

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.09.015

风电机组变桨轴承的动态柔性特性研究*

何先照^{1,2}, 刘 勇^{1,2}, 汤永江^{1,2}, 余清清^{1,2}, 朱长江^{1,2}

(1. 浙江运达风电股份有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 浙江省风力发电技术重点实验室, 浙江 杭州 310000)

摘要:针对传统变桨轴承方法中的刚性假设不能反应变桨轴承动态运行特点的问题,引入了在线测试与仿真分析技术,对变桨轴承动态柔性特性进行了研究。分析了变桨轴承运行的受载特点,提出了一种基于应变载荷测试与位移传感器的在线测试方法,以测试风电机组不同功率下变桨轴承内外圈轴向位移、径向位移和载荷;建立了考虑周边结构与变桨轴承柔性的变桨系统有限元模型,并以在线测试所得载荷作为有限元分析输入载荷,进行了仿真分析;最终对不同功率下的变桨轴承轴向位移、径向位移测试数据与仿真数据进行了对比分析。研究结果表明:变桨轴承载荷、变桨轴承内外圈轴向位移、径向位移随风轮转动呈现周期性交替变化规律,不同位置变化规律特点不同,体现了变桨轴承的动态柔性特性;该特性可应用于变桨轴承可靠性的研究。

关键词:风电机组;变桨轴承;轴向位移;径向位移;动态柔性特性

中图分类号:TH133.3;TH113;TM315

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)09-1080-06

Dynamic and flexible characteristics of pitch bearing in wind turbine

HE Xian-zhao^{1,2}, LIU Yong^{1,2}, TANG Yong-jiang^{1,2}, YU Qing-qing^{1,2}, ZHU Chang-jiang^{1,2}

(1. Zhejiang Windey Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 2. Key Laboratory of Wind Power Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the dynamic characteristics of pitch bearing could not be reflected with traditional pitch bearing analyzing method due to the rigid assumption, online test and numerical simulation techniques were introduced to study the dynamic and flexible characteristics of pitch bearing. The characteristics of load distribution in working pitch bearing were studied, and an online test method based on strain-load measurement and displacement sensor was proposed, to measure the axial and radial displacements of internal and external rings, and the load of pitch bearing at various powers. A finite element model of pitch system was developed with the flexibilities of pitch bearing and surrounding structures incorporated, and finite element analyses were performed with the tested loads as inputs. Finally the tested and simulated data of the axial and radial displacements at different positions of pitch bearing at different powers were compared. The results indicate that the load, axial and radial displacements of pitch bearing change regularly at different positions with different characteristics as the wind rotor operates, which shows the dynamic and flexible characteristics of the pitch bearing, and such characteristics can be used to guide the study of pitch bearing reliability.

Key words: wind turbine; pitch bearing; axial displacement; radial displacement; dynamic and flexible characteristics

0 引 言

在风电行业变桨轴承的服役过程中,由于出现变桨轴承套圈断裂以及保持架断裂以及开裂的问题,使风电机组变桨轴承运行安全性及稳定性受到广泛的关注^[1-3]。

风电机组变桨轴承失效形式,究其根源是对风电机组运行工况与变桨轴承运行规律的认识不足。在以往的变桨轴承设计时,通常将变桨轴承周围联接件视为刚性联接,沿用通用轴承设计标准,侧重变桨轴承滚道承载能力、寿命设计的评估,未能充分考虑变桨轴承

收稿日期:2019-12-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1501105)

作者简介:何先照(1984-),男,安徽合肥人,工程师,主要从事风力发电机组传动链设计方面的研究。E-mail:hexianzhao145@163.com

内外套圈强度、疲劳、刚度问题,给变桨轴承运行带来安全隐患。随着有限元(FEA)技术不断发展,变桨轴承及变桨系统联接件刚性假设条件被打破^[4],国内外学者开展了 FEA 技术研究,为更精准计算变桨轴承套圈受载^[5-8]、疲劳寿命^[9-12]以及刚度提供了有效计算方法。

鉴于 FEA 技术已广泛应用于变桨轴承的设计,为更好地将仿真、测试技术进行融合,笔者引入载荷测试技术,分析风电机组不同运行功率下变桨轴承轴向位移、径向位移的变化特点,探寻风电机组变桨轴承动态柔性特性的规律。

1 数据采集测试方案

1.1 接近开关采集设备及通道配置

笔者选取接近开关作为位移传感器,用于检测被

测物体与接近开关相对位移。信号采集设备涉及主采柜、轮毂电流测试柜、接近开关等。电器接线主要为轮毂电流柜与 16 个接近开关传感器接线,轮毂电流柜 230 VAC 供电接线,轮毂电流柜与主采柜 CAN 通讯接线,主采柜 230 VAC 供电接线。由于轮毂电流柜固定在风轮轮毂内,轮毂电流柜与主采柜 CAN 通讯接线要经过滑环备用通道,通道配有两路 CAN 接口,CAN1 串联 120 Ω 电阻表示终端,CAN2 连接滑环备用通道,再与主采集柜连接;轮毂电流柜供电则由轮毂内 230VAC 供电,接入轮毂电流柜供电电源接口。

轮毂电流测试柜与主采柜共配 16 个通道,可分别接 16 个接近开关,同时采集 16 个监测点的位移,4 路电源为 16 个接近开关供电。

其接线原理图如图 1 所示。

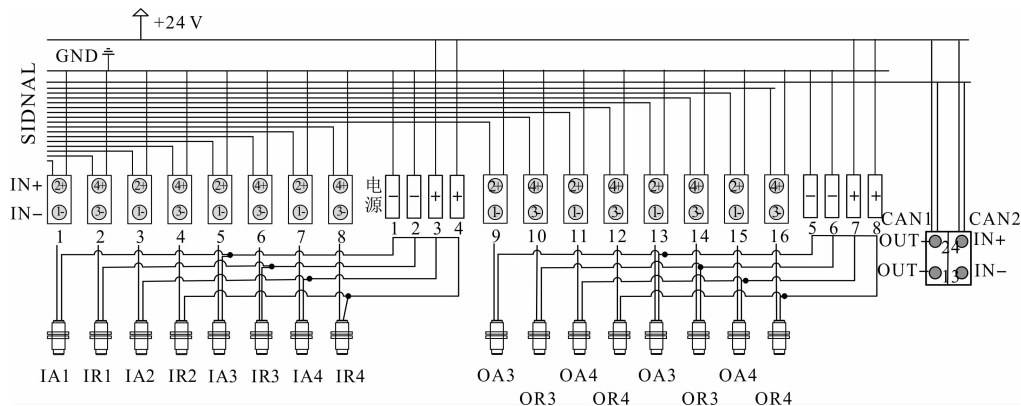


图1 通道配置

测试共用到轮毂电流测试柜 4 个点,用于测量变桨轴承内外圈相对位移测量。

1.2 变桨轴承位移测试方案

在受载运行过程中,为测量变桨轴承内外圈相对

位移变化情况,可将接近开关传感器安装于支架后固定在轮毂上,用于测量变桨轴承内外圈轴向径向相对位移,如图 2 所示。

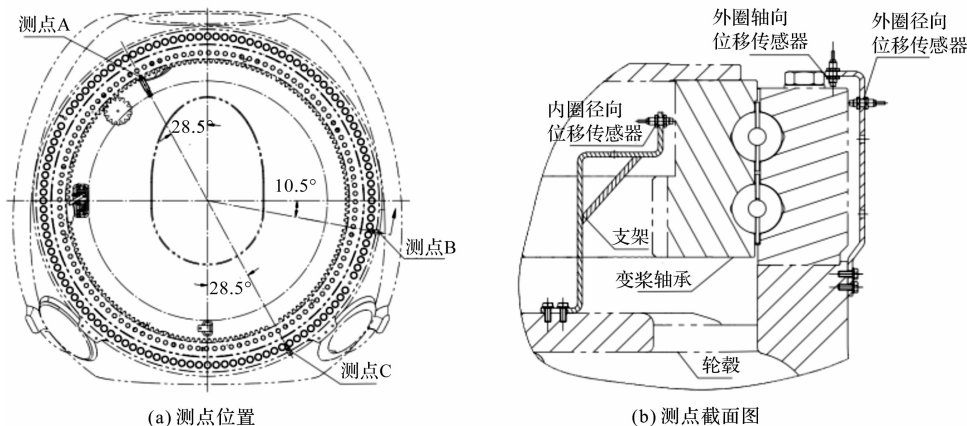


图2 测点及位移传感器布置图

图 2 中,A、B、C 三点作为测试对象,共 4 个位移传感器,分别为 A 点内圈径向位移传感器 1 个,B 点外

圈轴向径向位移传感器各 1 个,C 点外圈径向位移传感器 1 个。

1.3 叶根载荷测试方案

根据国际电工委员会编制的风电机组载荷测试相关标准规定,变桨轴承的载荷主要来自叶根的挥舞与摆振弯矩,可通过在叶根安装 T-型全桥应变片测量变桨轴承在运行过程中所受的弯矩,应变桥路及应变片安装位置如图 3 所示。

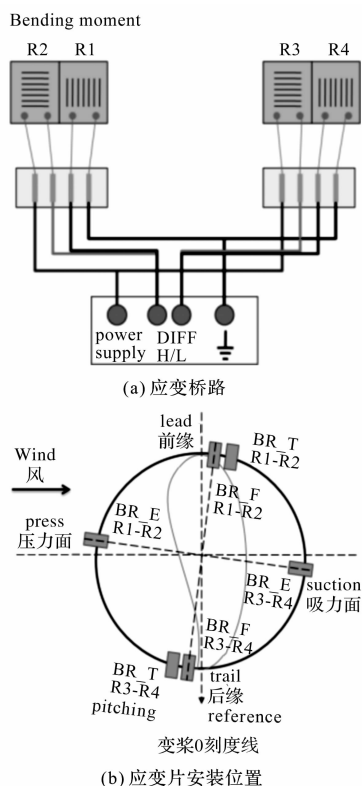


图 3 应变桥路及应变片安装位置

图 3 中,在每个叶根的挥舞和摆振方向各安装 2 组应变片进行弯矩测量;应变片安装于叶根圆柱体 4

等分位置,即距离叶根螺栓最深处 0.5 m 处。

2 有限元模型建立

笔者将变桨轴承置于桨叶叶根、轮毂、联接螺栓、联接圆盘等中,以系统地分析变桨轴承。

变桨系统模型及变桨轴承有限元模型局部剖视图如图 4 所示。

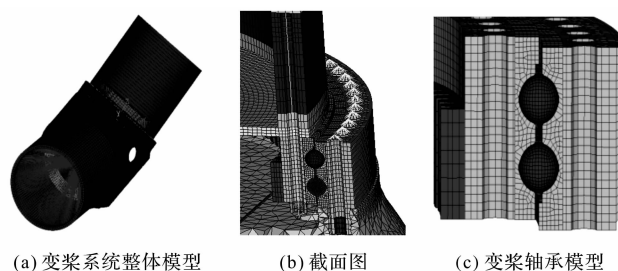


图 4 有限元模型

3 测试结果与仿真结果对比

3.1 位移测试数据统计

为研究不同功率段下变桨轴承内外相对位移情况,统计风电机组运行各个功率段下数以万级测试数据,笔者将功率按每隔 100 kW 进行分段,读取不同功率段下各位移传感器数据,并对各区段数据进行统计,求其平均值及标准偏差,用于评估变桨轴承在运行过程中各测点轴向位移、径向位移变化情况,并选取 4 个功率段作为研究对象。

各点的数据统计结果如表 1 所示。

表 1 各测点位移变化统计

功率段/kW	平均功率 /kW	平均风速 /(m·s ⁻¹)	测点 A 径向		测点 B 径向		测点 B 轴向		测点 C 径向	
			平均值/mm	标准偏差	平均值/mm	标准偏差	平均值/mm	标准偏差	平均值/mm	标准偏差
600 ~ 700	651	5.44	3.70	0.05	3.65	0.19	3.77	0.05	3.81	0.08
1 000 ~ 1 100	1 047	6.13	3.63	0.05	3.65	0.19	3.77	0.04	3.82	0.09
1 300 ~ 1 400	1 350	6.57	3.56	0.06	3.65	0.20	3.77	0.04	3.82	0.09
1 600 ~ 1 700	1 655	7.04	3.53	0.05	3.66	0.20	3.77	0.04	3.83	0.10

3.2 载荷测试数据提取

依据国际电工委员会风电机组设计规范叶根坐标系定义,笔者将 3 片桨叶叶根摆振与挥舞弯矩分别标记为 Mx_1 、 My_1 、 Mx_2 、 My_2 、 Mx_3 、 My_3 。

在风电机组运行过程中,变桨轴承承受对称循环摆振载荷与脉动循环挥舞载荷叶轮旋转一圈为一个循环周期,如图 5 所示。

3.3 有限分析数据提取

笔者按功率等级 650 kW、1 050 kW、1 350 kW、1 650 kW,分别提取一个循环周期载荷作为有限元输

入载荷,如表 2 所示。

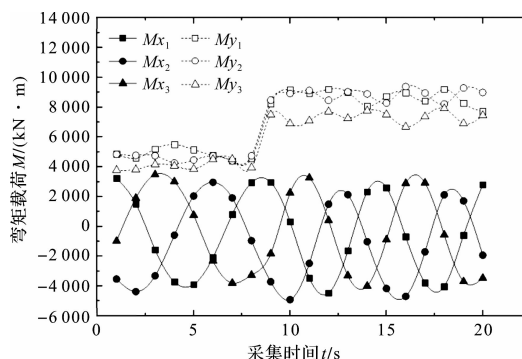


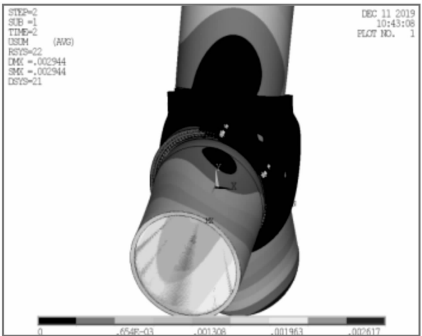
图 5 变桨轴承时序载荷

表 2 有限元模型输入载荷

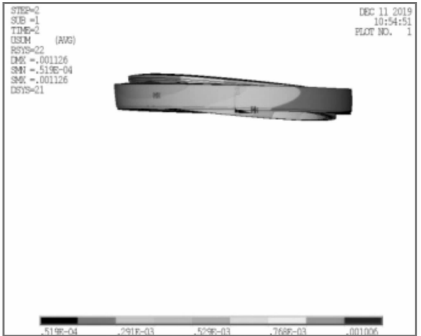
功率/kW	$Mx_1/\text{kN} \cdot \text{m}$	$My_1/\text{kN} \cdot \text{m}$	$Mx_2/\text{kN} \cdot \text{m}$	$My_2/\text{kN} \cdot \text{m}$	$Mx_3/\text{kN} \cdot \text{m}$	$My_3/\text{kN} \cdot \text{m}$
650	3 223	4 853	-3 533	4 836	-988	3 776
	1 523	4 583	-4 377	4 770	1 899	3 817
	-1 562	5 198	-3 311	4 748	3 478	4 161
	-3 722	5 496	-583	4 253	3 001	4 056
	-3 894	5 153	2 039	4 457	756	3 852
	-2 083	4 771	2 960	4 731	-2 308	4 495
	808	4 395	1 912	4 398	-3 798	4 516
	2 943	4 555	-958	4 740	-3 264	3 945
1 050	3 172	5 978	-3731	6 283	-1 149	4 611
	1 045	6 320	-4 524	6 100	2 106	4 982
	-2 441	6 533	-2 817	5 678	3 516	5 267
	-4 147	6 575	420	5 717	2 245	5 163
	-3 210	6 088	2 615	6 110	-1 015	5 274
	-168	5 798	2 174	6 105	-3 562	5 360
	2 627	5 907	-6 70	6 284	-3 617	5 017
	3 133	6 017	-3 758	6 251	-1 064	4 903
1 350	3 096	6 334	-1 911	7 548	-3 219	5 673
	2 509	7 277	-4 764	8 085	541	4 418
	-784	7 527	-4 192	6 998	3 147	5 263
	-4 017	8 296	-936	5 821	3 056	6 134
	-4 048	7 516	2 093	6 522	159	6 397
	-1 028	5 805	2 442	7 481	-3 357	6 529
	2 302	6 337	-343	7 570	-3 885	6 142
	3 110	7 234	-3 792	7 438	-1 250	4 703
1 650	2 647	7 755	-1 365	8 179	-3 593	6 541
	2 521	8 114	-4 448	7 844	-93	5 779
	-778	7 978	-4 265	7 950	2 992	6 354
	-3 960	7 914	-1 022	7 348	2 863	6 533
	-3 865	7 728	2 092	7 686	-343	6 362
	-520	7 015	2 019	7 805	-3 637	6 091
	2 646	7 173	-1 185	7 710	-3 605	5 901
	2 692	7 317	-4 211	7 090	-417	5 621

笔者将表 2 的载荷加载到变桨系统有限模型中,分析变桨轴承内外圈相对位移情况,读取不同功率下

各循环工况仿真结果,结果显示变桨轴承内外圈相对位置随载荷变化而变化,如图 6 所示。



(a) 变桨系统有限仿真结果



(b) 循环工况一仿真结果

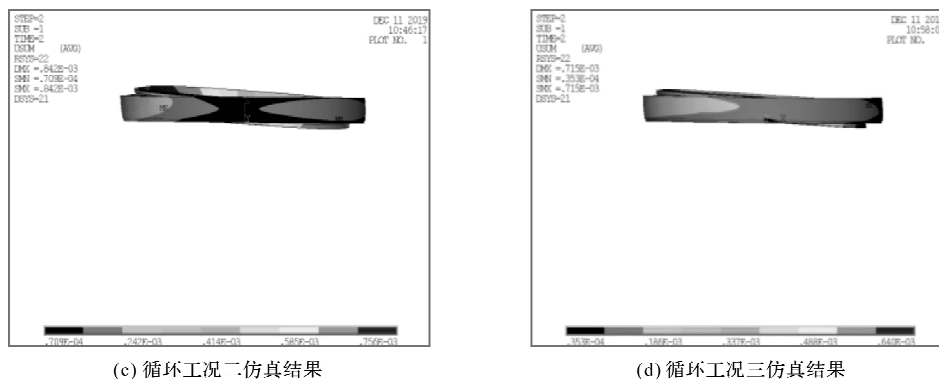


图 6 有限元仿真结果

从有限元模型中,笔者读取不同功率载荷下测点 A 径向、测点 B 轴向、测点 B 径向、测点 C 径向相对应的轴向位移、径向位移。

各测点的相对位移如表 3 所示。

表 3 有限元仿真结果

功率 /kW	测点 A 径向 /mm	测点 B 径向 /mm	测点 B 轴向 /mm	测点 C 径向 /mm
650	0.06	0.12	0.00	0.03
	-0.04	0.07	0.00	0.03
	-0.17	0.04	0.00	0.04
	-0.21	0.06	0.01	0.04
	-0.20	0.06	0.00	0.02
	-0.16	0.03	0.00	0.00
	0.00	0.04	0.00	0.00
	0.08	0.11	0.00	0.01
	0.02	0.13	0.00	0.03
	-0.08	0.08	0.00	0.05
1 050	-0.21	0.05	0.00	0.04
	-0.24	0.07	0.00	0.02
	-0.21	0.05	0.00	0.00
	-0.09	0.03	0.00	0.00
	0.03	0.11	-0.01	0.02
	0.02	0.12	0.00	0.03
	0.04	0.12	-0.01	0.01
	-0.07	0.13	0.00	0.05
	-0.19	0.06	0.00	0.06
	-0.30	0.08	0.01	0.05
1 350	-0.26	0.07	0.00	0.00
	-0.14	0.01	0.00	-0.03
	0.02	0.09	-0.01	0.00
	-0.03	0.14	0.00	0.05
	0.00	0.11	-0.01	0.02
	-0.08	0.13	0.00	0.06
	-0.19	0.06	0.00	0.04
	-0.26	0.07	0.00	0.01
	-0.26	0.07	0.00	-0.01
	-0.14	0.04	0.00	0.00
1 650	0.01	0.11	-0.01	0.02
	-0.02	0.12	0.00	0.05

3.4 测试与仿真结果对比分析

变桨轴承载荷承受对称循环摆振载荷与脉动循环挥舞载荷,电机组叶轮旋转一周,变桨轴承承受一次交变载荷,变桨轴承各点相对位移做一次循环。笔者对表 3 中各功率下一个循环周期各测点相对位移求平均,结果如表 4 所示。

表 4 各载荷下测点相对位移均值

功率均值 /kW	测点 A 径向 /mm	测点 B 径向 /mm	测点 B 轴向 /mm	测点 C 径向 /mm
650	-0.080	0.065	0.000	0.020
1 050	-0.095	0.079	0.000	0.023
1 350	-0.115	0.087	-0.001	0.023
1 650	-0.118	0.087	-0.001	0.024

将表 1 实测数据与表 4 有限元仿真数据进行对比,结果如下:

(1)对比测点 A 与测点 B、C 可知,实测数据与仿真数据均表明,随着风电机组功率的增大,变桨轴承内外圈相对位移随着增大,同载荷下变桨轴承内圈相对于变桨轴承外圈相对位移更大;

(2)对比 B 测点轴向与径向位移可知,实测数据测点 B 径向标准偏差要大于测点 B 轴向标准偏差,同时仿真数据也表明 B 点径向位移大于轴向位移,由此可见变桨轴承外圈径向位移大于轴向位移;

(3)对比各功率下实测位移与仿真位移数据可知,各功率下一个循环周期变桨轴承外圈轴向位移、径向位移代数和虽在数值上存在差异,但基本维持不变;变桨轴承内圈径向相对位移随功率增大而增大,但变化趋势一致,均向被测点靠近,载荷越大越接近被测点。

(下转第 1120 页)

本文引用格式:

何先照,刘 勇,汤永江,等.风电机组变桨轴承的动态柔性特性研究[J].机电工程,2020,37(9):1080-1084,1120.

HE Xian-zhao, LIU Yong, TANG Yong-jiang, et al. Dynamic and flexible characteristics of pitch bearing in wind turbine[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(9): 1080-1084, 1120.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>