

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209956

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*

刘少康¹, 武英杰², 田野², 王建国², 刘长良¹

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院 保定 071003; 2. 东北电力大学自动化工程学院 吉林 132012)

摘要:针对风电齿轮箱多级传动导致的振动耦合调制问题,提出了一种考虑级间调幅调频的齿圈故障新模型,并通过参数辨识技术将其应用于齿圈故障监测。某级齿圈故障特征频率会以调幅、调频方式,调制不同轮系的啮合频率,呈现出耦合调制现象,本文针对该特殊调制规律,建立了两级齿圈故障下的振动信号耦合调制模型。在此基础上,提出基于局部均值分解和列文伯格-马夸尔特算法的参数辨识技术,确定故障辨识模型的调幅系数,进而可方便地构建出状态指标,以达到齿圈故障监测的目的。用现场数据进行验证,结果表明,新模型比传统模型描述振动信号更全面;借助参数辨识技术构建的指标能定位故障齿轮。

关键词: 风电齿轮箱; 振动信号模型; 参数辨识; 状态监测

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

Fault monitoring of ring gear of wind turbine gearbox based on coupling modulation new model of vibration signal and parameter identification

Liu Shaokang¹, Wu Yingjie², Tian Ye², Wang Jianguo², Liu Changliang¹

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. School of Automation Engineering, Northeast Electric Power University, Jinlin 132012, China)

Abstract: To address the vibration coupling modulation problem caused by the multi-stage transmission of the wind turbine gearbox, a new ring gear fault model considering the inter-stage amplitude modulation and frequency modulation is proposed. It is applied to the monitor ring gear by the parameter identification technology. The fault characteristic frequency of a certain stage of ring gear will modulate the meshing frequency of different gear trains in a way of amplitude modulation and frequency modulation, which shows the phenomenon of coupling modulation. In the view of this special modulation law, this article establishes the coupling modulation model of vibration signal under two-stage ring gear fault. On this basis, the parameter identification technology based on local mean decomposition and Levinberg-Marquart algorithm is proposed to determine the amplitude modulation coefficient of the fault model. Then, the condition indicator can be easily constructed to achieve the purpose of ring gear fault monitoring. The field data are utilized to evaluate the content of this paper. Results show that the new model describes the vibration signal more comprehensively than the traditional model. The index constructed by parameter identification technology can locate the fault gear.

Keywords: wind turbine gearbox; vibration signal model; parameter identification; condition monitoring

0 引 言

齿轮箱是风力发电机组最易发生故障的部件之一,对其进行状态监测与故障诊断至关重要^[1]。振动信号包含了大量齿轮箱健康状态信息^[2],而理解振动信号模型是研究的基础。

对于单级定轴或单级行星齿轮箱的振动信号模型研究已经比较全面。单级定轴齿轮箱方面,Randall^[3]指出故障会产生调幅调频(amplitude modulation-frequency modulation, AM-FM),并建立了AM-FM振动信号模型。文献[4-5]详细解释了振动信号AM-FM边带产生机理和分布特点。单级行星齿轮箱方面,Mcfadden等^[6]首次解释行星轮系啮合频率边带不对称的原因。Mcnames^[7]用傅里叶级数表示了

Mcfadden 的研究结果。之后 Parker 等^[8]考虑各个行星齿轮之间相位差, Inalpolat 等^[9]和 Molina^[10]考虑行星轮系结构参数差异进一步完善了 AM-FM 模型。值得注意的是, Feng 等^[11]和 Lei 等^[12]建立了行星轮系各种齿轮故障情况下的现象学模型, 进一步深化了振动信号模型的研究。

但是, 以上研究存在一个问题: 没有考虑不同轮系相互耦合对振动信号模型产生的影响。尤其是风电齿轮箱, 一般由两级行星一级平行或一级行星两级平行构成, 当某一级齿轮发生故障势必会影响其他级振动信号。Teng 等^[13]指出当风电齿轮箱低速级行星轮系发生分布式故障时, 其啮合频率会在级间传递, 进而调制中速级和高速级啮合频率, 甚至齿轮箱固有频率; 王鑫等^[14]建立了两级平行一级行星减速齿轮箱耦合动力学模型, 指出第二级行星轮系啮合频率被第三级行星轮故障特征频率调制。通过以上研究可以发现在多级齿轮箱中, 某一级齿轮发生故障, 其故障特征频率经过传递会调制其他级啮合频率。

由于风电机组装机量大、测点多、采样频率高且服役时间长, 传动系统的状态监测系统 (condition monitoring system, CMS) 获取了海量监测数据, 故障诊断进入了“大数据”时代^[15]。然而, 依据振动信号模型在机械大数据中识别故障特征受制于人为经验, 费时费力。振动信号模型中与故障密切相关的调幅调频系数能够直接反映故障劣化程度, 然而对振动信号模型中调幅调频参数定量分析的文献较少。在其他研究领域, 使用参数辨识方法对模型参数定量分析的文献已有很多, Zhou 等^[16]用改进的粒子群优化算法辨识 3 个等效电路模型参数; Lopez 等^[17]用非线性最小二乘拟合方法辨识轮胎模型参数; 李建军等^[18]用最小二乘递推算法辨识电机参数; 孙鹏宇等^[19]用改进的带遗忘因子递推最小二乘法在线辨识二阶阻容等效电路模型参数。

针对上述问题, 本文就两级行星一级平行结构风电齿轮箱, 分析故障信号传递规律, 建立了两级齿圈故障振动信号模型, 使模型更准确的表征两级齿圈故障情况下振动信号的频谱特征; 采用参数辨识的思路, 辨识故障模型的调幅参数, 以此构建状态监测指标, 便捷地实现齿圈故障监测的目的。以 1.5 MW 风电齿轮箱振动数据, 验证了本文所提新模型的正确性和参数辨识用于齿圈故障监测的可行性。

1 振动信号模型

本文研究的是具有两级行星一级平行结构的风电齿轮箱, 结构简图如图 1 所示, 在这种多级耦合的风电齿轮箱上测得的振动信号有别于单级齿轮箱。本节将分析故障信号传递规律, 并提出两级齿圈故障振动信号新模型。

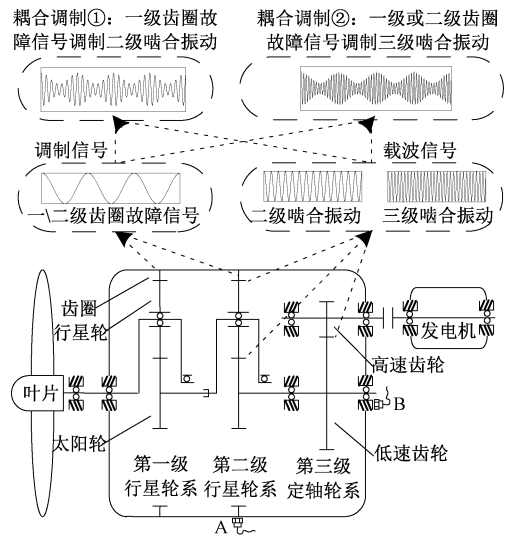


图 1 风电齿轮箱结构示意图与耦合调制示意图

Fig. 1 Structure diagram and coupling modulation diagram of wind turbine gearbox

1.1 正常振动信号模型

包含行星轮系的风电齿轮箱, 在齿圈处测点 (如图 1 中 A 点所示) 采集的振动信号由于传递路径时变, 会使行星轮系和定轴轮系的啮合振动信号都受到行星轮通过效应调幅作用影响, 而在齿轮箱中间轴 (齿轮箱空心轴附近, 即图 1 中 B 点) 测点采集的啮合振动信号不受到该调幅作用的影响^[20]。行星轮通过频率和齿圈故障特征频率呈比例关系, 为尽量减小行星轮通过效应产生的调幅影响, 本文使用齿轮箱中间轴处采集的振动数据。

齿轮箱正常情况下, 测得的振动信号主要来源于齿轮的啮合振动。因此, 各级轮系正常振动信号的模型的一般式可写为:

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

式中: A_m 为啮合振动第 m 次谐波的幅值, f_{mesh} 为第一级、第二级或者第三级轮系的啮合频率, ϕ_m 为啮合振动第 m 次谐波的初始相位, M 为啮合振动的最大谐波次数。式(1)适用于行星轮系和定轴轮系两种不同的轮系。

1.2 两级齿圈故障振动信号新模型

1) 耦合调制现象

文献[13-14]分别从实测信号和动力学模型仿真信号角度研究, 发现当某一级齿轮发生故障, 故障信号会调制其他级的啮合振动信号。对于两级行星一级平行结构齿轮箱, 分析齿轮的运动学关系可知, 当第二级行星轮系的齿圈发生局部故障时, 由于齿圈-行星轮啮合副与行星轮-太阳轮啮合副为同步啮合, 存在力的平衡作用^[21], 因此, 齿圈故障会造成行星轮和太阳轮以齿圈故障特征频率波动, 与二级太阳轮同轴的平行级大齿轮也以相同频

率波动,进而形成第三级啮合频率被第二级齿圈故障特征频率调制的现象。第三级平行轮系虽然没有故障,但是由于齿圈故障特征频率被传递,使得第三级产生“虚拟故障”。同理,当第一级行星轮系齿圈发生故障时,经过传递,第二级和第三级啮合振动同样被第一级齿圈故障信号调制。特殊的耦合调制现象表示为如图1上方的两种调制组合:(1)第二级啮合振动会被第一级的齿圈故障信号调制(2)第三级的啮合振动会被第一级或者第二级齿圈故障信号调制。在已有振动信号模型中,上述两个现象无法被表示。

2) 耦合调制新模型

以上通过故障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,提出两级齿圈均故障时风电齿轮箱各级轮系的振动信号模型:

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

式中:

$$a_m(t) = 1 + \sum_{i=1}^l a_{mi} \cos(2\pi i f_{1r} t + \alpha_{mi}) + \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^l b_{mi} \cos(2\pi i f_{2r} t + \beta_{mi})$$

$$b_m(t) = \sum_{j=1}^j c_{mj} \sin(2\pi j f_{1r} t + \mu_{mj}) + \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^k d_{mk} \sin(2\pi k f_{2r} t + \theta_{mk})$$

其中, f_{mesh} 可为第二级行星轮系或者第三级定轴轮系的啮合频率,调幅成分 $a_m(t)$ 可以包含一级齿圈故障调幅和二级齿圈故障调幅,调频部分 $b_m(t)$ 也可以包含一级齿圈故障调频和二级齿圈故障调频,调制啮合频率的成分不再局限本级轮系。 $a_m(t)$ 和 $b_m(t)$ 中故障信号相加形式表述了1.2节1)所述的耦合调制现象,拓展了当前现象学模型中调制信号的来源。 a_{mi} 、 b_{mi} 为一、二级齿圈故障调幅系数; f_{1r} 、 f_{2r} 为一、二级齿圈故障特征频率; α_{mi} 、 β_{mi} 为一、二级齿圈故障调幅函数的初始相位; c_{mj} 、 d_{mk} 为一、二级齿圈故障调频系数; μ_{mj} 、 θ_{mk} 为一、二级齿圈故障调频函数的初始相位。

推导振动信号模型的傅里叶变换,有助于理解与已有振动信号的区别。不失一般性,只考虑基频: $m=1$, $i=1$, $l=1$, $j=1$, $k=1$ 。将式(3)、(4)代入式(2)得:

$$x(t) = A_1 [1 + a_{11} \cos(2\pi f_{1r} t + \alpha_{11}) + b_{11} \cos(2\pi f_{2r} t + \beta_{11})] \cos[2\pi f_{mesh} t + c_{11} \sin(2\pi f_{1r} t + \mu_{11}) + d_{11} \sin(2\pi f_{2r} t + \theta_{11}) + \varphi_1] \quad (5)$$

$$\text{根据恒等式: } e^{j\sin\theta} = \sum_{U=-\infty}^{\infty} J_U(z) e^{jU\theta}$$

$$x(t) = A_1 [1 + a_{11} \cos(2\pi f_{1r} t + \alpha_{11}) +$$

$$b_{11} \cos(2\pi f_{2r} t + \beta_{11})] \sum_{p=-\infty}^{\infty} J_p(c_{11}) \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q(d_{11}) \times$$

$$\cos[2\pi(f_{mesh} + pf_{1r} + qf_{2r})t + p\mu_{11} + q\theta_{11} + \varphi_1] \quad (6)$$

根据三角函数积化和差:

$$x(t) = A_1 \sum_{p=-\infty}^{\infty} J_p(c_{11}) \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q(d_{11})$$

$$\{ \cos[2\pi(f_{mesh} + pf_{1r} + qf_{2r})t + p\mu_{11} + q\theta_{11} + \varphi_1] + \frac{1}{2} a_{11} \cos[2\pi(f_{mesh} + pf_{1r} + qf_{2r} + f_{1r})t + p\mu_{11} + q\theta_{11} + \varphi_1 + \alpha_{11}] + \frac{1}{2} a_{11} \cos[2\pi(f_{mesh} + pf_{1r} + qf_{2r} - f_{1r})t + p\mu_{11} + q\theta_{11} + \varphi_1 - \alpha_{11}] + \frac{1}{2} b_{11} \cos[2\pi(f_{mesh} + pf_{1r} + qf_{2r} + f_{2r})t + p\mu_{11} + q\theta_{11} + \varphi_1 + \beta_{11}] + \frac{1}{2} b_{11} \cos[2\pi(f_{mesh} + pf_{1r} + qf_{2r} - f_{2r})t + p\mu_{11} + q\theta_{11} + \varphi_1 - \beta_{11}] \} \quad (7)$$

忽略初始相位,只考虑正频率部分,进行傅里叶变换,频谱中幅值出现在: $f_{mesh} + pf_{1r} + qf_{2r}$, $f_{mesh} + pf_{1r} + qf_{2r} \pm f_{1r}$ 和 $f_{mesh} + pf_{1r} + qf_{2r} \pm f_{2r}$, 其中, $p, q \in \mathbf{Z}$ 。考虑 m, i, l, j, k 大于1时,频谱中幅值将出现在 $m f_{mesh} \pm a f_{1r} \pm b f_{2r}$, 其中, $a, b \in \mathbf{Z}$ 。

解调包含某个啮合频率的频带,得到包络信号:

$$a_m(t) = A_m [1 + \sum_{i=1}^l a_{mi} \cos(2\pi i f_{1r} t + \alpha_{mi}) + \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^l b_{mi} \cos(2\pi i f_{2r} t + \beta_{mi})]$$

忽略初始相位,只考虑正频率部分,进行傅里叶变换:

$$\text{Fourier}[a_m(t)] = A_m + \frac{A_m}{2} \sum_{i=1}^l a_{mi} \delta(f - i f_{1r}) e^{j\alpha_{mi}} + \quad (9)$$

$$\frac{A_m}{2} \sum_{i=1}^l b_{mi} \delta(f - i f_{2r}) e^{j\beta_{mi}}$$

因此,包络谱中幅值出现在 $i f_{1r}$ 和 $i f_{2r}$ 。

经过对频谱和包络谱推导,提出的耦合调制新模型可以描述风电齿轮箱的耦合调制现象。

2 模型参数辨识

选定一个数学模型的一般表达式及其部分参数,通过系统的输入输出信号确定数学模型的方法称为系统辨识^[22]。如果对模型结构了解,仅仅辨识参数则称为灰箱辨识^[23]。灰箱参数辨识需要事先假定一个模型结构,使模型输出与系统实际输出之差满足性能指标函数,得到系统参数^[24]。

啮合频率边带包含大量故障信息,因此,借鉴参数辨识的思路,以包含啮合频率边带的振动信号的包络信号

(envelope signal, ES) 为辨识对象, 构建参数辨识问题。由于本文所提耦合调制现象和多故障并发, 通过窄带滤波-幅值解调得到的 ES 成分同时包含了一级齿圈故障调幅和二级齿圈故障调幅。更一般性的讲, 对于未知故障的风电齿轮箱, 由于耦合调制, ES 成分是未知的, 调制成分可能来源于更广泛的任意轮系故障信号, 所以建立一个用于参数辨识的包络信号辨识模型是必要的。本文建立一个包络信号辨识模型 (envelope signal identification model, ESIM), 如式 (10) 所示。ESIM 的成分包含多级齿轮箱内所有齿轮的故障调幅信号, 以调幅信号及其谐波相加的形式体现。通过参数辨识过程, ES 中存在的成分将被 ESIM 辨识出来, 不存在的成分, ESIM 中的相应参数则被置 0, 不难推测, 本文的参数辨识方法对不同的齿轮箱典型故障是具有一定适用性的。

$$ESIM(\theta) = A \left[1 + \sum_{FT} \sum_{i=1}^l A_i^{FT} \cos(iO_i^{FT}\theta + \varepsilon_i^{FT}) \right] \quad (10)$$

式中: 故障类型 (fault type, FT) 包含第一级的齿圈、行星轮和太阳轮故障, 第二级的齿圈、行星轮和太阳轮故障, 第三级的大齿轮和小齿轮故障。A 为啮合振动幅值; A_i^{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_i^{FT} 为某一齿轮的故障特征阶次, 可以根据齿轮箱结构参数事先计算确定。阶次在不同转速下是恒定的, 因此, 为了保证参数辨识方法用于大量数据样本时无需过多参数调整, 本文采用阶次而不是频率。其中, A、 ε_i^{FT} 和 A_i^{FT} 是待辨识的与故障密切相关的参数。

按照参数辨识的一般流程, 被辨识模型的一般式确定后, 需要选择一种参数辨识方法求解辨识模型的参数。首先, 以解调得到的 ES 与 ESIM 的误差平方和最小为准则, 建立式 (11) 所示目标函数。

$$\text{目标函数} = \min \left\{ \sum_{i=0}^N [ESIM(i) - ES(i)]^2 \right\} \quad (11)$$

上述目标函数在参数空间上是非线性的, 则辨识问题将归结为非线性最优化问题。基于梯度校正的方法是解决非线性最优化问题的方法之一。本文采用列文伯格-马夸尔特算法 (Levenberg-Marquardt, LM), 相比牛顿法和高斯-牛顿法避免了矩阵非正定的问题。LM 算法原理不再赘述, 参见文献 [25]。当 ESIM 中参数取值合理时, 目标函数达到最小值。至此, 基于新模型的参数辨识问题建立完成, 求得的参数为故障相关参数, 可以用于故障监测和诊断。

3 基于模型参数辨识的齿圈故障监测方法

3.1 状态监测指标构建

2007 年文献 [26] 提出故障幅值比用于轴承故障分类; 2017 年文献 [27] 提出改进形式故障指数用于轴承故

障程度的评估。2015 年文献 [28] 提出特征能量比用于评价各种解调方法在解调齿轮或轴承故障时解调效果的好坏; 2020 年文献 [29] 将特征能量比用做 VMD 重构分量的选择准则; 2021 年文献 [30] 提出改进形式特征噪声能量比用于轴承正常和异常状态区分, 通过实验对比, 比 Kurtosis 和 RMS 更稳定不误报警、敏感度高。

总的来说, 特征能量比或者特征幅值比等指标应用对象涵盖齿轮和轴承。广被使用的根本原因是包络谱中故障特征频率的幅值可以量化故障程度。

上述指标存在一个问题: 在多故障并发时, 采用某一种故障的特征频率幅值 (或者能量) 和除以包络谱中各频率幅值 (或者能量) 和的形式, 分子可以量化故障程度, 但是, 分母包含另一种故障特征频率的幅值 (或者能量), 分子分母均为自变量, 所以不能准确反映多故障并发时故障劣化情况。即使像文献 [30] 一样, 采用多种故障特征频率的幅值和除以包络谱中各频率幅值和的形式, 可以解决上述问题, 但是, 指标丧失了故障定位的能力。

综上, 为发挥包络谱中故障特征频率的幅值 (能量) 量化故障程度的优势, 同时, 克服上述比值形式存在的问题, 本文提出故障特征频率能量相加形式的指标, 即特征能量和 (characteristic energy summation, CES), 如式 (12) 所示。ESIM 中与故障相关的故障调幅系数 A 和 A_i^{FT} 被辨识出来, 代入 CES 实现对齿轮故障劣化趋势的跟踪。一种齿轮故障计算一个 CES, CES 与故障齿轮具有一一对应的关系, 所以具备故障定位能力。

$$CES^{FT} = \sum_{i=1}^3 [A \times A_i^{FT}]^2 \quad (12)$$

式中: 各参数同式 (10), CES 只考虑故障特征频率的 1~3 倍谐波的能量, 更高次谐波幅值较小在此忽略。

3.2 齿圈故障监测方法

基于模型参数辨识的齿圈故障监测方法分为 4 步, 具体步骤, 如图 2 所示。

1) 角度域重采样和阶次带通滤波。受随机风速的影响, 风机转速实时波动, 因此, 通过角度域重采样将时域信号转化为角度域信号, 再设计包含啮合阶次的带通滤波器获取包含齿圈故障特征阶次的频带。

2) 局部均值分解解调。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 (输出分量个数 $K=2$), 获得随参考轴角度变化的包络信号。滤波后信号为窄带信号, 经 LMD 解调得到的两个分量, 其中一个为包含啮合阶次的主要分量, 另一个为残余分量, 选择主要分量进行下一步分析。LMD 解调原理参照文献 [31], 不再赘述。

3) 参数辨识。在目标函数准则下, 通过 LM 算法优化 ESIM 中待辨识的参数, 使 ESIM 逼近真实 ES。



图2 齿圈故障监测诊断流程

Fig. 2 Ring gear fault monitoring and diagnosis process

4) 齿圈状态监测。齿轮正常运行时其振动信号的各类特征值视为服从高斯分布的随机变量,可建立 $[u - 3\sigma, u + 3\sigma]$ 置信区间^[32]。因此,本文用多个正常样本求得的特征值均值与标准差 3 倍之和作为异常阈值。参照风电齿轮箱状态监测现场实践,齿轮箱正常阶段为监测系统安装后 1 年(2018 年 1 月~2019 年 1 月)。用辨识得到的参数计算 CES,结合阈值判断齿轮故障劣化情况。

3.3 抗噪能力仿真实验

为了验证参数辨识方法在不同噪声情况下的辨识效果,仿真公式(13)所示信号,设置不同信噪比(SNR=8, SNR=10, SNR=12, SNR=14, SNR=16,),执行图2中第2和3步。如图3所示,重构的ESIM与仿真设置的ES重合良好,同时,ESIM与仿真ES的均方根误差(mean square error, MSE)也随着信噪比增加而减小,说明提出的参数辨识方法具有较好抗噪能力。

$$x(\theta) = (1 + 0.05\cos(O^1\theta) + 0.1\cos(O^2\theta)) \times \cos(O_{3m}\theta + 0.01\sin(O^1\theta) + 0.05\sin(O^2\theta)) \quad (13)$$

4 基于模型参数辨识的齿圈故障监测应用

4.1 实验说明

本节使用采集于两级行星一级平行结构风电齿轮箱的振动数据验证新模型正确性和参数辨识方法的可行性。齿轮箱结构如图1所示,具体结构参数如表1所示。数据采集系统如图4所示,中间轴处振动信号和发电机

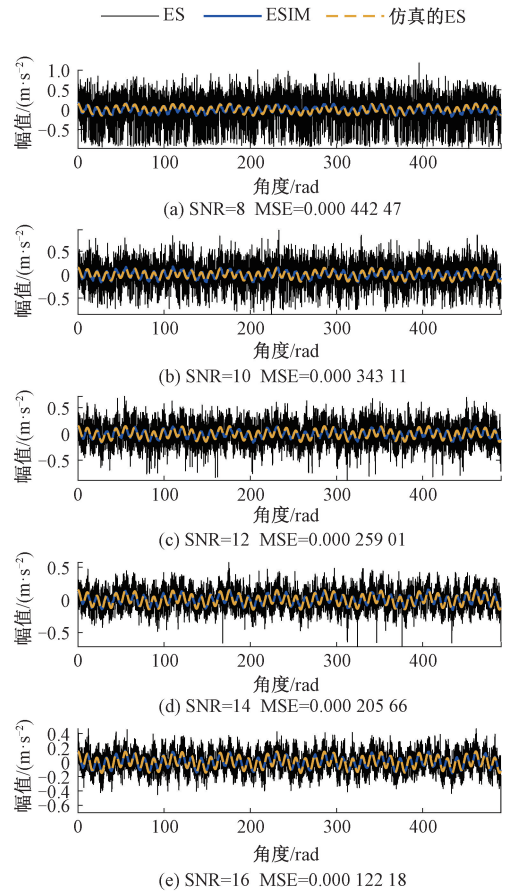


图3 不同信噪比下辨识结果

Fig. 3 Identification results under different SNR

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,已经诊断出第一、二级齿圈存在局部故障,如图5和6所示,通过不同时期的内窥镜照片对比,可见二级齿圈发生比较严重的局部故障,一级齿圈存在轻微局部故障。

表1 齿轮箱结构参数和阶次

Table 1 Structural parameters of gearbox and order

轮系	齿轮	齿数个数	啮合阶次	故障阶次
第一级行星轮系	太阳轮	24		0.46
	行星轮(3)	39	3.7	0.19
	齿圈	102		0.11
第二级行星轮系	太阳轮	24		2.43
	行星轮(3)	39	19.43	0.996
	齿圈	102		0.57
第三级定轴轮系	低速齿轮	106		1
	高速齿轮	29	106	3.655



图 4 数据采集系统
Fig. 4 Data acquisition system



图 5 一级、二级齿圈(2016年11月17日)
Fig. 5 First-stage ring gear and second-stage ring gear (November 17, 2016)



图 6 一级、二级齿圈(2019年8月18日)
Fig. 6 First-stage ring gear and second-stage ring gear (August 18, 2019)

4.2 基于传统指标的齿圈故障监测

风力发电机组运行过程中受到随机风速的影响,采集的振动数据差异性较大,为避免工况大幅变化对齿圈故障监测的影响,应尽量选择同工况数据。本文筛选了转速相近且稳定的历史振动数据,保证结果的可比性。历史数据分为 10 组,每组间隔 3 个月左右,每组包含相近日期的 10 个 10 s 数据,共计 100 个 10 s 数据。如图 7 所示为筛选后历史数据转速均值与方差,可知历史数据中间轴转速均值为 395 rpm,且转速方差在 0~5 rpm 内波动。

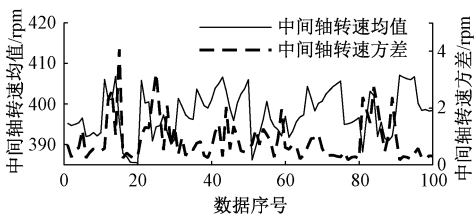


图 7 100 个数据转速情况
Fig. 7 Speed of 100 data

统计 10 组数据的有效值和峭度,如图 8 和 9 所示是两个指标的箱型图。有效值在 2019 年 9 月明显升

高,超出阈值线,说明齿轮箱发生故障,但不能定位故障,需要配合振动分析进一步定位故障,才能确定检修和备件计划。峭度仅在 2019 年 9 月小幅度升高,随后没有明显趋势,且没有超出阈值线,所以不能确定齿轮箱是否故障。

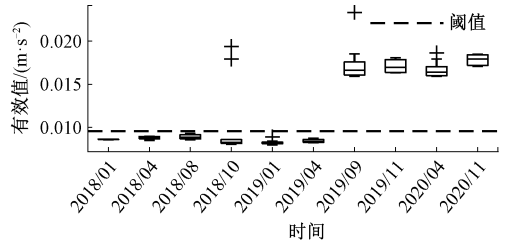


图 8 有效值
Fig. 8 Root mean square

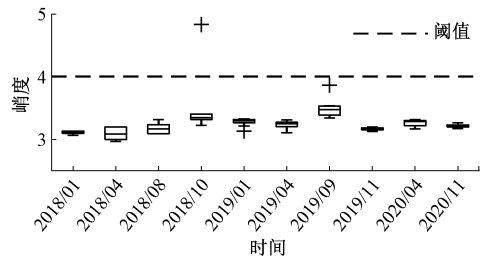


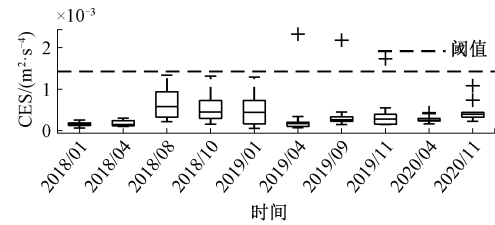
图 9 峭度
Fig. 9 Kurtosis

4.3 基于模型参数辨识的齿圈故障监测

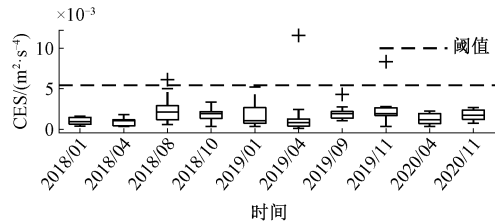
对相同数据,进行本文所提监测流程处理。如图 10 是第一、二级齿圈故障 CES 在二级啮合阶次带和三级啮合阶次带的箱型图。统观图 10 中 4 个图,参数辨识得到的 CES 出现少量离群异常点,但大多数 CES 稳定在四分位区间内。观察图 10(c)、(d)可知在 2019 年 9 月第一、二级齿圈的 CES 幅值均上升,超出了阈值,说明在 2019 年 4 月~9 月期间齿轮箱发生故障,并定位故障齿轮是齿圈。对比图 10(a)(b)与(c)(d),可知,一二级齿圈 CES 在二级啮合阶次带没有明显变化趋势,说明一二级齿圈故障在三级啮合阶次带更容易被监测,这一点依据单级齿轮箱振动信号模型是无法得出的。至此,可以给出比有效值和峭度更具指导性的运维意见:尽早安排检修,二级齿圈和一级齿圈重点关注。

将辨识得到的参数带入 ESIM,重构 ESIM,求其阶次谱,如图 11 所示。ESIM 比 ES 具有更少的背景噪声,有利于对故障进行谱分析验证。

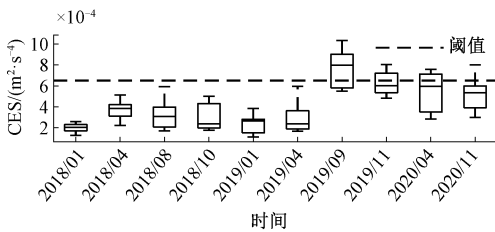
选取故障前(2018 年初)和故障后(2019 年末)的两组 20 s 振动数据进行谱分析验证故障,如图 12 所示,以中间轴为参考轴,计算各级啮合阶次和各个齿轮故障特征阶次,如表 1 所示,计算方法参考文献[33]。分别进行滤波-幅值解调,如图 13 所示,二级啮合阶次滤波后的阶



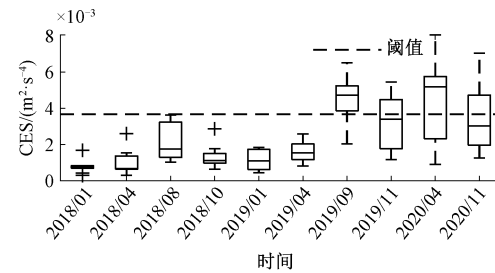
(a) 二级啮合阶次带的一级齿圈CES
(a) CES of the first-stagering in the second-stage meshing order band



(b) 二级啮合阶次带的二级齿圈特征能量和
(b) CES of the second-stage ring in the second-stage meshing order band



(c) 三级啮合阶次带的一级齿圈特征能量和
(c) CES of the first-stage ring in the third-stage meshing order band



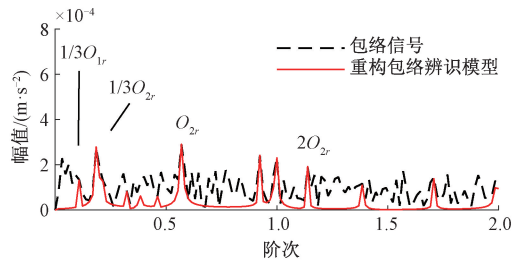
(d) 三级啮合阶次带的二级齿圈特征能量和
(d) CES of the second-stage ring in the third-stage meshing order band

图 10 CES 曲线

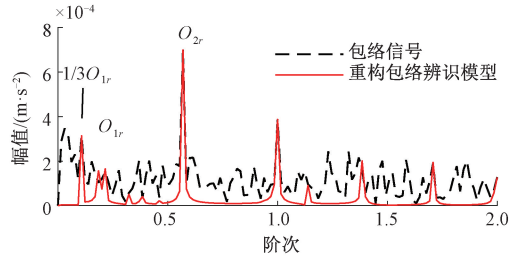
Fig. 10 Trends of CES

次包络谱中一级齿圈故障特征相关阶次 $1/3O_{1r}$ 、 O_{1r} 、二级齿圈故障特征相关阶次 $1/3O_{2r}$ 、 O_{2r} 、 $2O_{2r}$ 幅值明显增加。三级啮合阶次滤波后的阶次包络谱中一级齿圈故障特征相关阶次 $1/3O_{1r}$ 、 O_{1r} 幅值增加、二级齿圈故障特征阶次 O_{2r} 幅值明显增加。

值得注意的是,二级啮合阶次滤波后的阶次包络谱中出现一级齿圈故障特征阶次,三级啮合阶次滤波后的阶次包络谱中出现一、二级齿圈故障特征阶次,这是单级



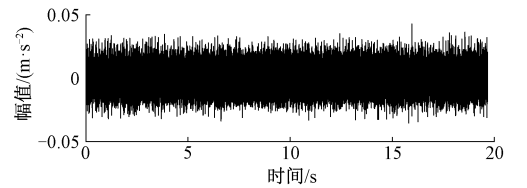
(a) 二级啮合阶次带阶次包络谱
(a) Order envelope spectrum of second-stage meshing order band



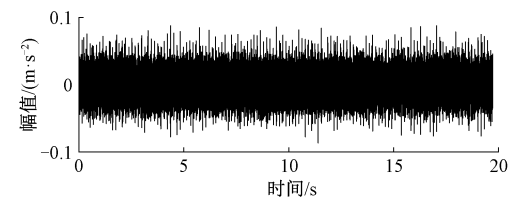
(b) 三级啮合阶次带阶次包络谱
(b) Order envelope spectrum of third-stage meshing order band

图 11 重构 ESIM 与包络信号的阶次谱

Fig. 11 Order spectrum of reconstructed ESIM and envelope signal



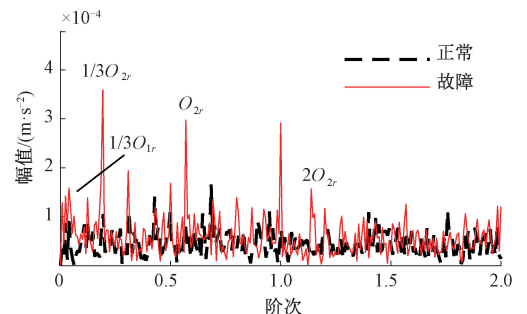
(a) 正常振动信号时域波形
(a) Time domain waveform of vibration signal of normal ring



(b) 故障振动信号时域波形
(b) Time domain waveform of vibration signal of fault ring

图 12 振动信号时域波形

Fig. 12 Time domain waveform of vibration signal



(a) 二级啮合阶次带
(a) Second-stagemeshing order band

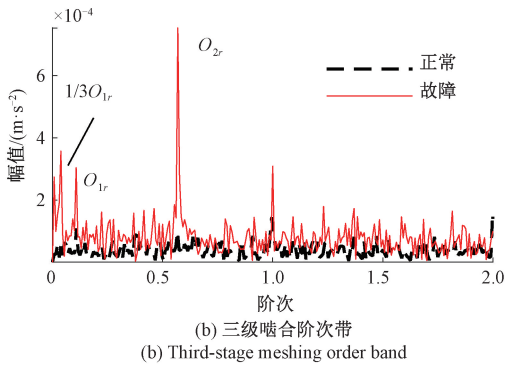


图 13 阶次包络谱对比

Fig. 13 Comparison of order envelope spectrum

齿轮箱振动信号没有的现象,与 1.2 节 2) 包络谱推导结果一致,验证了本文所提新模型的正确性和参数辨识的监测结果。

5 结 论

本文在单级齿轮箱的基础上,考虑风电齿轮箱齿圈故障特征频率在各级轮系间的传递,建立了一个新的振动信号模型,模型更准确的表示了两级齿圈故障情况下振动信号的频谱特征,为下一步借助谱分析的故障诊断丰富了理论基础。为解决日益突出的“机械大数据”问题,采用参数辨识的思路并构建了与故障状态指标(特征能量和),实验证明所提指标能够较好监测并定位齿圈故障,一定程度摆脱专家经验的束缚,促进了生产实践。

参考文献

[1] 金晓航,孙毅,单继宏,等. 风力发电机组故障诊断与预测技术研究综述[J]. 仪器仪表学报,2017,38(5): 1041-1053.
JIN X H, SUN Y, SHAN J H, et al. Fault diagnosis and prognosis for wind turbines: An overview [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38 (5): 1041-1053.

[2] 李舜酩,郭海东,李殿荣. 振动信号处理方法综述[J]. 仪器仪表学报,2013,34(8):1907-1915.
LI SH M, GUO H D, LI D R. Review of vibration signal processing methods [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(8): 1907-1915.

[3] RANDALL R B. A new method of modeling gear faults[J]. Journal of Mechanical Design, 1982, 104(2): 259-267.

[4] LI Y, DING K, HE G L, et al. Vibration mechanisms of

spur gear pair in healthy and fault states[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 81: 183-201.

[5] YANG X Q, DING K, HE G L. Phenomenon-model-based AM-FM vibration mechanism of faulty spur gear [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 134: 106366.

[6] MCFADDEN P D, SMITH J D. An explanation for the asymmetry of the modulation sidebands about the tooth meshing frequency in epicyclic gear vibration [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1985, 199(1): 65-70.

[7] MCNAMES J. Fourier series analysis of epicyclic gearbox vibration[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2001, 124(1): 150-153.

[8] PARKER R G, LIN J. Mesh phasing relationships in planetary and epicyclic gears [J]. Journal of Mechanical Design, 2004, 126(2): 365-370.

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

[10] MOLINA VICUÑA C. Theoretical frequency analysis of vibrations from planetary gearboxes [J]. Forschung im Ingenieurwesen, 2012, 76(1): 15-31.

[11] FENG Z P, ZUO M J. Vibration signal models for fault diagnosis of planetary gearboxes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(22): 4919-4939.

[12] LEI Y G, LIU Z, LIN J, et al. Phenomenological models of vibration signals for condition monitoring and fault diagnosis of epicyclic gearboxes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 369: 266-281.

[13] 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.

[14] 王鑫,徐玉秀,武宝林. 齿轮传动系统中行星轮断齿故障特征分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(21): 81-86.
WANG X, XU Y X, WU B L. Chipping fault feature analysis for planetary gear in a gearbox transmission system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(21): 81-86.

[15] 雷亚国,贾峰,孔德同,等. 大数据下机械智能故障诊断的机遇与挑战[J]. 机械工程学报, 2018, 54(5):

- 94-104.
- LEI Y G, JIA F, KONG D T, et al. Opportunities and challenges of machinery intelligent fault diagnosis in big data era [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(5):94-104.
- [16] ZHOU S, LIU X, HUA Y, et al. Adaptive model parameter identification for lithium-ion batteries based on improved coupling hybrid adaptive particle swarm optimization-simulated annealing method [J]. *Journal of Power Sources*, 2021, 482:228951.
- [17] LOPEZ A, OLAZAGOITIA J, MARZAL BARÓ F A, et al. Optimal parameter estimation in semi-empirical tire models [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering*, 2019, 233:73-87.
- [18] 李建军, 盛洁波, 王翠, 等. 异步电机定转子参数的辨识方法研究 [J]. *电工技术学报*, 2006(1):70-74.
- LI J J, SHENG J B, WANG C, et al. Research on parameter identification method for induction motor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2006(1):70-74.
- [19] 孙鹏宇, 李建良, 陶知非, 等. 动态工况电池在线参数辨识及 SOC 估计研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(1):10-17.
- SUN P Y, LI J L, TAO ZH F, et al. Research on online parameter identification and SOC estimation of battery under dynamic conditions [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(1):10-17.
- [20] NIE Y Y, LI F Y, WANG L M, et al. A mathematical model of vibration signal for multistage wind turbine gearboxes with transmission path effect analysis [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 167:104428.
- [21] XU L, DING K, HE G L, et al. Resonance modulation vibration mechanism of equally-spaced planetary gearbox with a localized fault on sun gear [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 166.
- [22] ZADEH L A. On the identification problem [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1956, 3(4):277-281.
- [23] 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(14):62-67.
- HE R M, SHEN F, HAN D, et al. The study of generator excitation system modeling and parameters estimation [J]. *Power System Technology*, 2007(14):62-67.
- [24] 王璨, 杨明, 栾添瑞, 等. 双惯量弹性伺服系统外部机械参数辨识综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(3):804-817.
- WANG C, YANG M, LUAN T R, et al. A review of external mechanical parameter identification of two-mass elastic servo systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(3):804-817.
- [25] FAN J, PAN J. A note on the Levenberg-Marquardt parameter [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2009, 207(2):351-359.
- [26] YU Y, YU D, CHENG J. A fault diagnosis approach for roller bearing based on IMF envelope spectrum and SVM [J]. *Measurement*, 2007, 40(9-10):943-950.
- [27] SINGH J, DARPE A K, SINGH S P. Bearing damage assessment using Jensen-Rényi divergence based on EEMD [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 87:307-339.
- [28] JIANG W, ZHENG Z, ZHU Y, et al. Demodulation for hydraulic pump fault signals based on local mean decomposition and improved adaptive multiscale morphology analysis [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015.
- [29] 程珩, 励文艳, 权龙, 等. 基于 VMD-MDE 和 ELM 的柱塞泵微弱故障诊断 [J]. *振动. 测试与诊断*, 2020, 40(4):635-642, 818.
- CHENG H, LI W Y, QUAN L, et al. Weak fault diagnosis of axial piston pump based on VMD-MED and ELM [J]. *Journal of Vibration Measurement & Diagnosis*, 2020, 40(4):635-642, 818.
- [30] 董绍江, 裴雪武, 汤宝平, 等. 基于 FNER 性能退化指标及 IDRSN 的滚动轴承寿命状态识别方法 [J]. *机械工程学报*, 2021, 57(15):105-115.
- DONG SH J, PEI X W, TANG B P, et al. Recognition of rolling bearing life status based on FNER performance degradation indicator and IDRSN [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(15):105-115.
- [31] FENG Z P, ZUO M J, QU J, et al. Joint amplitude and frequency demodulation analysis based on local mean decomposition for fault diagnosis of planetary gearboxes [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 40(1):56-75.

- [32] 周雁冰,柳亦兵,王峰,等. 齿轮故障振动信号非高斯性特征趋势分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(6): 165-169.
ZHOU Y B, LIU Y B, WANG F, et al. Trend analysis of non-Gaussian characteristic for gear fault vibration signals[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(6): 165-169.
- [33] 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. Fault diagnosis of a planetary gearbox based on order tracking[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(5): 140-145, 195.

作者简介



刘少康, 2019 年于河北大学获得学士学位, 2022 年于东北电力大学获得硕士学位, 现为华北电力大学在读博士研究生, 主要研究方向为风电机组故障诊断。

E-mail: liushaokang9610@163.com

Liu Shaokang received his B.Sc. degree from HeBei University in 2019, and received his M.Sc. degree from Northeast Electric Power University in 2022. He is currently a Ph.D. candidate at North China Electric Power University. His main research interest is wind turbine fault diagnosis.



武英杰(通信作者), 分别于 2009、2012 和 2016 年于华北电力大学获得学士、硕士和博士学位, 现工作于东北电力大学, 主要研究方向为风电机组故障诊断。

E-mail: wuyingjie6668@163.com

Wu Yingjie (Corresponding author) received his B.Sc. degree, M.Sc. degree, and Ph.D. degree all from North China Electric Power University in 2009, 2012, and 2016, respectively. He is currently working at Northeast Electric Power University. His main research interest is wind turbine fault diagnosis.