第 45 卷　第 8 期
2024 年 8 月

仪　器　仪　表　学　报
Chinese Journal of Scientific Instrument

Vol. 45 No. 8
Aug. 2024

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412403

复合故障下风电齿轮箱声音信号耦合调制模型辨识与故障诊断*

王建国[1],田　野[1],刘皓宇[2],辛红伟[1],武英杰[1]

(1. 东北电力大学自动化工程学院　吉林　132012; 2. 华能河南清洁能源分公司　郑州　450000)

摘　要:针对两级行星一级平行齿轮箱不同位置受损导致的复合故障,提出一种声音信号耦合调制模型,以辅助专家进行故障诊断。当风电齿轮箱发生复合故障时,其特征频率会以调幅和调频的形式影响不同轮系的啮合频率,为此,本文提出了复合故障下风电齿轮箱声音信号幅值耦合调制模型;利用模型参数辨识思路,确定所提耦合调制模型中不同轮系的调幅系数,并通过构建边带能量比指标,用于评价辨识效果;最后,利用声音信号耦合调制模型的重构谱,确定复合故障位置,实现具有辅助性质的故障诊断。实验与现场数据分析表明:用于评价辨识结果的边带能量比指标分别为 0.948,0.972,0.977 和 0.964 3,有效说明了模型辨识的有效性,为齿轮箱复合故障自动诊断奠定了基础。

关键词: 风电齿轮箱;声音信号;故障诊断;耦合调制

中图分类号: TH165.3　　**文献标识码**: A　　**国家标准学科分类代码**: 470.4047

Identification and fault diagnosis of sound signal coupling modulation model of wind power gearbox under compound fault

Wang Jianguo, Tian Ye, Liu Haoyu, Xin Hongwei, Wu Yingjie

(*1. School of Automation Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;*
2. Huaneng Henan clean energy branch, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: To assist experts in fault diagnosis, a sound signal coupling modulation model is proposed for compound faults caused by damage at different positions in a two-stage planetary gear system with a single-stage parallel gearbox. When compound faults occur in a wind turbine gearbox, their characteristic frequencies affect the meshing frequencies of different gear stages in the form of amplitude modulation and frequency modulation. Therefore, this paper proposes a coupling modulation model for the amplitude of sound signals in the wind turbine gearbox under compound faults. By utilizing a parameter identification approach, the modulation coefficients for different gear stages in the proposed coupling modulation model are determined. An energy ratio of sidebands index is constructed to evaluate the effectiveness of the identification. Finally, the reconstructed spectrum of the sound signal coupling modulation model is used to determine the location of compound faults, achieving auxiliary fault diagnosis. Experimental and field data analysis show that the sideband energy ratio indicators for evaluating the identification results are 0.948, 0.972, 0.977, and 0.964 3, effectively. These results effectively demonstrate the validity of the model identification, laying a foundation for automatic diagnosis of gearbox compound faults.

Keywords: wind turbine gearbox; acoustic signals; fault diagnosis; coupled modulation

0　引　　言

风力发电齿轮箱是连接机组主轴和发电机的重要部件,由于机组处于交变载荷工况,齿轮箱易出现磨损、点蚀等故障。齿轮箱作为机组关键部件,是故障诊断与异常排查的重要环节,所以齿轮箱故障诊断是近年风电机组故障诊断的重要方向[1-2]。

收稿日期:2024-01-16　　Received Date: 2024-01-16

*基金项目:吉林省发展和改革委员会创新能力建设(2020C022-3)、吉林省科技发展计划重点研发(20220203077SF)、吉林省教育厅科研(JJKH20230129KJ)项目资助

目前,齿轮箱故障诊断已取得众多研究成果。Inalpolat 等[3-4]在考虑行星齿轮传动不同结构参数的情况下建立了动力学解析模型,将行星轮传动系统分为 5 种类型,每种类型都具有各自典型的边带结构。在建立动力学模型的基础上,初步解析了含有制造误差条件下的振动信号调制效应以及振动信号的边频带分布模式,为齿轮故障情况下的频谱分布提供了理论基础。祝文颖等[5]将改进的 EWT 方法用于行星齿轮箱振动信号的分析,成功提取特征频率,诊断出故障。王况等[6]提出一种在变速条件下对旋转机械故障诊断的新方法,确定故障信号的能量,进行诊断。文献[7]考虑到振动信号中由于振源与采集器时变路径的影响,利用旋转编码器信号成功解决了这一难题,并成功诊断出齿轮箱故障。杨小青等[8]基于齿轮故障振动啮合调制模型,利用平方幅值解调,提出一种调幅调频信号准确分离方法。吴岚等[9]针对风电机组齿轮箱中同一旋转轴上的不同零部件(齿轮、轴承等),提出了一种基于变分模态分解 VMD 倒频变换的方法,实现了对这一复合故障的精细诊断。候双珊等[10]针对单一尺度的熵值不能完整反映序列间模式复杂性问题,通过复合粗粒化的方式对时间序列进行多尺度分析,提出了一种基于复合多尺度交叉模糊熵和萤火虫优化支持向量机的行星齿轮箱故障诊断方法。文献[11]针对两级行星一级平行结构的齿轮箱提出一种考虑级间耦合调制的现象学模型,为提高风电齿轮箱故障诊断准确性提供参考。贾舜宇等[12]针对齿轮箱复合故障特征难于提取,提出一种基于随机森林与证据理论相融合的多通道齿轮箱复合故障诊断方法。

目前,不少学者利用非接触监测方式对齿轮箱进行故障诊断。Ferrando 等[13]将声发射技术应用于风电机组齿轮箱的健康诊断中,研究了运行条件对风电机组齿轮箱声发射产生的影响。罗奕等[14]通过采集行星轴承内圈故障声发射信号,利用自适应选取声发射信号能覆盖的高频段共振带进行包络分析,实现对行星轴承的故障特征提取。虽然声发射信号被广泛应用于故障诊断领域,但是其与声音信号有本质上的不同,声发射信号由材料表面和内部结构变化,在受到应力或外部负载时会释放能量,产生声波信号,而声音信号则是通过声音传感器直接获取环境中的各种声源;二者获取信号的途径不同;其次,声发射信号源自微小裂纹或损伤的释放能量,通常具有较高的频率和短脉冲宽度,而声音信号的特征取决于其来源,它们可能具有不同的频率、振幅和波形等。武成同[15]使用小波包变换和希尔伯特变换,实现了对实验室两级平行传动齿轮箱的故障诊断,得出声音信号对早期故障具有敏感性,而且声音信号比振动信号具有更宽的频域、非接触式测量等优点。田昊等[16]通过某型两级传动齿轮箱齿面磨损故障诊断试验,对比阶次谱和阶次谱倒谱得出声音信号分析效果可以与振动信号相媲美,而且一定程度上优于振动信号。张郑武等[17]揭示了齿轮故障特征在声音信号共振频带内的分布规律。Li 等[18]提出一种基于均匀圆形麦克风阵列的远场声信号处理方法,用于齿轮故障检测。Hu 等[19]提出了一种关于行星减速机的振动-声学故障诊断方法。该方法解决了振动声学信号弱、故障特征提取困难、诊断精度和效率低等问题。根据共振频率不随转速变化的特点定位了齿轮箱共振频率,利用高阶同步压缩变换方法提取共振频带内行星齿轮箱故障特征。在一些应用中,振动信号不可用,声音信号可以作为变速箱故障诊断的有希望的替代方案,并且相较于振动信号,声音信号避免了传递路径对信号的干扰[20]。

在实际运行中,由于齿轮箱结构复杂、零部件众多、传动过程高度耦合,往往会发生一个部件上多处故障、多个部件同时故障的等多种复合故障的情况[21-22]。对于复合故障模型,往往存在公式复杂,公式中参数较多等问题,而模型中的参数对判断齿轮箱内部优劣又具有直接关系,因此参数辨识应用广泛。邓聪颖等[23]引入带遗忘因子递推最小二乘法在线辨识电机各参数,通过实时修正偏差解耦控制模型中的电机参数实现 d-q 轴电流解耦。文献[24]通过对旋转设备叶尖振动位移与振动速度在叶片共振时的不同振动特征,建立其数学模型,并辨识出了叶片的振动参数,该方法也证实了对于振动数据进行参数辨识的可行性。在文献[25]中,作者建立了两级齿圈故障下的振动信号耦合调制模型,并通过参数辨识确定故障辨识模型的调幅系数,进而构建了状态检测指标,达到了对风机齿轮箱状态检测的目的。由此看来,参数辨识算法已然成熟,对于构建模型具有相当大的帮助。

目前,对风机齿轮箱诊断大部分集中在振动信号,对于声音信号研究较少,已有文献并没有给出声音信号现象学模型,尤其是齿轮复合故障模型。因此,本文针对两级行星一级平行结构风电齿轮箱复合故障,提出了一种基于声音信号的齿轮箱耦合调制模型与故障诊断方法。

1　机舱内声源分析

在机组运行过程中,机舱内部存在多个声音源,从文献[26-29]中可以得知,风力发电机机舱内部的声音涉及多个因素,反映了风力发电系统复杂的机械和电气运作过程。将其总结如下。

1)机械旋转声音:由风扇、发电机、齿轮箱、传动系统等机械部件的运转所产生的轰鸣声或机械摩擦声。其中,齿轮箱作为风力发电机中关键的组成部分,其运转会导致齿轮之间的摩擦声以及机械振动引起的声音。

2)风噪:由风在机舱外部和内部的流动引起的声音,特别是当风速增大时,可能产生的风声或风压声。

3)冷却系统声音:由润滑系统中泵、管道、风扇等引起的声音,可能表现为风扇启动或者油泵运转的声音。

4)电气设备声音:发电机、变频器、控制系统等电气设备运行时可能产生的嗡鸣声。

5)异常声音:可能源自于零部件损坏、磨损或故障的异常声音,例如齿轮磨损、轴承故障、松动零件甚至零件脱落等。

综上,风力发电机机舱内部的声音是一个复杂的系统,受到多个因素的影响。分布在机舱内部的声音传感拾取到声音信号的不仅仅是齿轮箱内部的,还包括各类声源所发出的声音信号,导致给齿轮箱的故障诊断工作带来挑战,本文在齿轮箱声音信号模型基础上,通过辨识的方法排除非齿轮箱的干扰信号,最后对经过"滤波"后的声音信号进行分析与诊断。

2 齿轮箱声音信号耦合调制模型

本文研究的是具有 2 级行星 1 级平行结构的风电齿轮箱,结构简图如图 1 所示,力矩通过主轴传递给 1 级行星架,再通过由 1 级行星架带动 1 级行星轮转动,由此传递方式,将力矩传至第 3 级小齿轮,带动发电机运作。由于该传递路径的特殊性,无论齿轮处于正常状态还是故障状态,啮合频率始终都是存在的,只是 2 种状态下的振幅值大小是有差异的[30]。齿轮啮合情况良好,啮合频率及其谐波的幅值相对较低。啮合频率及谐波的幅值增大,除了可能与载荷变化等因素有关外,齿轮侧隙不当往往是最直接、最主要的影响因素[31]。

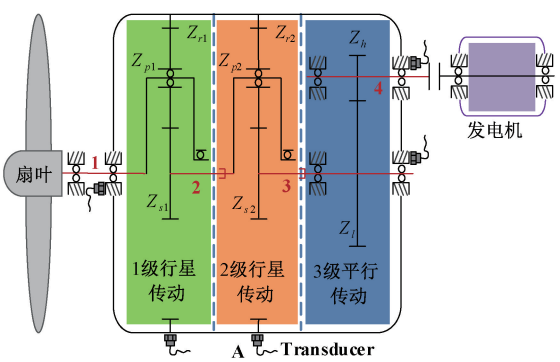


图 1 齿轮箱结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of gearbox structure

对于 2 级行星 1 级平行结构齿轮箱,分析齿轮的运动学关系可知:

由于齿圈-行星轮啮合副与行星轮-太阳轮啮合副之间存在力的平衡作用[32],当第 2 级行星轮轮系的齿圈出现局部故障时,由于行星轮与齿圈的相互啮合,故障冲击会影响至行星轮特征频率,而又因为行星轮同时与 2 级太阳轮之间相互啮合,从而导致该故障冲击传递至 2 级太阳轮,平行级大齿轮也会因与 2 级太阳轮相互啮合以产生相同频率波动,所以导致 2 级齿圈故障调制 3 级啮合频率现象的发生。虽然第 3 级传动系统齿轮正常,但由于齿轮间啮合,进而将 2 级齿圈故障特征频率传递至第 3 级,使得第 3 级出现一种"虚拟故障"的状态[25]。

传动过程中,齿轮传递的扭矩和转速变化会引起频谱的谐波分量的调制。调制导致与载波频率相关的边频分量增加。在旋转 1 圈中,传递扭矩的变化会引起正弦噪声或振动信号的幅值调制。风电齿轮箱振动信号存在不同传动级间特征频率串联调制、两级齿圈故障特征频率与各载波呈现交叉调制现象[33],在声音信号中同样存在。目前现有文献并未给出明确风电齿轮箱声音信号数学模型,因此本文建立了声音信号数学模型。

以上通过齿轮箱内部力矩传递规律解释了特殊调制现象,下面通过现象提出新模型。本文在已有单级行星齿轮箱和定轴齿轮箱模型基础上,提出基于声音信号的复合故障新模型,即 1、2 级轮系或第 3 级定轴轮系复合故障下风电齿轮箱各级轮系的声音信号模型:

$$x(t) = \sum_{m=1}^{M} A_m a_m(t)\cos(2\pi f_{mesh}t + b_m(t)) \tag{1}$$

式中:

$$a_m(t) = 1 + \sum_{k=0}^{K} a_{mk}\cos(2\pi k f_{1r}t + \alpha_{mk}) + \sum_{i=0}^{I} b_{mi}\cos(2\pi i f_{2r}t + \beta_{mi}) + \left(1 + \sum_{n=0}^{N} c_{mn}\cos(2\pi n f_d t + \gamma_{mn})\right)\cdot\left(1 + \sum_{q=0}^{Q} d_{mq}\cos(2\pi q f_g t + \delta_{mq})\right) \tag{2}$$

$$b_m(t) = \sum_{j=0}^{J} e_{mj}\sin(2\pi j f_{1r}t + \mu_{mj}) + \sum_{p=0}^{P} g_{mp}\sin(2\pi p f_{2r}t + \theta_{mp}) + \left(1 + \sum_{n=0}^{N} u_{mn}\cos(2\pi n f_d t + \gamma_{mn})\right)\cdot\left(1 + \sum_{q=0}^{Q} v_{mq}\cos(2\pi q f_g t + \delta_{mq})\right) \tag{3}$$

其中,f_{mesh} 为第 2 级行星轮系或者第 3 级定轴轮系的啮合频率,$a_m(t)$ 为复合故障下调幅成分,$b_m(t)$ 为复合故障下调频成分,$a_m(t)$ 与 $b_m(t)$ 中故障信号相加形式表述了耦合调制现象,特征信号相乘的形式表述了串联调制现象,即低速轴调制高速轴现象。a_{mk}、b_{mi}、c_{mn} 和 d_{mq} 分别为 1 级齿圈、2 级齿圈、低速轴、高速轴的故障调幅系数。f_{1c} 和 f_{2c} 为一二级行星架转频,f_{1r} 和 f_{2r} 为 1、2 级齿圈故障特征频率,f_d 和 f_g 为低速轴、高速轴转频,α_{mk} 和 β_{mi} 为故障调幅函数的初始相位,e_{mj}、g_{mp}、u_{mn} 和 v_{mq} 分别为 1 级齿圈、2 级齿圈、低速轴、高速轴的故障调频系数,

γ_{mn} 和 δ_{mq} 为串联调制函数的初始相位,μ_{mj} 和 θ_{mp} 为故障调频函数的初始相位。式中 $a_m(t)$ 与 $b_m(t)$ 相乘部分体现了齿轮箱声音信号特有的低速轴调制高速轴现象。

3　基于模型参数辨识的故障诊断原理

3.1　参数辨识方法

参数辨识是一种通过实验数据或者系统输入输出信号来确定数学模型的方法。在实际工程应用中,参数辨识技术对于控制系统的设计、优化和故障检测具有重要意义[34]。通常情况下,参数辨识可分为黑箱辨识和灰箱辨识两种。其中,黑箱辨识只关注系统的输入输出数据,对于模型结构并不作任何假设;而灰箱辨识是系统辨识的一种特殊情况,它需要事先假定一个模型结构,并且使模型输出与系统实际输出之差满足性能指标函数,从而得到系统参数[35]。在灰箱辨识中,模型结构已知,但是某些参数未知,需要通过数据分析方法来确定。

本文研究了风电齿轮箱的故障诊断方法,借鉴参数辨识的思路,以声音信号啮合频率边带的包络信号(envelope signal, ES)为辨识对象,经过对信号预处理后,ES 中不仅存在包含复合故障的调幅信号,且含有其他声源所发出的声音信号,所以 ES 中成分未知,所以需建立一个包络信号辨识模型(envelope signal identification model, ESIM)以准确拾取齿轮箱声音信号,从而进行复合故障下的齿轮箱故障诊断,如式(4)所示。

ESIM 是一个包含多种故障的多级齿轮箱齿轮故障调幅信号的线性组合,具体体现为调幅信号及其谐波相加及相乘。对式(4)进行辨识,将原始信号中存在的部分进行保留,不存在的部分将其系数置为 0。如图 2 所示,该图描述了辨识算法的原理;声音信号经过解调后与本文建立的模型进行“对比”,对差值较大的参数进行不断优化,将优化后的参数带入模型,最后得到声音信号耦合调制模型。本文采用了窄带滤波-幅值解调的方法获取包络信号,并将其输入 ESIM 模型中进行辨识。通过实验验证,本文所提出的参数辨识方法对于 1、2 级齿圈复合故障以及平行级复合故障有较高的准确性和可靠性,并具有一定的通用性和可扩展性。

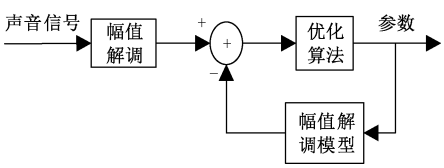


图 2　辨识系统方框图

Fig. 2　Identification system block diagram

$$ESIM(\theta) = A\left\{\left[1 + \sum_{FT}\sum_{m=1}^{T} A_i^{FT}\cos(iO^{FT}\theta + \varepsilon_i^{FT})\right] + \left[1 + \sum_{FT}\sum_{n=1}^{q} A_q^{FT}\cos(qO_d\theta + \gamma_q^{FT})\right]\cdot \left[1 + \sum_{FT}\sum_{r=1} A_p^{FT}\cos(pO_g\theta + \sigma_r^{FT})\right]\right\} \tag{4}$$

其中,故障类型(fault type, FT)包含第 1 级的齿圈、行星轮和太阳轮故障,第 2 级的齿圈、行星轮和太阳轮故障, 第 3 级的大齿轮和小齿轮故障。A 为啮合幅值;A_i^{FT}、A_q^{FT}、A_p^{FT}、γ_q^{FT}、σ_r^{FT}、ε_i^{FT} 为某一齿轮故障调幅信号第 i 次谐波的幅值、初始角度;O^{FT} 为某一齿轮的故障特征阶次,可以事先根据齿轮箱的结构参数计算得出。待辨识的与故障密切相关的参数包括振动幅值 A、调幅信号的谐波幅值 A_i^{FT} 和初始角度 ε_i^{FT},以及故障、低速轴与高速轴特征阶次 O^{FT}、O_d 与 O_g 为了简化参数调整,文章采用故障特征阶次而不是频率作为诊断参数。

在进行参数辨识的过程中,首先需要确定被辨识模型的一般式,即建立数学模型来描述实际系统,然后要选择合理正确的参数辨识方法。解调后的 ES 与 ESIM 的误差平方和最小时,停止优化。建立目标函数如式(5)所示。

$$\text{目标函数} = \min\left\{\sum_{i=1}^{l}\left[ESIM(i) - ES(i)\right]^2\right. \tag{5}$$

在参数辨识中,梯度矫正法往往用于解决优化问题。其目的是通过调整模型的参数来最小化损失函数,使模型能够更好地拟合训练数据并在未见过的数据上进行良好的泛化。本文选取列文伯格-马夸尔特算法(levenberg-marquardt, LM),来求解目标函数的最优解。LM 算法是一种用于非线性最小二乘问题求解的优化算法。它结合了梯度下降法和高斯-牛顿法的优点,通常用于拟合非线性模型参数以使其最小化某个损失函数,因此在实际应用中更加稳定和可靠。LM 算法的原理可以参考相关文献[36]。当 ESIM 中的参数取值合理时,目标函数将达到最小值,此时求得的参数即为故障相关参数。这些参数可以用于重构阶次谱,从而实现对齿轮箱故障诊断。

3.2　故障诊断原理

基于声音信号耦合调制模型对齿轮箱故障诊断方法分 3 个步骤。

1)声音信号预处理:首先对声音信号进行角度域重采样和阶次带通滤波,对滤波后的信号使用局部均值分解方法(local mean decomposition, LMD)进行幅值解调,获得随参考轴角度变化的包络信号。取主要分量与本文所建立声音信号数学模型的方差为目标表函数。

2)参数优化:将式(5)作为目标函数,采用 LM 算法

进行参数优化。当得到最优参数时,进行下一步工作,反之,循环此过程,直到得到最优参数。通过参数辨识,可以提取出故障特征参数,从而用于重构信号。

3)故障诊断:对重构信号的包络谱进行分析,观察包络谱中各频率的特征阶次,以达到齿轮箱故障诊断的目的。

3.3 辨识结果能量指标

为便于评价辨识模型的准确性,本文提出一种考虑辨识信号与原始信号差值的计算指标,即能量比指标(Se)。

$$Se = \overline{E_{O1r} + E_{O2r} + E_{Og} + E_{Od}} \tag{6}$$

其中,$E_{O1r} = \frac{h_{O1r}}{H_{O1r}}, E_{O2r} = \frac{h_{O2r}}{H_{O2r}}, E_g = \frac{h_{Og}}{H_{Og}}, E_d = \frac{h_{Od}}{H_{Od}}$。式中 H_{O1r}、H_{O2r}、H_{Og}、H_{Od} 分别为为原始信号中1级齿圈、2级齿圈、高速轴以及低速轴特征阶次的幅值;h_{O1r}、h_{O2r}、h_{Og}、h_{Od} 分别为重构信号中1级齿圈、2级齿圈、高速轴以及低速轴特征阶次的幅值,若重构谱中未出现某特征阶次的幅值,则将该值赋0。经计算,对于辨识信号与原始信号吻合度较高时,能量指标应为1左右。

4 基于模型参数辨识的故障诊断仿真

为了验证参数辨识方法在齿轮箱故障检测中建模效果切实好用,对式(1)所示信号进行仿真分析,设置不同调幅调频系数,转速为转速为1 007 rpm,载波频率为487 Hz,对应特征阶次如表1所示,为方便运算,设各初始相位为0,将各参数代入式(7)中。分别选取两组系数,进行仿真,并对仿真信号进行建模,利用建立的模型进行阶次谱重构并分析。

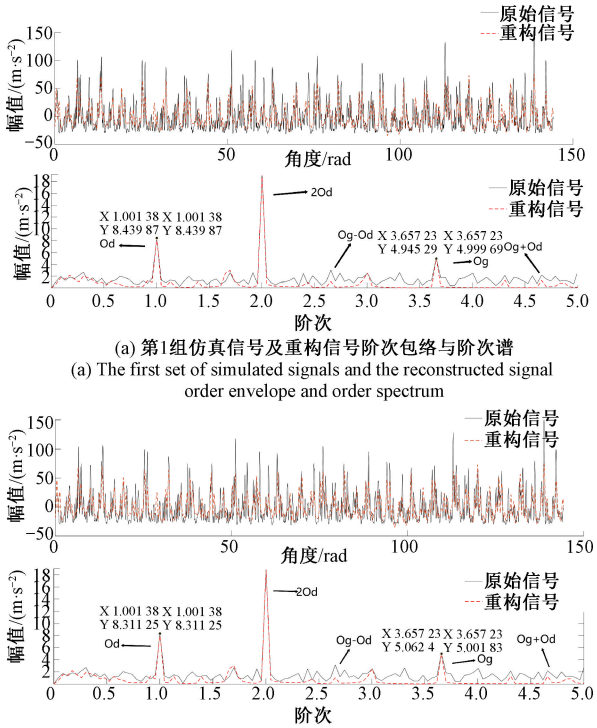
$$x_t = A_m \cdot \{1 + \cos(2\pi f_{1r}t + 1) + \cos(2\pi f_{2r}t + 1) + [1 + \cos(2\pi f_d t + 1)] \cdot [1 + \cos(2\pi f_g t + 1)] \cdot \cos[2\pi f_m t + \sin(2\pi f_g t + 1) + \sin(2\pi f_{2r}t + 1)] + [1 + \cos(2\pi f_d t + 1)] \cdot [1 + \cos(2\pi f_g t + 1)]\} \tag{7}$$

本次仿真分别选取两组系数。从图3可得,两组仿真数据得出的能量比分别为0.994 5与0.994 1,式(4)中参数被辨识较为准确,仿真信号达到预期效果,并且在阶次谱中也可看出低速轴调制高速轴现象被辨识出来,相较于仿真信号,重构信号更简洁。

表1 仿真信号参数值

Table 1 Simulation signal parameter values

参数	f_{1c}	f_{2c}	f_{1r}	f_{2r}	f_d	f_g
特征阶次	0.036	0.19	0.11	0.57	1	3.65



(a) 第1组仿真信号及重构信号阶次包络与阶次谱

(a) The first set of simulated signals and the reconstructed signal order envelope and order spectrum

(b) 第2组仿真信号及重构信号阶次包络与阶次谱

(b) The second set of simulated signals and the reconstructed signal order envelope and order spectrum

图3 仿真信号辨识图

Fig. 3 Simulated signal identification diagram

5 基于模型参数辨识的故障诊断应用

5.1 实验台声音信号故障诊断

本文采用具有相似性的实验台和现场风机齿轮箱的声音信号进行分析,其中实验信号源于课题组自主研发设计的双馈式风电机组模拟实验台,整体结构如图4所示,本实验台包含增速齿轮箱以及对称减速齿轮箱,通过控制三相异步电机模拟风力大小。其中,缩比齿轮箱(增速齿轮箱)参照现场1.5 MW两级行星、一级平行齿轮箱结构和齿数进行设计,具体参数如表2所示。

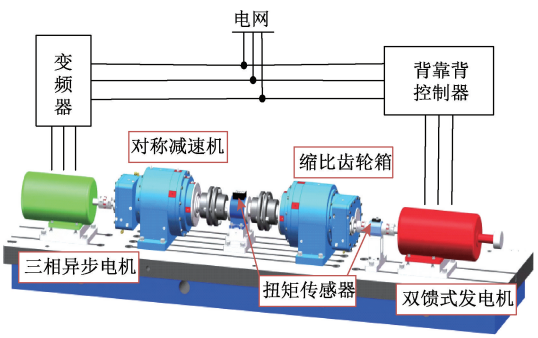


图4 实验台结构图

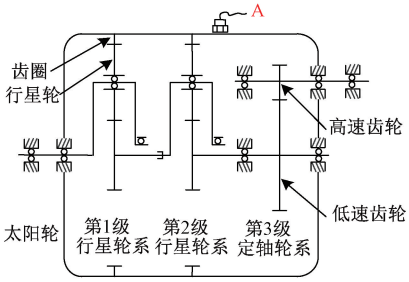
Fig. 4 Structure diagram of the test bench

表 2　齿轮箱结构参数和阶次

Table 2　Gearbox structural parameters and order

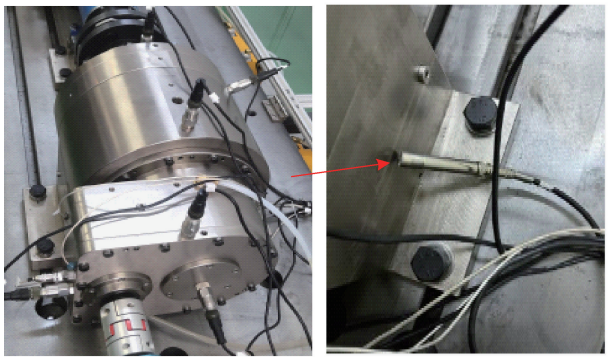
轮系	齿轮	齿轮个数	啮合阶次	故障阶次
第 1 级行星轮系	太阳轮	24	3.7	0.46
	行星轮(3)	39		0.19
	齿圈	102		0.11
第 2 级行星轮系	太阳轮	24	19.43	2.43
	行星轮(3)	39		0.996
	齿圈	102		0.57
第 3 级定轴轮系	低速齿轮	106	106	1
	高速齿轮	29		3.655

实验台增速齿轮箱为两级行星一级平行结构,其中行星齿轮传动均为行星架输入、太阳轮输出的方式,平行轴齿轮传动为大齿轮输入,小齿轮输出的方式,图 5 展示了增速齿轮箱结构示意图。



(a) 增速齿轮箱结构示意图

(a) Schematic diagram of speed increasing gearbox structure



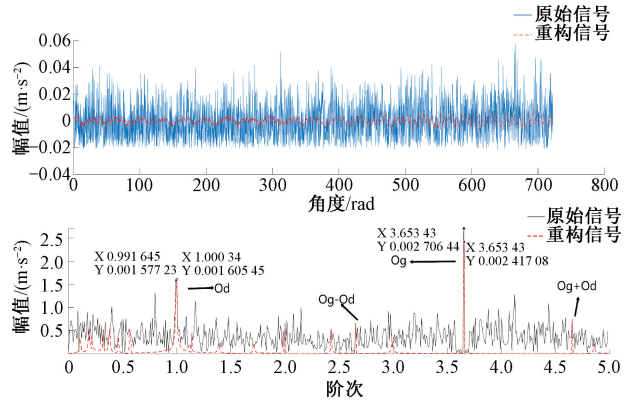
(b) 增速齿轮箱声音信号传感器

(b) Speed booster gearbox sound signal sensor

图 5　实验台信号传感器

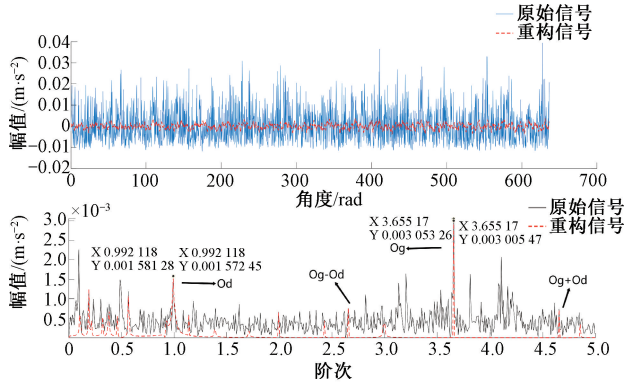
Fig. 5　Signal sensor on the test bench

以实验台齿轮箱的声音信号为例,选取转速为 1 680 r/min,时间为 60 s 的声音信号进行实验。本实验采样频率为 25.6 kHz。采用参数辨识方法得到如图 6 所示结果。为验证声音信号耦合调制是否为齿轮箱故障引起,选取 3 种状态进行实验:正常状态下、如图 7 所示的 20% 大齿轮裂纹故障下以及 20% 大齿轮裂纹和图 8 所示 50% 小齿轮断齿的复合故障的声音信号进行分析。



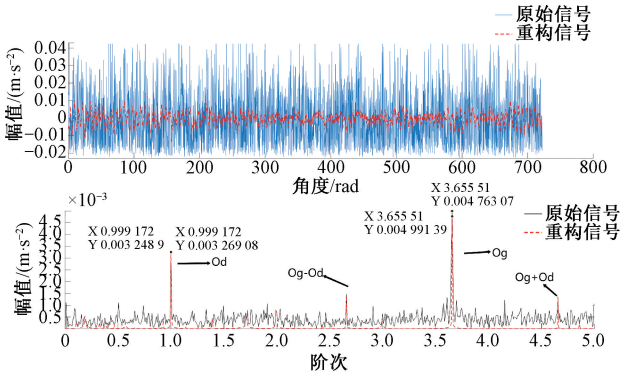
(a) 正常状态下实验台声音信号及重构信号阶次包络与阶次谱

(a) The order envelope and order spectrum of the acoustic signal and reconstruction signal of the laboratory bench under normal conditions



(b) 大齿轮20%齿根裂纹状态下实验台声音信号及重构信号阶次包络与阶次谱

(b)The order envelope and order spectrum of the sound signal and reconstruction signal of the laboratory bench under the condition of 20% root crack of the large gear



(c) 大齿轮20%齿根裂纹与小齿轮50%断齿的复合故障状态下实验台声音信号及重构信号阶次包络与阶次谱

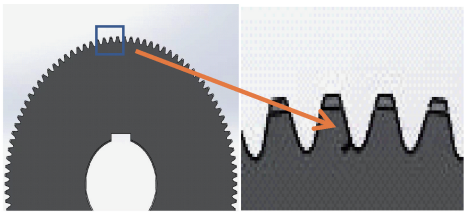
(c)The order envelope and order spectrum of the sound signal and reconstruction signal of the laboratory bench under the combined fault state of 20% root crack of the large gear and 50% broken tooth of the pinion

图 6　实验台原始信号及重构信号阶次包络与阶次谱

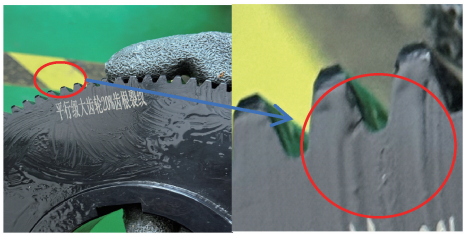
Fig. 6　The order envelope and order spectrum of the original signal and the reconstructed signal of the laboratory bench

图 6 显示了在不同状态下的实验台声音信号与其重构信号,经计算 3 组实验数据得出的能量比分别为 0.948、0.972 和 0.977,可以得出每组重构谱与原始信号

高度吻合,各个参数都被准确辨识,且对比原始阶次谱更为清晰简洁。在此基础之上,选择 15 组在近似转速下的声音信号数据(每种状态下 5 组,每组为 60 s 的数据)进行辨识,将每组辨识出的参数进行均值处理,并对经过处理后的 3 种状态下的模型进行谱重构。不同状态下重构的信号如图 9 所示。



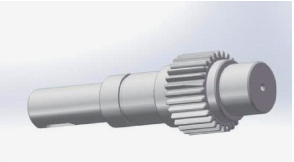
(a) 大齿轮齿根20%裂纹示意图
(a) Schematic diagram of 20% crack in the root of the large gear



(b) 大齿轮齿根20%裂纹实物图
(b) Physical diagram of 20% crack of the root tooth of the large gear

图 7 大齿轮齿根裂纹图

Fig. 7 Crack diagram of the tooth root of the large gear



(a) 小齿轮50%断齿示意图
(a) Schematic diagram of 50% broken teeth of pinion

(b) 小齿轮50%断齿实物图
(b) Physical diagram of 50% broken teeth of pinion

图 8 小齿轮断齿图

Fig. 8 Pinion tooth breakage diagram

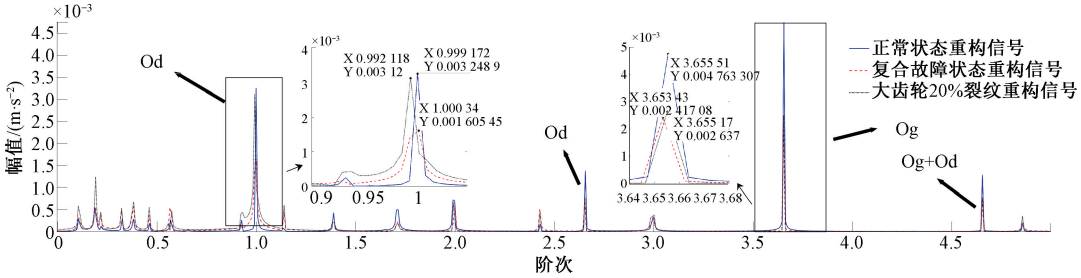


图 9 不同状态下试验台重构信号阶次谱对比

Fig. 9 Comparison of the order spectrum of the reconstructed signal on the test bench in different states

以中间轴为参考轴,计算各级啮合阶次和各个齿轮故障特征阶次,如表 2 所示,计算方法参考文献[37]。正如文献[38]所得结论,健康状态下在低速轴与高速轴及其调制的特征阶次出现明显的幅值,即出现 $O_g \pm O_d$ 幅值上升;含齿根裂纹故障时(大齿轮 20% 齿根裂纹故障),低速轴特征阶次幅值明显升高,即 O_d 幅值明显升高;而在复合故障中(小齿轮 50% 断齿与大齿圈 20% 齿根裂纹故障),高速轴与低速轴特征阶次的幅值相较于正常状态下有明显的升高,即 O_g 与 O_d 幅值相较于正常状态下的幅值都有所升高;并且,在该 3 种情况下,无论是哪一种,阶次谱中均出现低速轴调制高速轴这一现象,为下节对现场声音信号故障诊断提供理论支撑。由此可得出,该辨识方法不仅能将原始信号辨识出来,同时,将辨识信号进行谱重构后,得到的阶次谱更为简洁明了,更利于进行故障诊断。

5.2 现场声音信号故障诊断

本节使用与实验台同结构的风电齿轮箱的声音数据验证新模型正确性和参数辨识方法的可行性。数据采集系统如图 10 所示,机舱内声音信号和发电机转速信号经同步采集后存储在工控机内。该状态监测系统通过多年连续运行,已经诊断出第 1、2 级齿圈存在局部故障[25],如图 11 所示,通过内窥镜照片对比,可见 2 级齿圈发生比较严重的局部故障,1 级齿圈存在轻微局部故障。

如图 12 所示,经计算,现场数据得出的能量比为 0.964 3,由此可知,辨识信号同样也能将现场数据中重要信号所保留,该构建模型方法切实好用。将历史中转速相对一致的 5 个数据进行辨识,并对辨识出的模型参数进行均值处理,得到该模型后进行重构,重构谱如图 13 所示,滤波后的阶次包络谱中 1 级齿圈故障特征相关阶次 O_{1r}、$2O_{1r}$、$3O_{1r}$,2 级齿圈故障特征相关阶次 O_{2r}、$2O_{2r}$ 幅值明显。与上节得出结论一致,在平行级无故

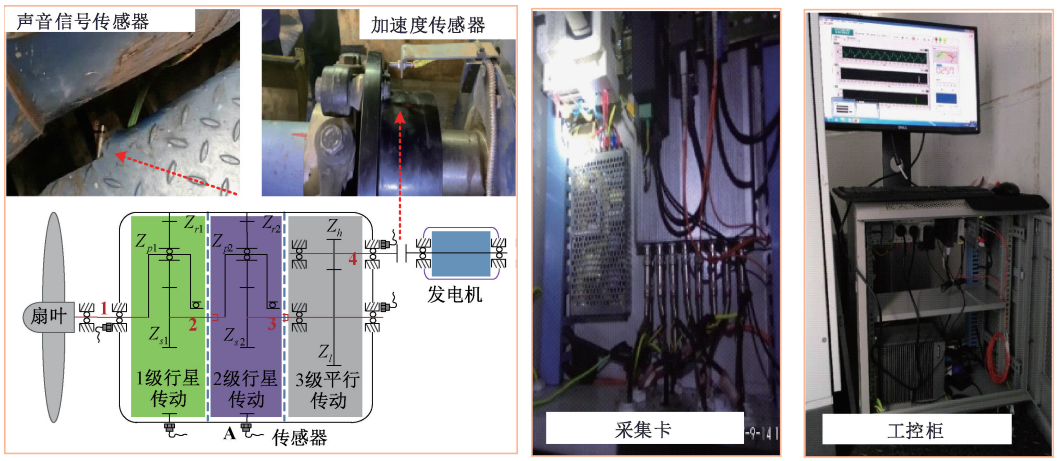


图 10　数据采集系统

Fig. 10　Data acquisition system

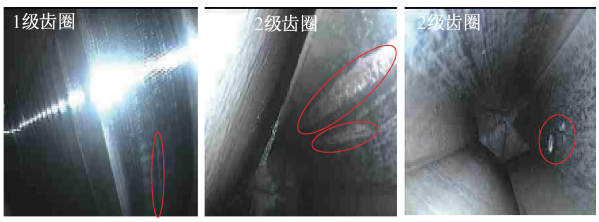


图 11　1 级、2 级齿圈(2019 年 8 月)

Fig. 11　Primary and secondary ring gear (August 2019)

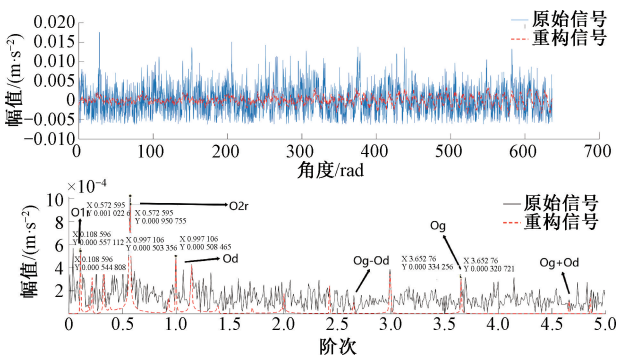


图 12　现场声音信号及重构信号阶次包络与阶次谱

Fig. 12　Order envelope and order spectrum of live sound signals and reconstruction signals

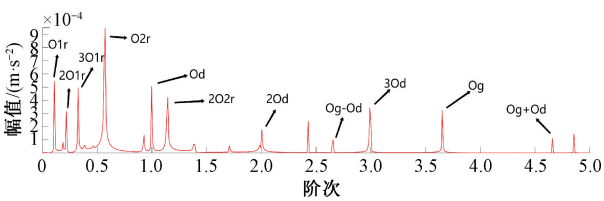


图 13　现场重构信号阶次谱

Fig. 13　Live reconstruction signal order spectrum

障下，O_d 与 O_g 幅值明显，且出现 $O_d \pm O_g$ 幅值的出现，符合本文预期。由此可判断出该齿轮箱 1 级齿圈及 2 级齿圈发生复合故障，与实际情况相符，同时调制现象也与本文预期一致。

在基于声音信号的风机齿轮箱故障诊断中，无论是从现场还是缩比实验台，阶次谱中均存在低速轴特征阶次调制高速轴特征阶次，所以该调制属于正常现象，并不能作为齿轮箱故障的依据。其次，对比实验台信号与现场信号，可以发现实验台声音信号阶次谱中的信号幅值是大于现场的，导致这种现象的原因为现场与实验台的采集系统不同，且实验台齿轮箱零件制造不够精密，安装误差较大所导致。

6　结　　论

本文提出一种考虑不同轮系受损的复合故障模型，该模型适用于 1 级、2 级齿圈复合故障、平行级大齿轮小齿轮复合故障。未来需要建立行星轮复合故障下的声音信号耦合调制模型，并考虑模型辨识随工况变化的规律。

基于模型参数辨识的齿轮箱复合故障诊断方法，客观上起到了定向滤波的效果，只辨识模型中确定的耦合调制特性。1、2 级齿圈复合故障下，辨识出的 1、2 级齿圈故障阶次明显；平行级复合故障下，辨识出平行级低高速轴特征阶次明显且伴随串联调制现象更加突出。

实验证明，采用参数辨识的方法能够有效定位齿圈等复合故障，减少了对专家经验的依赖，有助于推动生产实践的发展。

参考文献

[1]　张琛，邓伟. 中国风电产业发展现状及趋势研究[J]. 机电产品开发与创新，2023，36(3)：206-208.

ZHANG CH, DENG W. Research on the development status and trend of China's wind power industry[J]. Electromechanical Product Development and Innovation, 2023,36(3):206-208.

[2] 陈雪峰, 郭艳婕, 许才彬, 等. 风电装备故障诊断与健康监测研究综述[J]. 中国机械工程, 2020,31(2): 175-189.
CHEN X F, GUO Y J, XU C B, et al. A review of fault diagnosis and health monitoring of wind power equipment[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020,31(2): 175-189.

[3] INALPOLAT M, KAHRAMAN A. A theoretical and experimental investigation of modulationsidebands of planetary gear sets[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 323(3-5): 677-696.

[4] INALPOLAT M, KAHRAMAN A. A dynamic model to predict modulation sidebands of a planetarygear set having manufacturing errors [J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(4): 371-393.

[5] 祝文颖, 冯志鹏. 基于改进经验小波变换的行星齿轮箱故障诊断[J]. 仪器仪表学报,2016,37(10):2193-2201.
ZHU W Y, FENG ZH P. Fault diagnosis of planetary gearbox based on improved empirical wavelet transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(10):2193-2201.

[6] 王况, 王科盛, 左明健. 一种基于行星齿轮箱复合运动的故障诊断指标[J]. 振动与冲击,2016,35(23): 216-221.
WANG K, WANG K SH, ZUO M J. A fault diagnosis index based on composite motion of planetary gearboxes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(23):216-221.

[7] FENG Z, GAO A, LI K, et al. Planetary gearbox fault diagnosis via rotary encoder signal analysis [J]. Mechanical Syetems and Signal Processing, 2021, 149: 107325.

[8] 杨小青,丁康,何国林. 齿轮故障振动啮合调幅调频信号分离方法[J]. 振动工程学报, 2021, 34(2): 379-388.
YANG X Q, DING K, HE G L. Separation method of gear fault vibration meshing amplitude modulation frequency modulation signal[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021,34(2):379-388.

[9] 吴岚,柳亦兵,吴仕明,等. 基于 VMD 倒频变换的风电机组齿轮箱复合故障诊断[J]. 振动与冲击,2023, 42(24):221-227,256.
WU L, LIU Y B, WU SH M, et al. Composite fault diagnosis of wind turbine gearboxes based on VMD cepstral transform[J]. Vibration and Shock, 2023, 42(24):221-227,256.

[10] 候双珊,郑近德,潘海洋,等. 基于复合多尺度交叉模糊熵的行星齿轮箱故障诊断[J]. 振动与冲击,2023, 42(20):130-135,171.
HOU SH SH, ZHENG J D, PAN H Y, et al. Fault diagnosis of planetary gearbox based on composite multi-scale cross fuzzy entropy[J]. Vibration and Shock, 2023,42(20):130-135,171.

[11] 武英杰,佟源,李鹏飞,等. 风电齿轮箱振动信号耦合调制建模与应用[J]. 仪器仪表学报,2024,45(3): 240-250.
WU Y J, TONG Y, LI P F, et al. Coupling modulation modeling and application of wind power gearbox vibration signals[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024,45(3):240-250.

[12] 贾舜宇,齐咏生,魏淑娟,等. 基于 RF 与 D-S 证据理论融合的多通道齿轮箱复合故障诊断[J]. 振动与冲击, 2024,43(13):115-125.
JIA SH Y, QI Y SH, WEI SH J, et al. Multi-channel gearbox compound fault diagnosis based on fusion of RF and D-S evidence theory[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(13): 115-125.

[13] FERRANDO CHACON J L, ANDICOBERRY E A, KAPPATOS V, et al. An experimental study on the applicability of acoustic emission for wind turbine gearbox health diagnosis[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2016, 35(1): 64-76.

[14] 罗奕, 郭瑜, 伍星, 等. 基于声发射信号的行星轮轴承内圈故障包络分析方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33 (5): 164-170.
LUO Y, GUO Y, WU X, et al. Envelope analysis method for inner ring faults of planetary gear bearings based on acoustic emission signals[J]. Journal of Electronic Measurementand Instrument, 2019, 33 (5): 164-170.

[15] 武成同. 基于声信号的风电机齿轮箱故障诊断研究[D]. 大连海事大学. 2018.
WU CH T. Research on fault diagnosis of wind turbine gearbox based on acoustic signal[D]. Dalian Maritime University. 2018.

[16] 田昊, 唐力伟, 陈红, 等. 基于瞬态声与阶次倒谱的齿轮箱故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29 (2): 137-140.
TIAN H, TANG L W, CHEN H, et al. Fault diagnosis

of gearbox based on transient sound and order cepsulation[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29 (2): 137-140.

[17] 张郑武, 冯志鹏, 陈小旺. 基于高阶同步压缩变换的行星齿轮箱声音信号共振频带特征提取[J]. 工程科学学报, 2020, 42(8): 1048-1054.
ZHANG ZH W, FENG ZH P, CHEN X W. Acoustic signal analysis of the resonance frequency region for planetary gearbox fault diagnosis based on high-order synchrosqueezing transform [J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(8): 1048-1054.

[18] LI CH, CHEN CH ZH, GU X J. Acoustic signal analysis for gear fault diagnosis using a uniform circular microphone array[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2023, 37(11): 5583-5596.

[19] HU H X, LYU Y, YUAN R, et al. A novel vibro-acoustic fault diagnosis approach of planetary gearbox using intrinsic wavelet integrated GE-EfficientNet [J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35 (2): 025131.

[20] 刘少康, 武英杰, 安伟伦, 等. 基于声音信号和改进 MS-LMD 的风电齿轮箱故障诊断[J]. 振动与冲击, 2021, 40 (11): 230-239,251.
LIU SH K, WU Y J, AN W L, et al. Fault diagnosis of wind power gearbox based on sound signal and improved MS-LMD[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40 (11): 230-239,251.

[21] 姚锡凡, 景轩, 张剑铭, 等. 走向新工业革命的智能制造[J]. 计算机集成制造系统,2020,26(9): 2299-2320.
YAO X F, JING X, ZHANG J M, et al. Towarads smart manufacturing for new industrial revolution [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(9):2299-2320.

[22] 李杰, 李响, 许元铭, 等. 工业人工智能及应用研究现状及展望[J]. 自动化学报,2020,46(10):2031-2044.
LI J, LI X, XU Y M, et al. Recent advances and prospects in industrial AI and applications [J]. Acta Automatica Sinica,2020,46(10):2031-2044.

[23] 邓聪颖, 舒杰, 陈翔, 等. 多参数变化下基于参数辨识的永磁同步电机偏差解耦控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43 (6): 260-268.
DENG C Y, SHU J, CHEN X, et al. A decoupling control method for the deviation of permanent magnet synchronous motor based on parameter identification under multi-parameter variation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43 (6): 260-268.

[24] 边子方, 胡海峰, 杨拥民, 等. 基于单传感器的旋转叶片振动测量与参数辨识方法[J]. 中国科学:技术科学, 2023, 53 (8): 1323-1336.
BIAN Z F, HU H F, YANG Y M, et al. Vibration measurement and parameter identification method of rotating blade based on single sensor[J]. Scientia Sinica Techologica, 2023, 53 (8):1323-1336.

[25] 刘少康, 武英杰, 田野, 等. 基于振动信号耦合调制新模型和参数辨识的风电齿轮箱齿圈故障监测[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43 (10): 260-269.
LIU SH K, WU Y J, TIAN Y, et al. Fault monitoring of wind power gearbox ring gear based on new model and parameter identification of vibration signal coupling modulation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43 (10): 260-269.

[26] 雷军, 张海荣. 风力发电机振动与噪声测试及其减噪方法研究[J]. 北方环境, 2011, 23 (12): 101-104.
LEI J, ZHANG H R. Research on vibration and noise testing of wind turbines and their noise reduction methods[J]. Northern Environment, 2011, 23 (12): 101-104.

[27] 吴宏钢. 风力发电机组振动检测及噪声评估研究[D]. 重庆大学, 2010.
WU H G. Research on vibration detection and noise evaluation of wind turbines[D]. Chongqing University, 2010.

[28] 陈皓阳. 声振信号分离提纯的风力发电机故障诊断方法研究[J]. 自动化仪表, 2023, 44 (12): 42-47.
CHEN H Y. Research on fault diagnosis method of wind turbine based on separation and purification of acoustic and vibration signals [J]. Process Automation Instrumentation, 2023, 44 (12): 42-47.

[29] 任浩, 屈剑锋, 柴毅, 等. 深度学习在故障诊断领域中的研究现状与挑战[J]. 控制与决策, 2017, 32(8): 1345-1358.
REN H, QU J F, CHAI Y, et al. Deep learning for fault diagnosis: The state of the art and challenge[J]. Control and Decision, 2017, 32(8): 1345-1358.

[30] 王志乐, 郭瑜, 王波. 基于时变传输路径的太阳轮故障窄带解调分析方法[J]. 振动与冲击, 2019, 38(14):63-67.
WANG ZH L, GUO Y, WANG B. Narrow-band demodulation analysis method of solar gear fault based on time-varying transmission path[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(14):63-67.

[31] 孙宏. 多级行星传动系统动力学特性分析[D]. 重庆

大学, 2012.
SUN H. Analysis of dynamic characteristics of multi-stage planetary transmission system [D]. Chongqing University, 2012.

[32] TENG W, DING X, CHENG H, et al. Compound faults diagnosis and analysis for a wind turbine gearbox via a novel vibration model and empirical wavelet transform[J]. Renewable Energy, 2019, 136: 393-402.

[33] 辛红伟, 安伟伦, 武英杰, 等. 风电齿轮箱两级齿圈故障下振动信号幅值耦合调制建模[J]. 振动与冲击, 2021, 40 (22): 221-233.
XIN H W, AN W L, WU Y J, et al. Coupled modulation modeling of vibration signal amplitude under two-stage ring gear fault of wind power gearbox [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40 (22): 221-233.

[34] GUAN W, DONG L L, ZHOU J M, et al. Data-driven methods for operational modal parameters identification: A comparison and application[J]. Measurement, 2019, 132:238-251.

[35] 贺仁睦, 沈峰, 韩冬, 等. 发电机励磁系统建模与参数辨识综述[J]. 电网技术, 2007,31(14): 62-67.
HE R M, SHEN F, HAN D, et al. Review on modeling and parameter identification of generator excitation system[J]. Power System Technology, 2007, 31 (14): 62-67.

[36] FAN J Y, PAN J Y. A note on the Levenberg-Marquardt parameter[J]. Applied Mathematics and Computation, 2009, 207(2): 351-359.

[37] 杨小青. 齿轮故障振动调幅调频机理和分离方法研究[D]. 华南理工大学, 2020.
YANG X Q. Study on mechanism and separation method of vibration amplitude modulation and frequency modulation of gear fault [D]. South China University of Technology, 2020.

[38] 王况, 王科盛, 左明健. 基于阶次分析技术的行星齿轮 箱非平稳振动信号分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(5):140-145,195.
WANG K, WANG K SH, ZUO M J. Analysis of non-stationary vibration signal of planetary gearbox based on order analysis technique [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(5):140-145,195.

作者简介

王建国,1985 年于天津大学获得学士学位,1988 年于天津大学获得硕士学位,2001 年于华北电力大学获得博士学位,现为东北电力大学二级教授,主要研究方向为电力设备故障诊断及安全性分析、动力电池性能评估及寿命预测、换热设备污垢机理及对策。
E-mail:ssrs8706@163.com

Wang Jianguo received his Bachelor's degree from Tianjin University in 1985, his Master's degree from Tianjin University in 1988, and his Ph. D. from North China Electric Power University in 2001. He is currently a second-level professor at Northeast Electric Power University. His main research areas are fault diagnosis and safety analysis of power equipment, performance evaluation and life prediction of power batteries, and the fouling mechanism and countermeasures of heat exchange equipment.

田野,2010 年 6 月于长春工程学院获得学士学位,2017 年 12 月于吉林大学获得硕士学位,现为东北电力大学博士研究生,主要研究方向为发电设备故障诊断。
E-mail: tianyejixie@yeah.net

Tian Ye received his Bachelor's degree from Changchun Institute of Technology in June 2010 and his Master's degree from Jilin University in December 2017. He is currently a Ph. D. candidate at Northeast Electric Power University. His main research area is fault diagnosis of power generation equipment.

辛红伟(通信作者),2005 年于南京理工大学获得学士学位,2009 年于南京信息工程大学获得硕士学位,2022 年于东北电力大学获得博士学位,现为东北电力大学实验师,主要研究方向为新能源电力设备监测及诊断、电网二次设备设计与开发。
E-mail: xinhongwei1998@163.com

Xin Hongwei (Corresponding author) received his Bachelor's degree from Nanjing University of Science and Technology in 2005, his Master's degree from Nanjing University of Information Science and Technology in 2009, and his Ph. D. from Northeast Electric Power University in 2022. He is currently a laboratory instructor at Northeast Electric Power University. His main research areas are monitoring and diagnosis of new energy power equipment, and design and development of secondary equipment for power grids.