

引用格式: 卜忠颀, 章滔, 何录忠, 等. 风电主轴配对单列圆锥滚子轴承工作游隙分析 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 116-122. BU Zhongjie, ZHANG Tao, HE Luzhong, et al. Analysis on operating clearance of matched single row tapered roller bearings for wind turbine main shaft [J]. Southern energy construction, 2024, 11(5): 116-122. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.5.12.

## 风电主轴配对单列圆锥滚子轴承工作游隙分析

卜忠颀<sup>1,2,✉</sup>, 章滔<sup>1,2</sup>, 何录忠<sup>1,2</sup>, 刘林<sup>1,2</sup>, 阳雪兵<sup>1,2</sup>, 熊顺<sup>3</sup>

(1. 湖南兴蓝风电有限公司, 湖南湘潭 411101;

2. 海上风力发电装备与风能高效利用全国重点实验室, 湖南湘潭 411101;

3. 湖南精益传动机械设计有限公司, 湖南长沙 410007)

**摘要:** [目的] 单列圆锥滚子轴承双支撑的主轴系结构在风电机组中得到了广泛的应用, 确定合适的轴承工作游隙, 对轴承和主轴系的可靠运行至关重要。[方法] 以某中速永磁风电机组主轴系为研究对象, 建立了轮毂、主轴、上风向轴承和下风向轴承一体化的动力学分析模型; 计算得到了不同轴向游隙下, 轴承滚道寿命、承载区域以及最大接触应力的变化趋势。[结果] 确定了配对单列圆锥滚子轴承理想的轴向工作游隙范围为 $-0.74\sim-0.3$  mm。[结论] 研究结果对轴承和主轴系的可靠运行具有重大意义, 为配对单列圆锥滚子轴承轴向工作游隙的确认提供了方法和参考。

**关键词:** 单列圆锥滚子轴承; 轴向工作游隙; 滚道寿命; 接触应力

中图分类号: TK89; TH133.33

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)05-0116-07

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.5.12

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

## Analysis on Operating Clearance of Matched Single Row Tapered Roller Bearings for Wind Turbine Main Shaft

BU Zhongjie<sup>1,2,✉</sup>, ZHANG Tao<sup>1,2</sup>, HE Luzhong<sup>1,2</sup>, LIU Lin<sup>1,2</sup>, YANG Xuebing<sup>1,2</sup>, XIONG Shun<sup>3</sup>

(1. SinoAzure Wind Power Co., Ltd., Xiangtan 411101, Hunan, China;

2. National Key Laboratory of Offshore Wind Power Equipment and Efficient

Utilization of Wind Energy, Xiangtan 411101, Hunan, China;

3. Hunan Jingyi Transmission Machinery Design Co., Ltd., Changsha 410007, Hunan, China)

**Abstract:** [Introduction] The main shafting structure with double supports of single row tapered roller bearings has been widely used in wind turbines, and determining the appropriate bearing operating clearance is crucial for the reliable operation of bearings and the main shafting. [Method] A dynamics analysis model was established focusing on the main shafting of a medium speed permanent magnet wind turbine, incorporating the hub, main shaft, and both upwind and downwind bearing. The variation trends of bearing raceway life, load area, and maximum contact stress under different axial clearances were calculated. [Result] The ideal axial operating clearance range of matched single row tapered roller bearings has been identified as  $-0.74\sim-0.3$  mm. [Conclusion] The research results have significant implications for the reliable operation of bearings and main shafting, providing a method and reference for determining the axial operating clearance of matched single row tapered roller bearings.

**Key words:** single row tapered roller bearings; axial operating clearance; raceway life; contact stress

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2023-05-19 修回日期: 2023-07-28

基金项目: 国家重点研发计划项目“20兆瓦级海上新型风力发电实现机理及关键技术”(2022YFB4201505)

## 0 引言

由于传统化石能源的过度开采与使用导致气候变化和环境污染等问题日益严重,使得能源开发转向可再生的绿色能源<sup>[1]</sup>。作为新型清洁可再生能源,风力发电的发展备受瞩目<sup>[2]</sup>。随着国内风电技术的进步,风电机组逐渐向大容量、低成本、高可靠性方向发展。主轴轴承是风电机组传动支撑的关键部件<sup>[3-4]</sup>,其配置选型也迎来相应的挑战,围绕主轴轴承工程应用技术的探讨开始受到行业工程师和专家学者的关注。应用在风机主轴系上的主轴轴承种类多样,且都具有很强的承载能力,包括双列调心滚子轴承、三排柱组合轴承、双列圆锥滚子轴承以及单列圆锥滚子轴承等。

随着风电机组平价时代的到来,在保证质量的前提下,对制造成本提出了越来越高的要求<sup>[5]</sup>。为了降低风电机组制造成本,随着机组容量的增大,单列圆锥滚子轴承逐渐作为直驱、半直驱和双馈风电机组传动链的主要轴承选型类型。双支撑的单列圆锥滚子轴承,一般采用背对背的安装方式,两轴承具有一定的跨距,可以减少运行过程中两个轴承受载,且增强风机主轴系对风载倾翻力矩的承受能力。相同兆瓦级别的风电机组中,双支撑单列圆锥滚子轴承可以减小轴承尺寸,其中下风向轴承受载较小,可以采用较小的轴承,具有很好的成本优势。

随着国内各风电整机厂技术的进步,关于主轴系以及主轴轴承已经有大量的研究。申屠东华等<sup>[6]</sup>对大型风电机组传动系统支撑特性进行了分析,详细介绍了单列圆锥滚子轴承支撑轴系的特点。杜静等<sup>[7]</sup>基于 Stribeck 计算方法,分析了主轴轴承接触变形,得到了圆锥滚子轴承的接触应力分布。付大鹏等<sup>[8]</sup>利用 Romax 软件对风电机组主轴轴承接触应力进行了研究。杨剑飞等<sup>[9]</sup>通过对双列球面滚子轴承接触应力的求解,分析了主轴轴承载荷、游隙对轴承接触应力的影响。牛宝祺等<sup>[10]</sup>分析了载荷、转速、润滑脂污染程度对调心滚子轴承疲劳寿命的影响。姜宏伟<sup>[11]</sup>针对径向游隙对风电调心滚子轴承寿命的影响,得到了轴承最佳的工作游隙。李云峰等<sup>[12]</sup>针对直驱机组双支撑的单列圆锥滚子轴承,建立了滚动体载荷分布的分析模型,研究了滚动体凸度对轴承接触应力和沟道寿命的影响。董营等<sup>[13]</sup>对风电圆

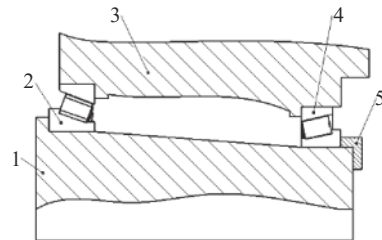
锥滚子轴承安装工艺进行了研究,保证其合理的安装游隙。肖文等<sup>[14]</sup>以 3 MW 机型主轴轴承为对象,分析了游隙变化对双列圆锥滚子轴承承载接触载荷的影响。Zheng 等<sup>[15]</sup>进行了变工况下双列圆锥滚子轴承疲劳寿命研究。章滔等<sup>[16]</sup>基于非线性弹性接触方程,建立滚子-滚道接触模型,进行了三排圆柱滚子轴承滚子修形方法研究。吕润楠等<sup>[17]</sup>建立了具有滚道波纹度的双列圆锥滚子轴承动力学计算模型,分析了波纹度波数、幅值对轴承振动特性的影响。采用单列圆锥滚子轴承双支撑的风机主轴系结构,近几年才开始在我国风电行业广泛应用,其游隙的控制至关重要,目前对此结构轴承游隙的研究还相对较少。

文章基于某中速永磁风力发电机组主轴系,开展相关研究。旨在得到不同轴向游隙下,轴承承载区域、轴承滚道寿命、最大接触应力的变化趋势,来确定配对单列圆锥滚子轴承理想轴向工作游隙范围,提高轴承运行的可靠性。

## 1 单列圆锥滚子轴承特性

单列圆锥滚子轴承具有一定的接触角,可以承受不同方向载荷,具有优秀的承载性能和旋转精度,通常需要配对使用,游隙也需要成对调整。且圆锥滚子轴承对于游隙的要求相当苛刻,游隙调整是否适当,直接关系到轴承最终运行的性能及使用寿命<sup>[18]</sup>。

圆锥滚子轴承游隙可以定义为滚动体和滚道之间的轴向间隙,轴向游隙是衡量圆锥滚子轴承的典型游隙,轴向游隙往往决定轴承寿命、噪声及振动等性能<sup>[19]</sup>。在安装时调整轴向游隙是圆锥滚子轴承的固有优点,对于背对背安装如图 1 所示,通常用轴承压盖 5 对轴承内圈轴向位置进行调整,来完成配对轴承装配轴向游隙的调整,保证配对轴承运行时处



注: 1—主轴; 2、4—单列圆锥滚子轴承; 3—轴承座; 5—轴承压盖。

图 1 单列圆锥滚子轴承布置简图

Fig. 1 Layout diagram of single row tapered roller bearings

于理想轴向工作游隙范围内。

由于风力发电机组主轴轴承运行工况低速、重载且复杂多变,为了增加轴承 2 个有效支撑点的距离,提高系统抗倾翻力矩的能力,单列圆锥滚子轴承采用背靠背装配。适当的预紧有利于提高配对单列圆锥滚子轴承的承载能力<sup>[20]</sup>,风电主轴系为了提高整个系统的刚性,要求配对轴承运行具有一定的预紧,即要求配对轴承运行时为负游隙。

## 2 轴承滚道接触应力

滚动体与沟道接触为有限长线接触,超出了 Hertz 理论的范畴。有限长接触问题的基本方程为<sup>[9]</sup>:

$$\iint_{\Omega} p(x, y) dx dy = Q \quad (1)$$

$$\frac{1}{\pi E'} \iint_{\Omega} \frac{p(x', y') dx' dy'}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}} = \delta - z(x, y) \quad (2)$$

式中:

$\Omega$  ——接触区域;

$p$  ——接触应力(MPa);

$Q$  ——滚动体与沟道的作用力(N);

$E'$  ——当量弹性模量(MPa);

$\delta$  ——滚动体与沟道接触中心弹性趋近量(mm);

$z$  ——滚动体与沟道接触表面的初始距离(mm)。

针对滚子与滚道线接触问题,可以采用罗继伟<sup>[21]</sup>的方法,如图 2 所示,将接触区域沿滚动体轴向( $y$  轴)分割为  $n$  个单元,假定切片区域  $j$  内的接触应力  $p_j$  沿母线方向符合均匀分布,沿  $x$  轴为赫兹分布:

$$p_j(x, y) = p_{oj} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a_j}\right)^2} \quad (3)$$

式中:

$p_{oj}$  ——接触切片  $j$  中心处的最大接触应力(MPa);

$2a_j, 2h_j$  ——接触切片  $j$  的长边和短边(mm)。

切片  $j$  产生的接触载荷为:

$$q_j = 2h_j \int_{-a_j}^{a_j} p_{oj} \sqrt{1 - (x/a_j)^2} dx = \pi a_j h_j p_{oj} \quad (4)$$

柔度系数为:

$$D_{ij} = \int_{-a_j, y_j-h_j}^{a_j, y_j+h_j} \frac{\sqrt{1 - (x'/a_j)^2}}{\sqrt{x'^2 + (y_i - y_j - y')^2}} dx' dy' \quad (5)$$

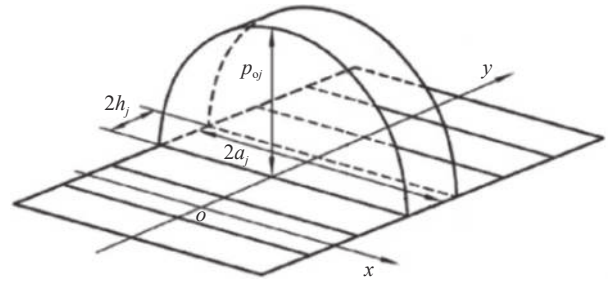


图 2 接触区域坐标系

Fig. 2 Contact area coordinate system

将式(1)、式(2)进行离散化处,可以得到:

$$Q = \pi \sum_{j=1}^n a_j h_j p_{oj} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\pi E'} \sum_{j=1}^n D_{ij} p_{oj} = \delta - Z_i(y_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

式中:

$Z_i(y_i)$  ——滚动体第  $i$  个切片处与沟道表面的初始间距(mm)。

式(6)和式(7)构成了滚子与滚道接触力学模型的方程组,运用数值解法即可得到各切片单元接触应力  $p_{oj}$ 。利用式(3)和式(4)进一步计算得到整个接触区域的应力分布和每个切片的接触载荷。

## 3 轴承滚道疲劳寿命

风电主轴承运行工况复杂多变,在进行轴承滚道疲劳寿命计算时,需要考虑润滑、污染、倾斜、轴承工作游隙等因素的影响。所以采用 ISO/TS 16281 标准<sup>[22]</sup>介绍的方法,进行轴承修正参考额定寿命的计算。

对应于 90% 可靠度的基本参考额定寿命为:

$$L_{10r} = \left\{ \sum_{k=1}^{n_s} \left[ \left( \frac{q_{kci}}{q_{kei}} \right)^{-9/2} + \left( \frac{q_{kce}}{q_{kee}} \right)^{-9/2} \right] \right\}^{-8/9} \quad (8)$$

在基本参考额定寿命的基础上,进行修正得到更符合轴承实际运行的修正参考额定寿命:

$$L_{mnr} = a_1 \left( \sum_{k=1}^{n_s} \left\{ \left[ a_{ISO} \left( \frac{e_C C_{ur}}{P_{ks}}, k \right) \right]^{-9/8} \left[ \left( \frac{q_{kci}}{q_{kei}} \right)^{-9/2} + \left( \frac{q_{kce}}{q_{kee}} \right)^{-9/2} \right] \right\} \right)^{-8/9} \quad (9)$$

式中:

$a_1$  ——可靠度修正系数;

$a_{ISO}$  ——修正系数;

- $e_c$  ——污染系数;
- $C_{ur}$  ——径向载荷疲劳极限(N);
- $\kappa$  ——润滑剂黏度比;
- $P_{ks}$  ——轴承第  $k$  个切片的当量动载荷(N);
- $q_{kci}$ 、 $q_{kce}$  ——内圈和外圈某一轴承切片处的基本额定动载荷(N);
- $q_{kei}$ 、 $q_{kec}$  ——内圈和外圈某一切片处的当量动载荷(N)。

对于多工况载荷谱, 可以分别计算每个工况下的轴承滚道寿命, 在运用 GL 规范介绍方法计算合并修正参考额定寿命为:

$$L_{10mr} = \frac{\sum q_i}{\sum \frac{q_i}{L_{10mri}}} \quad (10)$$

式中:

- $q_i$  ——第  $i$  个载荷等级的分时(h);
- $L_{10mri}$  ——第  $i$  个载荷等级的轴承修正参考额定寿命(h)。

## 4 建模与分析

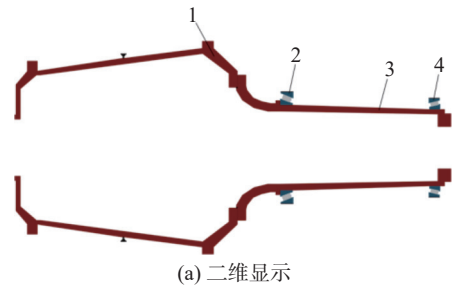
### 4.1 精益传动设计软件介绍

本文利用精益传动设计软件, 进行建模和分析计算。精益传动设计软件可以进行传动系统二维和三维建模, 能涵盖整个传动产品设计流程。吸收了国际设计标准规范, 不仅可以实现齿轮、轴承、轴等传动部件的分析计算, 还可以进行系统 NVH、变形、模态以及转子动力学等关键技术动力学分析计算。支持多任务、多数据快速并行算法, 是一款多物理场耦合的大型传动系统设计分析软件。主要面向汽车、风电、船舶、燃机等行业的国产传动系统仿真计算工业软件。

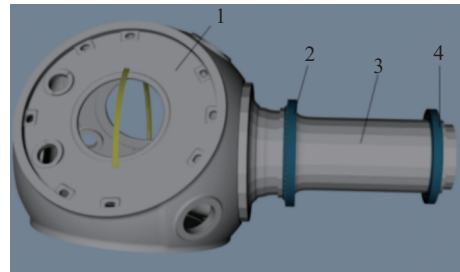
### 4.2 分析模型建立

以某风电机组主轴系为例, 利用精益传动设计软件, 建立了轮毂、主轴、上风向轴承和下风向轴承一体化的分析模型, 如图 3 所示。

其中轮毂和主轴设置好材料属性柔性化处理导入精益传动设计软件, 上下风向轴承可以根据轴承参数在软件中自定义设定添加, 材料属性和轴承参数分别如表 1 和表 2 所示。轮毂中心施加风机叶轮中心载荷, 软件中设置上下风向单列圆锥滚子轴承总轴向游隙, 进行仿真分析。



(a) 二维显示



(b) 三维显示

注: 1—轮毂; 2—上风向圆锥轴承; 3—主轴; 4—下风向圆锥轴承。

图 3 仿真分析模型

Fig. 3 Simulation analysis model

表 1 材料属性

Tab. 1 Material properties

名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
主轴	200	0.30	7 850
轮毂	169	0.28	7 300

表 2 轴承参数

Tab. 2 Bearing parameters

参数	上风向轴承	下风向轴承
内径/mm	1 500	1 350
外径/mm	1 965	1 740
宽度/mm	220	190
重量/kg	1 751	1 153

### 4.3 计算与分析

主轴转速为 8.8 r/min, 采用油润滑, 运动粘度为 320 mm<sup>2</sup>/s, 应用环境为正常清洁度。通过分析模型的计算, 得到了不同轴向游隙下, 上下风向轴承的合并修正参考额定寿命、承载区域以及最大接触应力的变化趋势。图 4~图 6 横坐标负数为正游隙, 表示轴承间隙; 正数为负游隙, 表示轴承预紧。

风电机组疲劳载荷分析形式主要有 3 种: 实时的时间序列、载荷持续分布(LDD)和等效疲劳载荷<sup>[23]</sup>。

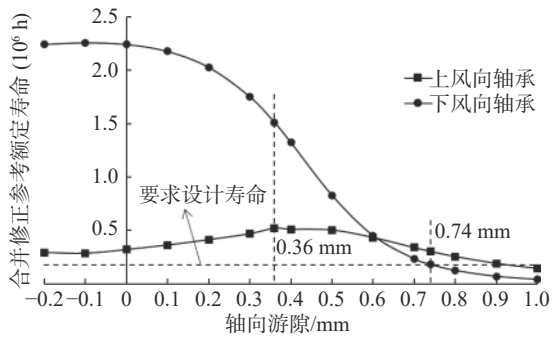


图 4 游隙与轴承寿命关系

Fig. 4 Relationship between clearance and bearing life

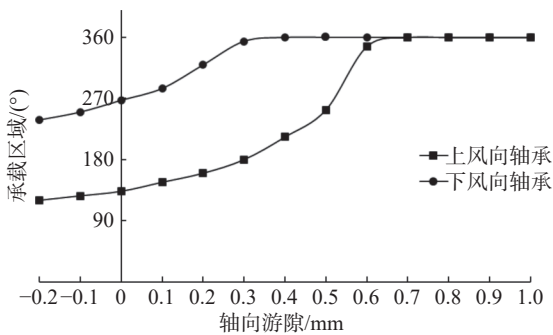


图 5 游隙与承载区域关系

Fig. 5 Relationship between clearance and load area

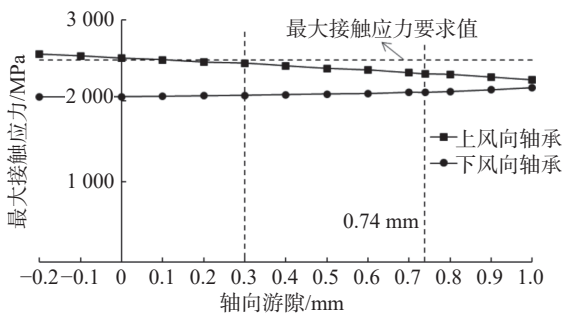


图 6 游隙与最大接触应力关系

Fig. 6 Relationship between clearance and maximum contact stress

主轴轴承滚道疲劳寿命一般采用载荷持续分布进行计算<sup>[24]</sup>,载荷包含力矩和力在各方向上的分量,即  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ , 以及时间和转速。

图 4 为在轮毂中心 LDD 疲劳载荷下,不同轴向游隙下,轴承滚道合并修正参考额定寿命的变化趋势。随着轴向游隙的减小,上风向轴承滚道寿命先增加后减小,下风向轴承滚道寿命逐渐减小;当轴向游隙为  $-0.6$  mm,上风向轴承和下风向轴承滚道寿命接近;当轴向游隙值小于  $-0.74$  mm 时,下风向轴承

滚道寿命低于要求设计寿命 7 300 d;当轴向游隙为  $-0.36$  mm 时,上风向轴承滚道寿命达到最大。因此,上风向轴承和下风向轴承同时满足大于要求设计寿命和轴向工作游隙为负游隙的条件下,合适轴向工作游隙范围为  $-0.74$  mm~ $0$ ,配对轴承寿命最优轴向工作游隙为  $-0.36$  mm。

图 5 为不同轴向游隙下,上风向轴承和下风向轴承承载区的变化。由图可知,随着轴向游隙的减小,上风向轴承和下风向轴承承载区逐渐增大。下风向轴承承载区始终大于  $180^\circ$ ,有超过一半滚子个数在承载区内。轴向游隙大于  $-0.3$  mm 时,上风向轴承承载区小于  $180^\circ$ ,小于一半滚子个数位于承载区。

为了减少单个滚子的接触应力,风电轴承往往要求至少有一半的滚子位于承载区。上风向轴承和下风向轴承同时满足至少有一半滚子位于承载区的轴向工作游隙范围是  $-1$ ~ $-0.3$  mm。

综上所述,同时考虑轴向游隙与寿命、承载区的关系,可以得到配对的上风向轴承和下风向轴承理想的轴向工作游隙范围为  $-0.74$ ~ $0.3$  mm。

图 6 为轮毂中心极限载荷下,不同轴向游隙下,上风向轴承和下风向轴承最大接触应力变化。由图可知,随着轴向游隙减小,上风向轴承最大接触应力逐渐减小,下风向轴承最大接触应力逐渐增大;轴向工作游隙  $-0.74$ ~ $0.3$  mm 范围内,上下风向轴承最大接触应力均小于最大接触应力要求值 2 500 MPa。因此,上述轴向工作游隙范围内,上下风向轴承满足极限的设计要求,进一步证明上述轴向工作游隙是合理的。

## 5 结论

以某中速永磁风力发电机组为例,基于传动系统动力学软件,通过建立轮毂、主轴、上风向轴承和下风向轴承一体化的动力学分析模型,研究了不同轴向游隙下,上下风向轴承滚道寿命、承载区域、接触应力的变化趋势,最终研究得到了该风电机组主轴配对单列圆锥滚子轴承的理想轴向工作游隙范围为  $-0.74$ ~ $0.3$  mm,并在该游隙范围内,上下风向轴承最大接触应力均小于要求值 2 500 MPa。研究结论对轴承和主轴系的可靠运行具有重大意义,为主轴轴承的工作游隙研究确认提供了方法和参考。

## 参考文献:

- [1] 陈嘉豪,尹梓炜,朱容宽,等.漂浮式海上风机平台阻尼结构设计研究[J].南方能源建设,2021,8(3):18-25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.003.  
CHEN J H, YIN Z W, ZHU R K, et al. Design and research on the foundation damping structure of semi-submersible floating offshore wind turbines [J]. Southern energy construction, 2021, 8(3): 18-25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.003.
- [2] 施伟,郑侃,任年鑫.南海海况下半潜浮式风机在故障工况下的动力学响应分析[J].南方能源建设,2018,5(4):12-20. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.002.  
SHI W, ZHENG K, REN N X. Dynamic analysis of semi-type floating offshore wind turbine with failure conditions under metocean conditions in South China Sea [J]. Southern energy construction, 2018, 5(4): 12-20. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.002.
- [3] 王慧.大功率海上风电机组关键部位轴承选型与技术分析[J].风能,2013(12):92-95. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2013.12.043.  
WANG H. Analysis of bearings selections and technical features for key positions in large capacity offshore wind turbines [J]. Wind energy, 2013(12): 92-95. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2013.12.043.
- [4] 张利慧,李殊瑶,李晓波,等.基于时频域特征参数的风电机组滚动轴承故障诊断方法及应用[J].内蒙古电力技术,2024,42(3):13-19. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2024.0035.  
ZHANG L H, LI S Y, LI X B, et al. Diagnostic method of wind turbine rolling bearing failure based on time-frequency domain characteristic parameters and its application [J]. Inner Mongolia electric power, 2024, 42(3): 13-19. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2024.0035.
- [5] 陈方述,阳雪兵,石峰.永磁直驱风力发电机组弯头形机舱优化分析[J].南方能源建设,2023,10(1):154-159. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.020.  
CHEN F S, YANG X B, SHI F. Optimization analysis of permanent-magnet direct-drive wind turbine elbow shape nacelle [J]. Southern energy construction, 2023, 10(1): 154-159. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.020.
- [6] 申屠东华,何先照,卢江跃,等.大型风电机组传动系统支撑方式特性分析[J].装备制造技术,2019(1):129-133. DOI: 10.3969/j.issn.1672-545X.2019.01.034.  
SHENTU D H, HE X Z, LU J Y, et al. Analysis of characteristics of transmission system support of large wind turbine [J]. Equipment manufacturing technology, 2019(1): 129-133. DOI: 10.3969/j.issn.1672-545X.2019.01.034.
- [7] 杜静,江术新,黄强,等.风力发电机主轴轴承载荷分布及接触应力分析[J].机械设计,2014,31(4):64-67. DOI: 10.13841/j.cnki.jxsj.2014.04.014.  
DU J, JIANG S X, HUANG Q, et al. Analysis of load distribution and contact stress of wind turbine main shaft bearing [J]. Journal of machine design, 2014, 31(4): 64-67. DOI: 10.13841/j.cnki.jxsj.2014.04.014.
- [8] 付大鹏,褚加瑞.基于 Romax 的风电机组主轴轴承接触应力分析[J].东北电力大学学报,2018,38(6):62-67. DOI: 10.3969/j.issn.1005-2992.2018.06.011.  
FU D P, CHU J R. Analysis on contact stress for the wind turbines main shaft bearing based on Romax [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2018, 38(6): 62-67. DOI: 10.3969/j.issn.1005-2992.2018.06.011.
- [9] 杨剑飞,李秀珍,欧惠宇,等.基于有限长接触的风电机组主轴轴承接触应力分析[J].轴承,2020(2):1-6. DOI: 10.19533/j.issn1000-3762.2020.02.001.  
YANG J F, LI X Z, OU H Y, et al. Analysis on contact stress of main bearings for wind turbines based on finite length contact [J]. Bearing, 2020(2): 1-6. DOI: 10.19533/j.issn1000-3762.2020.02.001.
- [10] 牛宝祺,李伦,李济顺,等.基于多因素的风电主轴轴承疲劳寿命分析[J].轴承,2022(8):9-14,18. DOI: 10.19533/j.issn1000-3762.2022.08.002.  
NIU B Z, LI L, LI J S, et al. Analysis on fatigue life of main shaft bearings in wind turbines based on multiple factors [J]. Bearing, 2022(8): 9-14,18. DOI: 10.19533/j.issn1000-3762.2022.08.002.
- [11] 姜宏伟.过盈配合下风电机组主轴轴承寿命研究[J].重型机械,2021(1):73-76. DOI: 10.3969/j.issn.1001-196X.2021.01.013.  
JIANG H W. Research on wind turbine main bearing life considering the influence of interference fit [J]. Heavy machinery, 2021(1): 73-76. DOI: 10.3969/j.issn.1001-196X.2021.01.013.
- [12] 李云峰,范雨晴,王高峰,等.风电主轴双支承圆锥滚子轴承疲劳寿命计算[J].轴承,2023(6):26-35. DOI: 10.19533/j.issn1000-3762.2023.06.004.  
LI Y F, FAN Y Q, WANG G F, et al. Fatigue life calculation of tapered roller bearings for doubly supporting wind turbine main shaft [J]. Bearing, 2023(6): 26-35. DOI: 10.19533/j.issn1000-3762.2023.06.004.
- [13] 董莹,吕超,赵登利,等.风机主轴用单列圆锥滚子轴承安装游隙控制工艺[J].轴承,2019(8):19-21,29. DOI: 10.19533/j.issn1000-3762.2019.08.005.  
DONG Y, LÜ C, ZHAO D L, et al. Control process for assembly clearance of single row tapered roller bearings for wind turbine mainshaft [J]. Bearing, 2019(8): 19-21,29. DOI: 10.19533/j.issn1000-3762.2019.08.005.
- [14] 肖文,王忠强,裴世源,等.大兆瓦风电主轴双列圆锥滚子轴承的承载接触机理[J].机械设计与制造,2021(6):90-94. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3997.2021.06.021.  
XIAO W, WANG Z Q, PEI S Y, et al. Contact mechanism of double-row tapered roller bearings of main shaft of wind turbine under loading condition [J]. Machinery design & manufacture, 2021(6): 90-94. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3997.2021.06.021.
- [15] ZHENG J Y, JI J C, YIN S, et al. Fatigue life analysis of double-row tapered roller bearing in a modern wind turbine under

- oscillating external load and speed [J]. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part C: journal of mechanical engineering science*, 2020, 234(15): 3116-3130. DOI: 10.1177/0954406220911966.
- [16] 章滔, 阳雪兵, 何录忠, 等. 风电机组回转支承滚子修形曲线设计方法研究 [J]. *机械强度*, 2021, 43(1): 183-190. DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2021.01.027.
- ZHANG T, YANG X B, HE L Z, et al. Research on the design method of roller modification curve for wind turbine [J]. *Journal of mechanical strength*, 2021, 43(1): 183-190. DOI: 10.16579/j.issn.1001.9669.2021.01.027.
- [17] 吕润楠, 郝旭, 于长鑫, 等. 双列圆锥滚子轴承滚道表面波纹度对轴承振动特性的影响研究 [J]. *振动与冲击*, 2022, 41(20): 126-132. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.20.016.
- LÜ R N, HAO X, YU C X, et al. Effects of vibration characteristics of a double row tapered roller bearing with raceway surface waviness [J]. *Journal of vibration and shock*, 2022, 41(20): 126-132. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.20.016.
- [18] 孟高强. 浅析配对单列圆锥滚子轴承的应用 [J]. *装备制造技术*, 2016(12): 176-178. DOI: 10.3969/j.issn.1672-545X.2016.12.058.
- MENG G Q. The application of matching single row tapered roller bearing is analyzed [J]. *Equipment manufacturing technology*, 2016(12): 176-178. DOI: 10.3969/j.issn.1672-545X.2016.12.058.
- [19] 陈建斌. 圆锥滚子轴承轴向游隙对接触应力影响分析 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2018.
- CHEN J B. Influence of axial clearance of tapered roller bearings on contact stress [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2018.
- [20] 彭智. 圆锥滚子轴承接触力学特性分析及优化设计 [D]. 西安: 长安大学, 2021. DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2021.001840.
- PENG Z. Tapered roller bearing contact mechanics characteristics analysis and optimization design [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. DOI: 10.26976/d.cnki.gchau.2021.001840.
- [21] 罗继伟, 罗天宇. 滚动轴承分析计算与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- LUO J W, LUO T Y. Analysis and application of rolling bearing [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [22] ISO. Rolling bearings-methods for calculating the modified reference rating life for universally loaded bearings: ISO/TS 16281: 2008 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2008.
- [23] 许移庆. 风电机组疲劳载荷影响因素分析(三) [J]. *风能*, 2013(10): 82-86. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2013.10.016.
- XU Y Q. Analysis of impact factors on wind turbine fatigue loads (III) [J]. *Wind energy*, 2013(10): 82-86. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2013.10.016.
- [24] 李英昌, 刘桂然, 员一泽. 风力发电机主轴轴承加速寿命试验研究 [J]. *机械*, 2023, 50(3): 14-20. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0316.2023.03.003.
- LI Y C, LIU G R, YUAN Y Z. Study on accelerated life test of main shaft bearing of wind turbine [J]. *Machinery*, 2023, 50(3): 14-20. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0316.2023.03.003.

---

作者简介:



卜忠颀

卜忠颀(第一作者, 通信作者)

1991-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事风力发电机组传动系统研发工作(e-mail)395664124@qq.com。

章滔

1988-, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事风力发电机组传动链相关研究工作(e-mail)zhangtao@hewp.com.cn。

何录忠

1989-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事风力发电机组传动链相关研究工作(e-mail)heluzhong@hewp.com.cn。

刘林

1989-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事风力发电机组传动链相关研究工作(e-mail)liulin@hewp.com.cn。

阳雪兵

1981-, 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为直驱型风电机组整机设计与传动链结构与系统动力学(e-mail)yangxuebing@hewp.com.cn。

熊顺

1985-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事齿轮传动的相关工作(e-mail)avictt\_xs@163.com。

(编辑 赵琪)