

文章编号: 1002-1582(2025)05-0586-06

基于双胶合透镜的低波前差变倍扩束系统设计

刘昱辰, 廖采霖, 梁鹤严, 徐智谋, 王双保, 张学明*
(华中科技大学 光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 激光扩束系统在多领域应用广泛, 为满足变倍扩束需求, 文章采用机械补偿式三组元结构, 以BK7和F2材料双胶合透镜组搭建了能提高像质的 $2\sim 6.4\times$ 光学系统。运用Zemax软件, 设定了632.8nm激光光源, 对组元焦距、初始距离、组元半径进行了优化设计。设计时选取8个扩束比, 系统总长控制在250mm内, 优化了各种像差, 结果表明系统具有出色的成像能力, 场曲畸变等像差控制良好; 激光发散角在 0.05° 左右, 具有好的准直性; 公差对扩束效果影响小; 光程差为0.1波长左右, 表明不同路径的光线能够保持良好的相位一致性。该系统实现了变倍扩束, 成像质量满足要求。

关 键 词: 应用光学; 激光扩束系统; 机械补偿式三组元结构; Zemax; 像差分析; 公差分析

中图分类号: O435.1

文献标识码: A

Design of low wave front differential amplification beam expanding system based on double glued lens

LIU Yuchen, LIAO Cailin, LIANG Heyan, XU Zhimou, WANG Shuangbao, ZHANG Xueming*
(School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Laser beam expansion systems are widely used in various fields. To achieve variable magnification beam expansion, this study employs a three-component mechanically compensated design, incorporating a double-cemented lens group made of BK7 and F2 glass to enhance image quality in a $2\sim 6.4\times$ optical system. Using Zemax software, the system is optimized with a 632.8 nm laser source, refining the focal lengths, initial spacing, and radii of the optical components. Eight expansion ratios are selected, with the total system length constrained within 250 mm. Various aberrations are optimized, and the results demonstrate excellent imaging performance with well-controlled field curvature and distortion. The laser divergence angle is less than 0.05° , indicating good collimation. Tolerance analysis shows minimal impact on beam expansion performance, while the optical path difference of approximately 0.1 wavelength confirms high phase consistency across different light paths. The proposed system successfully achieves variable magnification beam expansion with imaging quality meeting design requirements.

Keywords: applied optics; laser beam expander system; mechanically compensated three-group structure; Zemax; aberration analysis; tolerance analysis

0 引 言

激光扩束系统凭借其卓越性能, 在激光雷达、

激光测距、全息摄影、激光成像的诸多领域中有广泛的应用^[1]。从结构原理角度划分, 扩束系统可分为折射式、反射式和折反射式。折射式扩束系

收稿日期: 2025-03-13; 收到修改稿日期: 2025-05-25

基金项目: 湖北省级应用光学一流课程建设项目 (2022-65); 华中科技大学国家级大学生创新创业训练项目 (202410487032); 湖北省国际科技合作重点项目计划 (现代应用光学科研团队, 2023EHA028)

作者简介: 刘昱辰 (2004—), 男, 本科生, 从事光学系统设计研究。liuyc08@hust.edu.cn

张学明 (1968—), 男, 讲师, 从事光学系统设计研究。

* 通讯作者: optzhang@163.com

统通常由多组透镜组合而成,利用透镜对光线的折射特性实现光束的扩展;反射式扩束系统则借助反射镜,通过光线的反射来改变光束路径和尺寸;折反射式扩束系统结合了折射与反射的优势,综合优化光束的扩束效果。然而,受限于激光器自身的物理特性,一般激光器存在一定的发散角,不能满足远距离传输的要求。与此同时,在许多实际应用场景中,根据不同的任务需求,往往需要灵活改变激光束在目标位置的光斑尺寸,以适配特定的工作环境和功能需求,这就使得对激光进行变倍扩束成为必然趋势和核心技术需求。

在激光通信领域,激光器初始发射的光束半径通常存在一定的局限性,这在很大程度上制约了通信距离的拓展和通信质量的提升。为突破这一瓶颈,实现更远距离、更稳定可靠的激光通信,必须借助大口径光束确保接收端具备充足光功率。一般通过构建激光扩束系统,有效压缩激光空间发散角,进而使输出光束契合口径标准,达成激光束准直扩束目标。鉴于实际应用中口径需求的多样化,扩束比连续可变成关键技术诉求。

当前,国内外在激光变焦系统方面已积累了丰富的研究成果。叶井飞团队创新性地运用变焦镜头与定焦镜头组合,成功实现激光束2~13×的透射式连续变倍扩束^[1];单娟等则精心设计了一款2~6×的透射式激光连续变倍系统^[2];卢政伟等学者研制出基于卡塞格林系统的大口径复合式无遮拦激光扩束器,显著提升激光发射效率^[3]。此外,Edmund Optics公司推出可针对不同波长激光束进行2~8×连续变倍扩束的产品;CVIMG公司也研制出LBV系列激光扩束系统,实现2.5~10×连续变倍扩束。目前的激光扩束系统大致可分为两类^[4]:透射式和反射式。对于透射式的系统,随着口径的增大,通常需要复杂的结构来矫正色差。采用三组元变焦系统作为基础结构,采用BK7和F2材料制成的双胶合透镜组,实现了扩束倍率2.4~6.4×的光学系统。该设计可为空间探测中的激光望远镜系统提供参考。图1即为该激光望远镜系统的框架图。

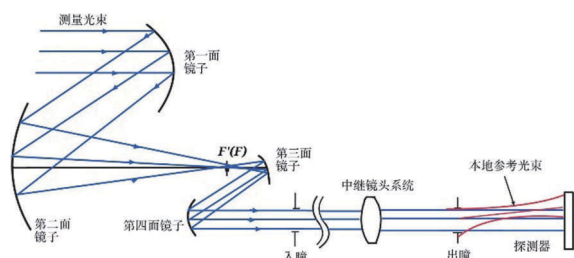


图1 自由曲面“天琴”望远镜布局方案

1 变倍扩束系统原理

透射式的变倍系统,可以通过2~4个组元来实现。比较分析后采用了机械补偿式三组元结构的可変倍扩束系统设计。具体结构如图2所示,分为变倍组、固定组、补偿组。通过改变透镜组之间的间距来实现变焦功能,其具有结构简单、连续变倍等优点。

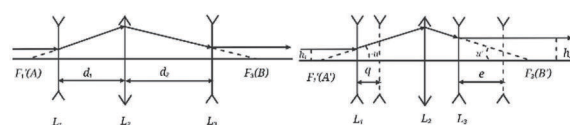


图2 理论分析系统光路图

当变倍组 L_1 移动距离为 q 时,为保证 L_2 的像点 B' 与 L_3 的焦点 F_3 重合,补偿组 L_3 需要移动距离 e 。通过确定各组元的焦距 f'_1 、 f'_2 、 f'_3 以及各组元的初始距离 d_1 和 d_2 ,来计算两组元移动距离^[5]。

1.1 计算变倍组和补偿组的移动距离

一个由多个组元组成的光学系统,它的总焦距等于第一个组元的焦距与后面各组元的放大率之积^[6],表示为

$$f' = f'_1 \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot m_4 \cdots \quad (1)$$

因此,只要改变后面组元的放大率就可以改变系统的总焦距,从而达到变焦的目的。如下式,首先确定 L_1 移动 q 后 L_2 的放大率

$$m_2(q) = \frac{f'_2}{f'_1 + f'_2 - (d_1 - q)} \quad (2)$$

然后对 L_2 列高斯公式,表示为

$$\frac{1}{(e + d_2) + f_3} - \frac{1}{f_1 - (d_1 - q)} = \frac{1}{f_2} \quad (3)$$

变形可得

$$e = \frac{f'_1 f'_2 - (d_1 - q) f'_2}{f'_1 + f'_2 - (d_1 - q)} + f'_3 - d_2 \quad (4)$$

假设入射光线高度为 h_1 ,出射光线高度为 h_3 ,则总放大率表示为

$$M = \frac{h_3}{h_1} = -\frac{f'_3}{f'_1 m_2(q)} \quad (5)$$

变倍组做直线运动,其运动状态可通过公式直接计算;补偿组做非直线运动,采用编程计算。对于两个组元间隔,可用式(2)、(5)直接解出。

1.2 变倍系统设计

首先确定了系统设计指标。根据参考文献^[4],确定了光路结构设计的基本设计参数。在开展变焦理论设计时,考虑到需研究不同扩束比下的结构,选取了八个具有代表性、取值范围在1至10

的扩束比，并对相应结构进行同步求解，系统结构仿真图如图 3 和图 4 所示。同时，为确保系统的紧凑性与实用性，对系统尺寸和组元半径进行了约束（详见系统参数优化）。由于该系统为无焦扩束系统，相较于有焦系统，其需考虑的像差种类相对较少。本研究着重针对球差、像散、彗差、场曲和畸变展开分析，为设计出高性能的无焦扩束系统提供理论依据。

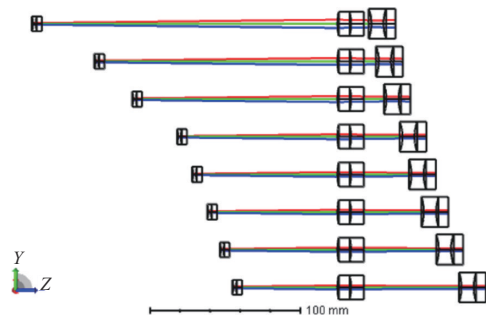


图 3 Zemax 仿真二维图(8种扩束比结构)

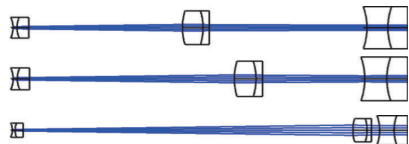


图 4 变倍组移动扩束效果图(从上到下依次为结构1、3、8)

在本设计中，采用上述三组元结构开展工作。其中，每一个透镜都承担着独特作用。为获取较为理想的成像质量，各组元均选用双胶合透镜。

双胶合透镜的材料组合直接影响系统色差校正能力和波前质量。本设计选用BK7（冕玻璃，折射率 $n_D=1.5168$ ，阿贝数 $V_D=64.17$ ）与F2（火石玻璃， $n_D=1.6200$ ， $V_D=36.37$ ）的组合，BK7的高阿贝数（低色散）与F2的低阿贝数（高色散）形成互补，可有效校正激光光源（632.8nm）的轴向色差，使不同波长光线尽可能会聚于同一点，两者折射率差异适中，既能保证界面处的折射效率，又避免因折射率差过大导致的反射损耗增加。此外，考虑到BK7与F2是光学设计中经典的双胶合组合，加工工艺成熟，胶合剂适配性好，可降低生产误差对波前差的影响。

具体而言，在每组双胶合透镜里，第一片透镜材质采用BK7玻璃，其光学性能稳定，能为光线的初步折射提供良好基础；第二片透镜则选用F2玻璃作为材质，F2玻璃的特性可有效校正像差，与BK7玻璃搭配，进一步优化系统成像，使得整体光学系统在多种工况下均能实现优质成像。

2 初始结构设计

参考论文[6]与1.1给出的推导，导出一组的初

始结构：取三个组元焦距为-20mm，50mm，-60mm，分别求解不同扩束比下的组元间隔 d_1 和 d_2 ，如表1所示。然后优化双胶合透镜半径得到对应焦距的组元。此即为变倍扩束系统的初始结构。在接下来的分析中，固定此组元间隔，优化像质。

表 1 扩束系统初始组元间隔

M(扩束比)	d_1/mm	d_2/mm
1.85	60.83	71.08
2.4	70.00	52.50
2.9	78.33	41.72
3.5	88.33	32.86
4	96.67	27.50
5.2	116.67	18.85
5.6	123.33	16.79
6.4	136.67	13.44

在 Zemax 中搭建了光路结构。参考市面售卖的 HNR05R 激光器，以 632.8nm 的氦氖激光为光源，此光源输出功率 $\geq 5.0\text{mW}$ ，发散角 $\leq 1.9\text{mrad}$ ，光斑直径 1.0mm，设置切趾类型为高斯，切趾因子为 1。然后对理论设计结果进行细调优化，满足了系统的像差要求。

3 系统参数优化

因近轴近似所带来的误差影响，仿真的光学结构里，扩束比与理论上的理想值之间会出现 20% 至 30% 的偏差。基于早期调试所积累的优化经验，本研究决定采用固定组元间隔的方式，同时将组元的厚度以及半径设定为可变参数，以此对各项性能指标展开优化工作。

在运用 Zemax 软件进行光学设计时，以软件默认的评价函数为基础，进一步创建多重结构，以此来精确表征变焦设计。针对变焦扩束系统中的八个不同结构，参考其他研究工作^[1]，分别对如下优化函数予以考量（表 2）。

表 2 优化操作数含义及目标

优化操作数	含义	控制目标
CVVA	控制组元半径	绝对值大于 10
TOTR	系统总长	小于 250
REAY	出射光线半径	按扩束比确定
SPHA	球差	0
RSCE	光斑半径	0
COMA	彗差	0
DISC	归一化畸变	0
DIMX	最大畸变	0
ASTI	三阶像散	0
RAED	出射光线角度	小于 0.03°

考虑加工的可行性以及设计合理性，对相关参数设置总体约束条件：组元半径需大于 10mm，从而保证加工时具有足够的尺寸裕度；系统总长度必须小于 250mm，以满足系统紧凑性的要求。

借助 REAY 操作数来精准控制扩束比，利用 RAED 函数对系统的准直性加以约束。与此同时，保持对组元焦距也进行较弱的约束，确保优化结果能够全面符合各种像差的控制要求。对于激光扩束系统涉及的众多像差，畸变是最为激光扩束系统的重要评价指标，因此，为畸变控制赋予较高的权重。

在设计流程中，首先优化三个双胶合透镜的焦距到设定值。然后在多结构分析下，添加其他约束操作数，进一步分析。

在优化前，按原组元间隔设置时，系统的成像质量欠佳。为此，需要重新确定各组元的半径及厚度。为防止结构变化幅度过大，对原有的焦距依然赋予较低权重。因此，优化过程中，系统通过调整焦距以及适当降低扩束比的方式，来有效提升成像质量。调试优化后，实际系统最终达到的扩束比范围在 2~6.4×左右，在满足像质要求的同时，实现了较为理想的扩束效果。

为实现低波前差目标，通过 Zemax 的多重结构优化功能，对双胶合透镜的球面曲率半径进行全局优化，确保各视场光线的光程差（OPD）控制在 0.05λ 以内；限制双胶合透镜中心厚度，避免因透镜过厚导致的材料吸收损耗和波前畸变。此外，在评价函数中提高畸变（DIMX）、波前像差（WFRN）和 RMS 光斑半径（RMSR）的权重，强制优化器优先控制场曲和相位误差。优化具体结构如表 3 优化结果所示。

表 3 优化结果

物面	类型	曲率半径	厚度	材料
0	标准面	无穷	50.00	
1	标准面(孔径)	—	26.00	
2	标准面	−25.38	3.06	BK7
3	标准面	25.38	5.00	F2
4	标准面	20.16	5.79	
5	标准面	23.31	5.79	F2
6	标准面	−23.31	4.86	BK7
7	标准面	−314.53	69.15	
8	标准面	−25.03	13.91	BK7
9	标准面	25.03	5.54	F2
10	标准面	无穷		

4 系统评价

优化完成后，针对最终确定的结构展开了多

种像差分析，并对优化成果进行评估。鉴于八种变焦结构在分析和优化过程中的情况极为相似，为使内容更为精炼且具有代表性，此处仅挑选一组结构进行详细展示。

4.1 MTF 曲线

MTF 曲线是衡量光学系统成像质量的重要指标，它展示了系统对不同空间频率的传递特性，能直观反映成像的清晰度。

如图 5 所示优化后的系统在空间频率为 1.2 周期/mr 处，MTF 值大于 0.4，且 MTF 曲线下落相对缓慢。这表明系统在不同空间频率下都能更好地保持对比度，对细节的成像能力强。

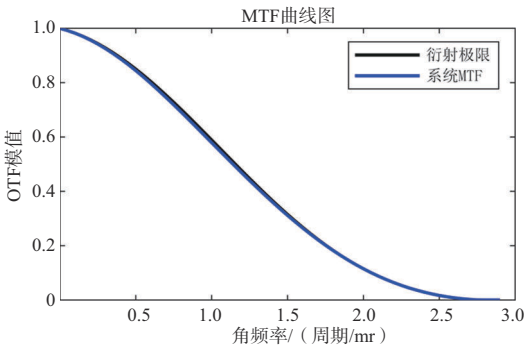


图 5 MTF 曲线(结构 1)

4.2 场曲畸变

场曲和畸变是影响光学系统成像质量的重要像差类型。场曲会使像面产生弯曲，导致不同视场的像不能同时清晰成像；畸变则会使像的形状发生变形，影响成像的真实性和准确性。各个结构的光学最大畸变、SMIA TV 畸变如表 4 所示。

表 4 光学最大畸变、SMIA TV 畸变

结构	光学最大畸变/%	SMIA TV 畸变/%
1	−1.63	−0.25
2	−1.69	−0.26
3	−1.74	−0.27
4	−1.77	−0.28
5	−1.76	−0.27
6	−1.26	−0.19
7	0.13	0.01
8	4.22	0.77
平均值	−0.6875	−0.0925

弧矢场曲、子午场曲以及 Ftan theta 畸变如表 5 所示。网格畸变如图 6 所示。

取结构 2，弧矢场曲、子午场曲图如图 7 所示。

优化后的结果整体的场曲畸变像差控制较好，弧矢场曲总体控制在 0.016~0.028mm 之间，子午场曲总体控制在 0.047~0.084mm 之间，表明该系统对波前差的影响较小，在可接受范围之内。对

于最大畸变，整体值较低，在 0.5% 左右，但 8 号结构畸变大，推测为由系统边缘效应引起。

表 5 各结构弧矢场曲、子午场曲以及 F tan theta 畸变值

类别序号	弧矢场曲/mm	子午场曲/mm	F tan theta 畸变/%
1	0.0166	0.0471	0.05019
2	0.0210	0.0687	0.5189
3	0.0243	0.0732	0.5344
4	0.0267	0.0834	0.5458
5	0.0277	0.0853	0.5446
6	0.0245	0.0754	0.4192
7	0.0166	0.0529	0.1037
8	0.0047	0.0214	1.0983

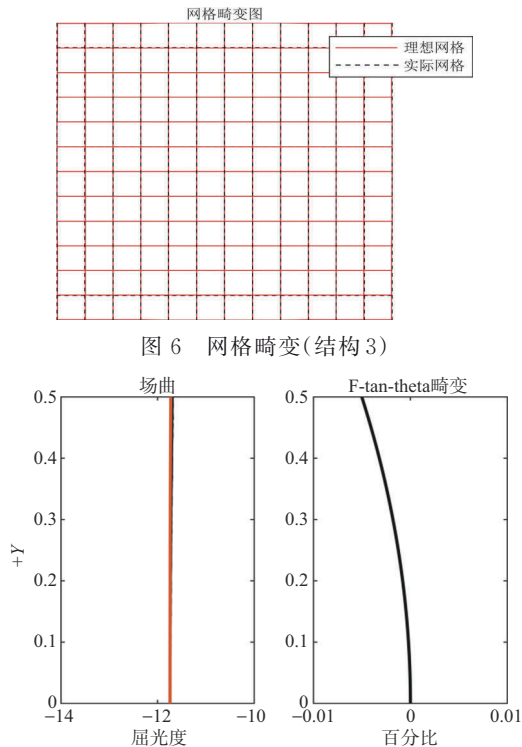


图 6 网格畸变(结构 3)

图 7 弧矢场曲、子午场曲以及 F tan theta 畸变(结构 2)

4.3 激光准直性分析

由于期望获取的激光具有良好准直性能，因此对本系统的发散角进行了详细分析。通过分析发散角的相关数据，能够评估激光束在传播过程中的扩散程度，从而判断其准直性是否符合预期要求，分析结果如表 6 所示。理论值由以下远场发散角式 (6) 计算，其中 M 为扩束比， $\lambda = 632.8\text{nm}$ ， ω_0 为输入光斑大小 (1mm)

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi \omega_0 M} \tag{6}$$

优化后的系统具有较小的发散角，符合激光扩束系统的设计指标。同时与理论计算得到的远场发散角与仿真值趋势相近，由于采用几何光学分析方法，存在一定合理误差。

表 6 各结构出射发散角

结构	光斑扩束比 M	发散角/ 10^{-3}°	理论值/ 10^{-3}°
1	1.85	7.64	6.24
2	2.4	10.53	4.48
3	2.9	7.83	3.98
4	3.5	9.14	3.30
5	4	7.70	2.89
6	5.2	6.82	2.22
7	5.6	3.80	2.06
8	6.4	1.23	1.81

4.4 公差分析

在光学系统中，公差对性能影响显著。进行公差分析，能评估加工和装配误差对系统成像及扩束性能的作用，确保系统稳定可靠。

对此变焦扩束结构进行公差分析，将曲率半径、装配后偏心、XY 方向倾斜、厚度公差设置为 $\pm 0.01\text{mm}$ 。由于 3、6 面为平面或近似平面，在装配时直接与机械结构贴合，不存在楔形公差，因此删除 3、6 面的 TIRX、TIRY 操作数。在灵敏度分析模式下，设置采样数为 4，采用 RMS 波前标准，设置全部优化 (DLS) 补偿器。进行正态分布的 20 次蒙特卡罗模拟。

公差分析结果和公差分析原图如图 8 和图 9 所示。

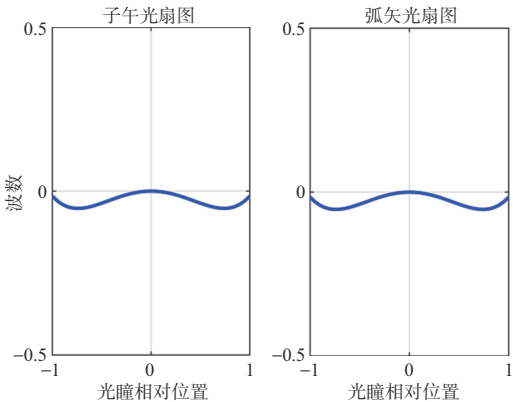


图 8 公差分析前光程差图(结构 7)

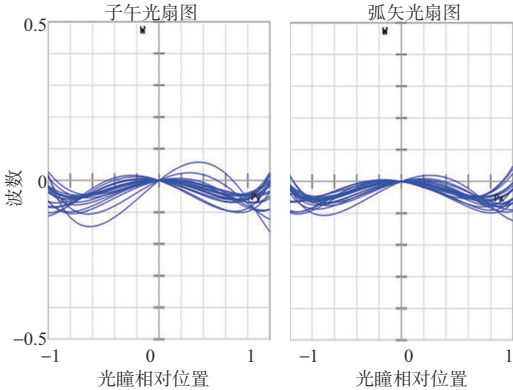


图 9 公差分析(结构 7)

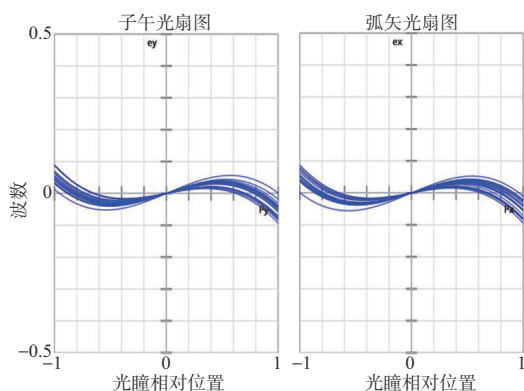


图10 光线光扇图(结构7)

选择光线光扇图和RMS波前差作为观测指标。如图10、11可见,在公差分析过程中,各个结构下产生的波前差均小于0.04波长。由此可见,公差对系统扩束效果影响较小。

4.5 光程差与低波前差分析

光程即光在介质里传播的几何路径长与该介

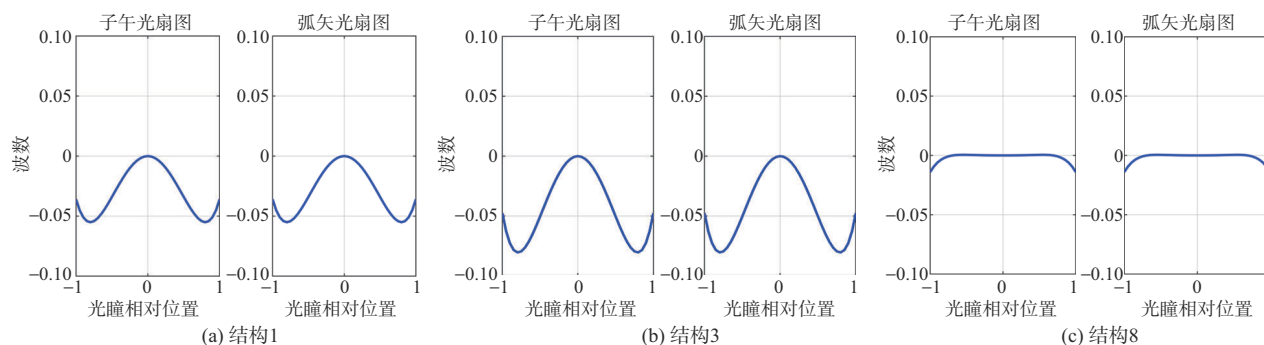


图12 三结构光程差图

可以看出,该系统光程差小于0.05波长。不同路径的光线能够保持良好的相位一致性,极大程度上减少了因光程差异导致的干涉条纹紊乱、成像模糊等问题。该结果充分体现了本三组元变倍激光扩束系统设计的合理性与优越性。

图13所描述的波前函数仿真图呈现了波长为 $0.6328\mu\text{m}$ 、位置为 -0.5000mm 条件下像面的波前状况。图内波前形似圆面,相同颜色对应几乎一致的波前函数值。根据图下方数据,波峰到波谷的差值小于0.05波长,RMS(均方根)值同样小于0.03波长,出瞳直径达 2.7883mm 。说明该系统的波前质量好,在上述条件下,系统产生的波前畸变近乎可忽略不计。

一方面,它保证了激光束在扩束过程中的准直性和稳定性;另一方面,也为系统在复杂环境下的可靠运行提供了有力支撑,降低了外界因素对系统性能的影响,确保系统能够长时间稳定工作。

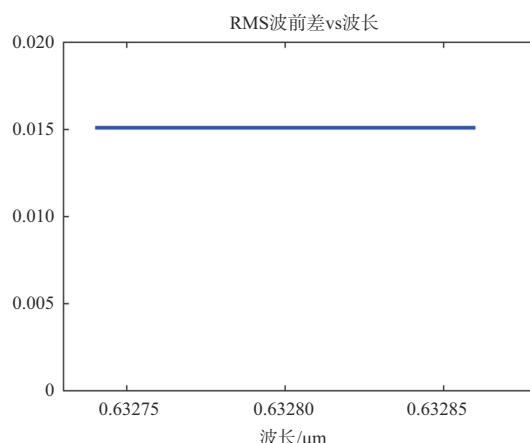


图11 RMS波前差图(结构7)

质折射率的乘积,而光程差,就是两束光传播时各自光程的差值。光程差能体现出两束光因传播路径与介质不同产生的相位差别。

从八个结构中挑选了三个进行分析,相关光程差情况如图12所示。

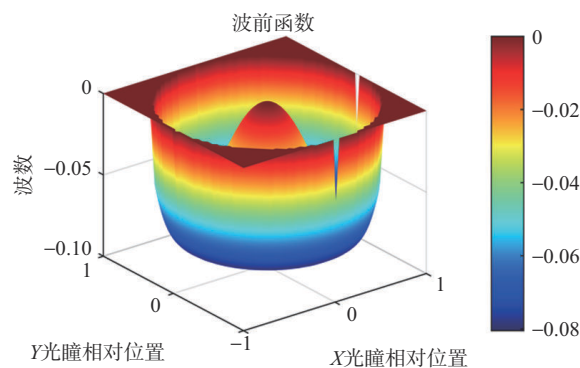


图13 波前函数仿真图(结构3)

5 结 论

本研究聚焦于激光领域,成功设计并优化了一款变倍扩束光学系统,理论设计上,采用机械补偿式三组元结构与BK7和F2材料双胶合透镜组,通过精确计算变倍组和补偿组移动距离,实现了系统变焦功能。确定多个扩束比下的初始结构,为后续优化提供了可靠的基础。

(下转第625页)