

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904934

传动轴扭矩无电池实时测量方法*

谢锐^{1,2}, 马铁华^{1,2}, 张红艳^{1,3}

(1. 电子测试技术重点实验室 太原 030051; 2. 中北大学电气与控制工程学院 太原 030051;
3. 中北大学理学院 太原 030051)

摘要:传动轴状态监测是动力机械设备健康管理的重要内容,转速、扭矩的实时获取是其首要环节与数据基础。针对状态监测中存在的传感器安装、信号传输、实时性、持续性问题,提出一种基于圆容栅的无电池、无引线实时测量方法。阐述了圆容栅的结构及工作原理,分析了电容耦合的信号传输原理,给出了圆容栅的差动组合配置模式和安装方法,通过仿真确定了圆容栅电极的最佳数量为20。最后在涡轮泵水力实验台上,对传动轴的转速、扭矩进行了测量,得到了300、600 r/min时的转速波形,以及300 r/min时对应3个不同扭矩值的波形,并选取了实验过程中的5个不同时间点,对圆容栅和应变式扭矩传感器在每个时间点采集的转速、扭矩数据进行了对比,数据一致性较好。实验结果表明,圆容栅可以用作传动轴扭矩的测量。

关键词:圆容栅;动态扭矩测量;电容耦合;电磁仿真

中图分类号: TH701 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Real-time measurement method for drive shaft torque without battery

Xie Rui^{1,2}, Ma Tiehua^{1,2}, Zhang Hongyan^{1,3}

(1. Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, Taiyuan 030051, China;

2. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. School of Science North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Drive shaft status monitoring is an important part of the health management of power machinery equipment. The real-time acquisition of speed and torque is its primary step and data foundation. Aiming at the problems of sensor installation, signal transmission, real-time and continuity in status monitoring, this paper proposes a battery-free and leadless real-time measurement method based on roundcapacitive grid. The structure and principle of the round capacitive grid are described. The principle of capacitive coupling signal transmission is analyzed. The differential-combination configuration and installation method of the round capacitive grid are given. The optimal number of round capacitive grid electrodes is determined by simulation as 20. Finally, the speed and torque measurement of the drive shaft is carried on the turbo pump hydraulic test bench. The speed waveforms at 300 and 600 r/min and the waveforms corresponding to three different torque values at 300 r/min are obtained. Five different time points are selected during the experiment, the speed and torque datas collected at each time point by the round capacitive grid and the strain gauge torque sensor are compared, and the data consistency is good. The experimental results show that the round capacitive grid can be used to measuring the torque of the drive shaft.

Keywords: round capacitive grid; dynamic torque measurement; capacitive coupling; electromagnetic simulation

0 引言

动力传输系统性能、状态参数的监测是预测与健康管理的重要内容,其动力传输的主要方式是轴传动,扭矩

是表征动力传输系统动力性能、传动链路的能量传递与利用效率的最典型动态参数之一^[1-6]。对转速、扭矩的实时获取,是动力传输系统预测与健康管理的首要环节与数据基础。

目前对于传动轴动态扭矩的实时测量,由于传动轴

的运动特性和环境的严苛性,存在的主要问题如下:1)传统的扭矩传感器安装困难、信号传输受到限制,测试精度低、实时性差;2)传感器的环境适应性差,需要中途更换电池,不能很好地满足长时间持续测量的要求^[7-9]。例如,常规的基于电阻应变片构建电桥的扭矩测试方法需要考虑电阻应变片供电和信号传输的问题,利用集流环、变压器耦合、无线传输等方法在一定程度上解决了这个问题。但是接触式集流环在高速旋转场合下可靠性差,以及机械摩擦会导致信号耦合噪声;无线遥测的发射模块在狭小空间及高速旋转的场合中安装受限,若直接安装到被测轴上,模块本身的转动惯量会影响轴系的动态性能;此外无线感应供电及无线遥测均存在易受干扰的问题^[10-15]。

基于此现状,有学者进行了大量的传感器设计及试验,文献[16]提出一种磁致伸缩片传感器,由磁致伸缩贴片和紧密结合在轴上的小磁铁组成,围绕轴放置螺旋管线圈,转轴运动时能将磁致伸缩片的变形转换成电压输出,它的特点是无需电池、能在线长时间测量,已应用在运输船推进轴的在线测试中。文献[17]采用电磁声学原理,研制了用于结构振动模态测试的非接触式传感器。与现有的振动激励机构相比,振动激励不需要换能器的机械运动,换能器的磁路仅由磁铁和电线圈组成。文献[18]研究了一种非接触式的航空发动机转子扭振测量新方法,根据扭转振动将引起测速脉冲信号宽度发生变化,造成转子转速瞬时波动的原理进行扭振的实时监测。文献[19]提出了对扭振信号进行等时间间隔二次采样和对扭角计算公式进行修正两种方法来提高信号时频转换精度。文献[20]研究了一种轴结构的间接扭振受力测量方法,可以根据测量的平移载荷数据估算轴系的扭转受力大小,将其将一个T形梁结构连接到轴系一端,通过建立轴系的扭转接收器和组装结构的平移接收器之间的关系,既不需要扭矩激励系统也不需要角度传感器,使用传统的线性加速度传感器和冲击锤来计算受力的大小。

本文结合涡轮泵实验台中传动轴的结构特点^[21],采用了一种新的圆容栅传感器系统,该系统无需安装电池,无需引线或无线方式传输信号。本文介绍了圆容栅的工作原理,并通过电磁仿真确定了圆容栅电极数量^[22],最后在涡轮泵水力实验台上进行测试,将试验结果与普通扭矩传感器进行对比,验证了基于圆容栅的扭矩实时测量方法的可行性和有效性。

1 圆容栅传感器

圆容栅传感器是变面积型电容传感器的一种特殊形式,具有结构简单、体积小、能耗低、环境适应性强、测量

精度高等特点,与一般电容传感器相比,显著优点体现在:1)多个电极,灵敏度高;2)电极可以细分,并具有误差平均效应,测量精度高;3)通过电荷传递作用可以实现两个电极之间无引线的信息传输。

1.1 圆容栅的结构和工作原理

圆容栅属于一种角位移式传感器,其结构如图1所示。它的静栅与动栅为圆环形,其上分布的单个电极呈扇形,其中动栅由多个电极并联组成,静栅由结构互补的两组电极组成,动栅和静栅的电极尺寸相同,静栅电极数量为动栅的2倍。

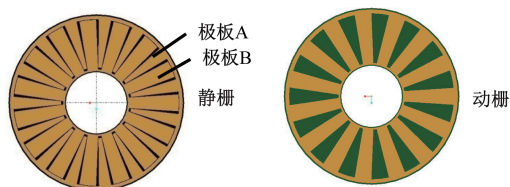


图1 圆容栅的结构

Fig.1 Structure of round capacitive grid

传动轴旋转时圆容栅的电容 $\Delta C = k\Delta\alpha$, $\Delta\alpha$ 是角位移,即电容的变化量与轴转过的角度成正比。当传动轴受到扭转载荷后,会产生形变,轴上不同位置的两个截面会发生相对扭转,产生扭角。传动轴上相距 dx 的两个横截面,其相对扭角 $d\theta$ 、剪切弹性模量 G 、极惯性矩 I_p 和扭矩 M_T 之间满足:

$$d\theta = \frac{M_T dx}{GI_p}$$

对于等半径圆轴,通过积分可得距离 L 的两截面的相对扭角为:

$$\theta = \int_l d\theta = \int_l \frac{M_T dx}{GI_p} = \frac{M_T L}{GI_p} \quad (1)$$

由式(1)可看出两截面相距越远,扭角越大,因此扭矩测量时为了产生尽可能大的扭角,在传动轴的两端分别放置一组圆容栅,其中动栅与传动轴连接随之一起旋转,作为圆容栅的接“地”极,静栅的位置与动栅正对且固定不动。传动轴旋转时动栅与静栅的相对面积周期性改变,静栅极板A、B输出的电容 C_1 、 C_2 具有公共的“地”,构成一组差动电容。 C_1 、 C_2 经过差动脉宽调制电路转化为脉冲信号 U_1 、 U_2 ,再经过调理电路输出为近似正弦波的信号 y ,其周期与传动轴的转速成正比。置于传动轴两端的圆容栅分别对应 y_1 、 y_2 ,传动轴受到扭矩作用时,产生了扭角,体现为两组圆容栅的输出信号 y_1 、 y_2 产生了相位差 φ ,即:

$$y_1 = U_1 \sin(\omega t) = U_1 \sin(2\pi f t) = U_1 \sin\left(\frac{vn\pi}{30}\right) \quad (2)$$

$$y_2 = U_2 \sin(\omega t + \varphi) = U_2 \sin\left(\frac{vn\pi}{30} t + \varphi\right) \quad (3)$$

式中: v 为传动轴转速; n 为动栅电极个数。

通过高频脉冲计数可以得到相位差 φ , 进而得到扭角 θ , 最终得到传动轴动态扭矩的大小。

$$\varphi = \frac{m_2}{m_1} \cdot 2\pi \quad (4)$$

$$\theta = \frac{\varphi \cdot m_1^2 \cdot n}{f^2} = \frac{m_2 \cdot m_1 \cdot n \cdot 2\pi}{f^2} \quad (5)$$

$$M_T = \frac{\theta G I_p}{L} = \frac{m_2 \cdot m_1 \cdot n \cdot 2\pi \cdot G I_p}{f^2 L} \quad (6)$$

式中: m_2 为对相位差 φ 的计数值; m_1 为对正弦波 y 半周期的计数值; f 为计数脉冲频率。

1.2 圆容栅的配置

在应用中, 由于涡轮泵实验台的传动轴长度固定, 因此可通过在径向增加圆容栅的尺寸来得到较大的输出信号。

圆容栅的静栅和动栅均为薄片状, 通过在柔性绝缘基底上使用镀膜、光刻等工艺将适当金属(如铜、金)刻蚀成栅状。安装时, 动栅通过金属底板与传动轴直接相连并接“地”设置, 静栅同样置于底板上, 并与动栅正对设置, 静栅的底板由固定支座定位于涡轮泵支架上, 保证圆容栅的电极与轴线垂直。在测量时, 为了进一步增大传感器的输出信号, 在动栅极板的两侧分别设置一个静栅, 如图2所示。即动栅与静栅极板 A、B 构成电容为 C_1 、 C_2 , 与静栅极板 A'、B' 构成电容 C_3 、 C_4 , 其中 C_1 、 C_2 和 C_3 、 C_4 分别为一组差动电容, 这种结构可以补偿测试过程中传感器轴向窜动引起的输出不稳定。

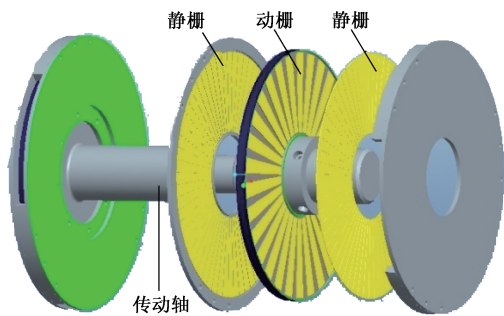


图2 圆容栅的安装

Fig.2 Installation of round capacitive grid

2 圆容栅的信号传输

圆容栅的电容 C 与动、静栅的正对面积 S 、介电常数 ε 成正比, 与两者间的距离 d 成反比。传动轴旋转过程中, 动栅与静栅的正对面积随轴的旋转周期性的变化, 输出的周期性信号 y 相当于一个载波, 其频率耦合

了转速信息。圆容栅输出的差动电容 C_1 、 C_2 拥有公共的接地端, 可通过充放电电路转化为电压信号, 此方法可消除分布电容对传感器的影响, 电路简单可靠, 给测量系统带来的噪声干扰比较小。 C_1 、 C_2 的充放电过程是非线性的, 充放电时间与电容量的大小和电路中充电阻阻值有关, 即电容充电时间耦合了扭矩信息。圆容栅连接信号处理电路后, 动栅和静栅可视为发射电极和接收电极, 其二维模型如图3所示, 由于电极的长度远远大于电极间的距离, 因此输出电容的变化形成交变电场。

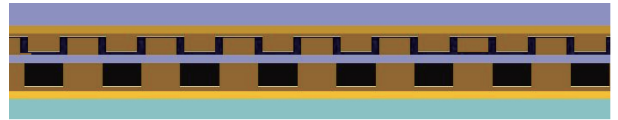


图3 圆容栅的二维模型(截面图)

Fig.3 Two-dimensional model of round capacitive grid (Sectional view)

设发射电极的电位为 V_1 , 接收电极的电位为 V_2 , 接收电极上的电荷量为 q , 则:

$$q = C_{12} \cdot (V_2 - V_1) \quad (7)$$

式中: C_{12} 为发射电极和接收电极之间的电容, 即圆容栅的工作电容。

若发射电极产生电位增量 ΔV , 会引起接收电极上电荷的变化, 设其变化量为 Δq , 则:

$$q + \Delta q = C_{12} \cdot [V_2 - (V_1 + \Delta V)] \quad (8)$$

将式(2)、(3)相减, 得到:

$$\Delta q = -C_{12} \cdot \Delta V$$

即:

$$C_{12} = -\frac{\Delta q}{\Delta V} \quad (9)$$

由此可见, 通过电容的耦合作用, 发射电极增加的电位, 引起接收电极的电荷变化, 实现了电能量的非接触式传递, 即通过圆容栅实现了传动轴高速旋转条件下无引线的信号传输。

3 圆容栅的仿真

3.1 输出特性仿真

当传动轴处于高速旋转时, 圆容栅输出信号的频率会较高, 为了得到较大的便于检测的输出信号, 应增大单个电极面积, 相应的电极数量便会减少, 即电极宽度增大, 使传感器的分辨率降低; 若增加电极数量, 电极宽度变小, 相对密集的电极会加剧边缘效应, 使传感器的灵敏度降低, 造成一定的非线性失真, 影响传感器电容量的输出。因此, 电极数量是影响传感器动态性能的重要参数

之一。因此,利用 Ansoft Maxwell 对圆容栅的输出特性进行仿真,得到电极数量与电容量的关系。

根据传动轴的尺寸确定圆容栅的内外半径外圆 $R=130\text{ mm}$,内圆 $r=43\text{ mm}$,建立圆容栅模型如图 4 所示,动、静栅极板厚度为 1 mm ,间距为 2 mm 。

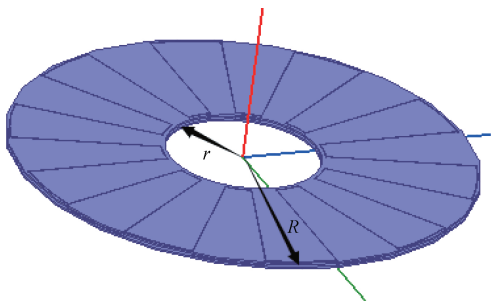


图 4 圆容栅仿真模型

Fig.4 Simulation model of round capacitive grid

为模型添加激励,其中静栅 A 和 B 添加 5 V 电压,动栅添加 0 V 电压。对求解域的边界条件进行定义,采用自适应剖分,对模型进行求解计算。表 1 所示为圆容栅电极数量为 10,当静栅相对动栅的转角从 $0^\circ\sim5^\circ$ 变化时,得到的静栅 A、B 的电容值,其和即为圆容栅输出的电容值。表 2 和 3 所示分别为圆容栅电极数量为 20、30 时,仿真得到的圆容栅输出电容值的大小。

表 1 电极数量为 10 的仿真结果

Table 1 Simulation results with 10 electrodes pF			
旋转角度	静栅 A	静栅 B	电容量
0°	63.34	110.63	173.97
1°	39.38	134.73	174.11
2°	44.193	129.9	174.093
3°	50.165	123.9	174.065
4°	56.642	117.4	174.042
5°	63.334	110.63	173.964

表 2 电极数量为 20 的仿真结果

Table 2 Simulation results with 20 electrodes pF			
旋转角度	静栅 A	静栅 B	电容量
0°	84.836	104.95	189.786
1°	131.97	57.839	189.809
2°	122.41	67.302	189.712
3°	110.59	79.141	189.731
4°	97.845	91.742	189.587
5°	84.836	104.95	189.786

表 3 电极数量为 30 的仿真结果

Table 1 Simulation results with 30 electrodes pF			
旋转角度	静栅 A	静栅 B	电容量
0°	77.165	56.974	134.139
1°	49.428	84.825	134.253
2°	55.293	78.918	134.211
3°	63.017	71.26	134.277
4°	70.773	63.528	134.301
5°	77.207	57.132	134.339

通过仿真结果,圆容栅传感器的电极数量为 20 时,输出信号的幅值达到最大。

3.2 圆容栅的电磁仿真

由于圆容栅存在边缘效应相当于在电容极板边缘处附加了一个电容,使实际极板的电容值大于理论值,边缘效应引起极板间电场分布不均匀,产生干扰信号,且灵敏度降低。因此对圆容栅的极板进行边缘效应仿真,结合电极数量与电容量关系的仿真结果,以及边缘效应的仿真结果,来确定动、静栅极板的最佳电极数量,实现圆容栅传感器性能的最优设置。

图 5 所示为电极数量为 10 的圆容栅静电场仿真三维模型,模型中动栅极板与静栅极板相对旋转了 1° ,两极板外添加了圆柱体区域将模型包围,对整体模型中圆容栅模型进行扣除,对剩余模型进行求解运算。计算完毕后,通过观察模型的场强分布图,查看 YZ 面的近端部电场强度 E 的幅值分布情况,对边缘效应进行分析。XZ 面和 XY 面的端部电场强度效果与 YZ 面相同。

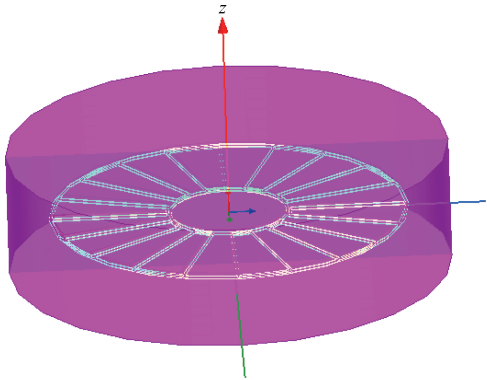


图 5 圆容栅边缘效应仿真模型

Fig.5 Edge effect simulation model of round capacitive grid

YZ 面的整体电场强度分布如图 6 所示,蓝色区域表示电场强度较低。将整体电场强度分布图放大到近端部,观察电场强度 E 的分布情况,如图 7 所示。可以看到电极内部的电场强度分布相对均匀,而端部的电场强度分布发生变化,中部电场强度相对较高,且由内向外强度

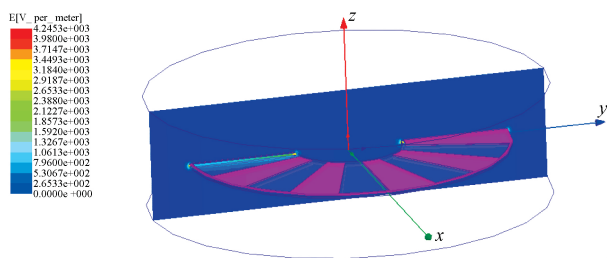


图 6 YZ 面整体电场强度分布

Fig.6 YZ overall electric field intensity distribution

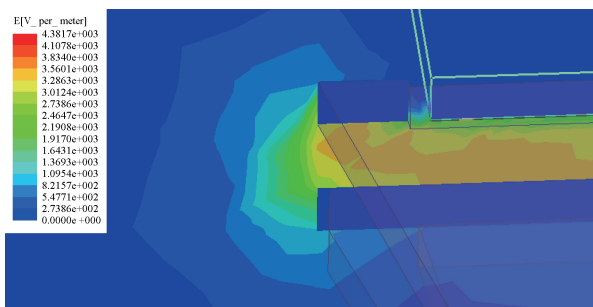


图 7 电极数量为 10 端部电场强度分布

Fig.7 Electric field intensity distribution of 10 electrodes

逐渐降低。

图 8 和 9 所示为电极数量为 20、30 的端部电场强度分布,同样表现出电场强度 E 由内向外逐渐降低的规律。

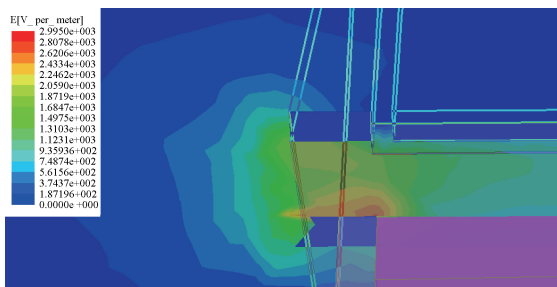


图 8 电极数量为 20 端部电场强度分布

Fig.8 Electric field intensity distribution of 20 electrodes

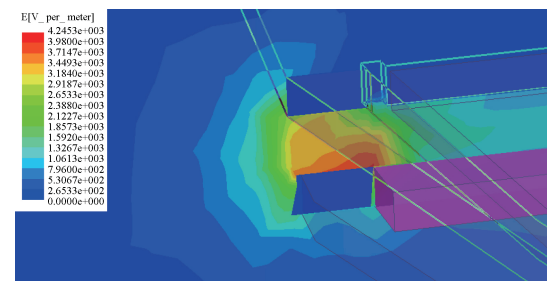


图 9 电极数量为 30 端部电场强度分布

Fig.9 Electric field intensity distribution of 30 electrodes

通过不同电极数量的端部电场强度分布,明显可以看出端部电场强度逐渐增强,即边缘效应的影响随着电极数量的增加而增大。结合前面电极数量仿真结果,选择电极数量为 20 的圆容栅,这样既避免了边缘效应过大而降低灵敏度,也使传感器输出的电容值相对最大,提高测试精度。

4 实验测量及结果

4.1 圆容栅装配结构

实验在涡轮泵水力实验台上进行,实验台主要包括电机、传动轴以及支架 3 个部分。电机输出轴利用联轴器与传动轴的右端连接。支架位于传动轴的左侧,其上有一个支撑筒,内部装有轴承。传动轴一端与电机相连,另一端为花键,经过支撑筒内的轴承与后续机械结构连接。传动轴两端分别安装一组圆容栅,中间位置安装了应变式扭矩传感器,作为圆容栅测量结果的比对。

圆容栅按照图 2 所示结构安装,动栅与静栅置于环状金属壳体内,金属壳体包括底座与外壳,其中动栅固定于金属底座上,静栅固定于金属外壳内。动栅通过底座与传动轴固定并实现电气上的连接,金属底座可随传动轴旋转,金属外壳由支架固定保持不动,保证圆容栅电极与轴线垂直。金属壳体有保护传感器和电磁屏蔽两个作用。圆容栅装配完成的结构如图 10 所示。

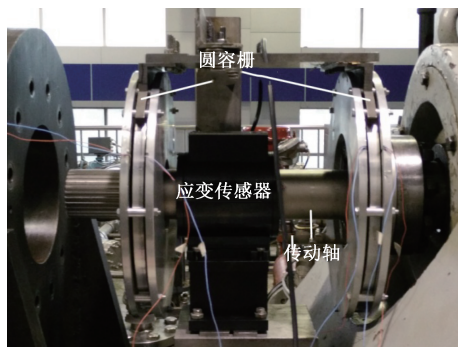


图 10 圆容栅的安装结构

Fig.10 Installation structure of round capacitive grid

4.2 传动轴转速、扭矩测量

测量过程中,从圆容栅上引出信号与测量仪器连接,用数据采集分析系统观察经过调理后的信号 y_1 并存储。图 11 和 12 所示为通过存储的原始数据绘制的曲线,图 11 所示为转速 300 r/min 时的曲线,图 12 所示为转速 600 r/min 时的曲线。从 y_1 的周期可计算得出对应的转速,符合实际的转速值,且能看出 y_1 的波形为近似正弦波形,与理论分析一致。此外,实时信号中包含噪声较大,

可能引入噪声的环节有:圆容栅与测量仪器间的引线,动栅接地不良,传感器屏蔽不到位等。

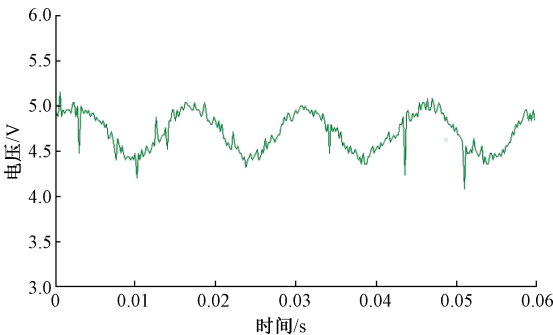


图 11 300 r/min

Fig.11 300 r/min

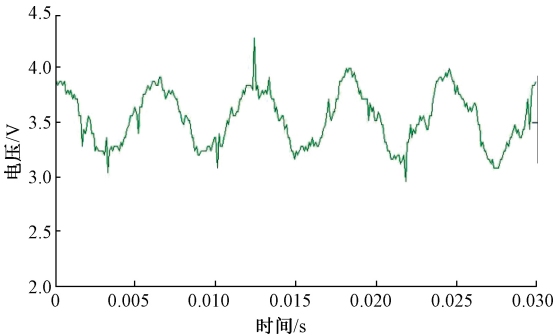
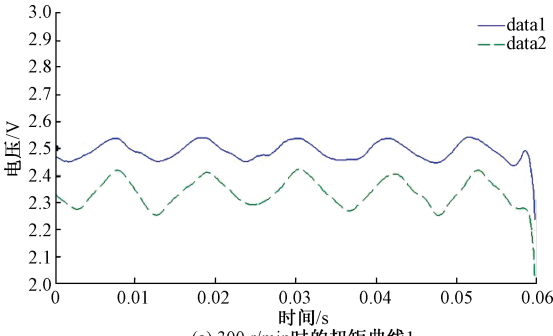


图 12 600 r/min

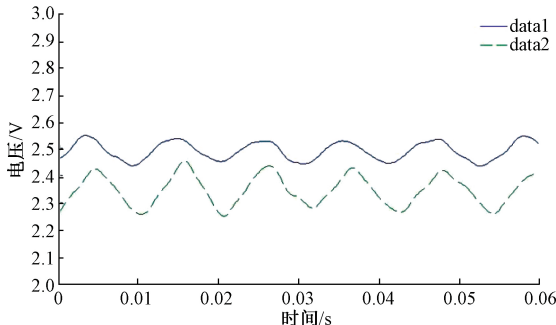
Fig.12 600 r/min

为了验证圆容栅对扭矩测量的有效性,设计如下测量过程:将传动轴转速固定在 300 r/min,调节加载装置以改变扭矩的大小,在这个过程中,采集对应不同扭矩值的 3 组圆容栅输出波形,并且将波形通过软件滤波,得到如图 13 所示的 3 组 y_1 、 y_2 波形。从图 13 中可以明显看出圆容栅输出信号 y_1 、 y_2 的频率恒定且与转速成正比,此外,随着扭矩的改变 y_1 、 y_2 波形之间的时间轴间隔不同,即两者的相位差发生改变。验证了前面对圆容栅原理的分析,可通过测量两组圆容栅输出信号的相位差得到传动轴扭矩的大小。



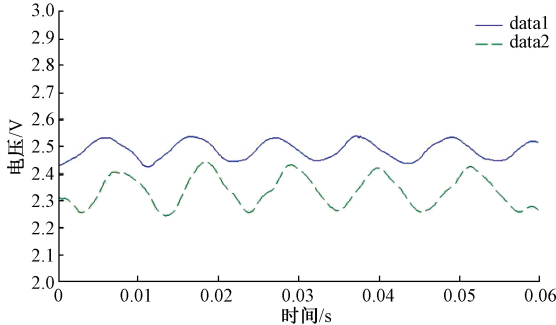
(a) 300 r/min时的扭矩曲线1

(a) Torque waveform1 at 300 r/min



(b) 300 r/min时的扭矩曲线2

(b) Torque waveform2 at 300 r/min



(c) 300 r/min时的扭矩曲线3

(c) Torque waveform3 at 300 r/min

图 13 y_1 、 y_2 软件滤波后波形

Fig.13 y_1 、 y_2 waveform after software filtering

同时,为了验证圆容栅测量的准确性,选用应变式扭矩传感器作为测量结果的比对。测量结束后,随机选取时间为 20、90、160、230、360 s 的几个测量点,将圆容栅与应变式扭矩传感器在这 5 个时间点测量得到的转速值、扭矩值进行对比,结果如图 14、15 所示。图 14 所示为转速信号对比,图 15 所示为扭矩信号对比。从两种曲线可以看出,随着转速的增加,扭矩也增大,转速的增加基本是线性的,前半段增速大于后半段,两种传感器数据一致性很好;扭矩的变化是非线性的,前半段两种传感器数据一致性较好,随着转速的增加,两种传感器的数据产生了一定的偏差。实验结果总体表明圆容栅的结构设计、电极尺寸设定、安装配置几个方面设计合理,但是在高速旋转环境下,噪声问题比较突出,对测量结果的影响较大。

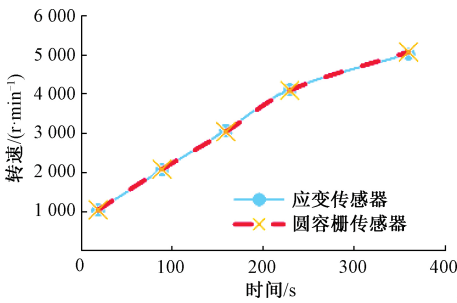


图 14 两种传感器测量的转速信号

Fig.14 Speed signals measured by two sensors

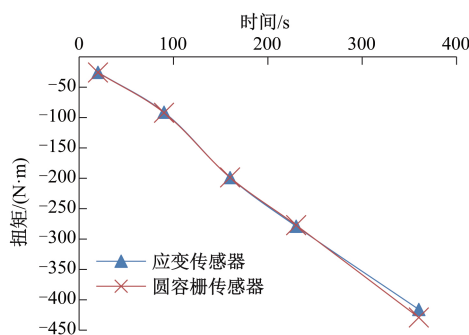


图 15 两种传感器测量的扭矩信号

Fig.15 Torque signals measured by two sensors

5 结 论

对于各种具有动力传动系统的大型机械设备或交通运输设备来说,传动轴的动态扭矩、转速的测量是其预测与健康管理的基礎环节。本文针对传动轴转速、扭矩在线实时测量存在的问题,结合涡轮泵水力实验台进行了基于圆容栅的实时测量方法的研究。说明了圆容栅的结构特点和工作原理,分析了电容耦合过程,以实现传感器输出信号无引线的传输方式,建立了通过电磁仿真确定圆容栅电极数量的方法,以实现在保证圆容栅精度的前提下输出信号的幅值达到最大。最后在涡轮泵水力扭矩实验台上进行了传动轴扭矩的测量,对实验结果的分析表明,圆容栅可以用作传动轴扭矩的在线实时测量。同时,通过信号的实时波形,以及圆容栅与应变式扭矩传感器测量结果的对比,反映出在转速较大的工况下,圆容栅的输出信号会发生衰减,且噪声变大,对测量结果产生了影响。因此,需要通过仿真进一步优化圆容栅的结构,并对微小电容信号检测和滤波方法进行研究,以提高传动轴扭矩实时测量的精度。

参考文献

- [1] 孟宗,李姗姗.基于小波半软阈值和 EMD 的旋转机械故障诊断[J].中国机械工程,2013,24(10):1279-1283.
MENG Z, LI SH SH. Research on fault diagnosis for rotating machinery based on semi-soft wavelet threshold and EMD[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(10):1279-1283.
- [2] 时培明,丁雪娟,李庚,等.一种 EMD 改进方法及其在旋转机械故障诊断中的应用[J].振动与冲击,2013,32(4):185-190.
SHI P M, DING X J, LI G, et al. An improved method of EMD and its applications in rotating machinery fault diagnosis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013,

32(4):185-190.

- [3] 陈志强,陈旭东,DE OLIVIRA J V,等.深度学习在设备故障预测与健康中的应用[J].仪器仪表学报,2019,40(9):206-226.
CHEN ZH Q, CHEN X D, DE OLIVIRA J V, et al. Application of deep learning in equipment prognostics and health management[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(9):206-226.
- [4] 裴大茗,王建峰,周鹏太,等.船舶 PHM 技术综述[J].电子测量与仪器学报,2016,30(9):1289-1297.
PEI D M, WANG J F, ZHOU P T, et al. Survey on PHM technology in marine system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(9):1289-1297.
- [5] 年夫顺.关于故障预测与健康管理的几点认识[J].仪器仪表学报,2018,39(8):1-14.
NIAN F SH. Viewpoints about the prognostic and health management[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8):1-14.
- [6] 景博,徐光跃,黄以锋,等.军用飞机 PHM 技术进展分析及问题研究[J].电子测量与仪器学报,2017,31(2):161-169.
JING B, XU G Y, HUANG Y F, et al. Recent advances analysis and new problems research on PHM technology of military aircraft[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(2):161-169.
- [7] 孟宗,刘彬.回转机械动态扭矩非接触测量的研究[J].计量学报,2006,27(4):364-367.
MENG Z, LIU B. Research on the dynamic torque non-contact measurement of rotary machine[J]. Acta metrologica sinica, 2006, 27(4):364-367.
- [8] 石延平,刘成文,张永忠.一种差动压磁式扭矩传感器的研究与设计[J].仪器仪表学报,2006,27(5):508-511.
SHI Y P, LIU CH W, ZHANG Y ZH. Design and study of a kind of torque sensor based on magnetoelastic effect[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(5):508-511.
- [9] 时培明,刘彬,赵武,等.扭振信号拓扑网络的轧机动态扭矩测量[J].计量学报,2007,28(4):365-369.
SHI P M, LIU B, ZHAO W, et al. Dynamic torque measurement in rolling mill drive system based on torsional vibration signal topological network[J]. Acta metrologica sinica, 2007, 28(4):365-369.
- [10] 宋立权,牛红恩,曾礼平,等.基于单元分析的车辆动力传动系统建模与扭振减振的研究[J].汽车工程,2015,37(8):866-874.

- SONG L Q, NIU H EN, ZENG L P, et al. A study on the modeling and torsional vibration attenuation for vehicle powertrain system based on unit analysis [J]. Automotive Engineering, 2015, 37(8):866-874.
- [11] 梁伟, 韦铁平, 杨晓翔, 等. 应变片排布位置对柱式力传感器输出影响[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5):132-143.
- LIANG W, WEI T P, YANG X X, et al. Influence of strain gauge layout on the output of column type force transducer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5):132-143.
- [12] 高丽丽, 张斌, 赵娟, 等. 特种车动力传动系统扭振仿真与试验分析[J]. 车辆与动力技术, 2015, 140(4):51-55.
- GAO L L, ZHANG B, ZHAO J, et al. Simulation and experimental analysis on powertrain torsional vibration of a special vehicle[J]. Vehicle & Power Technology, 2015, 140(4):51-55.
- [13] HAN H S, LEE K H, PARK S H. Parametric study to identify the cause of high torsional vibration of the propulsion shaft in the ship [J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 59(1):334-346.
- [14] 叶嘉, 李涛, 曾志龙, 等. 轴系扭转振动测试技术研究综述[J]. 船舶工程, 2014, 36(5):6-9.
- YE J, LI T, ZENG ZH L, et al. Review of research on shaft's torsional vibration measurement [J]. Ship Engineering, 2014, 36(5):6-9.
- [15] 刘宝, 申世磊, 闫敬东, 等. 便携式电机轴功率激光测量方法及应用研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(5):50-58.
- LIU B, SHEN SH L, YAN J D, et al. Research on a portable laser measurement method of motor shaft power and its application[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(5):50-58.
- [16] JUN KYU L, HONG MIN S, CHUNG IL P, et al. Magnetostrictive patch sensor system for battery-less real-time measurement of torsional vibrations of rotating shafts[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 414(2):245-258.
- [17] HONGJIN K, CHAN IL P, SUN HO L, et al. Non-contact modal testing by the electromagnetic acoustic principle; Applications to bending and torsional vibrations of metallic pipes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(2):740-751.
- [18] 蒋云帆, 廖明夫, 王四季. 航空发动机转子扭振测量新方法[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(3):410-415.
- JIANG Y F, LIAO M F, WANG S J. New method for measuring torsional vibration of aero-engine rotor [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(3):410-415.
- [19] 郭宜斌, 李玩幽, 蔡鹏飞, 等. 提高轴系扭振信号时频转换精度的方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(9):1117-1123.
- GUO Y B, LI W Y, CAI P F, et al. Research on improving the accuracy of time-frequency domain transformation in torsional vibration measurement [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(9):1117-1123.
- [20] LYU B L, OUYANG H J, LI W Y, et al. An indirect torsional vibration receptance measurement method for shaft structures [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 372(6):11-30.
- [21] 李彤, 刘站国, 窦昱, 等. 涡轮泵水力试验系统扭矩现场校准技术研究[J]. 火箭推进, 2015, 41(3):73-79.
- LI T, LIU ZH G, DOU Y, et al. Field calibration technology for torque of turbo pump hydraulic test system[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(3):73-79.
- [22] 王旺平, 莫易敏, 田蜜, 等. 微型汽车传动系统效率建模与试验验证[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(10):137-141.
- WANG W P, MO Y M, TIAN M, et al. Efficiency modeling and experimental verification of minicar transmission system [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(10):137-141.

作者简介



谢锐, 2005 年于西安理工大学获得学士学位, 2009 年于中北大学获得硕士学位, 2012 年于中北大学获得博士学位, 现为中北大学副教授, 主要研究方向为动态测控与智能仪器。

E-mail: zbxierui@163.com

Xie Rui received her B.Sc. degree in 2005 from XI'AN University of Technology, received her M.Sc. degree in 2009 from North University of China, received her Ph.D. degree in 2012 from North University of China. Now she is associate professor in North University of China. Her main research interests include dynamic testing and intelligent instruments.