

高斯光束的激光变焦扩束光学系统设计

赵延伸¹, 宋丰华², 孙华燕²

(1. 装备指挥技术学院 研究生管理大队, 北京 101416; 2. 装备指挥技术学院 光电装备系, 北京 101416)

摘 要: 远距离激光主动探测体制对扩束发射光学系统的扩束能力及其对距离的适应性能提出了较高的要求。针对某系统所用的 1.06 μm YAG 调 Q 脉冲激光器, 分析设计了一个可变扩束比为 1.510 的变焦扩束光学系统。按照高斯光束特殊传输及变换规律对变焦扩束系统进行分析, 得出了可用的初始结构参数, 并以此优化设计出的扩束光学系统满足了系统扩束比及其变焦范围的要求。

关 键 词: 变焦扩束系统; 高斯光束; 光学设计

中图分类号: TB 133

文献标识码: A

文章编号: 1673-0127(2007)05-0085-05

Design for Laser Expanding Optical System with Variable Focus of Gaussian Beams

ZHAO Yanzhong¹, SONG Fenghua², SUN Huayan²

(1. Company of Postgraduate Management, the Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China;

2. Department of Optical and Electrical Equipment, the Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)

Abstract: The active laser detecting system of far distance puts strict demands on the expanding ability and the adaptability to the distance of the expanding system. The paper presents a detailed analysis and design of the 1.06 microns impulse laser expanding optical system whose expanding ratio range can be about 1.5 times to 10 times. Moreover, by analyzing this expanding system with the special rule that Gaussian beams apply when transferring and transforming, the paper gives the feasible initial frame data which are used to make the optical design. The results show that the expanding system can satisfy the demand of the expanding ratio and the varifocal range.

Key words: expanding system of variable focus; Gaussian beams; design for optics

针对远距离目标的激光主动探测系统的作用距离首先取决于激光发射系统发射的激光束质量^[1]。为改善光束的方向性, 提高远距离目标处的激光能量密度, 需压缩光束发散角小到与探测系统的跟踪精度相匹配, 因此需要对其进行扩束, 并且在满足发散角和光束宽度的前提下, 使系统的扩束比具有可调性, 以便于探测系统能够根据

距离远近来完成相应的探测任务。

目前, 在光学系统设计中, 初始参数的确定都是根据几何光学的基本定律来进行计算推导的。而本文设计的系统专门针对 1.06 μm YAG 调 Q 脉冲激光器, 其发散角为 5 mrad, 输出光束光腰直径 ≤ 2.7 mm, 近似为基模高斯光束, 其传输时的规律不同于几何光束, 通过透镜时的变换规律

收稿日期: 2006-09-07

基金项目: 部委级资助项目

作者简介: 赵延伸, 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 光电信息处理与对抗。

宋丰华, 男, 高级工程师, 硕士生导师。

也与几何光束截然不同,因此需要按照高斯光束特有的传播变换规律对变焦扩束系统进行分析,这样得出的初始系统参数误差较小,可方便下一步的优化设计。根据作用距离的要求以及此激光器的光束质量参数,提出扩束系统的可变扩束比范围为 1.510。本文据此来分析其初始结构,然后结合 ZEMAX 光学设计软件进行优化,得出了满足成像质量和指标要求的变焦扩束系统。

1 系统设计方案

激光变焦扩束系统可根据变焦距摄像系统来进行改进^[2],如图 1 所示。为了结构简单,只取 3 个组元就能满足需求,依次把其称为变焦组、固定组和补偿组。

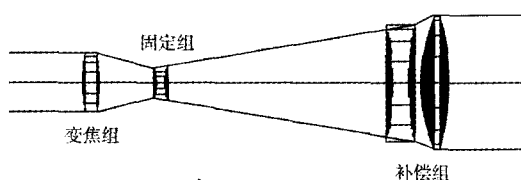


图 1 变焦扩束系统

当变焦组相对于固定组移动时,变焦组与固定组的等效焦距就连续改变,产生新的焦点。将补偿组也设计成可移动的,当变焦组移动到某一位置时,补偿组也移动到相应的位置,使新的焦点稳定在补偿组的焦点上,组合成新的扩束比的扩束系统。

由于强脉冲激光过度聚焦时光腰太小,将会出现空气的击穿现象,导致光学元件受到损伤,所以采用变焦组和固定组为正负透镜的组合,使激光束不能过分会聚,同时也缩短了系统的工作距离。为较好地校正球差、彗差,同时考虑到高能激光会对胶合面造成损伤而不宜采用胶合透镜,将补偿组镜片设计成双分离式,利用玻璃材料选择和空气间隙的微量变化来校正像差^[3]。在进行高斯分析时,仍将补偿组视为一个组元。

2 高斯光束的变焦扩束分析

高斯光束通过变焦扩束系统时的传播和变换情况,如图 2 所示。其中,镜组 A、B、C 的等效焦距依次为 f_A 、 f_B 、 f_C , ω_{01} 为入射激光束的束腰直径, ω_{01}' 为光束通过镜组 A 后的束腰直径, ω_{02} 为光束通过镜组 B 后的束腰直径, ω_{03} 为光束通过镜组 C 后的束腰直径, L_A 为入射光束光腰位置到镜组 A 的距离, $L_{A'}$ 为镜组 A、B 间光束光腰位置到镜组 A 的距离, L_B 为镜组 A、B 间光束光腰位置到镜组 B 的距离(当光腰在镜组 B 之后时 L_B 数值为负), $L_{B'}$ 为镜组 B、C 间光束光腰位置到镜组 B 的距离, L_C 为镜组 B、C 间光束光腰位置到镜组 C 的距离, $L_{C'}$ 为镜组 C 后光束光腰位置到镜组 C 的距离, L_1 为镜组 A、B 间的距离, L_2 为镜组 B、C 间的距离。这些参量均为长度或距离单位,单位均取 mm。

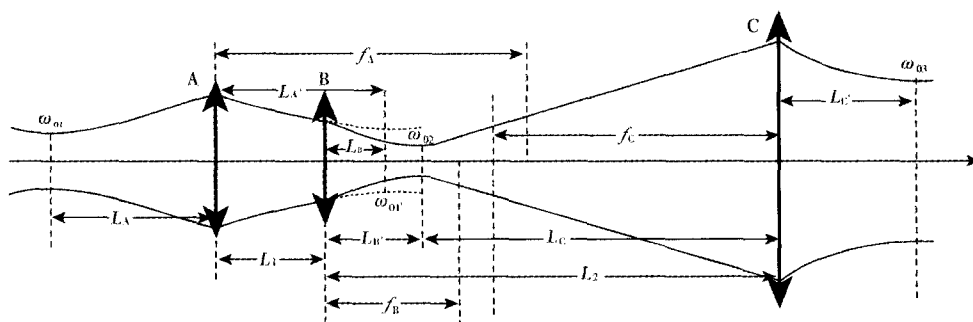


图 2 高斯光束通过变焦扩束系统

图 2 中的镜组 A 和镜组 B 组成的系统可以看成是一个等效望远系统的目镜,依据高斯光束通过望远系统的理论分析^[4],要取得较大的扩束比 M ,则高斯光束在通过镜组 B 后的光腰(后简称其为中间光腰)位置应始终处于镜组 C 的前焦面上,此时高斯光束通过镜组 C 满足第二种成像条件,因此有式(1)式(3)成立。

$$L_C = L_{C'} = f_C \quad (1)$$

$$\omega_{03} = \lambda f_C / (\pi \omega_{02}) \quad (2)$$

$$M = \omega_{03} / \omega_{01} = \lambda f_C / (\pi \omega_{02} \omega_{01}) \quad (3)$$

可见,在输入光腰直径 ω_{01} 和镜组 C 焦距 f_C 一定的情况下,中间光腰直径 ω_{02} 越小,扩束比越大,所以 ω_{02} 的大小将决定整个系统的扩束比。因此现在先只考虑镜组 A、B 组成的系统,它需要实现的是聚焦功能。为了方便分析,将镜组 A、B 组成的系统同样看成是一个望远系统,只不过实现的功能不一样,此系统实现的是聚焦,并设 $\Delta = f_A + f_B - L_1$ 为镜组 A、B 系统的离焦量,光束通

过镜组 A、B 系统的变换矩阵为

$$T = \begin{pmatrix} 1 & L_{B'} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_B & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f_A + f_B - \Delta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_A & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_A \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (4)$$

其中 A、B、C、D 为矩阵中的元素,其表达式为

$$\begin{cases} A = \frac{-\Delta L_{B'}}{f_A f_B} - \frac{f_B}{f_A} + \frac{\Delta}{f_A} \\ B = L_1 - \frac{L_{B'}(f_A - \Delta)}{f_B} - \frac{L_A(f_B - \Delta)}{f_A} - \frac{\Delta L_A L_{B'}}{f_A f_B} \\ C = -\Delta/(f_A f_B) \\ D = -\frac{\Delta L_1}{f_A f_B} - \frac{f_A}{f_B} + \frac{\Delta}{f_B} \end{cases}$$

令 $m_T = -f_B/f_A$, 即镜组 A、B 系统的角放大率, 可得到望远系统的成像公式(5)和物像比例公式(6)。

$$L_1 + L_A \left(m_T + \frac{\Delta}{f_A} \right) + L_{B'} \left(m_T^{-1} + \frac{\Delta}{f_B} \right) - \frac{\Delta L_A L_{B'}}{f_A f_B} = \frac{(\pi \omega_{01}^2 / \lambda) (m_T + \Delta/f_A - \Delta L_{B'}) / f_A f_B}{(f_A f_B / \Delta) (m_T^{-1} + \Delta/f_B) - L_A} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\omega_{02}}{\omega_{01}} \right)^2 &= \left(m_T + \frac{\Delta}{f_A} - \frac{\Delta L_{B'}}{f_A f_B} \right)^2 + \\ &\left[f_A + f_B - \Delta + L_A \left(m_T + \frac{\Delta}{f_A} \right) + \right. \\ &\left. L_{B'} \left(m_T^{-1} + \frac{\Delta}{f_B} \right) - \frac{\Delta L_A L_{B'}}{f_A f_B} \right]^2 / z_{01}^2 \quad (6) \end{aligned}$$

式中: λ 为激光波长; $z_{01} = \pi \omega_{01}^2 / \lambda$ 为高斯光束的瑞利距离。从式(6)可见, 要达到好的聚焦效果, 不仅与镜组 A、B 系统的角放大率 m_T 有关, 而且还与其他参数有关。现在的情况就是固定 ω_{01} 以及 L_A , 讨论在 Δ 变化的条件下 ω_{02} 和 $L_{B'}$ 的变化情况。

当出射光腰在焦平面上时, 扩束望远系统可达到最大扩束比, 因此将此镜组 A、B 组成的系统看成望远系统的倒装, 为达到好的聚焦效果, 入射光腰也应设在焦平面上, 故令 $L_A = f_A$, 则式(5)、式(6)变为

$$L_{B'} = f_B \left(1 - \frac{z_{01} \Delta f_B}{z_{01} \Delta^2 + f_A^4} \right) \quad (7)$$

$$\left(\frac{\omega_{02}}{\omega_{01}} \right)^2 = \frac{f_B^2 f_A^6 + \Delta^2 f_A^2 f_B^2}{(z_{01} \Delta^2 + f_A^4)^2} \quad (8)$$

同时, 为了使式(8)小于 1, 实现聚焦, 则要求满足约束条件:

$$f_B^2 f_A^6 + \Delta^2 f_A^2 f_B^2 < (z_{01} \Delta^2 + f_A^4)^2 \quad (9)$$

下面首先讨论 ω_{02} 的变化情况, 令式(8)对 Δ 求导, 得

$$\begin{aligned} d \left(\frac{\omega_{02}}{\omega_{01}} \right)^2 / d\Delta &= \\ 2 f_A^2 f_B^2 \Delta \frac{f_A^4 - 2 f_A^4 z_{01} - z_{01} \Delta^2}{(z_{01} \Delta^2 + f_A^4)^3} \quad (10) \end{aligned}$$

由于系统采用的激光器输出激光束瑞利距离 z_{01} 大于 0.5, 因此令式(10)为 0 只有唯一解 $\Delta = 0$ 。当 $\Delta < 0$ 时, ω_{02}/ω_{01} 单调递增; $\Delta > 0$ 时, ω_{02}/ω_{01} 单调递减。

然后讨论 $L_{B'}$, 令式(7)对 Δ 求导, 得

$$dL_{B'} / d\Delta = z_{01} f_B^2 \frac{z_{01} \Delta^2 - f_A^4}{(z_{01} \Delta^2 + f_A^4)^2} \quad (11)$$

令其为 0, 得 $\Delta^2 = f_A^4 / z_{01}$, 考虑到变焦系统的需要, 需使 $L_{B'}$ 与 $M' = \omega_{02}/\omega_{01}$ 同时满足单调变化, 由式(7)、式(8)可得出 $L_{B'}$ 、 M' 满足这样条件的区间如表 1 所示。

其中, M' 指镜组 A、B 组合系统的扩束比; $\uparrow$ 、 $\downarrow$ 分别代表 $L_{B'}$ 或 M' 随 Δ 的变化而单调递增、单调递减。

表 1 $L_{B'}$ 与 M' 的变化关系

序号	Δ 的变化范围	$M' = \omega_{02}/\omega_{01}$	$L_{B'}$
1	$\Delta < -\frac{f_A^2}{\sqrt{z_{01}}}$	$\left[0, \frac{f_B}{f_A} \frac{\sqrt{1+z_{01}}}{2\sqrt{z_{01}}} \right] \uparrow$	$\left[f_B, f_B \left(1 + \frac{\sqrt{z_{01}} f_B}{2 f_A^2} \right) \right] \uparrow$
2	$-\frac{f_A^2}{\sqrt{z_{01}}} < \Delta < 0$	$\left[\frac{f_B}{f_A} \frac{\sqrt{1+z_{01}}}{2\sqrt{z_{01}}}, \frac{f_B}{f_A} \right] \uparrow$	$\left[f_B \left(1 + \frac{\sqrt{z_{01}} f_B}{2 f_A^2} \right), f_B \right] \downarrow$
3	$0 < \Delta < \frac{f_A^2}{\sqrt{z_{01}}}$	$\left[\frac{f_B}{f_A}, \frac{f_B}{f_A} \frac{\sqrt{1+z_{01}}}{2\sqrt{z_{01}}} \right] \downarrow$	$\left[f_B, f_B \left(1 - \frac{\sqrt{z_{01}} f_B}{2 f_A^2} \right) \right] \downarrow$
4	$\frac{f_A^2}{\sqrt{z_{01}}} < \Delta < f_A + f_B$	$\left[\frac{f_B}{f_A} \frac{\sqrt{1+z_{01}}}{2\sqrt{z_{01}}}, f_A f_B \frac{\sqrt{f_A^4 + (f_A + f_B)^2}}{z_{01} (f_A + f_B)^2 + f_A^4} \right] \downarrow$	$\left[f_B \left(1 - \frac{\sqrt{z_{01}} f_B}{2 f_A^2} \right), f_A f_B z_{01} \left(\frac{f_A + f_B + f_A^3}{z_{01} (f_A + f_B)^2 + f_A^4} \right) \right] \uparrow$

由表 1 可以看出, 有 4 个单调区间, 其中 1 段与 4 段对称, 均能达到要求, 但是考虑到激光扩束

系统中间光束不能聚焦的缘故,1 段不能采用;比较 2、3、4 段的可调范围大小,选用第 4 段来进行变焦扩束。

同时,要实现聚焦,必须满足约束条件式(9),在 4 段亦需要保证极大值小于 1,即

$$\frac{f_B}{f_A} < \frac{2\sqrt{z_{01}}}{\sqrt{z_{01}+1}} \quad (12)$$

于是可得到在所选定的变焦范围内的系统扩束比为

$$M = \left| \frac{\omega_{03}}{\omega_{01}} \right| = \left| \frac{f_C(z_{01}\Delta^2 + f_A^4)}{f_A f_B z_{01} \sqrt{f_A^4 + \Delta^2}} \right| \quad (13)$$

变焦组和补偿组的移动距离分别为

$$L_1 = f_A + f_B - \Delta \quad (14)$$

$$L_2 = L_B' + f_C = f_C + f_B \left(1 - \frac{z_{01}\Delta f_B}{z_{01}\Delta^2 + f_A^4} \right) \quad (15)$$

变焦组移动范围为

$$L_1 \in (0, f_A + f_B - f_A^2 / \sqrt{z_{01}}) \quad (16)$$

按照几何光束来分析,镜组 A 的移动变焦范围应为 $0 < \Delta < f_A + f_B$;按照高斯分析的结果为 $f_A^2 / \sqrt{z_{01}} < \Delta < f_A + f_B$ 。由于 $f_A^2 / \sqrt{z_{01}}$ 很小,可说是近似相同,这其中的误差也存在于式(13)式(16)中,因此高斯光束比按照几何光束来分析更为精确。

3 初始结构确定及优化

根据高斯分析及系统扩束比要求,结合系统中输入激光束的参数(光腰直径为 2.7 mm,瑞利距离为 540.146 mm),来初始设定 3 个镜组焦距依次为 75 mm、-15 mm、200 mm,计算出 L_1 可调范围约为(0,60 mm)。但为满足校正像差的要求, L_1 不能太小,且 L_2 的调节范围也不宜过大,以免给机械部分造成困难。兼顾系统扩束比要求,选择 L_1 变化范围为(3 mm,60 mm),计算出对应的扩束比变化范围为(1.851 4,10.266 2)。扩束比和补偿组位移随变焦组位移的变化情况如图 3 和图 4 所示。

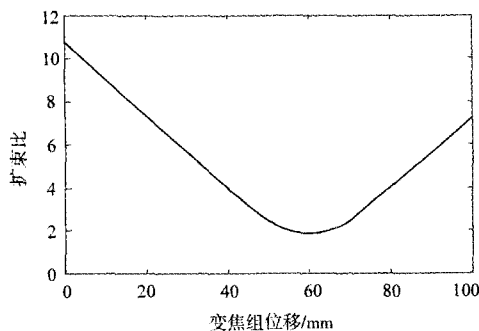


图 3 扩束比变化情况

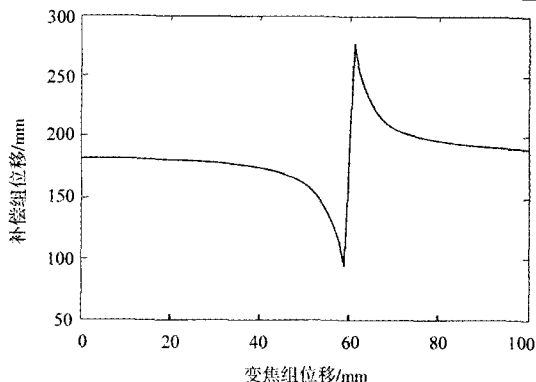


图 4 补偿组位移情况

依据此分析建立初始结构参数,运用 ZEM-AX 软件进行优化设计。变焦组、固定组、补偿组的焦距分别被优化成为 75.273 mm、-14.683 mm、203.889 mm,其具有最大扩束比时的外形,如图 5 所示。



图 5 优化后的变焦扩束系统外形图

由于扩束系统是对无穷远处成像,无法直接进行像质评价,而理想抛物面反射镜对平行光进行聚焦时不会带入任何像差,因此下面在补偿组后附加一焦距为 200 mm 的理想抛物面反射镜来进行像质评价,得出光学系统的调制传递函数如图 6 所示。

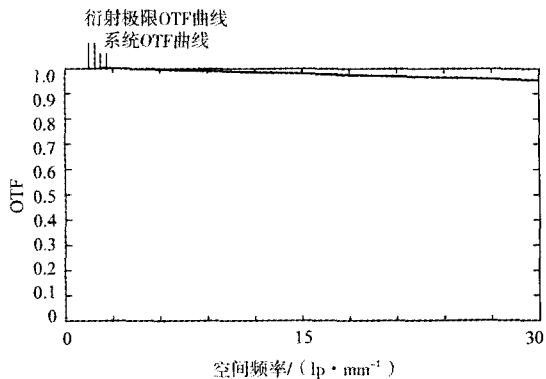


图 6 调制传递函数

从图 6 可以看出,系统的调制传递函数与衍射极限成像时的调制传递函数几乎完全一致,而且保护良好性,空间频率为 30 lp/mm 时到 0.95 以上,说明该系统接近理想成像。

按照公式(16), L_1 的理论可调节范围约为(0,60mm)。由于在实际加工中镜组 A 和镜组 B 之间需要留出一定的空气间隙,因此将 L_1 的可调节范围取为(3 mm,60 mm),得出不同 L_1 时对应

的扩束比、 L_2 以及最大波像差,见表2所示。

表2 补偿组移动、扩束比及波像差变化情况

L_1/mm	L_2/mm	扩束比	最大波像差/波长数目
3	166.226 2	9.973 9	0.026 5
8	165.989 5	9.228 0	0.044 1
10	165.880 0	8.930 0	0.042 3
20	165.191 1	7.444 4	0.006 8
30	164.173 0	5.966 4	0.005 0
40	162.480 0	4.494 8	0.003 4
50	159.130 0	3.028 6	0.006 9
60	149.500 0	1.566 8	0.020 6

从表2可以看出,扩束比变化范围满足了变焦系统的要求, L_2 的最大可调节范围为16.726 2 mm。而且在 L_1 的变化范围之内,最大波像差均远远小于0.25 波长,按照瑞利判断,可以认为该系统输出光束的实际波面是无缺陷的。

4 结 论

通过对激光变焦扩束系统的高斯分析,得出了高斯光束通过变焦扩束系统的传输变换规律,以及可用的变焦组及补偿组的线性调节区间。与

文献[5]中的几何光学分析方法相比,高斯光束分析方法更为准确、科学。这些规律可以为激光变焦扩束系统的理论设计提供借鉴。同时,针对一特定激光器,得出了可行的激光变焦扩束系统参数,以此作为初始结构进行优化设计得出的扩束系统,达到了理想化的像质,扩束比达到约1.510 均匀可调,满足了激光主动探测扩束发射系统的扩束比及其变焦范围的要求。

参考文献 (References)

- [1] 谷锁林,孙华燕,张永基,宋丰华.空中目标的激光主动探测[J].激光与红外,2005,35(7):476-478.
- [2] 蔡常达.变焦距激光扩束系统的结构设计[J].激光与红外,1996,26(1):30-31.
- [3] 李晓彤,岑兆丰.几何光学·像差·光学设计[M].杭州:浙江大学出版社,2003:180-190.
- [4] 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,1999:93-110.
- [5] 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.

(责任编辑:孙陆青)