

引用格式: 刘明, 阳雪兵, 张学文, 等. 兆瓦级风力发电机组偏航制动系统摩擦特性试验分析 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(1): 83-90. LIU Ming, YANG Xuebing, ZHANG Xuewen, et al. Experimental analysis on friction characteristics of MW wind turbine generator yaw braking system [J]. Southern energy construction, 2025, 12(1): 83-90. DOI: 10.16516/j.ceec.2023-296.

兆瓦级风力发电机组偏航制动系统摩擦特性 试验分析

刘明^{1,2,✉}, 阳雪兵^{1,2}, 张学文^{1,2}, 黄振荣^{1,2}, 卜忠颀^{1,2}

(1. 哈电风能有限公司, 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)

摘要: [目的] 风电偏航制动系统具有低压偏航和高压重载的应用工况, 摩擦副之间的摩擦性能受到机组偏航制动部件之间各参数影响。[方法] 基于盘式制动器的拖磨试验台, 模拟风机不同工况下制动器运行情况, 研究了不同材料对偶件、同种对偶件材料不同压力、速度和温度下的有机复合材料摩擦特性, 并从摩擦学角度揭示了不同参数对摩擦系数的影响因素。[结果] 结果表明: 在同等表面参数下, 不同对偶件材料对摩擦系数有较大影响; 在同种对偶件材料情况下, 制动压力和摩擦副相对运动速度越大摩擦系数越小, 且制动压力对摩擦系数影响因子更大; 摩擦系数受温度影响较大, 摩擦副之间温度越高摩擦系数往往越小。[结论] 此研究为风机偏航制动系统的参数选用及制动控制逻辑提供了重要参考思路和依据。

关键词: 风电制动系统; 对偶件材料; 摩擦系数; 制动压力; 摩擦副温度

DOI: 10.16516/j.ceec.2023-296

文章编号: 2095-8676(2025)01-0083-08

CSTR: 32391.14.j.ceec.2023-296

中图分类号: TK8; TM315



论文二维码

Experimental Analysis on Friction Characteristics of MW Wind Turbine Generator Yaw Braking System

LIU Ming^{1,2,✉}, YANG Xuebing^{1,2}, ZHANG Xuewen^{1,2}, HUANG Zhenrong^{1,2}, BU Zhongjie^{1,2}

(1. Harbin Electric Corporation 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)

Abstract: [Objective] The wind turbine generator (WTG) yaw braking system has application in low-pressure yaw and high-pressure heavy load, and the friction performance between friction pairs is influenced by various parameters between the components of the yaw braking system. [Method] Based on the friction test bench of disc brakes, this paper simulated the operation of the brakes under different working conditions of the WTG, studied the friction characteristics of organic composite materials under different pressures, velocities and temperatures for dual components of same and different materials, and revealed the influencing factors of different parameters on friction coefficient from the perspective of tribology. [Result] The results show that under the same surface parameters, different dual component materials have a significant impact on the friction coefficient; The friction coefficient decreases with the increase of braking pressure and relative velocity of the friction pair and the braking pressure has a greater impact factor on the friction coefficient; The friction coefficient is greatly affected by temperature, and the higher the temperature between the friction pairs, the smaller the friction coefficient. [Conclusion] The research results have important theoretical significance and practical value for the parameter selection and braking control logic of the wind turbine generator yaw braking system.

收稿日期: 2023-10-30 修回日期: 2024-03-22

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)

Key words: wind turbine generator braking system; dual component material; friction coefficient; brake pressure; friction pair temperature

2095-8676 © 2025 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/>).

0 引言

风力发电作为可持续发展的清洁能源之一,近 10 年在我国得到了快速的发展^[1-2]。风电使用盘式制动器是从工业制动器演变而来,在前期的应用中出现了漏油、缸体开裂等各种问题^[3-4]。随着技术的发展,国内外液压制动器的可靠性均得到了极大的提升,但风电制动器具有高压锚定和低压偏航的运行工况,且制动性能与各制动器之间匹配、环境温度及对偶面工况等有较大关联,偏航制动过程中容易出现偏航噪声等问题,风电刹车的性能是未来制动系统主要研究及需要解决的问题。

制动是一个复杂的耦合系统,有众多研究人员从各角度分析了偏航系统的问题。文献 [5-6] 通过噪声产生的机理原因和偏航系统常见故障分析了偏航制动异响。文献 [7-9] 通过建立偏航系统扭振或摩擦制动系统模型等方式分析了失稳振动。文献 [10-11] 通过有限元方法分析得到了摩擦片接触面等效米塞斯应力和温度分布曲线,得出了延长偏航制动器摩擦片使用寿命的方法。文献 [12] 研究了沟槽型表面织构尺寸及分布对摩擦噪声的影响。文献 [13-15] 研究了金属组元和有机负荷组元对刹车片摩擦性能的影响。

盘式制动器在汽车和工程领域都得到了较为广泛的应用,因此对盘式制动器刹车片也有较多的研究。文献 [16] 提出质量与刚度对摩擦噪声有较大影响,并研究了刹车片不同背板结构和摩擦材料对刹车噪声的影响。文献 [17] 通过试验方法,研究了不同速度和加速度下 4 种新旧刹车片材料的粘滞滑动特性和振动噪声之间的关系。文献 [18] 通过有限元和试验的方法验证了,相比于制动速度,制动时的接触角度对于噪声的产生起主要作用。文献 [19] 通过建立多自由度方程计算了摩擦力对制动机构自激振动的影响,为制动力与摩擦噪声之间的关系提出了新的计算模型。

但是,关于水平布置的盘式制动器摩擦性能与

不同工况之间关系的研究文献较少,针对当前研究不足,文章展开了大量的制动试验,探究刹车片在不同工况下摩擦特性,通过试验结果的分析,从摩擦学角度揭示了风电刹车摩擦性能的主要影响因素及其规律。

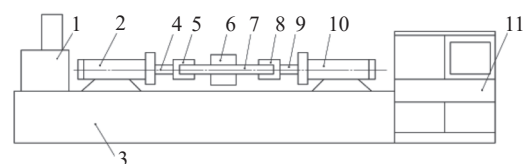
1 试验部分

1.1 试验装置

本文采用风力发电机偏航刹车片试验机模拟真实制动工况,如图 1 所示。该试验台运用稳定的液压驱动技术和现代测量测控技术可完成不同速度(5 ~ 19 mm/s)、不同压力(1 ~ 20 MPa)的动摩擦系数、静摩擦系数、摩擦盘温度和摩擦制动力矩等项目的测试。其中液压驱动采用 CHBT-60T 型压力传感器,精度满足 1.0 级;温度检测采用 K 型热电偶,准确度为二等;声音采集使用 GM1351 型声级计,满足二级精度要求;振动测量采用 TM63B 型测振仪,精度误差为±5%。



(a) 盘式制动器摩擦试验台实物图



注: 1-液压站; 2-左推力油缸; 3-底座; 4-左液压推杆; 5-左夹块; 6-液压制动器; 7-对偶件; 8-右夹块; 9-右液压推杆; 10-右推力油缸; 11-控制台。

(b) 摩擦试验台结构图

图 1 盘式制动器摩擦试验台

Fig. 1 Disc brake friction test bench

1.2 试验方案

风电偏航刹车片的实际应用工况复杂,刹车材

料本身就有瞬时性的特点,且单次制动具有偶然性、随机性,因此,多次连续制动的可靠性参考价值更大^[20]。本文试验中,会采用丙酮擦拭摩擦对偶件表面,保证对偶件表面无油污、杂质;按照一般偏航工况要求进行磨合试验,使摩擦片与对偶面贴合面达到 80% 以上。考虑到实验场所存在试验台电机、液压机及其他噪声,为保证得到准确的制动噪声数据,需要去除环境噪声影响。

本文通过噪声减法公式计算得到更为精确的 A 声级^[21],计算公式如下:

$$L_{PS} = 10 \lg(10^{0.1L_P} - 10^{0.1L_{P0}}) \quad (1)$$

式中:

L_{PS} ——被测噪声声级(dB);

L_{P0} ——本地噪声声级(dB);

L_P ——噪声等效连续 A 声级(dB)。

通过多次测量和试验,得出背景噪声为 56.7 dB。

1) 不同材料对偶件摩擦特性试验方案

刹车片对偶件材料其自身理化和机械特性的区别,致使在相同粗糙度、平面度和硬度的情况下,同种刹车片同种试验条件下会有不同的摩擦特性。本文选取 Q355NE、QT400 和 42CrMo 3 种制动盘进行有机复合材料摩擦特性试验研究,主要研究同种刹车片在不同对偶材料上的动、静摩擦系数、噪声和振动。试验制动声音时,将声级计的拾音头置于被测制动器正上方 0.5 m 处,如图 2 所示,每隔 1 h 连续测量 10 个制动周期,并记录每次最大值;进行震颤测试时,将振动仪置于被测制动器平面处,记录试验台颤振值,滑动后,每隔 1 h 连续测量 10 个制动周期,并记录每次最大值;静摩擦试验时,按静摩擦系数试验要求设定管路压力,使制动管路压力达到额定值,启动推力系统并逐渐增加推动力,制动 20 次,记录制动器被推动瞬间摩擦力最大值;动摩擦试验时,按动摩擦系数试验要求设定管路压力、滑动速度、试验次数。

2) 同种对偶件的刹车材料摩擦特性试验方案

不同厂家风力发电机组偏航制动器运行压力一般为 1~21 MPa,运行速度为 9~18 mm/s,需探究同种对偶件材料下,不同制动压力及速度的摩擦特性,本文从实际工况出发研究了同种机复合材料刹车片在 Q355NE 制动盘上进行拖磨时的摩擦特性。在完

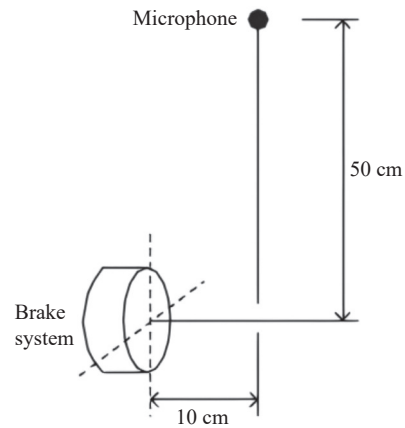
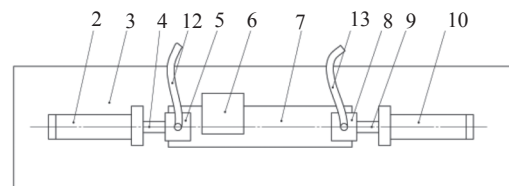


图 2 摩擦噪声测试示意图

Fig. 2 Schematic diagram of friction noise test

成刹车片磨合保证 80% 以上的贴合度后,制动压力分别维持在 2.5 MPa、6 MPa、16 MPa 和 18 MPa 下进行 9 mm/s 速度的摩擦特性研究。为研究不同速度时不同摩擦特性,使制动压力维持在 2.5 MPa,分别采用 9 mm/s、12 mm/s、15 mm/s 和 18 mm/s 的拖磨速度进行研究。

3) 不同温度条件下刹车材料摩擦特性试验方案
刹车片长时间在对偶件上带压摩擦时会产生热量,致使对偶件温度升高影响刹车片摩擦特性。为研究不同温度下刹车片摩擦特性的变化特性,设计特殊的 Q355NE 制动盘:在制动盘中间打孔,在两端管路中可通入/流出冷却液体,达到冷却制动盘的目的,如图 3 所示。



注: 2-左推力油缸; 3-基座; 4-左液压推杆; 5-左夹块; 6-液压制动器; 7-对偶件; 8-右夹块; 9-右液压推杆; 10-右推力油缸; 12-冷却液管路 a; 13-冷却液管路 b。

图 3 对偶件温度控制试验台示意图

Fig. 3 Schematic diagram of temperature control test bench for dual components

实验时,控制拖磨速度为 9 mm/s,分别测试制动压力为 2.5 MPa、6 MPa、16 MPa 和 18 MPa 时的摩擦特性,并且每个压力下做 2 组实验,一组实验不通冷却液进行拖磨,一组实验通入循环冷却液使制动盘保持常温进行拖磨实验。

2 实验结果与讨论

2.1 不同材料对偶件摩擦特性试验研究

在同样的制动工况下,在相同的表面参数要求下,不同材料对偶件本身的特性会影响摩擦性能的表现。本文从风力发电机组实际应用出发,选用了常用的 Q355NE、QT400 和 42CrMo 3 种制动盘进行同种尺寸和同批次有机复合材料摩擦特性试验研究。其中所有制动盘表面平面度为 0.15,表面粗糙度为 3.2~6.4。在室温下,测定了 18 MPa 下静摩擦系数;测定了在 2.5 MPa、9 mm/s 速度下,不少于 5 000 次拖磨的动摩擦系数、噪声和振动,获得结果如图 4 所示。

从图 4(a)可以看出,在同等工况条件下,无论哪种材料制动盘,初始时的动摩擦系数较小,需要运行到 2 000~3 000 次摩擦系数才能趋于稳定,这是由于前期摩擦片与制动盘贴合度不达标引起的,因此在新机组运行时,制动系统需要经过一个磨合阶段才能到达相应的制动力矩要求。

根据图 4(a)和图 4(b)稳定后摩擦系数表现,可以发现 QT400 制动盘的动、静摩擦系数均比其他两种材料大。摩擦因数的大小由微观摩擦面积、黏着效应和犁削效应等情况决定,QT400 相对较其他两种材料较软,刹车片与制动盘接触的微观摩擦面积最大,摩擦系数较大;而 42CrMo 相对表面组织最细密,对偶件之间不易形成较大接触面,致使摩擦系数相对较小。

根据图 4(c)和图 4(d)显示结果,不同材料的振动与噪声值数值上有一定区别,但在趋于稳定状态后数值区别不大。这是由于振动和噪声主要由刹车片摩擦组分其重要决定作用,相对来说对偶件材料种类的影响因素较小,其中噪声在前期会比较大是因为摩擦片与对偶件尚处于磨合阶段,在运行稳定后噪声值基本处于一致水平。

2.2 同种对偶件的刹车材料摩擦特性试验研究

在风力发电发电机偏航制动系统中,不同机型

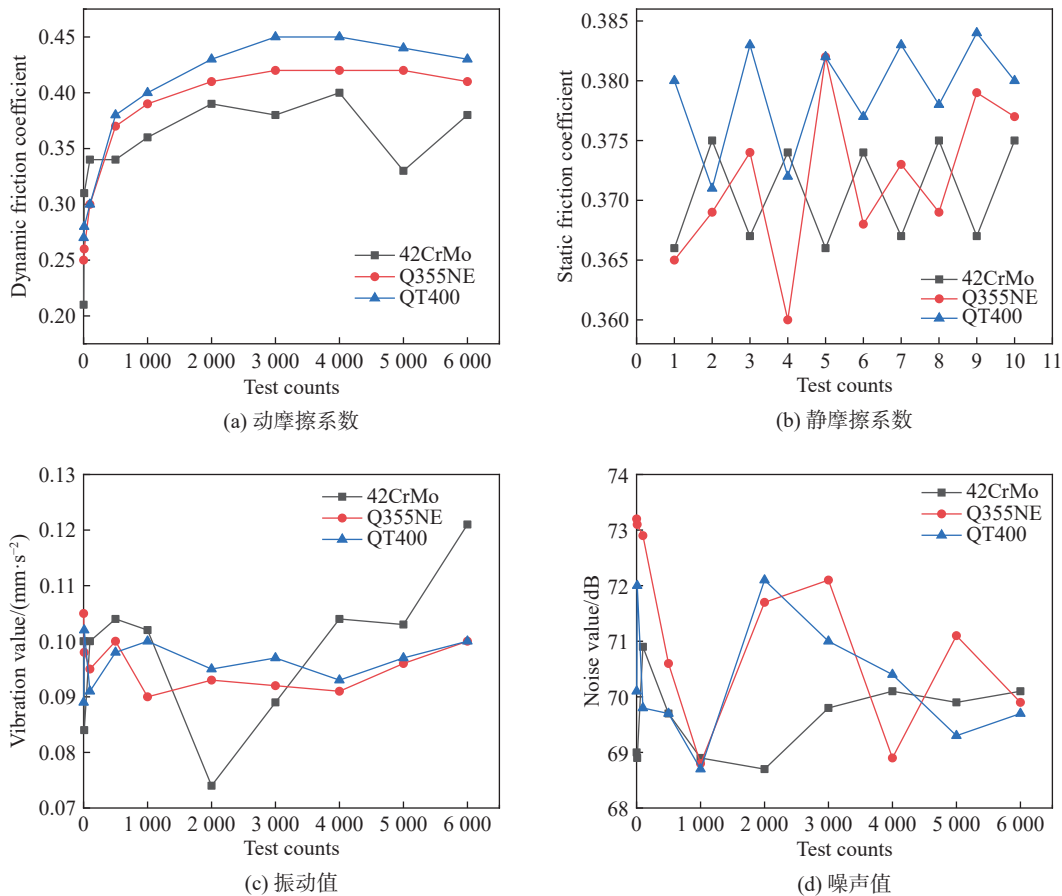


图 4 不同对偶材料下摩擦特性

Fig. 4 Friction characteristics of different dual materials

的制动参数设置上往往存在一定差异。在完成摩擦片磨合实验后, 根据风力发电机组常用压力和滑动速度, 对同等速度下不同压力的动摩擦系数和同等压力下不同滑动速度进行了动摩擦系数测定。

根据图 5(a) 可以看出, 动摩擦系数受压力影响较大且压力越大动摩擦系数越小: 在低压状态下动摩擦系数能保持在 0.37~0.4, 当达到高压状态时, 动摩擦系数骤降至 0.26~0.27。有机复合材料在微观层面上是多孔性质的, 当压力增大时, 压平了配

合件之间的波峰、波谷, 虽然增加了微观摩擦面积, 但是降低了两者的犁削效应致使了摩擦系数的降低。

根据图 5(b) 对比可知, 拖磨速度对动摩擦系数的影响较小: 速度最低时, 动摩擦系数最高, 随着速度的增加, 动摩擦系数会存在一定的下降。在同等压力下是黏着效应起主要作用, 在越高的速度下, 对偶件之间相互“嵌入”更少, 造成了摩擦系数的降低。

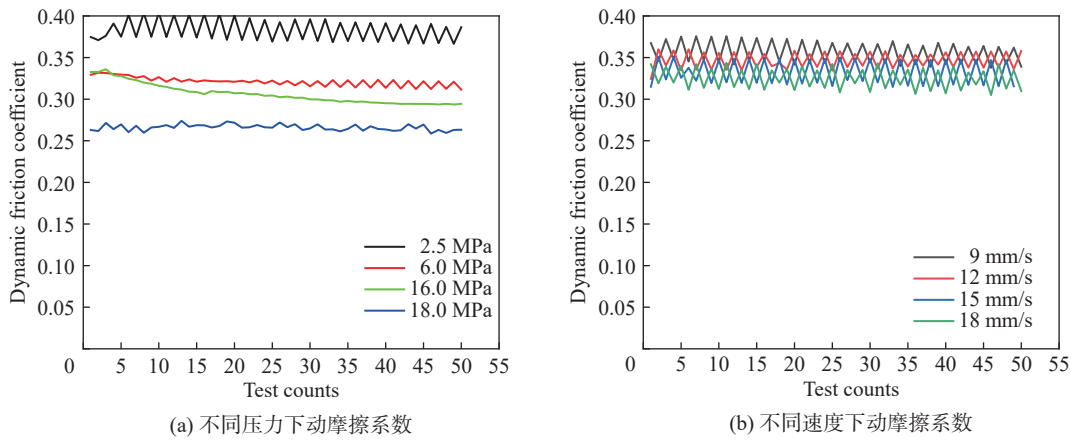


图 5 同种对偶件下不同压力和速度的动摩擦系数

Fig. 5 Dynamic friction coefficient under different pressures and velocities of the same dual component

2.3 不同温度下刹车材料摩擦特性试验研究

在风机运行中, 当风向与机头存在较大偏差角度时, 会存在长时间偏航工况, 图 6 为研究低速、重载情况下刹车片的摩擦特性。根据数据显示, 刹车片动摩擦系数有如下共性:

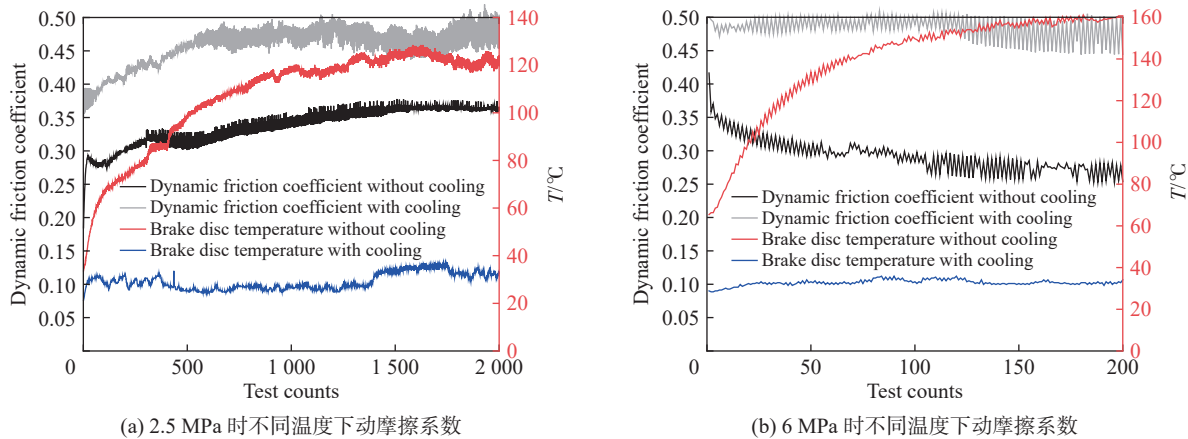
1) 无论在何种压力下, 随着对偶件之间温度升高, 动摩擦系数均是呈下降趋势, 而且温度越高摩擦

系数降低幅度越大。

2) 在保证对偶件温度处于室温状态时, 能获得更高的动摩擦系数。

根据摩擦学理论, 摩擦运行会造成动能转换成热能, 摩擦副表面温度上升会使得黏着力下降起主导作用, 摩擦因数减小。

但是根据图 6(a) 显示, 在低压状态下需要相对



(a) 2.5 MPa 时不同温度下动摩擦系数

(b) 6 MPa 时不同温度下动摩擦系数

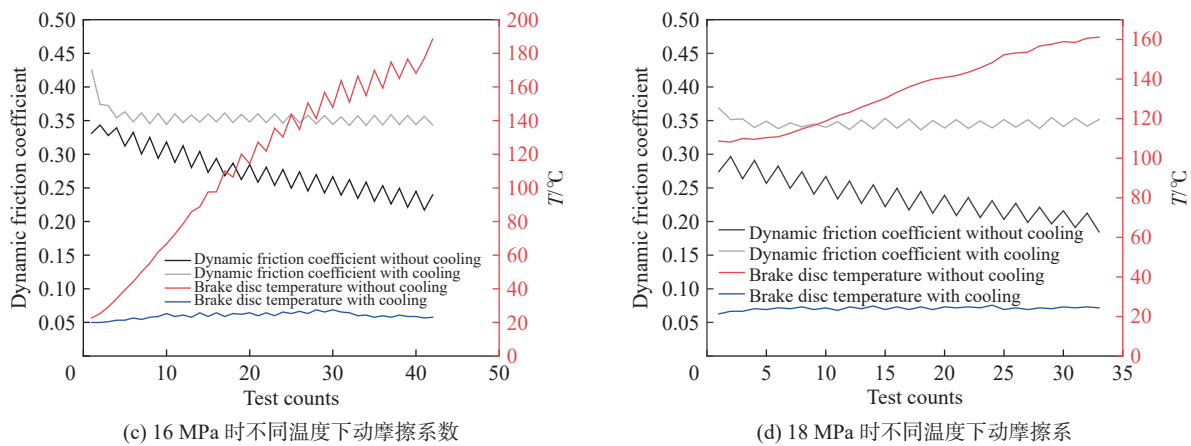


图 6 不同温度下刹车片材料摩擦特性

Fig. 6 Friction characteristics of brake pad materials at different temperatures

较长时间运行才会达到温度的平衡,而且在不超过 120 °C 时,摩擦副温度不会明显影响摩擦因数大小。

3 结论

1) 针对风电常用的制动盘材料中,不同材料制动盘和有机复合材料组成的摩擦副有不同的动、静摩擦系数,同等工况下有 10% ~ 20% 的系数差别,在满足机组特性的基础上,风电机组设计人员应选择能提供更高制动力矩的制动盘材料。低压运行时的振动与噪声主要由刹车片材料决定,对偶件材料影响因子较小。

2) 制动压力和拖磨速度对有机复合材料摩擦系数有较大影响,其中压力对摩擦系数影响较大且压力越大摩擦系数越小,所以实际应用中不能仅通过提高压力来提高制动力矩。在同等压力下,拖磨速度越大摩擦系数越小,机组设计人员应以整体思维考虑驱动和制动参数的匹配关系。

3) 无论何种压力下摩擦副的温度对摩擦系数均有较大影响,并且压力越高温度的影响因素占比越大。因此,在偏航控制逻辑中应避免高压下的长时间滑动,不仅会造成制动力矩的降低,并且在高压、高温下刹车片表面更容易形成釉质层,出现噪声或摩擦系数的永久性损失。

偏航制动系统中的制动盘材质、高压制动压力、偏航压力、速度和时间均与制动力矩存在着相互影响和制约的关系,应结合有机复合材料与机组的特性,选择合适的参数以满足机组运行要求。

参考文献:

- [1] 王秀强. 风电行业发展图鉴: 跌宕起伏十年, 行稳致远 [J]. 能源, 2018(11): 136-141.
WANG X Q. Wind power industry development chart: ups and downs for ten years, steady to go far [J]. Energy, 2018(11): 136-141.
- [2] 林楚, 秦海岩: 上半年我国风电行业实现高质量发展 [N]. 机电商报, 2023-08-07(A08). DOI: 10.28408/n.cnki.njdsb.2023.000345.
LIN C, QIN H Y: China's wind power industry achieved high-quality development in the first half of the year [N]. China meteorological society, mechanical and electrical business daily. 2023-08-07(A08). DOI: 10.28408/n.cnki.njdsb.2023.000345.
- [3] 刘明, 阳雪兵, 周孝, 等. 兆瓦级风力发电机组偏航制动系统关键故障失效分析与整改措施 [C]// 中国农业机械工业协会风力机械分会. 第四届中国风电后市场专题研讨会, 银川, 2017-05-25. [S.1.]: [s.n.], 2021: 222-225.
LIU M, YANG X B, ZHOU X, et al. Failure analysis and improvement measures of yaw braking system for MW wind turbine [C]// Wind Machinery Branch of China Agricultural Machinery Industry Association. The fourth china post-wind market symposium, Yinchuan, 2017-05-25. [S.1.]: [s.n.], 2021: 222-225.
- [4] 刘涛. 大型风力发电机偏航刹车装置的强度和防漏油措施的研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2021. DOI: 10.27232/d.cnki.gnchu.2021.001878.
LIU T. Research on the strength of yaw braking device and the measures of preventing oil leakage of large wind turbine [D]. Nanchang: Nanchang University, 2021. DOI: 10.27232/d.cnki.gnchu.2021.001878.
- [5] 梁宏. 水平轴风电机组偏航振动异响问题分析和处理 [J]. 中国机械, 2013(6): 192-193.
LIANG H. Analysis and treatment of abnormal sound of yaw

- vibration in horizontal axis wind turbine [J]. *Machine China*, 2013(6): 192-193.
- [6] 宁文钢,姜宏伟,王岳峰. 风力发电机组偏航系统常见故障分析 [J]. *机械管理开发*, 2018, 33(11): 67-68, 116. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2018.11.030.
- NING W G, JIANG H W, WANG Y F. Common faults analysis of wind turbine yaw system [J]. *Mechanical management and development*, 2018, 33(11): 67-68, 116. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2018.11.030.
- [7] 廖明夫,黄巍,董礼,等. 风力机偏航引起的失稳振动 [J]. *太阳能学报*, 2009, 30(4): 488-492. DOI: 10.3321/j.issn:0254-0096.2009.04.016.
- LIAO M F, HUANG W, DONG L, et al. Unstable torsional vibration of wind turbines caused by nacelle yawing [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2009, 30(4): 488-492. DOI: 10.3321/j.issn:0254-0096.2009.04.016.
- [8] 吴丽娟,唐进元,陈思雨,等. 风力发电机组偏航系统颤振分析 [J]. *太阳能学报*, 2013, 34(10): 1708-1713. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0096.2013.10.007.
- WU L J, TANG J Y, CHEN S Y, et al. Chatter characteristics of yawing system in wind turbine [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2013, 34(10): 1708-1713. DOI: 10.3969/j.issn.0254-0096.2013.10.007.
- [9] 李晓光,赵萍,韩德海. 主动偏航过程兆瓦级风机偏航系统失稳振动特性 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(3): 949-954.
- LI X G, ZHAO P, HAN D H. Characteristics of unstable vibration for megawatt wind power yaw system in process of active yaw [J]. *Journal of Central South University (Nature Science Edition)*, 2013, 44(3): 949-954.
- [10] 周新建,李志强. 利用FMECA法的兆瓦级风力机故障模式分析 [J]. *华东交通大学学报*, 2017, 34(1): 107-117. DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.01.017.
- ZHOU X J, LI Z Q. Failure mode analysis of mw scale direct-drive permanent magnet wind power generator based on FMECA method [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2017, 34(1): 107-117. DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.01.017.
- [11] 王岳峰,姜宏伟,宁文钢,等. 偏航制动摩擦片热力学耦合计算及失效原因分析 [J]. *表面技术*, 2018, 47(2): 111-116. DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.02.018.
- WANG Y F, JIANG H W, NING W G, et al. Thermo-mechanical coupled calculation and failure cause analysis of yaw brake friction plate [J]. *Surface technology*, 2018, 47(2): 111-116. DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.02.018.
- [12] 王正国,莫继良,陈光雄,等. 沟槽型结构化表面摩擦噪声特性试验研究 [J]. *摩擦学学报*, 2013, 33(3): 304-310.
- WANG Z G, MO J L, CHEN G X, et al. An experimental study on friction noise properties of groove-textured surfaces [J]. *Tribology*, 2013, 33(3): 304-310.
- [13] 白同庆,王秀飞,钟志刚,等. 摩擦组元对粉末冶金摩擦材料摩擦性能的影响 [J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2006, 11(6): 345-348. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0224.2006.06.006.
- BAI T Q, WANG X F, ZHONG Z G, et al. Effects of friction components on friction properties of powder metallurgy friction materials [J]. *Materials science and engineering of powder metallurgy*, 2006, 11(6): 345-348. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0224.2006.06.006.
- [14] 林娇,高诚辉,郑开魁,等. 一种少金属树脂基摩擦材料的实验研究 [J]. *机械制造与自动化*, 2019, 48(5): 48-50, 53. DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2019.05.012.
- LIN J, GAO C H, ZHENG K K, et al. Experimental study of less metallic resin-based friction material [J]. *Machine building & automation*, 2019, 48(5): 48-50, 53. DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2019.05.012.
- [15] 马保吉,朱均,高嵩. 芳纶纤维增强摩擦材料的摩擦学性能研究 [J]. *摩擦学学报*, 2000, 20(4): 260-263. DOI: 10.3321/j.issn:1004-0595.2000.04.006.
- MA B J, ZHU J, GAO S. Tribological properties of Kevlar pulp reinforced friction materials [J]. *Tribology*, 2000, 20(4): 260-263. DOI: 10.3321/j.issn:1004-0595.2000.04.006.
- [16] PAN G Y, CHEN L. Impact analysis of brake pad backplate structure and friction lining material on disc-brake noise [J]. *Advances in materials science and engineering*, 2018(1): 709-713. DOI: 10.1155/2018/7093978.
- [17] LAZZARI A, TONAZZI D, CONIDI G, et al. Experimental evaluation of brake pad material propensity to stick-slip and groan noise emission [J]. *Lubricants*, 2018, 6(4): 107. DOI: 10.3390/lubricants6040107.
- [18] KULKARNI S, PATIL A, LOUIS N, et al. Investigation of disc brake squeal using FE simulation and experimentation [J]. *International journal of scientific & engineering research*, 2019, 10(5): 169-173.
- [19] SCHLAGNER, VON WAGNER U. Characterization of disk brake noise behavior via measurement of friction forces [J]. *Proceedings in applied mathematics and mechanics*, 2009, 9(1): 59-62. DOI: 10.1002/pamm.200910016.
- [20] BAO J S, LU L J, YIN Y, et al. Frictional properties and mechanisms of an organic-metal brake pair braking repeatedly in magnetic field [J]. *Tribology transactions*, 2018, 61(1): 1-11. DOI: 10.1080/10402004.2016.1267291.
- [21] 董慧丽,鲍久圣,阴妍,等. 盘式制动器摩擦噪声特性的试验分析 [J]. *摩擦学学报*, 2020, 40(2): 175-184. DOI: 10.16078/j.tribology.2019108.
- DONG H L, BAO J S, YIN Y, et al. Experimental analysis on friction noise of disc brake [J]. *Tribology*, 2020, 40(2): 175-184. DOI: 10.16078/j.tribology.2019108.

作者简介:



刘明

刘明(第一作者,通信作者)
1990-,男,工程师,硕士,主要从事风力发电
机组液压传动系统研究工作(e-mail)
liuming@hewp.com.cn。

阳雪兵

1981-,男,博士,主要从事风力发电机组整机及传动系统研究
工作(e-mail)yangxuebing@hewp.com.cn。

张学文

1984-,男,硕士,主要从事风力发电机组液压润滑研究工作
(e-mail)zhangxuewen@hewp.com.cn。

黄振荣

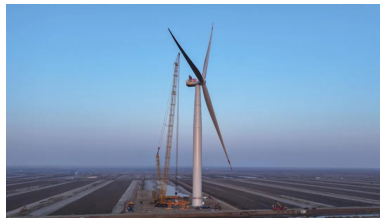
1993-,男,硕士,主要从事风力发电机组润滑研究工作(e-mail)
huangzhenrong@hewp.com.cn。

卜忠颖

1991-,男,硕士,主要从事风力发电机组轴承传动研究工作
(e-mail)buzhongjie@hewp.com.cn。

(责任编辑 孙舒)

中国中车“启航号”20 MW 漂浮式海上风电机组成功吊装



2025年1月11日,全球最大功率等级漂浮式风电机组——“启航号”在山东东营风电装备测试认证创新基地成功吊装,中国中车在海上超大型风机的探索迈出了重要一步。

“启航号”是中国中车自主研发的20 MW 漂浮式海上风电机组,功率突破到20 MW 量级,风轮直径达260 m,相当于7个标准足球场,叶尖速度与高铁速度“同行”,轮毂高度达151m,年满发小时数约为3 500 h,设计使用寿命25 a。机组每转动一圈能满足1个家庭2~4 d的用电需求,年节约燃煤消耗约2.5万 t,减少二氧化碳排放约6.2万 t。机组通过采取科学可靠的工艺措施,有效解决了筒节自重变形带来的组对制造难题,为海上漂浮式风机提供高安全、强有力的支撑系统。

“启航号”倾注了中国中车“双赛道双集群”的最新智慧,在性能和可靠性上力臻完善,助力了我国“双碳”目标的实现,为全球绿色能源发展注入磅礴动力。

来源:《射阳发布》微信公众号