DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2311708

新能源汽车油泵电机电磁力建模及 其匝间故障监测方法研究*

刘行谋1,何明朗1,肖 遥2,孙 逊3,吕 翔3

(1.重庆邮电大学自动化学院 重庆 400065; 2.重庆红宇精密工业集团有限公司 重庆 402760;3.贵州航天计量测试技术研究所 贵阳 550025)

摘 要:新能源汽车油泵电机出现匝间故障,无法保证燃料供给、控制压力、提供润滑和冷却等,威胁行车安全。对此,本文提出 了一种基于电流和振动信号相结合的匝间故障在线监测方法。首先,根据麦克斯韦张量法构建含有故障电流谐波的电磁力模 型。其次,设计了一个多传感器的电机信号采集电路。最后,采用改进的自适应经验模态分解法对经降噪后的振动信号进行自 适应分解,利用相关系数法对所得的一系列本征模式函数筛选和重构。综合评估峭度与均方根值之比以及包络谱特征因子,得 到故障特征指标提升 52.3%,表明重构信号具备更高的敏感性,并通过电流波形分析验证了重构信号与故障特征的一致性。该 研究对油泵电机故障诊断和状态预测具有重要工程意义。

关键词:油泵电机;匝间故障;振动信号;自适应经验模态分解;故障特征 中图分类号:TH38 **文献标识码:**A 国家标准学科分类代码:470.4024

Research on electromagnetic force modeling and inter-turn fault monitoring method for oil pump motors of new energy vehicle

Liu Xingmou¹, He Minglang¹, Xiao Yao², Sun Xun³, Lyu Xiang³

(1. College of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;
2. Chongqing Hongyu Precision Industry Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China; 3. Guizhou Aerospace Institute of Measuring and Testing Technology, Guiyang 550025, China)

Abstract: The occurrence of inter-turn faults in the electric motor of the fuel pump in new energy vehicles cannot guarantee fuel supply, pressure control, lubrication, and cooling, which poses a threat to driving safety. To address this issue, this article proposes an online monitoring method for winding inter-turn faults by combining electromagnetic parameters and vibration signals. Firstly, the electromagnetic force model containing fault current harmonics is formulated according to the Maxwell tensor method. Then, a multi-sensor motor signal acquisition circuit is designed. Finally, the improved adaptive empirical mode decomposition method is applied to adaptively decompose the denoised vibration signals, and a set of intrinsic mode functions is selected and reconstructed by using the correlation coefficient method. The comprehensive evaluation of the kurtosis-to-root mean square ratio and envelope spectrum feature factor results in 52. 3% improvement in the fault characteristic indicator. This indicates that the reconstructed signal has higher sensitivity. The consistency between the reconstructed signal and fault characteristics is further evaluated through analysis of current waveforms. This research holds important engineering significance for the fault diagnosis and state prediction of oil pump motors. **Keywords**; oil pump motor; inter-turn circuit; vibration signal; adaptive empirical mode decomposition; fault feature

0 引 言

新能源汽车电动化程度不断加深,传统机械油泵逐

渐被电动油泵替代。无刷直流电机(brushless DC motor, BLDC)作为电动油泵的动力装置,其稳定性和可靠性对整车运行至关重要^[1-2]。

收稿日期:2023-07-22 Received Date: 2023-07-22

^{*}基金项目:重庆市教委科学技术研究(KJQN202200634)、教育部产学合作协同育人(220801480240051)项目资助

303

目前,无刷直流电机故障诊断技术主要有电流分析 法、振动分析法、热分析法、信号处理和机器学习的方 法^[3]。Jafari 等^[4]提出了一种利用移动均值、方差和信号 能量指标分析三相电流波形失真情况检测匝间故障的方 法。Wang 等^[5]提出了一种基于电流、瞬时有功功率和瞬 时无功功率中会产生显著的二次谐波成分来检测定子故 障的方法。Wang 等^[6]提出了在六步换向控制策略下对 BLDC 电机中的匝间短路故障进行检测和定量分析。通 过监测电流信号,可以检测到电机功率特性的变化,如电 流波形的畸变、谐波成分的增加等,从而识别出电机的故 障。贾朱植等^[7]还利用电流信号特征的高分辨率谱对电 机早期转子断条故障进行评估诊断。值得注意的是.电 流信号不能直接获取到电机内部其他部件(如绕组)的 运行状态信息。王骁贤等^[8]提出了一种利用多传感器信 号深度特征融合的方法,通过提取和融合8通道的电机 振动和声音信号用于电机多工况下进行故障诊断,主要 是对故障类型的判断,却不能对故障程度进行判断。 Shifat 等^[9]利用集合经验模态分解辅助监督学习对 BLDC 电机振动信号进行故障诊断,该方法在信号质量 较差或者包含噪音时可能会产生不准确的分解结果。王 秋晓等[10]提出了一种采用电磁力产生的同频振动抵消 大部分初始振动,从而减小簧板的振动,保证系统线性度 的动平衡测量方法,该研究为电磁力在振动控制领域的 应用提供了新的思路和方法。为研究电机在运行过程中 所受电磁力,采用有限元的方法对径向力、切向力和轴向 力这3个电磁力分量进行分析,其中径向力的影响最为 明显^[11]。当电机发生匝间故障时,不对称绕组会显著影 响电机的电磁特性,如谐波特性、磁饱和度和交叉磁化强 度的变化,从而在定子内侧产生不平衡电磁张力,最终加 剧定子表面振动[12-14]。

基于以上分析,本文以新能源汽车 E2ePTEYB 型油 泵电机为研究对象,对车用泵类无刷直流电机采取电流 和振动故障信号相结合的方法进行特征提取。首先,基 于解析法分析绕组匝间故障引起电机电流与振动的变化 规律,确定造成电机振动的主要力波频率和阶次。其次, 建立有限元模型,分析电机匝间故障前后电流和振动与 气隙磁密的关系。最后,通过提取电机电流和振动信号 特征的方法进行相关实验验证。结果表明绕组匝间故障 可通过油泵电机电流和振动的奇次谐波进行监测。

1 车用油泵电机模型建立

本文根据当前最新量产的新能源汽车 E2ePTEYB 油 泵电机为研究对象,该类型油泵电机广泛应用于新能源 客车、新能源乘用车、混合动力汽车、火车和船舶等的加 热循环和冷却循环系统中,同时也用于纯电动车电机及 控制系统冷却循环、新能源汽车电池冷却和加热循环、暖风空调循环等。油泵包含电机、控制器、油泵3部分,其中电机是泵体的动力来源。该电机采用了9槽6极内转子结构,控制器(电机驱动)采用三相全控桥式电路。

1.1 电机结构及物理参数

E2ePTEYB 油泵电机采用单层分数槽集中式绕组, 三相绕组之间采用三角形连接方式。永磁体材料选用了 钕磁铁(NdFeB),电机基本参数如表1所示。

表 1 电机基本参数 Table 1 Basic motor parameters

Tuote I Duste motor parameters				
参数	数值			
额定电压/V	12			
极对数	3			
槽数	9			
每相绕组匝数	150			
电机转矩/(N·m)	2.6			
最大功率/W	600			

为了更准确模拟油泵电机匝间故障,本文考虑无刷 直流电机输入信号的特殊性,实验模型包括驱动系统和 绕组结构,该驱动利用反电动势过零点法检测转子位置, 核心是控制6个开关的关断^[15]。如图1所示,当S1断开 时,表示开路故障,这将导致绕组完全断开。而当S1闭 合且S2、S3或S4中的1个闭合时,可以模拟对应故障比 的短路故障。通过控制这些开关的状态,可以模拟不同 类型匝间故障。





1.2 油泵电机电磁振动数学模型

采用麦克斯韦应力张量法,其径向电磁力如下:

$$F_r = \frac{B_r^2 - B_t^2}{2\mu_0}$$
(1)

式中:F,为径向电磁力;B,为气隙中的径向磁通密度;B, 为切向磁通密度; μ_0 为真空中的磁导率。其中径向磁通 密度远大于切向磁通密度。假设电机定、转子表面足够 光滑,且忽略磁滞和涡流损耗,磁路不饱和,振动计算二 维模型如图2所示。



图 2 振动计算二维模型 Fig. 2 Two-dimensional models for vibration calculation

转子的半径为 R,,定子的内径为 R,,线圈电流从 A 点流入,B 点流出,P 点的径向气隙磁通密度可以通过 式(2)得到:

$$B_{r}(\beta) = \frac{2\mu_{0}Ni}{\pi R_{s}} \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{R_{s}^{2m} + R_{r}^{2m}}{R_{s}^{2m} - R_{r}^{2m}} \right) \sin \alpha m \times \sum_{l}^{2p} (-1)^{l-1} \cos m \left[\beta - \frac{\pi(l-1)}{p} \right]$$
(2)

式中:p为电机转子极对数;N是线圈匝数。因此,气隙中的径向磁通密度与电机的转子极对数、绕组匝数和线圈电流有关,特别是在绕组因故障而产生谐波时,磁通密度的变化将受到影响。对 B,进一步分解:

$$B_{r}(\theta,t) = [b_{s}(\theta,t) + b_{r}(\theta,t)] \times \Lambda(\theta)$$
(3)

式中: $\Lambda(\theta)$ 为定子堵塞效应的气隙渗透率; $b_s(\theta,t)$ 为电枢反应的定子径向磁动势; $b_r(\theta,t)$ 为转子径向磁动势,如式(4)所示。

$$\begin{cases} b_s(\theta, t) = \sum Q_{\nu} \cos(\omega_s t - \nu p \theta + \varphi_{\nu}) \\ b_r(\theta, t) = \sum F_{\mu} \cos(\omega_r t - \mu p \theta) \end{cases}$$
(4)

式中: ν 为定子谐波磁场数($\nu = k_1 + 1, k_1 = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots$); μ 为转子谐波磁场数($\mu = 6k_2 + 1, k_2 = 0, 1, 2, \cdots$); ω_s 为定 子绕组电流角速度; ω_r 为转子的旋转角速度; θ 为转子的 空间位置角; φ_{ν} 为谐波的初始角;t 为时间; Q_{ν} 和 F_{μ} 为电 子和转子电磁力的振幅。

由式(3)和(4)可知,不同频率的径向力是由定子和 转子的径向电磁力谐波相互作用产生的^[16]。定子、转子 谐波相互作用的电磁力如式(5)所示。

$$F_{s,r}(\theta,t) = \frac{b_s(\theta,t)b_r(\theta,t)}{2\mu_0} =$$

$$\frac{Q_\nu F_\mu}{4\mu_0} \times \left\{ \cos\left[\left(\omega_s + \omega_r \right)t \pm (\nu + \mu)p\theta + \varphi_\nu \right] + \cos\left[\left(\omega_s - \omega_r \right)t \pm (\nu - \mu)p\theta + \varphi_\nu \right] \right\}$$
(5)

由式(5)可知,径向电磁力谐波的阶数为($\nu \pm \mu$)p,对 应的电流频率为($\omega_s \pm \omega_r$)/2π。这些谐波产生的原因是 由于电流引起的旋转磁场与定子磁场不完全重合,导致 在空间中存在一定的不对称性,从而在转子上引起径向 力的振动,产生谐波。如果电机出现了匝间故障,则会引 起额外的电流谐波产生。这些谐波可能具有不同的频率 和幅值,并会导致转子振动的变化。因此,通过检测和分 析电机的电流谐波可以有效地发现电机的故障。

1.3 油泵电机匝间短路故障模型

假设 AC 绕组分为正常部分和故障部分,在故障位 置用并联电阻的方式模拟,绕组匝间短路故障等效电路 如图 3 所示。在实验中可以通过控制开关 S1、S2、S3、S4 的状态来模拟电动油泵无刷直流电机的匝间短路故障。 当 S1 闭合且开路电阻 *R*_{se} = 0 时,适当选择短路电阻 *R*_{se} 的阻值,并在 S2、S3、S4 中选择 1 个进行闭合,以模拟不 同的故障情况。



图 3 绕组匝间故障等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit for winding interturn fault

电机在正常状态下,三相完全对称。空间上每两相 互差120°;三相绕组对应的各参数完全相同;电机气隙磁 场均匀分布,无涡流损耗,磁路不饱和;同时忽略定子绕 组电枢反应和互感。此时,油泵电机计算模型如式(6) 所示。

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{V}_{a,b,c} \end{bmatrix} = \boldsymbol{R}_{s} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{a,b,c} \end{bmatrix} + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} (\begin{bmatrix} \boldsymbol{L}_{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{a,b,c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi}_{PM_{a,b,c}} \end{bmatrix})$$

式中: $V_{a,b,c}$ 和 $I_{a,b,c}$ 分别表示电压和电流的矢量矩阵形式; R_s 和 L_s 为等效电阻和电感矩阵; $\psi_{PMa,b,c}$ 是线圈磁通链矩阵。

当电机发生短路故障时,漏磁现象的发生改变了磁链的分布情况,从而对电机的电感产生影响。假设短路 匝数为 ΔN ,则故障比 η 和绕组电压方程如式(7)、(8) 所示。

$$\eta = \frac{N - \Delta N}{N} \tag{7}$$

$$\begin{bmatrix} V_{a} \\ V_{b} \\ V_{c} \\ V_{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{s} & 0 & 0 & -\eta r_{s} \\ 0 & r_{s} & 0 & 0 \\ -\eta r_{s} & 0 & 0 & \eta r_{s} + R_{f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a} \\ i_{b} \\ i_{c} \\ i_{f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M & M_{s-f} \\ M & L & M & -\eta M \\ M & M & L & -\eta M \\ M_{s-f} & -\eta M & -\eta M & \eta^{2}L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{a} \\ i_{b} \\ i_{c} \\ i_{f} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{PMa} \\ \psi_{PMb} \\ \psi_{PMc} \\ \psi_{PMc} \end{bmatrix}$$
(8)

式中:*M_{sf}*是故障相正常绕组与故障绕组的互感。永磁体产生的磁通和绕组相电流会影响电机的匝间短路电压,故障前后线圈磁链变化如图4所示。



Fig. 4 Magnetic chains for coils

磁链的变化会在故障线圈匝间短路前后一个电周期 中引起线圈电流的变化,并造成不平衡的电流。绕组中 的线电流和短路故障处的循环电流如式(9)、(10)所示。

$$i_{a} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sqrt{3} v_{a}}{n\pi \times |Z_{n}|} \sin \left[n \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) - \varphi_{n} \right]$$
(9)

$$i_f = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sqrt{3} v_f}{2n\pi \times |\eta Z_n|} \sin \left[n \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) - \varphi_n \right] \quad (10)$$

式中: Z_n 是绕组的阻抗, φ_n 是绕组阻抗角。短路故障循环电流的产生使气隙磁通量改变,影响谐波的特征。正常状态决定的谐波频率和故障状态决定的谐波频率可表示如式(11)、(12)所示。

$$f_{c} = [6(n-1) \pm 1]f$$
(11)

$$f_F = 2(n-1)f$$
(12)

式中:f是基波频率,f_e和f_F是谐波频率。短路故障状态下,会有较大的三次谐波。因此,对于短路故障,可以使用三次谐波来检测^[17]。

1.4 油泵电机绕组开路故障模型

油泵电机线圈开路故障早期表现为绕组高电阻连接,绕组温度升高加剧接触面氧化,将进一步增加接触电阻。当接触电阻严重过热致绝缘层破裂,导致开路故障的发生。以单相绕组开路故障为例,假设 AC 绕组之间存在高电阻连接。如图 3 所示,为了模拟绕线上出现绝缘破损的情况,将开关 S2、S3、S4 全部断开,并闭合开关

S1,通过电阻 R_{ac} 来模拟开路故障初期。当开关 S1 断开时,就会发生油泵电机的开路故障。绕组高电阻连接故障时,油泵电机的绕组电压方程如式(13)所示。

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s + R_{oc} & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} \psi_{PMa} \\ \psi_{PMb} \\ \psi_{PMc} \end{bmatrix}$$
(13)

式中: $V_a \ V_b \ V_c$ 是绕组的相电压; R_s 是定子等效相电阻; R_{oc} 是开路电阻; $i_a \ i_b \ i_c$ 是绕组的相电流; $\psi_{PMa} \ \psi_{PMb} \ \psi_{PMc}$ 是各绕组等效磁链。

开路故障是指某个绕组发生断路,导致电流无法流过 该绕组。这可能导致电机不转动并伴随嗡鸣声或异常振 动。由式(13)可知,当*R*。。趋于无穷大时,其中1个绕组中 的电流为0,会导致电机的三相严重不平衡,即三相电流数 值变化较大。在电机启动时,由于开路故障存在,电流幅 值会减小。因此,相对于短路故障而言开路故障小于电流 冲击,对电机其它电气元件的危害程度较轻。而短路故障 会导致电流异常增大,可能引起电机和系统的严重损坏。

因此,无论是开路故障还是短路故障,都需要及时检 测和修复,以确保电机的安全运行。

2 油泵电机电磁-力耦合计算

根据所构建的电机模型,采用有限元分析方法对无 刷直流电机定子绕组进行电磁场建模,得到电磁场及固 体力学分布,并计算匝间绝缘故障前后电磁参数以及力 学特性,分析并研究其变化特征。

2.1 绕组匝间故障前后的电磁场分布

油泵电机正常状态下,定子绕组的磁动势分布具有 一定的规律性和周期性变化。这种磁动势分布包括基波 和奇次谐波成分。在定子绕组出现绝缘破损并导致匝间 故障时,故障绕组的有效匝数改变,导致磁动势分布随之 变化,进而影响气隙磁场的分布。油泵电机磁通密度分 布如图 5 所示。

在正常状态下,三相绕组磁通密度分布基本对称性, 即磁通密度在各个部位相对均匀。然而,在短路故障时, 故障处的磁通密度相比其余两处较为稀疏。这是因为短 路故障会导致电流绕过部分绕组,使得该区域的磁通密 度减少。在开路故障时,通电相的绕组由于断开无法形 成完整的电流回路,导致该相的磁通密度相比其余两相 较为稀疏。

2.2 匝间故障对电流的影响

油泵电机在 2 000 rpm 转速时,电流波形如图 6 所示。正常状态下,电机三相电流是完全对称。当 AC 绕 组出现匝间故障时,三相电流不再平衡,A 相电流与 C 相电流幅值略微增大,并且存在轻微畸变,而 B 相电流的振



幅增大但波形无畸变。当电机某相绕组出现开路故障时,流经故障绕组的电流远小于其余两绕组,甚至无电流流过。本文研究电机绕组为三角形连接,故障绕组为AC,B相电流幅值变小但波形无畸变,而A相与C相电流幅值变小同时波形畸变。



AC 绕组发生短路故障后,谐波数量如图 7 所示,在 3、5、7、11 和 15 次谐波中,3 次谐波幅值较高。在相对转 速较低时,各谐波幅值呈现较小变化趋势。同时,在剩余 绝缘电阻并非接近于 0 的情况下,短路故障产生的影响 不明显,因此对除零序分量之外的主要谐波的作用可忽 略。而 3、5、7、11 次谐波基本呈现出与故障程度一样的 变化趋势,且 5 次谐波幅值整体高于 3 次谐波,但 9、 13 次谐波幅值变化无规律性,无法作为故障判定依据。



2.3 匝间短路对电磁转矩的影响

磁场能量的大小主要取决于气隙磁导和气隙磁动势。当转子绕组发生匝间短路故障时,气隙磁动势因定 子绕组有效匝数的变化而发生变化,对应状态下的磁场 能量也发生了相应的变化,体现在直流电机的具体电磁 转矩上,即电磁转矩的大小发生了变化^[18]。电机转速在 2 000 rpm 时,正常和短路故障状态下各采样点麦克斯韦 应力张量径向分量(σ_π)变化情况如图 8 所示。



Fig. 8 The radial component of the stator

在匝间短路状态下,绕组内部电流会发生不均衡分 布,其中短路处的电流密度明显增加,引入额外的磁场分 布,从而定子内部受到的电磁力分布发生变化。这会导 致磁力和力矩的波动,降低转矩输出,并引起异常振动。

3 电机试验及其振动特征分析

3.1 实验平台及故障数据采集

故障位置如图 9 所示,将导线从 6 个点处分别引出。 其中,1 和 1'、2 和 2'、3 和 3'是绕组线圈的断点,用于组 合出不同故障。在 1 和 2、2 和 3、1 和 3 之间接入不同阻 抗的电阻和电感即可模拟不同短路比和绝缘破损程度, 同时,将 1 与 1'悬空模拟绕组开路故障。



图 9 故障位置 Fig. 9 Fault location

为了对电动油泵系统中的无刷直流电机绕组匝间 故障特性分析,减少无关因素的影响。选择在空载状 态下进行故障实验,采集电流、电压和振动加速度信 号^[19]。为了模拟匝间故障,通过在导线之间采用不同 的连接方式来实现。具体做法是将定子绕组短路匝数 比η设为 0.05、0.15 和 0.45,并通过抽头引出,然后人 为地连接抽头,以模拟匝间故障的情况。实验平台如 图 10 所示。



流稳压源 电流传感器 采集卡 恒流源 油泵电 图 10 实验平台

Fig. 10 Experimental platform

3.2 基于 ICEEMDAN-WPD 的振动信号分析方法

ICEEMDAN-WPD 方法是一种用于机械故障诊断的 新型方法,它结合了改进的自适应噪声完备集合经验模 式分解(the improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN)和小波包 分解(wavelet packet decomposition, WPD)两种技术。使 用 ICEEMDAN-WPD 方法对匝间故障信号进行处理后, 可以得到高水平的振动特征值,从而实现对故障的检测、 诊断和预测。此方法能够处理非线性、非平稳和高斯白 噪声干扰的复杂机械信号;能够提取信号的局部特征,并 保留信号原始的时间和频率信息;能够准确地确定故障频率,并通过 WPD 技术实现快速、有效的故障检测。

1) ICEEMDAN 方法基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)分解原理,并在每次分解迭代 过程中对信号添加可控的高斯白噪声,通过多个添加噪 声信号并进行平均,该方法旨在解决模态混叠问题,增强 抗干扰性^[20]。ICEEMDAN 方法使用上一次迭代的残差 减去本次迭代中多个添加噪声信号的残差的平均值作为 每次迭代产生的 IMF。这种方法能够进一步减少 IMF 中 的噪声残留,从而改善分解效果^[21]。

2)小波包分解实际是对小波变换的一种改进,相比较小波变换,小波包分解能更有效的处理非平稳信号,并将原信号分解为高频和低频两个部分。将原始信号进行 n级小波包分解成了 2ⁿ 个子信号,高通滤波系数和低通 滤波系数需要满足正交关系。

3.3 实验数据处理及信号特征提取

如图 11 所示,电机在 2 000 rpm 转速下采集到的电 压、电流波形,其中含有大量小波纹。电机电流、电压的 频谱如图 12 所示,在频率范围为 15~25 kHz 之间含义大 量谐波。电源电压波形如图 13 所示,通过对采样的 10 000 个数据进行时频图分析,可以确定 20 kHz 谐波分 量来自于电源。





图 12 电流和电压的频谱图





Fig. 13 Voltage source waveform

由于电机驱动逆变电路的死区效应或管压降等非线 性因素的影响,还会引入一些时间序列谐波。本文以油 泵电机在2000 rpm 转速为例,电机电周期为10 ms(频率 为100 Hz),机械周期为30 ms(频率为33.3 Hz),这些频 率远小于上述谐波频率。对频率大于15 kHz的谐波噪 声采取滤除预处理,结果如图14 所示。





Fig. 14 Preprocessing results of experimental data

相关系数法能很好地反映每个模态变量和原信号之间的线性相关程度,并且可以定量地表示 2 个随机变量 之间的相关依赖程度。本文采用互相关系数法来选取有 效模态重组并绘制包络谱图。具体步骤:

1)对预处理信号选取小波基函数进行分解,滤除高频谐波分量得到预处理后的降噪信号;

 2) 对降噪后的信号进行 ICEEMDAN,得到由高到低 的固有模态函数(intrinsic mode function, IMF);

3) 将每个 IMF 与降噪后的实验信号进行相关性分 析,并计算相关系数;

4)保留所有相关系数大于 0.1 的低频 IMF 分量进 行重组并求取包络频谱图。

如图 15 所示,ICEEMDAN 分解出了 10 个 IMF 分量 和 1 个残余分量,各分量频率分离效果较好,且无关分量 较少,分解效率高,适合于匝间短路故障振动信号的分 析。分别求出各 IMF 分量与原信号的相关系数,得到的 数值如表 2 所示。



Fig. 15 ICEEMDAN decomposition diagram

表 2 IMF 分量相关系数 Table 2 IMF component correlation coefficient values

INIT	相大尔奴	11/11	相大示奴
1	0.0214	6	0.6457
2	0.026 1	7	0.735 3
3	0.124 3	8	0.094 7
4	0.281 6	9	0.014 0
5	0.4264	10	-6.8015×10^{-4}

从表中筛选出相关系数大于 0.1 的低频 IMF 分量作 为特征分量,进行信号的重构,得到新的振动加速度信 号,如图 16 所示。



当油泵电机出现绕组故障时,会引起振动信号的非对称性和非线性变化。为了量化这些变化,使用峭度与均方根之比(kurtosis-to-RMS ratio,K/R)作为特征指标。本文分别计算不同故障比下原始信号和经过小波包分解、ICEEMDAN 以及 ICEEMDAN-WPD 重构的信号的 K/R 值。计算结果如表 3 所示,采用对方差进行加权求和,然后乘以相关系数的平均值,每行数据的综合评估结果分别为2.6046、0.0543、1.0572和6.4911,第4行数据具有最大的综合评估值,它在方差和相关系数的综合考虑下显示出最大的变化幅度,具有更敏感的故障特征。

表 3 K/R 指标计算结果 Table 3 Plot of Kurtosis-to-RMS ratio

故障状态	$\eta = 0$	$\eta = 0.05$	$\eta = 0.15$	$\eta = 0.45$	开路
原始信号	0.932 2	1.315 4	2.171 8	2.4911	1. 435 9
小波包分解	1.3207	2.092 2	2.396 5	2.365 4	2.214 8
ICEEMDAN	1.2817	1.435 9	2.406 2	2.092 2	1.9316
ICEEMDAN-WPD	1.480 5	2.6769	4.581 0	4.8522	2.403 6

实验还计算了各种方法得到重组信号的包络谱特 征因子(envelope frequency follower, EFF),如表4所示, 计算每个方法得到的包络谱特征因子的标准差,分别 是 1.528、2.505、1.612 和 5.486。其中 ICEEMDAN-WPD 的标准差最大,意味着它对于匝间故障特征提取 具有更好的鉴别能力和更高的灵敏度。相反,原始信 号的标准差最小,表明该方法可能无法捕捉到特征丰 富的信号变化。

表 4 EFF 指标计算结果 Table 4 Plot of EEF ratio

故障状态	$\eta = 0$	$\eta = 0.05$	$\eta = 0.15$	$\eta = 0.45$	开路
原始信号	10.698 2	8.5386	7.1923	10.237 0	7.347 0
小波包分解	22.634	15.721	16. 692	15.621	15.950
ICEEMDAN	11.345	6.225	5.933	8.818	6.897
ICEEMDAN-WPD	41.011	32. 321	49.772	36.909	38. 108

由于故障振动信号在不同频率下拥有不同的能量, 用包络谱特征因子指标来评估信号处理方法的频谱分辨 率和信号特征提取能力,峭度与均方根值之比可以对信 号的高频噪声和低频信号的分辨能力进行综合考虑。对 每种方法在包络谱特征因子指标和峭度与均方根值之比 指标上的平均值进行归一化处理,从而消除指标之间的 量纲差异,使得各指标具有可比性。将归一化后的指标 进行综合评估,各方法故障特征指标相对于原信号提升 值依次是18.8%、26.7%和52.3%。ICEEMDAN-WPD 方 法在提取故障特征方面表现最优。

对重组的性信号绘制振动频谱包络图,如图 17 所 示,随着故障比的增加,油泵电机的基频幅值逐渐增大, 当严重短路故障发生时甚至成倍增加。此外,随着故障 的加重,3次、5次等奇次谐波幅值增加。油泵电机发生 开路故障时,除5次谐波较大外,其余特征与轻微短路故 障类似,短路故障危害更大。这些结果对于油泵电机故 障的诊断和预测具有重要意义。



实验 5 种工况的电流波形如图 18 所示,当油泵电机 发生匝间故障时,主要表现为短路绕组电流波形的畸变 与幅值变化。这与驱动器在控制电机输入电流时受到了 故障干扰和电机气隙磁场的变化产生电流谐波有关。故 障回路环流所引发的脉振磁场产生的脉振磁动势会在定 子绕组中感应出基频附加电势和二倍频附加电势等谐波 电势,这些电势会使转子励磁绕组电流发生变化^[22]。随 着故障比的增加电流幅值与畸变程度也在增加,而电机 开路绕组故障会使电流幅值显著减小。



Fig. 18 Comparison of current waveforms

值得注意的是,油泵电机通常由恒定电压的电源供 电,这意味着当电机发生匝间故障时,电源会维持输出电 压的稳定。电源具有较低的源阻抗和较高的输出能力, 即使在故障发生时,电源也可以继续提供相对稳定的电 压输出。因此,尽管出现了匝间故障,电压任然维持相对 稳定。

4 结 论

本文对新能源汽车油泵电机匝间故障进行了分析, 包括不同故障比定子绕组匝间短路故障和绕组开路故 障,并研究了这些故障对气隙磁密、电磁转矩和电机振动 加速度的影响,同时提出了故障特征提取方法。主要结 论如下:

1)定子绕组匝间故障会导致油泵电机失去平衡,同时励磁磁动势减小,破坏气隙磁密分布,从而影响电磁转矩,并增加定子表面张力,造成油泵异常振动。

2)通过二维有限元分析方法,模拟油泵电机绕组匝间故障发生前后的电机电流变化情况,并证明了故障绕 组中存在电流谐波分量,同时奇次谐波分量可作为故障 发生的指标。 3) 在搭建实验平台并采集实验数据后, 对空载状态 下油泵电机的电流、电压和振动加速度进行了去噪预处 理和分析。通过使用 K/R 指标和 EFF 指标评估, 发现经 过 ICEEMDAN-WPD 分解和重构后的信号相比原始信号 具有更敏感的故障特征。通过观察振动波形和电流波 形, 发现随着故障比的增加, 油泵电机的基频幅值逐渐增 大, 并且奇次谐波也随之增加。研究还表明, 在油泵电机 中短路故障比开路故障更具危害性。

参考文献

- [1] GANDHI A, CORRIGAN T, PARSA L. Recent advances in modeling and online detection of stator interturn faults in electrical motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1564-1575.
- [2] YANG L, ZHAO J, LIU X, et al. Effects of manufacturing imperfections on the circulating current in ironless brushless DC motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(1): 338-348.
- [3] NIU G, DONG X, CHEN Y J. Motor fault diagnostics based on current signatures: A review [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-19.
- [4] JAFARI A, FAIZ J, JARRAHI M A. A simple and efficient current-based method for interturn fault detection in BLDC motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(4): 2707-2715.
- [5] WANG B, WANG J B, GRIFFO A, et al. Stator turn fault detection by second harmonic in instantaneous power for a triple-redundant fault-tolerant PM drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65 (9): 7279-7289.
- [6] WANG H, WANG J L, WANG X X, et al. Detection and evaluation of the interturn short circuit fault in a BLDC-based hub motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(3): 3055-3068.
- [7] 贾朱植,杨理践,祝洪宇,等. 基于高分辨率谱估计的早期转子断条故障诊断[J]. 仪器仪表学报,2017, 38(2):279-287.
 JIA ZH ZH, YANG L J, ZHU H Y, et al. Highresolution spectral analysis for incipient broken rotor bar

resolution spectral analysis for incipient broken rotor bar diagnosis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 279-287.

- [8] 王骁贤,陆思良,何清波,等.变转速工况下基于多 传感器信号深度特征融合的电机故障诊断研究[J]. 仪器仪表学报,2022,43(3):59-67.
 WANG X X, LU S L, HE Q B, et al. Motor fault diagnosis based on deep feature fusion of multi-sensor data under variable speed condition[J]. Chinese Journal
- [9] SHIFAT T A, HUR J W. EEMD assisted supervised learning for the fault diagnosis of BLDC motor using vibration signal [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(10): 3981-3990.

of Scientific Instrument, 2022, 43(3): 59-67.

[10] 王秋晓,伍昭富,付晓艳,等.基于动态电磁力的主动式动平衡测量方法的研究[J]. 仪器仪表学报,2017,38(1):65-73.

WANG Q X, WU ZH F, FU X Y, et al. Research on active dynamic balance measurement method based on dynamic electromagnetic force [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 65-73.

- [11] IGA Y, TAKAHASHI K, YAMAMOTO Y. Finite element modelling of turbine generator stator end windings for vibration analysis [J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(2): 75-81.
- [12] SUN T, M KIM J, H LEE G, et al. Effect of pole and slot combination on noise and vibration in permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5): 1038-1041.
- [13] CHEN S, LIU G, ZHENG S. Sensorless control of BLDCM drive for a high-speed maglev blower using lowpass filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(11): 8845-8856.
- [14] LIN F, ZUO S, DENG W, et al. Modeling and analysis of electromagnetic force, vibration, and noise in permanent-magnet synchronous motor considering current harmonics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7455-7466.
- [15] 朱俊杰,黄海燕.无位置传感器无刷直流电机换相误
 差校正系统研究[J].仪器仪表学报,2021,42(4):
 41-49.

ZHU J J, HUANG H Y. Study on the commutation error correction system of position sensorless brushless DC motor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 41-49.

[16] DU J, LI Y, YU Z, et al. Research on radial electro-

magnetic force and vibration response characteristics of squirrel-cage Induction motor fed by PWM inverter[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 1-4.

- [17] SEUNG T L, HUR J. Detection technique for stator inter-turn faults in BLDC motors based on third-harmonic components of line currents [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(1): 143-150.
- [18] 魏东,刘侃,丁荣军,等.基于多重同步压缩变换的 永磁同步电机初期匝间短路故障检测[J].电工技术
 学报,2022,37(18):4651-4663.

WEI D, LIU K, DING R J, et al. Initial turn-to-turn short-circuit fault detection of permanent magnet synchronous motor based on multiple synchronous compression transform [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(18): 4651-4663.

[19] 丁石川,王清明,杭俊,等. 计及模型预测控制的永磁同步电机匝间短路故障诊断[J]. 中国电机工程学报,2019,39(12):3697-3708.
DING SH CH, WANG Q M, HANG J, et al. Turn-to-

turn short-circuit fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor counting and model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3697-3708.

- [20] 管一臣,童攀,冯志鹏. 基于 ICEEMDAN 方法和频率 解调的行星齿轮箱故障电流信号特征分析[J]. 振动 与冲击,2019,38(24):41-47.
 GUAN Y CH, TONG P, FENG ZH P. Characterization of planetary gearbox fault current signal based on ICEEMDAN method and frequency demodulation [J].
 Vibration and Shock, 2019, 38(24):41-47.
- [21] 李诗楠,凌威,梁竹关,等. 基于 ICEEMDAN 与小波 包分解的脉搏信号联合去噪[J]. 电子测量技术, 2022,45(18):41-48.
 LI SH N, LING W, LIANG ZH G, et al. Joint denoising of pulse signal based on ICEEMDAN and wavelet packet decomposition[J]. Electronic Measurement Technology, 2022,45(18):41-48.
- [22] TANG Z, CHEN Y, LIOU Y, et al. Axial magnetic force analysis and optimized design for single-phase BLDC slim fan motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8): 6840-6848.

作者简介



刘行谋(通信作者),2010年于吉林大 学获得学士学位,分别在 2013年和 2017年 于重庆大学获得硕士学位和博士学位,现为 重庆邮电大学讲师,主要研究方向为电磁力 建模及多耦合场分析。

E-mail:liuxm@cqupt.edu.cn

Liu Xingmou (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jilin University in 2010, received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Chongqing University in 2013 and 2017, respectively. He is currently a lecturer at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include electromagnetic force modeling and multi-coupled field analysis.



何明朗,2016年于重庆理工大学获得学 士学位,现为重庆邮电大学硕士研究生,主 要研究方向为电机建模与故障诊断。

E-mail:819167255@ qq. com

He Minglang received his B. Sc. degree from Chongqing University of Technology in

2016. He is currently a master student at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include motor modeling and fault diagnosis.



肖遥,2010年于吉林大学获得学士学 位,现为重庆红宇精密工业集团有限公司高 级工程师,主要研究方向为电机控制及故障 诊断。

E-mail:541294138@ qq. com

Xiao Yao received his B. Sc. degree from Jilin University in 2010. He is currently a senior engineer at Chongqing Hongyu Precision Industrial Group Co., Ltd. His main research interests include motor control and fault diagnosis.



孙逊,2019年于上海交通大学获得博士 学位,现为贵州航天计量测试技术研究所高 级工程师,主要研究方向为电子产品可靠性 及故障分析研究。

E-mail:sunxunup@ alumni.sjtu.edu.cn

Sun Xun received his Ph. D. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2019. He is currently a senior engineer at Guizhou Aerospace Institute of Measuring and Testing Technology. His main research interests include the reliability and fault analysis of electronic products.



吕翔,2006年于重庆大学获得硕士学 位,现为贵州航天计量测试技术研究所研究 员,主要研究方向为电子产品可靠性检测和 电磁兼容测试。

E-mail:119674153@ qq. com

Lyu Xiang received his M. Sc. degree from Chongqing University in 2006. He is currently a researcher at Guizhou Aerospace Institute of Measuring and Testing Technology. His main research interests include reliability testing and electromagnetic compatibility testing of electronic products.