

文章编号:1001-5078(2024)08-1291-09

· 光学技术 ·

一种基于 Buchdahl 模型的扩束系统设计

路鸿博, 褚凡忠, 谢桂娟

(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘要:本文基于 Buchdahl 模型的色散向量分析法设计了一款可用于激光测距的多波长复消色差激光发射镜头,其成本低廉,体积小,光束质量好且能抗高功率激光损伤,设计首先通过 Buchdahl 色散系数方程计算得到了常用国产高强激光透镜材料的色散向量,然后对光学系统进行光线追迹并计算比例因子,从而进行无焦系统的 Buchdahl 色散向量计算,最终依据此结果指导优化,优化后的系统在 0.707 孔径处 1064 nm 与 1572 nm 和 1550 nm 的色差分别仅为 2.49×10^{-6} D 和 4.43×10^{-6} D,1550 nm 与 1530 nm 的色差仅为 3.04×10^{-6} D,在波段范围内最大色差仅为 4.43×10^{-6} D,最大移焦差仅为 0.0005 D,各视场的 MTF 和点列图完全达到衍射极限,系统的复色差得到有效的矫正,研究结果使 Buchdahl 模型的色散向量分析法成功应用于工程设计中的无焦光学系统,为无焦光学系统设计提供了一种新思路。

关键词: Buchdahl 模型;色散向量;激光扩束系统;光学设计;无焦光学系统

中图分类号: O434; TN243 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.08.017

A design of beam expansion system based on Buchdahl model

LU Hong-bo, CHU Fan-zhong, XIE Gui-juan

(The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: Based on the dispersion vector analysis method of Buchdahl model, this paper designed a multi-wavelength achromatic laser emission lens that can be used for laser ranging, which has low cost, small size, good beam quality and resistance to laser damage at peak power. Firstly, the dispersion vector of commonly used domestic high-intensity laser lens materials was calculated by Buchdahl dispersion coefficient equation. Then, light tracing was performed on the optical system and the scale factor was calculated to calculate the Buchdahl dispersion vector of the non-focal system. Finally, the optimization was guided by this result. The color difference of the optimized system at 0.707 aperture of 1064 nm, 1572 nm and 1550 nm was only 2.49×10^{-6} D and 4.43×10^{-6} D, respectively. The color difference between 1550 nm and 1530 nm is only 3.04×10^{-6} D, the maximum color difference in the band range is only 4.43×10^{-6} D, and the maximum shift difference is only 0.0005 D. MTF and dot plot of each field of view fully reach the diffraction limit, and the polychromatic difference of the system is effectively corrected. The research results make the dispersion vector analysis method of Buchdahl model successfully applied to the focus-free optical system in engineering design, and provide a new idea for the design of focus-free optical system.

Keywords: Buchdahl model; dispersion vector; laser beam expansion system; optical design; focus-free optical system

1 引言

在激光测距以及激光通信系统中,波长的选择是一个非常重要的参数,在大气传输窗口范围内选用合适的波长几乎可以透明传播,从而获得更好的链路质量和更低的信号指向衰减,基于过去的研究发现,不同波长的激光测距机被广泛应用于深空测高和远距离的激光测距^[1-2]。但是在实际使用的过程中发现,采用单波长发射镜头不仅使系统复杂化而且很多时候需要频繁更换,这不会降低光学系统工作稳定性,还会增加整机结构的潜在设计难度,因此设计一种同时满足多波长使用的激光扩束镜头是一个可行的解决方案。

色差是影响宽光谱光学系统工作的重要因素,因此消色差是进行多波长光学设计必须考虑的问题^[3-4],Buchdahl模型是基于Schott和Sellmeier模型进行改进得到的用以描述折射率的多项式^[5-6],其具有更快的收敛速度,可以更高效率的得到复消色差的最优解,以往对其研究主要针对有焦的成像系统^[7-8],后经过改进得到可以适用于无焦光学系统的表达式^[9],由于实际的设计过程需要不断压缩成本或者提升质量,避免不了结构的迭代和改进,但是目前鲜有针对Buchdahl模型的色散向量分析法优化过程中改变镜片数量和结构形式的设计,所以本文采用该方法针对此问题进行无焦光学系统的复消色差设计。

2 光学系统的初始结构设计

激光扩束系统的初始结构参数表如表1所示,针对此设计考虑如下:由于反射式扩束系统的加工装调难度较大、成本较高且受外界影响较大,使用场景有较多限制^[10],所以在衡量变倍比与镜片体积和重量后,优先选用透射式光学系统。

激光扩束系统分为开普勒式和伽利略式望远系统,开普勒扩束系统由于两正组元焦点在间隔中形成实像点,当激光能量较高时,系统波像差变差,输出光束质量变差,伽利略式扩束系统由正负组元组成,其间隔内没有实像点,故选用其形式。

为了适应于高能激光测距系统的工作环境,防止激光回光损伤激光器,故将第一片透镜的第一个面设置为平面,且采用稳定性与强度都很高的无色二氧化硅材料,为了与激光器出射光束良好的匹配,防止工作环境中的冲击振动影响光束质量,故给定 0.1° 的视场余量。

表1 初始结构参数表

Tab.1 Initial structural parameter table

激光波长	出射激光发散角	入射激光光束直径	激光扩束镜光学总长	发射口径
$\lambda_1 = 1064 \text{ nm}$	$< 0.2 \text{ mrad}$	6.5 mm	$< 80 \text{ mm}$	$\leq 38 \text{ mm}$
$\lambda_2 = 1530 \text{ nm}$				
$\lambda_3 = 1550 \text{ nm}$				
$\lambda_4 = 1572 \text{ nm}$				

基于上述方案进行初始结构计算:

$$f_1' - f_2' = L_{\text{总长}} \quad (1)$$

其中, f_1' 和 f_2' 分别为前后两个光组的焦距; $L_{\text{总长}}$ 为光学总长。

$$M = |f_1'/f_2'| \quad (2)$$

其中, $L_{\text{总长}}$ 取 75 mm ,扩束比 M 为 5.5 倍,经过计算 $f_1' = -16.67 \text{ mm}$; $f_2' = 91.67 \text{ mm}$

$$D_{\text{出瞳}} = D_{\text{入瞳}} \times M \quad (3)$$

其中, $D_{\text{入瞳}}$ 为 6.5 mm ;扩束比 M 为 5.5 倍,经过计算 $D_{\text{出瞳}}$ 为 35.75 mm

至此得到初始结构的设计参数,由于该扩束系统应用于高能激光环境中,所以应避免使用胶合透镜,基于上述计算结果选型,并通过ZEMAX优化并进行改进得到如下初始结构,其初始结构光路原理图如图1所示,其评价图如图2所示:

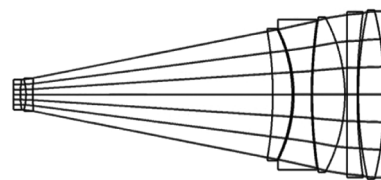
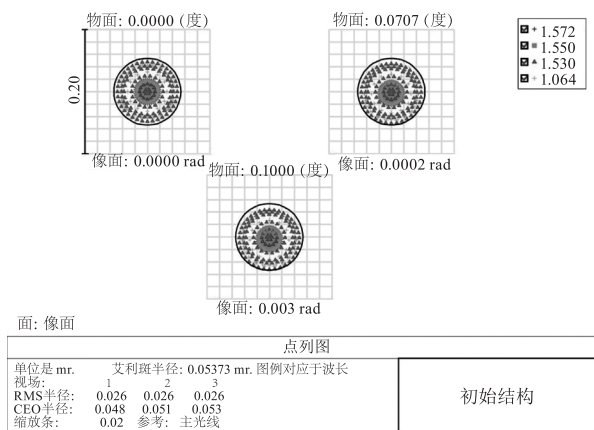


图1 初始结构光路原理图

Fig.1 Initial structured light path schematic diagram



(a)初始结构点列图

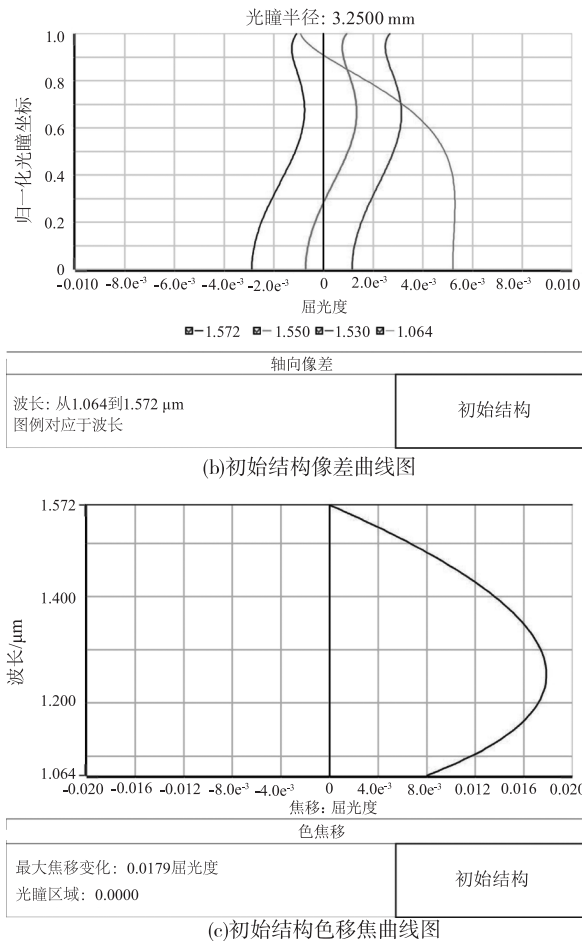


图2 初始结构评价图

Fig. 2 Initial structural evaluation chart

初始结构的点列图、像差曲线图、色移焦曲线图分别如图 2(a)、2(b)、2(c) 所示,初始结构的点列图基本达到衍射极限,RMS 光斑半径为 0.026 mrad,但在 0.707 孔径处最大色差为 $2.3898 \times 10^{-2} D$,波段内最大的移焦差为 0.0179 D,色差没有得到很好地矫正,系统未能完全实现复消色差设计,可以预见,随着发射距离的增加,不同波长的光斑差异过大,导致无法满足使用要求,此外,由于初始结构过于繁琐,镜片过多,间距过小,不利于公差分析^[11],而且会严重增加成本和稳定性,所以在复消色差设计的同时需要减少镜片的数量。

3 无焦系统的 Buchdahl 消色差理论

Buchdahl 模型引入了色散坐标,将折射率表示为幂级数形式,相比于常规的 Sellmeier 和 Schott 模型具有更快的收敛速度,其形式为^[12]:

$$N = N_0 + v_1 \omega + v_2 \omega^2 + \dots + v_i \omega^i \quad (4)$$

其中: $\omega = \frac{\lambda - \lambda_0}{1 + \alpha(\lambda - \lambda_0)}$, α 为控制收敛速度的常

数,需要经过大量的计算找其收敛速度最快的情况即最优解。

由公式(4)经代数变换得到:

$$D(\lambda) = \sum_{i=1}^n \eta_i \omega^i$$

其中, $\eta_i = \frac{v_i}{N_0 - 1}$ 。

从而:

$$D(\lambda) = \frac{N(\lambda) - N_0}{N_0 - 1} \quad (5)$$

根据三阶像差理论得到^[13]:

$$Y = \frac{1}{u'_m} \sum_{j=1}^m \left(\frac{\varphi_j y_j^2}{V_j} \right) = \frac{1}{u'_m} \sum_{j=1}^m \varphi_j y_j^2 D_j(\lambda) \quad (6)$$

根据光线追迹公式:

$$n'u' = nu - y\varphi \quad (7)$$

为方便计算,假定无穷远的光线平行入射,且各镜片之间的间隔为 0,可以得到:

$$u'_m = - \sum_{i=1}^m y_i \varphi_i \quad (8)$$

从而联立式(6)和式(8)得到:

$$Y = -y_1 D_0(\lambda) = - \frac{1}{\varphi_0 y_1} \sum_{j=1}^m \varphi_j y_j^2 D_j(\lambda) \quad (9)$$

从而得到:

$$D_0(\lambda) = \sum_{j=1}^m \frac{\varphi_j y_j^2}{\varphi_0 y_1^2} D_j(\lambda) \quad (10)$$

其中, $\alpha_j = \frac{\varphi_j y_j^2}{\varphi_0 y_1^2}$ 为比例因子。

由于其形式的限制,其分母与系统总体的光焦度有关,故只能用于有焦光学系统,若应用于无焦光学系统中则需要改进其形式,避免公式中的比例因子完全依赖光焦度。

联立式(7)和式(9)得到:

$$Y' = - \sum_{i=1}^m \left[\frac{y_i^2 \varphi_i}{\left(\sum_{i=1}^m y_i \varphi_i \right)} D_i(\lambda) \right] \quad (11)$$

考虑到光路在折射率变化较大时不能以恒定的光线高度入射,需要对(9)进行改进从而表示为各透镜之间的求和形式:

$$Y' = - \sum_{i=1}^m y_i D_0(\lambda) \quad (12)$$

联立式(11)和式(12)得到:

$$D_0(\lambda) = \sum_{i=1}^m \left[\frac{y_i^2 \varphi_i}{\left(\sum_{i=1}^m y_i^2 \varphi_i \right)} D_i(\lambda) \right] \quad (13)$$

其中, $\alpha_i = \frac{y_i^2 \varphi_i}{\sum_{i=1}^m y_i^2 \varphi_i}$ 为比例因子。

最终向量为各镜片色散向量与比例因子的乘积并求和:

$$\vec{G}_0 = \sum_{j=1}^m \alpha_j \vec{G}_j \quad (14)$$

其中: $\vec{G}_j = \eta_{1j}x + \eta_{2j}y + \eta_{3j}z$, 至此得到无焦形式的 Buchdahl 模型的色散向量分析法的计算公式, 此公式为后续消色差设计的理论基础, 理论上向量的模值越小代表色差矫正的越好。

4 基于 Buchdahl 模型的色散向量分析法的扩束系统设计

为对初始结构的色差进一步优化, 根据经验将常用的国产高强激光透镜材料进行了色散向量的计算, 得到的部分材料的色散向量分布图如图 3 所示, 并对设计中所涉及的材料进行标注, 此结果是材料选择的直观依据, 继而对于初始结构进行色散向量分析, 得到的初始结构光线追迹参数及色散系数表如

表 2 所示, 初始结构色散向量计算结果如图 4 所示, 初始色散向量分布图和初始色散合向量图分别如图 4(a) 和图 4(b) 所示, 为了表示的更直观, 取负透镜组的反向量并进行逆运算, 如图中虚线所示, 由图 4(b) 发现负透镜组合向量两个方向的分量均小于正透镜组合向量两个方向的分量, 所以首先考虑增大负透镜并减小正透镜的 η_1 和 η_2 系数。

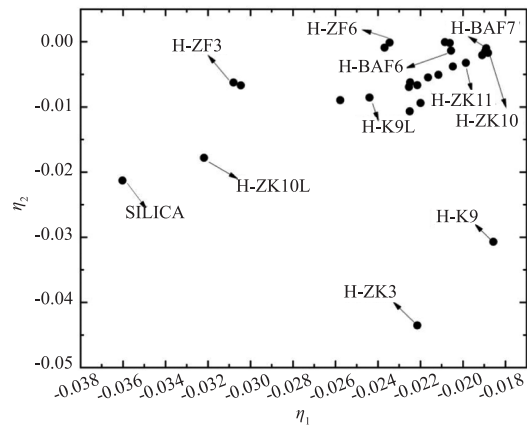
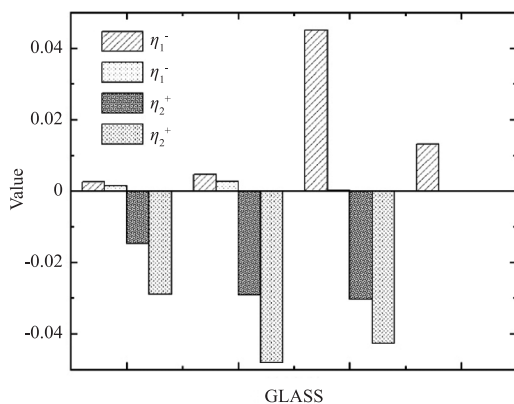


图 3 部分材料的色散向量分布图
Fig. 3 Dispersion vector distribution diagram of some materials

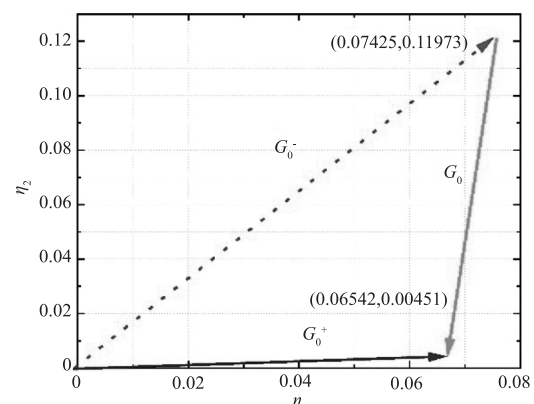
表 2 初始结构光线追迹参数及色散系数

Tab. 2 Initial structural ray tracing parameters and dispersion coefficient

GLASS	SILICA	SILICA	H-ZK3	H-ZF6	H-K9	H-ZF6	H-ZK3
P	0.020908	0.037629	0.011064	-0.0302	0.018764	0.005787	0.014047
Y	3.25	3.288	13.817	14.221	16.259	14.476	18.093
η_1	-0.03602	-0.03602	0.022149	0.023449	0.018567	0.023449	0.020956
η_2	-0.02131	-0.02131	0.043531	0.000115	0.030713	-0.000115	-0.02937
α	0.069702	0.128396	0.666663	1.927676	1.565596	0.557833	1.451348



(a) 初始色散向量分布图



(b) 初始色散合向量图

图 4 初始结构色散向量计算结果

Fig. 4 Calculation results of initial structural dispersion vector

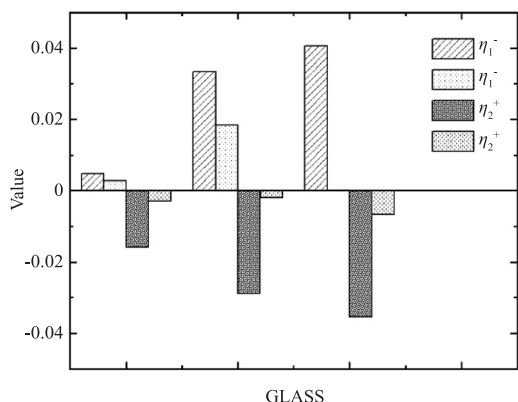
实际设计中不仅需要正透镜和负透镜分别替换为色散系数较大和较小的材料,而且同时需要考虑光线走向和光焦度的变化,从而需要同时考虑多个变量对结果的影响,所以根据无焦系统的 Buchdahl 模型的色散向量分析法,求出其组合色散向量与缩放因子的积,本文设计通过 ZEMAX 操作数的设置和 Matlab 的计算,进行色散向量与缩放因子的积的实时监控,以此为参考进行材料

的替换,此外,为减少透镜数量,首先确定要去掉的镜片与补偿镜片的组合光焦度符号,优化的过程中计算系统中其他光组的色散向量,光焦度以及光线走向的变化,得到优化后结构光线追迹参数及色散系数表如表 3 所示,优化后结构色散向量计算结果如图 5 所示,优化后色散向量分布图和优化后色散合向量图分别如图 5(a)和图 5(b)所示。

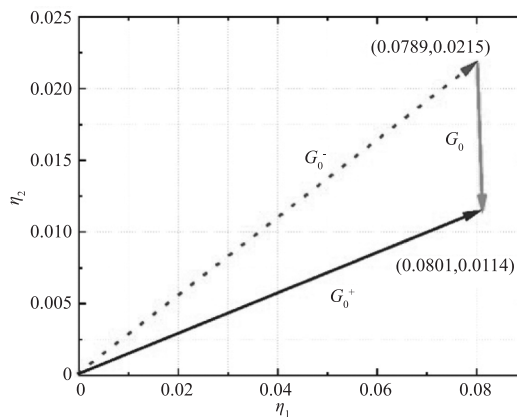
表 3 优化后结构光线追迹参数及色散系数

Tab.3 Optimized structural ray tracing parameters and dispersion coefficient

GLASS	SILICA	H-ZK10L	H-ZK11	H-BAF6	H-ZF6	H-ZK11
P	-0.05056	-0.038627	0.017232	0.0209	-0.02514	0.021384
Y	3.25	10.3738	13.43	16.3813	16.6335	18.015
η_1	-0.03602	-0.03218	-0.020472	-0.02056	-0.023449	-0.020472
η_2	-0.02131	-0.017809	-0.003794	-0.001387	-0.000115	-0.003794
α	-0.1332	-1.0366	0.7751	1.3986	-1.7346	1.7307



(a)优化后色散向量分布图



(b)优化后色散合向量图

图 5 优化后结构色散向量计算结果

Fig.5 Calculation results of optimized structural dispersion vector

表 2 和表 3 中黑色加粗的材料为替换的材料,第一步透镜材料色散向量变化图如图 6 所示,负正透镜组材料色散向量变化图分别如图 6(a)和 6(b)所示,其中圆直线和星号点直线为优化之前的色散向量分布曲线,三角点线和矩形短点线为优化后的色散向量分布曲线,右上标(1)为优化之前,右上标(2)为优化之后,对应材料已在图中标出,分析如下:其中 H-ZK10L 相比 SILICA 虽然色散系数 η_1 和 η_2 减小,但是由于结构改变,光线入射高度变化较大,而且光焦度几乎不变,所以其色散向量与缩放因子的积更大,负透镜组的 η_1 和 η_2 变大,满足替换要求,H-BAF6 相比 H-K9 虽然 η_1 略大且缩放因子变化不大,但是 η_2 明显变小导致正透镜组的和向量

减小,H-ZK11 相比 H-ZK3 的 η_1 几乎不变, η_2 下降明显且缩放因子仅略微变大,最终导致正透镜组和向量变小,所以以上替换均满足替换标准,倒数第二片(H-ZF6)和第一片(SILICA)均为负光焦度,由于优化过程中删减镜片的光焦度补偿和入射光线高度的变化,其缩放因子变大,负透镜组的和向量变大。

优化前后的光学系统的组合向量系数计算结果如图 4 和图 5 所示,图 4(a)和图 5(a)展示了不同镜片的 η_1 和 η_2 分量的变化情况,负透镜组的 η_2 分量明显变大,正透镜组的 η_2 分量明显减小,导致镜头整体和向量的模值明显减小,图 4(b)和图 5(b)展示了镜头向量模值最终计算的结果,由初始结构的 0.0134 为优化后的 0.0109。

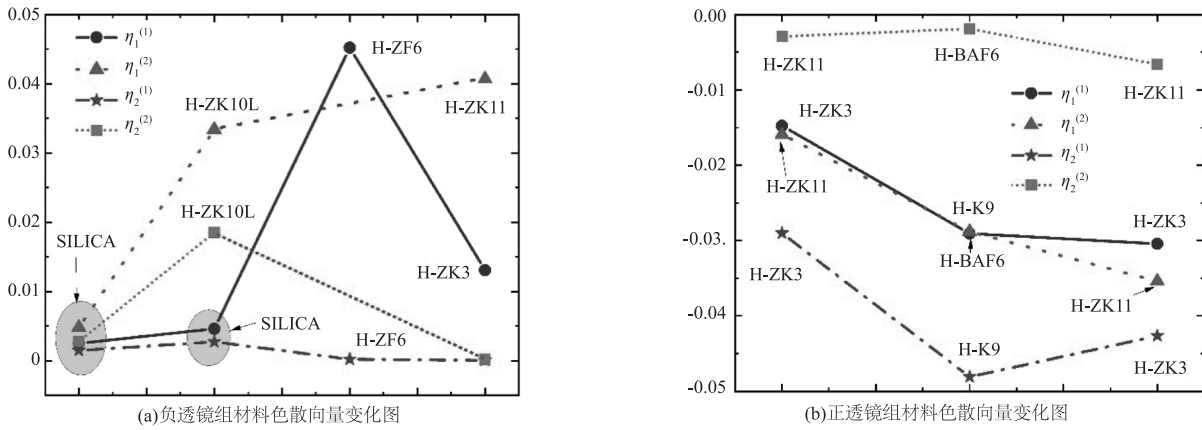


图 6 第一步透镜材料色散向量变化图

Fig. 6 Figure of dispersion vector variation of lens material in the first step

优化后的光学结构及其评价图如图 7 和图 8

所示。

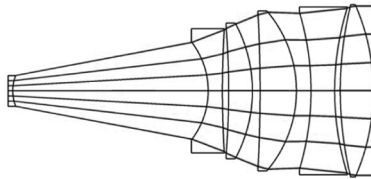
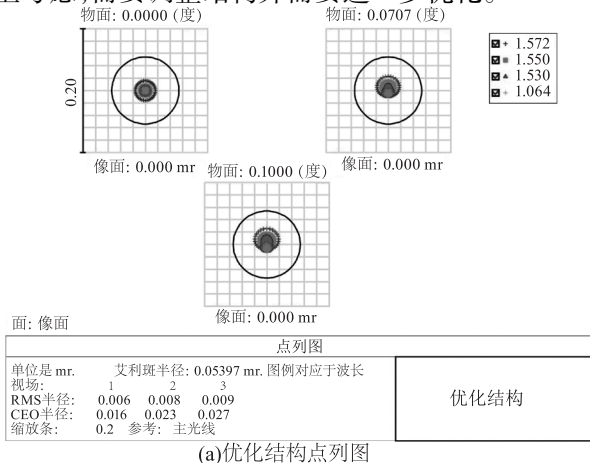


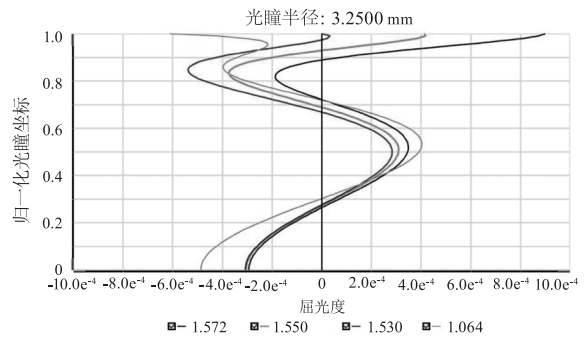
图 7 优化结构光路原理图

Fig. 7 Schematic diagram of optimized structured light path

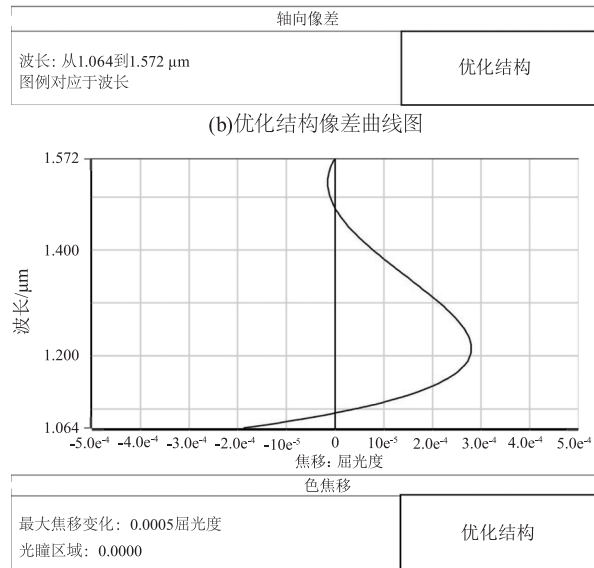
优化结构评价图如图 8 所示,优化结构点列图、像差曲线图、色移焦曲线图分别如图 8(a)、8(b)、8(c)所示,其 RMS 光斑半径由 0.026 mrad 变为 0.009 mrad,像质得到很大程度的改善,优化后的扩束系统在 0.707 孔径处最大色差为 $7.75 \times 10^{-5} D$,波段内的最大移焦差为 0.0005 D,可以发现色差和色移焦均得到很大程度的改善,但是整体结构仍过于复杂,最后一片透镜边缘过薄,且镜片间距过小从而导致公差过严或者无法使用,从而降低可行性,综上所述,需要调整结构并需要进一步优化。



(a) 优化结构点列图



(b) 优化结构像差曲线图



(c) 优化结构色移焦曲线图

图 8 优化结构评价图

Fig. 8 Optimization structure evaluation chart

由图 5(b) 得到的结果可知,正透镜组的 η_2 分量小于负透镜组的 η_2 分量,和向量的 η_1 分量矫正较好,所以有两种方案,一种是保持正负透镜组 η_1 不变并减小负透镜组和增大正透镜组的 η_2 分量,第二种是减小正负透镜组和向量之间的差距,此时只需要控制其差值即可。

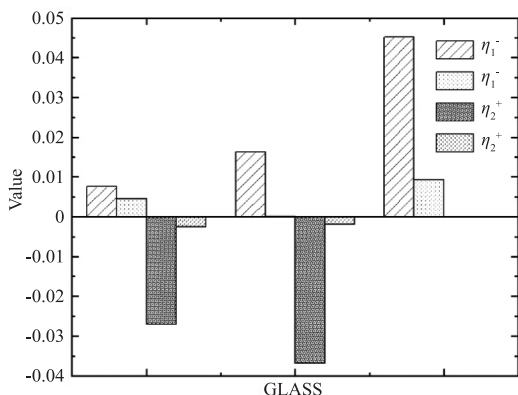
在实际的材料选择过程中,去掉透镜会导致其他透镜的光焦度补偿,所以基于整体光学结构合理,更换各透镜材料时并不能保证改变 η_2 分量的前提下保证 η_1 分量不变,故在设计时需要考虑整体各参数之间的补偿,所以选择上述第二种方案更合理,设计依然根据 ZEMAX 操作数和 Matlab

进行控制,此次复消色差以增大正透镜组的向量为起点进行材料的替换与光线的控制,得到的最终结构光线追迹参数及色散系数表如表 4 所示,最终结构色散向量计算结果如图 9 所示,最终色散向量分布图和最终色散合向量图分别如图 9(a)和图 9(b)所示。

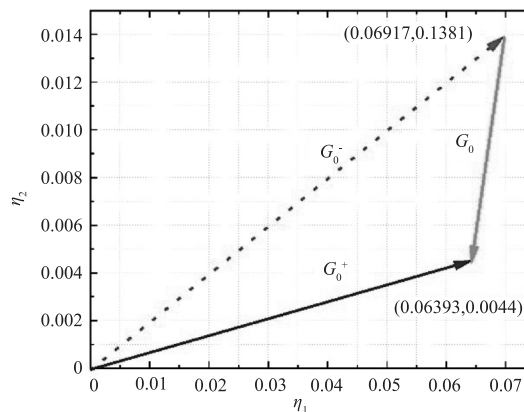
表 4 最终结构光线追迹参数及色散系数表

Tab.4 Table of final structural ray tracing parameters and dispersion coefficients

GLASS	SILICA	H-ZF6	H-ZK10	H-ZF3	H-BAK7
P	-0.060461	-0.015449	0.020724	-0.0182	0.018187
Y	3.25	11.658	14.436	15.593	17.949
η_1	-0.03602	-0.023449	-0.018816	-0.030801	-0.018901
η_2	-0.02131	-0.000115	-0.001728	-0.006276	-0.000992
α	-0.21184	-0.696489	1.432627	-1.4679	1.943602



(a)最终色散向量分布图



(b)最终色散合向量图

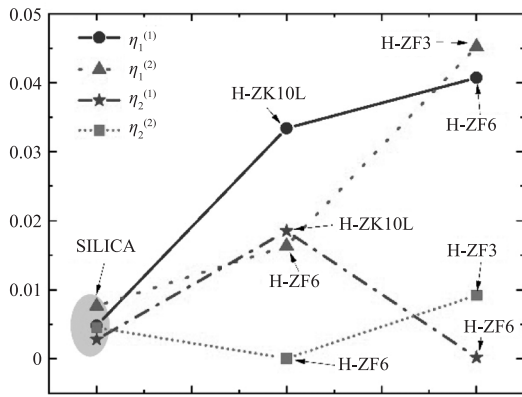
图 9 最终结构色散向量计算结果

Fig.9 Final structural dispersion vector calculation result

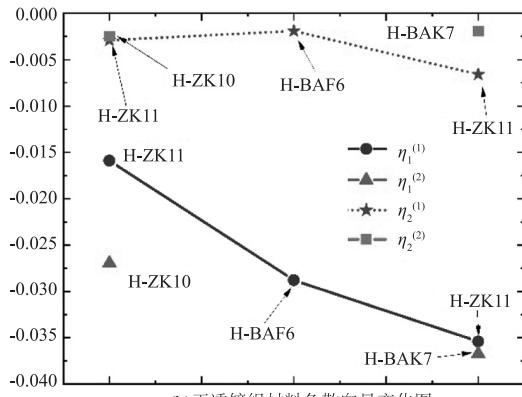
优化之前分析其结构特点,考虑将 H-ZF6 和 H-BAF6用一片透镜替代,并针对 H-ZF6 和 H-BAF6 的色散和向量进行材料替换,由于需要进行动态平衡,在优化的过程中不断调整各参数之间的变化,所以以此为优化起点同时对其他材料进行迭代计算,故在优化的过程中尤其注意每片透镜光焦度的变化与光线的入射高度以及走向,表 4 为最终结构光线追迹参数及色散系数表,其中黑色加粗的材料为替换的材料,第二步透镜材料色散向量变化图如图 10 所示,负正透镜组的材料色散向量变化图分别如图 10(a)和 10(b)所示,其中圆直线和星号点直线为优化之前的色散向量分布曲线,三角点线和矩形短点线为优化后的色散向量分布曲线,对应材料已在图中标出,分析如下:去掉 H-BAF6 会导致正透镜组色散向量 η_1 和 η_2 的分

量大幅度减小,选用的 H-ZF6 相比 H-ZK10L 的 η_1 和 η_2 系数均减小,而且其光线入射高度几乎不变,光焦度减小,从而导致其比例因子减小,所以负透镜组的色散向量的 η_1 和 η_2 分量明显减小,经过上述优化后正透镜组的 η_2 分量与负透镜组的 η_2 分量差距变小了,但同时 η_1 分量差距有一定程度的变大。

为了能够得到更好的复消色差效果,需要利用正负透镜组的其他两片透镜平衡色散,针对负透镜组 η_1 分量变大的问题可以增大其他两片透镜的色散向量,所以选择 η_1 和 η_2 系数较大的 H-ZF3 替换 H-ZF6,控制其缩放因子尽量不变,与此同时增大 SILICA 的缩放因子,可以使负透镜组与正透镜组的 η_1 分量差距减小,但是与正透镜组的 η_2 分量差距有一定程度的增加。



(a)负透镜组材料色散向量变化图



(b)正透镜组材料色散向量变化图

图 10 第二步透镜材料色散向量变化图

Fig. 10 Figure of dispersion vector variation of lens material in the second step

针对正透镜组选用 H-ZK10 替换 H-ZK11, 虽然 H-ZK10 的 η_1 和 η_2 系数小于 H-ZK11, 但是其具有更大的缩放因子, 可以使 η_1 的分量几乎不变并减小正负透镜组的 η_2 分量差距, 此时正负透镜组 η_2 分量差距进一步减小, 最后选用 η_1 和 η_2 系数较小的 H-BAK7 替换 H-ZK11 并控制缩放因子尽量不变, 使正透镜组的 η_1 分量略微增加 η_2 分量减小, 使得正负透镜组的和向量进一步缩小, 最终很好的完成了复消色差。

最终优化前后的光学系统的色散向量计算结果如图 5 和图 9 所示, 图 5 (a) 和图 9 (a) 展示了不同镜片的 η_1 和 η_2 分量的变化, 图 5 (b) 和图 9 (b) 展示了最终色散向量分布和最终色散合向量结果, 负透镜组的 η_2 和正透镜组的 η_2 略微变小, 负透镜组的 η_1 略微变小, 正透镜组的 η_1 明显变小, 最终整体向量模值与优化前的整体向量模值基本持平, 由优化后的 0.0109 变为最终的 0.0102。

最终设计结构和评价图如图 11 和图 12 所示。

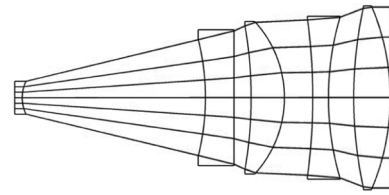
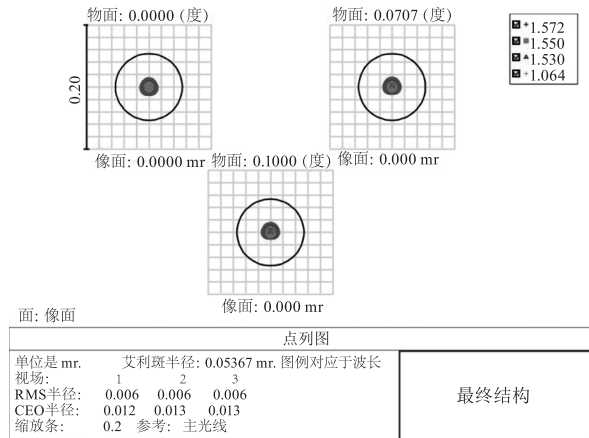
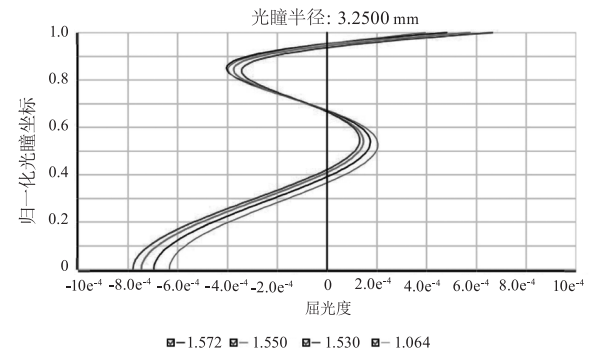


图 11 最终结构光路原理图

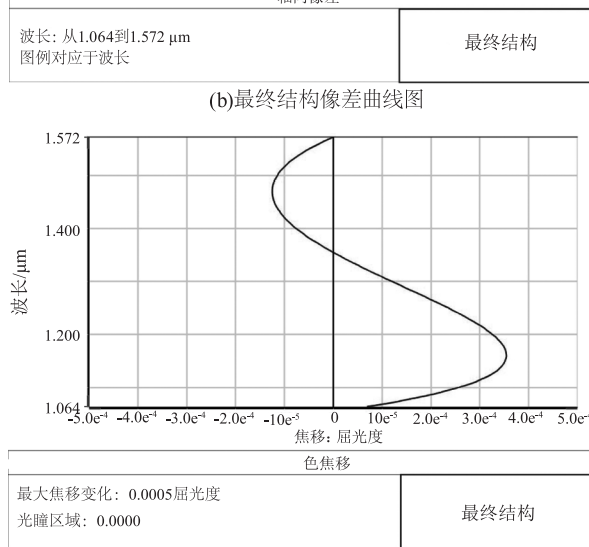
Fig. 11 Final schematic diagram of structured light path



(a)最终结构点列图



(b)最终结构像差曲线图



(c)最终结构色移焦曲线图

图 12 最终结构评价图

Fig. 12 Final structural evaluation chart

最终结构评价图如图 12 所示,最终的点列图、像差曲线图、色移焦曲线图分别如图 12(a)、12(b)、12(c)所示,其 RMS 光斑半径由 0.018 mrad 变为 0.006 mrad,像质矫正很好,优化后的系统在 0.707 孔径处 1064 nm 和 1572 nm 的色差仅为 2.49×10^{-6} D,1064 nm 和 1550 nm 的色差仅为 4.43×10^{-6} D,1550 nm 和 1530 nm 的色差仅为 3.04×10^{-6} D,波段范围内最大色差仅为 4.43×10^{-6} D,波段范围内最大移焦差仅为 0.0005 D,各视场的 MTF 以及点列图完全达到衍射极限,系统的复色差得到有效的矫正,而且整体结构简单,像质较高,公差合理,至此无焦光学系统的复消色差设计完成。

5 结论

基于激光应用的实际问题,从初始结构出发,利用 ZEMAX 软件对无焦光学系统进行设计和优化,通过 Buchdahl 模型的色散向量分析法替换透镜材料,设计出 5.5 倍且复消色差效果较好的激光扩束镜头,结果验证了 Buchdahl 模型的色散向量分析法和优化步骤的有效性,且该方法能够快速设计出高质量光学系统,为无焦激光发射镜头质量的提升开拓了新思路。

参考文献:

- [1] Dreischer T, Tuechler M, Weigel T, et al. Integrated RF-optical TT & C for a deep space mission[J]. *Acta Astronautica*, 2009, 65(11): 1772 - 1782.
- [2] Ortiz G G, Lee S, Monacos S P, et al. Design and development of a robust ATP subsystem for the altair UAV-to-ground lasercomm 2. 5-Gbps demonstration [C]//Free-Space Laser Communication Technologies XV. SPIE, 2003, 4975: 103 - 114.
- [3] Bayya S, Gibson D, Nguyen V, et al. Design and fabrication of multispectral optics using expanded glass map [C]//Infrared Technology and Applications XLI. SPIE, 2015, 9451: 436 - 442.
- [4] Shepard III R H, Sparrold S W. Material selection for color correction in the short-wave infrared [C]//Current Developments in Lens Design and Optical Engineering IX. SPIE, 2008, 7060: 100 - 109.
- [5] Pi Y, Reardon P J, Pollock D B. Applying the Buchdahl dispersion model to infrared hybrid refractive-diffractive achromats [C]//Infrared Technology and Applications XXXII. SPIE, 2006, 6206: 898 - 907.
- [6] Yang A, Gao X, Li M. Design of apochromatic lens with large field and high definition for machine vision [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(22): 5977 - 5985.
- [7] Luo Kuizhen, Yu Fangjin. Apochromatic design of machine vision optical system [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2021, 58(24): 326 - 332. (in Chinese)
骆魁桢, 于方津, 高兴宇. 机器视觉光学系统的复消色差设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(24): 326 - 332.
- [8] Xiao Z. Optical design of non-CaF₂ of middle and low power flat-field apochromatic metallographic micro-objective [C]//International Society for Optics and Photonics, 2010.
- [9] Zhang Jicheng, Fu Yuegang, Hu Yuan. Buchdahl model of achromatic method for unfocused systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(1): 163 - 168. (in Chinese)
张继承, 付跃刚, 胡源. Buchdahl 模型的无焦系统消色差方法 [J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(1): 163 - 168.
- [10] Zhang Cong, Wang Xuexiang, Yan Gaoshi. Optimum design to a single lens transmitted collimating module of laser ranging finders [J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(4): 383 - 385. (in Chinese)
张聪, 王雪详, 严高师. 激光测距仪单透镜发射准直模块的优化设计 [J]. *激光与红外*, 2009, 39(4): 383 - 385.
- [11] Fischer R E, Tadic-Galeb B, Yoder P R, et al. Optical system design [M]. New York: McGraw Hill, 2000.
- [12] Wang W, Zhong X, Liu J, et al. Apochromatic lens design in the short-wave infrared band using the Buchdahl dispersion model [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(4): 892 - 903.
- [13] Smith, Zhou Haixian, Cheng Yunfang. Modern optical engineering [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011. (in Chinese)
史密斯, 周海宪, 程云芳. 现代光学工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.