系统示意图

Fig. 2 Sketch of coaxial beam double reflecting mirrors expander system

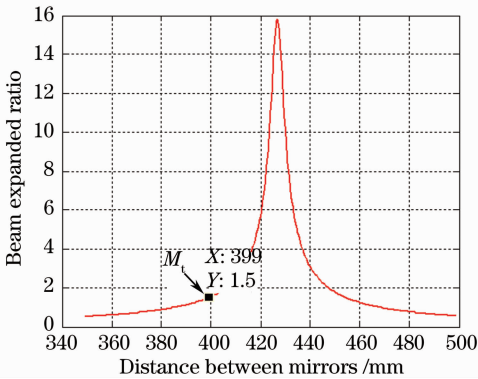


图 3 扩束比随主次镜间距 d 的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of beam expanded ratio with distance between main mirror and secondary mirror

(4)式对 d 求偏导可得

$$\frac{\partial \delta}{\partial d} = \frac{8d - 4r_1 - 2r_2}{r_1 r_2} \quad (5)$$

当 d 在重焦状态附近做微小移动 Δ 时,

$$d = \frac{r_1 + r_2}{2} + \Delta \approx \frac{r_1 + r_2}{2} \quad (6)$$

此时,

$$\frac{\partial \delta}{\partial d} \approx \frac{2r_2}{r_1 r_2} = \frac{2}{r_1} \quad (7)$$

从而

$$\delta \approx -\frac{r_1}{r_2} + \frac{2}{r_1} \Delta \approx -\frac{r_1}{r_2} \quad (8)$$

因此,当主次镜间距在重焦状态附近变化时,出射光束和入射光束的尺寸之比变化微小;然而,适当增加主次镜间距就能得到更大的扩束比。这就意味着用主次镜间距增量得到大扩束比的同时,不会引起出射光束尺寸的剧烈变化(在前述无光焦度扩束的条件下,出射光束的尺寸与扩束比同比例增大)。

为了消除中心遮拦,应将上述系统离轴使用。容易发现它不仅会产生同无焦系统一样的出射光束漂移(offset)现象,还有一个更加糟糕的问题:出射

光束的方向偏转(θ),如图 4 所示。这两个问题的存在,使得通过改变主次镜间距达到变倍效果的离轴反射式失调望远镜扩束器几乎失去了应用价值。

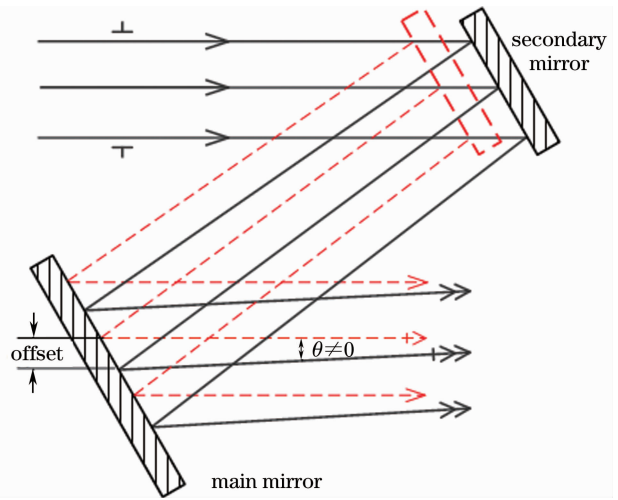


图 4 增大主次镜间距并离轴后的出射光束示意图

Fig. 4 Sketch of emergent beams after increasing the distance between the main mirror and secondary one and applying off-axis

然而,要实现该系统的失调,可以改变的参数不只有主次镜间距一个量。可以设想,只需对足够多的变量进行综合控制,应该可以达到同透射式的失调望远镜基本相当的扩束效果。本文从改变次镜的离轴和倾斜量以及次镜曲率半径和非球面系数的角度,采取共用一片主镜往复切换两片次镜的方法,实现了对入射高斯光束的两档切换变倍。

4 设计思路

该变倍扩束系统的工作过程如图 5 所示,正常工作状态下,次镜 1 和主镜参与扩束,这构成了第一档扩束;当需要进一步压缩出射光束的束散角时,就将次镜 1 切出,同时切进次镜 2,次镜 2 与原来的主

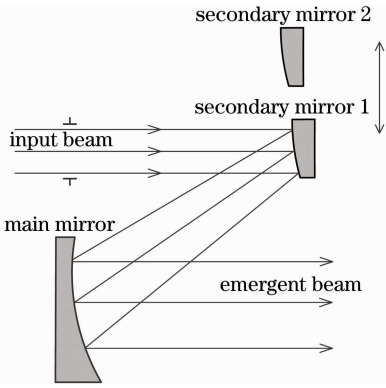


图 5 共用一片主镜的双次镜切换变倍方案

Fig. 5 Sketch of switch zoom using one piece of main mirror and two secondary mirrors

镜构成第二档扩束系统。第二档扩束系统具有更大的扩束比(相当于第一档扩束的失调情形),这样就实现了对同一激光的变倍扩束。

第一档扩束的设计可以直接沿用离轴使用的共轴双抛物面反射镜,进一步的工作仅需根据主次镜间距 d 和扩束比 M_1 计算得到主镜曲率半径 R_1 和次镜 R_2 ,并根据入射光束的半径 r 计算得到无遮拦的最小离轴量 k ,进而选取一个适合装配和调试的离轴量。诸参数的计算公式为

$$R_1 = \frac{2dM_1}{M_1 - 1}, \quad (9)$$

$$R_2 = \frac{2d}{M_1 - 1}, \quad (10)$$

$$k = \frac{M_1 + 1}{M_1 - 1}r. \quad (11)$$

第二档扩束实质上是一种离轴反射式光学系统,因为两档扩束系统共用一片主镜,该系统的设计就要靠调节次镜的结构参数来完成;调节参数的目的在于矫正前述离轴工作下失调望远镜中出现的出射光束位置漂移和方向偏转问题,同时保证预定的扩束比。

离轴反射式光学系统大都是以共轴反射式光学系统为初始结构,经过适当选择离轴量和定义优化模型之后优化得到的^[7,8]。因此,首先需要按照共轴反射式扩束器的失调设计,计算得到系统的初始参数。

取第二档主次镜间距等于第一档,原因后文有述。此时,第二档已知的条件有扩束比、主镜曲率半径和主次镜间距,通过矩阵光学推导就能够得出待求次镜 2 的曲率半径值。然后将次镜 2 定义为抛物面,并施加与第一档相同的离轴量。这些初始结构参数的获取,只需编制相应的计算程序即可。但离轴后,初始结构的扩束比不仅与理论计算不符,而且出射光

束的中心位置和传播方向都产生了较大的偏差。下一步需要定义适当的优化模型,然后寻优求解。

设计变量选择为次镜 2 的曲率半径和非球面系数以及次镜 2 的离轴和倾斜量;目标函数是经过光学系统后的高斯光束束腰尺寸,也就是扩束比。另外,还要严格控制出射光束的传播方向保持为与主镜的旋转轴线相平行。扩束比的控制需要借助光学设计软件中的物理光学传播的模拟仿真,而出射光束传播方向的控制只需要使用光线追迹即可。

需要指出的是,在目标函数的定义中并没有刻意地消除出射光束的位置漂移。这是因为在扩束比和主次镜间距固定的条件下,如果保证了出射光束的方向平行于主镜旋转轴线,那么出射光束在主镜上的投影位置就基本保持不变,这在后续的优化试验中也得到了验证。而且,两档主次镜间距相等有助于保证出射光束在主镜上的两档光斑尺寸基本相当,这也是在优化模型中固定主次镜间距不变的原因。

至此,优化模型的工作已经定义完成,该模型同时兼顾了扩束比和出射光束位置、尺寸以及方向的设计要求,剩下的工作就是编制相应的程序,提交给计算机求解计算。

5 设计实例

设计要求:应用卡塞格林式扩束器,对一束波长 $10.6 \mu\text{m}$ 的激光束进行 1.5 倍和 3 倍扩束,激光器为 CO_2 激光器,激光器输出窗口距离次镜 1500 mm,窗口半径 27 mm,远场束散角 2.5 mrad ,主次镜间距最大不超过 400 mm。

第一档扩束采用双抛物面的形式,并将光阑离轴,实现对光束的 1.5 倍扩束。主次镜间距应该在允许的范围内取尽量大的值,因为这样计算得到的主次镜曲率半径比较大,有利于降低镜片加工和装配的灵敏度,本例中选为 399 mm。主次镜的曲率半径可以根据已经确定的扩束比和主次镜间距由(9)、(10)式计算得到。将激光束窗口的尺寸和扩束比代入(11)式计算得到最小离轴量(135 mm),并选取得到一个合适的离轴量(160 mm)。第一档扩束的结构参数如表 1 所示。

第二档要与第一档共用一块主镜,并对激光束进行 3 倍扩束,其优化设计的过程需要借助 Zemax 软件中的物理光学模拟,所以需要定义扩束器的入射光束,也就是 CO_2 激光器的输出光束。由于该激光器属于非稳腔激光器,其输出的光束通常含有多

表 1 第一档结构参数

Table 1 Structural parameters of the first gear

Radius of the main mirror /mm	Radius of the secondary mirror 1 /mm	Distance between the two mirrors /mm	Min amount of off-axis /mm	Amount of off-axis /mm
2394	1596	399	135	160

种高阶模^[9],基模也不再是高斯光束,而应是几何光束^[10]。为设计方便,本例中使用一束具有 2.5 mrad 远场束散角的高斯光束对激光器的出射光加以近似,并将其束腰放在次镜 2 的左边,根据激光光学,该高斯光束的束腰为

$$\omega_0 = \frac{\lambda}{\pi\theta_0} \approx 2.7 \text{ mm}, \quad (12)$$

瑞利长度为

$$Z_0 = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda} \approx 2160 \text{ mm}, \quad (13)$$

为得到与激光束相似尺寸的光束,应当将束腰往次镜左方移动距离

$$z = Z_0 \sqrt{\frac{\omega_z^2}{\omega_0^2} - 1} \approx 21491 \text{ mm}. \quad (14)$$

可以发现,束腰到次镜的距离远远大于该高斯光束的瑞利长度,故能将其在通过扩束器的过程中近似为几何光束。在 Zemax 软件中,很容易通过编程的方式得到高斯光束在扩束器前后的束腰尺寸,所以这种近似处理便于在目标函数中添加扩束比的定义。

根据矩阵光学的推导,在近轴条件下可以得到

表 2 两档光学系统的光线追迹结果

Table 2 Ray-tracing results of the switch system

	Y coordinate value of the chief ray in output beam /mm	Angle between the output chief ray and the optical axis /mrad	Beam expanded ratio
First gear before off-axis	0	0	1.5
First gear after off-axis	-240	0	1.5
Second gear before off-axis	0	0	3.04
Second gear after off-axis	-238.52	2.4	2.87
Second gear after off-axis and being optimized	-240.04	0	3.0

优化的具体过程是:

首先,定义优化目标函数为期望扩束比。因为高斯光束在入射到扩束器之前的参数都是已知的,而且不会在优化过程中发生改变,所以扩束比的目标函数只需要在软件中用 GBSS 操作数获得出射光的远场束散角,并将其目标值定义为 0.412 mrad 即可。

其次,定义出射光束的方向约束。这个过程需要借助 Zemax 软件中的虚拟面,具体过程是:在主

镜镜面附近定义一个虚拟面 P_1 ,然后沿着光束出射的方向,在离开 P_1 一定距离(10 m)的地方定义第二个虚拟面 P_2 。由于次镜 2 的偏心和倾斜都是在 YZ 平面内,整个光学系统关于 YZ 平面对称,所以只需要对入射光束中的中心光线进行追迹,得到该光线在 P_1 和 P_2 两个平面上的 Y 坐标值,并求出其差值。这样,只要满足差值为 0,就能保证第二档出射光束的中心光线与主镜的旋转轴线平行。

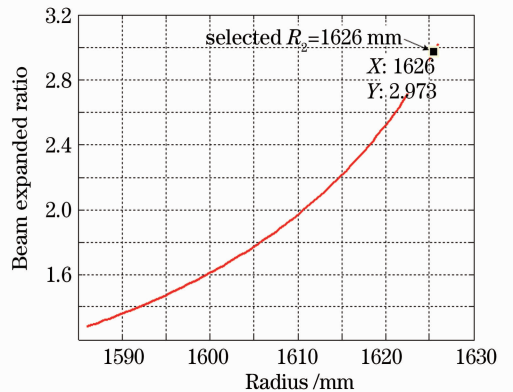


图 6 扩束比随次镜 2 曲率半径的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of beam expanded ratio with the curvature radius of the secondary mirror 2

镜镜面附近定义一个虚拟面 P_1 ,然后沿着光束出射的方向,在离开 P_1 一定距离(10 m)的地方定义第二个虚拟面 P_2 。由于次镜 2 的偏心和倾斜都是在 YZ 平面内,整个光学系统关于 YZ 平面对称,所以只需要对入射光束中的中心光线进行追迹,得到该光线在 P_1 和 P_2 两个平面上的 Y 坐标值,并求出其差值。这样,只要满足差值为 0,就能保证第二档出射光束的中心光线与主镜的旋转轴线平行。

将上述过程编制成代码,并将次镜曲率半径、次

镜非球面系数以及次镜 Y 向离轴量和绕 X 轴的倾斜量设置为设计变量之后,通过计算寻优,最终得到

的结果如表 3 所示,光路图如图 7 所示。

表 3 次镜 2 结构参数

Table 3 Structural parameters of secondary mirror 2

	Radius of the secondary mirror 2 /mm	Conic of the secondary mirror in Zemax	Decentered Y /mm	Tilted X /($^{\circ}$)
Original value	1626	-1	0	0
Optimized result	1625.60	-1.019	1.49	0.053

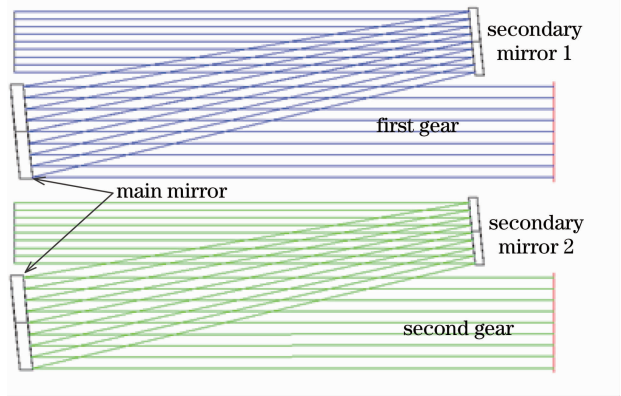


图 7 两个档位的扩束光路对比

Fig. 7 Contrast of the two gears' beam expanding optics

严格来说,此种设计方法得到的结果已经不再是传统意义上的扩束,而应当更广义地看做是对激光束发散角的变换,它更加接近于共轴透射式扩束望远镜的失调情形。下面将该系统与失调望远镜系统进行对比:选择与第一档扩束的主次镜曲率半径相等的两个近轴理想镜片组成一个理想的望远镜系统,并按照 3.0 倍的扩束比计算得到两镜片之间距应为 413.03 mm,即应有 14.03 mm 的失调量。为了对比观察两系统的像差,在像面之前 1000 mm 的地方添加一个焦距 $f=1000$ mm 的理想近轴透镜,两系统的光路如图 8 所示。

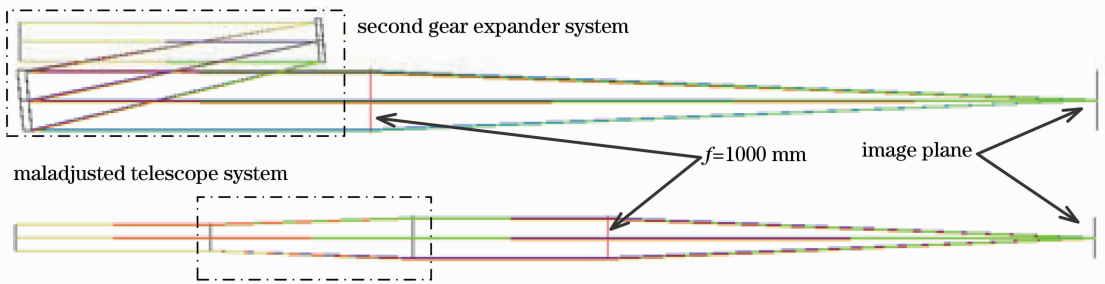


图 8 失调望远镜与第二档扩束的光路图

Fig. 8 Layout of the maladjusted telescope and the second gear expander

图 9 为失调望远镜系统与第二档扩束系统的调制传递函数(MTF)曲线,可以看到两者曲线形状几乎完全一样,只有在截至频率处有少许差别。由于 MTF 是系统的本征函数^[11],通过对比第二档变倍和失调望远镜系统的 MTF 曲线可以发现两者之间的等效性。两系统的 MTF 曲线之所以都不理想,是因为失调导致了两者都存在着较大的离焦,对它们都施加 -7 mm 的离焦量之后,都能达到衍射极限,点列图如图 10 所示,MTF 曲线均与极限情况重合。

由于离轴量和倾斜量的存在,在机构设计和光学装调方面需要有特别考虑^[12~14]。相比于波相差

和 MTF 指标,项目中更加重视出射光束的偏转角度,所以选择了出射光束中心光线偏转 $8''$ 作为公差分析的评价标准;两档位的光学公差分析如表 4 所示。从表中可以发现,两档主次镜的位置敏感度基本相当,第二档附加的离轴和倾斜量几乎没有增加系统的装调负担。

最后需要补充的是,本例中假设了入射光束的束腰位置远离扩束主镜;当入射光束束腰距离主镜较近时,扩束比提升的空间比较小^[15],这时应该采用与例子相反的思路(将高倍扩束比用第一档实现,低倍扩束比则采用有光焦度的第二档)进行切换变倍设计。

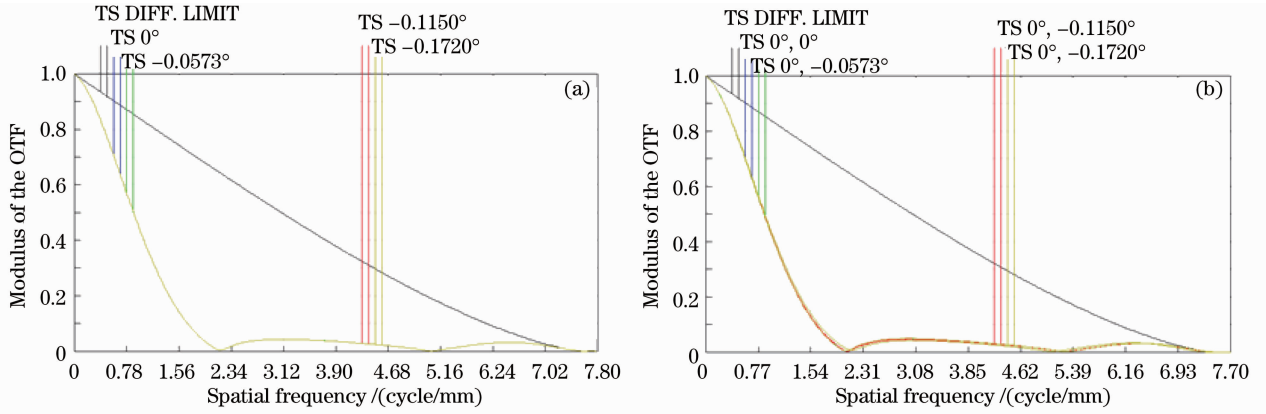


图 9 MTF 曲线。(a)失调望远镜;(b)第二档扩束

Fig. 9 MTF curves. (a) Maladjusted telescope; (b) second gear expander

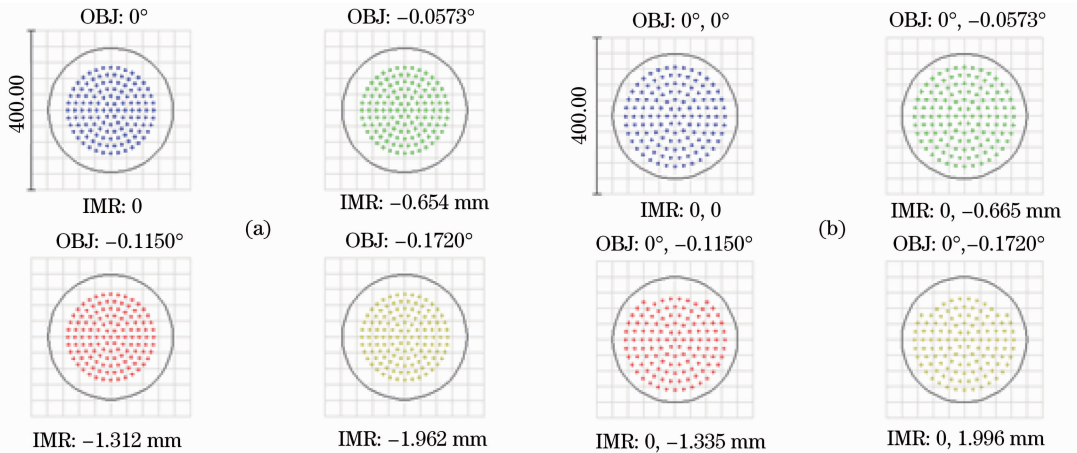


图 10 补偿了离焦量之后的四视场像面点列图。(a)失调望远镜;(b)第二档扩束

Fig. 10 Spot diagrams after focusing in 4 fields of view. (a) Maladjusted telescope; (b) second gear expander

表 4 两档切换系统的公差分析结果

Table 4 Tolerance analysis results of the switch zoom design

		Main mirror's tilted X / (")	Main mirror's decentered Y / μm	Secondary mirror's tilted X / (")	Secondary mirror's decentered Y / μm
First gear	On X-axis	4.1	39	6.8	39
	On Y-axis	4.1	40	6.7	40
Second gear	On X-axis	3.8	36	6.3	35
	On Y-axis	3.7	37	6.2	36

6 结 论

针对高功率激光发射装置的变倍需求,本文提出了一种新颖的切换变倍方案。其优点是能够切换不同的扩束倍率以控制出射光束的发散,同时保持设备通光孔径基本不变,并避免了出射光束的位置漂移。优化过程采用物理光学模拟和几何光线追迹相结合的方式,通过对第二档次镜曲率半径、非球面系数、离轴量和倾斜量的寻优求解,实现了与同等孔径下失调望远镜几乎相同的扩束效果,是一种简单

实用的反射式变倍扩束方案。

参 考 文 献

- Zhao Yanzhong, Song Fenghua, Sun Huayan. Design for laser expanding optical system with variable focus of Gaussian beams [J]. *J. Academy of Equipment Command & Technology*, 2007, **18**(5): 85~89
赵延伸, 宋丰华, 孙华燕. 高斯光束的激光变焦扩束光学系统设计[J]. *装备指挥技术学院学报*, 2007, **18**(5): 85~89
- Kong Xianglei, Hao Peiming, Zhou Shikang et al.. Study on aspherical reflecting beam expander [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2001, **18**(Suppl.): 40~43

- 孔祥蕾, 郝沛明, 周士康等. 非球面反射型扩束器的研究[J]. 量子电子学报, 2001, **18**(增刊): 40~43
- 3 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei *et al.*. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2680~2683
- 郭永祥, 李英才, 梁天梅等. 一种大视场离轴三反射光学系统研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2680~2683
- 4 Zhang Tingcheng, Wang Yongtian, Chang Jun *et al.*. Design of reflective zoom systems with 3 mirrors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3034~3038
- 张庭成, 王涌天, 常 军等. 三反变焦系统设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 3034~3038
- 5 Allen Mann. Infrared zoom lenses in the 1990s [J]. *Optical Engineering*, 1994, **33**(1): 113~114
- 6 于志文, 周昌群. 高斯光束与几何光束的区别与联系探讨[J]. 四川兵工学报, 1997, **18**(3): 1~7
- 7 吕百达. 激光光学[M]. 成都: 四川大学出版社, 1992. 85~112
- 8 Zhao Wencai. Design of improved off-axis TMA optical systems [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2011, **19**(12): 2839~2841
- 赵文才. 改进的离轴三反光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(12): 2839~2841
- 9 Zhao Quanzhong, Cheng Zhaogu, Jiang Jinbo *et al.*. Controlling the focusing characteristics of flying optics through an adaptive beam expander[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(4): 340~341
- 赵全忠, 程兆谷, 蒋金波等. 自适应扩束系统控制“飞行光束”聚焦特性[J]. 中国激光, 2002, **29**(4): 340~341
- 10 卢亚雄, 杨亚培, 陈淑芬. 激光束传输与变换技术[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1999. 93~114
- 11 Lü Naiguang. *Fourier Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 155~157
- 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 155~157
- 12 Zhang Bin, Han Changyuan. Study on optimization of computer-aided alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 54~58
- 张 斌, 韩昌元. 离轴非球面三反射镜光学系统装调中计算机优化方法的研究[J]. 光学学报, 2001, **21**(1): 54~58
- 13 He Hongxing, Zhao Jinsong, Pan Shunchen. Optical alignment of all-reflective afocal ZH optical system[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2011, **19**(8): 1744~1748
- 何红星, 赵劲松, 潘顺臣. 全反射式无焦 ZH 系统的装调[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(8): 1744~1748
- 14 Yang Xiaofei. Study on the Computer-Aided Alignment of Three-Mirror Optical System [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Academia Sinica, P. R. China, 2004. 102~105
- 杨晓飞. 三反射镜光学系统的计算机辅助装调技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004. 102~105
- 15 Cheng Jie, Sun Nianchun, Wang Zhengxing *et al.*. Maladjusted and beam expanded ratio of laser beam expanding telescope[J]. *Laser Technology*, 1995, **19**(1): 57~60
- 程 洁, 孙年春, 王正兴等. 激光扩束望远镜的失调与扩束比[J]. 激光技术, 1995, **19**(1): 57~60

栏目编辑: 韩 峰