

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.240250.

光电子器件技术

王隽杰,肖清明,王震,等. 基于非球面透镜实现 OCS 系统光路优化研究[J]. 光通信研究, 2026(4):200–206.

Wang J J, Xiao Q M, Wang Z, et al. Research on Optical Path Optimization of OCS System based on Aspherical Lens[J]. Study on Optical Communications, 2026(4):200–206.

基于非球面透镜实现 OCS 系统光路优化研究

王隽杰,肖清明,王 震,曹俊红

(1. 武汉邮电科学研究院,武汉 430074; 2. 武汉光迅科技股份有限公司,武汉 430205)

摘要:【目的】光电路交换(OCS)系统在光通信网络中占据核心地位,但其性能受到耦合效率低下问题的严重制约。文章旨在研究并优化一种基于非球面透镜的耦合方案,提升 OCS 系统的耦合效率,减少几何像差的影响,进而提高系统的稳定性和整体性能。【方法】文章探讨了不同耦合失配情况下对系统插损的影响,重点分析了 OCS 系统中模斑失配和轴向失配对插损和耦合效率的影响机理,利用非球面透镜光线聚焦和校正像差等特性,设计并优化了一种可应用于 OCS 系统中的非球面透镜,提升系统耦合效率,消除系统中的几何像差。【结果】研究结果表明,优化后的非球面透镜设计能够显著提升 OCS 系统的耦合性能,其耦合效率从 79.57% 提高到 99.92%,接近理论极限值。模斑失配和轴向失配的影响显著减弱,几何像差的影响减弱,光路的均匀性和稳定性得到有效改善。【结论】非球面透镜的优化设计,有效解决了模斑失配和轴向失配导致的插损问题,显著提高了 OCS 系统的耦合效率与光路稳定性。

关键词:光电路交换;耦合效率;非球面透镜

中图分类号:TN252

文献标志码:A

Research on Optical Path Optimization of OCS System based on Aspherical Lens

WANG Junjie, XIAO Qingming, WANG Zhen, CAO Junhong

(1. Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan 430074, China;

2. Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

Abstract:【Objective】Optical Circuit Switching (OCS) systems play a pivotal role in optical communication networks. However, their performance is significantly limited by coupling inefficiency. This paper aims to investigate and optimize an aspherical lens-based coupling scheme to enhance the coupling efficiency of the OCS system, mitigate the effects of geometric aberrations, and improve the system stability and overall performance. 【Methods】This study examines the impact of various coupling mismatches on system insertion loss, with a focus on mode-spot and axial mismatches. Leveraging the unique light-focusing and aberration-correcting properties of aspherical lenses, a new aspherical lens design was developed and optimized for the OCS system. This approach seeks to improve the system coupling efficiency while minimizing the influence of geometric aberrations. 【Results】The optimized aspherical lens design significantly enhances the coupling performance of the OCS system, increasing coupling efficiency from 79.57% to 99.92%, approaching the theoretical maximum. The adverse effects of mode-spot mismatch and axial mismatch are notably reduced, and geometric aberrations are minimized. These improvements contribute to better optical path uniformity and stability, thereby supporting the reliable operation of the OCS system. 【Conclusion】The optimized aspherical lens design effectively addresses the insertion loss caused by mode-spot and axial mismatches, substantially improving the coupling efficiency and optical path stability of the OCS system.

Key words:OCS; coupling efficiency; aspherical lenses

0 引 言

近年来,超大规模数据中心的兴起彻底改变了云计算领域的需求方向,光电路交换(Optical Circuit Switching, OCS)技术因其低时延、低功耗和全光透明的优势,在数据中心中的应用逐渐增多,该技术构建的固定光路通道具备稳定、透明的特点,可用于云网络与服务器端,满足汇聚侧传输需求^[1-3]。谷歌率先提出的 OCS 光交换机由 136 通道光纤准

直器阵列和微机电(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)芯片阵列等组件组成,可实现光路间的任意切换,插损(Insertion Loss, IL)低于 2 dB,支持宽波长范围^[4],谷歌已在其数据中心内规模部署了基于 OCS 和电分组交换(Electrical Packet Switching, EPS)的光/电混合数据中心网络以及只包含 OCS 的全光交换高性能网络,提升了数据传输速率,扩展了带宽容量^[5-6]。

光纤准直器对保证 OCS 系统稳定性与任务适

收稿日期:2024-12-02; 修回日期:2025-01-03; 纸质出版日期:2026-08-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2023YFB2807000)

作者简介:王隽杰(1999—),女,陕西宝鸡人。硕士,主要研究方向为光器件与光模块。

通信作者:王隽杰,硕士。E-mail: wjj123456780412@163.com

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

配性至关重要,其核心功能是将光纤出射的发散光束准直为平行光并高效耦合入光纤^[7]。这一设计减小了光束发散角和能量损失,提升了系统耦合效率。传统球面透镜受几何像差限制,难以实现高效耦合,而非球面透镜能优化光束聚焦,有效减小像差,从而提高耦合效率。因此,本文提出以非球面透镜替代球面透镜,旨在提高 OCS 系统的耦合效率、改善光束准直效果,并降低光学系统像差。

1 理论分析

1.1 OCS 系统

OCS 系统如图 1 所示,其主要组成部分包括:放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)光源、芯片转镜阵列和准直器阵列,芯片阵列的平面与相应的准直器阵列端面之间形成一定的夹角,取物方空间(Numerical Aperture, NA)为 0.14,波长为 1 550 nm。

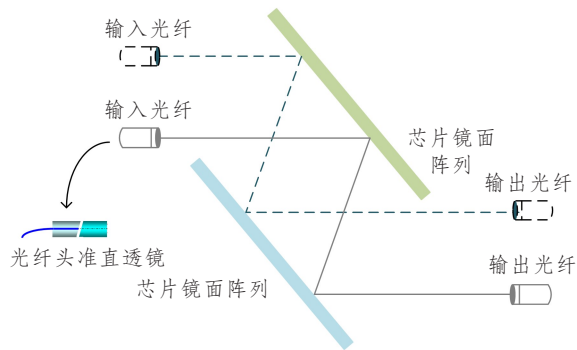


图 1 OCS 系统

Figure 1 OCS system

如图所示,光束进入输入端准直器阵列后被准

直,以特定入射角投射到输入芯片阵列。经芯片转镜反射,光束以一定角度入射至输出芯片阵列,随后通过准直器阵列耦合输出,形成 Z 字形光路结构。为保证光束的最大耦合效率,光纤准直器是重中之重。准直器主要由光纤与透镜两部分组成^[8],其中准直器透镜在光束准直中尤为重要。如图 2(a)所示,直接从光纤出射的光束相比于经过准直器的光束有更大的发散角,会导致更多的光能量损失;而加入透镜后,如图 2(b)所示,可以将发散的光束转换为平行光束,从而确保光线的传播方向一致,同时最大程度地减少由于光线偏离或散射而引起的光损失,提高系统的整体光效率。

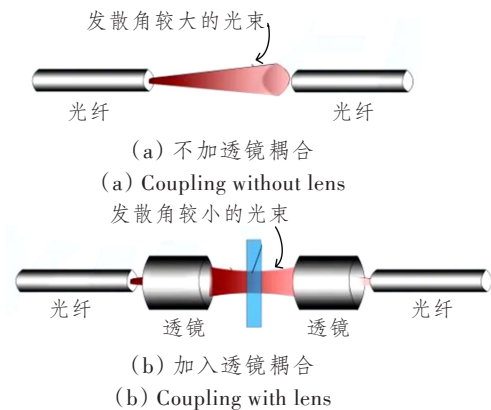


图 2 光纤准直器的准直作用

Figure 2 Collimation effect of fiber collimator

1.2 透镜耦合方案及材料对比分析

在初期的耦合透镜选型过程中,本文将 LLF1、SF2、N-BK7 和 F_SILICA 选为球面透镜材料候选方案^[9]。表 1 所示为 4 种材料的光学特性、透镜参数及系统耦合效率。

表 1 球面透镜方案及材料特性

Table 1 Spherical lens scheme and material properties

	LLF1	SF2	N-BK7	F_SILICA
曲率半径/mm	1.234	1.153	0.944	1.035
透镜厚度/mm	3.177	2.524	2.356	3.000
耦合效率(%)	86.40	86.94	68.47	79.57
折射率	1.54	1.64	1.51	1.45
透过率	优秀	良好	良好	极高
阿贝数	45.75	33.84	64.16	67.82
热膨胀系数 $\times 10^{-6}/K$	8.10	8.40	7.10	0.51
密度/ g/cm^3	2.94	3.86	2.51	2.20
特性	折射率适中 阿贝数较低 热膨胀系数较高	折射率高 低阿贝数 热膨胀系数较高	折射率较低 高阿贝数 热稳定性一般	最高透过率 极高热稳定性 高阿贝数

由表1可知,LLF1和SF2虽可以得到较高的耦合效率,但高色散和热膨胀系数可能导致光学系统性能波动,不适合用于精密光学系统。N-BK7亦因较高热膨胀系数而存在稳定性不足的问题。相比于传统的N-BK7,本文创新性使用F_SILICA作为透镜材料,其透过率更高,有助于减少光学损耗,并且其极低的热膨胀系数($0.51 \times 10^{-6}/K$)使光学系统在宽温度范围内更稳定,满足了高精度光学设计的需求。因此,选用F_SILICA作为后续研究透镜材料。然而,4种方案的球面透镜均未达到所需的高耦合效率,因此需进一步分析影响耦合效率的因素,优化设计以降低IL。

1.3 耦合效率影响因素

耦合损耗主要取决于两束高斯光束的光场叠加程度。当光场存在耦合失配会导致光场重叠误差,降低耦合效率。常见的耦合失配包括径向失配、轴向失配、角向失配和模斑失配损耗^[10-11],4种耦合失配如图3所示。

径向失配损耗:准直器相对于光轴产生了一个径向的偏移 dx ,当光束的偏移距离增大时,损耗会呈指数增长。IL可表示为

$$IL = -10 \lg \left[\exp \left(\frac{-dx^2}{\omega^2} \right) \right], \quad (1)$$

式中, ω 为束腰半径。

轴向失配损耗:在准直器束腰位置处,高斯光束不完全重叠,在轴向产生了一个 Δz 的平移,其IL可表示为

$$IL = -10 \lg \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\lambda \Delta z}{2\pi \omega^2} \right)^2} \right]. \quad (2)$$

角向失配损耗:准直器光轴夹角为 θ , $d\theta$ 为角度倾斜偏差量,其IL可表示为

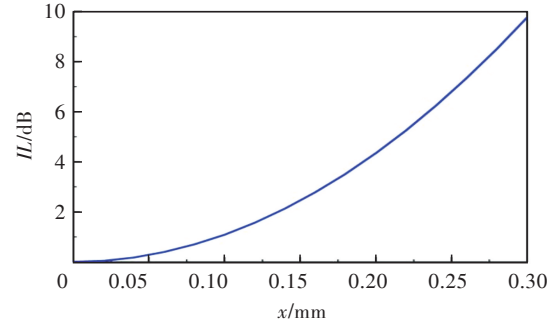
$$IL = -10 \lg \left[\exp \left(\frac{-d\theta^2}{\left(\frac{\lambda}{\pi \omega} \right)^2} \right) \right]. \quad (3)$$

模斑失配损耗:准直器所能得到的高斯光束束腰半径尺寸不一致, ω_{in} 为输入端准直器束腰半径, ω_{out} 为输出端准直器束腰半径,其IL可表示为

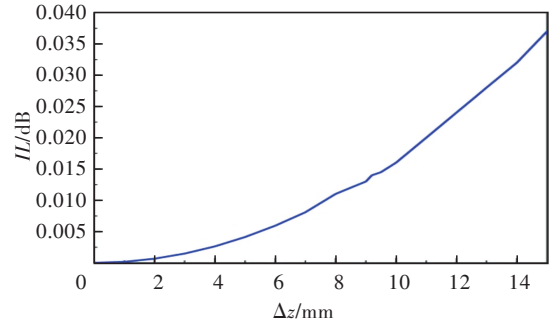
$$IL = -10 \lg \left\{ \frac{4}{\left[\left(\frac{\omega_{in}}{\omega_{out}} \right) + \left(\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} \right) \right]^2} \right\}. \quad (4)$$

在使用球面透镜时,系统耦合效率仅为79.57%未达到目标值1。造成损耗的主要原因在

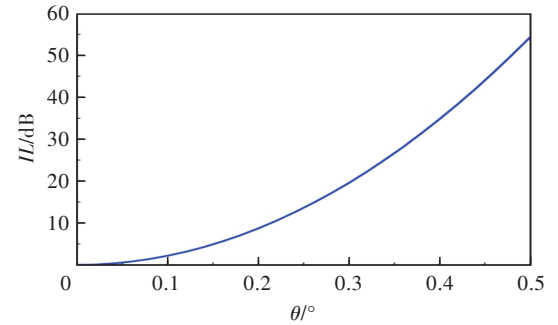
于准直器模斑失配和轴向失配;而径向失配和角向失配可通过调整芯片角度进行补偿,且一旦偏移,IL波动明显,与当前系统状态不符,因此不作为主要关注因素。模斑失配源于光束束腰半径与光纤接收模斑大小不匹配,影响光束有效聚焦;轴向失配则使束腰位置偏移,降低了聚焦精度。



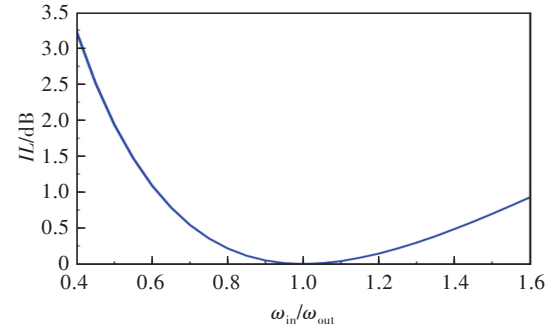
(a) 径向失配损耗
(a) Radial mismatch loss



(b) 轴向失配损耗
(b) Axial mismatch loss



(c) 角向失配损耗
(c) Angular mismatch loss



(d) 模斑失配损耗
(d) Mode spot mismatch loss

图3 4种耦合失配损耗

Figure 3 4 types of coupling mismatch loss

由此,可推测球面透镜的球差是模斑和轴向失配的主要原因,球差导致光轴上光线经球面折射后无法精确汇聚,如图 4(a)所示,光束的聚焦质量较差,波前无法理想聚焦,从而影响光束的束腰位置和形状,导致模斑尺寸和位置偏移,显著降低耦合效率。因此,优化球差是提升耦合效率及改善模斑匹配与轴向聚焦精度的关键。为减少模斑和轴向失配的影响,本文提出采用非球面透镜替代球面透镜。非球面透镜通过优化曲率和聚焦特性^[12],如图 4(b)所示,提升了模斑匹配度,减少了模斑不一致带来的耦合损耗。同时,非球面透镜能够精确调整光束聚焦位置,集中光束能量于接收区域,有效改善轴向失配,显著提高系统耦合效率,本文所提系统较原球面透镜系统耦合效率提高了 25%。

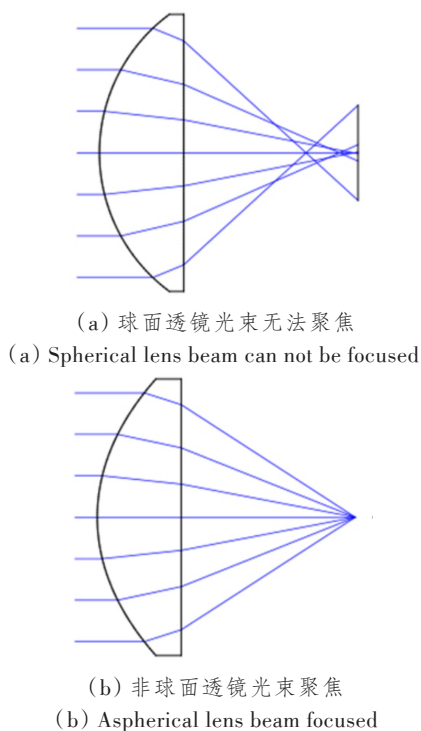


图 4 用非球面校正球差

Figure 4 Correction of spherical aberration with aspherical surface

1.4 非球面透镜的定义

非球面透镜是一种特殊的透镜。所谓非球面(aspherical surface),就是除了球面和平面以外的所有面形^[13],本文设计采用偶次非球面,以非球面顶点为坐标原点,光轴为轴非球面上某一点,在光轴方向上的高度差 z 表示为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_4 r^4 + \alpha_6 r^6 + \alpha_8 r^8 + \dots, \quad (5)$$

式中: $r(r^2 = a^2 + b^2)$ 为非球面透镜上任意一点到光轴的距离, a 和 b 为球面长半轴和短半轴; α_n 为高次非球面系数; c 为非球面透镜顶点处的曲率(半径的倒数); k 为曲面的圆锥系数。

2 透镜的优化设计过程

2.1 耦合效率计算理论

借助 ZEMAX 软件完成光学系统的耦合效率计算,采用单模光纤耦合计算方法,包括两种方式:能量传输计算和模式匹配计算。能量传输计算用于评估光束传输过程中光能的有效传递,模式匹配计算则关注光束的波前与光纤模式的相似程度,两者结合,能得到系统的总耦合效率。能量传输 S 和模式匹配 T 可表示为

$$S = \left[\frac{\iint t(x, y) F_s(x, y) dx dy}{\iint F_s(x, y) dx dy} \right]^2, \quad (6)$$

$$T = \frac{\left| \iint F_r(x, y) W'(x, y) dx dy \right|^2}{\iint F_r(x, y) F_r'(x, y) dx dy \iint W(x, y) W'(x, y) dx dy}, \quad (7)$$

式中: $F_s(x, y)$ 为光源的振幅函数,分子部分是指在光学系统的入瞳处的积分; $t(x, y)$ 为光学系统的透过率函数; $F_r(x, y)$ 为描述接收光纤复振幅函数; $W(x, y)$ 和 $W'(x, y)$ 分别为光学系统出瞳波前的复振幅函数及其共轭函数。

球差的存在会降低系统的能量传输和模式匹配效率:聚焦点偏离光纤模场中心会降低能量传递效率,同时模斑尺寸与光纤模场直径的不匹配进一步削弱了耦合效果。因此,在 ZEMAX 软件中进行非球面透镜优化时,需要从聚焦位置调整和束腰半径匹配两方面入手,通过优化轴向聚焦精度与模斑匹配,有效提升系统耦合效率。

2.2 非球面优化过程

①在 ZEMAX 软件中搭建初始模型,输入系统初始数据,包括准直器和芯片等光路基础数据,确认透镜所需材料。

②依据实际系统,先优化整体光路,以透镜曲率半径和中心厚度为结构优化变量;同时将高斯光束出射束腰的轴向位置作为评价约束条件。利用阻尼最小二乘法进行多次优化设计^[14],通过反复调整,使当前评价函数达到较小值,优化得到的球面透镜

参数如表2所示。此时系统耦合效率较低,为79.57%,尚未达到所需耦合效率。

表2 球面透镜设计结果

Table 2 Spherical lens design results

表面	曲率/mm	厚度/mm	材料
球面	1.035	3	F_SILICA

③通过将透镜面型从球面改为偶次非球面,并将圆锥系数 k 和高阶系数 A_2 、 A_4 设为优化变量。采用GBSS和GBSP函数对系统进行优化。GBSP用于计算特定表面出射的高斯光束大小,通过优化曲率减少球差,提升轴向聚焦精度,使光束能量集

中于光纤模场区域,从而提高能量传输效率。同时,GBSP获取倾斜高斯光束的束腰位置,优化波前形状以匹配光纤模场,提高模式匹配效率。GBSS和GBSP的结合确保光束在传播过程中的聚焦性和能量集中性。此外,通过POPD函数模拟光束传播,计算能量传输效率与模式匹配效率,两者相乘得到总耦合效率。结合SPHA评价函数优化球差,最终得到如表3所示的非球面透镜参数。系统优化后,耦合效率接近1,同时有效消除了系统像差。

表3 非球面透镜设计结果

Table 3 Aspherical lens design results

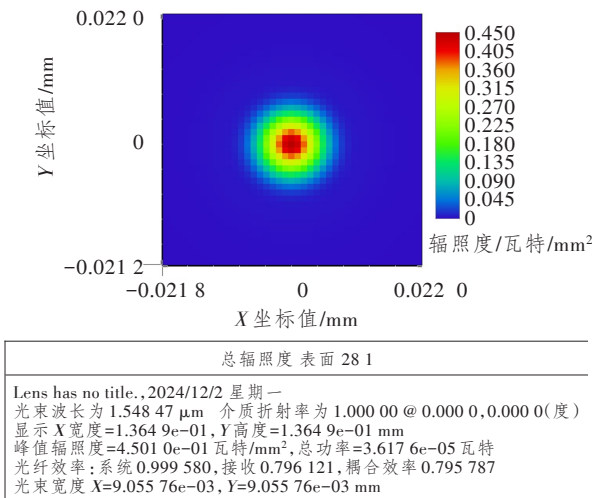
表面	曲率/mm	厚度/mm	非球面系数	非球面高阶系数	材料
偶次非球面	1.139	3	-1.45×10^{-4}	$A_2 = -4.410 \times 10^{-2}$ $A_4 = 2.786 \times 10^{-2}$	F_SILICA

在本次优化过程中,出现高阶次项系数较高的情况,其原因为优化过程中,为保证较高的耦合效率,需调整高阶次项的系数来修正更多的高阶像差。圆锥系数 k 值描述了非球面的总体形状(球、椭球和抛物面等),但只能有效修正大部分低阶像差。因此,依赖4阶等更高阶次项来修正优化剩余的高阶像差,从而导致高阶项比较大,对形状的调整更加细致。从而更好地校正像差,使得整个透镜的性能达到最优^[15]。

3 优化结果

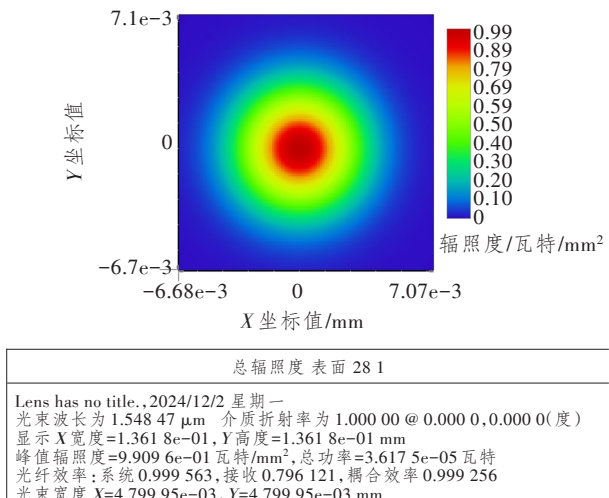
3.1 系统耦合效率

通过对非球面透镜的应用,保证在较长的工作距离内,光束在系统传播过程中不发散,光束宽度 $9.05576 \times 10^{-3} \sim 4.79995 \times 10^{-3}$ mm,从而大大提高系统的耦合效率,系统的耦合效率接近于1,前后耦合效率对比图如图5所示。



(a) 球面透镜耦合效率为 79.57%

(a) Coupling efficiency with spherical lens of 99.92%



(b) 非球面透镜耦合效率为 99.92%

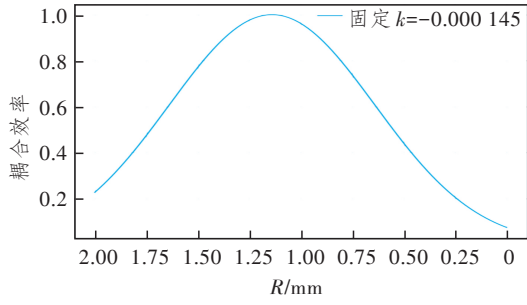
(b) Coupling efficiency with aspherical lens of 99.92%

图5 前后耦合效率对比

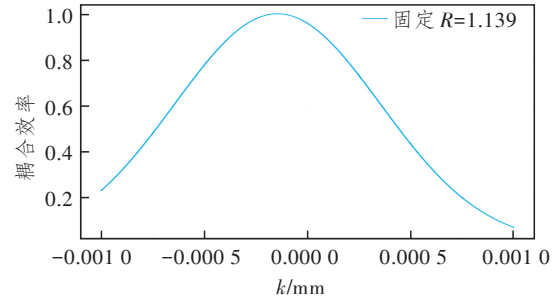
Figure 5 Comparison of front and rear coupling efficiency

分别固定曲率半径 R 或圆锥系数 k ,绘制耦合效率随另一个参数变化的关系曲线,如图6所示,显

见非球面透镜的耦合效率随 R 和 k 的变化趋势。符合理论仿真结果。



(a) 曲率半径 R 对耦合效率影响
(a) Effect of curvature radius R on coupling efficiency



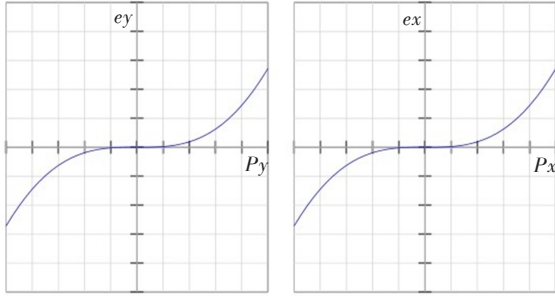
(b) 圆锥系数 k 对耦合效率影响
(b) Effect of cone factor k on coupling efficiency

图 6 耦合效率变化曲线

Figure 6 Coupling efficiency variation graph

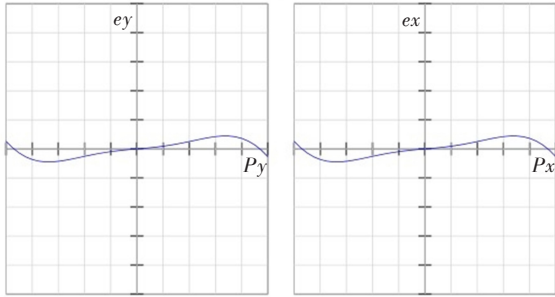
3.2 像差优化

非球面透镜优化前后像差曲线的对比如图 7 所示。纵轴为光线位置偏移量,横轴为光瞳坐标。在存在球差的光学系统中,不同光瞳位置的光线成像点偏离理想位置,且偏移量随光瞳位置的增大呈非线性增长,形成典型的“S”形曲线。优化后,像差曲线趋于平坦,靠近横轴,表明球差得到显著校正。



注: ex 为 X 方向弧矢垂轴像差; ey 为 Y 方向子午垂轴像差; Px 为弧矢方向光瞳坐标; Py 为子午方向光瞳坐标。

(a) 球面透镜系统
(a) Spherical lens system



(b) 非球面透镜系统
(b) Aspherical lens system

图 7 前后像差曲线对比

Figure 7 Comparison of front and rear aberration curves

综上所述,在 OCS 光学系统中,通过非球面透镜的选择优化,耦合效率相比原球面系统提升了 25%,达到了 99.92%,保证了在系统中光场能量利用的最大化,且最大幅度消除了系统中的球差,球差曲线明显平坦,保证了系统内的光束质量。

4 结束语

本文基于 OCS 系统,针对准直器透镜材料的选择,对 LLF1、SF2、N-BK7 和 F_SILICA 4 种材料进行了对比分析,最终选择了具有优异热稳定性和高透过率的 F_SILICA 作为透镜材料。在研究耦合效率低下的 4 种失配情况后,模斑失配和轴向失配是耦合效率下降的主要原因。通过引入非球面透镜优化聚焦质量,减少球差,提高模斑匹配度和轴向聚焦精度,从而显著提升耦合效率。优化后,系统耦合效率提升至 99.92%,较原球面透镜系统提高了 25%,接近理论极限值 1,显著提升了光束质量和系统性能。

参考文献:

- [1] Urata R, Liu H, Yasumura K, et al. Apollo: Large-Scale Deployment of Optical Circuit Switching for Datacenter Networking[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2023. San Diego, CA, USA: Optica Publishing Group, 2023: M2G. 1.
- [2] Urata R, Liu H, Yasumura K, et al. Mission Apollo: Landing Optical Circuit Switching at Datacenter Scale[EB/OL]. 2022; arXiv: 2208.10041. <https://arxiv.org/abs/2208.10041>
- [3] 尹林,王富,王小龙,等. 面向算力互联的快速光交换技术研究[J]. 光通信研究, 2024(5): 240032.
Yin L, Wang F, Wang X L, et al. Fast Optical Switching for Computing-Power Interconnects [J]. Study on Optical Communications, 2024(5):240032.
- [4] Poutievski L, Mashayekhi O, Ong J, et al. Jupiter Evolving: Transforming Google's Datacenter Network via Optical Circuit Switches and Software-Defined Networking [C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference. Amsterdam, Netherlands: ACM, 2022: 66–85.

- [5] 唐雄燕, 魏步征, 沈世奎, 等. 智算数据中心光电交换技术综述[J]. 光通信研究, 2024(5): 240062.
Tang X Y, Wei B Z, Shen S K, et al. Overview of Optoelectronic Switching Technology in Artificial Intelligent Data Centers[J]. Study on Optical Communications, 2024(5): 240062.
- [6] 朱宸, 周渭, 王佩龙. 可重构OCS技术在大模型预训练中的应用[J]. 光通信研究, 2024(5): 240049.
Zhu C, Zhou X, Wang P L. Application of Reconfigurable OCS Technology for Pre-training Large Language Models[J]. Study on Optical Communications, 2024(5): 240049.
- [7] 刘若仙, 赵士元, 谷一英, 等. 光纤阵列准直器设计及其发散角测量[J]. 光学精密工程, 2023, 31(1): 89–98.
Liu R X, Zhao S Y, Gu Y Y, et al. Design of Fiber Array Collimator and Measurement of Its Divergence Angle[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(1): 89–98.
- [8] 余文杰, 李环宇, 柯旋, 等. 多通道紧凑型波分复用器件的光纤准直器设计[J]. 现代传输, 2022(2): 43–46.
Yu W J, Li H Y, Ke X, et al. Design of Optical Fiber Collimator for Multi-Channel Compact Wavelength Division Multiplexing Device[J]. Modern Transmission, 2022(2): 43–46.
- [9] 郑博洋. 消色差多级衍射透镜的设计与制造[D]. 长春: 长春理工大学, 2023.
Zheng B Y. Design and Manufacture of Achromatic Multi-Order Diffractive Lens[D]. Changchun, China: Changchun University of Science and Technology, 2023.
- [10] Pan L, Jiang J, Liao W, et al. Research on Optical-Mechanical-Thermal Coupling of Lenses Group of High-Power Adaptive Fiber-Optics Collimator[C]// Proceedings of SPIE Conference on Nineteenth National Conference on Laser Technology and Optoelectronics, Shanghai, China: SPIE, 2024: 245.
- [11] Zhang J, Zhao Z, Qian H, et al. Optical Transmission Characteristics of Large-Tolerance Fiber Collimator[J]. Infrared Physics & Technology, 2024, 138: 105261.
- [12] Wang D, Cheng D, Yao C, et al. Field Curvature Analysis and Optimization Method for Near-Eye Display Systems[J]. Displays, 2024, 84: 102777.
- [13] Scholz G, Yang L, Schake M, et al. Concept for Improving the Form Measurement Results of Aspheres and Freeform Surfaces in a Tilted-Wave Interferometer[J]. Journal of Sensors and Sensor Systems, 2024, 13(1): 89–97.
- [14] 靳伍银, 高姣林, 剡昌峰. 基于Zemax的消球差非球面透镜的优化设计[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(5): 168–172.
Jin W Y, Gao J L, Yan C F. Zemax-based Optimum Design of Aspherical Lens for Elimination of Spherical Aberration[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(5): 168–172.
- [15] 王思婧. 多像位平视光学系统设计及优化[D]. 西安: 西安工业大学, 2024.
Wang S J. Design and Optimization of Multi-Image Head-Up Optical Systems[D]. Xi'an, China: Xi'an Technological University, 2024.