

单通道单模光纤高速旋转连接器的研制

魏莉,李恒春*

(武汉理工大学 机电工程学院,武汉 430070)

摘要:针对光纤旋转连接器(FORJ)普遍存在着结构复杂、损耗过大和转速低等问题,提出了一种高速单通道单模 FORJ 结构,并对其性能进行了相关的实验测试,对 FORJ 中光信号传输时的损耗进行了分析研究。实验结果表明:所设计的单通道单模 FORJ 能够在 8000 r/min 的高转速下传输光信号,损耗量为 19.6 dB,且能承受的最大冲击载荷为 20 m/s²,旋转输入轴的最大径向振幅为 0.63 mm,能够适应较为恶劣的工作环境。

关键词:光纤旋转连接器;光纤准直器;高速;非接触光信号传输

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2021)07-0037-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.07.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Development of single channel single mode fiber high speed rotary joint

WEI Li, LI Hengchun*

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In view of the problems of complex structure, excessive loss and low speed in the fiber optic rotary joint (FORJ), a high-speed single-mode FORJ structure is proposed, and its performance is tested. The loss of optical signal transmission in FORJ is analyzed and studied. The experimental results show that the designed single-channel single-mode FORJ can transmit optical signal at high speed of 8000 r/min, the loss is 19.6 dB, the maximum impact load is 20 m/s², and the maximum radial amplitude of the rotating input shaft is 0.63 mm, which can adapt to the harsh working environment.

Key words: fiber optic rotary joint; optical fiber collimator; high-speed; non contact optical signal transmission

0 引言

基于光纤光栅的传感器已经大规模应用于航空发动机或燃气轮机等旋转设备的状态检测中^[1],但旋转机械与静止的信号采集设备之间的信号传输问题一直是难点所在。光纤旋转连接器(FORJ)的出现,有效地解决了光信号在旋转平台之间的传输问题。

根据 FORJ 的结构形式的不同,分类方法也不同。FORJ 分为有/无源 FORJ、同/离轴 FORJ、单/多模 FORJ 以及单/多通道 FORJ 等^[2-5]。与传统的电动滑环相比,

FORJ 具有通信速率高、抗电磁干扰、保密性好、寿命长、无摩擦和可在易燃易爆的环境中使用等优点^[6]。目前,虽有多种 FORJ 实现方案(如:利用 DOVE 棱镜转像原理实现光信号旋转连接^[7]、采用光纤直接耦合^[8]和利用透镜结构的对称性^[9]等原理设计的 FORJ),但普遍存在着结构复杂、损耗过大和转速低等问题。

旋转设备转速的提高及恶劣的工作环境对 FORJ 的设计要求也越来越严苛,为使 FORJ 能够在高转速下工作,且能够抵抗较大的冲击载荷和振动载荷,本文设计一种新型的 FORJ,以满足高速旋转机械低损耗传输光信号的要求。

1 光纤准直器光传输损耗理论分析

传输光信号损耗的大小是衡量 FORJ 性能的重要指标,在 FORJ 中,光信号的主要传输的方式为光纤直接耦合和光纤准直器耦合。光纤直接耦合时,由于单

收稿日期:2020-08-22。

基金项目:国家重大科技专项(2019YF0117a)资助。

作者简介:魏莉(1977—),女,武汉理工大学副教授,主要研究方向为机械装备状态监测技术与应用和光纤光栅传感技术,参与了国家自然科学基金项目、国家 863 项目等多个光纤光栅领域的科研项目的工作。

*通信作者:李恒春(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为机械工况监测与故障诊断。



魏莉,李恒春:单通道单模光纤高速旋转连接器的研制

模光纤输出端发出光场可以近似认为是高斯光束,其束腰半径小而发散角较大,使得两光纤直接耦合的损耗对光纤间的偏差敏感性较大,对机械精度要求太高;而光纤准直器具有将发散的高斯光束变成准直光的功能,增大了两光纤间的容差范围,是光纤旋转连接系统中重要的核心部件。因此,本文选择光纤准直器耦合的方式作为 FORJ 内光信号的传输方式。

光纤准直器在光纤信号旋转传输系统中,充当连接光路中旋转端和静止端光信号的耦合作用。常见的光纤准直器有 G-lens 准直器、C-Lens 准直器和非球面透镜准直器。以 G-lens 准直器为例,当离轴偏差 X 、角度偏差 Φ 和轴向偏差 Z 这 3 种偏差单独存在时,与光损耗值的对应关系如下:

$$L_x = 4.343 \left[\frac{\pi n_0 \sqrt{A} \omega_0}{\lambda} \right]^2 X^2 \quad (1)$$

$$L_\phi = 4.343 \left[\frac{\tan \Phi}{n_0 \sqrt{A} \omega_0} \right]^2 \quad (2)$$

$$L_z = 4.343 \ln \left[1 + \left(\frac{\lambda Z}{2\pi \omega_1^2} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$\omega_1 = \frac{\lambda}{\pi n_0 \omega_0 \sqrt{A}} \quad (4)$$

其中, λ 为高斯光束的中心波长, ω_1 为从透镜端面出射时光斑半径, n_0 为自聚焦透镜的中心折射率, $\sqrt{A}$ 为透镜聚焦常数, ω_0 为高斯光束的模场半径。

由式(1)~式(4)可知,离轴偏差产生的损耗 L_x 和离轴偏差 X 的平方成正比关系;角度偏差产生的损耗 L_ϕ 和角度偏差的正切值 $\tan \Phi$ 成正比关系;轴向偏差产生的损耗 L_z 和轴向偏差 Z 的平方成正比关系。

本文取公式参数的经典值: $n_0=1.468$, $\lambda=1.55 \mu\text{m}$, $\sqrt{A}=0.326 \text{ mm}^{-1}$, $\omega_0=5.05 \mu\text{m}$, 将这些数据分别代入对应的式(1)、式(2)和式(3)中,计算各损耗与对应偏

差之间的关系值;同时,搭建准直器耦合实验平台,实验原理图如图 1 所示,通过调整五维调节架改变输入准直器与输出准直器间的离轴、角度与轴向偏差,得到损耗与偏差的对应关系。理论与实验所得偏差与损耗值的对应关系如图 2 所示。

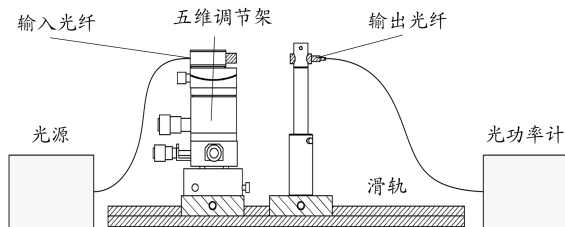


图 1 光纤准直器耦合调整方案

由实验结果与理论分析的对比可知,在偏差量较小时,理论值小于实验值,这是因为在实验条件下,无法保证只有单一偏差存在。此外,光纤准直器透镜较脏、光纤与透镜间距离不理想等因素均会使得光纤准直器耦合时损耗偏大。在偏差量较大时,理论值大于实验值,这表明光束没有到达理想的状态,这可能是由于镜头长度的微小误差或其它尺寸误差造成的,偏差越大,高斯光束的变形越严重。由于角度偏差的存在,通过输出准直器的光线不再是子午光线,一些光线会以螺旋的路径通过透镜,产生畸变。

由图 2 可知,若光纤准直器在耦合时满足小于 2 dB 损耗的要求,则需要保证在安装时两准直器的离轴偏差量小于 0.4 mm,角度偏差量小于 0.2° ,轴向偏差量可控制在 100 mm 以内。但出于对小型化的考虑,轴向距离可取尽可能小。

2 单通道单模 FORJ 结构设计

为使 FORJ 以较小的光损失进行工作,根据损耗分析的结果要求,本文提出的单通道单模 FORJ 结构

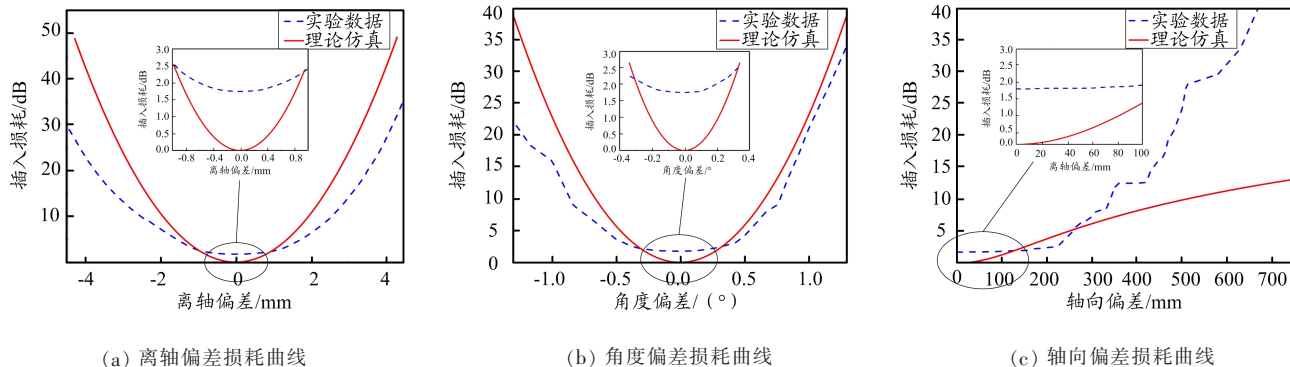
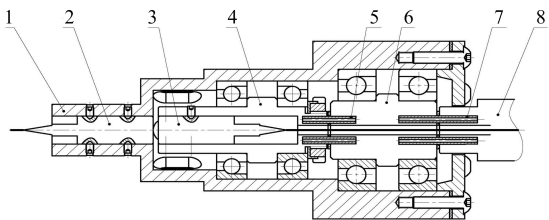


图 2 各插入损耗与对应偏差之间的理论与实验对比

如图3所示,包括固定体和旋转体。固定体又包括连接器外壳和固定端光纤准直器,旋转体包括依次设置的光纤准直器轴套、连接轴以及输入轴。光纤准直器轴套内径与旋转端光纤准直器配合,外径与轴承配合,达到旋转端准直器与固定端准直器耦合的目的。



1:连接器外壳 2:固定端光纤准直器 3:旋转端光纤准直器
4:准直器轴套 5:一级弹簧销 6:连接轴 7:二级弹簧销 8:输入轴

图3 FORJ 内部结构图

本结构所选用准直器为G-lens准直器,相对于C-lens与非球面透镜准直器,G-lens准直器更适合近距离耦合使用,FORJ也更容易做到小型化与轻量化。

为适应高速、高精度的旋转场合,对FORJ轴承提出了更高的要求。同尺寸下,角接触球轴承的极限转速大于深沟球轴承的极限转速,且在外界振动量较大时,角接触球轴承比深沟球轴承能承受更多的轴向载荷。因此,本文选择接触角为 15° 、极限转速为20000 r/min的角接触球轴承,能够适应高速的运转环境。

连接轴将光纤准直器轴套与输入轴连接起来,轴端连接处加有减振垫片,相邻两轴通过均布的弹簧销来传递转矩,以减少外界的振动对准直器的影响。连接轴结构简单、安装方便。

3 性能测试

FORJ最重要的性能评价指标是光信号在耦合时的插入损耗、插入损耗的旋转变化量以及在高转速条件下光信号能否持续稳定传输。为了研究FORJ在旋转一周时的损耗变化情况,静止状态下,在旋转输入轴旋转一周上均匀选取12个点,测得旋转输入轴在该位置时FORJ的损耗情况^[10],重复3次,取其平均值,得到FORJ在旋转一周范围内的损耗情况如图4所示。该旋转连接器的插入损耗小于2 dB,插入损耗的旋转变化量小于1 dB,与国内外厂家现有产品的参数水平相当,能够完全满足使用要求。

为了验证所设计的FORJ在工作状态下对光信号的传输性能,本文进行实验的实物图如图5所示。光源发出的光依次通过光环形器、FORJ和光纤布喇格

光栅(FBG);FBG跟随FORJ的旋转端一同旋转,并将传过来的光进行反射;反射后的光通过光环形器后由光功率计显示光功率值,以此计算光信号通过FORJ后的损耗情况。实验所用光源与FBG的波长均为1563 nm,光源输出功率为4.8 mW,调节电机转速,验证不同转速情况下FORJ的插入损耗情况。

将旋转连接器的转速从0~10000 r/min递增,每次增量为1000 r/min,重复3次,取其平均值,得到该FORJ的转速与损耗关系,如图6所示。由实验结果可知,该高速FORJ在8000 r/min下信号传输质量较好,即光路的最大插入损耗小于20 dB时旋转状态下光信号能持续传输,无信号中断的现象发生。

为了探究该旋转连接器输入轴所能承受的冲击量,实验过程中将LMS公司加速度传感器(比利时LMS公司生产的振动噪声测试系统探头,最大采样频率为204.8 kHz,可测电压信号范围为300 mV~10 V)粘贴于电机外壳上,对FORJ输入轴端的加速度信息进行采集,得到转速与加速度对应曲线如图7所示。其中,z方向为垂直径向振动,y方向为轴向方向,x方向为水平径向方向。可以看出,随转速升高,旋转轴所承受的各个方向的加速度随之变大,冲击载荷最大可达 20 m/s^2 ,证明在冲击载荷较大的环境中,该FORJ依旧可正常工作。

把FORJ整体安装在可以发生振动的器件上是现

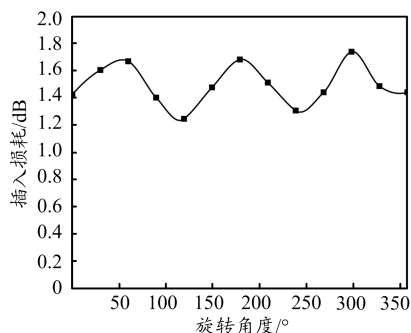


图4 FORJ在旋转一周范围内的损耗情况

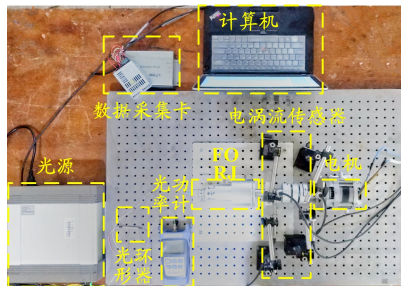


图5 实验实物图

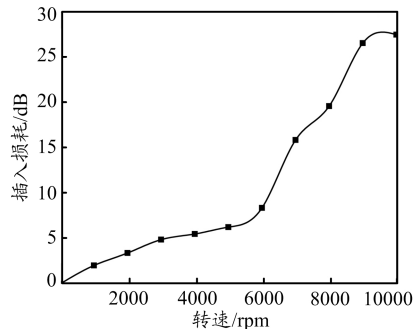


图6 FORJ转速与损耗关系

魏莉,李恒春:单通道单模光纤高速旋转连接器的研制

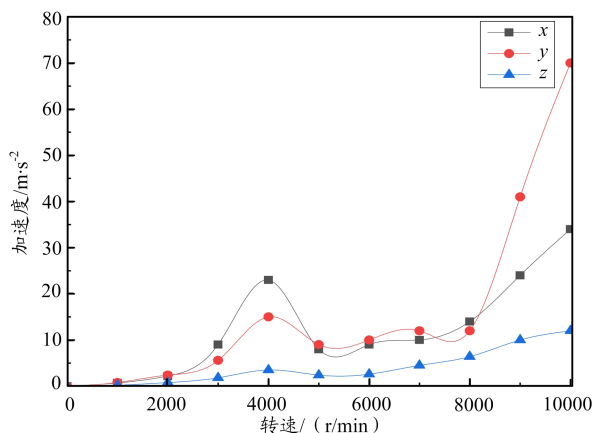
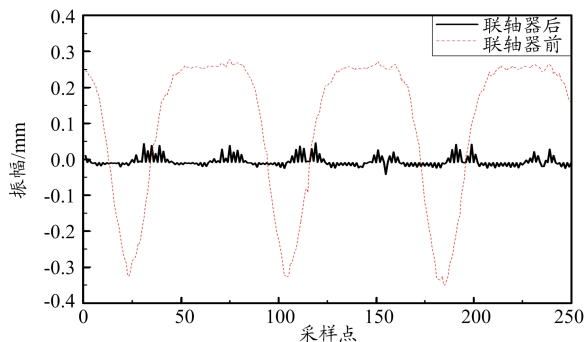
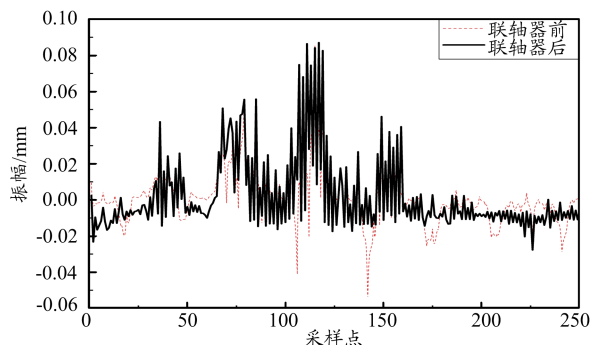


图7 旋转连接器转速与加速度对应关系

有对 FORJ 耐振动参数测试的标准操作方式,但无法反映出 FORJ 所能承受的旋转输入轴的跳动情况。为了探究该旋转连接器输入轴所能承受的径向偏差量,本文使用电涡流传感器(YXS-DW-8001,量程为 0~2 mm,采样率为 4000,精度为 0.01 mm)对旋转输入轴联轴器两侧的径向振幅进行测量(具体安装方式见图5),电涡流传感器测得径向振幅如图8所示。可以看出,未经联轴器抵消偏差之前,最大径向振幅量为 3000 r/min 时的 0.63 mm,最小径向振幅量为 7000 r/min



(a) 3000 r/min



(b) 7000 r/min

图8 电涡流传感器测得径向振幅

时的 0.15 mm,经过联轴器抵消偏差之后,输入旋转连接器的径向振幅在 3000 r/min 时变为 0.03 mm、7000 r/min 时变为 0.1 mm,由此证明该 FORJ 可在旋转输入轴有较大径向振幅的情况下工作。

4 结束语

本文提出了一种单通道单模的 FORJ 结构,通过对光纤准直器的耦合损耗分析,确定了在 FORJ 结构设计时的偏差控制范围,并采用柔性连接结构,使 FORJ 能够承受较大的冲击及振动载荷。实验结果表明:所设计的 FORJ 能够在 8000 r/min 的高转速下工作,插入损耗为 19.6 dB,所能承受的最大冲击载荷为 20 m/s²,旋转输入轴的最大径向振幅为 0.63 mm,能够适应较为恶劣的环境。

由于实验台的限制,无法解决多余光纤在旋转轴上的固定问题,旋转端光纤光栅无法粘贴成与旋转轴线平行的状态;在旋转时,光纤连接处会呈现较大的弯曲,使得损耗量急剧增大;同时,转速升高,回转轴线不平衡度增大,粘贴好的光纤光栅脱落、固定准直器的螺钉松动等问题,均会导致测得的损耗急剧增大,影响实验效果。

参考文献:

- [1] 陈琳. 基于光纤光栅的旋转叶片变形监测方法与系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [2] 张尹馨, 黄战华, 贾大功, 等. 低耦合损耗的光电混合光纤旋转连接器[J]. 光电子激光, 2008, 19(9): 1173-1176.
- [3] 贾大功, 张以谟, 井文才. 无源光纤旋转连接器的发展[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(z1): 199-202.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 贺正权, 李育林, 胡宝文, 等. 光纤旋转连接器的最新发展及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 67-71.
- [7] 祝勇. 应用道威棱镜的光纤旋转连接器的理论与实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [8] 张伯英, 张宏. 单通道光纤旋转连接器: 中国, CN201464674U [P]. 2010-05-12.
- [9] 邓玉秀, 周革, 刘卫, 等. 对称光学结构的双光信道旋转连接装置[J]. 光电子·激光, 2001, 12(8): 792-794.
- [10] JIA D, JING W, ZHANG Y, et al. Low-loss fiber optic rotary joint using C-lens collimators[J]. Optoelectronics Letters, 2005, 1(3): 221-223.