

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.04.011

永磁同步电机故障诊断方法研究综述

马建, 王建平, 孟德安, 颜黎明, 郭钊祥

(长安大学汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)具有结构简单、运行稳定、效率高和外形多样等显著优点,在生产制造领域得到广泛应用。PMSM在工作中不断受到速度变化和负载波动等复杂工况的影响,不可避免地会出现各种故障,如轴承故障、偏心故障、退磁故障和匝间短路故障等。文中综述了PMSM常见故障类型,并总结了自动化领域中基于信号的状态监测方法的现有研究,以用于各类电气和机械故障的检测和诊断。随后,对诊断方法进行了总结,并分析了其优势与限制,探讨了不同信号处理方法在应用中的利弊。最后,根据当前研究现状,讨论了PMSM故障监测与诊断存在的问题和未来发展方向。

关键词: 永磁同步电机(PMSM); 轴承故障; 偏心故障; 退磁故障; 匝间短路故障; 故障诊断

中图分类号: TM341

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)04-0104-12

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)具有宽速度范围、高输出扭矩、快速速度调节响应以及小巧轻便的特点^[1-3],在生产制造领域得到广泛应用。由于PMSM本身的制造缺陷以及运行过程中的磨损、变形和腐蚀等影响,PMSM的性能会随着部件性能的恶化而逐渐恶化,引发安全隐患(匝间短路、均匀和局部退磁、轴承故障等),在严重情况下,甚至可能引发停机事故,给经济造成严重损失。PMSM在工作中不断受到速度变化和负载波动等复杂工况的影响,负载的瞬态工况会加快PMSM的老化和损坏,因此及时准确地诊断PMSM故障非常重要。目前,PMSM故障诊断研究主要基于稳态工作条件,对于变速和变载工况下的故障诊断研究较为有限,而适用于稳态条件的电机故障诊断方法未必适用于频繁启动。

PMSM是一个较为复杂的机电耦合系统,引发系统故障的原因多种多样。此外,电机的故障诊断技术涉及到力学、热学和信号处理等多个领域知识的结合。目前,大型电机的诊断技术相对成熟,大型电机的诊断系统使用多个传感器来监测电机故障^[4],包括电信号、温度信号、噪音和振动等。在中小功率领域,受成本因素的限制,更常应用单一传感器的诊断系统^[5],单一信号的局限性在一定程度上影响诊断准确性。

文中总结了基于信号的状态监测方法在自动化领域的现有研究,以用于各种电气和机械故障的

检测和诊断。文中从PMSM常见故障类型展开,对这些故障类型进行详细分析;通过研究不同故障类型存在的特征信号,总结了故障诊断方法的优势与限制,并对当前故障诊断方法存在的问题进行了深入分析;最后,结合研究现状,对PMSM故障监测与诊断领域存在的问题进行讨论,并提出未来发展方向,旨在促使电机故障诊断技术在未来取得更大的进展,提高系统的健壮性和可靠性。

1 电机常见故障

PMSM转子分布结构有多种形式,如图1所示。根据永磁体在转子的分布位置不同将电机划分为表面贴合式与嵌入式,不同结构的PMSM形成的闭合磁路不同,因此电机模型、输出特性、适应场景均有不同。无论是径向、切向还是混合内嵌式PMSM,其整体构造相对表贴式均较为复杂,但电机整体的输出特性增强,如最大转矩、功率密度、过载倍数、磁阻转矩均有所提高,适用于不同的应用场景。

根据IEEE和EPRI的统计^[6-7],定子绕组故障是交流电机最常见的故障类型之一。根据电机的类型和尺寸不同,定子绕组故障在所有故障中所占比例为36%~66%,轴承故障所占比例为13%~41%,如图2所示。

PMSM故障有多种分类方式,按PMSM故障类型可分为电气故障和机械故障^[8-9],按PMSM故障位置可分为定子相关故障(与绕组和铁心相关)和转子故障(退磁、偏心和不平衡)^[10]。根据现有文献,PMSM故障分类如图3所示,文中将根据其进行分析。

收稿日期:2024-01-30;修回日期:2024-04-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52107036)

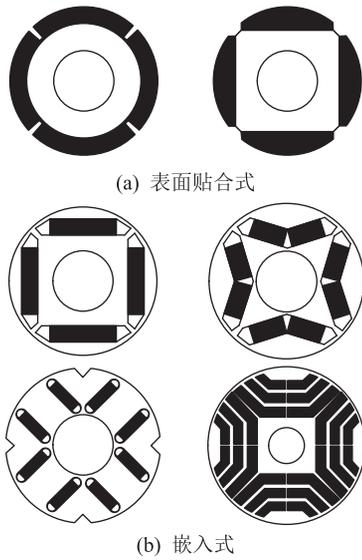


图1 PMSM不同转子分布结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of different rotor distribution structures in PMSMs

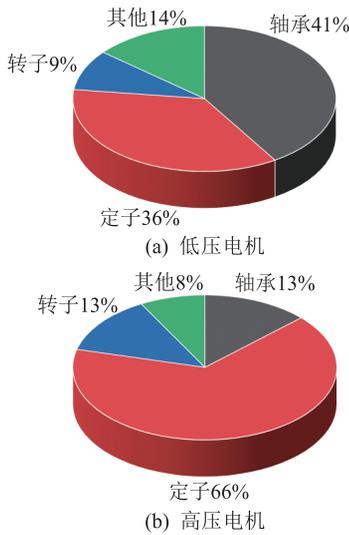


图2 各部件的故障占比
Fig.2 Fault ratio of each component

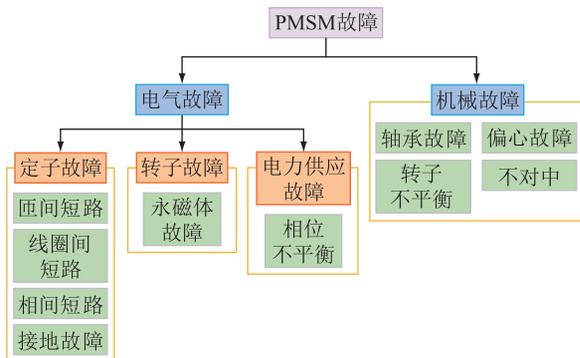


图3 PMSM故障分类
Fig.3 Fault classification of PMSMs

如果定子绕组磁场或永磁体磁场发生故障,会导致电机的定子和转子磁场偏离设计额定值,进而

影响电机的正常运行。然而,PMSM 在高温和强反磁场下容易失去磁化,导致电机转矩减少。定子绕组的电气故障会引起强烈的反磁场,增加退磁的风险。如果绕组发生短路,电机可能产生较大的瞬态交变电磁转矩,会损坏联轴器或电机转轴。

2 电机故障诊断方法

2.1 轴承故障诊断方法

针对电机轴承故障,通常采用的特征信号包括振动信号、电流信号、声学信号和热信号等。大多数研究人员倾向于利用振动信号进行分析,以识别轴承故障的特征。通过时域的方法直接提取故障特征可以节省计算时间,文献[11]提出一种新颖的分层自适应扩张卷积神经网络(adaptive deep convolutional neural network, ADCNN)模型,从振动信号中自动提取特征的 ADCNN,轴承数据的实验结果证明了模型的优越性。文献[12]提出通过具有训练干扰的卷积神经网络(convolution neural networks with training interference, TICNN)直接处理振动信号,无需任何耗时的手工特征提取过程,在嘈杂的环境下工作良好,并且在工作负载发生变化时表现良好。通过频域的方法分析振动信号,可以挖掘频域维度的故障信息,文献[13]通过快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)提取轴承的故障频率,从而实现了对轴承故障的检测,但是需要稳态条件,对负载和转速也不具有鲁棒性。FFT 需要具有高分辨率,从而能够区分轴承故障的频率与定子电流的频率。文献[14]采用缩放 FFT 算法来降低计算成本,提高分辨率。对于振动信号的时频域处理方法主要有连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)、希尔伯特变换(Hilbert transform, HT)等。文献[15]采用 CWT 模型对振动信号进行预处理和裁剪,提取故障特征后,应用多层感知机作为分类模型来识别不同类型的故障,但是需要一定的计算时间。文献[16]对机械振动加速度信号进行 FFT 和包络分析(envelope analysis, ENV),应用 HT 得到信号的包络,并使用 Kohonen 神经网络进行滚动轴承损坏检测。文献[17]建立一系列带通滤波器,用于从原始振动信号中提取多个分量信号,将这些分量信号加权求和,以重构出包含故障信息的去噪目标信号,最后利用得到的目标信号的 Teager-Kaiser 能量算子(Teager-Kaiser energy operator, TKEO)的傅里叶谱进行轴承故障诊断。

电流信号具有非侵入式测量的特点,因此部分研究人员选择利用电流信号进行轴承故障诊断。

文献[18]利用电流信号均匀性和第四中心矩峰度区分转轴损坏和轴承外圈故障,但是诊断速度比振动指标慢,对低速和转矩变化敏感。文献[19]利用等相位采样脉冲对噪声信号进行角重采样,并对重采样后的信号进行解调,计算包络阶谱以进行轴承故障识别。

文献[20]采用声学特征向量由最近邻分类器(K nearest neighbors, KNN)和朴素贝叶斯分类器(naive Bayes classifiers, NBC)进行轴承故障分类。采用声学信号分析是一种低成本、非侵入性的特征分析方法,只须对电机运行过程中的噪声进行采集。然而,电机在运转过程中的噪声来源于多个方面,因此如何提取与轴承故障相关的噪声信息仍是研究的难点。

除了噪声以外,温度也是轴承故障诊断研究者关注的方向。文献[21]使用二维离散小波变换对热图像进行预处理和滤波,采用主成分分析方法消除不相关的特征,通过马氏距离法按照相关性顺序对选定的特征进行排名,并将这些选定的特征传递给多种分类器进行学习和诊断,虽然这种方案不会破坏电机的内部结构,但是热成像仪的使用会大大增加诊断成本。

表1为各类电机轴承故障诊断方法比较,其中CNN为卷积神经网络,ZFFT为细化FFT。综上所述,针对轴承故障的特征提取方法中,振动信号的采集是一种非侵入式的方式,只要安装一个较低成本的加速度传感器即可实现,但信号采集受环境噪声的影响,且不同故障振动信号特征频率的区分仍

然是一个难点。电流信号分析排除了外界环境噪声的干扰,但相比振动信号分析需要更大的计算量和更多的计算时间。声学信号和轴承故障诊断的结合提供了一种新的思路,但具体方法的鲁棒性以及不同故障类型的区分仍须进一步研究。温度分析与机器学习的结合是轴承故障诊断的另一个研究方向,但温度表征和故障演化规律的内在联系仍须深入挖掘。在这些方法中,研究者需要权衡不同方面的优缺点,以找到最适合特定应用场景的故障诊断方法。

2.2 气隙偏心故障诊断方法

针对电机偏心故障,通常采用的特征信号有温度信号、电流信号和空载反电动势等。文献[29]通过振动信号频域分析故障特征,结合仿真模型分析了啮合力和振动加速度有效值随偏心距离的变化情况,为偏心故障的诊断提供理论依据。文献[30]分析了静态和动态偏心下电磁力的空间顺序和时间频率的变化规律,比较了不同偏心下静态和动态偏心对电机电磁振动的影响差异。

文献[31]使用热成像仪分析温度特征,运用机器视觉(machine vision, MV)和红外热成像(infrared thermal imaging, IRT)技术分析了温度特征参数,提取的热图像分别用于局部八点模式(local octa pattern, LOP)和支持向量机(support vector machine, SVM)进行分类,以实现故障诊断。

文献[32]利用电机电流特征分析(motor current signature analysis, MCSA)技术诊断偏心故障,该方法基于分析定子电流的FFT,实现了静态和

表1 电机轴承故障诊断方法比较

Table 1 Comparison of diagnosis methods for motor bearings faults

| 信号 | 诊断方法 | 优势 | 限制 | 参考文献 |
|----|----------|---|----------------------------|--------------|
| 振动 | CNN | 无需手工特征提取过程,无侵入性,高度灵敏,实验验证 | 只针对稳态工况,不可解释 | [11]、[22] |
| | TICNN | 无需手工特征提取过程,能克服环境噪声影响,对负载转矩鲁棒性,无侵入性,实验验证 | 只针对稳态工况,不可解释 | [12] |
| | FFT、ZFFT | 可解释性,无侵入性 | 不能克服环境噪声影响,只针对稳态工况 | [13-14]、[23] |
| | CWT | 时域分辨率,多尺度分析,无侵入性,低成本 | 参数选择困难,一定的计算资源,不可以在线检测 | [15]、[25] |
| | HT | 无侵入性,低成本,解决带限信号问题 | 一定的计算资源 | [16]、[26] |
| 电流 | FFT+TKEO | 可解释性,能克服环境噪声影响,无侵入性 | 只针对稳态工况,一定的计算资源 | [17]、[24] |
| | 均匀性与峰度 | 无侵入性,实验验证,可解释性 | 低诊断速度,对负载转矩无鲁棒性,对速度变化无鲁棒性 | [18] |
| 声学 | 包络谱分析 | 调幅调制分析,无侵入性 | 不能克服环境噪声影响,只针对稳态工况,一定的计算资源 | [19]、[27] |
| | KNN+NBC | 简单高效,无侵入性,低成本 | 需要测量噪声,不能克服环境噪声影响 | [20] |
| 温度 | IRT | 实时监测,非接触性检测,无侵入性 | 需要一定成本 | [21]、[28] |

动态偏心下的故障诊断。文献[33]开发了一种自适应滤波方案,用于去除电流波形的基本成分,以提高偏心故障诊断的准确率。文献[34]建立了定子电流模型,把在基频附近出现的边带效应确定为偏心故障的最重要指标。

许多研究者通过探测线圈的感应电动势来检测电机偏心故障的严重程度。文献[35]提出的故障检测方法基于均匀分布在气隙中的3个探测线圈,适用于独立于绕组布局的任何类型的轴向磁通PMSM,实验证明,该方法在任何负载条件下都能产生准确的结果。文献[36]开发了一种可以改变PMSM动态偏心率的实验装置,并对动态偏心率分别为0%、25%和50%的PMSM进行了实验,实验证明,该探测线圈法能够成功地实时检测PMSM的动态偏心。

文献[37]建立电机单元和整机空载反电势的解析模型,并通过有限元分析和实验测量对模型进行验证,提出一种基于单元电机空载反电势总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)的相贯线投影法诊断电流变PMSM静态偏心故障,该方法在瞬态和不对称条件下比振动分析更有效。文献[38-39]通过评估从每个相绕组中间测量的中点电压获得的残余电压(residual voltages, RV)来实现故障诊断,但是缺少相关实验来验证方法的有效性。

表2为电机气隙偏心故障诊断方法比较。综上所述,对于气隙偏心故障的诊断方法,采用温度信号虽然能够克服环境噪声的影响且没有侵入性,但热成像仪等设备需要一定的成本。采用电流信号具有较高的灵敏度,但对转速和负载的变化不具有鲁棒性。探测线圈的感应电动势可以适应转速和负载的变化,但需要破坏电机的内部结构,具有一

定的侵入性。因此,在选择气隙偏心故障的诊断方法时,需要根据具体情况权衡各种方法的优缺点,以找到适合特定应用场景的最佳方案。

2.3 退磁故障诊断方法

PMSM的工况复杂多变,过载、短路或其他工况可能导致永磁体温度过高,进而引发退磁故障,导致电机性能严重下降甚至损坏。因此,在早期阶段对退磁故障进行表征和诊断至关重要。对于退磁故障,通常采用的特征信号包括振动信号、电流信号和电感信号等。

文献[43]采用二维FFT来提取主导振动的重要谐波阶数,仿真和实验结果表明,在退磁故障条件下会出现特定的低模态阶数和相应的频率分量。部分研究者使用安装在每个定子齿上的探测线圈来诊断故障位置^[44],该方法在侵入性、实施成本和安装方面受到限制。文献[45]提出一种基于探测线圈的故障诊断方法,可以检测出具有任何退磁故障类型的PMSM中退磁永磁体的具体位置,需要在定子磁轭上增加3个环形磁轭线圈,环形磁轭线圈用于测量反电动势,仿真和实验结果证明了该方法的准确性。文献[46]基于对局部退磁和均匀退磁情况下的气隙磁通的分析,提出一种基于气隙探测线圈电压的故障检测和分类方法,对模拟故障条件下的PMSM进行实验测试,并与基于振动和电流谱的检测方法进行比较,结果表明,相比传统的频域分析方法,该方法具有更高的故障诊断精度。

然而,振动信号会受到所安装的传感器位置的限制,并受到被动系统的各种因素的影响。文献[47]基于定子电流数据使用CNN检测PMSM的退磁故障,实验研究结果表明,所开发的基于CNN的诊断系统具有良好的诊断性能,能够精确地检测出

表2 电机气隙偏心故障诊断方法比较

Table 2 Comparison of diagnosis methods for motor air gap eccentricity faults

| 信号 | 诊断方法 | 优势 | 限制 | 参考文献 |
|-----------|-------------|---|-------------------------------------|-----------------|
| 振动 | FFT | 无侵入性,高度灵敏 | 对负载转矩无鲁棒性,对速度变化无鲁棒性 | [29-30] |
| 温度 | IRT+LOP+SVM | 能克服环境噪声影响,对负载转矩鲁棒性,对速度变化鲁棒性,无侵入性,实验验证 | 需要一定成本 | [31] |
| 电流 | MCSA+FFT | 无侵入性,高度灵敏,实验验证 | 只针对稳态工况,不可以在线检测,对负载转矩无鲁棒性,对速度变化无鲁棒性 | [32],[34],[40] |
| | 自适应滤波 | 提高信号分辨率,无侵入性,高度灵敏,高诊断准确率,适用于复杂环境 | 对负载转矩无鲁棒性,对速度变化无鲁棒性 | [33] |
| 探测线圈感应电动势 | 理论推导 | 对负载转矩鲁棒性,对速度变化鲁棒性,实验验证,高度灵敏,较少计算资源,高诊断准确率 | 有侵入性,需要探测线圈,需要一定成本 | [35-36],[41-42] |
| 电压 | RV | 早期故障诊断,无侵入性 | 只有仿真 | [38-39] |

初始阶段的退磁故障。文献[48]通过电机电流/电压特征分析和线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)检测 PMSM 的健康或故障状态,在确定故障类型以及估计静态偏心或匝间短路故障的严重程度方面具有较高的准确性。文献[49]采用基于 FFT 的 MCSA 方法进行故障诊断,将故障情况下的谐波作为检测退磁的故障指标,发现局部退磁会引入特定的谐波,而均匀退磁会导致一定扭矩下的电流振幅增加。文献[50]提出一种基于希尔伯特-黄变换的电流谱的退磁故障诊断方法,实验结果表明,该方法具有有效性,适用于速度非稳态条件下的电机。文献[51]提出基于 CWT 和离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)的方法,用于检测非稳态条件下 PMSM 的退磁故障,实验结果证明了该方法的鲁棒性。文献[52]针对 PMSM 的退磁极数不确定和无法定位故障的问题,选择定子支路电流作为退磁故障的识别和定位信号;通过对一个极序退磁后的电机定子分支电流的剩余值和正常电机分支电流进行计算和归一化处理,建立一个退磁故障的示例数据库;通过分析均匀退磁的支路电流的剩余值和故障样本数据库的皮尔逊相关系数,得到故障阈值;分析 PMSM 实时支路电流剩余值与故障样本数据库的相关系数,通过计算的相关系数超过阈值的数量和位置来确定退磁极数和故障位置。文献[53]提出一种基于深度 CNN 和定子电流分析的图像识别方法,用于诊断 PMSM 的偏心和退磁故障,为了从 PMSM 的定子电流中提取故障特征,引入一种使用自相关矩阵的灰色图像变换算法,以增强定子电流的特征表示,该方法中,电流数据经过递归和及时处理,实验结果表明,该方法能够监测多类故障,并对速度和负载具有鲁棒性。文献[54]在定子电流中应用一个有选择性的带通滤波器,通过对滤波器参数的合理计算,可以仅提取与故障频率特征相关的信号,获取的有关信号的幅度和相位角信息可以用于区分退磁和偏心故障。文献[55]针对 PMSM 在宽广的转速范围内运行时出现的一系列严重程度不同的故障诊断问题,提出基于小波包变换和深度一维 CNN 的故障诊断方法,可以区分不同的退磁故障状态和轴承故障状态的电机。文献[56]关注同步坐标系中电流的大小和角度的变化,分析表明,退磁会导致电流角 β 增加,而匝间短路故障会导致 β 减小,因此可以利用这种差异来对故障进行分类。

文献[57]通过三相电机的 d 轴注入直流和交流分量,研究增量电感的变化来检测和分类故障,

实验结果表明,该方法不仅可以检测故障类型,也可以识别故障的严重程度。文献[58]提出一个基于自适应控制和滑模观测器相结合的诊断模型,用于诊断电感干扰下的退磁故障,该方法可以通过滑动模式控制策略有效减弱 PMSM 的电感干扰,并且采用自适应控制估计算法实现对退磁磁通的实时检测。

文献[59]设计了一种基于超扭曲算法的滑模 Luenberger 观测器(super-twisting algorithm-based sliding-mode Luenberger observer, STA-SMLO)用于退磁故障诊断,可以消除滑模观测器的抖振,有效抑制电机转速对观测器的影响,适用于多种变速工况。

多信号故障诊断也运用于退磁故障诊断。文献[60]使用 VGG-16 网络提取振动和定子电流信号的特征,以提高故障诊断的准确率,研究结果表明,振动和电流信号的结合显著提高了故障诊断技术的精度。

表 3 为电机退磁故障诊断方法比较。综上所述,针对退磁故障的诊断方法,振动信号具有非侵入性的优势,但在工况变化下的故障诊断方面存在局限。通过探测线圈信号检测退磁故障,虽然不受其他故障类型的影响,具有较高的诊断精度,但探测线圈的预置具有一定的侵入性。电感的检测方法适用于在线检测,但仅适用于稳态工况。多信号的故障诊断方法具有高诊断精度,但需要一定的计算资源。在选择退磁故障的诊断方法时,需要根据具体应用场景和需求综合考虑不同方法的优劣,并权衡其非侵入性、侵入性、适用工况等方面的特点。

2.4 匝间短路故障诊断方法

PMSM 定子绕组故障主要包括匝间短路故障、线圈间短路故障、相间短路故障和接地故障等。其中,匝间短路故障是定子绕组失效的最初阶段,也是定子绕组故障中最常见的一种^[65]。针对匝间短路故障通常采用的特征信号包括电流信号、电压信号和转矩信号等。

文献[66]提出一种基于多尺度核的残留 CNN 算法,用于诊断匝间短路故障,该算法从复杂工作条件和电磁干扰下收集的电流信号中提取高维度特征,并通过恒定工况和动态工况对算法进行测试,验证了其有效性。文献[67]采用 SVM 和 CNN 处理电流信号,两种方法都能达到 99% 的准确率,但 SVM 可以通过更少的数据量来实现同样的准确率。文献[68]设计一种基于迁移学习的 VGG16 深度 CNN 的故障诊断方法,并通过网格搜索和交叉验证方法完成对故障诊断模型超参数的微调,该模型

表3 电机退磁故障诊断方法比较
Table 3 Comparison of diagnostic methods for motor demagnetization faults

| 信号 | 诊断方法 | 优势 | 限制 | 参考文献 |
|-----------|---------------|---|----------------------|--------------|
| 振动 | FFT | 无侵入性,不受其他故障影响,实验验证 | 只针对稳态工况 | [43]、[61] |
| 探测线圈的反电动势 | 归一化探测线圈电压指标 | 不受其他故障影响,适应瞬态工况,实验验证,高度灵敏,高诊断准确率,适用于均匀退磁和不均匀退磁,可以在线检测 | 有侵入性,需要探测线圈 | [45-46]、[62] |
| | HHT | 不受其他故障影响,适应瞬态工况,实验验证 | 一定的计算资源,低诊断速度 | [50]、[63] |
| | CWT+DWT | 适应瞬态工况,实验验证,低成本 | 一定的计算资源,低诊断速度 | [51] |
| | 皮尔逊相关系数 | 无侵入性,无需手工特征提取过程,较少计算资源,适用于均匀退磁和不均匀退磁 | 只针对稳态工况,只有仿真,对异常值不敏感 | [52] |
| 电流 | 灰度图像变换+深度 CNN | 对负载转矩鲁棒性,对速度变化鲁棒性,无侵入性 | 一定的计算资源 | [53] |
| | 带通滤波器 | 信号增强,无侵入性,不受其他故障影响,实验验证 | 只针对稳态工况 | [54] |
| | 小波包变换+CNN | 对速度变化鲁棒性,无侵入性,不受其他故障影响,实验验证,时间频率局部化 | 一定的计算资源 | [55] |
| | 模型法 | 对负载转矩鲁棒性,对速度变化鲁棒性,不受其他故障影响,实验验证 | 一定的计算资源 | [56] |
| 电感 | 信号注入 | 高灵敏度,无侵入性,不受其他故障影响,实验验证,低成本,灵活性 | 操作困难 | [57] |
| | 滑模策略观测器 | 无侵入性,可以在线检测,低成本 | 只针对稳态工况,只有仿真 | [58] |
| 反电动势 | STA-SMLO | 无侵入性,适应瞬态工况,实验验证 | 一定的计算资源,操作困难 | [59]、[64] |
| 多信号 | 迁移学习+VGG 网络 | 无侵入性,不受其他故障影响,实验验证 | 一定的计算资源 | [60] |

能够有效、准确地识别故障,具有良好的工程指导意义。文献[69]提出一种基于 Luenberger 状态观测器的电机匝间短路故障诊断方法,能够评估故障的严重程度,并在故障初期阶段以及各种运行条件下具有良好的鲁棒性。文献[70]提出相位瞬时无功功率(instantaneous reactive power, IRP)的二次谐波百分比作为故障诊断的指标,该指标可以定位匝间短路故障所在相位,不同工作条件下的仿真结果表明,在检测和定位匝间短路故障时,相位 IRP 中二次谐波与其直流分量的百分比比二次谐波振幅更可靠。文献[71]提出基于频谱和双谱分析的 PMSM 定子绕组故障检测方法,各种电机运行条件下的实验结果验证了算法的有效性。文献[72]利用对称电流分量的频谱分析来提取故障特征,基于 KNN 算法来检测和分类 PMSM 定子绕组故障。文献[73]为高频正序和负序电流调节器设置特定的电流基准,将高频电流注入不同的相位绕组,然后提取高频线电压偏差用于绕组状态监测,研究结果

表明,该方法对匝间短路故障具有很高的敏感性。

文献[74]提出一种在线识别匝间短路和电阻性不平衡初期故障的方法,收集零序电压信号,利用零序电压分量(zero-sequence voltage component, ZSVC)来检测 PMSM 的异常状态,然后注入高频信号以判别故障类型。文献[75]通过双绕组的反电动势和阻抗之差来识别故障绕组,实验结果验证了该方法在负载、速度、接触电阻和短路匝数变化的情况下的有效性。

文献[76]提出的故障诊断策略可以消除电流相对增益系数误差,分别利用估计的 d 轴残余电压的八次谐波和二次谐波来定位匝间短路故障,实验结果验证了该方法的有效性。

文献[77]使用一个额外的探测线圈进行匝间短路故障的建模和诊断,为了建立模型,将代表 PMSM 模型电气部分的微分方程使用梯形技术转换成代数类型,并结合非线性磁性方程,利用牛顿-拉弗森方法进行求解,该模型可以有效地对健康和故

障状态的电机进行建模,从而降低模型的计算复杂性。文献[78]通过 FFT 提取与匝间短路故障相关的扭矩频率成分,结果表明,通过利用所提出的扭矩的二次和四次谐波分量,可以轻松检测到初始阶段的匝间短路故障。

文献[79]提出一种信息融合的故障诊断方法,该方法首先根据相电流的基波振幅诊断故障相位,然后根据端电压诊断匝间短路严重程度,具有较高的故障诊断精度。

表4为电机匝间短路故障诊断方法比较。综上所述,对于匝间短路故障的诊断方法,采用电流信号虽然具有非侵入性和高诊断精度的优势,但在转矩和转速变化的情况下可能面临诊断准确率降低的挑战。通过反电动势和阻抗检测退磁故障虽然具有一定鲁棒性,但操作复杂。使用转矩检测方法虽然成本较低且非侵入性,但容易受其他故障类型的影响。在选择适当的方法时,需要综合考虑准确性、成本和适用性等因素。

3 存在的共性问题

虽然现有的电机故障诊断方法达到了较高的

诊断精度和鲁棒性,但是依然存在以下共性问题:

(1) 单一信号应用的局限。故障诊断的多样性需要综合考虑多个信号,整合来自不同传感器的信息或者采用多模态数据融合的方法可能有助于更全面地了解电机的状态。

(2) 实验数据的偏差。实验室环境下获得的故障数据可能与实际工业环境存在差异,更广泛、真实的故障数据集的获取和使用可以提高算法的泛化性。

(3) 数据量不足。数据量不足可能制约深度学习等算法的性能,解决方法包括积累更多实际数据,采用数据增强技术,或考虑半监督学习等方法。

(4) 算法适用性。开发更通用的算法,适用于不同类型和规模的电机,是一个关键问题,通用性的提高可能需要更复杂的模型或更灵活的算法。

(5) 相同频率信号的不同故障难区分。鉴别不同故障可能需要更高分辨率的传感器或更复杂的特征提取技术,以确保能区分相似频率的信号。

(6) 复合故障检测难解耦。在实际应用中,多个故障可能同时存在,需要更先进的算法来进行复合故障检测和分类,提高系统的可靠性。

表4 电机匝间短路故障诊断方法比较

Table 4 Comparison of diagnosis methods for motor interturn short-circuit faults

| 信号 | 诊断方法 | 优势 | 限制 | 参考文献 |
|----------------|-----------------------------------|---|---------------------|--------------|
| 电流 | 多尺度核的残差 CNN | 无侵入性,实验验证,高诊断准确率,简化网络学习 | 一定的计算资源 | [66] |
| | SVM 和 CNN | 无侵入性,实验验证 | 只针对稳态工况,不可解释 | [67]、[80] |
| | 基于迁移学习的 VGG-16 深度 CNN | 无侵入性,实验验证,高诊断准确率 | 一定的计算资源 | [68] |
| | 从 Luenberger 状态观测器生成的残差与频率分量提取相结合 | 无侵入性,初期微小故障诊断能力,高度灵敏 | 只针对稳态工况 | [69] |
| | 谐波分析 | 对负载转矩鲁棒性,对速度变化鲁棒性,无侵入性,实验验证 | 只针对稳态工况 | [70]、[81] |
| | 频谱分析 | 实验验证,低成本 | 只针对稳态工况,有限分辨率 | [71-72]、[82] |
| | 高频电流注入 | 无侵入性,实验验证,高度灵敏 | 对负载转矩无鲁棒性,对速度变化无鲁棒性 | [73] |
| 电压 | ZSVC 中高频分量 | 实验验证,高度灵敏,可以在线检测 | 有侵入性 | [74]、[83-84] |
| <i>d</i> 轴剩余电压 | <i>d</i> 轴残余电压的八次谐波和二次谐波 | 无侵入性,实验验证,高诊断准确率 | 适应瞬态工况 | [76] |
| 反电动势和阻抗 | 模型推导 | 对负载转矩鲁棒性,对速度变化鲁棒性,无侵入性,适应瞬态工况,实验验证 | 操作困难 | [75]、[85] |
| 探测线圈 | 理论推导 | 对负载转矩鲁棒性,对速度变化鲁棒性,适应瞬态工况 | 有侵入性,只有仿真 | [77]、[86] |
| 转矩 | FFT | 频谱分辨率,对负载转矩鲁棒性,对速度变化鲁棒性,无侵入性,实验验证,低成本,高效性 | 受其他故障影响 | [78]、[87] |

(7) 鲁棒性问题。环境和负载条件的不断变化可能对故障检测算法的鲁棒性产生负面影响,改进算法以适应不同工况可能是一个研究方向。

(8) 学习与检测精确度的挑战。对于机器学习算法,降低学习时间并提高检测精确度是一个重要挑战,采用更高效的算法、硬件加速等技术可能有助于解决这个问题。

解决这些问题需要多个领域的专业知识,包括机器学习、电机工程、传感器技术等。未来的研究可能集中在跨学科合作和技术创新上,以推动电机故障诊断领域的进一步发展。

4 总结与展望

文中对当前 PMSM 的多种故障诊断方法的研究进展进行了综述,如轴承故障、气隙偏心故障、退磁故障和匝间短路故障等,详细讨论了这些诊断方法的优势和限制,并指出了故障监测与诊断研究存在的问题,得出未来电机故障诊断技术发展主要有以下几个方向:

(1) 多信号融合技术。多模态数据的融合可以提供更全面的故障信息。未来的研究可以探索如何有效地整合来自振动、电流、温度等多个传感器的数据,以提高故障诊断的准确性和可靠性。

(2) 简化高效的模型。发展更简化、高效、通用的电机故障诊断模型是一个重要方向。这可能涉及到深度学习、机器学习等技术的应用,以建立更精确的模型,并确保其在不同类型的电机和工况下都具有良好的通用性。

(3) 集成化与智能化系统。未来的电机故障诊断系统可能会趋向于更集成、高精度、智能化和网络化。这包括了在设备内部集成故障监测系统,实时处理大量数据,并通过网络传输结果。智能算法和自适应系统可能在这方面发挥关键作用。

(4) 实时监测与预测。未来的研究可以集中于实时监测和预测电机的健康状况。通过结合实时数据和先进的分析技术,可以预测潜在的故障,从而实现预防性维护,减少停机时间。

(5) 大数据与云计算。利用大数据和云计算技术,可以更有效地存储、管理和分析来自多个电机的数据。这有助于建立更强大的模型,提高故障诊断的准确性,并为系统性能提供反馈。

(6) 深度学习的进一步应用。深度学习技术在故障诊断中取得了显著的成就。未来的研究可以进一步探索深度学习在电机故障诊断中的应用,以提高模型的自适应性和智能化水平。

(7) 标准化和可解释性。制定电机故障诊断领域的标准可以促进研究成果的应用。此外,提高算法的可解释性是确保工业界接受和信任这些技术的重要步骤。

这些研究方向旨在促使电机故障诊断领域在未来取得更大的进展,提高系统的健壮性和可靠性。

参考文献:

- [1] 龙丹,唐润忠,吴公平,等. 考虑参数失配的 PMSM 鲁棒无差拍预测电流控制[J]. 电力科学与技术学报,2023,38(4): 113-122,168.
LONG Dan, TANG Runzhong, WU Gongping, et al. Robust deadbeat predictive current control for PMSM considering parameter mismatch[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 113-122, 168.
- [2] 周立,尚治博,周越鹏,等. 永磁同步电机低复杂度双矢量预测电流控制[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(6):63-72.
ZHOU Li, SHANG Zhibo, ZHOU Yuepeng, et al. Low complexity dual-vector predictive current control for permanent magnet synchronous motor[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 63-72.
- [3] 曾小莉,王维庆,王海云. 基于新型电压控制律的永磁同步电机滑模补偿控制[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(10):153-162.
ZENG Xiaoli, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Sliding mode compensation control of a permanent magnet synchronous motor based on a new voltage control law[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 153-162.
- [4] 杜博超. 电动汽车永磁同步电机驱动系统故障诊断与容错技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
DU Bochao. Research on fault diagnosis and fault tolerance for electrical vehicle electrical drive system based on permanent magnet synchronous motor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [5] LANG W J, HU Y H, GONG C, et al. Artificial intelligence-based technique for fault detection and diagnosis of EV motors: a review[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(1): 384-406.
- [6] HE J B, SOMOGYI C, STRANDT A, et al. Diagnosis of stator winding short-circuit faults in an interior permanent magnet synchronous machine [C]//2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Pittsburgh, PA, USA. IEEE, 2014:3125-3130.
- [7] Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, part II [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1985, IA-21(4): 865-872.
- [8] FAIZ J, MAZAHARI T E. Demagnetization modeling and fault diagnosing techniques in permanent magnet machines under stationary and nonstationary conditions: an overview [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2772-2785.
- [9] LI R, WU Z, LI X. Review on fault diagnosis and active fault to-

- lerant control of permanent magnet synchronous motor drive system[J]. *Journal of Applied Science and Engineering*, 2021, 24(2):185-205.
- [10] FAIZ J, NEJADI-KOTI H. Eccentricity fault diagnosis indices for permanent magnet machines: state-of-the-art[J]. *IET Electric Power Applications*, 2019(9):1241-1254.
- [11] GUO X J, CHEN L, SHEN C Q. Hierarchical adaptive deep convolution neural network and its application to bearing fault diagnosis[J]. *Measurement*, 2016, 93:490-502.
- [12] ZHANG W, LI C, PENG G, et al. A deep convolutional neural network with new training methods for bearing fault diagnosis under noisy environment and different working load[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2017, 100:439-453.
- [13] REZIG A, N'DIAYE A, MEKIDECHE M R, et al. Modelling and detection of bearing faults in permanent magnet synchronous motors[C]//2012 International Conference on Electrical Machines. Marseille, France. IEEE, 2012:1778-1782.
- [14] LEE J S, YOON T M, LEE K B. Bearing fault detection of IPMSMs using zoom FFT[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2016, 11(5):1235-1241.
- [15] SURENDRAN R, KHALAF O I, ROMERO C A T. Deep learning based intelligent industrial fault diagnosis model[J]. *Computers, Materials & Continua*, 2022(3):6323-6338.
- [16] JANKOWSKA K, EWERT P. Effectiveness analysis of rolling bearing fault detectors based on self-organising Kohonen neural network-a case study of PMSM drive[J]. *Power Electronics and Drives*, 2021, 6:100-112.
- [17] SHI X F, ZHANG Z, XIA Z L, et al. Application of Teager-Kaiser energy operator in the early fault diagnosis of rolling bearings[J]. *Sensors*. 2022, 22(17):6673.
- [18] MARTINEZHERRERA A L, FERRUCHOALVAREZ E R, LEDESMACARRILLO L M, et al. Multiple fault detection in induction motors through homogeneity and Kurtosis computation[J]. *Energies*, 2022, 15(4):1541.
- [19] LU S L, HE Q B, ZHAO J W. Bearing fault diagnosis of a permanent magnet synchronous motor via a fast and online order analysis method in an embedded system[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 113:36-49.
- [20] GLOWACZ A, TADEUSIEWICZ R, LEGUTKO S, et al. Fault diagnosis of angle grinders and electric impact drills using acoustic signals[J]. *Applied Acoustics*, 2021, 179:108070.
- [21] CHOUDHARY A, GOYAL D, LETHA S S. Infrared thermography-based fault diagnosis of induction motor bearings using machine learning[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(2):1727-1734.
- [22] 张彩华, 张英杰, 李明, 等. 基于改进深度卷积神经网络的轴承故障诊断[J]. *计算技术与自动化*, 2023, 42(3):19-26. ZHANG Caihua, ZHANG Yingjie, LI Ming, et al. Based on improved deep convolutional neural network for bearing fault diagnosis[J]. *Computing Technology and Automation*, 2023, 42(3):19-26.
- [23] 唐良宝, 姜锐红. 基于 FFT 的循环自相关函数算法在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. *轴承*, 2009(9):43-47. TANG Liangbao, JIANG Ruihong. Cyclic autocorrelation function arithmetic based on FFT and its application in rolling bearing fault diagnosis[J]. *Bearing*, 2009(9):43-47.
- [24] 李心一, 谢志江, 罗久飞. 加窗插值快速傅里叶变换在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(10):1166-1172. LI Xinyi, XIE Zhijiang, LUO Jiufei. Applications of windowed interpolation FFT algorithm in rolling bearing fault diagnosis[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(10):1166-1172.
- [25] 夏颖怡. 基于 DT-CWT 的轴承故障诊断方法[J]. *机械设计与制造工程*, 2017, 46(8):106-108. XIA Yingyi. Fault diagnosis method of the bearings based on DT-CWT[J]. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2017, 46(8):106-108.
- [26] 杨铮鑫, 王明罡, 党鹏飞, 等. 基于 VMD-HT 的滚动轴承故障诊断[J]. *机械设计与制造*, 2023(3):15-18. YANG Zhengxin, WANG Minggang, DANG Pengfei, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on feature extraction of VMD-HT[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2023(3):15-18.
- [27] 陈康, 安康, 王骁贤, 等. 基于振动和电流信号深度融合的电动机转速估计及轴承故障诊断[J]. *轴承*, 2023(2):54-60. CHEN Kang, AN Kang, WANG Xiaoxian, et al. Estimation of motor speed and fault diagnosis of bearings based on deep fusion of vibration and current signals[J]. *Bearing*, 2023(2):54-60.
- [28] 王建鑫, 郭佑民, 杨君. 滚动轴承红外热成像故障诊断与状态监测[J]. *红外技术*, 2023, 45(10):1045-1051. WANG Jianxin, GUO Youmin, YANG Jun. Fault diagnosis and status monitoring of rolling bearings using infrared thermal imaging[J]. *Infrared Technology*, 2023, 45(10):1045-1051.
- [29] LIU Y, CHEN Z, HUA X, et al. Effect of rotor eccentricity on the dynamic performance of a traction motor and its support bearings in a locomotive[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2022, 236(9):1080-1090.
- [30] WANG S, LI H F. Analysis of electromagnetic vibration of permanent magnet synchronous motor under static and dynamic eccentricity fault[C]//2021 6th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE). Beijing, China. IEEE, 2021:106-111.
- [31] JAVED M R, SHABBIR Z, ASGHAR F, et al. An efficient fault detection method for induction motors using thermal imaging and machine vision[J]. *Sustainability*, 2022, 14(15):9060.
- [32] BESSOUS N, ZOUZOU S E, SBAA S, et al. New vision about the overlap frequencies in the MCSA-FFT technique to diagnose the eccentricity fault in the induction motors[C]//2017 5th International Conference on Electrical Engineering-Boumerdes (ICEE-B), 2017.

- [33] HEYDARZADEH M, ZAFARANI M, AKIN B, et al. Automatic fault diagnosis in PMSM using adaptive filtering and wavelet transform [C]//Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). IEEE, 2017.
- [34] AKAR M, TASKIN S, SEKER S, et al. Detection of static eccentricity for permanent magnet synchronous motors using the coherence analysis[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 2010, 18(6):963-974.
- [35] MIRIMANI S M, VAHEDI A, MARIGNETTI F, et al. An online method for static eccentricity fault detection in axial flux machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3):1931-1942.
- [36] KANG K, SONG J, KANG C, et al. Real-time detection of the dynamic eccentricity in permanent-magnet synchronous motors by monitoring speed and back EMF induced in an additional winding [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9):7191-7200.
- [37] MA C G, GAO Y J, DEGANI M, et al. Eccentric position diagnosis of static eccentricity fault of external rotor permanent magnet synchronous motor as an in-wheel motor[J]. IET Electric Power Applications, 2020, 14(11):2263-2272.
- [38] MAZZOLETTI M A, GUILLERMO R B, BOSSIO J M, et al. Fault diagnosis in PMSM with partitioned stator windings-part II: interturn short-circuit and static eccentricity [J]. IEEE, 2020;7.
- [39] MAZZOLETTI M A, GUILLERMO R B, BOSSIO J M, et al. Fault diagnosis in PMSM with partitioned stator windings-part I: experimental validation with static eccentricity[J]. IEEE, 2020;7.
- [40] 葛荣亮, 郭立炜, 张梯, 等. 基于幅值恢复法的感应电机特性分析系统[J]. 河北省科学院学报, 2010, 27(3):19-22.
GE Rongliang, GUO Liwei, ZHANG Ti, et al. The characteristic analysis system of the induction motor based on amplitude recovery algorithm [J]. Journal of the Hebei Academy of Sciences, 2010, 27(3):19-22.
- [41] 杭俊, 孙无双, 赖江龙, 等. 基于跨极式探测线圈的双三相永磁同步电机故障诊断方法[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(7):163-173.
HANG Jun, SUN Wushuang, LAI Jianglong, et al. Fault diagnosis method of dual three phase permanent magnet synchronous motor based on transpolar search coil[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(7):163-173.
- [42] 曾冲, 黄嵩, 杨永明. 永磁同步电机定子齿磁通分析与偏心故障在线诊断[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(3):186-194.
ZENG Chong, HUANG Song, YANG Yongming. Tooth flux analysis and eccentricity fault diagnosis for permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(3):186-194.
- [43] YANG Z, SHI X D, KRISHNAMURTHY M. Vibration monitoring of PM synchronous machine with partial demagnetization and inter-turn short circuit faults [C]//2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Dearborn, MI, USA. IEEE, 2014;1-6.
- [44] DA Y, SHI X D, KRISHNAMURTHY M. A new approach to fault diagnostics for permanent magnet synchronous machines using electromagnetic signature analysis [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28:4104-4112.
- [45] CHEN H, GAO C, SI J, et al. A novel method for diagnosing demagnetization fault in PMSM using Toroidal-Yoke-type search coil [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71:7501012.
- [46] RAFAQ M S, LEE H J, PARK Y, et al. Airgap search coil based identification of PM synchronous motor defects [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(7):6551-6560.
- [47] SKOWRON M, ORLOWSKA-KOWALSKA T, KOWALSKI C T. Detection of permanent magnet damage of PMSM drive based on direct analysis of the stator phase currents using convolutional neural network [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12):13665-13675.
- [48] HADDAD R Z, STRANGAS E G. On the accuracy of fault detection and separation in permanent magnet synchronous machines using MCSA/MVSA and LDA [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(3):924-934.
- [49] KRICHEN M, ELBOUCHIKHI E, NAOUREZ B, et al. Motor current signature analysis-based permanent magnet synchronous motor demagnetization characterization and detection [J]. Machines, 2020, 8(3):1-28.
- [50] ESPINOSA A G, ROSERO J A, CUSIDO J, et al. Fault Detection by means of Hilbert-Huang transform of the stator current in a PMSM with demagnetization [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2):312-318.
- [51] RUIZ J R R, ROSERO J A, ESPINOSA A G, et al. Detection of demagnetization faults in permanent-magnet synchronous motors under nonstationary conditions [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(7):2961-2969.
- [52] YU Y Q, GAO H X, CHEN Q P, et al. Demagnetization fault detection and location in PMSM based on correlation coefficient of branch current signals [J]. Energies, 2022, 15(8):2952.
- [53] LI Z Y, WU Q M, YANG S M, et al. Diagnosis of rotor demagnetization and eccentricity faults for IPMSM based on deep CNN and image recognition [J]. Complex & Intelligent Systems, 2022, 8(6):5469-5488.
- [54] KOURA M B, BOUDINAR A H, AIMER A F, et al. Diagnosis and discernment between eccentricity and demagnetization faults in PMSM drives [J]. Journal of Power Electronics, 2021, 21(3):563-573.
- [55] KAO I-Hsi, WANG W J, LAI Y H, et al. Analysis of permanent magnet synchronous motor fault diagnosis based on learning [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(2):310-324.
- [56] MOON S, JEONG H, LEE H, et al. Detection and classification

- of demagnetization and interturn short faults of IPMSMs [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64 (12): 9433-9441.
- [57] KIM I, LEE Y, OH J, et al. Fault detection and classification of permanent magnet synchronous machine using signal injection [J]. Smart Structures and Systems, 2022, 29(6): 785-790.
- [58] ZHANG M Y, XIAO F, SHAO R, et al. Robust fault detection for permanent-magnet synchronous motor via adaptive sliding-mode observer [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020: 9360939.
- [59] ZHAO K H, LENG A J, ZHOU R R, et al. Demagnetization fault reconstruction for six-phase permanent magnet synchronous motor by improved super-twisting algorithm-based sliding-mode observer [J]. Measurement, 2021, 172: 108905.
- [60] ULLAH Z, AHMAD LODHI B, HUR J. Detection and identification of demagnetization and bearing faults in PMSM using transfer learning-based VGG [J]. Energies, 2020, 13 (15): 3834.
- [61] 刘麦, 马艳花. 内置式永磁同步电机退磁仿真建模及特征分析 [J]. 汽车零部件, 2020(12): 25-29.
LIU Mai, MA Yanhua. Demagnetization simulation modeling and characteristic analysis of interior permanent magnet synchronous motor [J]. Automobile Parts, 2020(12): 25-29.
- [62] 高彩霞, 李炳锬, 陈昊, 等. 基于半周反电势残差的永磁同步电机局部退磁故障诊断 [J]. 电机与控制学报, 2023, 27(7): 183-194.
GAO Caixia, LI Bingkun, CHEN Hao, et al. Local demagnetization fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor based on half-period back EMF residual [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(7): 183-194.
- [63] 魏海增, 马宏忠, 陈诚, 等. 基于 CWT-HHT 结合的永磁同步电机失磁故障诊断方法及其可行性分析 [J]. 电机与控制应用, 2017, 44(8): 81-87.
WEI Haizeng, MA Hongzhong, CHEN Cheng, et al. Diagnosis method based on CWT-HHT of demagnetization fault for permanent magnet synchronous motor and analyzing its feasibility [J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(8): 81-87.
- [64] 蒋明康, 郝万君, 刘一凡. 基于改进 STO 的 IPMSM 退磁故障模型预测 MTPA 容错控制 [J]. 机床与液压, 2023, 51(21): 217-224.
JIANG Mingkang, HAO Wanjun, LIU Yifan. IPMSM demagnetization fault model predictive MTPA fault tolerant control based on improved STO [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(21): 217-224.
- [65] 高彩霞. 直驱永磁同步电机故障建模与诊断研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2020.
GAO Caixia. Research on fault model and diagnosis of direct-drive permanent magnet synchronous motor [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2020.
- [66] SONG Q, WANG M, LAI W, et al. Multi-scale Kernel-based residual CNN for estimation of inter-turn short circuit fault in PMSM [J]. Sensors, 2022, 22(18): 6870.
- [67] SHIH K J, HSIEH M F, CHEN B J, et al. Machine learning for inter-turn short-circuit fault diagnosis in permanent magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(8): 8204307.
- [68] HUANGFU H B, ZHOU Y, ZHANG J X, et al. Research on inter-turn short circuit fault diagnosis of electromechanical actuator based on transfer learning and VGG16 [J]. Electronics, 2022, 11(8): 1232.
- [69] MAHMOUDI A, JLASSI I, CARDOSO A J M, et al. Inter-turn short-circuit faults diagnosis in synchronous reluctance machines, using the luenberger state observer and current's second-order harmonic [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(8): 8420-8429.
- [70] HUANG S P, BI Z G, SUN Z J, et al. Detection of stator winding faults in PMSMs based on second harmonics of phase instantaneous reactive powers [J]. Energies, 2022, 15(9): 3248.
- [71] PIETRZAK P, WOLKIEWICZ M. Stator winding fault detection of permanent magnet synchronous motors based on the bispectrum analysis [J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences, 2022, 70(2): 140556.
- [72] WOLKIEWICZ M. On-line detection and classification of PMSM stator winding faults based on stator current symmetrical components analysis and the KNN algorithm [J]. Electronics, 2021, 10(15): 1786.
- [73] XU Z, ZHANG J, ZHANG Y, et al. Winding condition monitoring for inverter-fed PMSM using high-frequency current injection [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021(57-6).
- [74] ZHANG J Z, XU Z, WANG J Y, et al. Detection and discrimination of incipient stator faults for inverter-fed permanent magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8): 7505-7515.
- [75] YANG Y, CHEN Y, HAO W. Online detection of inter-turn short-circuit fault in dual-redundancy permanent magnet synchronous motor [J]. IET Electric Power Applications, 2021, 15(1): 104-113.
- [76] XU Y X, WANG Y R, ZOU J B. An inter-turn short-circuits fault detection strategy considering inverter nonlinearity and current measurement errors for sensorless control of SPMSM [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(11): 11709-11722.
- [77] PEYMAN Naderi. Magnetic-equivalent-circuit approach for inter-turn and demagnetisation faults analysis in surface mounted permanent-magnet synchronous machines using pole specific search-coil technique [J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(7): 916-928.
- [78] LALE Timur, GÜMÜŞ Bilal. A new approach based on electro-mechanical torque for detection of inter-turn fault in permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Power Components and Systems, 2022, 49(18-19): 1499-1511.

- [79] ZHENG Z P, LI Q Q, LI X Y, et al. Analysis and fault-tolerant control of inter-turn short-circuit fault for five-phase permanent-magnet synchronous machine [J]. Energy Reports, 2022(8):7360-7373.
- [80] 赵耀, 陆佳煜, 李东东, 等. 基于机电信号融合的电励磁双凸极电机绕组匝间短路故障诊断[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1):204-219.
ZHAO Yao, LU Jiayu, LI Dongdong, et al. A fault diagnosis strategy for winding inter-turn short-circuit fault in doubly salient electro-magnetic machine based on mechanical and electrical signal fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1):204-219.
- [81] 徐金全, 田新磊, 郭宏. 三冗余永磁同步电机绕组匝间短路故障诊断方法[J]. 航空科学技术, 2023, 34(8):86-94.
XU Jinquan, TIAN Xinlei, GUO Hong. Inter-turn short-circuit fault diagnosis method for triple-redundancy PMSM system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(8):86-94.
- [82] 许允之, 方永丽, 张晓. 基于最小二乘支持向量机和能量频谱分析的电机匝间短路故障诊断[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2013, 40(2):30-33.
XU Yunzhi, FANG Yongli, ZHANG Xiao. The motor fault diagnosis of turn-to-turn short circuit based on LS-SVM and energy spectrum analysis[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2013, 40(2):30-33.
- [83] XU Z, ZHANG J Z, CHENG M. Investigation of signal injection methods for fault detection of PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(3):2207-2216.
- [84] 茅宇, 杨刘, 颜亮亮, 等. 基于VMD的永磁同步电机初期匝间短路故障检测方法[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(9):66-74.
MAO Yu, YANG Liu, YAN Liangliang, et al. Detection method of incipient inter-turn short circuit fault of PMSM based on VMD[J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(9):66-74.
- [85] 程啟华, 盛国良. 无刷直流电动机匝间短路故障检测及识别方法[J]. 微特电机, 2014, 42(2):14-17.
CHENG Qihua, SHENG Guoliang. Detection and recognition on inter turn short-circuit fault of brushless DC motor [J]. Small & Special Electrical Machines, 2014, 42(2):14-17.
- [86] 陈昊, 张楠, 高彩霞, 等. 永磁同步电机匝间短路故障短路线圈定位方法[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(3):124-134.
CHEN Hao, ZHANG Nan, GAO Caixia, et al. Fault coil location approach of permanent magnet synchronous motor with interturn short circuit fault [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(3):124-134.
- [87] 刘志勇, 孙俊, 高海波, 等. 永磁同步电机匝间短路对电机性能影响研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(3):471-475.
LIU Zhiyong, SUN Jun, GAO Haibo, et al. Research on influence of permanent magnet synchronous motor inter-turn short circuit on motor performance [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2019, 43(3):471-475.

作者简介:



马建

马建(1957),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为新能源汽车技术(E-mail:majian@chd.edu.cn);

王建平(1997),男,博士在读,研究方向为电机故障诊断;

孟德安(1989),男,博士,副教授,研究方向为新能源汽车轻量化与智能控制。

Review of fault diagnosis methods for permanent magnet synchronous motors

MA Jian, WANG Jianping, MENG De'an, YAN Liming, GUO Dianxiang
(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) are widely utilized in the field of manufacturing and production due to their notable advantages such as simple structure, stable operation, high efficiency, and diverse configurations. Operating under conditions with variable speeds and load fluctuations, PMSMs inevitably experience various faults, including bearing faults, eccentricity faults, demagnetization faults, and interturn short-circuit faults. An overview of common fault types in PMSMs is provided in this paper and the existing researches on signal-based condition monitoring methods in the field of automation for the detection and diagnosis of electrical and mechanical faults are summarized. Subsequently, diagnostic methods are summarized, and their strengths and limitations are analyzed, discussing the pros and cons of different signal processing approaches in application. Finally, considering the current state of research, the challenges and future directions in the monitoring and diagnosis of PMSM faults are discussed.

Keywords: permanent magnet synchronous motor (PMSM); bearing faults; eccentricity faults; demagnetization faults; interturn short-circuit faults; fault diagnosis

(编辑 方晶)