

DOI: 10.19666/j.rlfed.202303035

基于实验模态和工作变形的大型风力发电机 转子动力学特性分析

马 斌, 张 庆, 沙德生, 李 芊, 王玉玉
(中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209)

[摘 要] 对大型风力发电机转子设备静止和旋转状态下的动力学特性进行了实验分析。研究主要基于实验模态分析和工作变形分析, 采用 LMS.TESTLAB 系统及无线数采系统, 首先测试各响应点锤击激励下振动信号, 信号经频响函数计算、曲线拟合后得到其各阶模态参数; 然后进行全转速振动测量, 并根据实验结果选取共振运行工况, 进行工作变形测试分析; 最终实现转子静态及旋转状态数据收集、模态参数提取和分析。分析结果表明: 发电机转子在旋转过程中, 发生共振的频率与实验模态频率存在偏差, 转子整体刚度减小; 且在旋转电磁力作用下, 振型由静止状态时的驻波形式变为行波形式。该研究结果对于转子动力学评估、仿真模型修正及参数输入以及转子结构优化设计具有借鉴参考意义。

[关 键 词] 风力发电机转子; 实验模态; 工作变形分析; 振型; 动态特性

[引用本文格式] 马斌, 张庆, 沙德生, 等. 基于实验模态和工作变形的大型风力发电机转子动力学特性分析[J]. 热力发电, 2023, 52(11): 132-139. MA Bin, ZHANG Qing, SHA Desheng, et al. Dynamic characteristic analysis of large-size wind turbine rotor based on experimental modal and operational deflection shape[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(11): 132-139.

Dynamic characteristic analysis of large-size wind turbine rotor based on experimental modal and operational deflection shape

MA Bin, ZHANG Qing, SHA Desheng, LI Qian, WANG Yuyu
(China Huaneng Clean Energy Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: Test for large-size wind turbine rotor under static and rotating conditions have been carried out for rotor dynamic characteristics. Based on experimental modal and operational deflection shape, firstly this test obtained modal data using LMS TEST.Lab system by calculating FRFs and curve fitting. Secondly the resonate speed was obtained according to the vibration sweep test. Then modal parameters were analyzed through operational deflection shape test under the resonate speed. The results show that the resonate frequency under rotating condition is different from the resonate frequency under the static condition. And the modal shape of rotor under rotating condition is travelling wave while it is standing wave under static condition. In conclusion, the integral stiffness is decreased when the rotor is rotating which results in the decrease of the resonate frequency, the modal shape turns to be the travelling wave resulting from the rotating magnetic force. This research results can offer a reference and guidance for rotor dynamics evaluation, simulation model modification and parameter input, and optimization design of rotor structure.

Key words: wind turbine rotor; experimental modal analysis; operational deflection shape; modal shape; dynamic characteristic

在风力发电领域, 对于大型变转速运行发电机, 其转子尺寸大, 刚度低, 固有频率一般分布在低频范围。由于其变转速运行, 且设计转速较低, 在整个运行转速范围内, 存在电磁激励力同结构固

有频率接近或重叠情况, 即存在共振转速工况^[1-2]。受产品成本及振动特性的影响, 一般设计上重点考虑产品额定工况电磁激励力的基频及二倍频避开结构一阶和二阶模态频率的一定范围^[3]。然而即便

收稿日期: 2023-03-09

基金项目: 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司研究与开发基金项目 (QNYJJ22-18)

Supported by: Research and Development Fund Project of China Huaneng Clean Energy Research Institute (QNYJJ22-18)

第一作者简介: 马斌 (1990), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为设备故障诊断与状态检修, b_ma@qny.chng.com.cn.

满足以上设计要求,仍然需要关注其他转速下电机的振动情况,对于振动较大的转速工况,需根据实际测试振动幅值,结合振动疲劳仿真等做出可靠性评估^[4-5]。因此,开展电机转子固有属性及动力学特性的研究,有助于在产品设计和仿真模拟初期合理评估其振动特性,规避产品动力学设计问题^[6-7]。

目前,对于发电机转子的动力学研究多采用有限元仿真分析的方式。文献[8-9]通过建立转子系统有限元模型,获取转子临界转速,分析了不平衡作用力对转子系统动态特性的影响。文献[10]通过建立进气道流体仿真模型,分析了气流激振力作用下旋转冲压转子的动力学响应特点。文献[11]通过求解静压气体轴承动态刚度系数及动态阻尼系数,研究了供气压力、转速、偏心运行参数对转子动力学参数及稳定性的影响。文献[12]通过建立电磁耦合力表达式,分析了开关磁阻电机电磁耦合状态下转子的弯曲振动规律。这些研究重点考虑电机内一种或几种作用力,然而转子在旋转状态下,存在电磁力、离心力、气动力、偏心、不平衡等多个作用力,且各作用力存在一定耦合,其受力模型复杂,仿真分析难以准确模拟其受力状态。工程上一般通过实验模态参数和仿真模态参数对标的方式,对仿真动力学模型进行修正,以获得较为准确的仿真模型^[13]。然而实验模态参数是在转子静止状态下测试提取,与实际旋转状态的模态参数存在差异。实验模态参数作为转子动力学评估的模型修正或仿真输入参数,本身存在一定误差。

为准确合理评估转子动力学特性,需获取实际运行状态下转子动力学参数。本文针对发电机转子静止状态和旋转状态,采用实验模态和工作变形分析方法,对转子的模态参数进行提取分析,研究转子静止和旋转状态的动力学参数变化特性。首先,采用 LMS.TESTLAB 系统,对某外转子永磁同步发电机进行实验模分析,获取转子静态模态参数;然后,采用无线数采设备采集各转速工况转子振动信号,分析转子动力学响应;最后,对转子进行工作变形测试,提取各测点相位和幅值信息,拟合转子旋转状态下的主要振型,分析旋转状态下转子的动力学变化特性。

1 实验原理及方法

1.1 激励源分析

本文实验发电机类型为 3 MW 直驱永磁同步风

力发电机,永磁磁钢为表贴式,双套绕组,星型连接,双套绕组相移 30°。发电机为外转子、内定子结构,外转子为对称结构。发电机轴系由定轴、转轴和双轴承组成,其中定轴连接实验台底座工装及定子支架,转轴连接转子支架,各部件间皆为螺栓刚性连接。转子极数与定子槽数的极槽比为 25/78 (极数 100,槽数 312),转速设计范围为 6.0~15.4 r/min。

由于大型风力发电机转速较低,机械旋转激励远离结构模态频率,因此不考虑机械方面的激励源。除机械激励外,电磁激励同样为发电机的主要激励源。永磁同步发电机电磁激励力频率主要为电流基波频率及其倍频,以及定子铁心开槽导致的齿槽频率。电磁激励力频率计算方法为^[14]:

$$f_p = f \times p \times n \quad (1)$$

$$f_z = f \times z \times n \quad (2)$$

式中: f_p 表示电流频率; p 表示电机磁极对数; f_z 表示齿槽频率; z 表示槽数; f 表示发电机转频; n 为正整数,表示激励频率的倍频。

发电机通用的径向电磁激励力计算方法为^[15-16]:

$$P(\theta, t) = b^2(\theta, t) / 2\mu_0 \quad (3)$$

$$b(\theta, t) = f(\theta, t) \times \lambda(\theta, t) \quad (4)$$

式中: $P(\theta, t)$ 表示电磁激励力; $b(\theta, t)$ 表示磁场密度; μ_0 表示空气磁导率; θ 表示相位参数; t 表示时间参数; $f(\theta, t)$ 表示磁动势; $\lambda(\theta, t)$ 表示气隙磁导。可见,电磁激励力主要由磁动势和气隙磁导的特征决定。转子偏心、转子不圆、定子铁心开槽、永磁体结构设计、定子电流谐波含量等都将影响磁动势和气隙磁导的空间和时间分布,从而影响发电机的电磁激励力。

根据上述电机设计参数及电磁激励公式计算可知,实验电机齿槽频率较高,远离结构的低阶模态频率,可不予考虑。电机的电流基波频率及倍频频率较低,需要重点关注。经过初步测试分析,实验发电机由于安装问题,转子外圆存在一定变形,测量的发电机气隙轮廓如图 1 所示。转子不圆导致气隙磁场发生非正弦性畸变,最终导致谐波电磁激励增大。本文除分析实验模态和工作变形外,还将对该发电机进行振动测量,以确定其全转速范围内的振动特性。

1.2 振动测量实验

为获取工作转速范围内转子结构的振动响应进行振动测量实验。通过振动测量,可计算得到全转速范围内转子的振动色谱图。联合振动色谱图及后续实验模态测试结果,分析转子全转速范围内是

否存在结构共振,并最终确定工作变形测试的最佳运行工况。

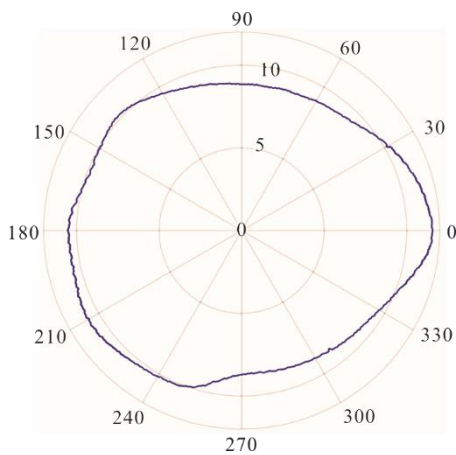


图1 发电机气隙轮廓
Fig.1 Outline of generator gap

由于电机转子为对称结构,振动测量时其测点分布如图2所示。选用IEPE式加速度传感器,发电机转子轴向上均布3个测点,周向上每隔60°布置1个测点,共计9个测点。振动测量时,转子处于旋转状态,选用无线振动采集设备收集振动信号,通过变频器控制电机转速,采集设计转速范围内(6.0~15.4 r/min)的振动信号,转速间隔设置为0.1 r/min,每个转速下运行90 s,采集频率设置为2 000 Hz。数据采集后,绘制各转速工况振动信号的频谱图,最终形成全转速范围的色谱图,通过色谱图分析转子振动特性。无线设备通过胶黏方式固定于转子表面,通过WIFI无线方式将振动信号实时回传到采集所用电脑。

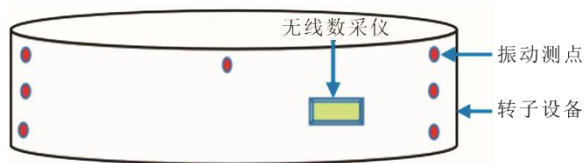


图2 振动测量测点布置
Fig.2 Layout of vibration measuring points

1.3 模态参数实验

1.3.1 模态参数实验方案

结构模态参数的实验方法,一般可分为实验模态、工作模态和工作变形分析。实验模态一般在实验室或厂内进行,采用锤击或激振器激励,可获得较好的信号质量,但是结构边界条件和实际现场安装条件会存在差异;工作模态一般在实际安装现场进行,通常采用环境激励或其它可用激励,如桥梁

采用车辆激励,大型叶片采用风激励等,其激励源不可控,信号质量较差,但结构边界条件为实际边界条件,数据可直接应用现场分析^[17-18];工作变形分析一般指结构处于工作状态时,测试结构的振动响应,提取响应的幅值相位等信息,分析其实际振型形态和振动特性。由于工作变形测试时,结构同时存在强迫响应和可能的共振响应,其振型实际为各种振动响应的叠加^[19-20]。因此在做工作变形分析时,一般还需要结合实验模态参数判断工作状态下的具体的动力学特征。

本文基于实验模态和工作变形分析方法进行相关实验分析。实验模态用于确定结构的固有属性参数分布,工作变形用来分析转子实际旋转状态下的振型和频率变化。通过分析模态参数变化,研究转子在不同状态下的结构动力学特性,为结构优化设计和动力学仿真等提供方向及数据支撑。

模态实验测点布置需根据仿真预实验结果进行,依据模态振型信息,振动拾取位置应避免振型节点,避免振动传感器拾取不到振型信号。本次实验中,为全面清晰获取实验模态振型信息,在转子周向均布24个传感器,同时在轴向上布置2层传感器,共计48个测点,采用分批测量方式,使用力锤进行模态激励。具体布点模型如图3所示。

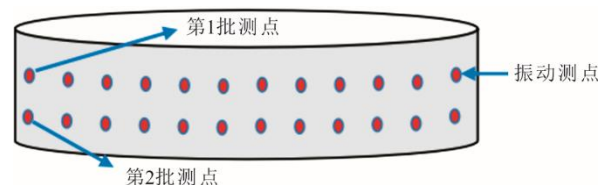


图3 实验模态分析测点布置
Fig.3 Layout of measuring points of EMS

进行工作变形测试时,转子处于旋转状态,需要选用无线采集设备收集振动信号。由于本次实验无线设备通道数量受限,采用在周向90°范围内,均布7个测点,采集运行过程中的振动信号。测点轴向具体位置根据振动测试结果确定,应保证测点位于变形的敏感区域。由于转子为对称型结构,因此在获取工作变形振型后,可通过模态振型的对称性,将90°振型扩展至360°。工作变形测试时,测点及无线设备布置如图4所示。

1.3.2 模态参数分析方法

模态实验采用锤击激励法,数据采集及处理使用LMS.TESTLAB模块,分析带宽设置为200 Hz,采集力锤的激励信号和振动传感器拾取的响应信

号。锤击激励信号能量较大，信噪比高，而大型结构导致部分远离锤击位置的测点响应信号能量小，信噪比低。因此，可将此实验假设为响应信号受噪声干扰，而激励信号无噪声干扰的模型。实际响应信号模型公式为：

$$Y(\omega) = X(\omega) + N(\omega) \quad (5)$$

式中： $Y(\omega)$ 表示实际响应信号； $X(\omega)$ 表示理想响应信号； $N(\omega)$ 表示噪声干扰。

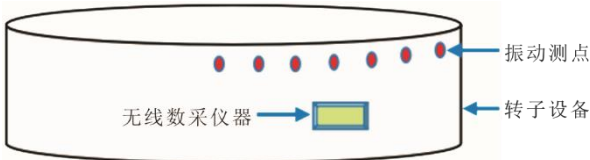


图 4 工作变形分析测点布置
Fig.4 Layout of measuring points of ODS

计算频响函数时，采用 H_1 估算式，通过 7 次锤击求平均的方式降低噪声干扰。 H_1 估计式的实现方式为^[21]：

$$H_1(\omega) = G_{fY}(\omega) / G_{ff}(\omega) = (G_{fX}(\omega) + G_{fN}(\omega)) / G_{ff}(\omega) \quad (6)$$

式中： $G_{fY}(\omega)$ 表示激励和实际响应的互功率谱； $G_{ff}(\omega)$ 表示激励的自功率谱； $G_{fX}(\omega)$ 表示激励和理想响应信号的互功率谱； $G_{fN}(\omega)$ 表示激励与噪声信号的互功率谱。由于噪声干扰同响应信号和激励信号不相关，因此噪声与激励力的互功率在多次测量平均后可有效降低，当平均次数足够多时，噪声干扰可认为降低为零^[21]。

获得频响函数后，采用最小二乘复频域数法进行曲线拟合，通过多阶迭代稳态图的方式，判断结构的模态频率。在进行迭代计算时，频率容差设置为 0.2，阻尼比容差设置为 0.5。当确定频率和阻尼后，通过计算留数和选定带宽外的上下残余项，确定模态振型。

对于工作变形分析，采用无线数采设备同步采集各测点振动信号，通过变频器调节发电机转速至选定工况。采集时长 150 s，设置采样频率 5 000 Hz。数据采集结束，选定某一测点为参考点，进行相位偏差计算：

$$\theta = N_{ij} / N_T \times 360 \quad (7)$$

式中： θ 表示相位角度； N_{ij} 表示测点 i 的峰值点和测点 j 的峰值点相差的采样点数； N_T 表示 1 个振动周期时间内的采样点数，且为所有测点采样点数的平均值。结合各点相位偏差和幅值大小，将相关信息输入测点模型，可动态显示运行过程中的转子变形

振型及频率信息。

2 实验结果分析

2.1 振动测量分析

对发电机转子全转速范围进行振动测试，绘制测试数据色谱图，结果如图 5 所示。由图 5 可知，转子振动在 0~100 Hz 范围内存在多个激励源，激励力频率与转速存在线性关系，经计算为电流基波频率和基波频率倍频。其中，非驱动端侧测点振动明显较大，电流基波频率的 4 倍频（33.33 Hz）在 10 r/min 时振动幅值最高。根据振动响应特点，可初步判断存在共振情况，且主振位置靠近发电机非驱动侧。

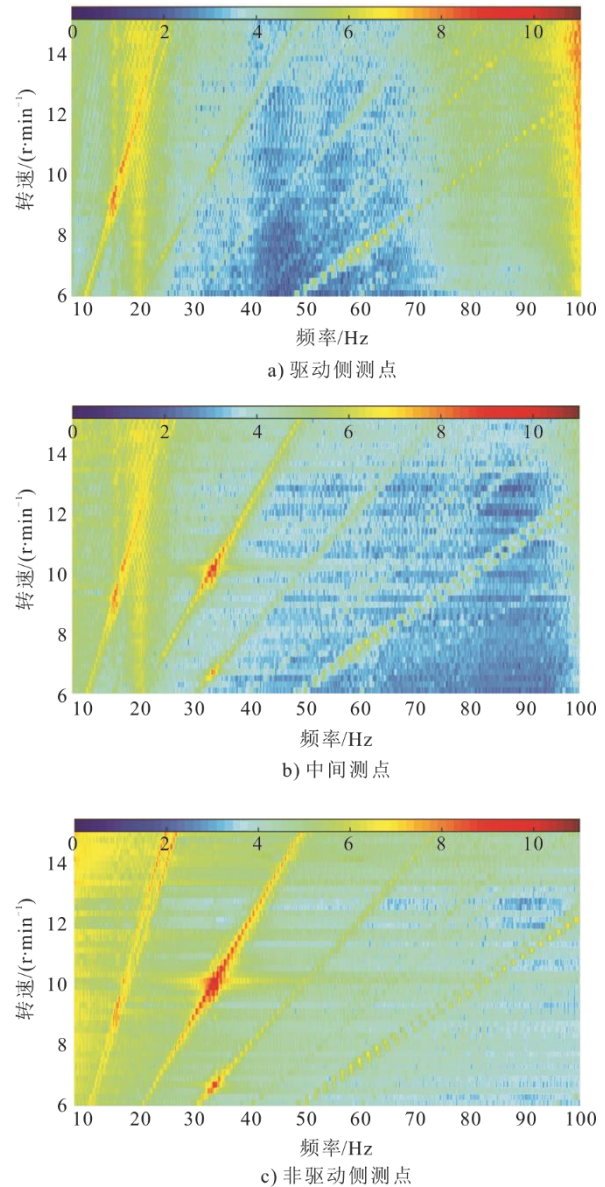


图 5 全转速范围振动测量色谱图
Fig.5 Vibration colormap of overall speed

2.2 模态参数分析

2.2.1 实验模态分析

根据前述方案进行实验模态测试，锤击过程中选择多个锤击点进行激励，以避免锤击到振型节点位置而造成对应模态丢失。模态参数提取结果见表 1。其中，一阶摆阵和二阶弯曲模态的振型图如图 6、图 7 所示。由测试结果可知，50 Hz 范围内转子存在三阶模态，模态振型整体较为平滑，振型结果较理想。

对测试结果进行相关性 MAC 验证，结果如图 8 所示。由图 8 可知，不同阶数的模态振型之间 MAC 值低于 10%，各振型不相关，振型提取质量较好。

表 1 模态参数统计
Tab.1 Statistical table of modal parameters

阶数	频率/Hz	振型描述
1	19.45	一阶左右摆动
2	29.36	轴向前后窜动
3	33.92	二阶弯曲振动
4	62.12	三阶弯曲振动

根据模态参数提取结果，绘制转子系统坎贝尔图，结果如图 9 所示。由图 9 可知，基波倍频激励频率和模态频率存在多个交点工况，这些交点对应的转速为潜在的共振工况。由振动测量分析得知 10 r/min 工况存在振动峰值，可判断该发电机转子存在共振工况，共振转速为 10 r/min。

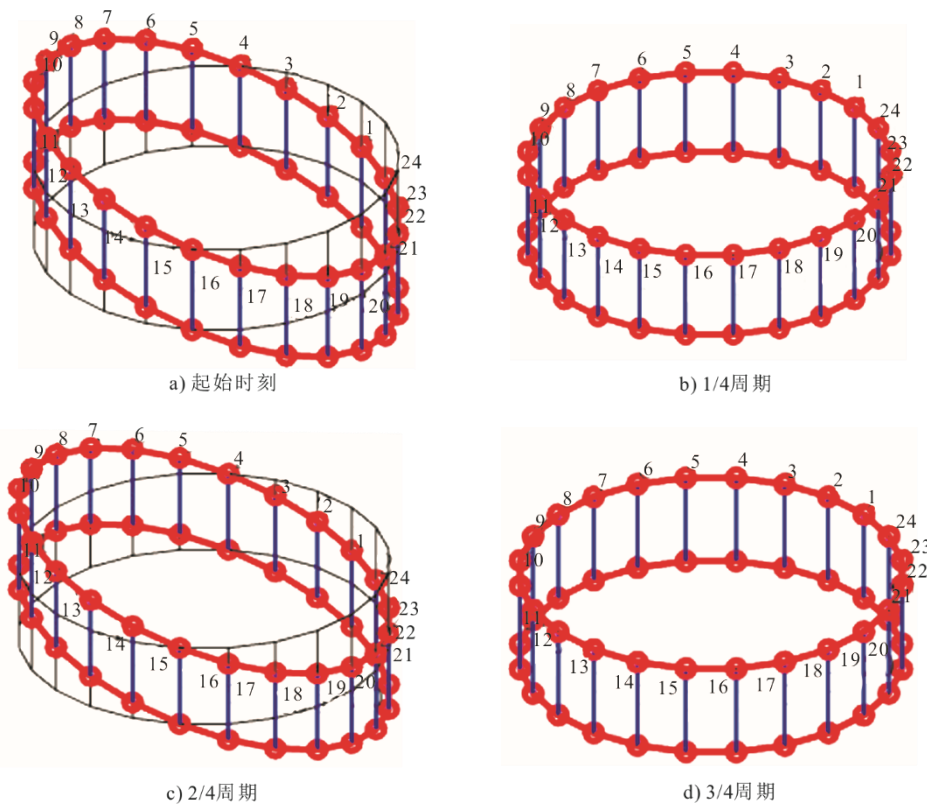
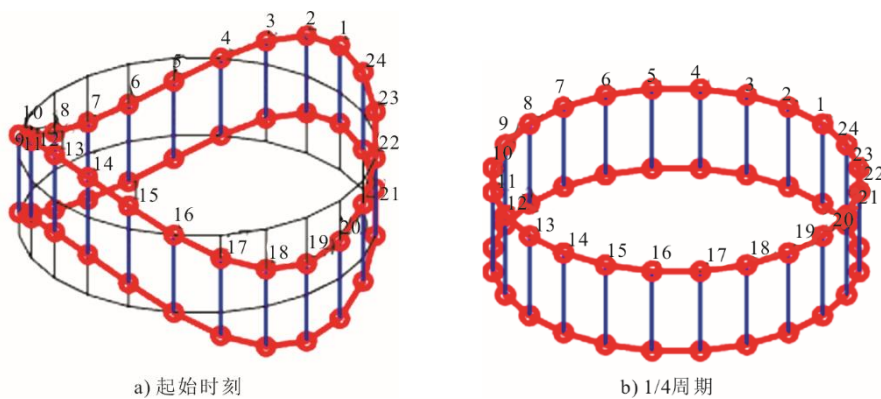


图 6 一阶摆动振型
Fig.6 Modal shape of first mode



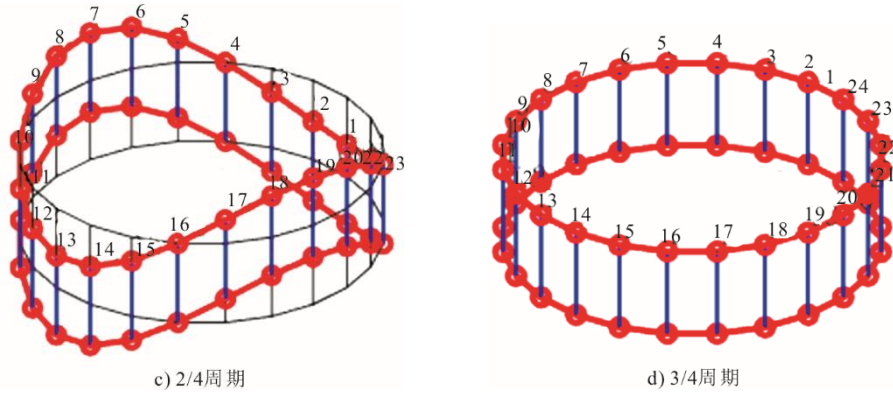


图 7 二阶弯曲振型
Fig.7 Modal shape of second mode

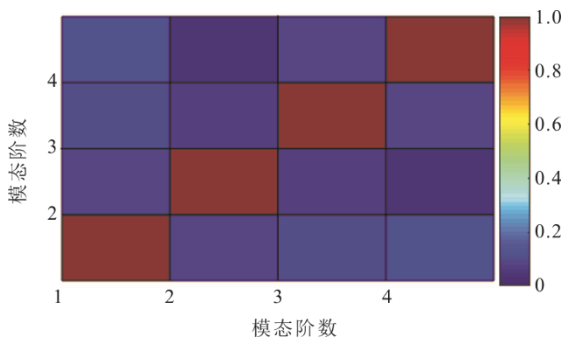


图 8 低阶模态 MAC 图
Fig.8 Mac histogram of low-order modes

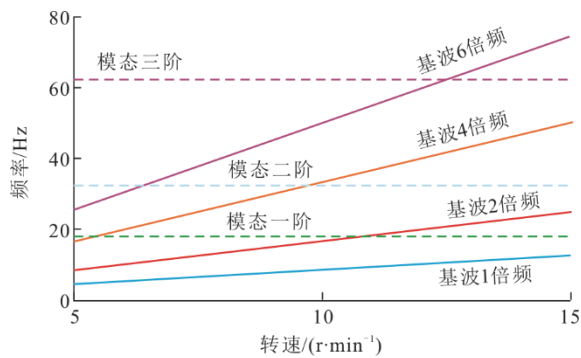


图 9 转子坎贝尔图
Fig.9 Campbell diagram of rotor

2.2.2 工作变形分析

针对上述数据分析情况，在非驱动侧周向 0~90°范围内均匀布置 7 个传感器，将电机转速调至 10 r/min，转速稳定后，采集其运行状态下的振动数据。运行过程中振动信号时域图谱如图 10 所示，频域图谱如图 11 所示。由于转子转速较低，在低频范围内结构无显著振动激励，但在转子旋转过程中，振动传感器受本身工作特性影响会输出转频周期的信号，此信号非结构真实振动信号，因此图 10 中

的振动信号进行了 2 Hz 的高通滤波。从图 10 和图 11 可以看出，各测点振动幅值处于同一量级，各测点信号间存在一定的相位偏差。振动主要频率为 32.68 Hz，此频率同时也是基波 4 倍频的边频频率（基波 4 倍频 33.33 Hz，转频 0.33 Hz）。

通过式(7)计算获取运行过程中各测点的相对振动相位，对振动相关信息进行统计，结果见表 2。

将获取的振动测点幅值和相位信息输入测点模型，动画显示不同时刻转子振型状态。各测点振型显示如图 12 所示，根据其对称特性，将振型扩展至全结构如图 13 所示。

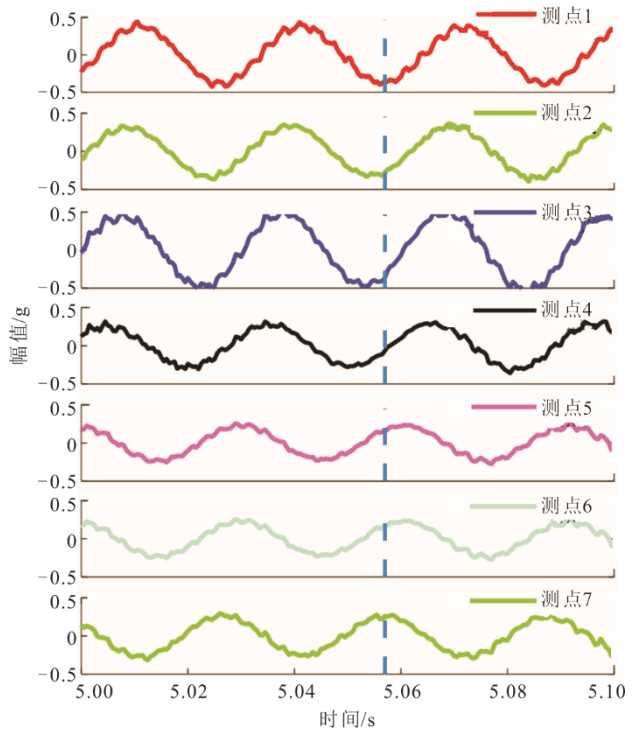


图 10 转子振动时域波形
Fig.10 Time wave of rotor vibration

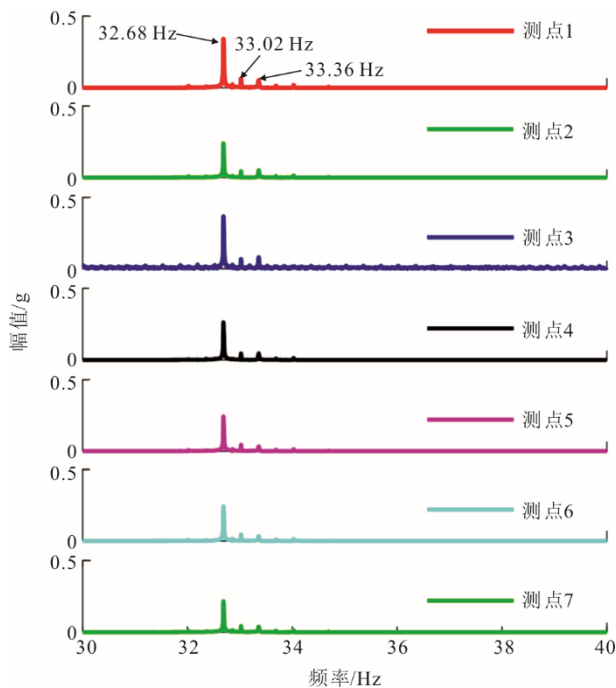


图 11 转子振动频谱图

Fig.11 Spectrum of rotor vibration

表 2 工作变形分析各测点振动信息统计

Tab.2 Vibration information statistical of ODS

测点位置	主振频率/Hz	最大幅值/g	相对相位/(°)
测点 1	32.68	0.24	0
测点 2	32.68	0.28	47.2
测点 3	32.68	0.39	94.4
测点 4	32.68	0.37	118.0
测点 5	32.68	0.34	135.7
测点 6	32.68	0.29	153.4
测点 7	32.68	0.26	177.0

由图 12、图 13 可知，在运行过程中，转子的变形形式同二阶弯曲振型一致，各测点振动幅值相当，且存在一定的相位偏差，即旋转状态下，二阶弯曲振型沿转子周向旋转，振型为行波特征。

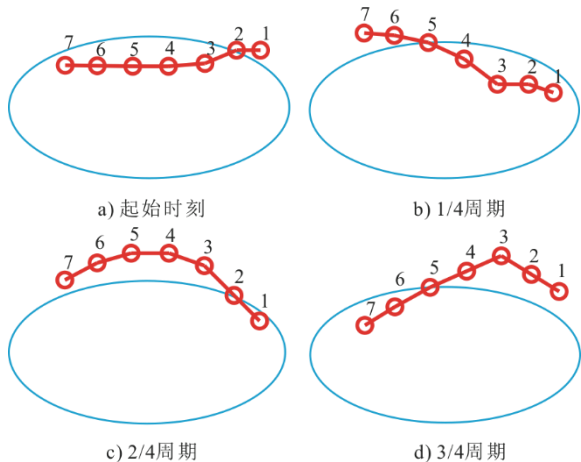


图 12 工作变形振型（局部振型）

Fig.12 Modal shape of ODS (local)

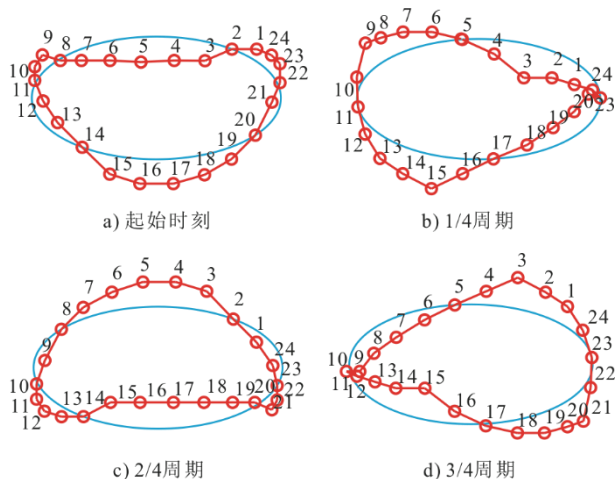


图 13 运行变形振型（全结构振型）

Fig.13 Modal shape of ODS (global)

3 结 论

1) 通过实验模态分析和工作变形分析，得出发电机转子在旋转过程中，实际转子边界条件已经发生改变，转子整体刚度降低，静止状态转子二阶弯曲频率为 33.92 Hz，实际旋转状态二阶弯曲共振频率为 32.68 Hz。

2) 发电机磁场为旋转磁场，电磁激励既是空间分布函数，也是时间函数，在电磁力时间-空间激励下，转子振型由静止状态下的驻波特征变为行波特征。以转子实际旋转状态下动力学参数作为仿真模型修正或输入参数，能够更加合理准确评估转子动力学响应特性，为振动问题解决、结构优化设计提供指导和参考。

[参 考 文 献]

[1] 李源, 曹国豪, 马武福, 等. 风力发电机定子振动测试及响应分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版). 2021, 43(6): 183-190.
LI Yuan, CAO Guohao, MA Wufu, et al. The vibration test and response analysis of wind power generation stator[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology edition), 2021, 43(6): 183-190.

[2] 单光坤, 王晓东, 姚兴佳, 等. 兆瓦级风力发电机组的稳定性分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(7): 786-791.
SHAN Guangkun, WANG Xiaodong, YAO Xingjia, et al. Stability analysis on MW wind turbine[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2008, 29(7): 786-791.

[3] 刘石, 仲继泽, 冯永新, 等. 大型二极汽轮发电机定子端部绕组共振的二重点理论[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(7): 80-84.
LIU Shi, ZHONG Jize, FENG Yongxin, et al. Two-coincidence condition of resonance for stator end winding in large two-pole turbogenerator[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(7): 80-84.

[4] 覃金飞, 杨国俊, 邵杰. 基于工作模态法的装载机后车架动态特性分析[J]. 现代制造工程, 2016(12): 67-70.

- QIN Jinfei, YANG Guojun, SHAO Jie. Analysis of dynamic characteristics of a certain loader rear frame based on operational modal method[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2016(12): 67-70.
- [5] 李德葆, 陆秋海. 实验模态分析及其应用[M]. 北京: 科技出版社, 2001: 2.
LI Debao, LU Qiu hai. Analysis and application of experimental modal[M]. Beijing: Beijing Science Technology Press, 2001: 2.
- [6] 于开平, 邹经湘. 结构动力学[M]. 3 版. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015: 2.
YU Kaiping, ZOU Jingxiang. Dynamics of structures[M]. 3rd ed. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2015: 2.
- [7] 刘闯, 朱旭勇, 卿湘文. 开关磁阻电机转子动力学建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 83-89.
LIU Chuang, ZHU Xuyong, QING Xiangwen. Modeling and analysis of switched reluctance machine considering rotor dynamics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(3): 83-89.
- [8] 瓮雷, 杨自春, 曹跃云. 转子系统临界转速计算及不平衡响应分析[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(11): 65-69.
WONG Lei, YANG Zichun, CAO Yueyun. Critical speed of the rotor system and the unbalance response analysis[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2012, 33(11): 65-69.
- [9] 权凌霄, 刘嵩, 张崇. 轴向柱塞泵-电机转子系统临界转速及不平衡响应分析[J]. 液压与气动, 2017(3): 49-56.
QUAN Lingxiao, LIU Song, ZHANG Chong. Critical speed and unbalance response analysis for turbine shaft rotor system of swash-plate axial piston pump[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2017(3): 49-56.
- [10] 刘占生, 亢维佳, 张广辉, 等. 气流激振力作用下旋转冲压转子动力学响应[J]. 振动与冲击, 2013, 32(3): 150-156.
LIU Zhansheng, KANG Weijia, ZHANG Guanghui, et al. Dynamic response of a rotating ramjet rotor under flow induced force[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(3): 150-156.
- [11] 李健, 杨少荣, 李晓明, 等. 运行参数对静压气体轴承动力学特性的影响[J]. 轴承, 2017(9): 42-48.
LI Jian, YANG Shaoqi, LI Xiaoming, et al. Effects of operating parameters on dynamic characteristics of externally pressurized gas bearings[J]. *Bearing*, 2017(9): 42-48.
- [12] 王峰, 吴志强, 李亚杰. 电磁激励下开关磁阻电机转子的弯曲振动分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(18): 243-250.
WANG Feng, WU Zhiqiang, LI Yajie. Bending vibration analysis of a SRM rotor under electromagnetic excitation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(18): 243-250.
- [13] 王福乾, 米洁, 杨庆东. 基于测试和仿真的机床整机动态特性研究[J]. 机械设计与制造. 2020(4): 79-83.
WANG Fuqian, MI Jie, YANG Qindong. Research on dynamic characteristics of machine tool based on test and simulation[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(4): 79-83.
- [14] 陈永校, 诸自强, 应善成. 电机噪声的分析和控制[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1987: 135-141.
CHEN Yongxiao, ZHU Ziqiang, YING Shancheng. Motor noise analysis and control[M]. Zhejiang: Zhejiang University, 1987: 135-141.
- [15] 路文开, 张卫, 唐杨. 永磁同步电机定子振动特性分析[J]. 机械设计与制造, 2020(8): 232-234.
LU Wenkai, ZHANG Wei, TANG Yang. Analysis of stator vibration characteristics of permanent synchronous motor[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(8): 232-234.
- [16] 张磊, 温旭辉. 车用永磁同步电机径向电磁振动特性[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(5): 33-40.
ZHANG Lei, WEN Xuhui. Radial electromagnetic vibration model characteristics of pmsms for electric vehicles[J]. *Electric Machines and Control*, 2012, 16(5): 33-40.
- [17] 李星占, 岳晓斌, 黄文, 等. 振动响应传递率及其工作模态分析方法综述[J]. 振动与冲击, 2019, 38(18): 24-34.
LI Xingzhan, YUE Xiaobin, HUANG Wen, et al. Vibration response transmissibility and operational modal analysis methods: a review and comparative study[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(18): 24-34.
- [18] 周铨, 曹阳光, 刘浩, 等. 汽车顶棚约束模态与工作模态分析与比较[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(2): 84-87.
ZHOU Hong, CAO Yangguang, LIU Hao, et al. Analysis and comparison of constraint modal and operation modal of a car roof[J]. *Noise and Vibration Control*, 2016, 36(2): 84-87.
- [19] 伍川辉, 周灿, 靳行. 振动谱与 ODS 分析在内燃机车降噪研究中的应用[J]. 中国测试, 2019, 45(6): 132-137.
WU Chuanhui, ZHOU Can, JIN Hang. Vibration spectrum and ODS for studying noise reduction of diesel railcar[J]. *China Measurement & Test*, 2019, 45(6): 132-137.
- [20] 刘斌, 冯涛, 吴雪, 等. 斜筒式滚筒洗衣机工作变形与低频噪声分析[J]. 噪声与振动控制, 2010(3): 51-54.
LIU Bin, FENG Tao, WU Xue, et al. ODS and low-frequency noise analysis on the tilt open drum washing machine[J]. *Noise and Vibration Control*, 2010(3): 51-54.
- [21] 曹树谦, 张文德, 萧龙翔. 振动结构模态分析-理论、实践与应用[M]. 2 版. 天津: 天津大学出版社, 2014: 104-109.
CAO Shuqian, ZHANG Wende, XIAO Longxiang. Modal analysis of structure vibration-theory, practice and application[M]. 2nd ed. Tianjin: Tianjin University Press, 2014: 104-109.

(责任编辑 杨嘉蕾)