

# 永磁发电机转子滑环结构有限元分析与研究

王建春<sup>1,4</sup>, 张雅<sup>2</sup>, 张俊<sup>3</sup>

(1. 光伏发电系统控制与优化湖南省工程实验室, 湖南 湘潭 411104; 2. 北京航天石化技术装备工程有限公司, 北京 100076; 3. 湖南湘电动力有限公司, 湖南 湘潭 411101; 4. 湖南理工职业技术学院, 湖南 湘潭 411104)

**摘要:** 新能源发电领域风力发电机组运行质量的好坏及使用寿命的长短, 发电机转子滑环起决定性作用, 滑环中护环与转轴配合间隙的确定是目前风电机组发电机结构设计与装配技术难点。通过对目前风电行业通用的某型号风力发电永磁发电机转子滑环结构建立分析模型, 根据滑环工作条件下对不同配合情况进行有限元仿真分析, 通过仿真最终获得最佳的间隙或过盈量, 使发电机能满足最佳工作要求, 从而找到滑环结构设计的最佳值, 为滑环结构设计及同类结构设计提供理论参考。

**关键词:** 发电机; 转子滑环; 过盈量; ANSYS 有限元法

**中图分类号:** TM 315

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-3281 (2024) 01-0076-011

双碳政策背景下, 风电产业高速发展, 主流机型中风力发电机组采用永磁发电机具有以下一系列的优点: 转矩密度高、功率密度高、气隙磁密高、体积小、力能指标高、重量轻、损耗小、效率高、机械无刷、功率因数高、气隙大、过载能力强等, 随着变频技术的日益飞速发展, 永磁发电机在风力发电、舰船推进、电动汽车、电梯等运用场合中运用较多<sup>[1]</sup>, 相对故障机理较复杂的双馈异步风力发电机电刷滑环而言<sup>[2]</sup>, 由于永磁发电机转速变化范围大, 设计时转子各关键零部件的强度至关重要, 滑环作为高速承载并换向的核心部件, 护环与转轴运行中散热问题就显得尤其重要, 其结构设计及配合过盈的确定对永磁发电机的寿命与性能的影响尤为关键<sup>[3]</sup>, 发电机滑环安装有两种方式: 即热套与冷压<sup>[4]</sup>, 本文将对某大型号风电机组永磁发电机转子滑环过盈设计进行有限元分析与研究, 旨在为风电机组永磁发电机转子滑环结构设计及装配间隙确定提供理论支撑。

## 1 模型确定

为了节省计算成本, 去掉了对计算结果影响很小的部分, 对原始模型作了必要的简化, 并根据对称性得到了 (如图 1) 转子计算模型<sup>[5]</sup>, 其各个零部件的材料及其材料属性如表 1 所示。

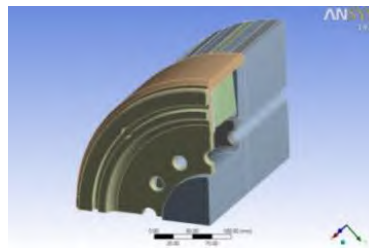


图 1 转子简化模型

Fig.1 Simplified model of rotor

## 2 有限元分析建模

划分网格 (图 2) 的有限元模型, 限制转轴中间的 Z 向平动, 施加对称约束 (如图 3、图 4), 利用接触类型 Rough 建立的过盈配合 (如图 5), 过盈量根据要求给定。

## 3 过盈量设计

无过盈的情况下, 计算转轴和滑环在 100 °C 的温度载荷和 8 000 r/min 的转速下各自的径向变形量, 由其差值估计转子上护环与转轴、中心环的过盈量,

收稿日期: 2022-11-11

基金项目: 湖南省自然科技项目 (基金编号: 2021JJ60052); 湖南省教育教改项目 (基金编号: ZJGB2020424)。

作者简介: 王建春 (1974—), 男, 高级工程师, 副教授, 硕士。主要从事风力发电工程技术研究工作。



表 1 材料属性 Table 1 Material properties					
零件名称	材料	密度 / (kg · m <sup>-3</sup> )	弹性模量 /GPa	泊松比	屈服强度 /MPa
转轴、中心环等	25Cr2Ni4MoV	7 850	218	0.3	660
护环	1Mn18Cr18N	7 800	218	0.3	1 050
绝缘垫块	二苯醚坯布	1 900			
线圈	铜	8 900			

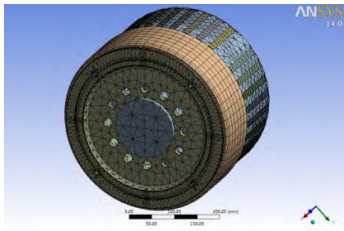


图 2 转子有限元模型  
Fig.2 Simplified model of rotor

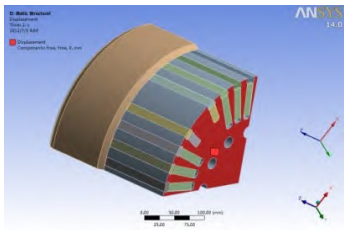


图 3 转轴约束示意图  
Fig.3 Finite element model of rotor

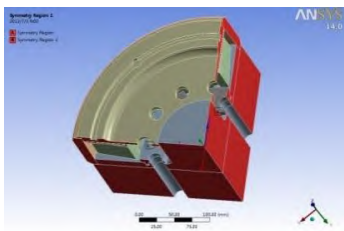


图 4 对称约束示意图  
Fig.4 Symmetrical constraint diagram

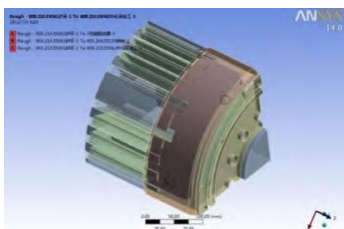


图 5 接触方式示意图  
Fig.5 Schematic diagram of contact mode

再对过盈量验算。计算方法：利用 ANSYS 中的稳态热分析和静力学分析模块<sup>[6]</sup>。初始温度：20℃。温度载荷：100℃（温差：+80℃）。转速：8 000 r/min

时，按通常轴类与套类过盈量的尺寸选择进行分析计算<sup>[7]</sup>：0 mm；0.1 mm；0.2 mm；0.25 mm；0.3 mm；0.4 mm；0.7 mm。

3.1 过盈量 0mm 的计算结果

滑环与支撑件的高速滑动电接触，导轨温度场和热应力特性是时刻变化的<sup>[8]</sup>，中心环与护环连接处的径向位移如图 6，最大值为 0.220 48 mm，最小值为 0.185 28 mm。转轴与护环连接处的径向位移云图如图 7，最大值为 0.265 06 mm，最小值为 0.223 78 mm。护环与中心环连接处的径向位移如图 8，最大值为 0.412 2 mm，最小值为 0.410 17 mm。护环与转轴连接处的径向位移如图 9，最大值为 0.410 89 mm，最小值为 0.409 69 mm。

3.2 估计过盈量

由图 6~7 可知中心环与护环连接处，护环跟中心环的径向位移差值为 0.189 69~0.226 92 mm；转轴与护环连接处，护环跟转轴的径向位移差值为 0.144 63~0.187 11 mm。因此，过盈量需设计为大于

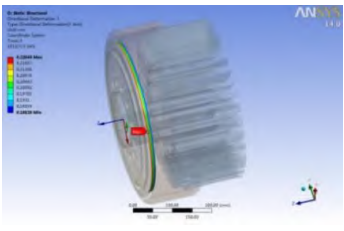


图 6 径向位移  
Fig.6 Radial displacement

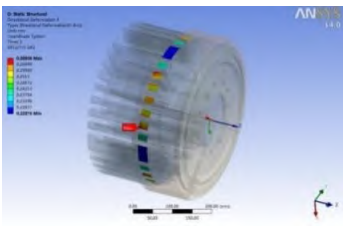


图 7 径向位移  
Fig.7 Radial displacement



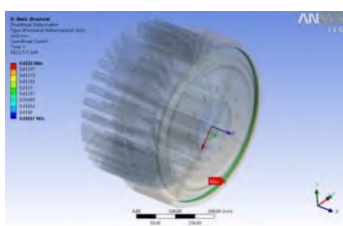


图 8 径向位移  
Fig.8 Radial displacement

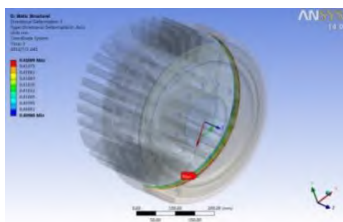


图 9 径向位移  
Fig.9 Radial displacement

0.226 92 mm。由于当过盈量为 0 mm 时,护环的膨胀量比磁极线圈大,计算时忽略了磁极线圈对护环膨胀量的影响,故 0.226 92 mm 的过盈量设计偏小,可考虑取为 0.3~0.4 mm<sup>[9-10]</sup>。

### 3.3 各个过盈量配合情况验算

将 0.1~0.4 mm 分为 0.1 mm、0.2 mm、0.25 mm、0.3 mm、0.4 mm 和 0.7 mm 六种过盈量进行有限元计算,各过盈量下护环连接处的压力如图 10~15,根据有限元计算可得各过盈量下护环连接处接触情况如表 2 所示,可知为保证在 2 000 r/min 高温时护环

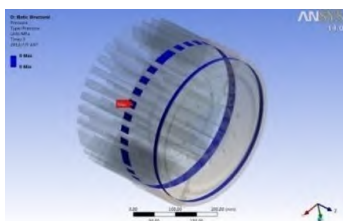


图 10 0.1 mm 过盈量  
Fig.10 0.1 mm interference

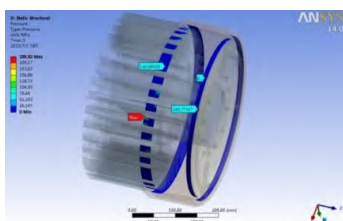


图 11 0.2 mm 过盈量  
Fig.11 0.2 mm interference

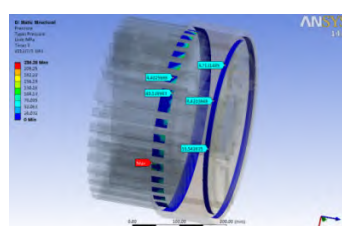


图 12 0.25 mm 过盈量  
Fig.12 0.25 mm interference

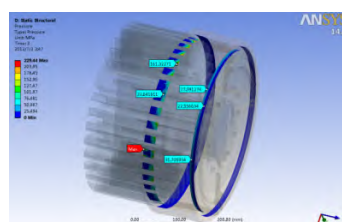


图 13 0.3 mm 过盈量  
Fig.13 0.3 mm interference

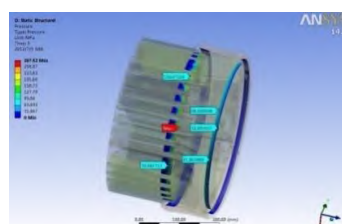


图 14 0.4 mm 过盈量  
Fig.14 0.4 mm interference

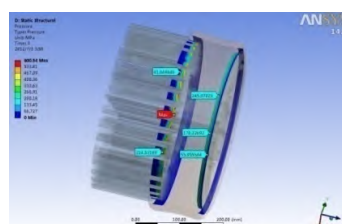


图 15 0.7 mm 过盈量  
Fig.15 0.7 mm interference

表 2 过盈量与接触情况  
Table 2 Interference and contact

过盈量/mm	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.7
接触应力 / MPa	0	< 20	< 20	> 20	> 20	> 20
配合接触情况	分离	不良好	不良好	良好	良好	良好

与转轴、中心环接触良好,护环与转轴、中心环的过盈量应在 0.3 mm 或以上的值。



3.4 强度验证

利用ANSYS中Steady-State Thermal和Static

Structural分析<sup>[11]</sup>, 分析的情况如表3, 计算时对表3中的各种情况进行组合, 并进行有限元分析。

表 3 强度验证情况 Table 3 Strength verification						
名称		参数				
初始温度 /℃	20					
过盈量 /mm	0.3	0.4	0.7			
工况	常温	常温 +2 000 r/min	100 ℃	100 ℃ +2 000 r/min	-20 ℃	-20 ℃ +2 000 r/min

(1) 过盈量为 0.3 mm

常温：转轴的应力如图 16 所示，最大值为 411.34 MPa；中心环的应力如图 17 所示，最大值为 204.62 MPa；护环的应力如图 18 所示，最大值为 492.9 MPa。

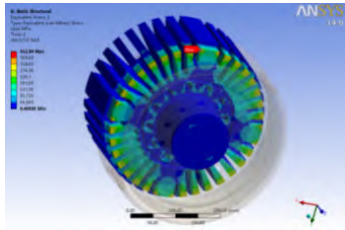


图 16 转轴应力云图  
Fig.16 Axis stress nephogram

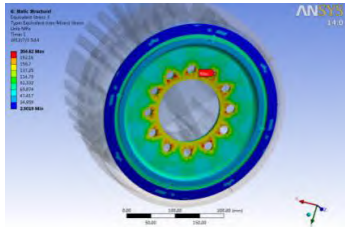


图 17 中心环应力云图  
Fig.17 Stress nephogram of central ring

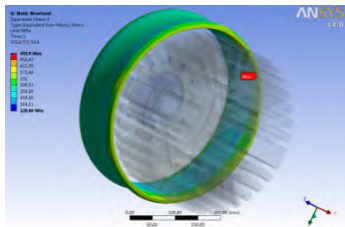


图 18 护环应力云图  
Fig.18 Stress nephogram of retaining ring

常温 +8 000 r/min：转轴的应力如图 19 所示，最大值为 500.92 MPa；中心环的应力如图 20 所示，最大值为 128.69 MPa；护环的应力如图 21 所示，最大值为 609.76 MPa。

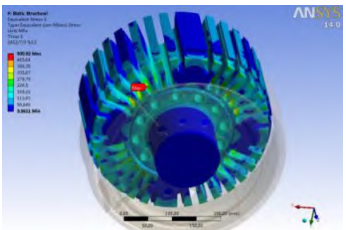


图 19 转轴应力云图  
Fig.19 Axis stress nephogram

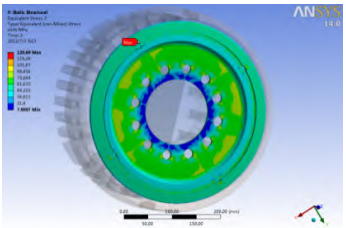


图 20 中心环应力云图  
Fig.20 Stress nephogram of central ring

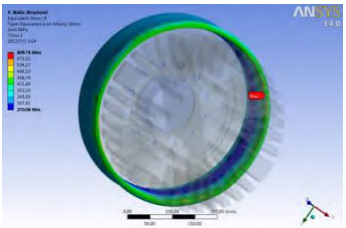


图 21 护环应力云图  
Fig.21 Stress nephogram of retaining ring

100 ℃：转轴的应力如图 22 所示，最大值为 316.55 MPa；中心环的应力如图 23 所示，最大值为 164.1 MPa；护环的应力如图 24 所示，最大值为 449.78 MPa。

100 ℃ +8 000 r/min：转轴的应力如图 25 所示，最大值为 524.13 MPa；中心环的应力如图 26 所示，最大值为 149.5 MPa；护环的应力如图 27 所示，最大值为 549.3 MPa。

-20 ℃：转轴的应力如图 28 所示，最大值为



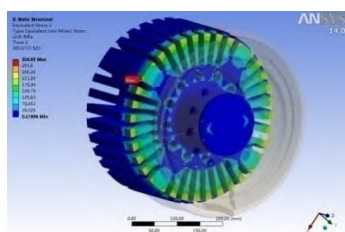


图 22 转轴应力云图

Fig.22 Axis stress nephogram

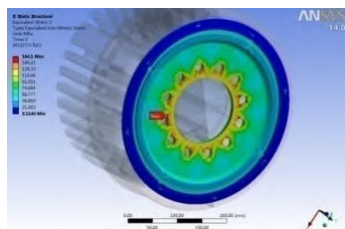


图 23 中心环应力云图

Fig.23 Stress nephogram of central ring

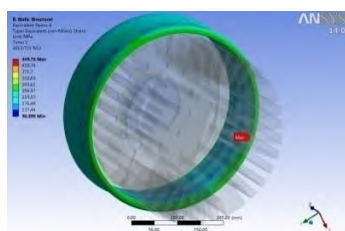


图 24 护环应力云图

Fig.24 Stress nephogram of retaining ring

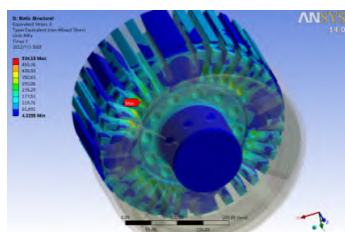


图 25 转轴应力云图

Fig.25 Axis stress nephogram

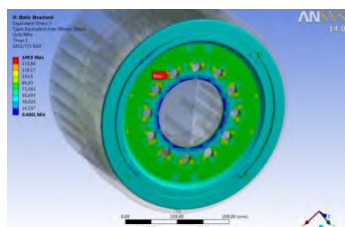


图 26 中心环应力云图

Fig.26 Stress nephogram of central ring

462.33 MPa；中心环的应力如图 29 所示，最大值为 233.51 MPa；护环的应力如图 30 所示，最大值为 524.51 MPa。

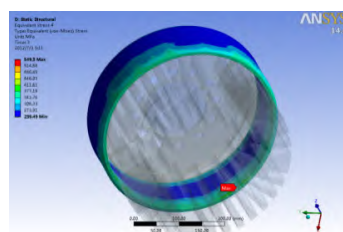


图 27 护环应力云图

Fig.27 Stress nephogram of retaining ring

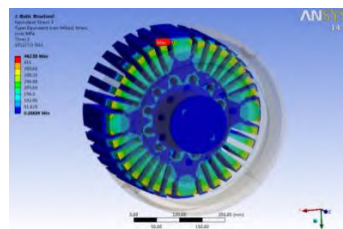


图 28 转轴应力云图

Fig.28 Axis stress nephogram

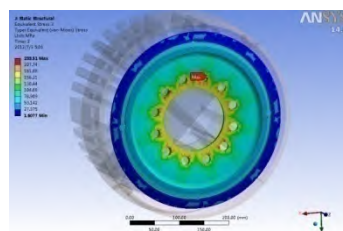


图 29 中心环应力云图

Fig.29 Axis stress nephogram

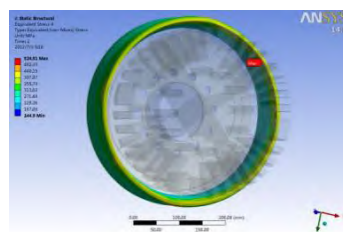


图 30 护环应力云图

Fig.30 Stress nephogram of retaining ring

-20℃ +8 000 r/min：转轴的应力如图 31 所示，最大值为 486.41 MPa；中心环的应力如图 32 所示，最大值为 149.9 MPa；护环的应力如图 33 所示，最大值为 636.53 MPa。

## (2) 过盈量为 0.4 mm

常温：转轴的应力如图 34 所示，最大值为 545.55 MPa；中心环的应力如图 35 所示，最大值为 272.82 MPa；护环的应力如图 36 所示，最大值为 576 MPa。

常温 +8 000 r/min：转轴的应力如图 37 所示，最大值为 464.31 MPa；中心环的应力如图 38 所示，



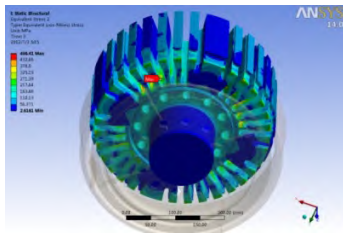


图 31 转轴应力云图

Fig.31 Axis stress nephogram

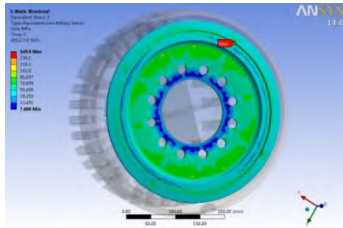


图 32 中心环应力云图

Fig.32 Axis stress nephogram

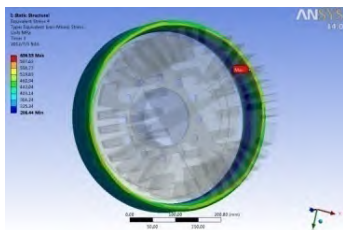


图 33 护环应力云图

Fig.33 Stress nephogram of retaining ring

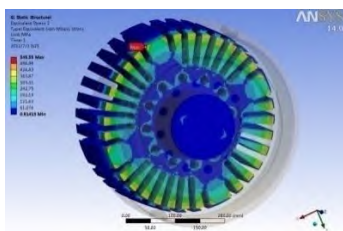


图 34 转轴应力云图

Fig.34 Axis stress nephogram

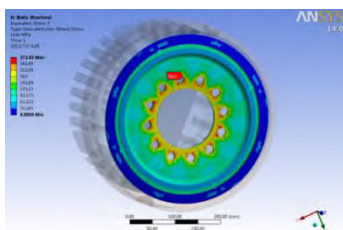


图 35 中心环应力云图

Fig.35 Axis stress nephogram

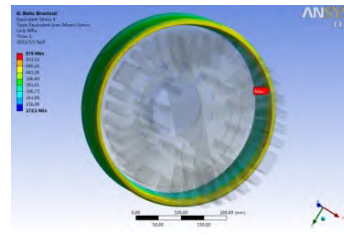


图 36 护环应力云图

Fig.36 Stress nephogram of retaining ring

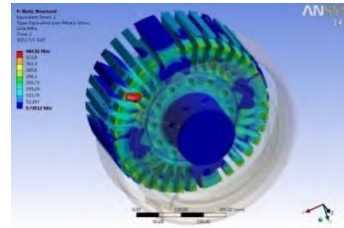


图 37 转轴应力云图

Fig.37 Axis stress nephogram

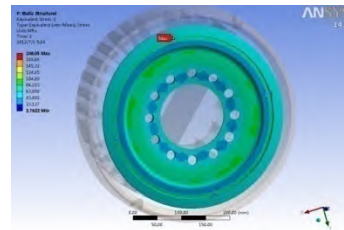


图 38 中心环应力云图

Fig.38 Axis stress nephogram

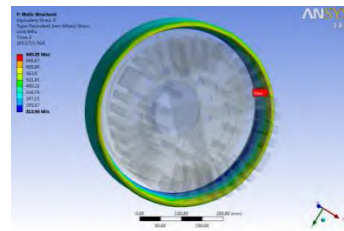


图 39 护环应力云图

Fig.39 Stress nephogram of retaining ring

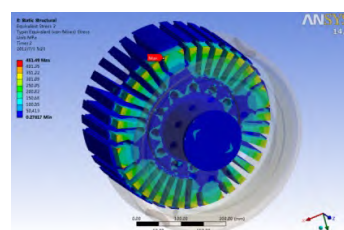


图 40 转轴应力云图

Fig.40 Axis stress nephogram

最大值为 186.05 MPa；护环的应力如图 39 所示，最大值为 688.25 MPa。

100 ℃：转轴的应力如图 40 所示，最大值为

451.49 MPa；中心环的应力如图 41 所示，最大值为 232.63 MPa；护环的应力如图 42 所示，最大值为 514.69 MPa。



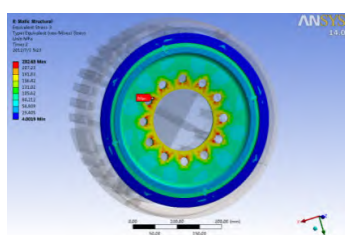


图 41 中心环应力云图

Fig.41 Stress nephogram of central ring

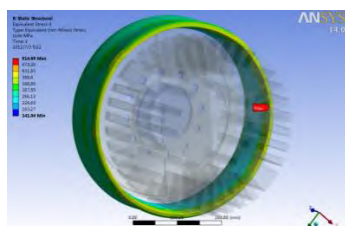


图 42 护环应力云图

Fig.42 Stress nephogram of retaining ring

100 °C +8 000 r/min : 转轴的应力如图 43 所示, 最大值为 486.19 MPa ; 中心环的应力如图 44 所示, 最大值为 151 MPa ; 护环的应力如图 45 所示, 最大值为 637.6 MPa。

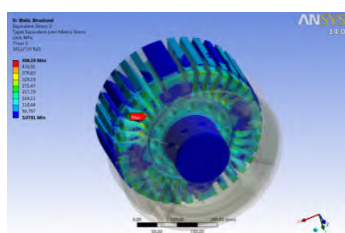


图 43 转轴应力云图

Fig.43 Axis stress nephogram

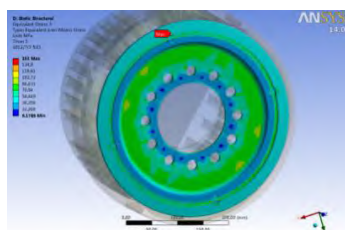


图 44 中心环应力云图

Fig.44 Stress nephogram of central ring

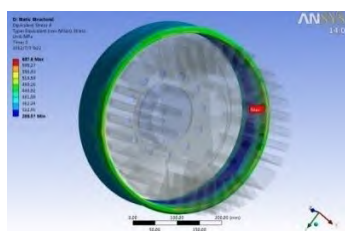


图 45 护环应力云图

Fig.45 Stress nephogram of retaining ring

-20 °C : 转轴的应力如图 46 所示, 最大值为 595.68 MPa ; 中心环的应力如图 47 所示, 最大值为 301.77 MPa ; 护环的应力如图 48 所示, 最大值为 613 MPa。

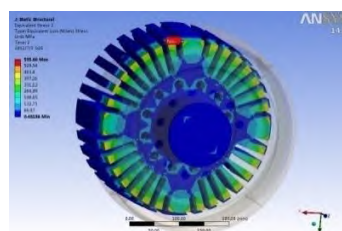


图 46 转轴应力云图

Fig.46 Axis stress nephogram

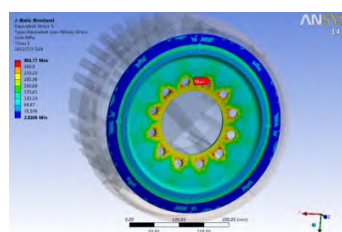


图 47 中心环应力云图

Fig.47 Stress nephogram of central ring

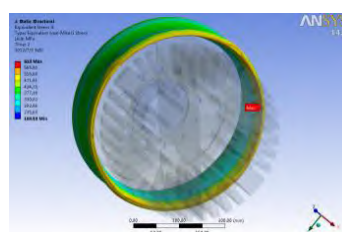


图 48 护环应力云图

Fig.48 Stress nephogram of retaining ring

-20 °C +8 000 r/min : 转轴的应力如图 49 所示, 最大值为 449.73 MPa ; 中心环的应力如图 50 所示, 最大值为 208.92 MPa ; 护环的应力如图 51 所示, 最大值为 721.55 MPa。

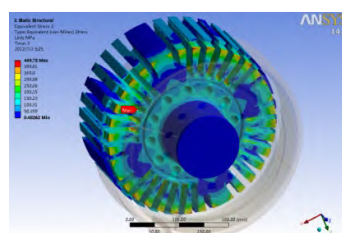


图 49 转轴应力云图

Fig.49 Axis stress nephogram



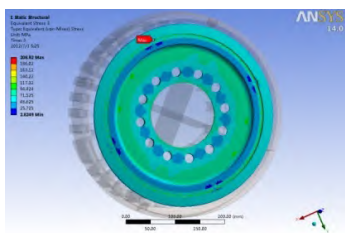


图 50 中心环应力云图

Fig.50 Stress nephogram of central ring

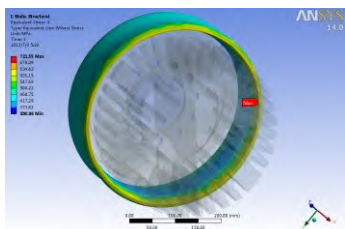


图 51 护环应力云图

Fig.51 Stress nephogram of retaining ring

## (3) 过盈量为 0.7 mm

常温：转轴的应力如图 52 所示，最大值为 938.78 MPa；中心环的应力如图 53 所示，最大值为 479.01 MPa；护环的应力如图 54 所示，最大值为 875.84 MPa。

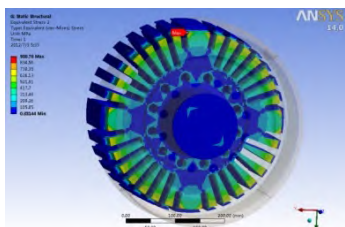


图 52 转轴应力云图

Fig.52 Axis stress nephogram

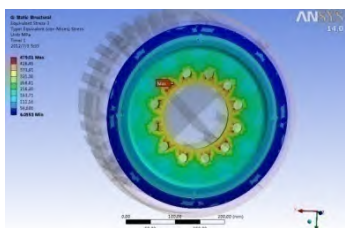


图 53 中心环应力云图

Fig.53 Stress nephogram of central ring

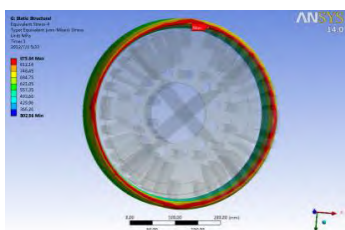


图 54 护环应力云图

Fig.54 Stress nephogram of retaining ring

常温 +8 000 r/min：转轴的应力如图 55 所示，最大值为 757.87 MPa；中心环的应力如图 56 所示，最大值为 366.39 MPa；护环的应力如图 57 所示，最大值为 965.52 MPa。

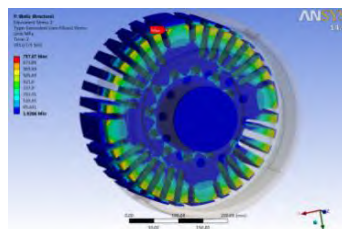


图 55 转轴应力云图

Fig.55 Axis stress nephogram

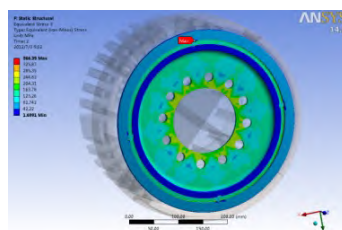


图 56 中心环应力云图

Fig.56 Stress nephogram of central ring

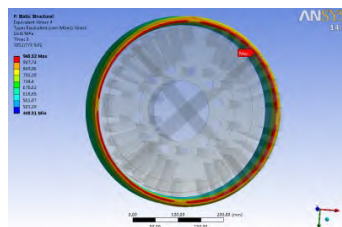


图 57 护环应力云图

Fig.57 Stress nephogram of retaining ring

100 ℃：转轴的应力如图 58 所示，最大值为 848.85 MPa；中心环的应力如图 59 所示，最大值为 438.86 MPa；护环的应力如图 60 所示，最大值为 788.36 MPa。

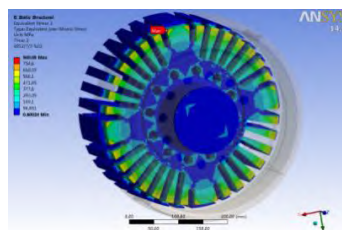


图 58 转轴应力云图

Fig.58 Axis stress nephogram



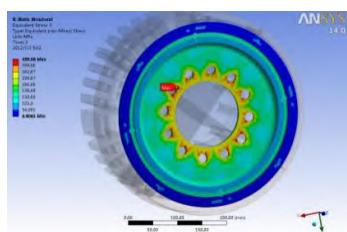


图 59 中心环应力云图

Fig.59 Stress nephogram of central ring

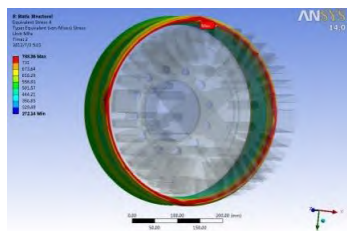


图 60 护环应力云图

Fig.60 Stress nephogram of retaining ring

100 °C +8 000 r/min : 转轴的应力如图 61 所示, 最大值为 664.66 MPa ; 中心环的应力如图 62 所示, 最大值为 323.42 MPa ; 护环的应力如图 63 所示, 最大值为 901.86 MPa。

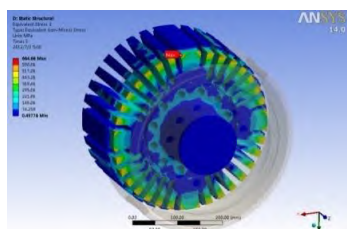


图 61 转轴应力云图

Fig.61 Axis stress nephogram

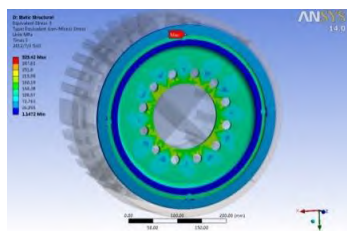


图 62 中心环应力云图

Fig.62 Stress nephogram of central ring

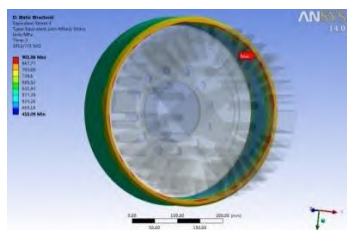


图 63 护环应力云图

Fig.63 Stress nephogram of retaining ring

-20 °C : 转轴的应力如图 64 所示, 最大值为 988.71 MPa ; 中心环的应力如图 65 所示, 最大值为 506.2 MPa ; 护环的应力如图 66 所示, 最大值为 923.63 MPa。

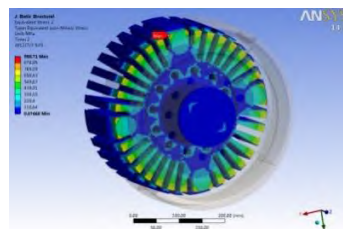


图 64 转轴应力云图

Fig.64 Axis stress nephogram

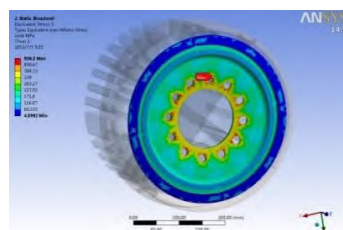


图 65 中心环应力云图

Fig.65 Stress nephogram of central ring

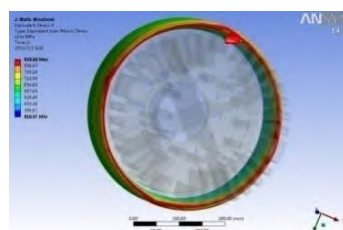


图 66 护环应力云图

Fig.66 Stress nephogram of retaining ring

-20 °C +8 000 r/min : 转轴的应力如图 67 所示, 最大值为 807.34 MPa ; 中心环的应力如图 68 所示, 最大值为 391.97 MPa ; 护环的应力如图 69 所示, 最大值为 1 004.9 MPa。

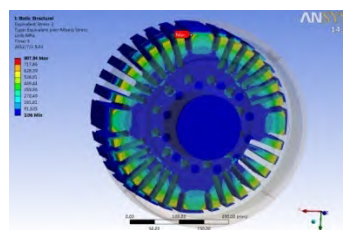


图 67 转轴应力云图

Fig.67 Axis stress nephogram



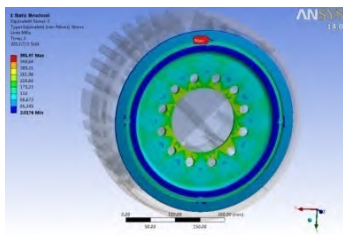


图 68 中心环应力云图

Fig.68 Stress nephogram of central ring

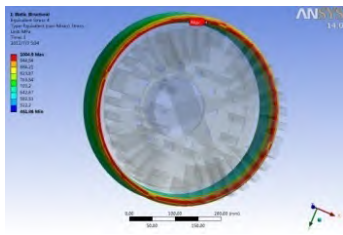


图 69 护环应力云图

Fig.69 Stress nephogram of retaining ring

## 4 结论

本文针对风电机组某型号永磁发电机转子滑环结构强度情况,建立了转子护环结构三维模型,利用 ANSYS 分析其不同过盈工况下的强度情况,并根据强度仿真,最终确定选择最佳过盈量的方法,使其能满足最佳工作要求,研究结果表明:

(1) 有限元分析结果可知当过盈量为 0.3 mm 和 0.4 mm 时,转轴、中心环和滑环之间保持较为均匀的良好接触状态,各部件应力最大值均小于材料的屈服强度,满足强度要求;

(2) 当过盈量为 0.7 mm 时,转轴有可能发生破坏,中心环和滑环的应力也处于较高水平;

(3) 在综合考虑接触是否良好、各种工况下是否发生破坏、是否产生疲劳累积等问题时,为了保证护环与转轴、中心环接触良好和避免因过盈量太

大而发生破坏,护环与转轴、中心环的过盈量可选取为 0.3~0.4 mm,过盈量越小,疲劳应力越大,寿命越长。

本研究结果对风力发电机转子滑环结构设计及配合过盈的优化设计具有理论指导意义及工程设计实用借鉴。

## 参考文献

- [1] 徐军,无刷励磁同步电动机转子优化设计与动态特性仿真[D].沈阳:沈阳工业大学,2014.
- [2] 陈涛涛,马宏忠.双馈异步发电机电刷滑环系统状态监测技术研究现状与发展[J].电工电能新技术,2013,32(3):89-94.
- [3] 钟绍辉,解京晶.双馈风力发电机滑环、碳刷故障分析及解决措施探讨[J].风能,2018,9(8):98-100.
- [4] 蒋新艳,何井祥.HXn5 机车主辅发电机滑环安装工艺研究[J].电子世界,2018,40(22):56,58.
- [5] Lefik M, Komez A, Napieralska-Juszczak E, et al. Comparison of the reluctance laminated and solid rotor synchronous machine operating at high temperatures[J]. Compel Int J for Computation & Maths in Electrical & Electronic Eng, 2019.
- [6] 黄志新,刘成柱.ANSYS Workbench14.0 超级学习手册[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [7] 周向,龚天明,颜丝,等.基于计算机辅助设计的过盈联接设计[J].装备制造技术,2018,46(12):43-46.
- [8] 郑杜成,徐蓉,成文凭,等.高速滑动电接触导轨温度场与热应力的仿真分析[J].电工电能新技术,2019,38(11):33-38.
- [9] 浦广益.ANSYS Workbench 基础教程与实例详解(第二版)[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [10] 吴柏禧.基于多场耦合的增程器用外转子发电机转子结构设计[D].广州:华南理工大学,2018.
- [11] Arteaga O, Chacon S, Héctor C. Terán, et al. Design and structural analysis of an interprovincial bus applying the LFRD method[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 27.

# Finite Element Analysis and Research on the Rotor Slip Ring Structure of Permanent Magnet Generator

Wang Jianchun<sup>1,4</sup>, Zhang Ya<sup>2</sup>, Zhang Jun<sup>3</sup>

(1. Hunan Engineering Laboratory for control and optimization of PV systems, Xiangtan, Hunan 411104, China; 2. BAPTEEC Ltd; Beijing 100076, China; 3. Hunan Xiangdian Power Co., Ltd., Xiangtan, Hunan 411101, China; 4. Hunan Vocational Institute of Technology, Xiangtan, Hunan 411104, China)

**Abstract:** In the field of new energy power generation, the operation quality and service life of wind turbine are good or bad, and



the slip ring of generator rotor plays a decisive role; the determination of the matching clearance between the retaining ring and the shaft in the slip ring is the technical difficulty in the structural design and assembly of wind turbine generator at present. Based on the analysis model of the slip ring structure of the rotor of a wind power permanent magnet generator which is widely used in the wind power industry at present, and according to the working conditions of the slip ring, the finite element simulation analysis is carried out for different matching conditions. Through the simulation, the best clearance or interference is finally obtained, so that the generator can meet the best working requirements, so as to find the best value of the slip ring structure design, which is used to guide the slip ring Structure design and similar structure design provide theoretical reference.

**Keywords:** generator; rotor slip ring; interference volume; ANSYS finite element method

重磅！《化工设备与管道》再次被收录为“中国科技核心期刊”

中国科学技术信息研究所重磅发布《中国科技核心期刊目录》(2023 年版), 是中国最权威的科技核心期刊评价体系, 上海工程公司主办期刊《化工设备与管道》已连续多年被收录。

自 1987 年以来, 中国科技信息研究所 (ISTIC) 受国家科技部委托, 承担“中国科技论文统计与分析”工作, 对科技期刊的评价采用定量评价和定性评审相结合的方法。相关宏观统计数据编入国家统计局和国家科学技术部编制的《中国科技统计年鉴》, 统计和分析研究成果被科技管理部门和学术界广泛关注和应用。

近年来,《化工设备与管道》作为国内化工设备管道领域具有重要影响力的科技期刊,全面提升科技论文质量,着力打造一流科技期刊,成功入选中文核心期刊、中国科技核心期刊等中国核心期刊体系。《化工设备与管道》再次被收录为“中国科技核心期刊”,表明《化工设备与管道》的办刊质量、载文水平和行业影响力不断提升,期刊编辑部将秉承初心、务实笃行,为公司高质量发展建设贡献更大力量。

(曹姬姬、余鑫萍)

