

DOI: 10.13382/j.jemi.B2307079

改进麻雀搜索算法在 PMSM 匝间短路中应用研究*

李斌 杨润 舒洋

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院 葫芦岛 125105)

摘要:针对麻雀搜索算法(SSA)存在收敛精度低和易陷入局部最优等问题,提出了一种改进麻雀搜索算法(ISSA),并应用于PMSM匝间短路故障诊断。首先,搭建了PMSM匝间短路仿真模型,模拟了不同短路匝数比的故障。其次,对故障进行分析,提取了3个故障识别特征量。接着,利用实验平台进行不同短路匝数比的故障测试。然后,介绍了麻雀搜索算法(SSA),并利用Tent混沌映射、自适应正弦策略和Levy飞行策略对其进行优化,生成改进麻雀搜索算法(ISSA),同时将ISSA算法与SSA算法、粒子群算法(PSO)、灰狼算法(GWO)在测试函数上进行比较,验证其在寻优能力和稳定性等方面具有优越性。紧接着,介绍了随机森林(RF)算法,并搭建了ISSA-RF的故障诊断模型。最后,将4种算法分别对RF的基本参数进行优化并实现故障分类。结果表明,所提出的改进方法能够检测出匝间短路故障及其故障严重程度,ISSA-RF模型的准确率达到98.5%,验证了该算法的有效性和可靠性。

关键词:永磁同步电机;匝间短路;随机森林;改进麻雀搜索算法;故障诊断

中图分类号: TM307; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Application of improved sparrow search algorithm in PMSM inter-turn short-circuit

Li Bin Yang Run Shu Yang

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: Aiming at the problems of low convergence accuracy and local optimality in sparrow search algorithm (SSA), an improved sparrow search algorithm (ISSA) is proposed and applied to the diagnosis of inter-turn short-circuit fault in PMSM. Firstly, the PMSM inter-turn short-circuit simulation model is built to simulate the fault of different short-circuit turns ratio. Secondly, the fault is analyzed, and three fault recognition features are extracted. Then, the experiment platform is used to test the fault of different short-circuit turns ratio. Then, the sparrow search algorithm (SSA) is introduced and optimized by using Tent chaotic mapping, adaptive sine-cosine strategy and Levy flight strategy to generate an improved sparrow search algorithm (ISSA). Meanwhile, ISSA algorithm is compared with SSA algorithm, particle swarm optimization algorithm (PSO) and grey wolf optimization (GWO) on the test function. It is proved that it has advantages in optimization ability and stability. Then, the random forest (RF) algorithm is introduced, and the fault diagnosis model of ISSA-RF is built. Finally, four algorithms are used to optimize the basic parameters of RF and achieve fault classification. The results show that the proposed improved method can detect the inter-turn short-circuit fault and its severity, and the accuracy of ISSA-RF model reaches 98.5%, which verifies the effectiveness and reliability of the algorithm.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; inter-turn short-circuit; random forest; improved sparrow search algorithm; fault diagnosis

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor,

PMSM)具有体积小和效率高等优点,广泛应用于电动汽车和航空航天等领域中^[1-3]。在复杂的工况下,PMSM会出现各种类型的故障,其故障主要分为机械故障和电气故障^[4-5]。

收稿日期: 2023-11-27 Received Date: 2023-11-27

* 基金项目: 国家自然科学基金(51674136, 52104160)项目资助

PMSM 的匝间短路故障是最常见的电气故障,同时也是最早期的相内绕组故障,若放任匝间短路故障不管,则会导致更严重的故障^[6],所以需要一系列方法实现对匝间短路故障的检测。目前已经有很多相关的故障诊断研究,文献[7]用小波包变换处理定子电流和电机的振动信号,通过故障电机和正常电机相比较,发现故障时电机定子电流的基波和三次谐波频谱幅值增大,振动信号的四次谐波和八次谐波分量增多,提出将二者故障特征融合进行故障诊断,并验证了该方法的可行性。文献[8]通过仿真实验得到电机发生匝间短路故障时产生负序电压的临界值,然后对电机运行时的负序电压进行检测,通过与临界值进行比较,从而判断永磁同步电机是否发生匝间短路故障,但是负序电压受转速等因素的影响,所以需要对电机做大量的实验来获取不同转速下电机发生匝间短路故障时产生负序电压的临界值。虽然现在已经提出了许多方法来检测 PMSM 的匝间短路故障,但是大多数是找到一种特征对该故障进行识别,并且不能区分故障程度。

针对这一问题,提出了一种基于改进麻雀搜索算法(improved sparrow search algorithm, ISSA)^[9]优化随机森林(random forest, RF)的方法进行 PMSM 匝间短路故障诊断。首先,利用 Ansys Electronics Desktop 软件建立了永磁同步电机匝间短路故障下的有限元仿真模型,得到了不同故障程度下的定子电流信号,并对其正常运行情况下和发生匝间短路故障情况下的运行情况进行了分析,提取了故障相电流的频域特征、负序阻抗和负序阻抗故障系数 3 个故障特征识别量。紧接着,介绍了相关的实验平台,利用实验所得的三相定子电流数据与仿真所得的三相定子电流数据进行分析比较,进一步说明所设置的 3 个不同短路匝数比(0.05、0.125、0.25)能够反映不同故障程度的匝间短路故障。然后,提出了麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA),利用 Tent 混沌映射、自适应正余弦策略和 Levy 飞行策略进行了改进,生成 ISSA 算法,紧接着,将 ISSA 算法与 SSA 算法、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)和灰狼算法(grey wolf optimization, GWO)在测试函数上进行比较^[10],验证了 ISSA 算法具有良好的收敛性与稳定性。最后,介绍了 RF 算法,并构建了 ISSA-RF、SSA-RF、GWO-RF、PSO-RF 这 4 个匝间短路的故障诊断模型,应用于 PMSM 匝间短路故障程度诊断,进一步验证该算法的优越性。

1 PMSM 匝间短路故障建模

有限元法是先研究对象通过网格划分成若干个互相关联的小单元,每个小单元都用近似的有限元函数进行表示,定义好边界,将系统整体的求解域变成在每个小

单元里面进行求解,然后再将各个小单元的解整合起来得到整个系统的解,这一过程实现了无穷自由度向有限自由度的互相转化。

随着信息技术和仿真技术的迅速发展,有限元法已经被广泛应用到许多领域,在电气领域中,较为常见的就是用来处理电磁计算,或用来处理瞬态分析问题以及非线性问题。在建立电机的故障模型时,采用有限元法进行分析能够考虑更多的电机物理细节以及系统的非线性影响。

选用 ANSYS Electronics Desktop 软件对永磁同步电机进行有限元建模,其模型和主要参数分别如图 1 和表 1 所示。

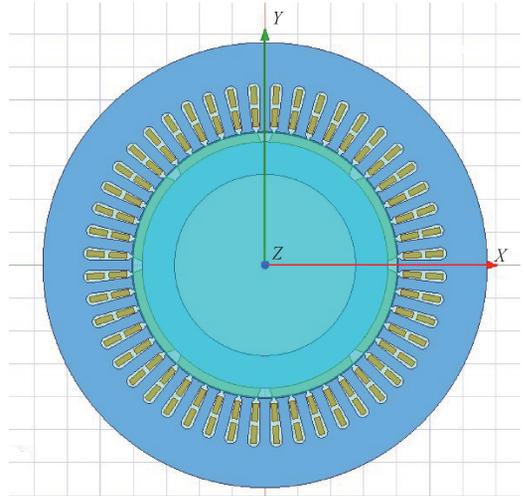


图 1 PMSM Maxwell 2D 模型

Fig. 1 Maxwell 2D-model of PMSM

表 1 电机主要参数

Table 1 Main parameters of motor

参数名称	参数值
额定电压	200 V
额定转速	750 rad/min
磁极对数	4
定子槽数	48
定子电阻	0.346 Ω
定子电感	7.8 mH
转动惯量	0.089 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
永磁体材料	NdFe35
定子内径	162 mm
定子外径	270 mm
转子内径	110 mm
转子外径	160.4 mm

在图 1 模型基础上进行修改,以实现匝间短路故障的模拟和分析,将 PMSM Maxwell 2 D 模型中三相电流的输入设置为外部电路激励,以 A 相发生匝间短路故障为例,通过 ANSYS Electronics Desktop 软件对 PMSM 匝间短路故障绕组和非故障相绕组进行外电路的搭建,其仿真电路图如图 2 和 3 所示。

图 2 中设置了一个定时闭合的开关 S_16,当该开关

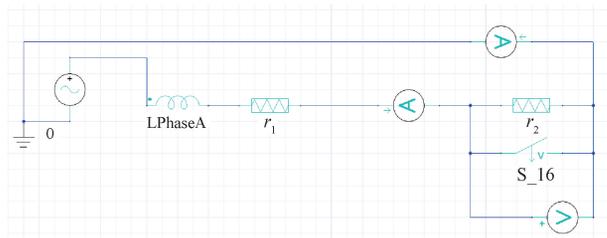


图 2 A 相外电路

Fig. 2 A-phase external circuit

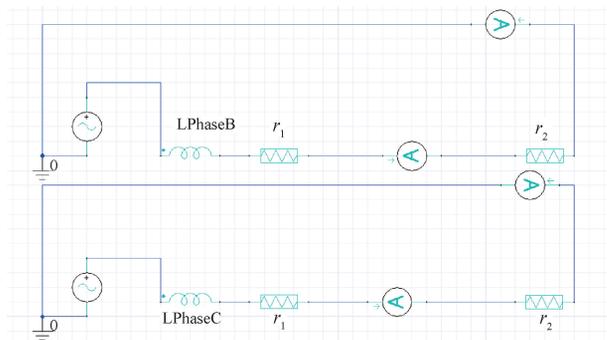


图 3 B 相和 C 相外电路

Fig. 3 B-phase and C-phase external circuits

断开时 A 相是正常状态, PMSM 三相对称运行, 当 S_16 闭合时, A 相就发生了绕组内的匝间短路故障, 以此方法实现对电机的匝间短路故障的模拟, 通过改变短路部分电阻占相电阻的比值来模拟不同故障程度的匝间短路故障, 并分别按照短路匝数比为 0.05、0.125、0.25 搭建了 3 种故障程度的 PMSM 模型, 为后续的匝间短路故障特征分析以及故障程度特征分析奠定基础。

2 PMSM 匝间短路故障特征分析

2.1 匝间短路故障仿真分析

运行第 1 节中搭建的仿真模型, 得到 PMSM 正常运行的三相电流如图 4 所示。

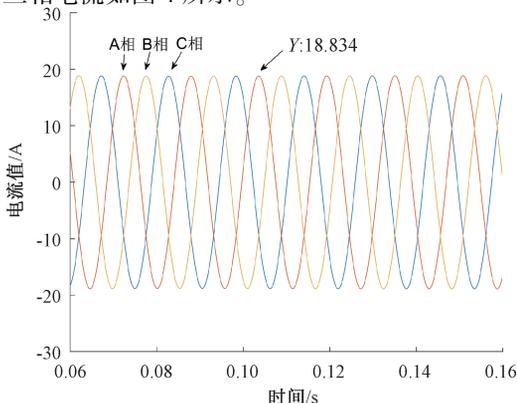
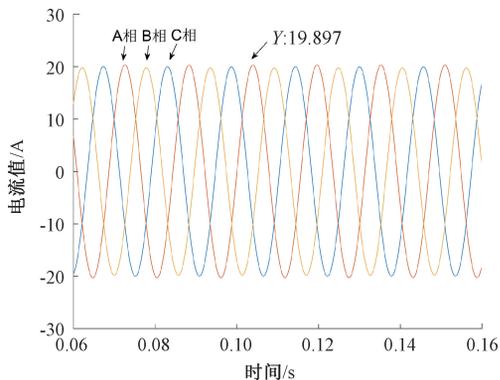


图 4 正常运行的三相电流图

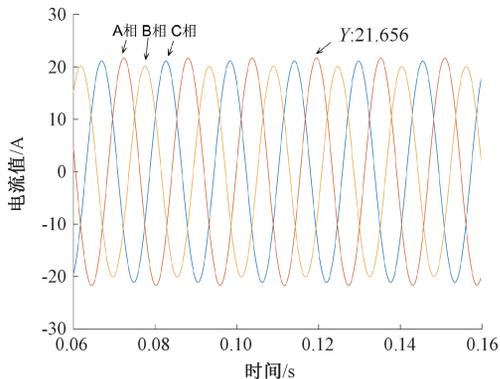
Fig. 4 Three-phase current diagram in normal operation

图 4 是正常运行时的三相电流图。其中, A 相电流峰值为 18.834 A, 波形平稳。当电机发生匝间短路故障之后(短路匝数比分别为 0.05、0.125、0.25), 电机的三相电流波形如图 5 所示。



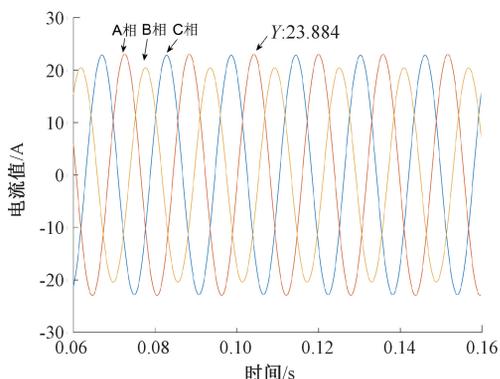
(a) 短路匝数比为 0.05 的三相电流图

(a) Three-phase current diagram with short-circuit turns ratio of 0.05



(b) 短路匝数比为 0.125 的三相电流图

(b) Three-phase current diagram with short-circuit turns ratio of 0.125



(c) 短路匝数比为 0.25 的三相电流图

(c) Three-phase current diagram with short-circuit turns ratio of 0.25

图 5 不同短路匝数比的三相电流图

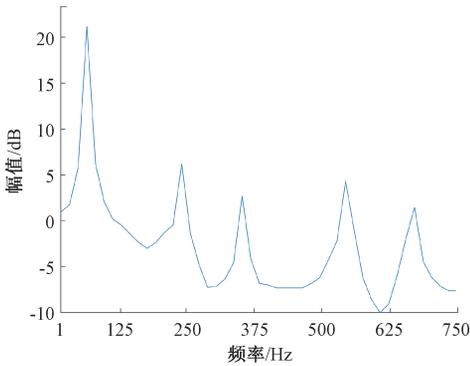
Fig. 5 Three-phase current diagram of different short-circuit turns ratio

从图 5(a)、(b)、(c) 可以看出, 三相电流的不平衡度和幅值增大程度与匝间短路的严重程度相关。当短路

匝数比为 0.05 时, A 相电流峰值变为 19.897 A, 与正常运行情况下的 A 相电流峰值相比增长了 5.64%, 此时相当于电机出现匝间短路故障的初期, 电流变化不是很明显; 当短路匝数比为 0.125 时, A 相电流峰值为 21.656 A, 与正常运行情况下的 A 相电流峰值相比增长了 14.98%, 此时相当于电机出现匝间短路故障的中期, 电流变化较为明显; 当短路匝数比为 0.25 时, A 相电流峰值为 23.884 A, 与正常运行情况下的 A 相电流峰值相比增长了 26.81%, 此时相当于电机出现匝间短路故障的严重期, 电流变化非常明显。

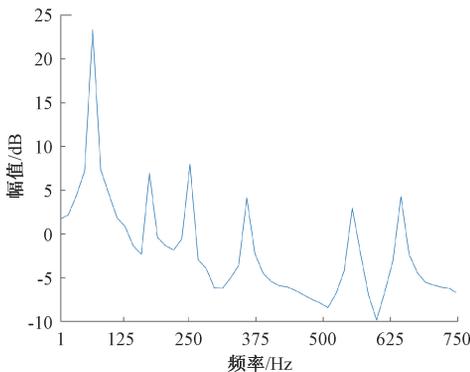
2.2 故障相电流的频域分析

通过图 4 和 5 的分析对比可以看出, 匝间短路故障会造成电流波形的畸变, 因此频域上也应该有所变化^[11]。文献[12]利用小波算法去除信号中的噪声。文献[13]利用连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)进行降噪并且对信号进行频域分析并提取其频域特征, 说明 CWT 对于信号的特征提取适用性很高。利用 CWT 方法对永磁同步电机正常运行状态和短路匝数比为 0.125 状态的 A 相电流进行频域分析, 转换之后得到频谱包络图和时频图如图 6 和 7 所示。



(a) 无故障电流频谱包络图

(a) Spectrum envelope diagram of trouble-free current

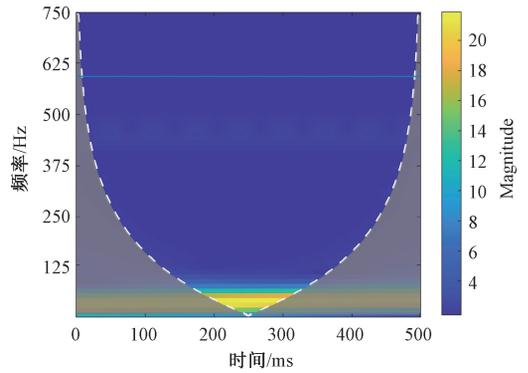


(b) 故障电流频谱包络图

(b) Spectrum envelope diagram of fault current

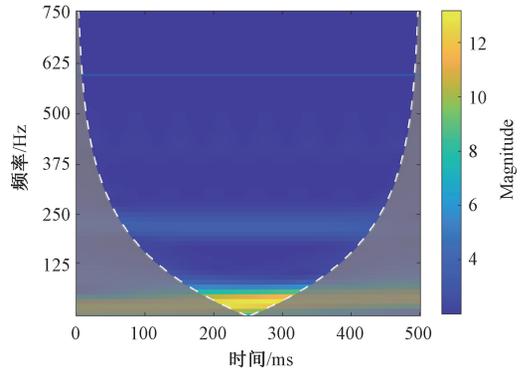
图 6 频谱包络图

Fig. 6 Spectrum envelope diagram



(a) 无故障电流时频图

(a) Trouble-free current time-frequency diagram



(b) 故障电流时频图

(b) Time-frequency diagram of fault current

图 7 时频图

Fig. 7 Time-frequency diagram

从图 6 可以看出, 当电机发生匝间短路故障时故障相电流在频域的 149.8 Hz 即 3 倍频处的变化比较大, 442.9 Hz 即 9 倍频处故障时频率分量的幅值相对增大, 538.9 Hz 即 11 倍频处故障时频率分量的幅值相对减小。图 7 为 CWT 转换得到的时频图, 从中可以看出在 3 倍频附近的能量相较于无故障时明显增大, 其能量分布规则并且和频谱图一致, 说明能够很好地刻画出信号时间和频率的局部信息。把不同短路匝数比的 PMSM 定子故障相电流进行 CWT 变换, 结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出在不同故障程度下 3 倍频和 9 倍频处的幅值都增大了, 只是幅值变化的大小不同, 在 11 倍频处的变化不太明显。这与文献[14]发现当永磁同步电机发生匝间短路故障时故障相电流频谱中 3 次和 9 次谐波幅值增大的这一结论一致, 说明 CWT 已经将频域特征提取出来, 因此可以将故障相电流频谱中 3 次和 9 次谐波作为电机发生匝间短路故障诊断的一个特征。导致电流频域产生此类变化的原因不止匝间短路故障一种, 所以不能单独作为故障特征对匝间短路故障进行识别, 也不能对故障程度进行识别, 因此需要配合其他特征一起进行诊断。

表 2 不同故障程度下的倍频幅值

Table 2 Frequency amplitudes under different fault degrees

故障程度	频谱幅值		
	3 倍频	9 倍频	11 倍频
无故障	-3.82 dB	-7.93 dB	4.33 dB
$\eta = 0.05$	2.99 dB	-7.21 dB	4.34 dB
$\eta = 0.125$	6.58 dB	-6.48 dB	4.36 dB
$\eta = 0.25$	11.87 dB	-2.67 dB	3.81 dB

2.3 负序分量分析

电机通常中性点不接地,因此没有零序分量,在电机正常运行时三相电流应该是三相对称的,因此负序分量几乎为 0,只包含正序列分量。发生匝间短路故障之后三相电流不平衡,导致出现负序列分量增加,因此负序电流是检测 PMSM 电机故障的一个常用特征。

通过有限元仿真得到的电流数据进行计算得到 PMSM 不同健康状态下的负序电流幅值如表 3 所示。

表 3 不同转速和不同故障程度负序电流幅值

Table 3 Negative sequence current amplitudes of different speeds and different fault degrees

故障程度	转速/(r·min ⁻¹)			
	100	300	500	750
无故障	0.022 7	0.044 5	0.076 2	0.093 8
$\eta = 0.05$	0.375 8	0.544 8	0.694 5	0.932 8
$\eta = 0.125$	0.896 7	1.143 6	1.387 5	1.636 2
$\eta = 0.25$	1.832 9	2.125 8	2.368 7	2.668 4

由表 3 可以看出,无故障时也有很小的负序电流,故障程度越大,负序电流幅值越大,但是转速的提升也会导致负序电流幅值增大。图 8 以 $\eta = 0.05$ 的情况为例,显示了负序电流幅值随转速变化情况,也进一步表明了这一因素会干扰对故障诊断的可靠性。

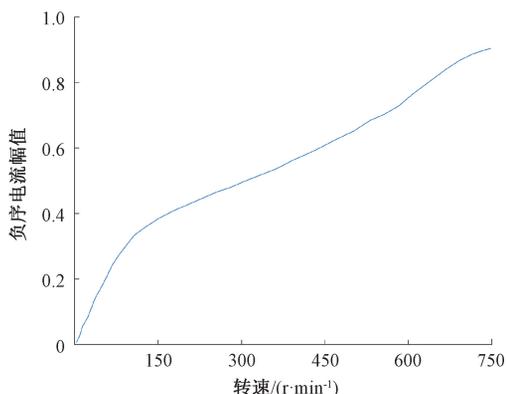


图 8 负序电流值随转速变化

Fig. 8 Negative sequence current value with speed change

响较小,通过图 9 可以观察当电机转速发生改变时,对负序阻抗产生的影响。

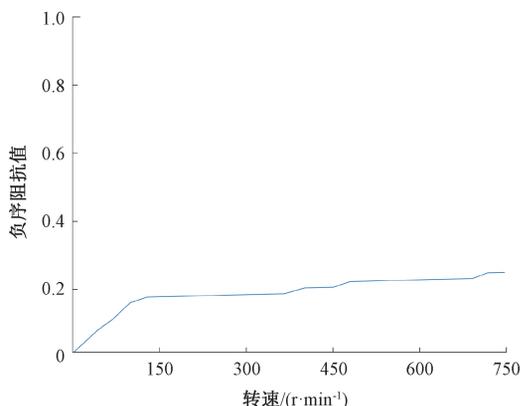


图 9 负序阻抗值随转速变化

Fig. 9 Negative sequence impedance value with speed change

图 9 是以 $\eta = 0.05$ 的情况为例,显示了负序阻抗随转速变化的情况,可以看出转速增大并不会导致负序阻抗大幅增加。因此可以利用负序阻抗继续进行分析,计算出不同故障程度下的负序阻抗如表 4 所示。

表 4 不同转速和不同故障程度下的负序阻抗值

Table 4 Negative sequence impedance values at different speeds and different fault degrees

故障程度	转速/(r·min ⁻¹)			
	100	300	500	750
无故障	3.077 6	3.108 5	3.114 5	3.152 6
$\eta = 0.05$	0.183 5	0.192 8	0.206 5	0.217 8
$\eta = 0.125$	0.105 8	0.117 2	0.121 4	0.128 9
$\eta = 0.25$	0.023 5	0.024 8	0.031 0	0.039 6

从表 4 可以看出,发生匝间短路故障之后负序阻抗的数值明显减小。匝间短路故障越严重,负序阻抗的数值越小,而且不同故障程度下的负序阻抗相差较大,并且受转速影响较小,综上分析,可以将负序阻抗作为诊断是否发生匝间短路故障的特征之一。

2.4 负序阻抗系数分析

根据不同故障程度时负序阻抗的变化趋势,本节定义一个负序阻抗故障系数,其计算公式如式(1)所示。

$$D = \frac{Z_{RE-} - Z_{f-}}{Z_{f-}} \quad (1)$$

式中: Z_{RE-} 为无故障时电机的负序阻抗, Z_{f-} 为故障时电机的负序阻抗。无故障时负序阻抗一般比故障时的负序阻抗大,当发生匝间短路故障之后,负序阻抗会减小,随着故障程度的增大负序阻抗值也继续减小,则式(1)的分子就会随着故障程度变大,分母就会随着故障程度变小,负序阻抗故障系数数值就会变大,这个负序阻抗故障系

外部电源不平衡和外部因素的变化对负序阻抗的影

数通过分子分母的同时变化提高了诊断故障的灵敏度,通过设置阈值,与负序阻抗故障系数作比较,进而实现对匝间短路故障程度的检测。

3 实验与结果分析

3.1 实验平台设计

由永磁同步电机、三相电源、电流互感器、示波器所组成的实验平台如图 10 所示。

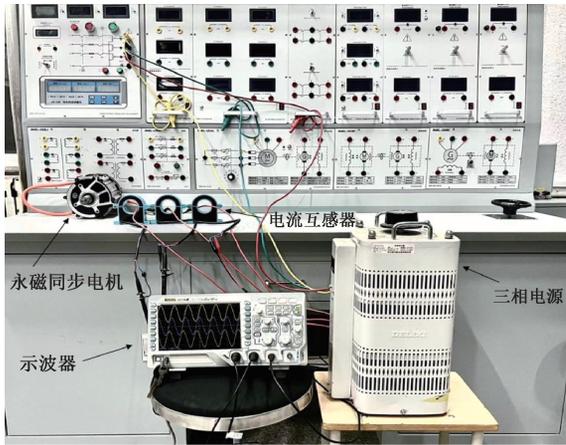


图 10 实验平台图

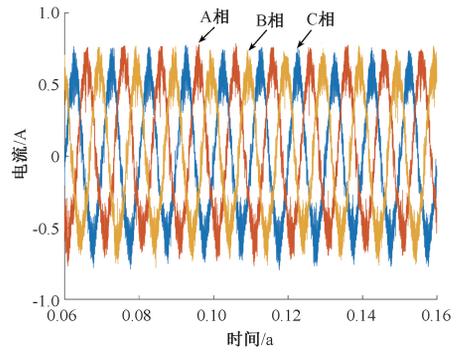
Fig. 10 Experimental platform diagram

为了对前文设置的短路匝数比进行有效性验证和工程适用性分析,在实验室中搭建了匝间短路故障实验平台,并进行了正常运行情况下和 3 种不同短路匝数比情况下的 4 组实验。

3.2 实测信号分析

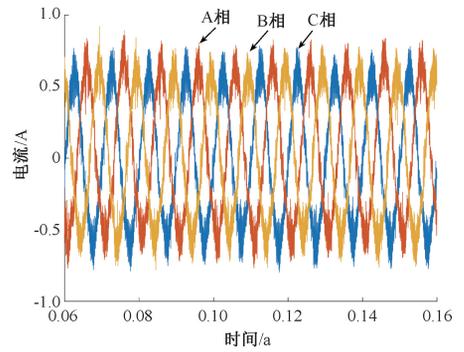
完成上述的匝间短路实验后,得到了电机的三相电流信号,图 11 为经过 MATLAB 分析后的实测三相电流数据。

图 11(a)是正常运行的三相电流图,三相电流的波形平稳,大小几乎一致;图 11(b)是短路匝数比为 0.05 时的三相电流图,A 相电流峰值与正常运行的 A 相电流峰值相比略微增长,此时相当于电机出现匝间短路故障的初期,电流变化不是很明显;图 11(c)是短路匝数比为 0.125 时的三相电流图,A 相电流峰值与正常运行的 A 相电流峰值相比有较为明显的增长,此时相当于电机出现匝间短路故障的中期,电流变化较为明显;图 11(d)是短路匝数比为 0.25 时的三相电流图,A 相电流峰值与正常运行的 A 相电流峰值相比增长程度很大,而且电流波形出现了轻微的失真现象,此时相当于电机出现匝间短路故障的严重期,电流变化非常明显。如果短路匝数比继续增大,可能会烧坏绝缘层,进而对其他非故障相造成影响,形成绕组间故障,更严重的会烧坏电机。



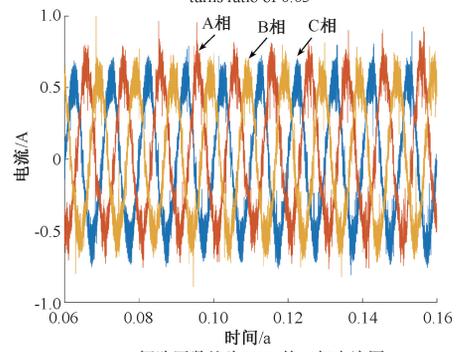
(a) 正常运行的三相电流图

(a) Three-phase current diagram in normal operation



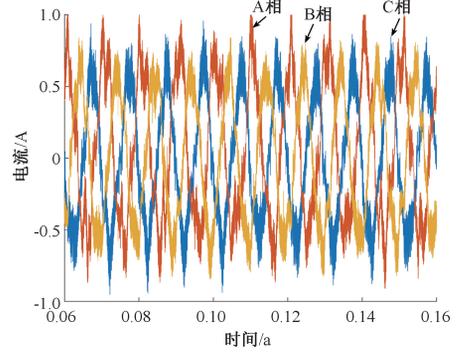
(b) 短路匝数比为0.05的三相电流图

(b) Three-phase current diagram with short-circuit turns ratio of 0.05



(c) 短路匝数比为0.125的三相电流图

(c) Three-phase current diagram with short-circuit turns ratio of 0.125



(d) 短路匝数比为0.25的三相电流图

(d) Three-phase current diagram with short-circuit turns ratio of 0.25

图 11 不同实验条件下的三相电流图

Fig. 11 Three-phase current diagram under different experimental conditions

将实验所测得的数据与仿真得到的数据进行分析对比可知,设置的 3 种短路匝数比能够反映不同的匝间故障严重程度,便于进行后续的故障诊断研究。

4 改进麻雀搜索算法及其性能测试

4.1 麻雀搜索算法

麻雀搜索算法(SSA)是 2020 年提出智能优化算法,具有较好的局部开发能力和全局寻优能力^[15]。麻雀捕食过程中主要分为 3 种角色:发现者、跟随者和预警者,麻雀算法中发现者、跟随者和预警者位置的更新公式如式(2)~(4)所示。

麻雀觅食行为中发现者位置的更新如式(2)所示。

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \exp(-\frac{i}{ar_{\max}}), S > R \\ X_{i,j}^t + CL, S \leq R \end{cases} \quad (2)$$

式中: t 表示第 t 次迭代; r_{\max} 表示最大迭代次数; i 表示第 i 个麻雀; j 代表维数,表示麻雀位置; a 是 $[0,1]$ 之间的随机数; C 是服从于标准正态分布的随机数; L 是 j 维的单位行向量; $X_{i,j}^{t+1}$ 表示在第 $t+1$ 次迭代中第 i 个麻雀在第 j 维里; R 和 S 分别表示预警值和安全值。当预警值小于安全值,意味着麻雀群当前的安全情况良好;当预警值大于安全值时,意味着附近有危险,此时需要前往安全区域。

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} C \cdot \exp(-\frac{X_{i,j}^t - X_{i,j}^{\text{worst}}}{i^2}), i > \frac{n}{2} \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}| \cdot A^+ + L, i \leq \frac{n}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $X_{i,j}^t$ 代表在第 t 次迭代适应度最低的麻雀位置; X_p^{t+1} 为第 $t+1$ 次迭代时由发现者控制的适应度最优的位置; $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$, A 为一个 t 维的行向量,且 A 中元素只为 1 和-1。

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t + b \cdot |X_{i,j}^t - X_{i,j}^{\text{best}}|, f_i \neq f_b \\ X_{i,j}^t + K \cdot \left[\frac{|X_{i,j}^t - X_{i,j}^{\text{best}}|}{(f_i - f_w) + \mu} \right], f_i = f_b \end{cases} \quad (4)$$

式中: $X_{i,j}^t$ 代表在第 t 代适应度最高的麻雀位置; K 是 $[-1,1]$ 之间的随机数; b 是服从于标准正态分布的随机数; μ 为趋近于 0 的常数; f_i, f_b, f_w 分别表示局部最优解、全局最优解和全局最差解。

4.2 改进麻雀搜索算法

1) Tent 混沌映射策略

SSA 初始种群采用随机生成方式,因此生成种群的质量无法保证。Tent 混沌映射适用于种群初始化,可以为算法求解提供更加多样性的初始解,有利于算法的寻优求解。因此采用 Tent 混沌映射策略生成麻雀初始种

群,其表达式如式(5)所示。

$$x_{i+1} = \begin{cases} \frac{x_i}{u}, 0 \leq x_i < u \\ \frac{1-x_i}{1-u}, u \leq x_i \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: u 为 $[0,1]$ 之间的数,当 $u = 0.5$ 时,序列分布比较均匀,对不同的参数也有近似一致的分布密度^[16]。

图 12 和 13 分别给出了经过随机初始化和 Tent 混沌映射初始化后的种群分布。从图 12 和 13 对比可知,采用 Tent 混沌映射初始化后的种群没有出现重叠的现象,说明采用 Tent 混沌映射初始化后的种群分布更加均匀,该策略有效地提高了种群多样性。

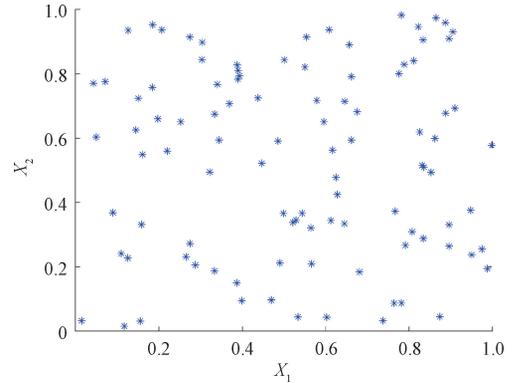


图 12 随机初始化种群分布图

Fig. 12 Randomly initialized population distribution map

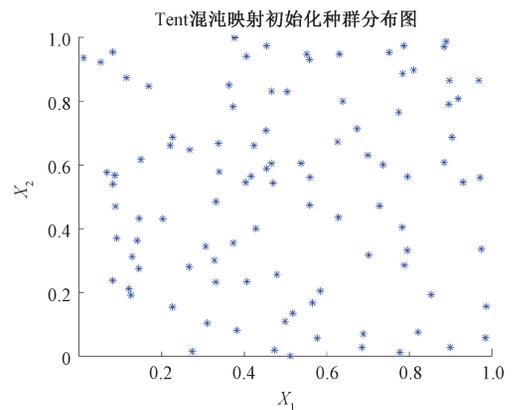


图 13 Tent 混沌映射初始化种群分布图

Fig. 13 Population distribution map of Tent chaotic map initialization

2) 自适应正弦策略

在算法迭代计算的过程中,随着迭代次数的增加,算法逐渐收敛,理想的寻优过程是从大范围的全局搜索逐渐靠近最优解后,通过小范围局部搜索最终找到最优解。一般算法采用固定权重进行迭代,灵活性较差,不能满足寻优过程中不同阶段的搜索能力需求^[17]。针对发现者

位置的更新进行改进,借助正余弦算法(sine and cosine algorithm, SCA)的搜索方式,采用非线性自适应正弦因子 w ,来增强其局部勘探能力^[18]。

寻优过程中,发现者位置的更新由式(6)确定:

$$w = w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min}) \sin(\pi / \text{Max}_{\text{iteration}}) \quad (6)$$

权重 w 的引入,使发现者位置更新为式(7):

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t + w \cdot \sin(r_1) \mid r_2 \cdot X_{\text{best}}^t - X_{i,j}^t \mid, S > R \\ X_{i,j}^t + w \cdot \cos(r_1) \mid r_2 \cdot X_{\text{best}}^t - X_{i,j}^t \mid, S \leq R \end{cases} \quad (7)$$

式中: r_1 为控制步长参数,取 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布的随机数; r_2 为控制当前最优解对发现者位置更新影响的权重,取 $[0, 2]$ 内均匀分布的随机数。

3) Levy 飞行策略

Levy 飞行策略是模拟动物觅食的随机游走过程,可以扩大搜索空间,增加其多样性,改善陷入局部最优情况,增强全局探索能力^[19]。跟随者位置采用 Levy 飞行策略,其表达式如式(8)所示。

$$\text{Levy}(\alpha) = \frac{\mu}{\mid \nu \mid^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (8)$$

式中: $\text{Levy}(\alpha)$ 为飞行步长;参数 α 值为1.5; μ, ν 服从正态分布:

$$\begin{aligned} \mu &\sim N(0, \sigma_{\mu}^2) \\ \nu &\sim N(0, \sigma_{\nu}^2) \end{aligned} \quad (9)$$

引入该策略后,跟随者位置由式(3)更新为式(10):

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} C \cdot \exp\left(-\frac{X_{\text{worst}}^t - X_{i,j}^t}{l^2}\right) + 0.2\text{Levy}(\alpha), i > \frac{n}{2} \\ X_p^{t+1} + \mid X_{i,j}^t - X_p^{t+1} \mid \cdot A^+ + 0.2\text{Levy}(\alpha), i \leq \frac{n}{2} \end{cases} \quad (10)$$

4.3 ISSA 算法的性能测试

为了对提出的改进算法进行更好的性能评估,将ISSA和SSA、PSO、GWO分别在4个测试函数中进行比较。算法参数的设置如表5所示。

表5 算法参数

Table 5 Algorithm parameters

算法	参数
ISSA	自适应正弦因子 $w \in [0.4, 0.9]$ 、 $w_{\min} = 0.4$ 、 $w_{\max} = 0.9$
SSA	安全阈值 $ST = 0.6$ 、发现者比例 $PD = 0.7$ 、警戒者比例 $SD = 0.2$
PSO	惯性因子 $w = 0.9$ 、学习因子 $c_1 = c_2 = 2$ 、收敛因子 $a = 2 - 2t/\text{Maxiter}$
GWO	随机因子 $r_1, r_2 \in (0, 1)$

近年来,在算法研究领域,学者们常用基准测试函数来评估算法性能。选取4个测试函数进行评估(F_1, F_2

为单峰函数, F_3, F_4 为多峰函数),并将算法的迭代次数、种群数量、运行次数和维度分别设置为1000次、30个、30次和30,函数如表6所示。

表6 基准测试函数

Table 6 Benchmark functions

函数	搜索范围	理论值
$F_1(x) = \sum_{i=1}^n \mid x_i \mid + \prod_{i=1}^n \mid x_i \mid$	$[-10, 10]$	0
$F_2(x) = \sum_{i=1}^n ([x_i + 0.5]^2)$	$[-100, 100]$	0
$F_3(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10]$	$[-5.12, 5.12]$	0
$F_4(x) = -20\exp\left(-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$	$[-32, 32]$	0

测试函数的结果如表7所示,每个测试函数的收敛曲线如图14所示。

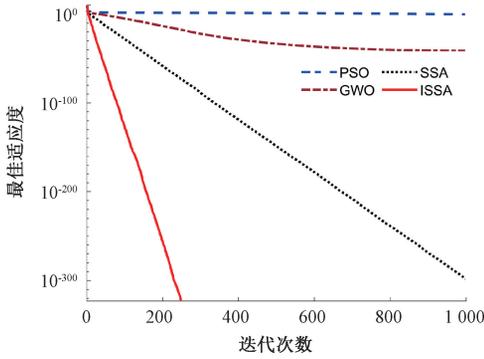
表7 测试函数结果对比

Table 7 Comparison of test function results

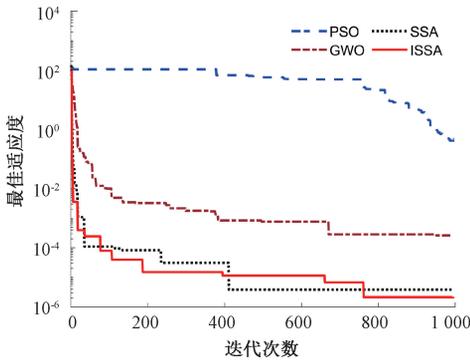
函数名	指标	ISSA	SSA	GWO	PSO
F_1	Best	0	2.1249×10^{-298}	3.1963×10^{-41}	0.39055
	Mean	0	6.2604×10^{-298}	7.7663×10^{-41}	0.61241
	Std	0	4.7706×10^{-298}	4.1244×10^{-41}	0.16804
F_2	Best	8.3408×10^{-7}	6.7432×10^{-6}	0.00021745	0.51531
	Mean	6.5812×10^{-6}	8.7336×10^{-6}	0.00047397	1.6923
	Std	5.1158×10^{-6}	2.8244×10^{-6}	0.00019267	0.97151
F_3	Best	0	0	0	63.2511
	Mean	0	0	22.5002	92.0752
	Std	0	0	50.312	14.0008
F_4	Best	8.8818×10^{-16}	6.8208×10^{-16}	7.9936×10^{-15}	0.16033
	Mean	8.8818×10^{-16}	5.8506×10^{-16}	1.3678×10^{-14}	0.67702
	Std	0	6.1776×10^{-15}	3.1776×10^{-15}	0.48391

由表7可知,当测试函数为 F_1 时,只有ISSA算法的适应度达到了理论值;当测试函数为 F_2 时,所有算法的适应度都没有达到理论值,但ISSA算法无论最优值还是标准差都有着最优的效果;当测试函数为 F_3 时,ISSA和SSA算法的适应度达到理论值,证明了麻雀优化算法拥有良好的搜索能力;当测试函数为 F_4 时,所有算法均没有达到理论值,但是ISSA算法的适应度值均小于其他算法,且标准差为0,证明该算法更稳定^[20]。

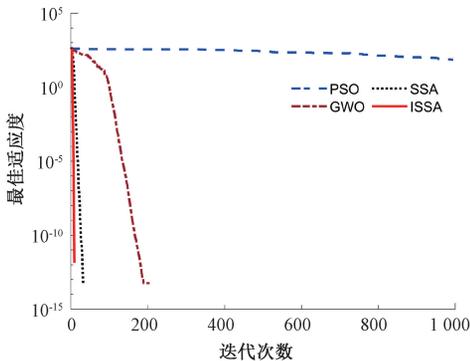
由图14可以看出,ISSA算法的收敛速度好于其他算法;PSO算法的适应度值最差;SSA算法比GWO算法的迭代次数快。综上所述,ISSA算法的稳定性和寻优能力最好。



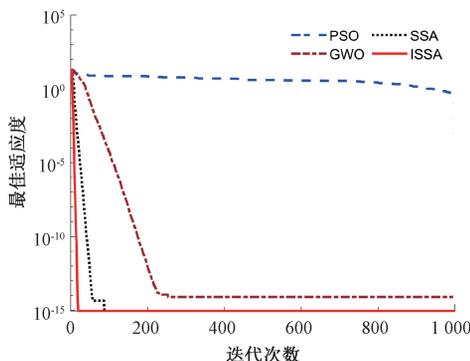
(a) F_1 函数值收敛曲线
(a) Convergence curve of F_1 function value



(b) F_2 函数值收敛曲线
(b) Convergence curve of F_2 function value



(c) F_3 函数值收敛曲线
(c) Convergence curve of F_3 function value



(d) F_4 函数值收敛曲线
(d) Convergence curve of F_4 function value

图 14 测试函数收敛曲线

Fig. 14 Test function convergence curve

5 ISSA-RF 模型建立及仿真结果分析

5.1 随机森林算法

随机森林 (RF) 算法是一种基于决策树的集成算法, 该算法对异常值有很高的包容性, 在分类和回归中不易出现过度拟合, 能够处理具有高维特征的输入样本, 评估各个特征在分类上的重要性。

5.2 ISSA-RF 模型建立

由于 RF 的参数通常是人为选取, 因此易导致最终的分类结果产生误差。为了获取全局的最优参数, 将决策树的剪枝阈值、决策树数量和预测测试样本的选取概率组成目标向量。与此同时, 将其设置为 ISSA 算法中的个体, 再通过算法实现全局寻优, 同时得到最适宜的 RF 参数^[21], 然后构建基于 ISSA 算法优化 RF 的故障诊断模型。其具体流程如图 15 所示。

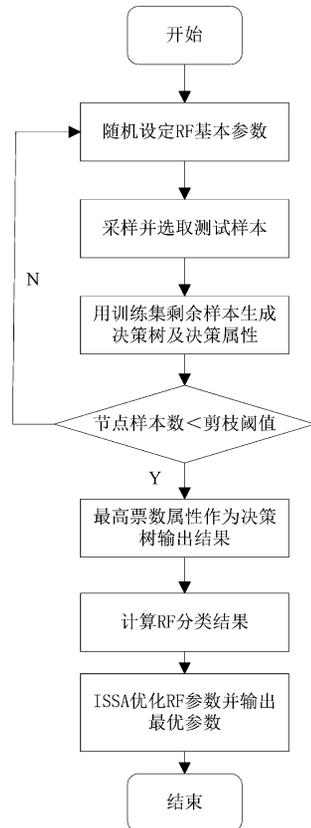


图 15 ISSA-RF 流程

Fig. 15 Flowchart of ISSA-RF

5.3 仿真结果分析

为了更好地评估 RF 模型对于 PMSM 匝间短路故障的诊断效果, 设置最大迭代次数为 20 次, 种群规模为 10 个, 接着, 将数据分别输入 ISSA-RF, SSA-RF, PSO-RF 和

GWO-RF 模型中进行故障诊断,得到 4 种模型测试样本的结果,如图 16~19 所示^[22]。

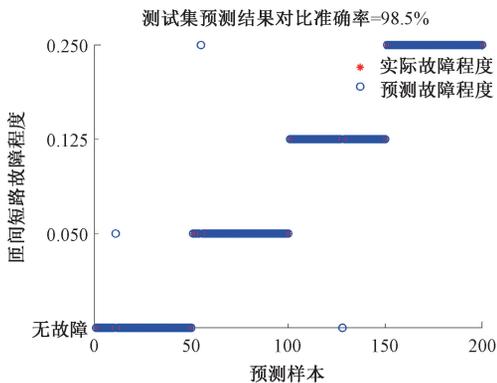


图 16 ISSA-RF 模型诊断结果

Fig. 16 Diagnostic result of ISSA-RF model

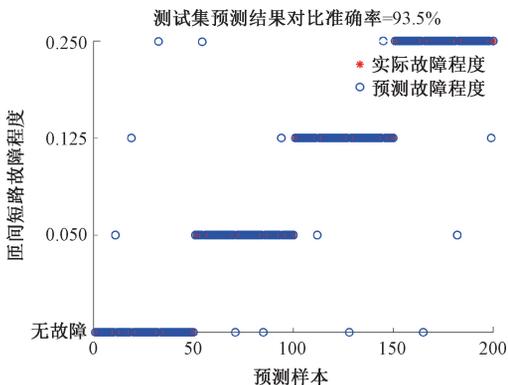


图 17 SSA-RF 模型诊断结果

Fig. 17 Diagnostic result of SSA-RF model

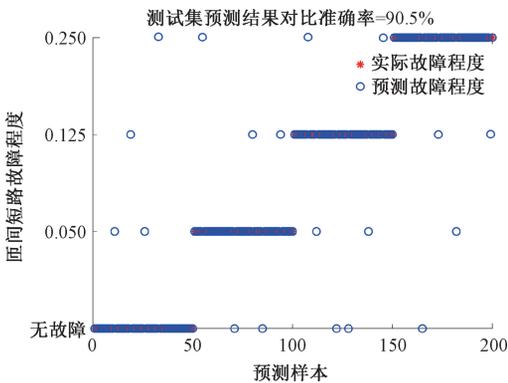


图 18 GWO-RF 模型诊断结果

Fig. 18 Diagnostic result of GWO-RF model

由图 16~19 可知, PSO-RF、GWO-RF、SSA-RF 和 ISSA-RF 的故障诊断准确率分别为 88%、90.5%、93.5% 和 98.5%,说明 RF 模型对 PMSM 匝间短路故障的诊断效果好。结果表明,改进的 ISSA 算法准确率最高,能更

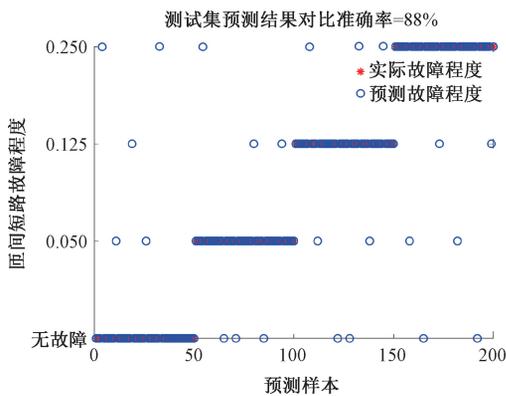


图 19 PSO-RF 模型诊断结果

Fig. 19 Diagnostic result of PSO-RF model

好地解决 RF 的最优参数选择问题。

6 结 论

本文提出了一种 ISSA 优化 RF 参数的诊断方法,解决了大多数 PMSM 匝间短路故障诊断方法中存在的故障识别特征量单一和不能区分故障程度等问题。通过对搭建的 PMSM 有限元模型进行仿真,对其匝间短路故障特征进行分析,通过对故障时电机定子电流分析得到其频域特征,通过对故障时电机的负序分量分析发现可以选用负序阻抗作为另一个匝间短路故障诊断特征,并引入一个负序阻抗故障系数的概念,用来识别电机的匝间短路故障程度。原则上,将这 3 个特征(两个特征量和一个故障系数)与智能检测算法结合起来,可以识别出匝间短路故障及其故障程度。在基于 RF 的检测模型基础之上引入改进的 ISSA 算法,构建了一个基于 ISSA-RF 的 PMSM 匝间短路故障检测模型。将融合之后的特征数据输入到 ISSA-RF 检测模型当中并与 SSA-RF、PSO-RF 和 GWO-RF 检测模型进行对比,发现 ISSA-RF 检测模型的准确率达到 98.5%,进一步说明了该检测方法对 PMSM 匝间短路故障诊断可靠性高。

参考文献

[1] 卢志远,柏受军,江明,等. 改进的线性自抗扰永磁同步电机转速控制器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2022,36(4): 73-81.

LU ZH Y, BAI SH J, JIANG M, et al. Design of improved speed controller for linear active disturbance rejection permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(4): 73-81.

[2] 李珍国,王鹏磊,孙启航,等. 基于逐相旋转坐标变换的无刷直流电机转子磁场定向瞬时转矩控制技术[J]. 电工技术学报,2022,37(22):5788-5798.

- LI ZH G, WANG P L, SUN Q H, et al. Transient torque control technology of brushless DC motor rotor field orientation based on phase by phase rotation coordinate transformation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 37(22): 5788-5798.
- [3] 史梓豪, 刘细平, 张瑞恒, 等. 基于新型滑模观测器和非奇异快速终端滑模的永磁同步电机控制[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(5): 135-141.
- SHI Z H, LIU X P, ZHANG R H, et al. Permanent magnet synchronous motor control based on novel sliding mode observer and non-singular fast terminal sliding mode [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42 (5): 135-141.
- [4] 刘颖明, 张天琦, 王晓东, 等. 永磁同步风力发电机匝间和退磁故障早期检测 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 252-258.
- LIU Y M, ZHANG T Q, WANG X D, et al. Early detection of turn and demagnetization faults of permanent magnet synchronous wind turbine [J]. Acta Solar Energy Sinica, 2022, 43(10): 252-258.
- [5] SHIH K J, HSIEH M F B, CHEN 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): 1-7.
- [6] HUANG W T, HUA W, FAN Q G. Performance analysis and comparison of two fault-tolerant model predictive control methods for five-phase PMSM drives [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2021, 5(4): 311-320.
- [7] 陈勇, 梁洪, 王成栋, 等. 基于改进小波包变换和信号融合的永磁同步电机匝间短路故障检测[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S1): 228-234.
- CHEN Y, LIANG H, WANG CH D, et al. Interturn short circuit fault detection of permanent magnet synchronous motor based on improved wavelet packet transform and signal fusion [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S1): 228-234.
- [8] 祝本超. 永磁同步电机故障诊断研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- ZHU B CH. Research on fault diagnosis of permanent magnet synchronous motor [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [9] 山浩强. 油浸式变压器故障诊断与定位方法研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022.
- SHAN H Q. Research on fault diagnosis and location method of oil-immersed transformer [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2022.
- [10] 付华, 刘昊. 多策略融合的改进麻雀搜索算法及其应用 [J]. 控制与决策, 2022, 37 (1): 87-96.
- FU H, LIU H. Improved sparrow search algorithm based on multi-strategy fusion and its application [J]. Control and Decision, 2022, 37 (1): 87-96.
- [11] ZHOU S Y, TANG J, PAN C, et al. Partial discharge signal denoising based on wavelet pair and block thresholding [J]. IEEE Access, 2020, 8: 119688-119696.
- [12] LI Z C, WANG T Z, WANG Y D, et al. A wavelet threshold denoising-based imbalance fault detection method for marine current turbines [J]. IEEE Access, 2020, 8: 29815-29825.
- [13] 孙曙光, 张婷婷, 王景芹, 等. 基于连续小波变换和 MTL-SEResNet 的断路器故障程度评估 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 162-173.
- SUN SH G, ZHANG T T, WANG J Q, et al. Fault degree evaluation of circuit breakers based on continuous Wavelet transform and MTL-SEResNet [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(6): 162-173.
- [14] ZHANG C, WANG F, WANG Z, et al. Analysis of stator winding inter-turn short circuit fault of PMSM for electric vehicle based on finite element simulation [C]. 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Beijing, 2014: 1-6.
- [15] 王子萌. 面向工业控制网络的入侵检测关键技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- WANG Z M. Research on key technologies of intrusion detection for industrial control networks [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [16] 滕志军, 吕金玲, 郭力文, 等. 一种基于 Tent 映射的混合灰狼优化的改进算法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50 (11): 40-49.
- TENG ZH J, LYU J L, GUO L W, et al. An improved hybrid gray wolf optimization algorithm based on Tent mapping [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50 (11): 40-49.
- [17] 李泽霜, 唐忠, 程卓, 等. 基于改进麻雀搜索算法的电热-气-氢综合能源系统优化 [J/OL]. 现代电力, 1-11. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0351>.
- LI Z SH, TANG ZH, CHENG ZH, et al. Optimization of electric-heat-gas-hydrogen integrated energy system based on improved sparrow search algorithm [J/OL]. Modern Electric Power, 1-11. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0351>.
- [18] 孙珂琪, 陈永峰. Lévy 飞行的正余弦乌燕鸥混合算法及应用 [J]. 机械设计与制造, 2023, (1): 212-217.

- SUN K Q, CHEN Y F. Sine-cosine wul-tern hybrid algorithm for Lévy flight and its application [J]. Machinery Design & Manufacture, 2023,(1): 212-217.
- [19] 徐小平,杨转,刘龙. 求解物流配送中心选址问题的蜘蛛猴算法[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(1): 150-157.
- XU X P, YANG ZH, LIU L. Spider monkey algorithm for solving logistics distribution center location problem [J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(1): 150-157.
- [20] 李斌,郭自强,高鹏. 改进北方苍鹰算法在光伏阵列中应用研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7): 131-139.
- LI B, GUO Z Q, GAO P. Application of improved northern goshawk optimization algorithm in photovoltaic array [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023,37(7): 131-139.
- [21] 刘士李,周远科,施晓敏,等. 基于改进RF算法的低压配电工程信息识别技术[J]. 电子设计工程, 2023, 31(20): 177-181.
- LIU SH L, ZHOU Y K, SHI X M, et al. Low-voltage distribution based on improved RF algorithm engineering information recognition technology [J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(20): 177-181.
- [22] 王瑞,尤敬尧,章小彬,等. 基于蚁狮算法优化极限学习机的变压器故障诊断[J]. 黑龙江电力, 2023, 45(1):17-22.

WANG R, YOU J Y, ZHANG X B, et al. Transformer fault diagnosis based on extreme learning machine optimized by Ant Lion algorithm [J]. Heilongjiang Electric Power, 2023,45(1): 17-22.

作者简介



李斌,分别在2003年、2006年和2012年于辽宁工程技术大学获得学士学位、硕士学位和博士学位。现为辽宁工程技术大学副教授,主要研究方向为电接触理论及应用、智能电器与智能电网技术。

E-mail: 25992816@qq.com

Li Bin received his B. Sc. degree in 2003, M. Sc. degree in 2006, and Ph. D. degree in 2012 from Liaoning Technical University, respectively. Now he is an associate professor in Liaoning Technical University. His main research interests include electrical contact theory and application, intelligent appliances and smart grid technology.



杨润(通信作者),2022年于辽宁工程技术大学获得学士学位。现为辽宁工程技术大学硕士研究生,主要研究方向为电接触理论及应用、智能电器与智能电网技术。

E-mail:2176985421@qq.com

Yang Run received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2022. Now he is a M. Sc. candidate in Liaoning Technical University. His main research interests include electrical contact theory and application, intelligent appliances and smart grid technology.