

离轴旋转光纤传输系统的设计与实现

刘 飞¹ 李 毅^{1,2} 郝如龙¹ 孙 瑶¹ 唐佳茵¹ 陈培祖¹ 蒋 蔚¹ 伍征义¹ 徐婷婷¹ 方宝英¹
王晓华^{1,3} 肖 寒¹

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

²上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093

³上海电力学院, 上海 200090

摘要 为了实现光信号的离轴旋转连接,设计了一种新型的离轴旋转光纤传输系统。基于高斯光束传播理论,分析了大口径光纤准直器对高斯光束的扩束准直作用,利用ZEMAX对准直器的结构和输出光束特性进行了优化。对离轴旋转光纤传输系统进行了实验测量,结果表明大口径光纤准直器输出光束在50 mm的工作距离处能量分布满足高斯型,其束腰半径达到18 mm,远场发散角仅为 5.48×10^{-2} mrad,在1.25 Gb/s的信号传输速率及80 r/min的转速下,系统的最大连接损耗为23.28 dB,整体性能满足了旋转部件之间稳定传输高速光信号的要求。

关键词 光通信; 离轴光纤旋转连接器; 光纤准直器; 高斯光束; 计算机辅助光学设计

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0905001

Design and Implementation of an Off-Axis Rotary Optical Fiber Transmission System

Liu Fei¹ Li Yi^{1,2} Hao Rulong¹ Sun Yao¹ Tang Jiayin¹ Chen Peizu¹ Jiang Wei¹
Wu Zhengyi¹ Xu Tingting¹ Fang Baoying¹ Wang Xiaohua^{1,3} Xiao Han¹

¹School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

²Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, Shanghai 200093, China

³Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China

Abstract A new-type off-axis rotary optical fiber transmission system is designed to achieve the connection of the optical signals under the rotary state. The collimating and expanding effect of the fiber collimator with large aperture is analyzed based on the propagation theory of Gaussian beam, and the structure and output beam properties of the fiber collimator is optimized by ZEMAX. The relative optical characteristics of the transmission system are measured. The results show that the fiber collimator outputs Gaussian beam at a working distance of 50 mm. Beam waist radius and far-field divergence degree are 18 mm and 5.48×10^{-2} mrad, respectively. The maximum connection loss of the transmission system is 23.28 dB when the signal transmission rate is 1.25 Gb/s and the rotation speed is 80 r/min. The overall performance of the transmission system satisfies the requirement of stability for high-speed optical signal transmission between the rotary parts.

Key words optical communications; off-axis fiber optic rotary joint; fiber collimator; Gaussian beam; computer-aided optical design

OCIS codes 060.2340; 060.4510; 220.3620; 120.4880

收稿日期: 2015-04-02; 收到修改稿日期: 2015-04-20

基金项目: 国家863计划(2006AA03Z348)、教育部科学技术研究重点项目(10ZZ94)、上海市领军人才培养计划(2011-026)

作者简介: 刘 飞(1991—),男,硕士研究生,主要从事光电子器件方面的研究。E-mail: oeliufei@163.com

导师简介: 李 毅(1964—),男,博士,教授,主要从事光电材料、器件与系统方面的研究。E-mail: optplyclp@263.net

1 引 言

随着光纤通信技术的发展,光纤旋转连接器逐渐取代传统的电滑环,以光的方式实现了信号的旋转传输,尤其是可以应用于在相对旋转部件之间进行通信的场合^[1],如车载周视观瞄^[2]、光学相干断层扫描^[3-4]、地质勘探^[5]、雷达探测等^[6]。

根据光轴是否位于旋转轴上这一特征,光纤旋转连接器有同轴和离轴之分,同轴光纤旋转连接器的光轴位于旋转轴上,其光路结构简单,易于制作;离轴光纤旋转连接器的光轴和旋转轴分离,这种器件可应用在轴上空间已被占用或不便使用的旋转传输场合^[7],如有些雷达在信号传输过程中需要同时在旋转轴上传输高压气体^[8];雷达信号在传输过程中要在旋转轴上放置滚轴、转桶,以及CT扫描仪在进行断层扫描时要在旋转轴上放置人体等。随着相关领域的发展,对离轴光纤旋转连接器和通信系统提出了更高要求。

然而现阶段离轴光纤旋转连接器的发展并不成熟,大多存在连接损耗大、离轴空间有限、传输速率低等问题^[9],例如在轴外空间设置两组环形光纤阵列来耦合光信号,在耦合过程中因光纤直接耦合效率低使连接损耗较大^[10];在圆柱反射镜式的连接器中,光信号在经过多次反射后发散角增大,从而导致耦合难度高、可靠性低^[11];通过轴外空间的棱镜之类的中间光学元件转折光路在实现离轴光信号旋转连接过程中存在旋转速度和离轴空间受限的问题^[12]。

本文提出一种新型的离轴旋转光纤传输系统,在设计优化旋转结构的基础上,使用大口径光纤准直器对光纤出射光束进行扩束准直,既扩大了光束尺寸又压缩了光束发散角,使得在2个旋转部件之间的自由空间中传输的光束成为具有大光斑直径的平行光,这样可以减小装配误差和旋转抖动对光耦合效率造成的不利影响,配合上述的旋转结构,可以实现高速光信号在离轴旋转过程中的低损耗持续传输。

2 系统结构及工作原理

图1为离轴旋转光纤传输系统的结构示意图,它主要由光发射机、光滑环、光分路器、大口径光纤准直器、旋转盘、光接收机及步进电机组成,其中旋转连接部分包括光滑环、光分路器、光纤准直器及旋转盘,并且分为左、右两端,由步进电机控制其转速,光滑环可以避免光纤在旋转过程中的缠绕。

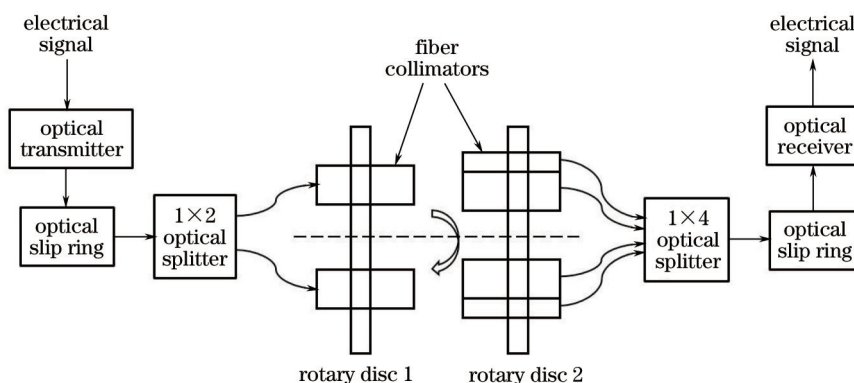


图1 传输系统结构示意图

Fig.1 Framework of transmission system

该系统的基本工作原理为:输入的电信号经光发射机转换为光信号,此光信号被1x2光分路器以功率均分的方式分为2路,通过光纤将光信号传输到旋转盘1上的2个大口径光纤准直器,2束光被光纤准直器扩束准直为具有大光斑直径的平行光,入射到两旋转部件之间的自由空间,旋转盘2上的4个大口径光纤准直器将各自接收到的平行光会聚到光纤中并传输到1x4光分路器,4路光信号以功率叠加的方式被耦合成一光信号,最终光接收机将光信号转换为电信号。

图2为系统工作原理示意图。假定旋转盘1旋转,旋转盘2静止,在旋转过程中,旋转盘1上的2个光纤准直器(c和d)及旋转盘2上的4个光纤准直器(e~h)的光轴始终保持与旋转轴等距、平行,并且准直器c、d的轴心到旋转盘1中心的连线夹角为135°,而准直器e~h在旋转盘2上各自间隔90°均匀分布。图2(a)为旋转连接的初始状态,准直器c和e完全重合,以束斑的重叠面积计算耦合效率,则此时的耦合效率最大。图2(b)

为旋转盘1相对旋转盘2旋转了22.5°之后的状态,此时的耦合效率最小,继续旋转22.5°后回到初始状态,则耦合效率是以45°为周期的旋转角度的函数,旋转过程中始终能够保证光信号的持续传输。

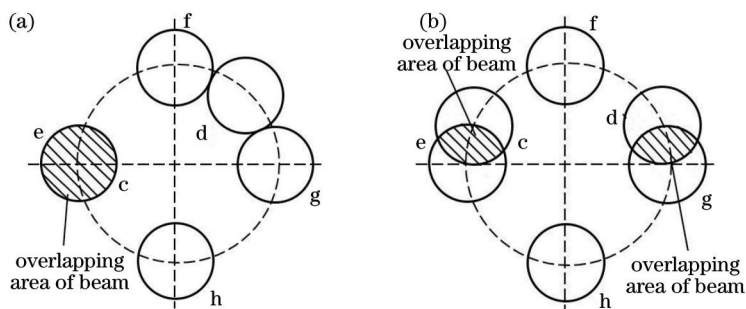


图2 传输系统工作原理示意图。(a) 初始状态; (b) 旋转22.5°后的状态

Fig.2 Schematic diagrams of transmission system. (a) Initial state; (b) state after rotation of 22.5°

3 大口径光纤准直器

图3为大口径光纤准直器的结构示意图,其主要由自聚焦透镜 L_0 、凹透镜 L_1 和双胶合凸透镜 L_2 构成,图中各量的符号规则为:凡物距在物方为正,像距在像方为正,反之为负;球面圆心位于球面顶点右侧时,球面半径为正,反之为负。在1.55 μm的通信波段,普通单模光纤出射高斯光束的束腰半径 ω_0 为5.05 μm,束腰位于光纤端面处。自聚焦透镜 L_0 因具有梯度折射率分布可对高斯光束进行扩束准直^[13],其传输矩阵^[14]为

$$M_0 = \begin{bmatrix} \cos(gl_0) & \frac{\sin(gl_0)}{gn_0} \\ -gn_0 \sin(gl_0) & \cos(gl_0) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 n_0 为自聚焦透镜的轴线处折射率, g 为聚焦常数, l_0 为透镜长度。根据高斯光束的传输变换理论,选取自聚焦透镜材料为SLW-4.0,长度为节距的0.23倍,以实现 L_0 对光纤出射光束的预扩束。

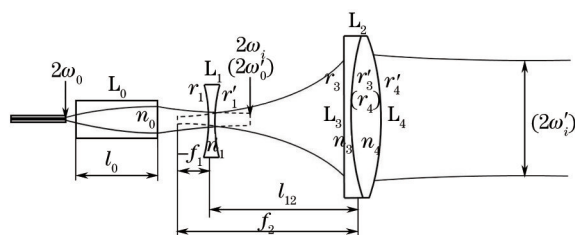


图3 大口径光纤准直器结构示意图

Fig.3 Framework of the fiber collimator with large aperture

凹透镜 L_1 的像方焦点和双胶合凸透镜 L_2 的物方焦点重合,构成倒置的伽利略型望远镜,其传输矩阵为

$$M_{12} = \begin{bmatrix} -\frac{f_2}{f_1} & l_{12} \\ 0 & -\frac{f_1}{f_2} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 f_1 、 f_2 分别是 L_1 、 L_2 的焦距, l_{12} 是 L_1 和 L_2 的间距,且 $l_{12} = f_1 + f_2$ 。利用传输变换求解可得

$$\omega_i = \left| \frac{f_2}{f_1} \right| \omega_0, \quad (3)$$

式中 ω_0 、 ω_i 分别是 L_0 、 L_2 输出光束的束腰半径。由(3)式可知, $f_2 > |f_1|$ 时,调焦望远镜系统具有扩束准直作用,准直率(又称扩束比)为 $\left| \frac{f_2}{f_1} \right|$ 。短焦距的负透镜 L_1 和长焦距的正透镜 L_2 以此方式配合工作能对经自聚焦透镜扩束后的束腰以更大的倍率放大^[15-16],在准直范围内,高斯光束可近似视为平行光。

对于凹透镜 L_1 ,其光焦度为

$$\varphi_1 = (n_1 - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_1'} \right), \quad (4)$$

式中 n_1 为 L_1 的折射率, r_1 、 r_1' 分别是 L_1 的前、后表面的曲率半径, 透镜材料选取燧石玻璃 SF6。

对于双胶合凸透镜 L_2 , 其光焦度为

$$\varphi_2 = (n_3 - 1) \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_3'} \right) + (n_4 - 1) \left(\frac{1}{r_4} - \frac{1}{r_4'} \right), \quad (5)$$

式中 n_3 、 n_4 分别是 L_3 、 L_4 的折射率, L_3 和 L_4 的材料分别是燧石玻璃 SF6 和冕牌玻璃 BK7, r_3 、 r_3' 分别是 L_3 的前、后表面的曲率半径, r_4 、 r_4' 分别是 L_4 的前、后表面的曲率半径, 并且 $r_3' = r_4$ 。

在 L_0 对光束预扩束的基础上, 确定 L_1 和 L_2 所组成的倒置望远镜的扩束比, 并由此计算出 L_1 和 L_2 的光焦度, 然后根据透镜初级像差要求, 计算了图 3 所示的光纤准直器的初始结构参数, 并利用计算机辅助光学设计软件 ZEMAX 对准直器在 1.55 μm 波长及 0.11 的物方数值孔径的条件下进行了优化, 得到最终的准直器结构参数, 如表 1 所示, 表中 OBJ 为物面, STO 为光阑面, IMA 为像面。

表 1 光纤准直器结构参数(单位: mm)

Table 1 Structure parameters of fiber collimator (Unit: mm)

Surface	Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-diameter
OBJ	Standard	Infinity	0.000	—	0.000
1	Standard	Infinity	0.525	—	0.000
STO	Gradient 9	Infinity	9.771	SLW-4.0	0.900
3	Standard	Infinity	4.563	—	0.900
4	Standard	-3.277	0.500	SF6	1.000
5	Standard	-53.212	179.316	—	1.000
6	Standard	-170.833	4.500	SF6	26.000
7	Standard	1847.478	9.000	BK7	26.000
8	Standard	-54.088	50	—	26.000
IMA	Standard	Infinity	—	—	19.584

4 实验和结果分析

首先对所设计的大口径光纤准直器进行理论仿真, 得到输出光束的光斑半径随传播距离的变化曲线, 同时对实际的光纤准直器输出光束在不同传播距离处的光学特性进行了测量, 将理论仿真结果和实验测量数据进行对比, 如图 4 所示。从图中可以看出在 50 mm 的工作距离处, 光斑半径为 18.036 mm, 理论值和实验值较为吻合, 并且随着传播距离的增加, 光斑半径几乎没有变化, 光束接近于平行光。

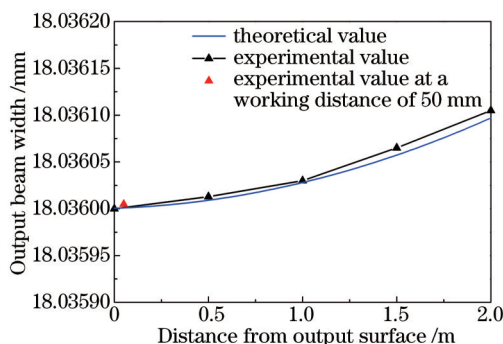


图 4 不同传播距离处的束宽

Fig.4 Beam width under different propagation distances

图 5 给出了在不同传播距离处的输出光束截面上 Y 方向的能量分布, 为便于观察, 图中的纵坐标为相对光功率, 可以看出随着传播距离的增加, 由于衍射效应的存在, 能量分布曲线有所波动, 但都呈现出了高斯型分布, 尤其在 50 mm 的工作距离处, 理论值和实验值吻合得很好。

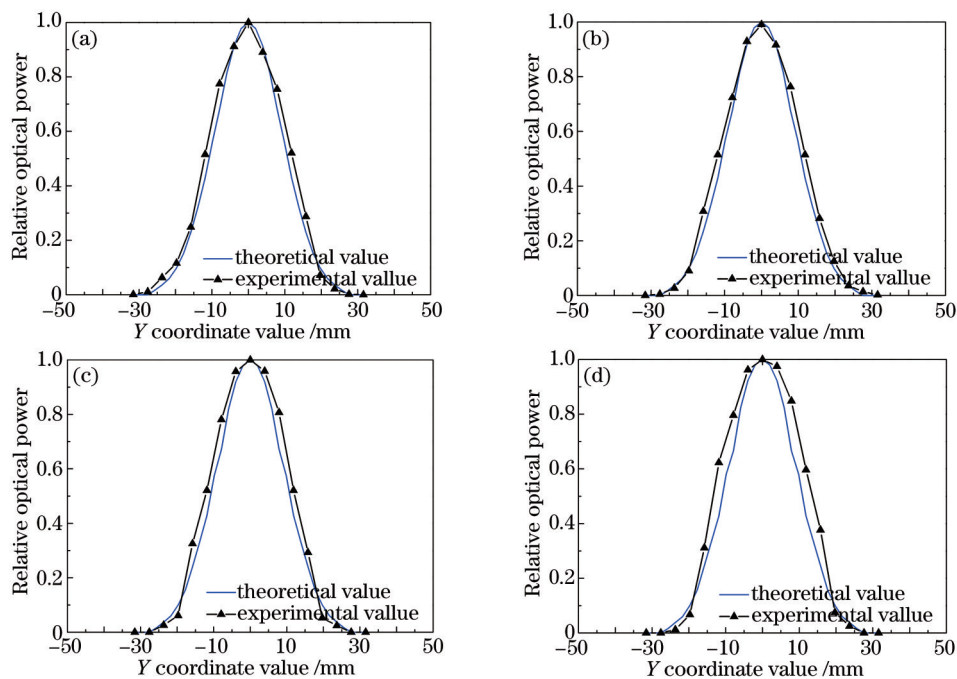


图5 不同传播距离处的光束能量分布。(a) 50 mm; (b) 100 mm; (c) 150 mm; (d) 200 mm

Fig.5 Energy distributions of beam under different propagation distances. (a) 50 mm; (b) 100 mm; (c) 150 mm; (d) 200 mm

由前述对系统工作原理的分析可知,旋转部件之间的光信号连接依赖于两端光纤准直器的光束耦合,而准直器在耦合时存在轴向间距、横向错位和轴线倾角3种耦合误差^[17],如图6所示,这些误差如果不加以精确控制,会造成耦合效率显著降低,且随旋转而波动,尤其在光束尺寸小、发散角大的工作情形下。此外,光束模场失配也会对耦合效率产生不利影响^[18]。然而从图4、图5对束腰半径和能量分布的测量结果可以看出,经大口径光纤准直器扩束准直后,光束依然为高斯光束,束腰半径也达到了18 mm,其对应的远场发散角仅为 5.48×10^{-2} mrad,瑞利长度为656 m。因此光束在较长的传播距离内都能保持大光斑尺寸、高准直度及模场匹配度,耦合效率对于轴向间距和横向错位2种误差的敏感度降低,耦合难度减小,这对于提高系统的光耦合效率有重要意义。

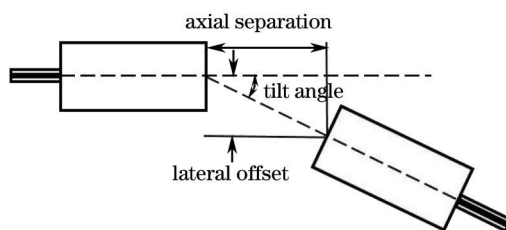


图6 准直器耦合示意图

Fig.6 Coupling between fiber collimators

对如图7所示的离轴旋转光纤传输系统的连接插入损耗进行测量。当系统静止时,测量其在不同对准状态下的连接插入损耗,每隔 22.5° 测量一次,测量结果如图8所示,连接插入损耗出现周期性重复,周期为 45° ,与前述理论分析一致。最大连接插入损耗为20.46 dB,最小连接插入损耗为19.13 dB,这些损耗主要来自光纤准直器本身的耦合损耗,其次是光分路器、光滑环、光纤跳线的插入损耗。测量结果表明系统最大和最小连接插入损耗仅相差1.33 dB,可以保证光信号稳定传输。

在1.25 Gb/s的光信号传输速率下,测量系统在不同旋转速度时的连接损耗,结果如图9所示。从图中可以看出,旋转速度相对较低时,系统连接损耗也相对较低,但随着转速增加,损耗增加幅度逐渐变大,这主要是由于在高速旋转时,旋转部件的抖动会使光纤准直器的耦合误差增大,从而增大耦合损耗,这些损耗的波动可以通过优化准直器和旋转盘的固定件结构及提高各部件的加工装配精度来进一步减小。

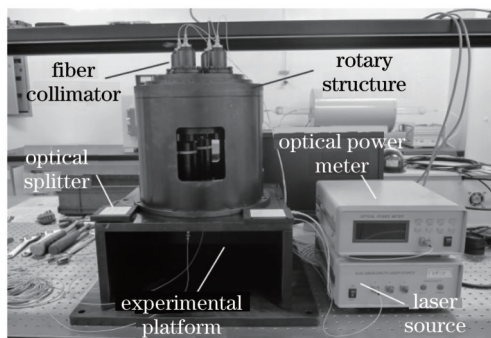


图7 离轴旋转光纤传输系统

Fig.7 Off-axis rotary optical fiber transmission system

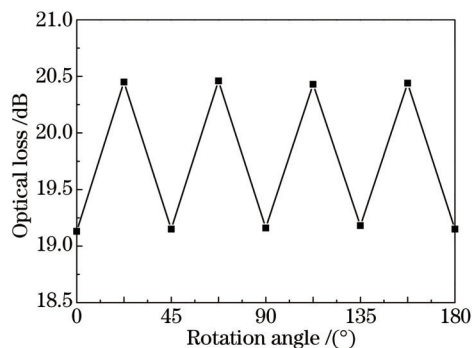


图8 不同对准状态下的连接插入损耗

Fig.8 Insertion losses under different alignment states

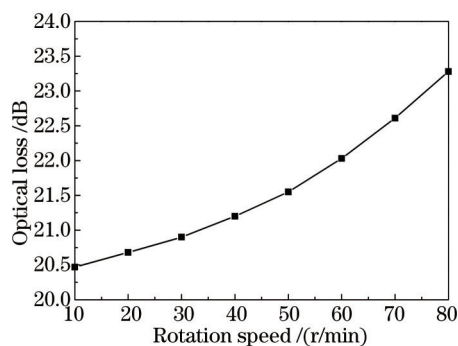


图9 不同转速时的连接损耗

Fig.9 Connection losses under different rotation speeds

上述结果表明,由于采用了大口径光纤准直器,增大了光斑尺寸,提高了光束准直度,使得旋转界面中的光束更加易于耦合,系统能够保证光信号的稳定持续传输。

5 结 论

根据离轴旋转传输光信号的高速率、低损耗及大离轴空间要求,基于光分路器的分束、合束作用设计旋转结构,利用大口径光纤准直器对光束进行整形,并结合光端机、光滑环构建了一种新型的离轴旋转光纤传输系统。对大口径光纤准直器输出光束在不同传播距离处的光斑大小和能量分布进行了理论仿真和实验测量,理论仿真和实验结果基本吻合,输出高斯光束的束腰半径为 18 mm,发散角为 5.48×10^{-2} mrad,光束特性明显优于普通单模光纤准直器。对整个系统的旋转传输性能进行了测量,系统在 1.25 Gb/s 的信号传输速率及 80 r/min 的转速下的最大连接损耗为 23.28 dB,说明系统能够满足光信号的离轴旋转传输要求。

参 考 文 献

- 1 Zhe Ji, Dagong Jia, Qiang Xu, *et al.*. Design and implementation of a plastic fiber optical rotary joint using upside down taper lens [J]. Opt Commun, 2013, 292: 57-61.
- 2 Wencai Jing, Dagong Jia, Feng Tang, *et al.*. Design and implementation of a broadband optical rotary joint using C-lenses[J]. Opt Express, 2004, 12(7): 4088-4093.
- 3 Hamid Pahlevaninezhad, Anthony M D Lee, Tawimas Shaipanich, *et al.*. A high-efficiency fiber-based imaging system for co-registered autofluorescence and optical coherence tomography[J]. Biomedical Optical Express, 2014, 5(9): 2978-2987.
- 4 Jiefeng Xi, Anqi Zhang, Zhenyu Liu, *et al.*. Diffractive catheter for ultrahigh-resolution spectral-domain volumetric OCT imaging [J]. Opt Lett, 2014, 39(7): 2016-2019.
- 5 Dong-Soo Kim, Nam-Ryong Kim, Yun Wook Choo, *et al.*. A newly developed state-of-the-art geotechnical centrifuge in Korea[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2013, 17(1): 77-84.
- 6 In-Kui Cho, Jung-Ik Mun, Yong-Tak Han, *et al.*. Fiber-optic rotary joint and optical link for RF-antenna measurement[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(7): 447-449.
- 7 Wang Yanxiao, Yu Youlong, Gao Canhui, *et al.*. Temperature measurement for rotating parts based on the fiber-optic slip-ring[J].

- Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0808004.
 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.
- 8 Robert Fisher McKay. Off-Axis Rotary Joint: US, 7372230B2[P]. 2008-05-13.
- 9 Ding Jie, Li Yi, Wang Feng, *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.
 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]. 光电子·激光, 2013, 24(11): 2075-2080.
- 10 Norris E Lewis, Michael B Miller. Optical Slip Ring Assembly: US, 4492427[P]. 1985-01-08.
- 11 T Helzel, G Martens. Optical slip ring for off-axis high-bit-rate data transmission[J]. Appl Opt, 1986, 25(5): 775-779.
- 12 Hong Zhang, Boying B Zhang. Off-Axis Fiber Optic Slip Ring: US, 7792400B1[P]. 2010-09-07.
- 13 Zigang Zhou, Li Zhu, Yongjia Yang, *et al.*. The refractive index distribution of even polygonal selfoc lens[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(13): 674-678.
- 14 Wang Chi, Bi Shubo, Ding Wei, *et al.*. Optical characteristic parameters of gradient-index fiber probe[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0905001.
 王 驰, 毕书博, 丁 卫, 等. 梯度折射率光纤探针的光学特征参数[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0905001.
- 15 Xu Baozhong, Liu Tiegeng, Wang Meng, *et al.*. Research on laser marking technology for free-form surface[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2165-2169.
 许宝忠, 刘铁根, 王 萌, 等. 空间自由曲面激光标刻技术研究[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2165-2169.
- 16 Liu Liping, Wang Qi. Design of the local beam branch in CO₂ laser imaging radar optical system[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(7): 605-608.
 刘丽萍, 王 骐. CO₂脉冲外差激光成像光学系统中高斯光束光路的设计[J]. 中国激光, 2003, 30(7): 605-608.
- 17 Zhang Minrui, He Zhengquan, Hu Baowen, *et al.*. Research on loss of fiber optic rotary joint based on virtual prototype[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(12): 1222001.
 张敏睿, 贺正权, 胡宝文, 等. 基于虚拟样机的光纤旋转连接器损耗研究[J]. 光子学报, 2014, 43(12): 1222001.
- 18 Wang Zhiyong, Zhang Jing, Ge Tingwu, *et al.*. Highly coupling efficient mode-field adaptors for high power fiber lasers[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(2): 319-324.
 王智勇, 张 晶, 葛廷武, 等. 高功率高耦合效率光纤模场匹配器[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(2): 319-324.

栏目编辑: 王晓琰