

基于智能滚子的风电圆锥滚子轴承接触载荷测量方法

王子豪¹ 仲志丹^{1,2} 刘明辉³ 郝文路⁴ 郭子豪⁵

(1. 河南科技大学 机电工程学院, 洛阳 471003)

(2. 高端轴承河南省协同创新中心, 洛阳 471039)

(3. 航空精密轴承国家重点实验室, 洛阳 471039)

(4. 洛阳新强联回转支承股份有限公司, 洛阳 471822)

(5. 河南科技大学 农业装备工程学院, 洛阳 471003)

摘要:【目的】针对大型风电圆锥滚子轴承接触载荷难以直接测量的问题,以某型号风力发电机的主轴轴承为例,对轴承的滚子进行智能化改造。【方法】首先,将载荷传感器以及其余电路部分安装到空心滚子中,设计出用于测量接触载荷的智能滚子,并设计了相应的载荷传感器。其次,通过有限元仿真得出载荷传感器中金属圆片的径向应变分布规律,并进行了虚拟组桥的仿真分析。最后,通过试验验证了金属圆片径向应变分布的规律,并进行了传感器标定试验。【结果】结果表明,滚子在受到固定载荷时,所设计的组桥方式可以很好地消除滚子自转角度对载荷测量的影响,使滚子在自转时仍能输出稳定的电压。所提测量方法为得到大型圆锥滚子轴承的接触载荷提供了一种新路径。

关键词: 圆锥滚子轴承; 智能滚子; 接触载荷测量; 传感器设计

中图分类号: TH133.3 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.01.018

0 引言

大型单列圆锥滚子轴承是风力发电机等重型机械设备中起旋转连接作用的核心部件。轴承运行中,滚子承受内、外滚道的接触载荷,研究滚子与滚道的接触载荷对于大型轴承的设计,以及轴承的健康状态检测具有重要意义。李云峰等^[1]提出了针对三排圆柱滚子轴承的五自由度力学分析模型,计算了在外部5个方向载荷联合作用下轴承接触载荷的分布情况。张旭等^[2]提出了一种新的三排圆柱滚子轴承力学模型,实例比较表明,这种等效模型在计算滚子法向接触载荷时与整体有限元模型的误差在7%以内。

智能轴承概念的提出,标志着将传感器与调节装置集成于传统轴承之上,形成了一种独特的轴承结构元件。这使轴承不仅仅是传统的支撑装置,更具备了实时在线监测、故障检测和状态调节等功能。利用信息处理和自动控制技术,智能轴承能够及时捕获轴承的运行状态,检测潜在的故障,并实时调节其状态,从而提高轴承的可靠性和性能^[3]。松田晋也^[4]发明了轴

承滚子的状态检测装置。尼古拉斯·西蒙·威廉·登·哈克等^[5]发明了一种具有集成的载荷检测的滚子,通过检测作用在滚子上的径向载荷而引起的滚子孔的变形来计算滚子的接触载荷。石岗等^[6]设计了一种智能滚子,内部安装电路以测量低速重载轴承的振动信号,试验结果显示,其振动信号具有较强能量与高信噪比,可反映滚子轴向冲击。未来可通过对振动信号的变化规律进行研究,实时监测滚子的运行状态,并及时发现潜在的异常情况。郑锴等^[7]设计了一种摩擦电-压电耦合压力传感器,实现了圆柱滚子轴承内部载荷分布的测量。

为能够准确地测量滚子接触载荷,根据智能滚子的理念,将普通圆锥滚子改造成空心滚子。采用嵌入式结构^[8],将载荷传感器装配到滚子内孔壁中,设计出在固定载荷作用下,即使滚子发生转动,也能输出稳定电压的载荷传感器,并且载荷与传感器输出电压具有良好的线性关系。最后通过理论、仿真和试验证明所提方法的可行性。

收稿日期: 2024-05-09

基金项目: 河南省科技研发计划联合基金重大项目(225101610003); 河南省重点研发专项(231111222900)

作者简介: 王子豪,男,1999年生,河南商丘人,在读硕士研究生; 主要研究方向为大型圆锥滚子轴承的滚子接触载荷测量; E-mail: 17550030786@163.com。

仲志丹(通信作者),男,1975年生,河南洛阳人,博士,教授; 主要研究方向为智能轴承技术; E-mail: zzd@haust.edu.cn。

引用格式: 王子豪,仲志丹,刘明辉,等. 基于智能滚子的风电圆锥滚子轴承接触载荷测量方法[J]. 机械强度, 2026, 48(1): 143-149.

WANG Zihao, ZHONG Zhidan, LIU Minghui, et al. Contact load measurement method of wind turbine tapered roller bearings based on intelligent roller[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(1): 143-149.



免费获取

1 智能滚子设计

1.1 智能滚子

智能滚子主要由空心滚子本体、载荷传感器、无线传输模块及供电电池组成,其结构如图1所示。

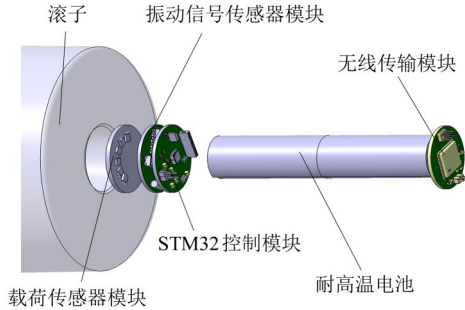


图1 智能滚子结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the intelligent roller structure

本文的研究对象为永磁直驱式风力发电机的上风向轴承。风机主轴系的结构如图2所示。

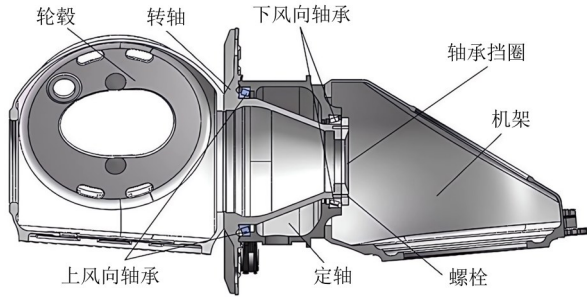


图2 风机主轴系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the wind turbine main shaft system structure

轴承的主要结构参数如表1所示,滚子的凸度类型为对数素线,凸度量 δ 的计算式为

$$\delta = 2 \times 10^{-2} \ln \left[\frac{1}{1 - (2x/226)^2} \right] \quad (1)$$

式中, x 为在滚子有限接触长度上凸度量的位置。

表1 轴承主要结构参数

Tab. 1 Main structural parameters of bearing

参数	值
内径/mm	2 600
外径/mm	3 100
轴承宽度/mm	310
公称接触角/(°)	19
滚子小端直径/mm	99.416
滚子大端直径/mm	104.5
滚子有效长度/mm	226
滚子个数	80

根据风机的实际结构,以轮毂中心建立坐标系,并建立风机主轴力学模型,如图3所示。图3中, O 点为轮毂中心风载荷作用点; O_1 、 O_2 为轴承载荷作用点;

G_z 为转子重力; G_c 为磁拉力; F_{xb} 、 F_{yb} 、 F_{zb} 分别为 O_1 处支点各方向上的载荷; F_{xa} 、 F_{ya} 、 F_{za} 分别为 O_2 处支点各方向上的载荷。

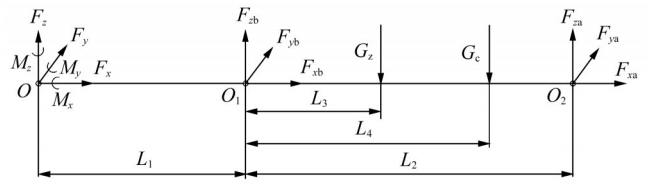


图3 风机主轴力学模型

Fig. 3 Mechanical model of the wind turbine main shaft

列出空间力系平衡方程,求得上、下风向轴承处的支点载荷为

$$\begin{cases} F_{yb} = \frac{1}{L_2} [-F_y(L_1 + L_2) + M_z] \\ F_{zb} = \frac{1}{L_2} [-F_z(L_1 + L_2) + G_z(L_2 - L_3) + G_c(L_2 - L_4) - M_y] \\ F_{ya} = \frac{1}{L_2} [F_y L_1 - M_z] \\ F_{za} = \frac{1}{L_2} [F_z L_1 + G_z L_3 + G_c L_4 + M_y] \end{cases} \quad (2)$$

两轴承的径向力 F_{r1} 、 F_{r2} 的计算式为

$$F_{ri} = \sqrt{F_{yi}^2 + F_{zi}^2}, \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

令两个轴承处的派生轴向力分别为 F_{d1} 、 F_{d2} ,计算式为

$$F_{di} = \frac{F_{ri}}{2Y_i}, \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

式中, Y_1 、 Y_2 均为两轴承的计算系数。

依据轴向力平衡关系,求解上、下风向轴承位置的轴向力。

当 $F_{d1} > F_x + F_{d2}$ 时,

$$\begin{cases} F_{a1} = F_{d1} \\ F_{a2} = F_{a1} - F_x \end{cases} \quad (5)$$

当 $F_{d1} < F_x + F_{d2}$ 时,

$$\begin{cases} F_{a1} = F_{d2} + F_x \\ F_{a2} = F_{d2} \end{cases} \quad (6)$$

给定风机极限载荷数据,应用风机主轴力学模型,得到多组上风向轴承径向和轴向载荷值,取轴承所受最大径向载荷和轴向载荷。

对于圆锥滚子轴承,

$$\begin{cases} F_r = ZQ_{\max} J_r(\varepsilon) \cos \alpha \\ F_a = ZQ_{\max} J_a(\varepsilon) \cos \alpha \end{cases} \quad (7)$$

式中, F_r 、 F_a 分别为轴承径向、轴向载荷; $J_r(\varepsilon)$ 、 $J_a(\varepsilon)$ 分别为径向、轴向载荷积分; Z 为滚子数; Q_{\max} 为轴承最大法向接触载荷。

此处计算采用径向载荷积分,计算出 $F_{i,\tan\alpha_c}/F_a$ (α_c 为轴承公称接触角)。查单列轴承负荷分布积分表,得出 $J_r(\varepsilon)$,代入式(7)计算轴承滚子与滚道的最大法向接触载荷 Q_{\max} [9]。根据计算,滚子外滚道的最大法向接触载荷 Q_{\max} 为 1 150 kN。

1.2 智能滚子机械结构

智能滚子是一种空心圆锥滚子。文献[10]分析了空心度对轴承轴向刚度和径向刚度的影响。当空心度为 0.3 时,空心度对轴承轴向刚度和径向刚度影响较小。与实心滚子相比,轴向刚度和径向刚度下降率均在 5% 以内。为了满足载荷传感器的安装需求,综合考虑后,将智能滚子内孔直径设置为 30 mm。

1.3 智能滚子电路设计及载荷传感器

电路总体设计图及载荷传感器分别如图 4、图 5 所示。载荷传感器是智能滚子的核心部件,载荷传感器所在平面与滚子凸度最高点所在平面重合。

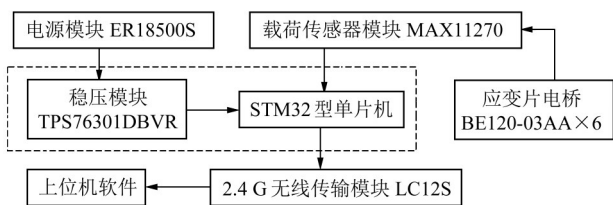


图 4 电路总体设计框图

Fig. 4 Schematic diagram of the overall circuit design

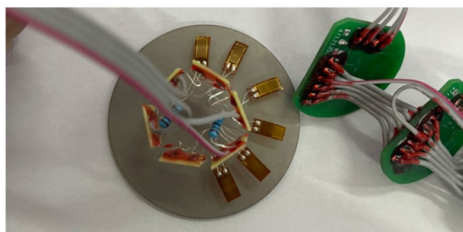


图 5 载荷传感器结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the load sensor structure

载荷传感器由金属圆片和电阻应变片组成,结构如图 5 所示。金属圆片为结构钢材质,直径为 30 mm(误差为 +0.01~+0.05 mm),厚度为 2 mm,与滚子内孔壁采用过盈配合。轻微加热滚子后,可完成载荷传感器的装配。载荷传感器与滚子同步转动。应变片型号为 BE120-05AA-G,可耐 250 °C 高温,敏感栅尺寸为 0.5 mm×1.2 mm,应变极限为 2%。过金属圆片中心点,划 0° 基准线,每隔 30° 划线,标记至 150°。将电阻应变片中部与 0° 基准线对齐粘贴,并保证电阻应变片中部距金属圆片中心点 8 mm,依次粘贴其余 5 个电阻应变片。

相比于在狭小的空心滚子内孔壁粘贴电阻应变片,在外部粘贴电阻应变片操作方便,并可保证粘贴位置的准确性。

2 接触载荷连续测量方法

2.1 空心滚子受载有限元仿真分析

在 Ansys 软件中建立智能滚子有限元网格模型进行分析,如图 6 所示。

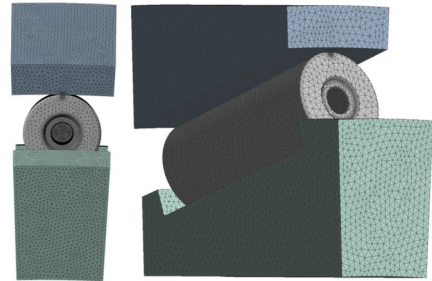


图 6 智能滚子有限元网格接触模型

Fig. 6 Finite element mesh contact model of the intelligent roller

1) 定义材料类型。滚子和滚道的材料为 42CrMo,金属圆片材料为结构钢。

2) 接触对的设置及网格划分。将轴承内圈的外表面和外圈的内表面作为目标面,圆锥滚子为接触面,采用摩擦接触。金属圆片侧边作为“接触面”,滚子内孔壁作为“接触面”,采用摩擦接触,通过添加偏移来模拟金属圆片与内孔壁之间配合的过盈量。采用四面体网格划分,滚道与滚子接触区域的网格尺寸为 0.4 mm,小于二分之一接触半宽,对空心滚子内壁及金属圆片做面网格细化处理。

3) 约束及施加的载荷。对下滚道的表面施加固定约束。在柱坐标系下,将滚子沿轴承旋转中心线的旋转自由度设置为 0。载荷施加方向为外滚道面法向,载荷大小为 1 150 kN。

对智能滚子施加 1 150 kN 法向接触载荷时,在 Ansys 软件中,通过在模型中建立路径,在柱坐标系下提取载荷传感器半径 8 mm 处的径向应变,如图 7 所示。

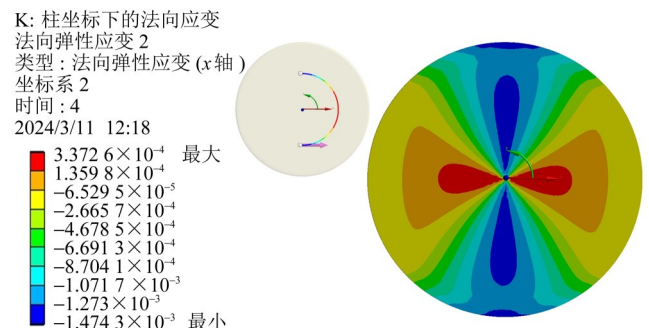


图 7 径向应变云图

Fig. 7 Nephogram of radial strain

有限元模型对称平面与载荷传感器表面相交成一条直线,该直线与定义的路径在两点相交。定义靠近下滚道的点为起始点 0°。根据提取到的数据,以载荷传感器圆周方向角度为横坐标,半径 8 mm 处的径

臂的连接方式,根据式(8),则电桥理论输出为

$$U_o \approx \frac{K}{4} [-0.0004 - 0.0009\cos(2\theta) - 0.0002\cos(4\theta)] U_i \quad (16)$$

若滚子在恒定法向载荷 1 150 kN 作用下,按照图 9 所示的电阻应变片组桥方式和粘贴位置,根据式(8)、式(15),由于消除了式(8)中的第 1 次、2 次谐波,因此电桥的理论输出为

$$U_o \approx -\frac{K}{4} \times 0.0024 \times U_i \quad (17)$$

由式(17)可以看出,在滚子所受载荷恒定的情况下,该组桥方式能够在理论上输出稳定的电压。

使用柱坐标系下金属圆片半径为 8 mm 处的径向应变进行虚拟组桥分析,虚拟应变片和虚拟电桥输出结果如图 10 所示,符合电桥理论输出稳定电压的结果。因此,在固定载荷下,即使滚子发生转动,载荷传感器也能输出稳定的电压,有效地消除了滚子转动对测量结果的影响。

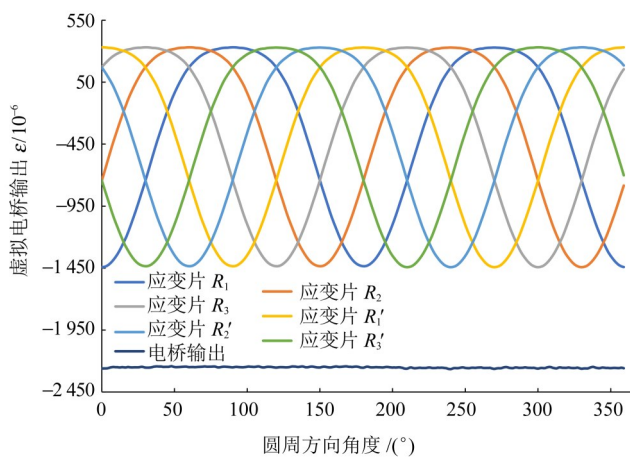


图 10 虚拟电桥输出

Fig. 10 Output of virtual bridge

3 试验分析

智能滚子标定试验台主要由标定试验台、液压机和测量系统组成,如图 11、图 12 所示。

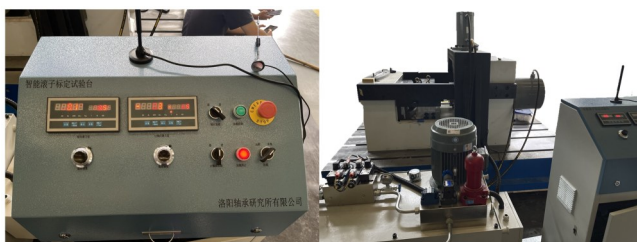


图 11 智能滚子标定试验台和液压机

Fig. 11 Intelligent roller calibration test bench and hydraulic press

通过在标定试验台调整液压机施加的载荷量,液压机压头可向模拟外滚道施加指定的载荷。保持架及其固定结构可以确保滚子在受载时不发生位移,如

图 13 所示。

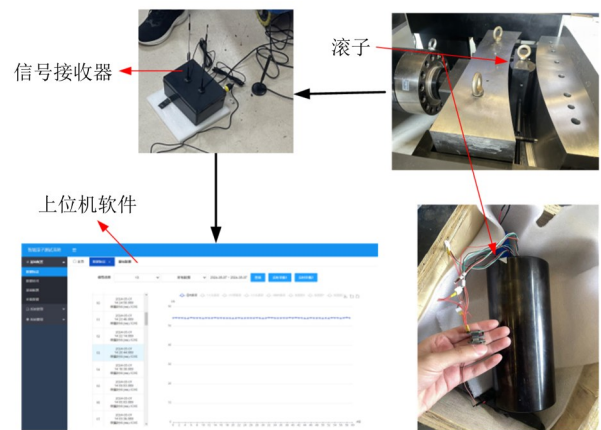


图 12 测量系统

Fig. 12 Measurement system

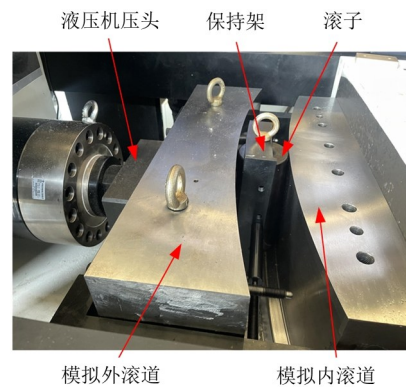


图 13 滚子载荷施加示意图

Fig. 13 Schematic diagram of roller load application

为验证有限元仿真得到的金属圆片径向应变分布规律,将应变片粘贴在金属圆片半径为 8 mm 的位置。然后将金属圆片装配到空心圆锥滚子中,确保金属圆片所在平面与滚子凸度最高点所在平面重合。

在智能滚子标定试验台上,调整液压机载荷,施加 100 kN 的法向载荷。每隔 15° 转动 1 次滚子,采集 1 次数据,共 25 组数据。径向应变实测规律如图 14 所示。与图 8 比较可知,金属圆片的径向应变实测规律与仿真结果一致。

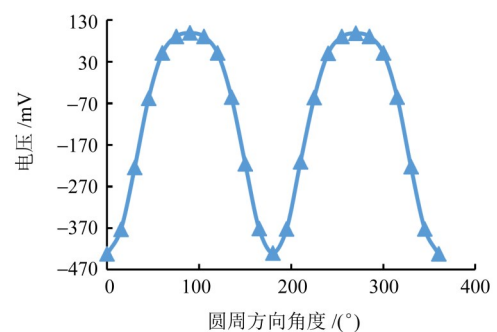


图 14 径向应变实测规律

Fig. 14 Measured patterns of radial strain

对滚子施加 50、150、250、350、450、550 kN 这 6 组法向载荷,记录滚子以 15° 间隔转动 1 周的载荷传感器输出值,如图 15 所示。

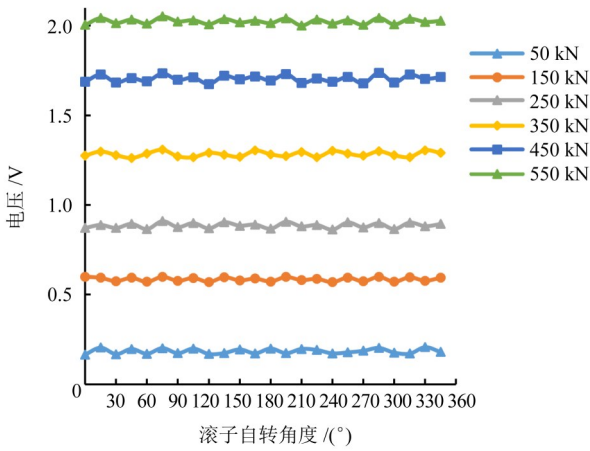


图 15 载荷传感器输出

Fig. 15 Output of the load sensor

设载荷传感器输出电压与接触载荷的关系为

$$U = K_e Q_e + b' \quad (18)$$

式中, Q_e 为外滚道与滚子之间的接触载荷; K_e 为传感器输出灵敏度; b' 为传感器初始零点输出值。

选取 50、150、250、350、450、550 kN 这 6 组法向载荷下,滚子转动后传感器输出电压的均值,得到智能滚子载荷标定曲线,如图 16 所示。

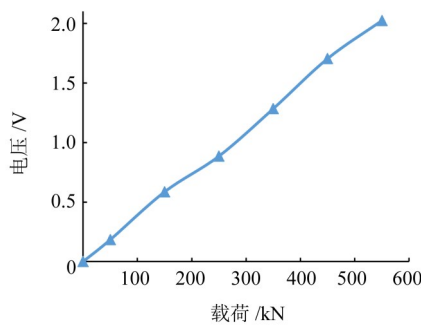


图 16 智能滚子载荷标定曲线

Fig. 16 Calibration curve of the intelligent roller load

对传感器电压输出均值与施加载荷进行线性拟合,拟合关系式为 $U = 0.0037Q_e + 0.0011$,拟合优度 $R^2 = 0.9988$,说明传感器电压输出均值与施加载荷具有良好的线性关系。

4 结论

以大型圆锥滚子轴承为研究对象,提出了一种新的滚子接触载荷测量方法,得出以下主要结论:

1)通过在空心滚子内部集成金属圆片式传感器,利用有限元仿真,得出了金属圆片径向应变随圆周方向角度变化的规律,并通过试验进行了验证。

2)根据金属圆片径向应变随圆周方向角度变化

的规律,设计了特殊电阻应变片电桥,电阻应变片粘贴在金属圆片指定位置,与金属圆片组成载荷传感器。在滚子所受载荷一定时,即使滚子转动,电桥也能输出稳定电压,且输出电压与载荷成线性关系。

3)在传感器标定试验中,对载荷传感器输出电压与施加载荷进行了线性拟合。结果表明,两者具有良好的线性关系,所提方法能够实现滚子接触载荷的测量。

未来,将进一步优化传感器设计和信号处理算法,以提高载荷测量的精度。

参考文献 (References)

- [1] 李云峰,高元安,贾磊. 表面硬化滚道风电主轴轴承的疲劳寿命分析[J]. 太阳能学报,2022,43(6):176-182.
LI Yunfeng, GAO Yuan'an, JIA Lei. Analysis for fatigue life of wind turbine main bearing with surface hardened raceways[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(6): 176-182. (In Chinese)
- [2] 张旭,于茂林,温保岗,等. 基于刚度等效与实体混合的三排圆柱滚子轴承力学模型与修形设计[J]. 轴承,2023(6):36-42.
ZHANG Xu, YU Maolin, WEN Baogang, et al. Mechanical model and profiling design of three row cylindrical roller bearings based on mixing of stiffness equivalence and solid[J]. Bearing, 2023(6): 36-42. (In Chinese)
- [3] 邵毅敏,涂文兵,周晓君,等. 基于嵌入式多参量传感器的智能轴承[J]. 中国机械工程,2010,21(21):2527-2531.
SHAO Yimin, TU Wenbing, ZHOU Xiaojun, et al. Smart bearing based on embedded multi-parameter sensors[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(21): 2527-2531. (In Chinese)
- [4] 松田晋也. 轴承用滚子的状态检测装置、带传感器的滚子轴承装置以及风力发电机:CN103867565B[P]. 2017-10-31.
MATSUDA Shinya. The condition check out gear of bearing roller, the roller bearing device of belt sensor and wind-driven generator: CN103867565B[P]. 2017-10-31. (In Chinese)
- [5] 哈克,范阿姆荣根. 具有集成的载荷检测的滚子:CN109990000B[P]. 2022-05-06.
HAAK, VAN AMERONGEN. Roller with integrated load detection: CN109990000B[P]. 2022-05-06. (In Chinese)
- [6] 石岗,陶建峰,魏齐,等. 低速重载轴承智能滚子的设计与振动特性[J]. 机械设计与研究,2022,38(1):122-127.
SHI Gang, TAO Jianfeng, WEI Qi, et al. Design and vibration characteristic analysis of smart roller for low speed and heavy load bearing[J]. Machine Design & Research, 2022, 38(1): 122-127. (In Chinese)
- [7] 郑皓,王晓力,李立洲. 基于摩擦电-压电耦合压力传感器的轴承内部载荷分布测试方法[J]. 轴承,2024(12):29-34.
ZHENG Gao, WANG Xiaoli, LI Lizhou. Measuring method for internal load distribution of bearings based on triboelectric-piezoelectric coupling pressure sensor[J]. Bearing, 2024(12): 29-34. (In Chinese)

- [8] 陈金海,李伟,张文远,等. 智能滚动轴承监测方法与技术研究现状综述[J]. 机械强度,2021,43(3):509-516.
CHEN Jinhai, LI Wei, ZHANG Wenyuan, et al. Research status of smart rolling bearing monitoring methods[J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(3):509-516. (In Chinese)
- [9] HARRIS T A, KOTZALASMN. 滚动轴承分析[M]. 罗继伟, 马伟, 译. 北京:机械工业出版社, 2009: 144-146.
HARRIS T A, KOTZALASMN. Rolling bearing analysis [M]. LUO Jiwei, MA Wei, Jr. Beijing: Machinery Industry Press, 2009: 144-146. (In Chinese)
- [10] 吴正海,徐颖强,赵兴. 脂润滑空心圆锥滚子轴承刚度特性分析[J]. 轴承,2019(11):10-15.
WU Zhenghai, XU Yingqiang, ZHAO Xing. Analysis on stiffness characteristics of grease-lubricated hollow tapered roller bearings [J]. Bearing, 2019(11):10-15. (In Chinese)
- [11] 朱明隆. 直辐板测力轮对方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015: 10-11.
ZHU Minglong. Research on straight plate instrument wheelset method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015: 10-11. (In Chinese)

Contact load measurement method of wind turbine tapered roller bearings based on intelligent roller

WANG Zihao¹ ZHONG Zhidan^{1,2} LIU Minghui³ HAO Wenlu⁴ GUO Zihao⁵

(1. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

(2. High-end Bearing Collaborative Innovation Center of Henan Province, Luoyang 471039, China)

(3. State Key Laboratory of Aviation Precision Bearings, Luoyang 471039, China)

(4. Luoyang Xinqianglian Slewing Bearing Co., Ltd., Luoyang 471822, China)

(5. College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

Abstract: [Objective] To address the challenge of directly measuring the contact load of large wind turbine tapered roller bearings, the main shaft bearing of a specific model wind turbine is taken as an example to implement intelligent modifications on the bearing rollers. [Methods] Firstly, a load sensor and its associated circuitry were installed within a hollow roller to develop an intelligent roller designed for measuring contact load, along with corresponding load sensors. Secondly, finite element simulations were conducted to derive the radial strain distribution pattern of the metallic disc within the load sensor, followed by virtual bridge assembly simulations. Finally, experimental validation was performed to confirm the radial strain distribution pattern of the metallic disc and sensor calibration tests were conducted. [Results] The results indicate that when subjected to fixed loads, the proposed bridge assembly method effectively mitigates the influence of roller rotation angle on load measurement, allowing for stable voltage output during roller rotation. The proposed measurement methodology provides a novel approach for obtaining contact loads in large tapered roller bearings.

Key words: Tapered roller bearing; Intelligent roller; Contact load measurement; Sensor design

Corresponding author: ZHONG Zhidan, E-mail: zzd@haust.edu.cn

Fund: Major Project of Joint Fund for Science and Technology R&D Program in Henan Province (225101610003); Key R&D Program of Henan Province (231111222900)

Received: 2024-05-09

(编辑:李立)