

激光与光电子学进展

基于 ZEMAX 单模大光束光纤准直透镜信号耦合分析

何琦¹, 赵振刚^{1,2*}, 许晓平¹, 罗川¹, 李英娜^{1,2}, 李川^{1,2}

¹昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南 昆明 656500;

²云南省计算机应用重点实验室, 云南 昆明 656500

摘要 针对光纤连接器核心部件之一光纤准直透镜信号精密耦合问题, 采用双合透镜设计了一种单模大光束光纤连接器。通过分析双合透镜特性、光纤准直器阵列中的多光学器件耦合机理和准直透镜间的 3 种耦合偏差引起的传输损耗, 推导出该耦合系统的传输损耗公式。基于 MATLAB 分析得到: 角向失配对准直器的耦合损耗影响最大, 轴向失配影响最小。利用光学仿真软件 ZEMAX 在序列和混合模式下对连接器进行模拟, 用 Origin 绘制出不同失配情况下信号耦合效率曲线, 结果表明单模光纤芯径为 12 μm 时, 耦合效率达到 92.42%。最后通过光学平台搭建实验系统, 验证了仿真结果的准确性。

关键词 光纤光学; 光纤旋转连接器; 双合透镜; 单模光纤; 大光束准直透镜; ZEMAX

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2106008

Signal Coupling Analysis of Single-Mode Large Beam Fiber Collimating Lens Based on ZEMAX

He Qi¹, Zhao Zhengang^{1,2*}, Xu Xiaoping¹, Luo Chuan¹,
Li Yingna^{1,2}, Li Chuan^{1,2}

¹Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 656500, China;

²Yunnan Key Laboratory of Computer Technology Applications, Kunming, Yunnan 656500, China

Abstract Aiming at the precise coupling problem of the optical fiber collimating lens signal, one of the core components of the optical fiber joint, a single-mode large beam optical fiber connector is designed using a doublet lens. By analyzing the characteristics of dual lens, the coupling mechanism of the multi-optical devices in the fiber collimator array, and the transmission loss caused by the three coupling deviations between the collimating lenses, the transmission loss formula of the coupling system is derive. Based on MATLAB analysis, the angular mismatch has the greatest effect on the coupling loss of the collimator, and the axial mismatch has the least effect. The optical simulation software ZEMAX is used to simulate the joint in sequence and hybrid modes, and Origin is used to plot the signal coupling efficiency curves under different mismatch conditions. The results show that when the core diameter of single-mode fiber is 12 μm , the coupling efficiency reaches 92.42%. Finally, an experimental system is built through the optical platform to verify the accuracy of the simulation results.

收稿日期: 2021-01-26; 修回日期: 2021-02-17; 录用日期: 2021-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(51667011, 61765009, 61962031)、云南省自然科学基金(2018FB095, 202101AT070131)

通信作者: *zhaozhengang@kust.edu.cn

Key words fiber optics; optical fiber rotary joint; doublet lens; single-mode fiber; large beam fiber collimating lens; ZEMAX
OCIS codes 060.2330; 060.2430; 140.3325; 220.4830

1 引言

光纤旋转连接器(FORJ)是一种将光信号从一旋转(或静止)的端口有效地传输到另一静止(或旋转)的端口的光学器件,近年来,已广泛应用于军事、交通、医疗CT系统、石油化工等领域^[1-6]。由于信号耦合、电磁干扰和体积过大等问题,早期的电滑动环已无法满足目前信号传输需求^[7]。而FORJ以信号传输稳定、可靠性较高、抗电磁干扰、传输容量大及噪声低等优点^[8],成为解决信号传输问题的最佳器件,国内外研究者对FORJ做了大量研究。

2005年,Bowman^[9]提出一种镜面反射式旋转连接器,内部20个发射器载有相同信息,且几乎同时出射光束,由于波导角度大于发射器的角度间隔,可保证光束均能传输,但该连接器需多个发射器才能保证转子转动时连续地传输信号,光信号沿单方向传输。2011年,雷平顺等^[10]基于ZEMAX软件设计了一种可调焦的多模光纤准直器,并通过实验验证了用ZEMAX软件进行多模光纤准直器设计的可行性。2011年,南京理工大学王海林等^[11]基于ZEMAX软件纯非序列设计了一种半导体激光器与单模光纤耦合系统,该系统耦合效率大于54%,并分析了单模光纤与系统对接时出现的误差对耦合效率的影响。2020年,北京工业大学董雪岩等^[12]基于ZEMAX软件设计了一种多模扩束型连接器,并分析了该连接器对准误差和耦合效率,得出准直镜产生的偏心或倾斜误差可以通过调整聚焦镜的位置进行补偿的结论,可指导扩束型光纤连接器的设计。但上述连接器有的机械结构复杂,有的采用多

模光纤传输。多模光纤使光纤的带宽窄、色散大、损耗也大,通常只适合中短距离和小容量的光纤通信系统^[13]。

目前光纤耦合系统层出不穷,但关于双合透镜组成的光纤准直器及单模大光束耦合方式的研究较少。因此,在满足高耦合的前提下,本文采用双合透镜设计了一种单模大光束连接器。对双合透镜特性和光纤准直器阵列中的多光学器件耦合机理进行研究,探讨准直器之间的3种耦合偏差引起的传输损耗,推导出信号耦合效率公式。采用光学仿真软件ZEMAX对大光束光纤准直器的关键光学元件进行参数优化,并在混合模式下模拟得到准直器透镜间的耦合效率,最后使用光学平台搭建实验系统,进行了信号耦合分析。

2 大光束准直透镜耦合机理分析

2.1 双合透镜特性分析

现实中光学系统的成像是完善的,光线经过光学系统后会形成像差,使所成像产生模糊、弥散斑和变形等缺陷。单模光纤芯径较小,使用单模光纤耦合准直系统信号时要求系统的像差较小,常用的单透镜是不能校正球差和慧差的,而双合光学系统将正负透镜组合,使色差和慧差相互补偿^[14]。采用双合透镜设计的准直器具有结构简单、光能损失小、能扩大光斑尺寸、能校正球差和慧差及能减小光斑半径的特点,便于实现精密耦合。

近轴光学通过单厚透镜系统的几何成像公式^[15]为

$$M = T_1 T_2 T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_1 r_2} & \frac{n_2}{n_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1 - n_2}{n_2 r_1} & \frac{n_2}{n_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{(n_1 - n_2)l}{n_2 r_1} & \frac{n_1 l}{n_2} \\ -\frac{(n_2 - n_1)}{n_1} \left[\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} + \frac{(n_2 - n_1)l}{n_2 r_1 r_2} \right] & 1 + \frac{(n_2 - n_1)l}{n_2 r_2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: M 为单厚透镜传输矩阵; r_1 、 r_2 为透镜的曲率半径(凹透镜 $r < 0$,凸透镜 $r > 0$); l 为单透镜厚度; n_1 、 n_2 为折射率。

单厚透镜的主距为 h_1 、 h_2 ,焦距为 f 时,传输矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & h_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & h_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{h_2}{f} & h_1 + h_2 - \frac{h_1 h_2}{f} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{h_1}{f} \end{bmatrix} \quad (2)$$

联立(1)、(2)式有 $\begin{cases} h_1 = -\frac{n_1 r_1 l}{n_2(r_2 - r_1) - (n_2 - n_1)l} \\ h_2 = -\frac{n_1 r_2 l}{n_2(r_2 - r_1) - (n_2 - n_1)l} \end{cases}$, 则 \mathbf{M} 可以简化为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{h_2}{f} & \frac{n_1 l}{n_2} \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{h_1}{f} \end{bmatrix} \quad (3)$$

结合(1)式、(3)式以及高斯光学的 ABCD 定理, 可以推导出双合透镜的传输矩阵 \mathbf{M}_T 为

$$\mathbf{M}_T = \mathbf{M}_2 \mathbf{T} \mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 1 + \frac{h_4}{f_2} & \frac{n_1 l_2}{n_2} \\ -\frac{1}{f_2} & 1 - \frac{h_3}{f_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + \frac{h_2}{f_1} & \frac{n_1 l_1}{n_2} \\ -\frac{1}{f_1} & 1 - \frac{h_1}{f_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\begin{cases} a = \frac{h_4(h_2 + f_1 - L) + f_2(h_2 + f_1 - L)}{f_1 f_2} - \frac{l_1 n_1}{f_1 n_2} \\ b = \frac{f_1[(h_4 + f_2)(l_1 n_1 + n_2 L) + l_2 n_1 f_2] - h_1 n_2 L(h_4 + f_2) - h_1 l_2 n_1 f_2}{f_1 f_2 n_2} \\ c = \frac{L + h_3 - h_2 - f_2 - f_1}{f_1 f_2} \\ d = \frac{L h_1 + h_1 h_3 + f_1 f_2 - h_1 f_2 - L f_1 - h_3 f_1}{f_1 f_2} - \frac{l_1 n_1}{f_2 n_2} \end{cases}$; $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2$ 为透镜 1、2 的传输矩阵; \mathbf{T}

为两透镜自由空间的传输矩阵; f_1, f_2 为透镜 1、2 的焦距; l_1, l_2 为透镜 1、2 的厚度; h_1, h_2, h_3, h_4 分别为透镜 1、2、3、4 的主距; L 为双合透镜间距离。

2.2 高斯光束在透镜中的传输特性分析

为提高光纤准直器输出高斯光束的耦合效率, 需对高斯光束原理特性和理论进行分析计算。在柱面坐标系中当 z 为常数时, 高斯光束束腰位置处的光强沿 z 轴方向以高斯函数的形式由中心向外减小, 在轴线处强度最高, 可视为一种非均匀高斯球面波, 束宽沿 y 轴按双曲线规律向外扩展, 且等相面保持为球面(特殊范围内为平面), 如图 1 所示。

入射参数为 q_1 的高斯光束通过大光束光纤准直器的传输矩阵后变成参数为 q_2 的高斯光束^[15], 则有

$$\frac{1}{q_i} = \frac{1}{R_i} - i \frac{\lambda_i}{\pi \omega_i^2} = X_i - i Y_i, \quad (5)$$

式中: q_i 为参数 ($i=1, 2$); R_i 为透镜曲率半径; λ_i 为光波长; ω_i 为高斯光束束腰半径。

传输过程遵守高斯光束的 ABCD 定律, 结合(4)式, 有

$$\frac{1}{q_2} = \frac{C + D/q_1}{A + B/q_1}, \quad (6)$$

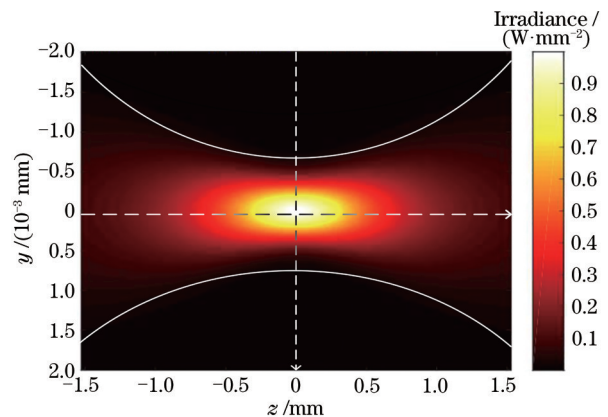


图 1 高斯光束沿 z 轴的光强分布

Fig. 1 Light intensity distribution of Gaussian beam along the z axis

式中:物方束腰到像方束腰处的传输矩阵 $M_3 = \begin{bmatrix} 1 & s_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & s_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$,其中 s_1 为物方束腰位置, s_2 为像方束腰位置, $\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$ 为双合透镜的传输矩阵。

联立(4)~(6)式得到高斯光束通过双合透镜组成的大光束光纤准直器的传输公式,其表达式为

$$\begin{cases} X_2 = \frac{(X_1^2 + Y_1^2)BD + X_1(AD + BC) + AC}{A^2 + 2X_1AB + (X_1^2 + Y_1^2)B^2} \\ Y_2 = \frac{(n_1/n_2)Y}{A^2 + 2X_1AB + (X_1^2 + Y_1^2)B^2} \end{cases} \quad (7)$$

2.3 大光束准直透镜耦合原理

基于高斯光束的传播理论分析大光束准直透镜对高斯光束的准直扩束和聚合作用,通过提高高斯光束在透镜间耦合效率来提高准直系统耦合效率,因此分析高斯光束传播特性有重要意义^[16]。常规的单模光纤芯径小,一般只有 8~10 μm,在旋转平台与静止平台间用两光纤直接耦合信号难度较大,机械对准精度要求非常高,目前很少采用该方法。一般都采用光纤准直器的方法耦合高斯光束,以降低对机械精度的要求。光纤准直器作为旋转连接系统的核心元件,自身性能直接决定 FORJ 性能的好坏,研究光纤准直器具有重要意义^[17]。

图 2 为大光束光纤准直透镜耦合的结构示意图,包括光纤激光器、单模光纤、双合准直透镜、双合聚焦透镜、光功率计等关键光学器件。光纤激光器通过单模光纤与准直透镜连接,聚焦透镜通过单模光纤与光功率计连接。当激光信号通过准直透镜时光路被准直、扩束成近平行光,通过调整位置,聚焦透镜与准直透镜在同一光轴上,最后将近平行

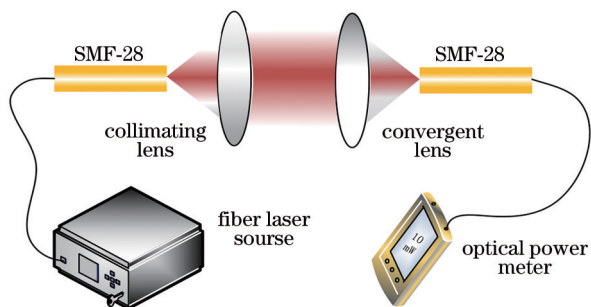


图 2 大光束光纤准直透镜耦合结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coupling structure for large beam fiber collimating lens

光聚合成束腰半径较小的高斯光束,由光纤进行接收,从而实现信号的传输。

在耦合时,准直透镜安装在精密转轴上,转轴转动时受到不同维度的机械振动等因素的影响,使光轴发生偏心,导致准直器间可能存在 3 种失配(径向失配 δ_z 、轴向失配 δ_y 和角向失配 ϕ),如图 3 所示。耦合失配会造成光场重叠误差,带来损耗,从而降低耦合效率。同时,光强受准直器件对准过程与转轴振动特性等多种因素的影响,且转速越快,振幅越大,光信号能量变化越明显,这些都会影响耦合信号。

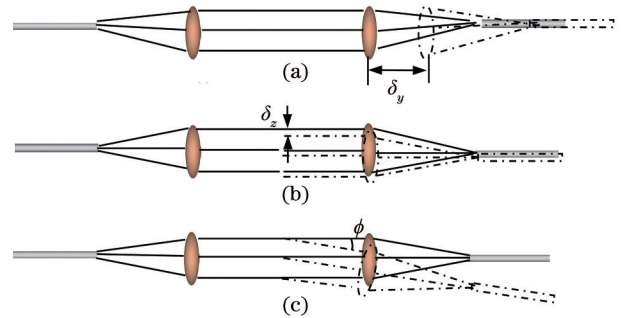


图 3 耦合失配示意图。(a)轴向失配;(b)径向失配;(c)角向失配

Fig. 3 Schematic diagram of coupling mismatch. (a) Axial mismatch; (b) radial mismatch; (c) angular mismatch

耦合效率是光信号在耦合过程中输出功率与输入功率之比,是衡量 FORJ 信号传输性能的优良标准,耦合效率越高,光信号损耗就越小^[18-19]。单模大光束准直透镜耦合损耗可以根据高斯光束耦合特性进行分析^[20],表达式为

$$L_{\text{loss}} = -10 \lg \eta, \quad (8)$$

式中: L_{loss} 是光纤的耦合损耗; η 是信号的耦合效率。

本次研究采用单模光纤,其光纤模场分布可近似看作带束腰 W 的高斯分布^[21]。根据(8)式可分别计算图 3 中 3 种主要的耦合损耗带来的耦合效率 η ^[22]。径向失配产生的耦合效率 η_{δ_z} 为

$$\eta_{\delta_z} = \exp\left(-\frac{\delta_z^2}{\omega}\right), \quad (9)$$

式中: ω 为准直后光束半径。

轴向失配产生的耦合效率 η_{δ_y} 为

$$\eta_{\delta_y} = \frac{4}{4 + (\lambda \delta_y / \pi \omega^2)^2} \quad (10)$$

角向失配产生的耦合效率 η_{ϕ} 为

$$\eta_{\phi} = \exp\left[-\left(\frac{\pi \omega \cdot \tan \phi}{\lambda}\right)^2\right] \quad (11)$$

将(9)~(11)式代入(8)式中得到各种失配的耦合损耗,经单模大光束光纤准直透镜准直后高斯光束的相关参数分别代入(8)~(11)式中,用MATLAB计算得到耦合损耗与3种失配的关系,其中角向失配对准直器的耦合损耗影响最大,轴向失配影响最小,当角度改变 0.001° 时,损耗增加0.4 dB左右。

3 单模大光束准直透镜优化分析

3.1 大光束准直透镜的设计

此次仿真使用的ZEMAX Optic Studio是一款光学设计软件,具有强大的像质评价和优化功能,可以用来设计和分析光学系统^[23-24]。基于ZEMAX软件对FORJ中核心部件光纤准直透镜进行设计和优化,可以提高系统成像质量和耦合效率。采用凸凹透镜和双凸透镜组成双合透镜

设计的单模大光束准直透镜,具有扩束、准直、聚合、通光孔径大、易调节和慧差小等特点,且该准直透镜没有运动部件,结构紧凑,不易受错位影响。

通过ZEMAX序列模式对大光束准直透镜进行建模,用均方根(RMS)和Wave Front优化函数对系统的光路进行优化。物理光学成像过程中,由一近点光源发出的若干条发散型光线经过光学系统成像后,由于像差和慧差的存在,与像面的交点不再集中于一点,而形成具有一定半径的弥散斑。因此,设置相应的评价函数和操作数对球差、慧差(操作数COMA)和像散进行校正。优化后得到系统最佳模型参数,如图4所示,系统成像质量较好,且入射点的焦距与出射点的焦距均满足使用要求,在该范围内信号能较好耦合进单模光纤内。

	Surface Type	Comment	Radius	Thickness		Material	Coating
0	Standard	OBJECT	Infinity	0.000			
1	Standard	f	Infinity	30.663	V		
2	Standard	Lens 1	115.450	2.700		N-SF6	THORC
3	Standard		42.660	1.847			THORC
4	Standard	Lens 2	153.820	4.000		N-SF6	THORC
5	Standard		-23.660	40.000	V		THORC
6	Standard	Lens 3	23.660	4.000		N-SF6	THORC
7	Standard		-153.820	1.847			THORC
8	Standard	Lens 4	-42.660	2.700		N-SF6	THORC
9	Standard	f	-115.450	30.686	V		THORC
10	IMAGE		Infinity	-			

图4 大光束准直透镜参数

Fig. 4 Parameters of large beam collimating lens

准直透镜模型和光路如图5所示,两组双合透镜是完全对称的,优化后将两组透镜固定,因此它

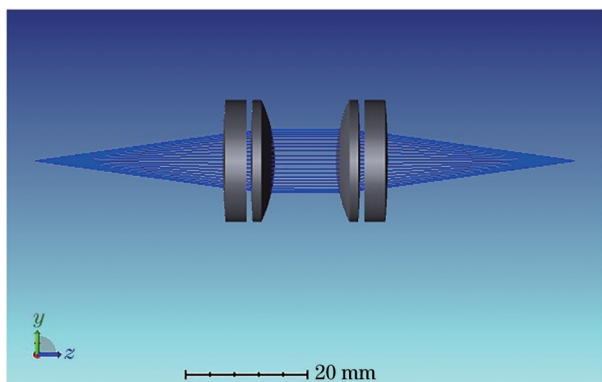


图5 准直透镜模型光路图

Fig. 5 Light path diagram of collimating lens model

不可调焦,可以实现光路准直扩束和聚合。

3.2 大光束准直透镜的优化分析

使用ZEMAX软件分析菜单中Spot Diagram评价系统成像质量,得到不同视场下的RMS半径、Airy半径和几何(GEO)半径值,通过这些值分析系统的成像质量,值越小成像质量越好,耦合效率也越高,结果如图6所示。成像后的Airy半径值为 $6.738 \mu\text{m}$, RMS半径值为 $5.895 \mu\text{m}$, RMS值小于Airy值,且慧差较小达到衍射极限,弥散斑半径在 $6 \mu\text{m}$ 左右。根据该值最终选择半径为 $6 \mu\text{m}$ 的光纤耦合信号。计算得到该系统的接收效率为95.74%,耦合效率为95.95%,该准直系统耦合效率较高,达到耦合需求,主要参数见表1。

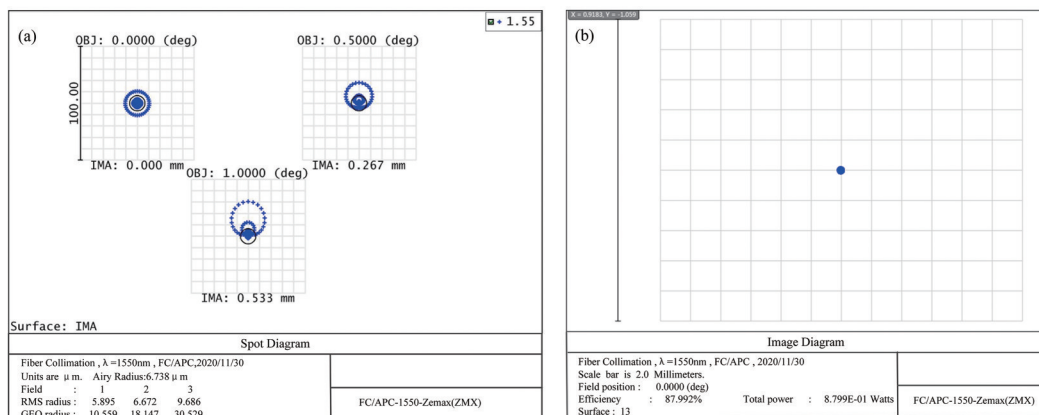


图 6 像质评价图。(a)点列图;(b)几何图像

Fig. 6 Image quality assessment chart. (a) Spot diagram; (b) geometric image

表 1 准直透镜参数

Table 1 Parameters of collimating lens

Parameter	Value
Collimated wavelength /nm	1550
Waist diameter /mm	7.0
Focal length /mm	37.13
Numerical aperture	0.24

4 大光束光纤准直透镜耦合性能评估

4.1 混合模式下模拟评估

对大光束准直透镜优化后,使用该透镜阵列来耦合单模光纤,特种单模光纤芯径为 8~14 μm ,能传输一种模式的光,模间色散小,适合远距离传输。在 ZEMAX 中采用混合模式搭建单模光纤准直器耦合系统,两双合透镜前后插入非序列组件。并在非序列窗口中设置光纤相关参数,两透镜组后插入坐标间断点并设置不同的轴向、径向和角向失配,分析系统的耦合效率,系统模型如图 7 所示。

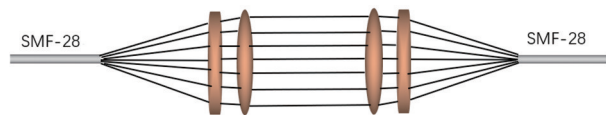


图 7 系统模型

Fig. 7 System model

在 ZEMAX 非序列模式下,其他参数不变,设置芯径为 12 μm 的单模光纤耦合准直透镜的输出信号,在几何图像分析中得到整个系统耦合效率为 92.42%,如图 8 所示,耦合效率较高,达到使用需求。当聚焦透镜和准直透镜不在同一光轴上时,光斑半径增大,成像质量降低,像方焦点发生偏移,信

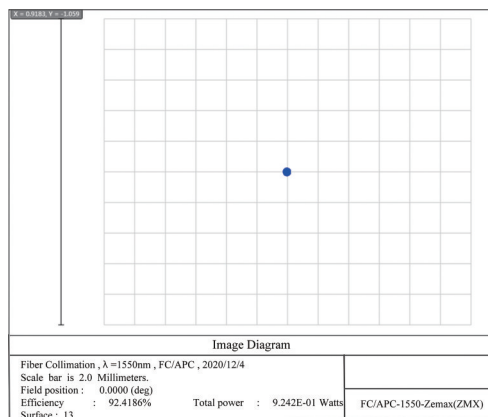


图 8 系统耦合效率

Fig. 8 System coupling efficiency

号难以耦合进光纤,系统耦合失配。

径向和角向失配对耦合效率影响较大,通过 ZEMAX 模拟这两种情况。系统发生径向失配时,即准直透镜和聚合透镜产生 x 偏心、 y 偏心和 xy 偏心,耦合效率如图 9 所示;发生角向失配时,即准直透镜和聚合透镜分别沿 x 轴、 y 轴和 xy 轴倾斜,耦合效率如图 10 所示。

从图 9 中可以得到系统耦合效率随着径向失配变化的关系。 x 偏心或 y 偏心存在时,耦合效率变化范围在 7% 以内, xy 偏心同时存在时,向 45° 方向处失配,相较于 x 偏心和 y 偏心偏离 $\sqrt{2}$ 倍距离,整体耦合效率在径向失配大于 0.6 mm 之后衰减较快,这是因为系统成像质量较差,成像偏移,光斑半径增大,部分信号难以耦合进光纤中。对准直透镜特性、解调仪解调可控范围(6 dB 左右)及预留调节空间进行分析,径向失配存在时,耦合效率需在 80% 以上以满足后期旋转连接器研制的要求,此时损耗

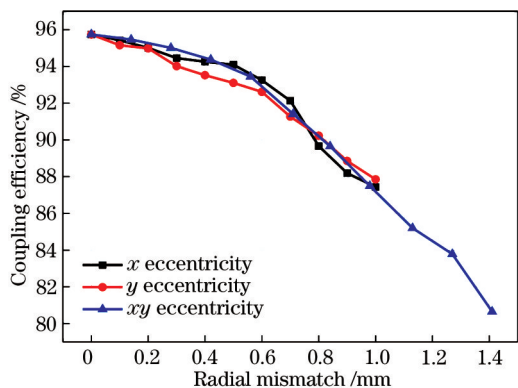


图 9 径向失配系统耦合效率

Fig. 9 Coupling efficiency of radial mismatch system

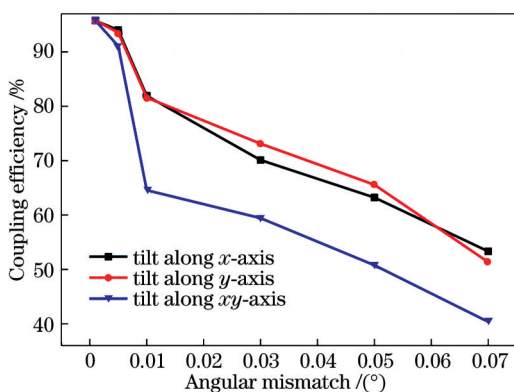


图 10 角向失配系统耦合效率

Fig. 10 Coupling efficiency of angular mismatch system

为 2.23 dB,因此精密校准时要严格控制径向失配在 1.4 mm 内。

从图 10 中可以得到:角向失配从 0°变化到 0.01°时,沿 x 轴和 y 轴单独倾斜时,耦合效率变化 12%,角度改变 0.001°时,损耗约增加 0.4 dB 左右;xy 轴倾斜同时存在时,耦合效率变化 30%,角向失配大于 0.01°后耦合效率低,耦合难度大。随着角度的增大,系统失配较严重,导致慧差和球差增大,成像逐渐恶化,信号难于耦合进光纤,耦合效率逐渐下降。角向失配是光纤连接系统较难控制的,通过高精度校准装置校准后,用激光焊接或环氧树脂胶固定在机械装置中才能尽可能地降低其带来的影响。

4.2 实验评估

实验使用的光源为光纤耦合输出半导体激光器,输出波长和功率可调,发送和接收光纤均采用单模光纤跳线(SMF-28FC),经仿真分析该系统达到大光束准直透镜耦合使用条件。搭建光学实验平台进行准直透镜耦合实验,如图 11 所示。

在校准时,将图 11 所展示的器材置于相对稳定的实验环境下。首先将气泵打开以减小外界震动

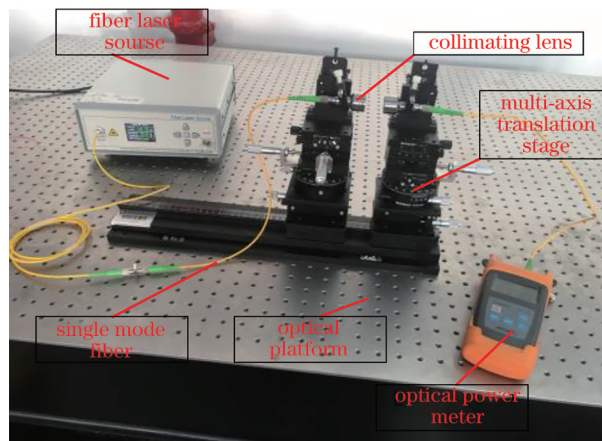


图 11 大光束准直透镜耦合实验

Fig. 11 Coupling experiment of large beam collimating lens

对光学平台的影响,高精度多轴位移调整台固定在气浮型光学平台上,准直透镜和聚焦透镜安装在多轴位移台上,用单模光纤将两透镜与半导体激光发射器和光功率计相连,借助可见光将准直透镜与聚焦透镜的光轴调节在一条直线上,最后通过位移台进行多维度微调,使输出功率达到最大。采用控制变量法进行多次测试,最终得到 3 种失配存在时的输出功率曲线,如图 12 所示。

图 12(a)为径向失配与输出功率的关系曲线。从图中得到,随着径向失配的增大,输出功率逐渐衰减。当径向失配为 1.0 mm 时,输出功率下降了 0.455 mW,而径向失配为 1.5 mm 时,输出功率下降了 0.892 mW,径向失配对信号的耦合效率影响较明显,需严格控制。

图 12(b)为角向失配与输出功率的关系曲线。从图中得到,当角向失配为 0.07°时,输出功率下降了 3.957 mW,功率损耗较大。角向失配对耦合效率影响较明显,在使用高精度多轴位移台进行校准时必须严格控制 x 轴和 y 轴带来的角向失配。在校准过程中一些偶然因素使准直透镜产生轻微的抖动,导致输出功率存在一定的误差,这也从侧面说明了角度变化对耦合的影响。

图 12(c)为轴向失配与输出功率关系曲线。从图中得到,轴向失配由 0 增加到 40 mm 的过程中,输出功率整体呈现波动下降趋势,轴向失配为 40 mm 时,输出功率仅下降了 0.238 mW,轴向失配对准直系统的耦合效率影响较小。在对多轴位移台进行轴向调节过程中,调节时用力不均匀和位移台自身等因素会使准直透镜产生轻微的晃动,导致输出功率波动,波动在 0.294 mW 以内。

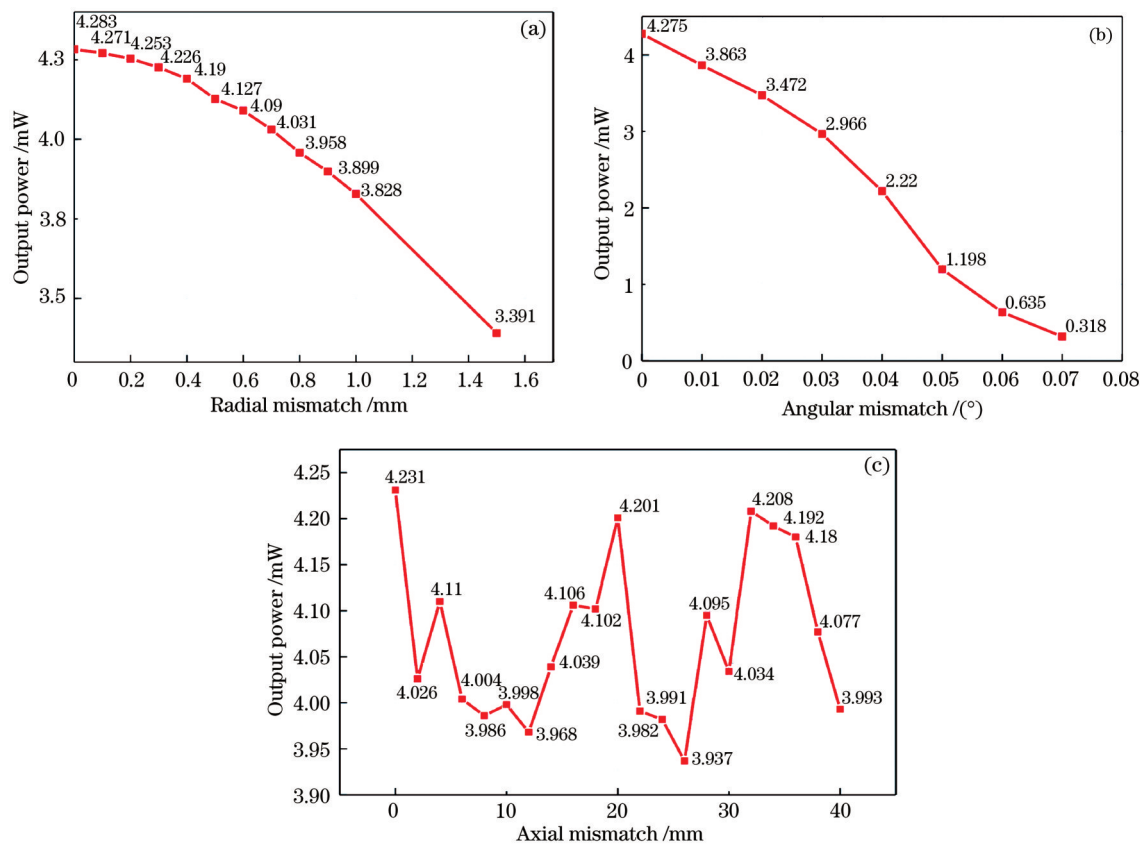


图 12 三种失配与输出功率关系。(a)径向失配;(b)角向失配;(c)轴向失配

Fig. 12 Relationship between three mismatches and output power. (a) Radial mismatch; (b) angular mismatch; (c) axial mismatch

5 结 论

当使用大光束准直透镜耦合信号时,耦合效率是一个重要的因素,因为耦合效率过低将导致准直透镜无法使用。本实验组对光纤准直透镜阵列中的多光学器件耦合机理进行了分析,探讨了准直透镜之间的 3 种耦合偏差引起的传输损耗,通过 MATLAB 计算得出角向失配对耦合损耗影响最大,轴向失配最小,当角度改变 0.001° 时,损耗增加 0.4 dB 左右,控制角度则成为最重要的目标。采用 ZEMAX 光学仿真软件建立了大光束光纤准直器模型,进行了优化分析,并在混合模式下模拟了单模光纤耦合信号和发生不同偏心时信号耦合效率,结果表明,在单模光纤芯径为 $12\ \mu\text{m}$ 时,系统耦合效率为 92.42%。最后结合单模大光束光纤连接器的耦合方式,双合透镜特性和耦合误差分配等关键技术,搭建了光学实验平台对仿真结果进行验证,得到的结论与理论计算和 ZEMAX 模拟吻合,符合光纤连接器信号的传输要求,为单模大光束光纤准直器的设计及耦合校准提供了指导。

参 考 文 献

- [1] Ji Z, Jia D, Xu Q, et al. Design and implementation of a plastic fiber optical rotary joint using upside down taper lens[J]. *Optics Communications*, 2013, 292: 57-61.
- [2] Williams R J, Krämer R G, Nolte S, et al. Femtosecond direct-writing of low-loss fiber Bragg gratings using a continuous core-scanning technique [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1918-1920.
- [3] Dorsey G. Fiber optic rotary joints: a review[J]. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1982, 5(1): 37-41.
- [4] Takahashi N, Tanaka S, Wada A. FBG-based vibration measurement of rotating structure using optical fiber rotary joint[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7753: 77537U.
- [5] Cho I K, Mun J I, Han Y T, et al. Fiber-optic rotary joint and optical link for RF-antenna measurement[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(7): 447-449.
- [6] Yamaguchi M. Application of fiber optics for deep-sea exploration systems[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1990, 15(3): 238-243.
- [7] Zhao Z, Jia D G, Xu Q, et al. Effect of Dove prism

- manufacturing errors on coupling loss[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(2): 16-20.
- 赵振, 贾大功, 许强, 等. Dove 棱镜的加工误差对耦合损耗的影响[J]. 光电工程, 2012, 39(2): 16-20.
- [8] Gu W B, Wang Y. Design of signal transmission system of rotary joint component based on CPLD[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(10): 1272-1276.
- 顾文斌, 王怡. 基于 CPLD 的旋转联接部件信号传输控制系统设计[J]. 机电工程, 2016, 33(10): 1272-1276.
- [9] Bowman A L. Fiber optic rotary join: US6907161[P]. 2005-06-14.
- [10] Lei P S, Xue L F, He J, et al. Design of multi-mode fiber collimator with ZEMAX[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(1): 010605.
- 雷平顺, 薛力芳, 何军, 等. ZEMAX 在多模光纤准直器设计中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(1): 010605.
- [11] Wang H L, Zhang D Y. Design of coupling system between fibers and laser diodes based on Zemax[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(S1): 81-84.
- 王海林, 张登印. 基于 Zemax 半导体激光器与单模光纤耦合系统设计[J]. 光子学报, 2011, 40(S1): 81-84.
- [12] Dong X Y, Li P X, Zhang X, et al. Analysis of alignment errors of beam-expanded optical fiber connector based on ZEMAX[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 152201.
- 董雪岩, 李平雪, 章曦, 等. 基于 ZEMAX 的扩束型光纤连接器对准误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(15): 152201.
- [13] Chen H, Zou S Z, Yu H J, et al. Experimental study of the transmission in multimode fiber with a single mode laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 040602.
- 陈寒, 邹淑珍, 于海娟, 等. 单模激光在多模光纤中的传输实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 040602.
- [14] Wang Y, Xu Y Y, Liu A Y, et al. Design and simulation of long-wavelength infrared microscopic imaging optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0622001.
- 王宇, 许阳阳, 刘爱云, 等. 长波红外显微成像光学系统的设计与仿真[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0622001.
- [15] Hu W S, Zeng Q J. Analysis of additional coupling loss caused by assembly error of self-focusing rod lens collimation system[J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(3): 221-224.
- 胡卫生, 曾庆济. 自聚焦棒透镜准直系统的装配误差引起的附加耦合损耗分析[J]. 中国激光, 1999, 26(3): 221-224.
- [16] Liu F, Li Y, Hao R L, et al. Design and implementation of an off-axis rotary optical fiber transmission system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0905001.
- 刘飞, 李毅, 郝如龙, 等. 离轴旋转光纤传输系统的设计与实现[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0905001.
- [17] Jia D G, Ji X T, Qu Q, et al. Analysis of point accuracy for C-lens fiber collimator[J]. Aerospace Control and Application, 2020, 46(4): 76-80.
- 贾大功, 冀雄涛, 曲强, 等. C-lens 光纤准直器点精度优化分析[J]. 空间控制技术与应用, 2020, 46(4): 76-80.
- [18] Jia D G, Chen Z T, Xu Q, et al. Research progress on off-axis fiber optic rotary joint[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(11): 1454-1460.
- 贾大功, 陈志童, 许强, 等. 中空光纤旋转连接器研究进展[J]. 兵工学报, 2013, 34(11): 1454-1460.
- [19] Lin J H, Zhang W G. Recent progress in theory, design and development of fiber coupler[J]. Progress in Physics, 2010, 30(1): 37-80.
- 林锦海, 张伟刚. 光纤耦合器的理论、设计及进展[J]. 物理学进展, 2010, 30(1): 37-80.
- [20] Zhu C, Guo R, Zhu B W. Study on improving insert loss of collimator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(S1): 111-112.
- 朱昌, 郭芮, 朱保文. 基于提高准直器插入损耗的研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(S1): 111-112.
- [21] Huang M H, Wang J F, Zhuang Q R. Design of optical current transformer based on magnetic torsion micro-mirror[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2016, 27(12): 1274-1280.
- 黄梅红, 王巨锋, 庄其仁. 磁扭转微镜光学电流互感器设计[J]. 光电子·激光, 2016, 27(12): 1274-1280.
- [22] Jia D G. Development of multi-channel spatial interconnection optical rotary joint[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004: 10-14.
- 贾大功. 多路空间互连光旋转连接器的研制[D]. 天津: 天津大学, 2004: 10-14.
- [23] Wang G M, Li S C. Optimization design of light source system for sulfur dioxide detector[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 012205.
- 王桂梅, 李世超. 二氧化硫检测仪光源系统的优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 012205.
- [24] Liu C C, Wang C L, Wang X, et al. Design of double wavelengths fiber coupled module of semiconductor diode laser by ZEMAX[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(1): 0105002.
- 刘翠翠, 王翠鸾, 王鑫, 等. 半导体激光器双波长光纤耦合模块的 ZEMAX 设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(1): 0105002.