

基于单相训练的匝间短路故障跨相迁移 诊断方法研究

李争国*, 张志锋, 李东霖

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Research on Cross-Phase Migration Diagnosis Method for Inter-Turn Short-Circuit Faults Based on Single-Phase Training

Li Zhengguo*, Zhang Zhifeng, Li Donglin

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: [Objective] Inter-turn short-circuit faults are a common and latent early-stage failures in circuit and motor drive systems. Although the underlying physical mechanisms of such faults are essentially identical across different phases, significant discrepancies in data distributions arise due to phase shifts and measurement conditions, which limits the cross-phase applicability of data-driven diagnostic methods. This paper proposes a unified diagnosis method for inter-turn short-circuit faults in different phases under limited annotation conditions. [Methods] The phase-to-phase difference was regarded as a specific form of data distribution shift, so the core criterion for inter-turn short-circuit was independent of the specific phase. Based on this, a feasible method was proposed in this paper from the perspective of cross-phase transfer, which utilized only single-phase inter-turn short-circuit fault data for model training and directly applied it to fault diagnosis of other phases. This method achieved multi-phase inter-turn short-circuit fault identification under single-phase training conditions by constructing a physically consistent feature representation and employing a unified lightweight diagnostic model. [Results] The results indicated that, without the introduction of complex transfer structures or additional labeled data, the proposed method demonstrated high diagnostic accuracy on the training phase and maintained

stable performance in different phase-to-phase inter-turn short-circuit fault diagnosis tasks, significantly enhancing the cross-phase generalization ability of fault diagnosis.

[Conclusion] This study provides a concise and effective solution for reducing the dependence of the inter-turn short-circuit fault diagnosis model on multi-phase labeled data and enhancing the model's generalizability in practical engineering scenarios, thus possessing high engineering practical value.

Key words: inter-turn short-circuit fault; cross-phase transfer; single-phase training; fault diagnosis; circuit systems

摘要: [目的]匝间短路故障是电路系统及电机驱动系统中常见且隐蔽的早期故障类型,不同相故障在物理机理上具有一致性,但受相位差异与测量条件影响,其数据分布存在显著差异,给数据驱动诊断方法的跨相应用带来挑战。本文提出一种在有限标注条件下实现不同相匝间短路故障的统一诊断方法。[方法]将相别差异视为一种特定形式的数据分布偏移,因此匝间短路的核心判据与具体相位无关。基于此,本文从跨相迁移的角度出发,提出一种仅利用单一相匝间短路故障数据进行模型训练,并将其直接应用于其他相故障诊断的可行性方法。该方法通过构建具有物理一致性的特征表示,并采用统一的轻量化诊断模型,以此实现单相训练条件下的多相匝间短路故障识别。[结果]结果表明,在不引入复杂迁移结构和额外标注数据的前提下,所提出的方法在训练相上具有较高诊断精度,并能够在不同相匝间短路故障诊断任务中保持稳定性能,显著提升了故障诊断的跨相泛化能力。[结论]该研究为降低匝间短路故障诊断模型对多相标注数据的依赖、提升模型在实际工程场景中的可推广性提供了一种简洁而有效的解决思路,具有较高

基金项目: 国家自然科学基金(62506241);辽宁省教育厅公共关系重点项目(LJ212410142079);辽宁省博士科研启动基金项目(2024-BS-097)

National Natural Science Foundation of China (62506241); Key Public Relations Project of Liaoning Provincial Education Department (LJ212410142079); Liaoning Provincial Doctoral Research Foundation Project (2024-BS-097)

的工程实用价值。

关键词: 匝间短路故障; 跨相迁移; 单相训练; 故障诊断; 电路系统

0 引言

匝间短路故障是电路系统及电机驱动系统中最为常见且危害性较高的一类早期故障形式^[1-2]。该类故障通常由绝缘老化、热应力或机械振动等因素引起, 初期表现为局部匝间短接, 外部症状不明显^[3-4], 但会导致相电流不对称、铜耗和局部温升显著增加^[5-6], 若不能及时识别, 极易进一步演化为相间短路或绕组烧毁, 从而造成系统停机甚至设备损坏^[7-8]。因此, 实现匝间短路故障的早期、可靠诊断在工程应用中具有重要意义^[9-10]。

从物理机理上看, 不同相(如 A/B/C 相或 U/V/W 相)的匝间短路故障具有高度一致的本质特征^[11-12], 其对系统的影响主要体现在电流分布失衡、磁链扰动以及特征频谱成分的变化等方面^[13-14]。然而, 在实际测量数据中, 由于相位差异、信号通道配置以及控制策略的影响, 不同相的短路故障在时域波形和统计特征上往往呈现出明显差异^[15-16]。这种“物理一致而数据分布不一致”的特性, 使得基于数据驱动的故障诊断模型在跨相应用时面临显著挑战^[17-18]。

尽管理想情况下六相电流具有对称性与固定电角度差, 理论上各相故障特征可通过相位旋转建立映射, 但在实际驱动与测量系统中, 该对称性往往受到诸多因素影响而被削弱, 例如不同电流传感器通道增益/偏置差异、采样不同步与噪声特性差异、逆变器死区与 PWM 调制引入的非理想谐波分量, 以及匝间短路导致的负序增强与谐波能量重分配等。这些因素会使不同相别故障样本在统计分布与特征空间上呈现明显差异, 从而造成“源相训练、目标相性能下降”的跨相失配问题。与此同时, 工业场景中故障样本采集代价高且标注困难, 往往只能获得单一相或少量相别的标注数据, 而实际部署需要覆盖任意相别故障。因此, 在上述约束下构建具有跨相鲁棒性的诊断方法具有明确的工程必要性与应用价值。

现有研究多采用针对各相分别建模或混合多相数据统一训练的方式来实现匝间短路故障诊

断^[19-20]。前者需要为每一相单独采集并标注大量故障样本, 模型复用性较差, 工程成本较高^[21-22]; 后者虽然在一定程度上提升了模型的泛化能力, 但仍然依赖多相故障数据的充分覆盖, 在实际运行中难以满足数据获取条件^[23-24]。尤其是在工业现场, 某些相的故障样本往往难以获取, 导致模型训练受限^[25-26]。因此, 如何在有限标注条件下实现不同相匝间短路故障的统一诊断, 仍然是一个亟需解决的问题。

将相别差异可视为一种特定形式的数据分布偏移, 因此匝间短路的核心判据与具体相位无关。基于上述背景, 本文从跨相迁移的角度出发, 提出一种仅利用单一相匝间短路故障数据进行模型训练, 并将其直接应用于其他相故障诊断的可行性方法。该方法通过构建具有物理一致性的特征表示, 并采用统一的轻量化诊断模型, 以此实现单相训练条件下的多相匝间短路故障识别。

需要说明的是, 本文所述的跨相迁移并非传统迁移学习意义上的领域自适应或迁移分类问题。迁移学习中的领域自适应通常假设可访问目标域数据, 并通过分布对齐、对抗学习等方式缩小源域与目标域差异; 而本文关注的任务更贴近于单相监督条件下的跨相泛化: 仅利用源相(如 A 相)的标注样本训练诊断模型, 在不依赖目标相训练数据的前提下, 要求模型能够在 B/C/U/V/W 等任意相别故障中保持稳定识别性能。

1 跨相迁移诊断方法

1.1 理论分析

为直观说明跨相故障诊断的复杂性, 首先对不同相匝间短路故障条件下的原始六相电流波形进行对比, 如图 1 所示。由图 1 可知, 在相同采样设置与相近工况下, 不同相发生匝间短路时, 电流波形的畸变形态、幅值分布及不对称程度均存在明显差异^[27], 且故障相的畸变会通过耦合影响其他相的波形形态。由图 1 还可知, 虽然匝间短路在不同相中的物理机理具有一致性, 但测量信号在数据层面呈现出显著的分布差异^[28]。若直接采用单相训练模型而不进行针对性处理, 往往会导致跨相泛化性能下降^[29-30]。因此, 构建能够弱化相别差异影响的诊断方法具有必要性。

针对匝间短路故障在不同相之间物理机理一

致但数据分布存在差异的问题^[31-32],本文将跨相故障诊断建模为一种基于单相监督训练的迁移识别任务。将六相电流信号表示为

$$\mathbf{i}(t) = [i_a(t), i_b(t), i_c(t), \dots]^T \quad (1)$$

式中: $i_a(t)$ 为A相电流信号; $i_b(t)$ 为B相电流信号; $i_c(t)$ 为C相电流信号。

其中仅某一相(如A相)对应的样本集合 $D_s = \{(i_s, y_s)\}$ 具有故障标签 $y_s \in \{0, 1\}$, 其余相数据 $D_s = \{i_t\}$ 在训练阶段不参与监督。

基于单相训练的匝间短路故障跨相迁移诊断方法的框架图如图2所示,主要包括信号采集、相位无关特征构建、特征提取与故障判别等三个步

骤。模型先要学习一个映射函数,即:

$$f(\cdot): \mathbf{i}(t) \rightarrow y \quad (2)$$

模型学习映射函数后,在仅使用源相数据进行训练的条件下,得以实现对其他相匝间短路故障的直接诊断,而无需重新训练或调整模型参数。在该建模思路中,不同相之间的差异不被视为新的故障类型,而被视为由相位旋转、信号通道映射及工况扰动引起的数据分布偏移。基于这一认识,本文的核心目标并非增强模型复杂度,而是通过合理的特征构建与统一的诊断模型,使模型网络重点关注匝间短路引起的本质不对称特征,从而弱化相别差异对诊断结果的影响。

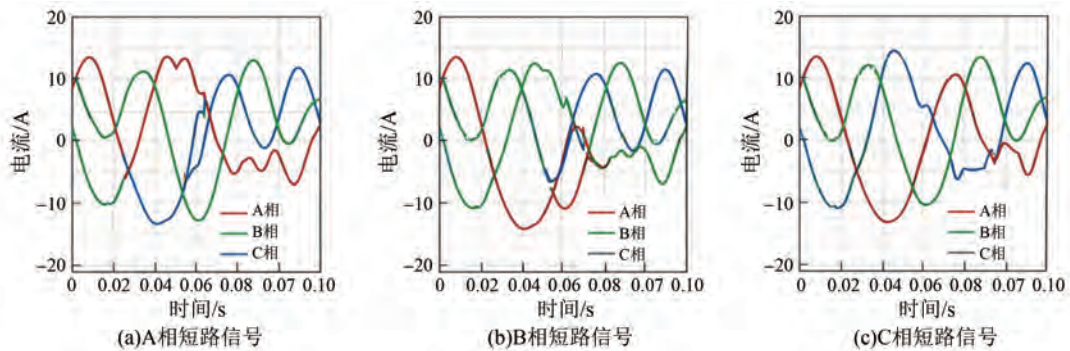


图1 不同相匝间短路的原始信号对比图

Fig. 1 Comparison charts of the original signals of inter-turn short-circuit in different phases

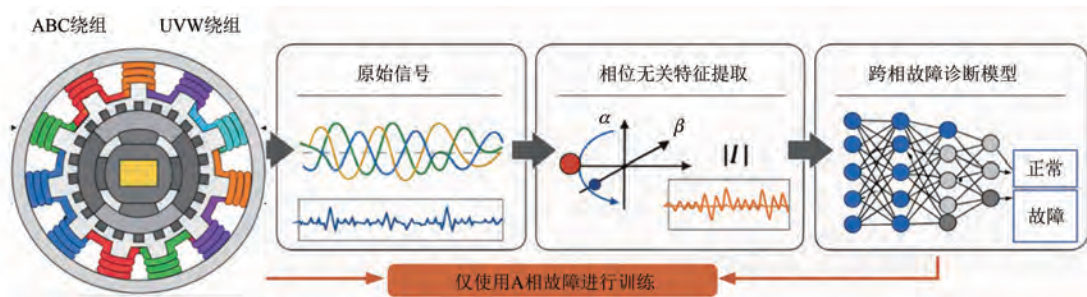


图2 基于单相训练的匝间短路故障跨相迁移诊断方法框架图

Fig. 2 Framework diagram of inter-turn short-circuit fault cross-phase migration diagnosis method based on single-phase training

1.2 相位无关特征构建

为提升模型在不同相匝间短路故障中的泛化能力,本文在特征层面引入相位无关的物理表示,以减少不同相之间的分布差异。具体而言,基于采集到的六相电流信号,通过坐标变换将其映射至静止参考系,从而构建对相位旋转不敏感的特征形式。

首先,对六相电流信号进行 Clarke 变换,得

到 α - β 坐标系下的电流分量^[33]。该变换能够将六相不平衡特性统一表征为二维向量形式,有效减弱具体相序对信号表达的影响^[23]。图3为不同相匝间短路条件下的 α - β 电流轨迹对比图,图3(a)为A相短路的 α - β 轨迹,图3(b)为B/C相短路的 α - β 轨迹。由图3可知,尽管短路相别不同导致原始六相信号在时域表现存在差异,但在 α - β 平面中轨迹形态保持较强的一致性(如椭圆

形轨迹的偏移与畸变趋势相近), 这表明 Clarke 变换能够在一定程度上消除相位旋转带来的影响。因此, 采用 α - β 平面特征作为跨相诊断输入具有合理性和数据一致性基础。

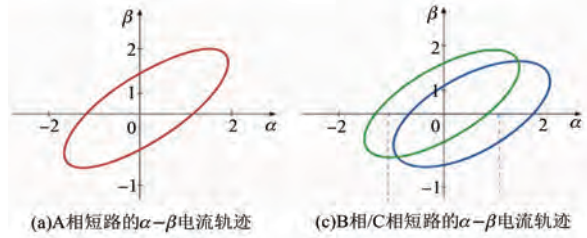


图 3 相位无关特征的可视化示意

Fig. 3 Visual representation of phase-independent features

进一步对 Clarke 变换前后的跨相故障特征一致性进行量化评估。分别以原始六相电流 $[i_a(t), i_b(t), i_c(t)]$ 与变换后的静止坐标系电流 $[i_\alpha(t), i_\beta(t)]$ 及幅值特征 $r(t)$ 为对象, 构建不同故障相 (A/B/C/U/V/W) 之间的跨相相似度指标。考虑到故障波形存在非线性时移与尺度变化, 本文从形态一致性和分布一致性两方面引入以下三类度量。

(1) 归一化动态时间规整距离 D_{DTW} 用于衡量波形形态差异:

$$D_{DTW}(x, y) = \frac{D_{TW}(x, y)}{\sqrt{\|x\|_2 \cdot \|y\|_2}} \quad (3)$$

式中: x, y 为不同相故障下的特征序列, 数值越小表示形态越一致。

(2) 最大均值差异 M_{MD} 用于衡量特征分布差异:

$$M_{MD}^2(X, Y) = \left\| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi(x_i) - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \varphi(y_j) \right\|_2^2 \quad (4)$$

式中: $\varphi(\cdot)$ 为核映射函数, 数值越小表示跨相分布差异越小。

(3) 皮尔逊相关系数 ρ 用于衡量整体相关性 (其值越接近 1 表示一致性越强):

$$\rho(x, y) = \frac{\text{Cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (5)$$

式中: $\text{Cov}(x, y)$ 为 x 和 y 的协方差; σ_x 和 σ_y 分别为 x 和 y 的标准差。

表 1 给出了典型跨相迁移任务 (以 A 相训练为源域, 迁移至其他相) 下的量化结果。可以观察到, Clarke 变换后特征在不同相之间的 D_{DTW} 与 M_{MD} 显著降低, 同时相关系数 ρ 明显提升, 说明 Clarke 变换确实能够削弱相别引起的表征差异, 为后续跨相故障诊断提供更加一致且稳定的输入空间。

表 1 Clarke 变换前后跨相故障特征一致性量化对比 (A→其他相)

Tab. 1 Quantitative comparison of cross-phase fault feature consistency before and after Clarke transformation (A → other phase)

| 特征形式 | 指标 | A→B | A→C | A→U | A→V | A→W | 平均 |
|----------------------------------|--------------|------|------|------|------|------|------|
| 原始六相 $[i_a, i_b, i_c]$ | D_{DTW} 下降 | 0.34 | 0.37 | 0.33 | 0.39 | 0.36 | 0.36 |
| | M_{MD} 下降 | 0.21 | 0.24 | 0.20 | 0.26 | 0.23 | 0.23 |
| | ρ 上升 | 0.74 | 0.71 | 0.76 | 0.69 | 0.72 | 0.72 |
| Clarke 变换后 $[i_\alpha, i_\beta]$ | D_{DTW} 下降 | 0.19 | 0.21 | 0.18 | 0.22 | 0.20 | 0.20 |
| | M_{MD} 下降 | 0.10 | 0.12 | 0.09 | 0.13 | 0.11 | 0.11 |
| | ρ 上升 | 0.88 | 0.86 | 0.89 | 0.85 | 0.87 | 0.87 |
| 幅值特征 $r(t)$ | D_{DTW} 下降 | 0.12 | 0.13 | 0.11 | 0.14 | 0.13 | 0.13 |
| | M_{MD} 下降 | 0.06 | 0.07 | 0.05 | 0.08 | 0.07 | 0.07 |
| | ρ 上升 | 0.93 | 0.92 | 0.94 | 0.91 | 0.92 | 0.92 |

在此基础上, 进一步计算电流矢量的幅值特征:

$$I(t) = \sqrt{i_\alpha^2(t) + i_\beta^2(t)} \quad (6)$$

该特征能够反映匝间短路引起的整体能量波

动与不对称效应。由于其与相位旋转无关, 在不同相发生匝间短路时具有较好的一致性, 因此适合作为跨相诊断的关键输入特征。

需要指出的是, 匝间短路引发的跨相差异并

非仅由单一相位偏移造成,其本质是短路回路中的环流与磁链耦合导致六相电流产生不对称分量与谐波重分配。为更完整地刻画匝间短路的物理特征变化规律,进一步引入对称分量分解,将六相电流表示为零序、正序与负序分量:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}, a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (7)$$

式中: I_0 、 I_1 、 I_2 分别表示零序、正序与负序电流分量。

进一步定义零序和负序相对强度指标:

$$K_0 = \frac{|I_0|}{|I_1|}, K_2 = \frac{|I_2|}{|I_1|} \quad (8)$$

在正常状态下,六相系统趋于平衡, K_0 与 K_2 通常接近于 0。而当发生匝间短路时,局部短路支路产生附加电流通路,使得负序分量显著增强(K_2 上升),并伴随幅值调制现象,使得电流包络与能量分布发生变化。

此外,匝间短路还会导致频域特征发生可观变化,主要表现为基波能量下降与低次谐波增强。采用快速傅里叶变换计算特征序列的频谱,并以总谐波畸变 T_{HD} 衡量谐波变化趋势:

$$T_{HD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^k A_k^2}}{A_1} \quad (9)$$

式中: A_1 为基波幅值; A_k 为第 k 次谐波幅值。

在故障试验中可观察到,故障状态下 T_{HD} 呈上升趋势,反映出匝间短路不仅改变相位关系,还会同时引发幅值与频率维度的系统性变化。上述变化在 α - β 平面上通常表现为电流轨迹由近圆形向椭圆形扭曲、轨迹厚度增加等现象,从而进一步解释了 Clarke 变换后特征具有更强跨相一致性的原因。

此外,为兼顾故障局部细节信息,本文在相位无关特征之外,保留原始六相绕组电流信号的时序特征输入,构成联合特征表示:

$$z(t) = [i(t), I(t)] \quad (10)$$

通过这种方式,既避免了完全依赖手工特征可能带来的信息损失,又有效降低了相别差异对模型训练的干扰。

1.3 特征提取与跨相故障判别模型

在特征提取与分类阶段,本文采用统一的轻

量化神经网络结构完成匝间短路故障判别。设输入特征序列为 $z(t)$,网络通过多层一维卷积与非线性映射提取高层特征表示:

$$h = F(z, \theta) \quad (11)$$

式中: $F(\cdot)$ 为特征提取网络; θ 为可学习参数。

随后,特征向量 h 通过分类器输出故障预测结果:

$$\hat{y} = \sigma(\mathbf{W}h + b) \quad (12)$$

式中: $\sigma(\cdot)$ 为 Sigmoid 激活函数; \mathbf{W} 为权重向量; b 为偏置项; $\hat{y} \in [0, 1]$ 表示发生匝间短路故障的概率。

本文所用故障诊断模型为轻量化一维卷积神经网络,用于对输入电流序列特征进行二分类判别(正常/匝间短路)。网络结构由“卷积特征提取骨干+分类头”组成:首先输入为相位无关特征序列;随后依次通过若干个一维卷积模块进行特征提取,每个卷积模块包含 Conv1D+BatchNorm+ReLU,并在模块间采用 MaxPooling1D 实现降采样与抗噪增强;最后将特征展平后输入全连接层,并通过 Sigmoid 输出故障概率。该结构仅包含少量卷积层与参数量较小的分类头,适合在线部署场景。

模型训练阶段仅使用单一相的故障与正常样本进行监督学习,通过最小化二分类交叉熵损失函数使模型学习匝间短路与正常状态之间的判别边界。在训练过程中,不引入相别标签信息,模型输出仅对应故障状态,从而避免网络在特征空间中对具体相别形成依赖。

训练完成后,模型直接应用于其他相的数据,实现跨相匝间短路故障诊断。该建模方式不依赖复杂的迁移结构或额外的目标相标注数据,而是通过相位无关特征与统一判别模型的协同作用,使网络能够聚焦于匝间短路的共性特征。试验结果将进一步验证该方法在不同相匝间短路故障诊断任务中的有效性与稳定性。

2 试验设计与结果分析

2.1 数据与设置

受限于当前试验条件,本文在此研究阶段暂未开展实物试验验证,仅通过 Simulink 仿真完成算法有效性与可行性的核心验证。数据来源于搭建的电路系统匝间短路故障仿真平台,涵盖正常

工况及不同相的匝间短路故障状态。本文考虑的故障类型包括 A/B/C 相(或 U/V/W 相)匝间短路,其中仅在单一相引入匝间短接,其余相保持正常状态。采集信号主要为六相电流信号,采样频率保持一致,以保证不同相数据在时间分辨率上的可比性。仿真选用等幅值变换,对整个模型进行解耦,相关的电机参数见表 2。

表 2 六相电机参数表

| 参数名称 | 参数值 |
|-------------------------------------|-------|
| 极对数 | 3 |
| 直轴电感/mH | 8 |
| 自感/mH | 1.7 |
| 定子电阻/ Ω | 1.4 |
| 转子磁链/Wb | 0.68 |
| 转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$) | 0.015 |
| 摩擦因数 | 0 |

仿真预设的转速与负载条件下转速为 300 r/min(以及不同工况的 400 r/min),负载为 5 N·m(以及 7 N·m),驱动采用脉宽调制,六相电流以采样频率 10 kHz 进行同步采集,每种工况与故障类型均连续采集若干秒以保证样本数量充足。

数据构建采用滑动窗口分割策略,为抑制幅值尺度差异与噪声影响,对每段信号执行归一化预处理。在评估协议上,遵循单相监督的跨相迁移设定:仅使用源相(A相)标注样本训练模型,其余相别样本仅用于测试,从而更真实地模拟工程场景中目标相缺乏标注的情况。

在后续模型设计中,仅选取某一相(以 A 相为例)的数据作为有标注训练集,其余相的数据全部作为测试集使用,不参与模型训练过程。该设置严格模拟了工程中仅掌握某一相故障样本的实际场景,用于验证模型的跨相迁移能力。所有样本均按固定长度进行分段处理,并进行归一化操作,以减少量纲差异对模型训练的影响。本文训练与测试数据均来源于仿真平台采集的六相定子电流信号,包括正常状态与匝间短路故障状态,且覆盖不同故障相别。

评价指标选用分类准确率、召回率以及准确率和召回率的调和平均数,以综合衡量模型在不同相匝间短路诊断任务中的性能表现。

2.2 单相训练性能验证

首先评估所提出模型在训练相(A相)上的诊断性能,以验证模型是否能够有效学习匝间短路的基本判别特征。模型在 A 相测试集上的分类结果见表 3。

表 3 A 相匝间短路诊断性能

| 指标 | 准确率 | 调和平均数 | 召回率 |
|-----|------|-------|------|
| A 相 | 98.6 | 98.4 | 98.9 |

可以看出,模型在训练相上的诊断准确率和调和平均数均接近 99%,表明所构建的特征表示与分类模型能够有效区分正常状态与匝间短路故障,为后续跨相迁移试验提供了可靠的基础。

2.3 跨相匝间短路诊断结果

在不对模型进行任何重新训练或参数调整的情况下,将基于 A 相训练得到的模型直接应用于其他相的匝间短路故障诊断。表 4 汇总了模型在不同相测试集上的诊断结果。

表 4 单相训练模型的跨相诊断性能

| 测试相别 | 准确率 | 调和平均数 | 召回率 |
|------|------|-------|------|
| B 相 | 95.2 | 94.7 | 95.9 |
| C 相 | 94.6 | 94.1 | 95.0 |
| U 相 | 95.8 | 95.3 | 96.4 |
| V 相 | 94.9 | 94.5 | 95.2 |
| W 相 | 95.4 | 95.0 | 96.1 |

图 4 和图 5 分别为跨相诊断结果的柱状图与雷达图。由图 4~图 5 可知,尽管模型仅使用 A 相数据进行训练,但在其余各相的匝间短路诊断中仍保持了较高的识别性能。相比训练相,跨相测试的准确率存在一定下降,但整体降幅控制在 3%~4% 以内,且调和平均数与召回率指标保持稳定,说明模型并未对具体相别形成显著依赖。

需要指出的是,不同相之间的诊断性能存在轻微差异,这主要与相位分布、测量噪声水平以及各相在试验系统中的耦合特性有关。然而,该差异并未导致模型失效,表明本文所提方法具有较好的跨相鲁棒性。

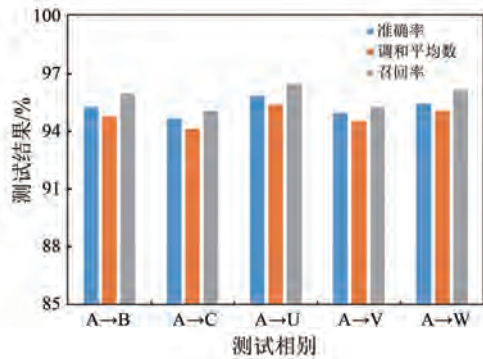


图4 跨相诊断结果的柱状图

Fig.4 The bar chart of the cross-phase diagnosis results

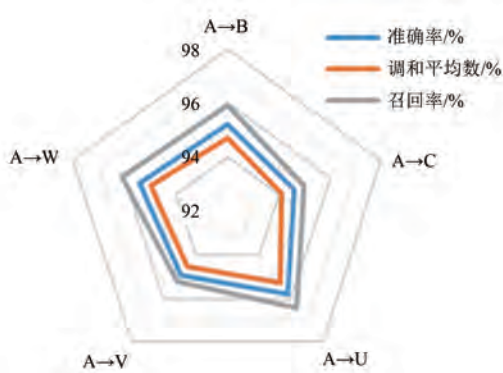


图5 跨相诊断结果的雷达图

Fig.5 The radar chart of the cross-phase diagnosis results

2.4 对比试验与结果分析

为进一步验证所提出方法在跨相诊断任务中的有效性,本文选取两种对比方法进行试验分析:方法一,基于原始单相信号训练的模型,不引入相位无关特征;方法二,混合多相数据训练的模型,即将所有相的数据共同用于训练,对比试验结果见表5。

表6 不同运行工况下的跨相迁移性能对比(训练相:A相)

Tab.6 Comparison of phase-to-phase migration performance under different operating conditions (training phase: A phase)

| 训练工况 → 测试工况 | A→B | A→C | A→U | A→V | A→W | 平均 |
|---|------|------|------|------|------|------|
| 工况1 (n_1, L_1) → 工况1 (n_1, L_1) | 95.6 | 95.1 | 96.2 | 94.7 | 95.0 | 95.3 |
| 工况1 (n_1, L_1) → 工况2 (n_2, L_2) | 94.0 | 93.4 | 94.6 | 92.8 | 93.2 | 93.6 |

2.5 模型复杂度分析

除识别精度外,工程部署还需考虑模型参数规模与推理开销。为此,本文进一步对不同诊断模型的复杂度进行量化对比,结果见表7。

表5 不同方法的跨相诊断性能对比(正确率)

Tab.5 Comparison of cross-phase diagnostic performance of different methods (accuracy)

| 方法 | A→A | A→B | A→C | A→U | A→V | A→W |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 方法一 | 90.2 | 88.3 | 87.6 | 89.1 | 87.9 | 88.5 |
| 方法二 | 97.6 | 96.4 | 96.1 | 96.9 | 96.0 | 96.6 |
| 本文方法 | 98.9 | 95.2 | 94.6 | 95.8 | 94.9 | 95.4 |

由表5可知,仅基于原始单相信号训练的模型在跨相测试中性能显著下降,表明其对相别差异较为敏感,泛化能力有限。多相混合训练模型虽然取得了最优的诊断性能,但其前提是能够获取所有相的故障样本,在实际工程应用中往往难以实现。

相比之下,本文方法在仅使用单相标注数据的前提下,实现了与多相混合训练模型接近的诊断性能,且显著优于不加处理的单相模型。这一结果充分说明,通过构建相位无关特征并采用统一的判别模型,可以有效缓解相别差异带来的影响,从而在低标注成本条件下实现可靠的跨相匝间短路故障诊断。

为进一步评估本文方法在不同运行工况下的鲁棒性,我们在原始工况(n_1, L_1)之外新增另一组转速与负载组合(n_2, L_2),并在训练工况固定、测试工况变化的条件下评估其跨相迁移性能。其中 $n_1 = 300 \text{ r/min}, L_1 = 5 \text{ N} \cdot \text{m}, n_2 = 400 \text{ r/min}, L_2 = 7 \text{ N} \cdot \text{m}$,试验结果见表6。由表6可知,当测试工况发生变化时,各目标相的识别准确率仅出现有限下降,平均准确率仍保持在93%以上,说明本文方法不仅能够缓解跨相差异,还对工况变化具有一定适应能力。

由表7可知,本文模型在保持跨相诊断精度的同时,参数量与计算量显著低于深层残差网络与时序模型,说明所提相位无关特征构建,能够有效降低模型对复杂结构的依赖,从而具备更好的

实时性与工程部署潜力。

表 7 不同诊断模型的复杂度对比

Tab. 7 Comparison of complexity among different diagnostic models

| 诊断模型 | Params/M | FLOPs/G | Latency/ms |
|---------------------|----------|---------|------------|
| BiLSTM | 0.31 | 6.8 | 1.95 |
| CNN-LSTM | 0.56 | 10.4 | 2.60 |
| ResNet-18 | 1.17 | 18.9 | 3.40 |
| Transformer-Encoder | 2.06 | 22.7 | 4.10 |
| 本文轻量化模型 | 0.08 | 2.1 | 0.52 |

2.6 工程化实现路径讨论

本文方法可直接嵌入现有电机驱动与状态监测系统,实现在线故障诊断与预警。工程实现流程为:在驱动器/采集卡处同步获取六相定子电流信号,通过滑动窗口实时构造输入样本;对每个窗口在线完成 Clarke 变换与幅值特征计算,得到相位无关表征后输入轻量化一维卷积分类器,输出故障概率。当故障概率连续多个窗口超过阈值时触发告警,从而降低瞬时噪声导致的误报。

由于本文模型结构轻量、特征计算仅涉及基础线性变换与简单运算,整体推理开销低,可部署在工控机或边缘端设备上实现实时运行。诊断结果(故障概率、告警时间戳等)可进一步上传至上位机或监控平台,用于可视化展示与运维决策。尤其在仅能获取单一相标注数据的场景下,本文方法可避免对各相分别采集与训练的高成本需求,具备较好的工程推广价值。

3 结语

本文针对匝间短路故障在不同相之间物理机理一致但数据分布存在差异的问题,研究了一种基于单相训练的跨相故障诊断方法。通过构建与相位无关的特征表示,并采用统一的轻量化诊断模型,实现了仅利用单相标注数据对多相匝间短路故障的有效识别。

试验结果表明,所提出的方法在训练相上具有较高的诊断精度,同时在其他相的匝间短路诊断任务中也保持了稳定的性能表现。与传统基于原始单相信号的诊断模型相比,该方法显著提升了跨相泛化能力;而与多相混合训练方法相比,该方法则在大幅降低数据标注成本的前提下取得了

接近的诊断效果。

综上所述,本文方法在无需复杂迁移结构和额外标注数据的条件下,实现了匝间短路故障的跨相诊断,具有良好的工程实用性和推广价值。未来研究可进一步考虑不同工况、负载变化以及故障程度差异对跨相诊断性能的影响,并探索该方法在其他不对称故障类型中的应用潜力。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

李争国进行了方案设计、内容总结与论文撰写,李东霖进行了模型研究,张志锋参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and paper writing were carried out by Li Zhengguo. The model research was conducted by Li Donglin. The manuscript was revised by Zhang Zhifeng. All authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献

- [1] 张官祥, 程建, 李利华, 等. 异步电机匝间短路故障诊断方法综述[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 2025, 47(2): 68-86.
Zhang G X, Cheng J, Li L H, et al. Review of diagnosis methods for interturn short circuit of asynchronous motor [J]. Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition), 2025, 47(2): 68-86.
- [2] 马杰, 都业林, 金涛, 等. 动车组牵引电机匝间短路故障诊断方法研究[J]. 铁道机车车辆, 2025, 45(1): 144-151.
Ma J, Du Y L, Jin T, et al. Research on fault diagnosis method of interturn short circuit for EMU traction motor [J]. Railway Locomotive & Car, 2025, 45(1): 144-151.
- [3] 朱瑞雨, 崔江. 一种航空发电机电枢绕组匝间短路故障诊断技术[J]. 电机与控制应用, 2025, 52

- (1): 22-35.
- Zhu R Y, Cui J. A fault diagnosis technique for interturn short circuit of aircraft generator armature winding [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(1): 22-35.
- [4] 宋君健, 徐文婧, 高宏洋, 等. 永磁同步电机定子匝间短路故障诊断技术研究[J]. *微特电机*, 2025, 53(11): 31-35.
- Song J J, Xu W J, Gao H Y, et al. Research on stator interturn short circuit fault diagnosis technology for permanent magnet synchronous motor[J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2025, 53(11): 31-35.
- [5] Zheng Z, Li Q, Li X, 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.
- [6] Hao Y, Zhang Z, Xiao J, et al. Study on thermal characteristics of winding under inter-turn fault of oil-immersed transformer [J]. *Electronics*, 2024, 13(14): 2869.
- [7] Zheng X, Xian R, Wang L, et al. Online identification method for inter-turn short-circuit fault of grounding transformer winding and phase distinction[J]. *Measurement*, 2025, 256: 118367.
- [8] 韦金国. 基于 QPSO-LSSVM 模型的变压器匝间短路故障诊断[J]. *黑龙江科学*, 2025, 16(8): 34-37.
- Wei J G. Transformer interturn short circuit fault diagnosis based on QPSO-LSSVM model [J]. *Heilongjiang Science*, 2025, 16(8): 34-37.
- [9] 潘景宜, 张旭, 晏佳胜, 等. 基于 GA-SVM 的 DR-PMSM 匝间短路故障诊断方法研究[J]. *微电机*, 2025, 58(2): 14-20.
- Pan J Y, Zhang X, Yan J S, et al. Research on interturn short circuit fault diagnosis method for DR-PMSM based on GA-SVM[J]. *Micromotors*, 2025, 58(2): 14-20.
- [10] 李俊卿, 李忠徽, 全宗义. 基于信息融合的双馈风机定子匝间短路故障诊断[J]. *电机与控制应用*, 2017, 44(8): 99-103.
- Li J Q, Li Z H, Tong Z Y. Stator interturn short circuit fault diagnosis of DFIG based on information fusion[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2017, 44(8): 99-103.
- [11] 常九健, 黄睿, 丁宇浩. 基于改进 CGAN-CNN 的电机匝间短路故障诊断研究[J]. *汽车工程学报*, 2025, 15(6): 980-989.
- Chang J J, Huang R, Ding Y H. Research on motor interturn short circuit fault diagnosis based on improved CGAN-CNN [J]. *Chinese Journal of Automotive Engineering*, 2025, 15(6): 980-989.
- [12] 孙士涛, 雷雨, 卢毅, 等. 基于端口频域特性的水轮发电机转子绕组匝间短路故障诊断[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(4): 77-84.
- Sun S T, Lei Y, Lu Y, et al. Fault diagnosis of rotor winding interturn short circuit in hydro-generator based on port frequency domain characteristics [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(4): 77-84.
- [13] Lan P, Yao L, Lu Y, et al. A multi-task causal knowledge fault diagnosis method for PMSM-ITSF based on meta-learning[J]. *Sensors*, 2025, 25(4): 1271.
- [14] Li J, Zhang C, He Y, et al. Impact of inter-turn short circuit in excitation windings on magnetic field and stator current of synchronous condenser under unbalanced voltage[J]. *Energies*, 2023, 16(15): 5695.
- [15] 李俊卿, 余长亮, 何玉灵, 等. 考虑电压不平衡下的同步发电机定子匝间短路故障诊断[J]. *电机与控制学报*, 2025, 29(8): 10-18.
- Li J Q, Yu C L, He Y L, et al. Stator interturn short circuit fault diagnosis of synchronous generator considering voltage unbalance[J]. *Electric Machines and Control*, 2025, 29(8): 10-18.
- [16] 王艳斌, 崔栋栋, 杨晓波, 等. 电机定子匝间短路故障诊断系统研究[J]. *现代制造技术与装备*, 2024, 60(8): 162-164.
- Wang Y B, Cui D D, Yang X B, et al. Research on fault diagnosis system for motor stator interturn short circuit [J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2024, 60(8): 162-164.
- [17] 陈众, 伍雅娜, 冷鹏, 等. 异步电机定子绕组匝间短路故障诊断研究[J]. *电机与控制应用*, 2019, 46(5): 120-125.
- Chen Z, Wu Y N, Leng P, et al. Study on stator winding interturn short circuit fault diagnosis of asynchronous motor[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(5): 120-125.
- [18] 孙西宁, 鲍超凡. 基于改进支持向量机的变压器绕组匝间短路故障诊断方法[J]. *机电技术*, 2025

- (2): 36-40.
- Sun X N, Bao C F. Transformer winding interturn short circuit fault diagnosis method based on improved support vector machine[J]. *Mechanical & Electrical Technology*, 2025(2): 36-40.
- [19] Wang X, Zhou J, Qin J, et al. Stator inter-turn short-circuit fault diagnosis of induction motor based on characteristic current [C]//2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Hefei, China, 2023.
- [20] 吴振宇, 王慧, 胡存刚, 等. 基于多路漏磁信号阵列的无刷直流电机匝间短路故障诊断[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(4): 1105-1116.
- Wu Z Y, Wang H, Hu C G, et al. Interturn short circuit fault diagnosis for brushless DC motor based on multi-channel leakage flux signal array [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(4): 1105-1116.
- [21] 李俊卿, 李忠徽, 仝宗义. 基于支持向量机和 D-S 证据理论的双馈风机定子匝间短路故障诊断[J]. *电机与控制应用*, 2018, 45(5): 99-103.
- Li J Q, Li Z H, Tong Z Y. Stator interturn short circuit fault diagnosis of DFIG based on support vector machine and D-S evidence theory[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2018, 45(5): 99-103.
- [22] 蒋梦瑶, 马宏忠, 陈滇斐, 等. 同步调相机定子绕组匝间短路故障诊断[J]. *电机与控制学报*, 2021, 25(7): 75-86.
- Jiang M Y, Ma H Z, Chen Z F, et al. Stator winding interturn short circuit fault diagnosis for synchronous condenser[J]. *Electric Machines and Control*, 2021, 25(7): 75-86.
- [23] Bai W, Zhou X, Wang Y, et al. Vibration analysis of the electric drive system with inter-turn short-circuit and gear spalling faults [J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2023, 11(8): 3595-3605.
- [24] Dongare U V, Umre B S, Ballal M S, et al. Online inter-turn fault detection in wound rotor induction motors based on VI loci pattern [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2023, 60(1): 411-425.
- [25] 谢方, 蒋玫, 黄文琦, 等. 基于改进卷积神经网络的曳引电机匝间短路故障诊断[J]. *中国测试*, 2025, 51(10): 174-181.
- Xie F, Jiang M, Huang W Q, et al. Fault diagnosis of interturn short circuit for traction motor based on improved convolutional neural network [J]. *China Measurement & Test*, 2025, 51(10): 174-181.
- [26] 付朝阳, 刘景林, 张晓旭. 双余度永磁无刷直流电机匝间短路故障诊断[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(1): 104-109.
- Fu C Y, Liu J L, Zhang X X. Interturn short circuit fault diagnosis for dual-redundancy permanent magnet brushless DC motor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(1): 104-109.
- [27] 李昂, 王彤, 张健. 电机定子匝间短路故障诊断方法研究[J]. *水电与新能源*, 2024, 38(4): 22-25.
- Li A, Wang T, Zhang J. Research on fault diagnosis method of motor stator interturn short circuit [J]. *Hydropower and New Energy*, 2024, 38(4): 22-25.
- [28] He Y L, Qiu M H, Jiang M Y, et al. Stator current identification in generator among single and composite faults composed by static air - gap eccentricity and rotor inter - turn short circuit [J]. *IET Electric Power Applications*, 2023, 17(2): 268-278.
- [29] 李欣蔚. 基于 RBF 神经网络的永磁同步电机匝间短路故障诊断方法[J]. *科技创新与应用*, 2025, 15(14): 26-30.
- Li X W. Interturn short circuit fault diagnosis method for permanent magnet synchronous motor based on RBF neural network[J]. *Technology Innovation and Application*, 2025, 15(14): 26-30.
- [30] 刘进, 王莉, 张丹旭. 发电机转子绕组匝间短路故障诊断研究[J]. *自动化仪表*, 2013, 34(10): 13-16.
- Liu J, Wang L, Zhang D X. Research on fault diagnosis of generator rotor winding interturn short circuit [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2013, 34(10): 13-16.
- [31] 陈滇斐, 凌志豪, 李志新, 等. 基于参数优化 VMD 和多尺度模糊熵的星-三角接法 FS-PMM 匝间短路故障诊断方法[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(6): 31-43.
- Chen Z F, Ling Z H, Li Z X, et al. Interturn short circuit fault diagnosis method for star-delta connection FS-PMM based on parameter-optimized VMD and multiscale fuzzy entropy [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(6): 31-43.
- [32] 张玉良, 马宏忠, 蒋梦瑶, 等. 基于 DST 的调相机

转子轻微匝间短路故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2023, 43(2): 355-362.

Zhang Y L, Ma H Z, Jiang M Y, et al. Slight interturn short circuit fault diagnosis of condenser rotor based on DST [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2023, 43(2): 355-362.

[33] 高彩霞, 冯凌云, 党建军. 基于双级 PNN 的直驱永磁同步电机匝间短路故障诊断方法[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2025, 44(2): 116-127.

Gao C X, Feng L Y, Dang J J. Interturn short circuit fault diagnosis method for direct-drive permanent magnet synchronous motor based on two-stage PNN [J]. Journal of Henan Polytechnic University

(Natural Science), 2025, 44(2): 116-127.

收稿日期:2025-12-25

收到修改稿日期:2026-01-28

作者简介:

* 通信作者:李争国(2000—),男,硕士研究生,研究方向为双六相永磁同步电机控制方法及故障诊断, 13469110054@163.com;

张志锋(1981—),男,博士,教授,研究方向为低空飞行器电推进系统和电动汽车电驱动系统等,zzf_sut@126.com。