

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2109028

基于光纤法布里珀罗干涉的扭矩测量方法研究^{*}

余鑫宇^{1,2}, 范 典¹, 周次明¹, 陈 希^{1,2}, 汪立雄¹

(1. 武汉理工大学光纤传感技术与网络国家工程研究中心 武汉 430070; 2. 武汉理工大学信息工程学院 武汉 430070)

摘 要:在动态条件下,获取准确的传动轴扭矩测量数据是评估传动轴健康状况和运行状态的重要手段之一。传动轴扭矩测量经常伴随着震动、高温高湿以及强电磁等恶劣环境,考虑到电类传感器有漏电、电火花以及难以在强电磁干扰环境下工作等问题,本文提出了一种基于非本征光纤法布里珀罗干涉技术的扭矩测量方法。阐述了光纤传感器的工作原理,给出了传感器的安装方式,搭建了扭矩测量平台并对传感器的性能进行了实验验证。实验结果表明,传感器灵敏度为 $(0.224 \pm 0.06) \mu\text{m}/\text{Nm}$,与理论具有很好的一致性。本文提出的测量方法在传动轴扭矩测量中具有测量动态范围大、测量精度高和实时快速的优势。

关键词: 光纤法布里珀罗腔;传动轴;动态扭矩测量;扭矩传感器

中图分类号: TH701 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Research on the torque measurement method based on optical fiber Fabry-Perot interference

Yu Xinyu^{1,2}, Fan Dian¹, Zhou Ciming¹, Chen Xi^{1,2}, Wang Lixiong¹

(1. National Engineering Research Center for Optical Fiber Sensing Technology and Network, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Under dynamic conditions, how to achieve accurate transmission shaft torque measurement data is an important way to evaluate the health status and running state of the transmission shaft. The drive shaft torque measurement is often implemented in harsh environment, such as vibration, high temperature and humidity, and strong electromagnetic. The electrical sensors have problems, such as leakage, electric sparks and difficulty in working in the strong electromagnetic interference environment. To address these issues, this article proposes a torque measurement method based on the extrinsic optical fiber Fabry-Perot interferometry. The working principle of the optical fiber sensor is described, and the installation mode of the sensor is given. The torque test platform of the sensor is established and the performance of the sensor is evaluated. Experimental results show that the sensor sensitivity is $(0.224 \pm 0.06) \mu\text{m}/\text{Nm}$, which is in good agreement with the theory. The proposed measurement method has advantages of large dynamic range, high measurement accuracy and real-time speed in the torque measurement of drive shafts.

Keywords: fiber Fabry-Perot cavity; transmission shaft; dynamic torque measurement; torque sensor

0 引 言

现代汽车、船舶等大型机械设备大多采用传动轴系来提供动力,其中轴系的扭矩是评价传动轴系健康状况和运行状态的重要参数之一^[1-2]。而设备运行过程中,由于传动轴系动力大、能量传递密集等特性而导致的振动,可能出现运行不稳导致传动轴系出现故障甚至灾难性的事故发生^[3]。因此,传动轴扭矩和转速的实时获取对于

机械设备的稳定性、安全性和可靠性具有重要的意义。

目前国内外研究的扭矩测量技术形式具有多样性,其中应用较广泛的是光电式和磁电式等扭矩传感器^[4-6]。文献[7]提出了一种新型的非接触式瞬时扭矩传感器,通过对两个绕弹性轴旋转的偏心套之间的相位差进行分析,实现了在宽角速度下的高精度扭矩测量;文献[8]提出了一种表面横向波的无源无线扭矩传感器,通过对表面横向波的灵敏度机理进行分析,并对不同切削方式下的转矩灵敏度和温度系数进行数值计算,实现高精度的

收稿日期:2021-12-15 Received Date: 2021-12-15

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52071245, 61975157, 61775173)、应用基础前沿专项(2020010601012179)资助

扭矩测量;文献[9]提出了一种基于磁机械效应的非接触式扭矩测量新方法,通过检测励磁线圈的磁感应强度变化,实现了对扭矩的测量;文献[10]提出了一种新型抗气隙干扰磁弹性扭矩传感器,通过恒定磁通控制和乘积电流补偿相结合,实现了一种测量精度较高的扭矩测量方法。上述研究方法采用的都是机电类传感器,在强电磁干扰等场所中应用存在困难。

光纤传感器是近年来发展起来的新型光学传感器,与传统光电式、磁电式扭矩传感器相比,光纤类传感器不仅克服了电学传感器的易受电磁干扰等缺点,且具有体积小、抗腐蚀、易复用成网络等优点^[11-14]。文献[15]提出了一种基于光纤光栅的螺纹管压弯扭测量方法,将光纤缠绕在螺纹管上,通过测量光纤光栅中心波长漂移量,实现对弯矩的测量;文献[16]提出了一种由双光纤布拉格光栅构成的光纤传感器,将传感器与轴向呈 $\pm 45^\circ$ 角粘接,利用两个光栅分别测量传动轴扭转,实现高灵敏度和精度测量。文献[17]提出了一种基于单光纤光栅的扭矩传感器,采用一种扭梁设计的结构,根据光纤光栅波长的变化与扭矩大小呈线性关系的原理,从而实现了扭转(扭转角或扭矩)与温度的双参量同时测量。但是这类光纤光栅扭矩传感器仅适合小量程的传动轴扭矩测量。

基于上述现状,提出了一种基于非本征法布里-珀罗干涉(Fabry-Perot, F-P)技术的扭矩测量方法,该方法采用卡环和悬臂梁式结构,无需断开轴系,适合大扭矩、大振动、小间距的扭矩测量。本文介绍了光纤F-P扭矩传感器的工作原理,在扭矩测量平台上进行测试,将试验结果与参考扭矩传感器进行对比,实验证明本文测量方法具有较高的灵敏度以及良好的精度。

1 扭矩测量原理

基于非本征光纤法布里珀罗扭矩测量方法是以扭转梁应变原理和光纤F-P传感为基础。如图1(a)所示,为扭转梁受扭矩作用发生扭转变形图。施加扭矩 T 时,截面a,b之间的距离并没有发生变化,只是相对转动了一个角度 φ 。已知扭转梁的长度为 L ,直径为 D ,故圆截面a,b之间的扭转角 φ 与扭矩 T 之间的关系为:

$$\varphi = \frac{TL}{GI_p} \quad (1)$$

其中, $I_p = \frac{\pi D^4}{32}$ 是截面的极惯性矩, G 是刚度常数, GI_p 。从式(1)可知,扭转角 φ 与扭矩 T 成正比。

如图1(b)所示,当扭转梁受扭转 T 作用时,取距圆心 O 为 R 的一点 q ,沿圆心转动角度 φ ,两截面之间的径向位移可以用 Δl 表示。扭转梁的刚度较大,长度 L 较小,因此a,b两截面的相对扭转角 φ 非常小,则其对应的 q 点

的位移 Δl 可以表示为:

$$\Delta l = 2R \sin \frac{\varphi}{2} \approx R\varphi \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)变形可得:

$$\Delta l = \frac{RL}{GI_p} T \quad (3)$$

由式(3)可知,两截面之间的径向位移 Δl 与扭矩 T 成正比,因此可以通过测量两截面之间的径向位移 Δl 来测量扭矩。

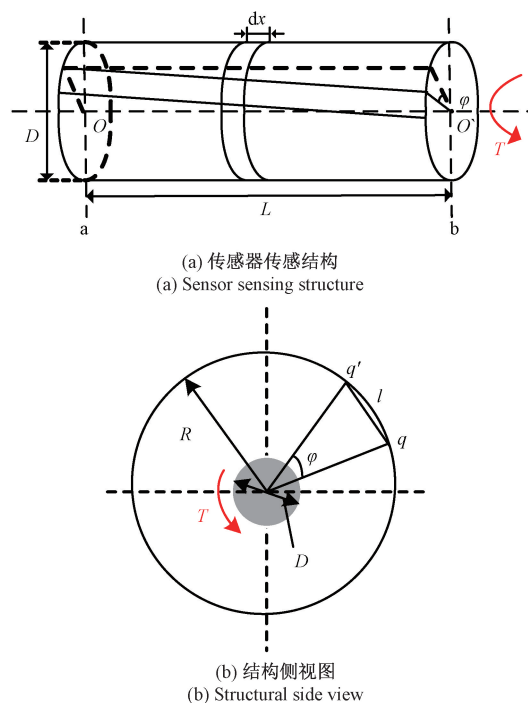


图1 扭转梁应变原理

Fig. 1 Torsion beam strain principle

光纤F-P传感器是利用F-P腔腔长变化来感应外界物理量,具有灵敏度高、响应速度快、抗电磁干扰等特点,是一种干涉型光纤传感器,广泛应用于对位移、加速度、压力、振动等领域。光纤F-P腔主要由两个相互平行的反射面构成,当入射光通过单模光纤进入F-P腔后,在两反射面处进行多次反射以及透射,而部分反射光在F-P腔之间发生多光束干涉^[18],通过对反射光干涉信号的解调,可以得到F-P腔长度变化。

结合上述分析,本文提出了如图2所示的非本征光纤F-P扭矩测量方法。其中图2(a)所示为传感器的结构,通过测量光纤F-P腔腔长变化量间接来测量两截面之间的径向位移 Δl ,进而得到扭矩。其中固定环和测量臂作用是将截面的径向位移传递到同一个圆截面上。将固定环分别安装在弹性轴上,截面a,b之间构成扭转梁,光纤传感头A和反射面B平行形成F-P腔,其初始腔长为 l_0 。

如图 2(b) 所示传感结构侧视图,当弹性轴受到扭矩作用时,弹性轴横截面 a,b 发生微小的扭转位移,其线性变化范围很小。此时光纤传感头 A 和反射面 B 的相对位置与平行度发生变化,但 A,B 与弹性轴圆心之间的距离为几十到几千毫米,远远大于腔长的变化,A,B 两个反射面的平行度变化很小,因此对其干涉信号的光谱的影响较小^[19],可以直接将 A,B 之间的距离看作 F-P 腔的腔长 l 。

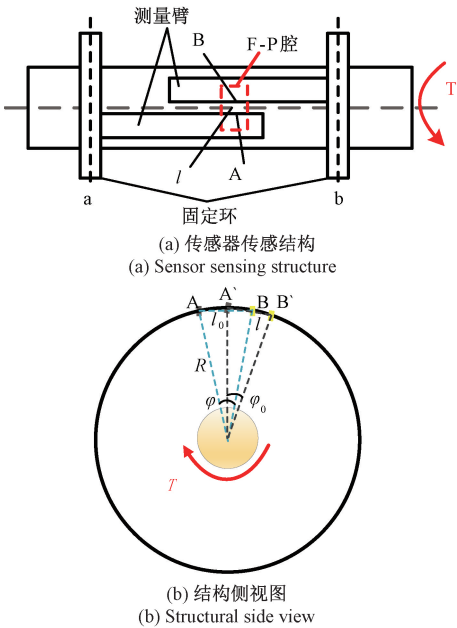


图 2 光纤非本征 F-P 扭矩测量原理

Fig. 2 Principle of optical fiber extrinsic F-P torque measurement

根据式 (3) 可知,在理想的情况下,在弹性轴上施加恒定扭矩时,两个传感器臂的相对位置保持不变 F-P 腔腔长保持不变。当弹性轴受到扭矩的影响时,弹性轴两截面发生扭转位移 Δl ,此时光纤传感头 A 和反射面 B 之间的距离为 l ,通过光谱仪分析,可以得到对应的腔长变化量 Δl ,且 $\Delta l = l - l_0$ 。因此通过测量 F-P 腔长变化量来测量扭矩。

2 扭矩测量系统

搭建的光纤 F-P 扭矩测量系统如图 3 所示。该系统由以下几个模块组成:可保持恒定转速的伺服电机、参考扭矩传感器、1:2 减速转向器、作为扭矩负载的主动电磁制动器、贯穿整个系统的弹性轴、光纤滑环、传感模块和电源单元。伺服电机的扭矩输出轴经由数字式转矩测量仪,以及 1:2 减速转向器为传动轴提供转速和扭矩,传动轴的另一端为电磁制动器,每个器件之间用联轴器连接。

光纤 F-P 扭矩传感器安装传动轴中间,通过光纤滑环与耦合器相连。

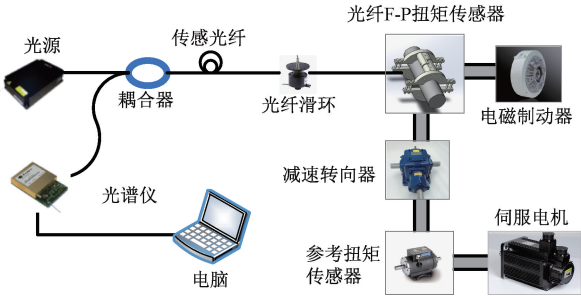


图 3 扭矩测量系统模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the torque measurement system model

其中传感模块由 (amplified spontaneous emission, ASE) 宽带光源 (波长范围为 1 527~1 565 Nm)、光谱仪、耦合器、光纤 F-P 扭矩传感器、计算机组成。系统中的几个模块之间由联轴器连接。通过 LabVIEW 的实时应用程序可以得到系统的动态响应。因实验条件限制,选用的伺服电机 (型号:百格拉 180SG-M48015) 为弹性轴提供转矩,额定转速为 1 500 rpm,额定转矩为 48 Nm,最大转矩为 96 Nm;参考扭矩读数是参考数字式转矩测量仪 (型号:JN388) 测量的扭矩,测量周期为 20~2 000 ms,将联轴器与伺服电机相连,转矩测量范围为 10~100 Nm,转矩准确率大于 0.5%;伺服电机输出扭矩经过 1:2 减速转向器后,传递扭矩为输出扭矩的两倍,速度将为一半;解调模块中,系统通过将光源发出的光经过光纤 F-P 传感器后发生干涉后的干涉光,经过耦合器耦合后进入光谱仪,然后输入到计算机通过 LabView 实时应用程序进行解调及显示。

如图 4 所示为 SolidWorks 软件建立的扭矩传感器结构示意图。图中将传感光纤探头贯穿其中一个测量臂,另一测量臂上固定反射面,光纤探头端面与反射面形成光纤 F-P 腔,传感光纤与光纤滑环连接。整个结构为刚性连接,测量臂与弹性轴之间有一定的间隙,使得测量臂在旋转过程中不会与弹性轴发生碰撞。

如图 5 所示为固定后的光纤 F-P 传感器,在安装传感器时,需要利用分隔棒来固定传感器的长度,安装完成后可拆除。弹性轴的材料是常用的 45 号钢,弹性模量 G 为 80 GPa,直径 D 为 30 mm,将传感器设计为长度 L 为 60 mm、高度 R 为 24 mm 的结构固定在弹性轴上。根据式 (3) 可以得到 F-P 腔长变化量和扭矩理论关系的为 $\Delta l = 0.226T$ 。

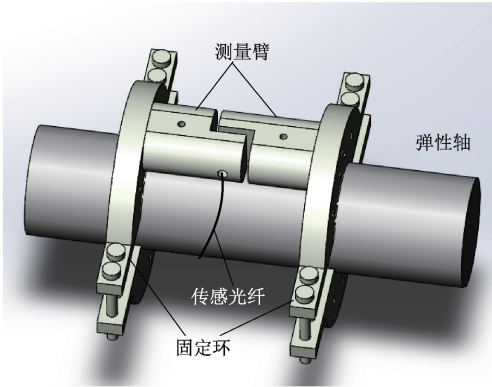


图 4 扭矩传感器结构示意图
Fig. 4 Structural diagram of the torque sensor

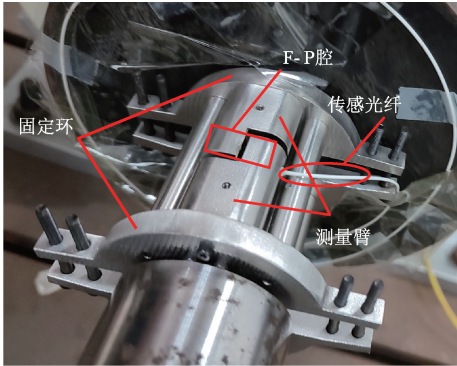


图 5 传感器安装示意图
Fig. 5 Sensor installation diagram

3 测试结果与分析

在室温为 24℃ 的环境下,对扭矩测量平台进行了测试和研究。参考扭矩由参考数字式转矩转速测量仪提供的。受设备性能限制,测量仪显示的扭矩值在一个小范围内持续波动,每次记录其平均值。测量时,伺服电机保持恒定转速,通过调节负载的大小使得伺服电机扭矩输出范围在 1~50 Nm 内先增大后减小,光谱仪的采样频率为 2 000 Hz。在施加扭矩时,弹性轴会带动传感器产生径向位移,使得传感器两测量臂的相对位置发生变化,光纤探头感应腔长变化。实验采用小波变换相位补偿算法^[20],通过采集参考扭矩测量仪获得的扭矩值与光纤 F-P 传感器测得的腔长变化进行对比分析。如图 6 所示为 F-P 腔长变化量与扭矩的时域信号,其左右坐标轴之间的关系是根据式(3)得到的,其关系为 $\Delta l = 0.226T$ 。

为了验证光纤 F-P 扭矩传感器的准确性,根据传感器的参数,通过式(3)得到 F-P 腔长变化量与扭矩的关系为 $\Delta l = 0.226T$ 。伺服电机输出转速保持为 30 rpm,通

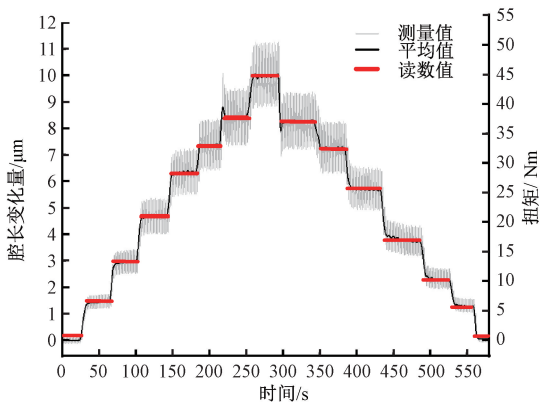


图 6 腔长变化量与扭矩的时域信号
Fig. 6 Time domain signal of cavity length variation and torque

过调节电磁制动器给传动轴施加负载,输出的每个扭矩保持一定时间,得到为 F-P 传感器测得的腔长变化量和参考扭矩值随时间变化的结果如图 6 所示。由于测得的数据量较大,为了更好的区分,其中灰色细线曲线为传感器测得的腔长变化量,黑色曲线为灰色细线曲线进行了 2 000 个数据点平均后插值拟合得到平均值曲线,粗线曲线为实验过程中,读取数字式转矩转速测量仪数值得到的参考扭矩。从图中可以明显看出,随着时间和施加扭矩的变化,传感器测量腔长变化量整体呈现阶梯性变化,表明传感器有良好的稳定性。从图 6 中可以看出,输出扭矩改变时,测量值曲线有明显的倾斜,这是由于每次改变扭矩的过程需要 1~2 s 的调整时间,这与实际现象相吻合。F-P 传感器测得的扭矩值是在围绕某一平均值上下变动,其中间值与实验中的参考扭矩的变化基本一致,因此可以根据平均后插值拟合的方式来显示扭矩变化趋势性。在扭矩值较大时,传感器测得的扭矩值和参考扭矩值曲线基本重合,且扭矩值较为稳定;在扭矩值较小时,测量值与参考值有明显的差别,是因为数字式转矩转速测量仪位于 1:2 减速转向器之前,而传感器位于转向器之后,由于转向器对扭矩的传递效率有所损耗导致。随着扭矩的增大,传感器测得腔长变化量的波动性越大,这是由于伺服电机没有在与额定转矩下工作,实际转速为 10~50 rpm,远远小与额定转速 1 500 rpm,因此在调节负载使得电机的输出扭矩增大的实验过程中,实验平台会发生抖动,从图中可以看出随着扭矩的增大,扭矩变化的幅度也随之增大且呈现周期性变化,根据扭转振动的定义,轴系产生的周期性扭转变形的现象叫扭转振动^[21-22],本文的 F-P 扭矩传感器可以准确地测量出传动轴的扭转振动。

如图 7(a) 所示为在转速为 30 rpm 时扭矩恒定在 44.5 Nm 的信号局部放大图,图 7(b) 为在转速为

40 rpm 时扭矩恒定在 29 Nm 的信号局部放大图。灰色细曲线为传感器测得的腔长变化量,黑色细虚线为平均值曲线,粗曲线为参考扭矩传感器的读数,粗虚线为扭矩参考值的波动范围,其波动范围大约为 ± 2 Nm。从图中可知:当伺服电机输出的转速和扭矩一定时,传感器测得的腔长变化量表现为较为稳定的周期性变化且相对应的扭矩平均值在扭矩参考值的波动范围内;其中图 7(a)所示的周期为 2 s,图 7(b)所示的周期为 1.5 s,与伺服电机提供的转速周期保持一致,表明传感器能测得传动轴上的扭矩与实时的速度。从测量结果上看,在图 7(a)、(b)中在每 1 个周期内均存在畸变,传感器测得的扭矩值小于读数,其中在低转速、高扭矩情况下尤为明显,与 1:2 减速转向器的啮合误差一致^[23],光纤 F-P 扭矩传感器相对灵敏度高,能真实地反映了传动轴系的健康状况,凸显其在结构健康监测的明显优势。

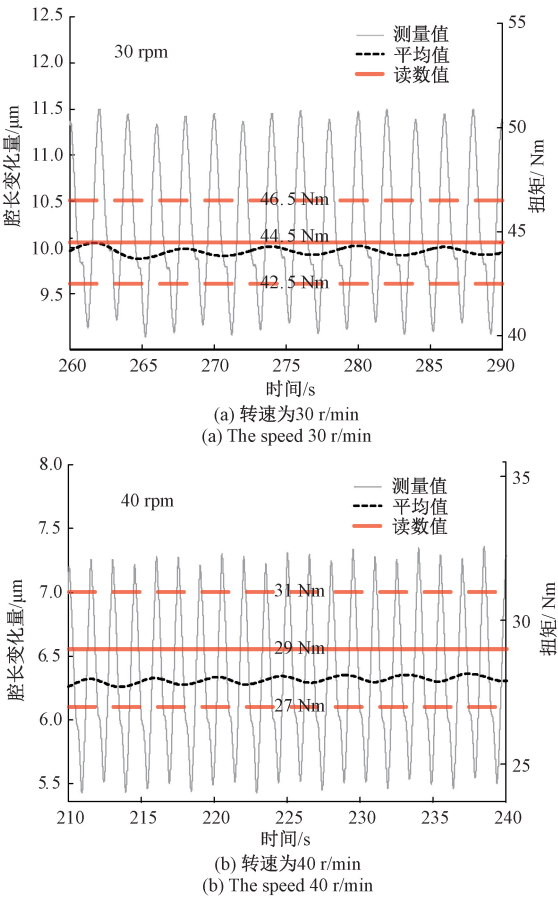


图 7 腔长变化量与扭矩的局部放大图

Fig. 7 Local enlarged view of cavity length variation and torque

转速保持为 30rpm 时,选取每个扭矩 20 s 的数据的平均值,将扭矩加载和卸载过程分别作线性拟合,得到的腔长变化量与扭矩的拟合曲线如图 8(a)、(b)所示,图 8(b)是(a)的局部放大图。从图中可见,在转速一定

的情况下,扭矩加载和卸载的拟合曲线基本重合,与理论曲线 $\Delta l = 0.226T$ 基本重合,具有良好的线性度。

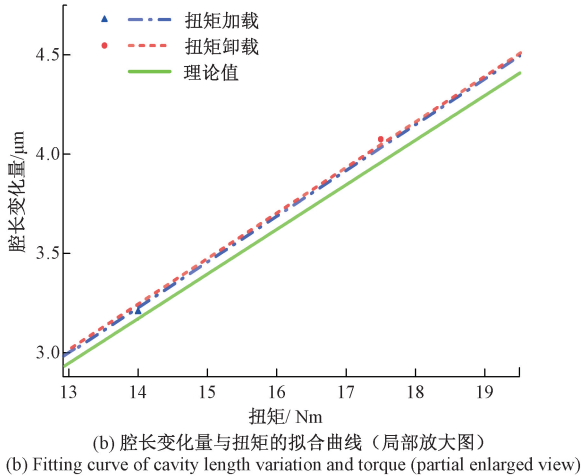
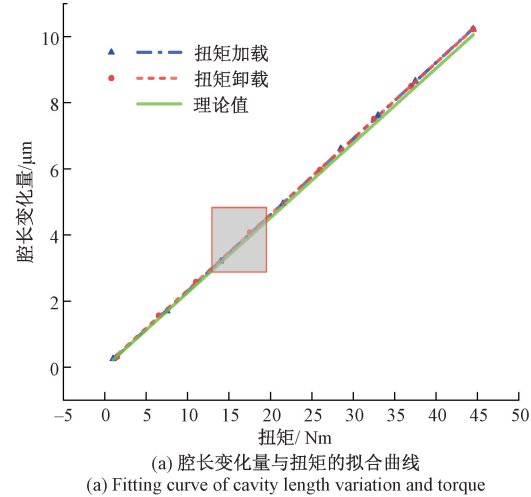


图 8 转速为 30 rpm 时扭矩加载和卸载的对比图

Fig. 8 Comparison of torque loading and unloading at 30 rpm

将转速保持为 30 rpm,电机每次输出扭矩,持续 25 s 以上,以保证电机输出扭矩的稳定性,从而不影响其测量精度。测量每个扭矩时,记录 20 s 的数据后取其平均值,以进一步提高系统的测试精度。如图 9 所示为转速保持为 30 rpm 时,测得的 F-P 腔腔长变化量与参考扭矩作线性拟合的关系曲线。图 9 中的误差棒表示传感器测量值的波动,由图 9 可知,随着扭矩的增加,F-P 腔腔长变化量也随之增大,对应的误差值也随之增大,其与扭振的大小相关。对各扭矩下测得的腔长变化量取平均,将参考扭矩值与数据点进行拟合,可得到腔长变化量和扭矩的线性拟合曲线为 $\Delta l = 0.229T + 0.092$ 。其中 T 为参考扭矩(Nm), Δl 为腔长变化量(μm),该曲线的线性拟合度高达 0.996 72,对应的该传感系统的灵敏度为 0.229 $\mu\text{m}/\text{Nm}$,这与根据式(3)计算所获得的本传感器灵敏度理论值 0.226 $\mu\text{m}/\text{Nm}$ 基本吻合。

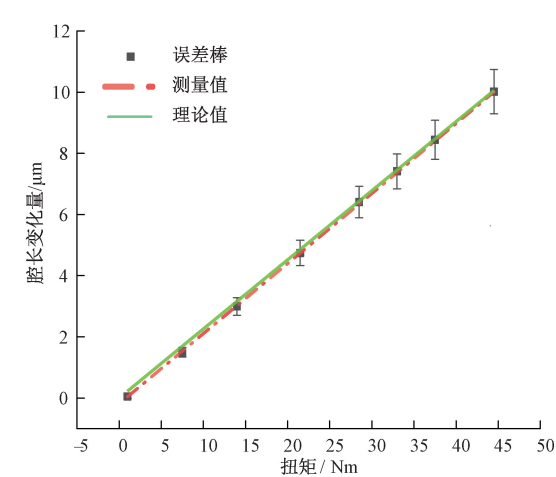
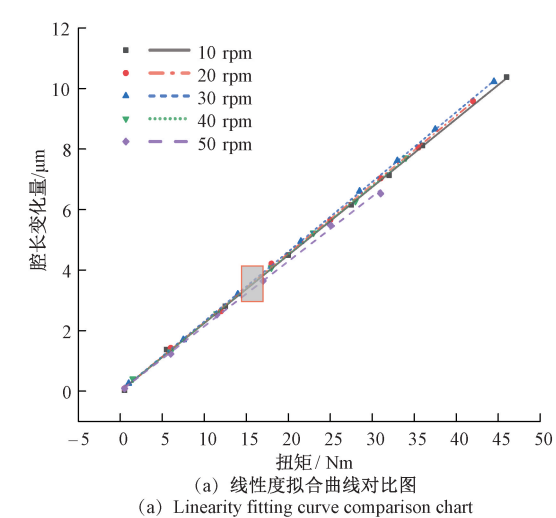


图 9 扭矩与腔长变化量线性拟合与误差棒

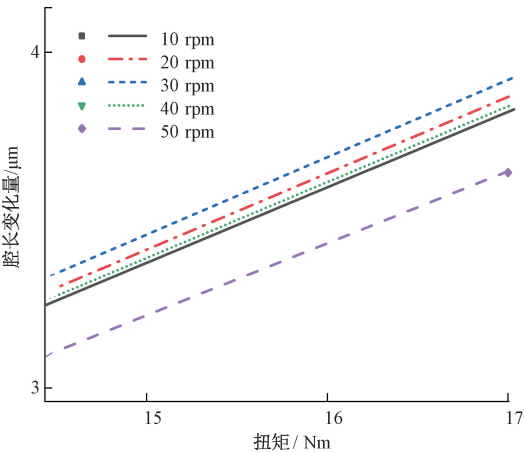
Fig. 9 Linear fitting and error line of torque and cavity length variation

为了验证传感器腔长的变化量与扭矩之间的正比例关系,在转速恒定在 10、20、30、40 和 50 rpm 下分别进行了参考扭矩与腔长变化量的测量,改变电机输出的扭矩,记录解调腔长变化量,如图 10 所示,其中图 10(b) 为图 10(a) 的局部放大图。将参考扭矩读数与传感器腔长变化量做线性拟合,可以得到对应的灵敏度分别为 0.225、0.227、0.229、0.226、0.214 $\mu\text{m}/\text{Nm}$ 。从图中可知,前 4 次传感器测量的灵敏度与理论值 0.226 $\mu\text{m}/\text{Nm}$ 十分接近;当转速为 50rpm 时的灵敏度与前 4 次的灵敏度相差较大,可归因于搭建的实验平台处于不稳定状态而造成的误差。在 10、20、30 和 40 rpm 时,传感器的灵敏度与理论值 0.226 $\mu\text{m}/\text{Nm}$ 基本吻合,说明传感器具有良好的稳定性。



(a) 线性度拟合曲线对比图

(a) Linearity fitting curve comparison chart



(b) 线性度拟合曲线对比图 (局部放大)

(b) Linearity fitting curve comparison chart (partial zoom)

图 10 5 次加载实验的对比

Fig. 10 Five experiments comparison at different load

4 结 论

本文首次提出了光纤 F-P 传感技术对传动轴扭矩测量的新方法。设计了一种基于非本征光纤法布里珀罗技术的扭矩传感器,对传动轴在旋转过程中的扭矩进行了实验研究。实验结果表明,传感器测得了传动轴在旋转过程中的扭矩,在转速为 10 ~ 50 rpm 内对光纤 F-P 扭矩传感器的灵敏度进行重复性测量,证明了该传感器的稳定性及可靠性。从实验结果可以看出,光纤 F-P 扭矩传感器具有测量动态范围大、测量精度高和实时快速的优势,可以将此方法应用于汽车、船舶等大型传动轴系,通过适当的保护方法防止灰尘、油污进入传感器,使其可以在恶劣的环境中使用。

参考文献

[1] SACKFIELD A, BARBER J R, HILLS D A. A shrink-fit shaft subject to torsion [J]. European Journal of Mechanics A/Solids, 2002, 21(10):73-84.

[2] 禹精达,朱晖. 传动轴扭矩测量误差分析[J]. 机械研究与应用,2011(4):4-5,8.

YU J D, ZHU H. Measurement error analysis of shaft torque [J]. Mechanical Research & Application, 2011(4):4-5, 8.

[3] 杨翼,王旭荣,王明坤,等. 船舶推进轴系的扭转-纵向冲击响应[J]. 振动与冲击,2017,36(13):96-102.

YANG Y, WANG X R, WANG M K, et al. Torsional-longitudinal shock responses of a ship propulsion shaft system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017,

- 36(13):96-102.
- [4] 赵浩. 一种基于霍尔效应的扭矩传感器[J]. 传感技术学报, 2016, 29(10):1505-1508.
- ZHAO H. A new torque sensor based on hall effect[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(10):1505-1508.
- [5] BORGES J C S, DEDEUS D B, LIMA FILHO A C, et al. New contactless torque sensor based on the Hall effect [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(16):5060-5067.
- [6] 李志鹏, 王博男, 孟旭, 等. 电磁式扭矩传感器原理、研究现状及发展趋势[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1):1-14.
- LI ZH P, WANG B N, MENG X, et al. Principle, study status and development trend of the electromagnetic torque sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1):1-14.
- [7] ZHANG X M, ZHAO M R, HUANG Y G, et al. Novel non-contact torque measurement using the magnetomechanical effect[J]. Instrumentation Science & Technology, 2019, 47(1):107-116.
- [8] JIANG K S, ZHOU Y Y, HAN L B, et al. Design of a high-resolution instantaneous torque sensor based on the double-eccentric modulation principle[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(16):6595-6601.
- [9] JI X J, FAN Y P, JIN C, et al. Passive wireless torque sensor based on surface transverse wave [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(4):888-894.
- [10] 武延鹏, 张松涛, 尤政. 新型抗气隙干扰磁弹性扭矩传感器的研究[J]. 传感器与微系统, 2001, 20(5):16-18, 24.
- WU Y P, ZHANG S T, YOU ZH. Study on a new magnetolastic torque sensor with resistablity to air-gap variation[J]. Journal of Transducer Technology, 2001, 20(5):16-18, 24.
- [11] 谢锐, 马铁华, 张红艳. 传动轴扭矩无电池实时测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2):47-54.
- XIE R, MA T H, ZHANG H Y. Real-time measurement method for drive shaft torque without battery[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2):47-54.
- [12] LIU Z Y, TAM H Y, HTEIN L, et al. Microstructured optical fiber sensors [J]. Journal of Lightwave Technology: A Joint IEEE/OSA Publication, 2017, 35(11):3425-3439.
- [13] DI H T, XIN Y, JIAN J Q. Review of optical fiber sensors for deformation measurement [J]. Optik: Zeitschrift fur Licht-und Elektronenoptik: Journal for Light-and Electronoptic, 2018, 168:703-713.
- [14] 姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光电子. 激光, 2002, 13(4):420-430.
- JIANG D SH, HE W. Review of applications for fiber bragg grating sensors [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2002, 13(4):420-430.
- [15] 梅钰洁, 余有龙, 耿淑伟. 基于光纤光栅的螺纹管压弯扭测量技术[J]. 光子学报, 2017, 46(9):167-172.
- MEI Y J, YU Y L, GENG SH W. Measurement technique of pressure, bending moment and torque for threaded pipe based on fiber bragg grating [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(9):167-172.
- [16] 吴素艳, 黄银国, 赵美蓉, 等. 基于光纤光栅的扭矩测量系统设计[J]. 纳米技术与精密工程, 2017, 15(2):135-139.
- WU S Y, HUANG Y G, ZHAO M R, et al. Design of torque measurement system based on FBG [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2017, 15(2):135-139.
- [17] 张伟刚, 许兆文, 杨翔鹏, 等. 用单光纤光栅实现扭转与温度的双参量传感测量[J]. 光学学报, 2002, 22(9):1070-1075.
- ZHANG W G, XU ZH W, YANG X P, et al. Sensing measurement of two parameters for torsion and temperature ZUSING single fiber grating[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(9):1070-1075.
- [18] LIANG W L, ZHOU C M, FAN D. Fiber-optic Fabry-Perot high temperature sensor based on sapphire wafer[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(12):1228007.
- [19] NEILSON D T. Tolerance of optical interconnections to misalignment [J]. Applied optics, 1999, 38(11):2282-2290.
- [20] 王晶, 张子豪, 余鑫宇, 等. 法布里-珀罗干涉信号的小

波变换相位补偿算法[J]. 光子学报, 2021, 50(7): 39-45.

WANG J, ZHANG Z H, YU X Y, et al. Phase compensation algorithm of wavelet transform for Fabry-Perot interference signals[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(7):39-45.

[21] 向超群, 欧阳泽铿, 成庶. 转矩脉动触发的牵引逆变器模型预测控制[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(5): 100-108.

XIANG CH Q, OUYANG Z K, CHENG SH. Model predictive control of traction inverter based on torque ripple triggering[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(5):100-108.

[22] 于慎波, 李野, 钟双双. 磁极结构对永磁同步伺服电机转矩脉动的影响[J]. 重型机械, 2018(3):37-42.

YU SH B, LI Y, ZHONG SH SH. Influence of magnetic pole structure on torque ripple of permanent magnet synchronous servo motor [J]. Heavy Machinery, 2018(3):37-42.

[23] 张义民, 路金昌, 胡鹏. 转速及扭矩对啮合齿轮副非线性特性影响分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(3):397-401.

ZHANG Y M, LU J CH, HU P. Non-linear characteristics analysis of gear pairs with the impact of rotational speed and torque[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2014, 35(3):397-401.

作者简介



余鑫宇, 2018 年于湖北科技学院获得学士学位; 现为武汉理工大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感器及其解调技术。
E-mail: 2375901090@qq.com

Yu Xinyu received his B.Sc. degree from Hubei University of Science and Technology in 2018; He is currently pursuing his M.Sc. degree at Wuhan University of Technology. His main research interests include optical fiber sensor and demodulation technology processing.



范典(通信作者), 2005 年于武汉理工大学获得硕士学位; 2011 年于武汉理工大学获得博士学位, 现为武汉理工大学光纤传感技术与网络国家工程研究中心研究员、博士研究生导师, 主要研究方向为光纤传感技术方向, 蓝宝石光纤高温传感、光栅阵列传感光纤网络、光栅阵列干涉型分布式声压传感。

E-mail: fandian@whut.edu.cn

Fan Dian (Corresponding author) received her M.Sc. degree and Ph.D. degree both from Wuhan University of Technology in 2005 and 2011, respectively. She is currently a researcher and a master advisor in the National Engineering Research Center for Optical Fiber Sensing Technology and Network at Wuhan University of Technology. Her main research interests include optical fiber sensing technology, sapphire fiber high temperature sensing, grating array sensing fiber network, grating array interference distributed sound pressure sensing.