

文章编号 1004-924X(2023)10-1443-11

大光斑离轴式光纤旋转连接器的耦合性能

赵振刚^{1,2*}, 王思飞¹, 段绍锋¹, 曹发松¹, 刘爱莲^{1,2}

(1. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500;

2. 云南省绿色能源与数字电力量测及控保重点实验室, 云南 昆明 650500)

摘要:针对直接对准型离轴式光纤旋转连接器中自聚焦透镜准直器出射光斑小、光纤耦合损耗大和有效对准时间短的问题,本文提出了一种由双合透镜和热扩芯光纤构成的大光斑光纤准直器。基于出射光斑在相对旋转过程中重叠面积的周期性变化规律,分析了准直器间存在径向误差和角向误差时的耦合损耗变化。根据转子圆环和出射光斑尺寸得到耦合损耗为 3 dB 时的理论有效对准时间。为此搭建了光纤耦合实验平台测试其耦合性能及有效对准时间。实验结果表明,光纤准直器采用的单模光纤模场直径越大耦合损耗越低,其中模场直径为 28 μm 时耦合损耗低至 0.22 dB。在转速为 60 r/min 时,通过光电转化和函数拟合得到四种模场直径光纤准直器的有效对准时间。模场直径为 17 μm 时最大有效对准时间为 7.05 ms,与理论值 7.1672 ms 基本一致。最后应用光纤布拉格光栅传感实现无接触式传输光信号。这种设计为大光斑离轴式光纤旋转连接器的研究及其在光纤传感领域的应用提供了理论和技术支撑。

关键词: 离轴; 光纤旋转连接器; 双合透镜; 热扩芯光纤; 光纤耦合

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233110.1443

Coupling performance of large spot off-axis fiber optic rotary joint

ZHAO Zhengang^{1,2*}, WANG Sifei¹, DUAN Shaofeng¹, CAO Fasong¹, LIU Ailian^{1,2}

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Yunnan Key Laboratory of Green Energy, Electric Power Measurement Digitalization, Control and Protection, Kunming 650500, China)

* Corresponding author, E-mail: zhaozhengang@kust.edu.cn

Abstract: To solve the problems of the small spot of graded-index lenses and the significant coupling loss and short effective alignment time of the current direct alignment-type off-axis fiber optic rotary joint, this study devised a large-spot fiber collimator made of a double-lens collimator and thermal expansion core fiber. Based on the periodic variation law of the overlapping area when the exit spot rotates relatively, the change in the coupling loss when there are radial and angular errors between the collimator was analyzed. The theoretical effective alignment time of the off-axis fiber optic rotary joint under a 3-dB coupling loss was calculated from the exit spot size of the rotor ring and the fiber collimator. An optical fiber coupling experimental platform was set up to test the coupling performance of the off-axis fiber optic rotary joint and measure the effective alignment time. The experimental results indicate that a larger mode field diameter

收稿日期: 2022-12-16; 修订日期: 2023-01-18.

基金项目: 云南省科技厅基础研究专项-重点项目资助(No. 202101AS070096); 云南省科技计划资助项目(No. 202101AT070131)

(MFD) of the single-mode fiber used in the fiber collimator corresponds to a smaller coupling loss. In the test, a large MFD of 28 μm yields the minimum loss of 0.22 dB. At a speed of 60 r/min, the effective alignment times of the four MFD fiber collimators were obtained via photoelectric conversion and function fitting. For the MFD of 17 μm , the maximum effective alignment time is 7.05 ms, which is close to the theoretical value of 7.1672 ms. Finally, fiber Bragg grating sensing was applied to achieve contactless transmission of optical signals. This design provides theoretical and technical support for the large-spot off-axis fiber optic rotary joint and its application in optical fiber sensing.

Key words: off-axis; fiber optic rotary joint; double lens; thermal expansion core fiber; optical fiber coupling

1 引言

近年来,随着光纤技术的高速发展,光纤旋转连接器(Fiber Optic Rotary Joint, FORJ)作为一种通过旋转结构传输光信号的工具得到广泛应用,大多数为同轴光纤旋转连接器^[1-2],但有些传输过程中转轴内还伴随气、油和水等介质的传输^[3-5],这些介质需要一个传输通道,且该通道常设置在中心轴的位置,当中心轴被其他介质占用,光信号不能沿与连接器旋转轴重合的光轴传输,就需要一种中空离轴式光纤旋转连接器(Off-Axis Fiber Optic Rotary Joint, OA-FORJ)^[6]。在特殊的应用环境中,还涉及结合光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感技术对旋转结构的温度、应变等状态监测^[7-9]。

殷樱等^[10]利用准直器实现离轴旋转连接和光信号在旋转过程中双向实时传输的离轴式光纤连接器系统。王彦晓等^[11]成功利用离轴式光纤滑环实现 FBG 传感,采用自聚焦透镜(Grin Lens, G-Lens)与普通单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)组成光纤准直器,出射光斑半径为 0.16 mm。刘飞等^[12]结合光端机、光滑环设计了一种大口径离轴旋转光纤传输系统,其中光纤准直器由多个透镜组构成,经实验测量,系统的出射光斑半径为 18 mm,耦合损耗为 20.46 dB。丁杰等^[13]通过热扩芯(Thermal Expansion Core, TEC)光纤、红外直角棱镜和 G-Lens 按一定的规则排布设计了多通道大内径离轴光纤旋转连接器,耦合损耗最大为 21.73 dB。为降低光纤耦合损耗, Mi 等^[14]设计了一种单通道 TEC 光纤旋转连接器,与 SMF 光纤准直器相比, TEC 光纤准直器对角向误差的敏感性比较低,旋转时最大插入

损耗小于 1.27 dB。TEC 光纤虽然能够有效降低耦合损耗,但结合 G-lens 后,光斑较小,对准难度大,制成离轴式光纤旋转连接器对准时间短,不利于光纤光栅信号传输。

上述多种直接对准型离轴式光纤旋转连接器未兼顾装配精度与耦合难度,存在出射光斑小、光信号耦合损耗大的问题。

因此,为降低耦合损耗,同时增大光斑大小,本团队前期工作中,采用双合透镜(Double Lens, D-Lens)结合 TEC 光纤设计了单模大光束光纤连接器^[15],在 ZEMAX 中建立大光束光纤准直透镜模型,最后搭建光学实验平台对模拟结果进行验证。相对于其他准直器,本文设计的双合透镜准直器光斑大、损耗低、结构简单,易进行自由空间耦合。通过理论分析了存在径向误差和角向误差时的耦合损耗变化,根据转子圆环和出射光斑尺寸得到耦合损耗为 3 dB 时的理论有效对准时间。搭建光学实验平台,在 60 r/min 旋转下测得四种模场直径的 TEC 光纤耦合损耗为 3 dB 对应有效对准时间。最后结合 FBG 传感技术实现了离轴、无接触式旋转传输光信号。此种设计结构为直接对准型离轴式光纤旋转连接器及应用光纤布拉格光栅提供理论研究与技术支撑,具有较为广泛的应用前景。

2 结构分析

2.1 离轴式光纤旋转连接器结构分析

当旋转部件中心轴被其他结构占用,无法实现信号同轴传输时,光信号的离轴传输成为必要。本文设计的离轴式光纤旋转连接器传输系统结构如图 1 所示,连接器由转子端圆环和定子

组成,转子可通过结构件安装在转轴外随轴转动,转子圆环圆柱孔处安装由双合透镜和 TEC 光纤组成的光学结构。定子端采用与转子相同的光学结构,距轴心相同距离固定。

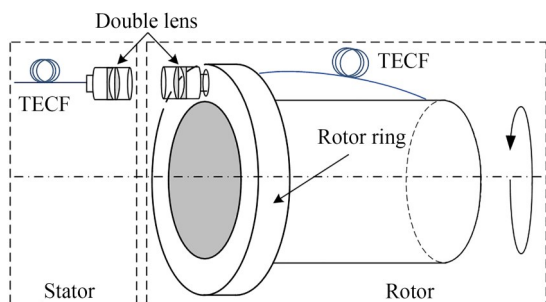


图 1 离轴式光纤旋转连接器结构图

Fig. 1 Structure of OA-FORJ

转子随轴转动时,旋转盘上光学结构始终在转子圆环上公转,每转一周两个双合透镜对准一次,实现光信号的一次导通。旋转造成准直透镜相对位置发生变化,两透镜出射面形成“相离—相切—相交—相切—相离”的过程,准直器的重叠面积发生周期性变化。准直器形成重叠区域且有光信号通过时,透镜之间可实现信号双向传输,理想情况下两准直器完全对准时,耦合损耗最低接近于 0 dB。由于准直器出射光束能量分布呈高斯特性,准直器的对准区域达到一定面积,即两准直透镜轴心距在一定范围内在才能实现光的有效导通,该轴心距离称为有效耦合距离,实现光信号双向导通的时间段称为有效对准时间。有效对准时间越长,越有利于光信号的采集和解调。

转子端圆环简化结构如图 2 所示,通过分析圆环尺寸以及转速对对准时间的影响。离轴式光纤旋转连接器的定子和转子中双合透镜准直器出射光斑半径为 d ,转子端准直透镜夹持于旋转盘上,旋转盘固定在旋转台上,其中转子圆环半径为 R_1 ,中空旋转轴半径为 R_2 ,光斑与旋转轴的圆心距为 R_0 。由于旋转中对准时间短,两透镜中心距离小,因此径向光斑错位距离 $2y_0$ 可近似为旋转弧长。弧度角与弧长、圆心距的几何关系式^[16]为:

$$\Delta\theta = \frac{2y_0}{R_0}, \quad (1)$$

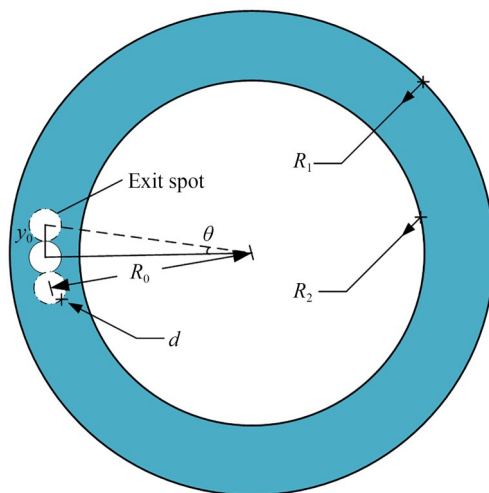


图 2 转子圆环结构图

Fig. 2 Structure diagram of rotor ring

根据 $\omega = 2\pi n, \Delta t = \frac{\Delta\theta}{\omega}$ 的关系,在一个“相离—相切—相交—相切—相离”旋转过程中,图中光斑旋转对准时间 Δt 为:

$$\Delta t = \frac{y_0}{\pi n R_0}, \quad (2)$$

其中: y_0 为径向光斑错位距离, n 为转速。

从式(2)中可看出有效对准时间受光斑中心的旋转半径、转速、有效耦合距离综合影响。光斑中心的旋转半径越大对准时间越短;转速越快对准时间越短;有效耦合距离越大,有效对准时间越长,而有效耦合距离又受光纤准直器出射光斑尺寸制约。为增大有效耦合距离增大对准时间,采用大模场直径单模光纤与大光斑准直透镜。

2.2 透镜结构分析

传统单模光纤芯径很小,射出的光束只有很少一部分能够耦合到输出光纤中,且直接耦合困难,因此需要借助光纤准直器耦合光纤间的光信号。光的传输导模接近高斯特征,所以单模光纤准直的本质是高斯光束通过准直透镜传播^[17],而准直透镜能不改变光的传输模式将光束扩大准直。则单模光纤耦合效率^[18]表示为:

$$\eta = \frac{\left| \iint \varphi_1 \cdot \varphi_2^* ds \right|^2}{\iint |\varphi_1|^2 ds \cdot \iint |\varphi_2|^2 ds}, \quad (3)$$

其中: φ_1 是发射光纤在积分平面内的模式分布函数, φ_2^* 是接收光纤在积分平面内模式分布函数。

光纤准直器是由准直透镜和光纤构成,它将光纤中出射发散角较大的光束通过准直透镜变为近平行光。目前直接对准型光纤旋转连接器以自聚焦透镜(Grin-Lens, G-Lens)作为对准器件较多,尾端采用常规单模光纤耦合光信号,出射光斑尺寸小^[15],与双合透镜相比,对准难度高,耦合损耗大。

为了实现离轴式光纤旋转连接器的低损耗、大光斑要求,采用大模场直径 TEC 光纤耦合光纤准直器的光信号。TEC 光纤^[19]是一种新型单模光纤,通过高温使普通 SiO₂ 光纤中的 Ge⁴⁺ 发生扩散,形成扩束光纤。扩束区域增大了模场直径,比普通单模光纤更容易进行自由空间耦合。

研究证明由面材质均为 N-SF6 的正负单球面透镜组成的双合透镜^[20]制成的光纤准直器,可减少色差,减小发散角,增大出射光斑尺寸和准直距离。双合透镜准直器结构如图 3 所示。

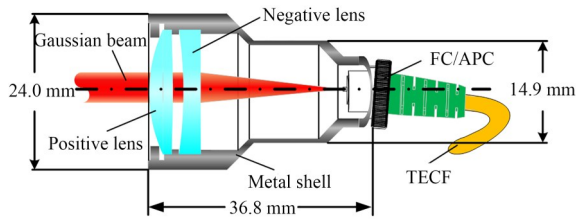


图 3 双合透镜准直器结构图
Fig. 3 Structure of D-Lens collimator

双合透镜准直器将入射光准直扩束为光斑半径为 d 的近平行光束,理论近似值为:

$$d \approx 2\lambda \left(\frac{f}{\pi D_T} \right), \quad (4)$$

其中: λ 为光的波长, D_T 为光纤的模场直径, f 为焦距。测试 OA-FORJ 耦合性能,需要对光纤准直器进行耦合分析。当 λ 为 1 550 nm、焦距为 37.13 mm 时,根据式(4)计算不同模场直径 TEC 光纤与双合透镜耦合后的出射光斑半径尺寸。如表 1 所示。

从式(4)可以看出,波长、双合透镜焦距参数一定,光斑半径与 TEC 光纤模场直径成反比。由表 1 可知,TEC 光纤的模场直径越大,出射光斑尺寸越小。通过激光探测卡实测 20 μm 的 TEC 光纤分别连接双合透镜与自聚焦透镜的输出光斑对比图。

表 1 不同模场直径 TEC 光纤下的双合透镜准直器输出光斑尺寸

Tab.1 Output spot size of D-Lens collimator in the TECF with different MFDs

$D_T/\mu\text{m}$	d/mm
14	2.629 0
17	2.165 1
20	1.840 3
28	1.314 5

如图 4 所示,双合透镜出射光斑尺寸远大于自聚焦透镜的出射光斑。因此采用双合透镜作为光纤准直器。

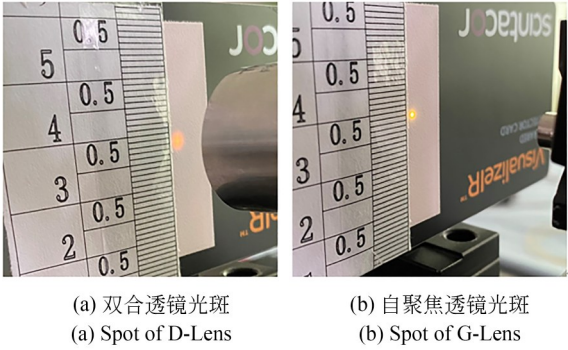


图 4 光斑对比图
Fig. 4 Comparison of spot

3 离轴光纤旋转连接器耦合时间分析

3.1 理论对准时间

根据双合透镜尺寸和有效对准时间要求设计的转子圆环参数如表 2 所示。

光信号耦合效率^[18]是衡量离轴式光纤旋转连接器耦合性能好坏的标准之一,即耦合过程光功率输出与输入之比,而光信号耦合效率与光纤

表 2 转子圆环参数

Tab. 2 Parameters of rotor ring

参量	参数/mm
光斑与转盘圆心距 R_0	80
旋转盘 R_1	90
中空旋转轴 R_2	65
夹持准直器圆柱孔 D_0	15.1

准直器耦合情况有关。两光纤准直器耦合效率越高,耦合损耗就越低。两者满足:

$$\text{Loss} = -10 \lg \eta, \quad (5)$$

其中:Loss 为光纤的耦合损耗, η 为光纤的耦合效率。

光纤准直器间的耦合损耗主要由三种装配误差^[21]引起,如图 5 所示。(a)径向误差:径向距离 y_0 , (b)角向误差:倾角 θ , (c)轴向误差:轴向距离 X_0 。

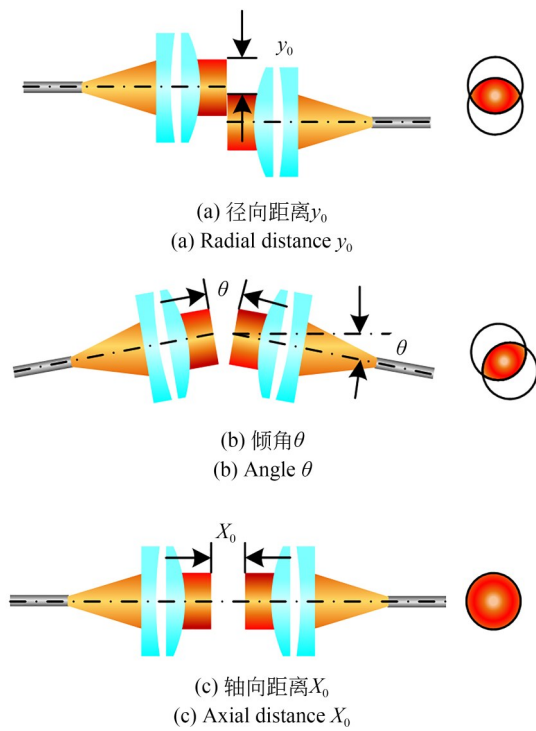


图 5 三种耦合误差

Fig. 5 Three kinds of coupling errors

由这三种误差分别导致的耦合损耗^[21]计算式如下:

径向误差耦合损耗为:

$$L_y = 4.343 \frac{y_0^2}{d^2}, \quad (6)$$

角向误差耦合损耗为:

$$L_\theta = 4.343 \left(\frac{\pi d \tan \theta}{\lambda} \right)^2, \quad (7)$$

轴向误差耦合损耗为:

$$L_x = -10 \lg \frac{1}{1 + \left(\frac{X_0 \lambda}{2\pi d^2} \right)^2}, \quad (8)$$

由式(6)、式(7)计算不同模场直径单模光纤通过双合透镜准直器的耦合损耗曲线如图 6 所示。

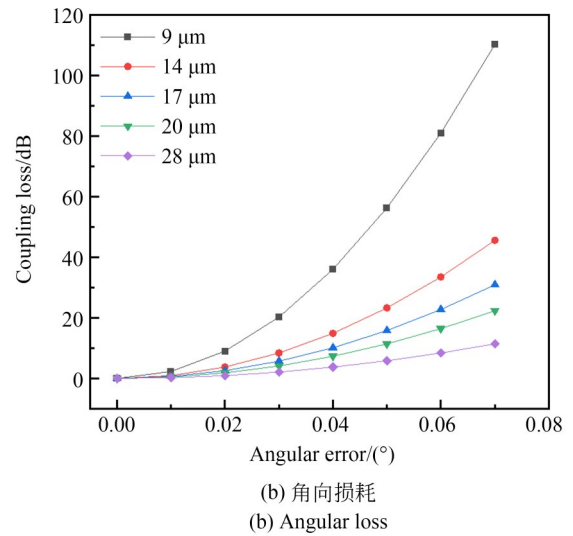
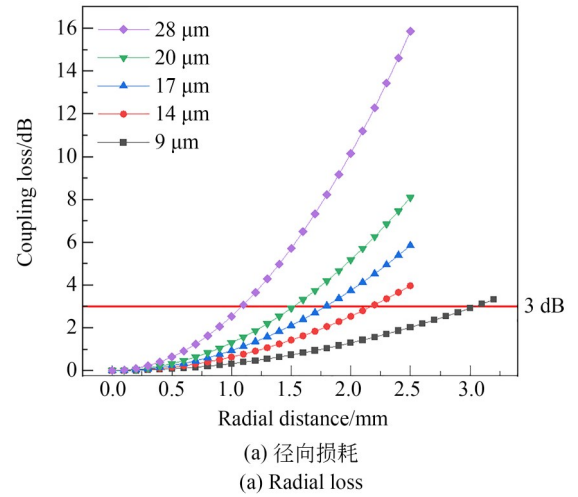


图 6 不同模场直径单模光纤耦合损耗曲线

Fig. 6 Coupling loss curves for different MFDs

从图 6(a)可知,随着光纤模场直径与径向距离的增加,耦合损耗逐渐增大。为保证后续 FBG 光信号的采集,选取耦合损耗小于 3 dB(耦合效率 $>50\%$)的光斑错位距离为有效耦合距离。在此条件限制下,模场直径为 28 μm 的有效耦合距离为 1.09 mm,而 9 μm 的单模光纤耦合损耗为 3 dB 时,有效耦合距离为 3.12 mm。与 SMF 光纤准直器相比,TEC 光纤准直器对径向误差更为敏感。从图 6(b)可知,随着光纤模场直径与角度增

加,损耗逐渐增大。但模场直径越大,耦合损耗增加得越缓慢。因此,可采用大模场直径光纤降低角向误差对耦合损耗的影响。

由于双合透镜准直器出射光斑较大,对轴向距离要求低。由式(8)计算可知:随着 d 减小和 X_0 增大,耦合损耗变化范围极小。因此,轴向距离对耦合损耗及对准时间影响可忽略不计。

将式(6)代入式(2)得到理论有效对准时间为:

$$\Delta t = \frac{d}{\pi n R_0} \sqrt{\frac{L_y}{4.343}}. \quad (9)$$

根据式(9)计算转速 n 为 60 r/min、耦合损耗 L_y 为 3 dB 时的理论有效对准时间,如表 3 所示。

表 3 耦合损耗为 3 dB 时理论有效对准时间

Tab. 3 Theoretical effective alignment time when coupling loss is 3dB

$D_T/\mu\text{m}$	y_0/mm	$\Delta_\theta/(^{\circ})$	t/ms
14	2.1	0.054 6	8.703 1
17	1.8	0.045 0	7.167 2
20	1.5	0.038 3	6.092 1
28	1.09	0.027 3	4.351 5

从表 3 中可看出光纤模场直径越大,径向错位距离越短,旋转弧度角越小,有效对准时间也越短。

3.2 光信号耦合实验对准时间

基于上述理论分析,搭建实验平台测试离轴式光纤旋转连接器的耦合性能,结构如图 7 所示。其中,光学平台使用北京北光世纪仪器公司型号为 HB400 的自动平衡型光学平台,三维位移台使用同公司型号为 PTS310 的精密平移台、PRS202M 的精密旋转台、VTS123M 精密升降

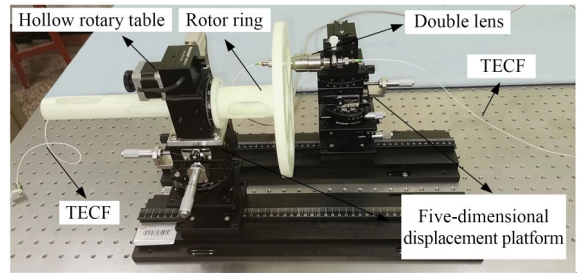


图 7 离轴式光纤旋转连接器结构图
Fig. 7 Structure of the OA-FORJ

台、TG101 精密角位移台,其位移精度达到 0.003 mm,角度精度达到 0.01°。通过上海嘉慧光电子有限公司型号为 JW3211 的光功率计获取输出光功率。光源为输出光谱范围为 1 525~1 565 nm 的 ASE 宽带光源。测量模场直径为 9 μm 的 SMF 光纤和 14 μm,17 μm,20 μm 及 28 μm 的 TEC 光纤连接双合透镜准直器后的耦合损耗。其中,双合透镜来自索雷博光电科技有限公司,型号为 F810APC-1550。TEC 光纤来自广州奥鑫通讯设备有限公司。

调节三维位移台使输出光功率最大后,将数值代入式(6)得到耦合损耗。如图 8 所示。

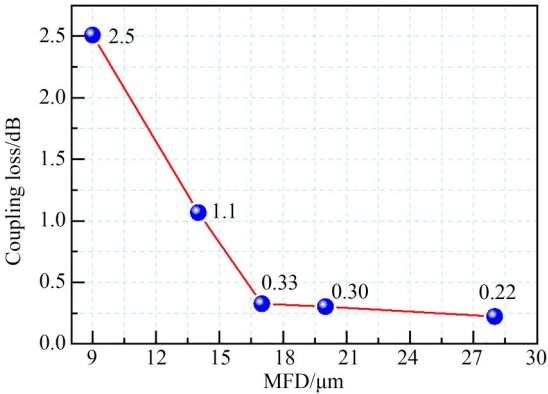


图 8 光纤准直器耦合损耗实测曲线
Fig. 8 Coupling loss measurement curve

由图 8 中可知,随着光纤模场直径的增加,双合透镜准直器耦合损耗显著减小。28 μm 的 TEC 光纤耦合损耗为 0.22 dB,证明由双合透镜和 TEC 光纤构成的光纤准直器满足低损耗传输要求。

测量了 5 种光纤分别存在径向误差和角向误差时的耦合损耗。如图 9 所示。

从图 9(a)和 9(b)耦合损耗曲线图中可知,角向误差对光纤准直器的耦合损耗影响最为明显,径向误差次之。而 4 种大模场直径 TEC 光纤能大幅度降低角向误差对光纤准直器耦合的影响。

为验证有效对准时间的准确性,搭建了如图 10 所示的测量系统,光源入射光功率为 10 mW,连接光衰减器衰减至光电探测器(Photoelectric Detector, PD)最大光饱和功率 0.2 μW。设定旋转台转速为 60 r/min,光信号通过光衰减器连接到定子端 TEC 光纤,当双合透镜准直器旋转对

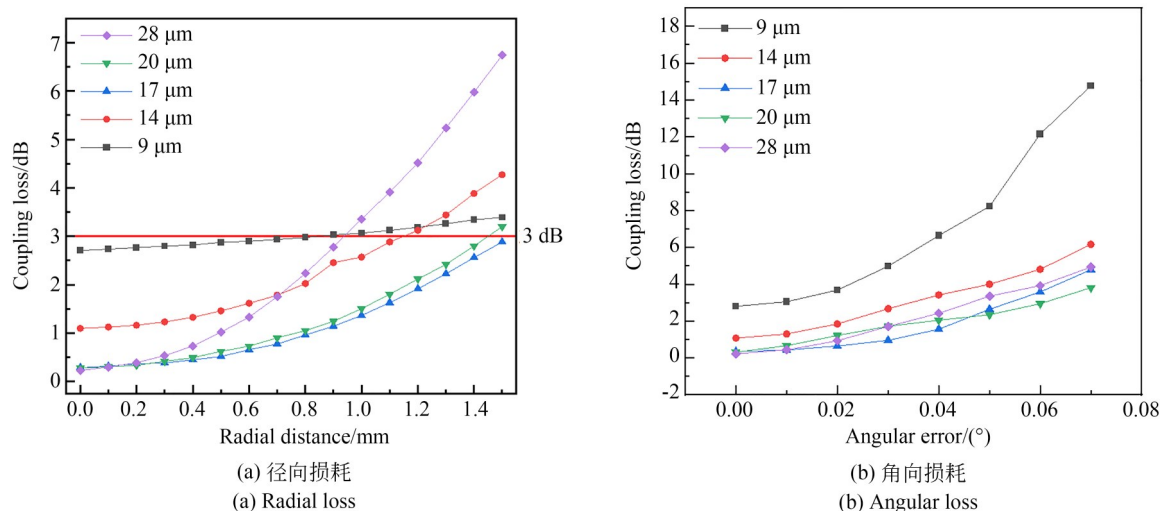


图9 双合透镜准直器耦合损耗曲线

Fig. 9 Coupling loss curve of D-Lens collimator

准时,光信号传输到另一端TEC光纤,进入输入波长响应范围为1 525~1 565 nm,3 dB带宽为200 kHz的光电探测器进行光电转化后,电信号进入电子示波器中输出脉冲电压时域波形。其中,转子端采用北京北光世纪仪器公司型号为MRS312的中空电控旋转台,并采用同公司型号为SC100系列步进电机控制器驱动旋转台。光电探测器来自北京康冠世纪光电科技有限公司,型号为KG-PR-200K-A。示波器来自泰克有限公司,型号为TBS1202B。

选取4种模场直径TEC光纤进行测量。由于光电探测器和示波器自身存在底噪,因此将脉冲电压时域波形进行函数拟合。如图11所示。

将理论与实验有效对准时间作对比,如表4

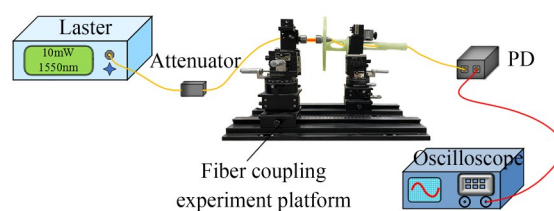
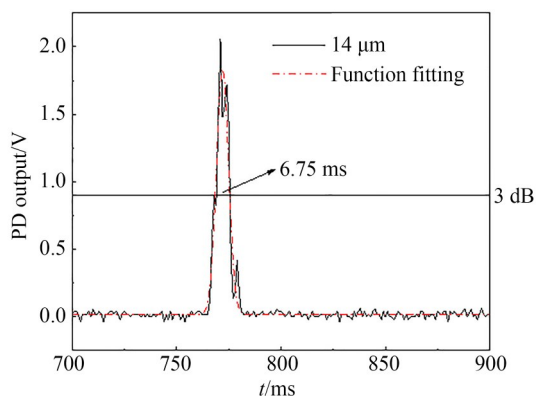
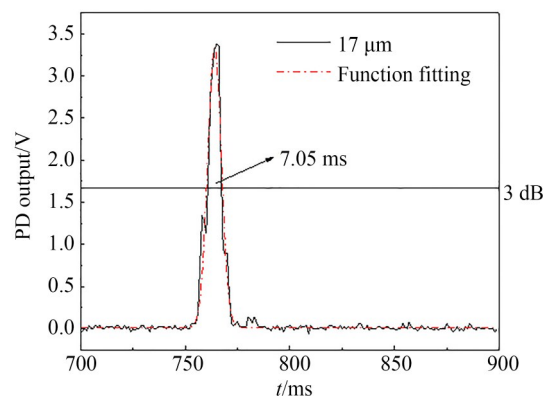


图10 离轴光纤旋转连接器时间测量实验系统

Fig. 10 OA-FORJ time measurement system

所示。

由表4可知,TEC光纤模场直径为14 μm 和28 μm 的实际测量时间大幅度减小,这是由于在旋转过程中光纤准直器受三种耦合误差综合影响,耦合损耗增大,有效耦合距离减小,出射光斑对准时间减小。TEC光纤的模场直径为17 μm

(a) 14 μm 波形
(a) Waveform of 14 μm (b) 17 μm 波形
(b) Waveform of 17 μm

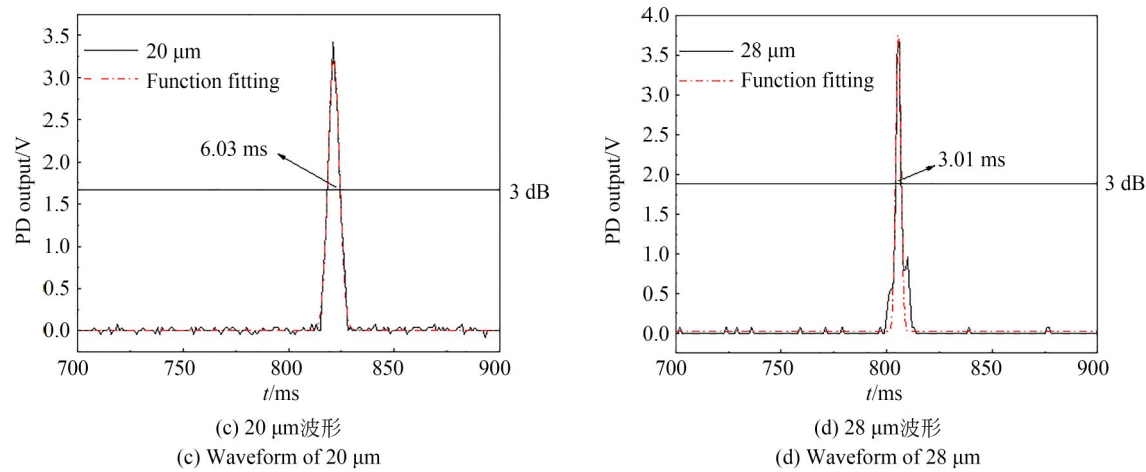


图 11 不同模场直径 TEC 光纤的 PD 输出波形
Fig. 11 PD output waveforms of TECFs with different MFDs

表 4 有效对准时间对比

Tab. 4 Comparison of effective alignment time

$D_T/\mu\text{m}$	Theoretical time	Fitting time
14	8.703 1	6.75
17	7.167 2	7.05
20	6.092 1	6.03
28	4.351 5	3.01

时,有效对准时间为 7.05 ms,这证明它的对准时间更长,但对角向误差比较敏感。因此,根据实测耦合损耗、耦合误差、对准时间、选定 20 μm 的 TEC 光纤和双合透镜构成光纤准直器。

4 光学耦合应用实验

为了验证 FBG 光纤传感器反射的光信号可通过离轴式光纤旋转连接器传输,设计了如图 12 所示的实验装置图。其中,光纤信号解调采用昆明开显科技有限公司型号为 LTG-40GNA2000 光纤光栅解调仪,其输出光功率约为 13 dBm,分辨率为 1 pm,采样频率为 5 kHz,波长解调范围响应为 1 525~1 565 nm。采用东莞市勤卓环境测试设备有限公司型号为 CK-408G 的恒温恒湿试验箱进行温控。可控温度范围为 -30~120 $^{\circ}\text{C}$,精度为 0.01 $^{\circ}\text{C}$,满足实验要求。实验中,解调仪输出的宽带光通过 OA-FORJ 注入转子端模场直径为 20 μm 的 TEC 光纤,其尾端熔接 FBG 光纤传感器。当旋转光路对准时,温度传感器光栅返

回特定波长的光信号,反射光在对准时间内通过离轴式光纤旋转连接器进入解调仪输出反射光的中心波长,上位机将波长数据转换为温度。

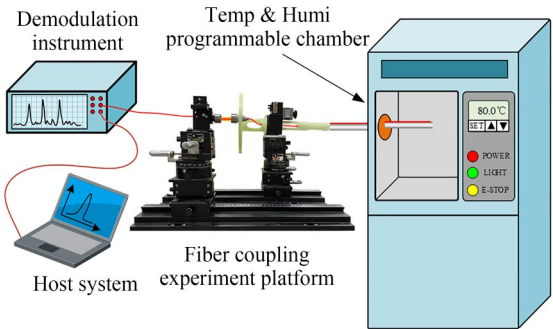


图 12 温度传感系统
Fig. 12 Temperature sensing system

首先进行 FBG 光纤传感器静态标定,将传感器放入恒温恒湿箱,设定恒温恒湿箱温升范围在 15~100 $^{\circ}\text{C}$ 之间。记录同一时刻下温度值对应上位机的中心波长,重复 2 次取平均。得到 FBG 光纤传感器的温度灵敏度标定结果,如图 13 所示。

由图 13 可知,FBG 光纤传感器的温度灵敏度系数为 10.1 pm/ $^{\circ}\text{C}$, $R^2(\text{COD})$ 为 0.991 5,证明 TEC 光纤熔接 FBG 传感器性能良好。

按照图 12 实验装置进行温度传感实验,设定恒温箱温升范围为 0~100 $^{\circ}\text{C}$,记录光纤准直器旋转对准期间解调仪显示的波长值,将波长值代入

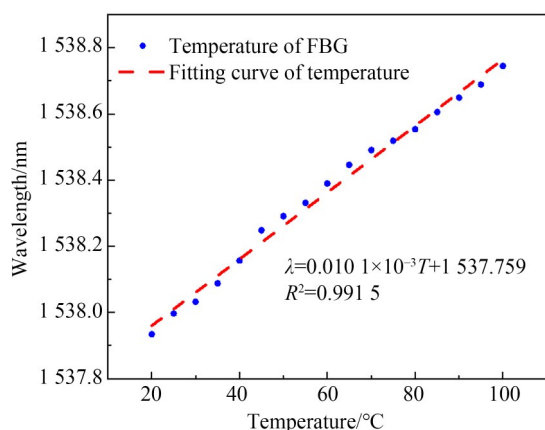


图 13 FBG 传感器温度灵敏度的标定

Fig. 13 Calibration for temperature sensitivity of FBG sensor

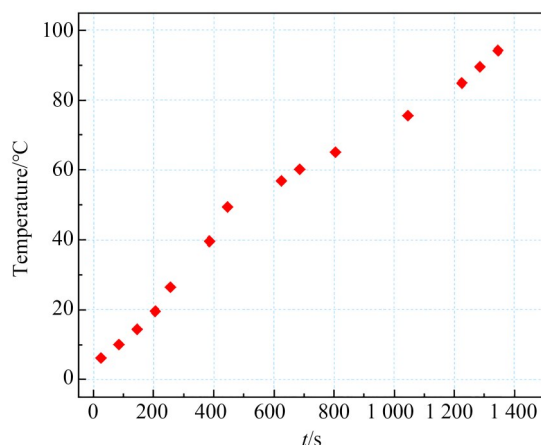


图 14 温度随时间变化曲线图

Fig. 14 Curve of temperature change with time

标定方程式得到温度随时间变化曲线图,如图 14 所示。

由图 14 可知,离轴式光纤旋转连接器结合 FBG 光纤传感器实现了光信号双向传输和对温度的监测。由于在旋转过程中双合透镜准直器受振动影响,产生耦合误差,解调仪接收不到反射回来的光信号,导致温度值非均匀排布。

5 结 论

为增大光斑、降低耦合损耗和增加有效对准时间,本文设计了一种由双合透镜和 TEC 光纤构成的大光斑离轴式光纤旋转连接器。分析了光纤准直器由径向误差和角向误差带来的耦合损耗,根据转子圆环参数计算得到离轴式光纤旋转连接器耦合损耗为 3 dB 时的理论有效对准时间。搭建光纤耦合实验平台。测量了五种模场直径光纤双合透镜准直器的耦合损耗,其中模场直径为 28 μm 的 TEC 光纤耦合损耗为 0.22 dB。在 60 r/min 时,通过光电转化和函数拟合得到模场直径为 17 μm 的双合透镜准直器出射光斑最大有效对准时间为 7.06 ms。最后在低转速下结合 FBG 传感技术实现了离轴、无接触式旋转传输光信号。本文所设计的大光斑光纤准直器为直接对准型离轴式光纤旋转连接器及应用光纤布拉格光栅提供理论研究与技术支撑。对旋转结构的光纤光栅监测也具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] DORSEY G. Fiber optic rotary joints-a review[J]. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1982, 5(1): 37-41.
- [2] 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.
- [3] MCKAY R F. Off-axis rotary joint: US7372230 [P]. 2008-05-13.
- [4] SHINGLETON W B, SEWELL P E. Percutaneous renal tumor cryoablation with magnetic resonance imaging guidance[J]. *The Journal of Urology*, 2001, 165(3): 773-776.
- [5] SNOW J W, MACKAY I B, BOWERS K. Off-axis optical rotary joint: US5297225[P]. 1994-03-22.
- [6] 胡百泉. 旁轴光纤旋转连接器的研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [7] HU B Q. *Research of Off-axis Fiber Optic Rotary Joint* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [7] 金凯, 丁莉芸, 郭会勇, 等. 超低温条件下光纤光栅温度敏感系数标定[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(1): 56-61
- JIN K, DING L Y, GUO H Y, *et al.* Calibration of temperature-sensitivity coefficient of fiber Bragg grating at ultra-low temperature[J]. *Opt. Precision*

- Eng., 2022, 30(1): 56-61. (in Chinese)
- [8] 饶春芳, 吴锴, 胡友德, 等. 光纤布拉格光栅在医用蒸汽灭菌器温度监测的应用[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9): 1930-1938.
- RAO CH F, WU K, HU Y D, *et al.* Application of fiber Bragg grating in temperature monitoring of medical steam sterilizer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(9): 1930-1938. (in Chinese)
- [9] 张开宇, 闫光, 孟凡勇, 等. 温度解耦增敏式光纤光栅应变传感器[J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1330-1337.
- ZHANG K Y, YAN G, MENG F Y, *et al.* Temperature decoupling and high strain sensitivity fiber Bragg grating sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(6): 1330-1337. (in Chinese)
- [10] 殷樱, 李毅, 丁杰, 等. 离轴光纤旋转连接器的设计与实验[J]. 光学技术, 2013, 39(2): 188-192.
- YIN Y, LI Y, DING J, *et al.* Design and experiment of an off-axis fiber-optic rotary joint[J]. *Optical Technique*, 2013, 39(2): 188-192. (in Chinese)
- [11] 王彦晓, 余有龙, 高灿辉, 等. 基于光纤滑环的旋转部件温度测量[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0808004.
- WANG Y X, YU Y L, GAO C H, *et al.* Temperature measurement for rotating parts based on the fiber-optic slip-ring[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(8): 0808004. (in Chinese)
- [12] 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.
- 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. (in Chinese)
- [13] 丁杰, 李毅, 王锋, 等. 大内径离轴光纤旋转连接器的设计与实现[J]. 光子·激光, 2013, 24(11): 2075-2080.
- DING J, LI Y, WANG F, *et al.* Design and realization of the off-axis fiber optic rotary joint with large inner diameter[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2013, 24(11): 2075-2080. (in Chinese)
- [14] MI L, YAO S L, SUN C D, *et al.* A Single-Channel Fiber Optic Rotary Joint on the Basis of TEC Fiber Collimators[C]. *9th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON 2010)*. 24-27, 2010, Nanjing. London: IET, 2011: 437-440.
- [15] HE Q, ZHAO Z, YE X D, *et al.* Optical coupling efficiency of a coupler with double-combined collimating lenses and thermally expanded core fibers[J]. *Micromachines*, 2022, 13(2): 324.
- [16] 许嘉璐, 林崇德. 中国中学教学百科全书-教育卷[M]. 沈阳: 沈阳出版社, 1990.
- XU J L, LIN CH D. *Encyclopedia of Middle School Teaching in China-Education Volume* [M]. Shenyang: Shenyang Publishing House, 1990. (in Chinese)
- [17] 代梦诗, 李重光, 楼宇丽, 等. 高斯光束经轴锥镜-透镜系统变换后的解析描述[J]. 光子学报, 2021, 50(7): 0726001.
- DAI M SH, LI CH G, LOU Y L, *et al.* Analytical expression of Gaussian beam converted by axicon-lens system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(7): 0726001. (in Chinese)
- [18] 米磊. 单通道光纤旋转连接器的研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2010.
- MI L. *Researches on the Single-Chanel Fiber Optic Rotary Joint*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
- [19] 李榴, 李毅, 郑秋心, 等. 基于热扩芯光纤的光纤准直器特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012(6): 77-82.
- LI L, LI Y, ZHENG Q X, *et al.* Characteristics of fiber collimator based on thermally expanded core fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012(6): 77-82. (in Chinese)
- [20] 何琦, 赵振刚, 许晓平, 等. 基于ZEMAX单模大光束光纤准直透镜信号耦合分析[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(21): 2106008.
- HE Q, ZHAO ZH G, XU X P, *et al.* Signal coupling analysis of single-mode large beam fiber collimating lens based on ZEMAX[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(21): 2106008. (in

Chinese)

- [21] 宋巍, 谢友金, 李治国, 等. 基于光纤旋转连接器的光纤耦合效率研究[J]. 光子学报, 2022, 51 (11): 1106005.

SONG W, XIE Y J, LI ZH G, *et al.* Research on coupling efficiency based on fiber optic rotary joints [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51 (11): 1106005. (in Chinese)

作者简介:



赵振刚(1981—),男,内蒙古兴安盟人,博士,教授,硕士生导师,分别于2005年、2007年、2012年在哈尔滨工业大学获得学士、硕士、博士学位,目前主要从事光纤传感与解调技术研究、传感器应用技术与嵌入式系统研发等工作。E-mail: zhaozhengang@kust.edu.cn



王思飞(1997—),男,山西临汾人,硕士研究生,2020年于山西工程技术学院获得工学学士学位,主要研究方向为光纤传感、光纤旋转连接器。E-mail: sifeiwang11@163.com