DOI:10.12177/emca.2026.246 文章编号:1673-6540(2026)11-1216-13 中图分类号:TM 307 文献标志码:A

基于电磁场降阶和粒子群优化的圆柱式线性感应电磁泵匝间短路快速辨识

刘 伟[1,2*], 刘 洋[1,2], 秦 凤[1,2], 苏 华[1,2]
(1.核动力运行研究所,湖北 武汉 430223;
2.中核武汉核电运行技术股份有限公司,湖北 武汉 430223)

Rapid Identification of Inter-Turn Short Circuits in Annular Linear Induction Pumps Based on Electromagnetic Field Reduced-Order Modeling and Particle Swarm Optimization

Liu Wei[1,2*], Liu Yang[1,2], Qin Feng[1,2], Su Hua[1,2]
(1. Research Institute of Nuclear Power Operation, Wuhan 430223, China;
2. China Nuclear Power Operation Technology Corporation, Ltd., Wuhan 430223, China)

Abstract: **[Objective]** Inter-turn short circuit (ITSC) is a typical fault of the annular linear induction pump (ALIP), which impairs the transport capacity of liquid metal coolant and the heat dissipation performance of fast reactors. To address this issue, this paper proposes an ITSC fault inversion method based on electromagnetic field reduced-order model (ROM) with the particle swarm optimization (PSO) algorithm. **[Methods]** A prototype sodium-cooled ALIP was taken as the research object, a fault simulation and leakage magnetic field test platform was established. Latin hypercube sampling was adopted to generate sample datasets under various fault conditions. Proper orthogonal decomposition was used to extract the electromagnetic field dominant modes and corresponding mode coefficients. A deep neural network was further combined to establish the nonlinear mapping between operating condition parameters and mode coefficients, and the electromagnetic field ROM of the ALIP was constructed. Taking the sparse magnetic flux measurement data on the pump shell as inputs, the established ROM and the PSO algorithm were utilized to realize the rapid reconstruction and identification of ITSC faults. **[Results]** The results showed that the maximum relative errors of the ROM-calculated shell leakage magnetic field and core magnetic field against the full-order model (FOM) were 3.9% and 3.5%, respectively, and the computational speed was improved by a factor of 4 447 compared with the FOM. The proposed inversion method could accurately identify ITSC faults, with a single inversion taking only 12 s. **[Conclusion]** The proposed method provides methodological support for developing digital-twin-oriented ALIP health management systems and facilitates the enhancement of operational reliability for the equipment and new-generation nuclear power systems.

Key words: annular linear induction pump; leakage magnetic field test; electromagnetic field reduced-order model; particle swarm optimization; inter-turn short circuit

摘 要:**【目的】**匝间短路(ITSC)是圆柱式线性感应电磁泵(ALIP)的一种典型故障,危及液态金属冷却介质的传输容量和快堆的散热效能。针对此问题,本文提出一种基于电磁场降阶模型(ROM)与粒子群优化(PSO)算法的ITSC故障反演方法。**【方法】**以某原型钠介质ALIP为研究对象,搭建故障模拟与漏磁检测平台。通过拉丁超立方采样生成不同故障工况下的样本数据集。采用本征正交分解提取电磁场主导模态及相应模态系数,并结合深度神经网络建立运行工况参数与模态系数之间的非线性映射,构建ALIP电磁场ROM。以外壳空间稀疏磁通测点数据为输入,利用构建的ROM和PSO算法实现ITSC故障的快速重构与辨识。**【结果】**结果表明,该ROM对外壳漏磁和铁心磁场的计算结果相对全阶模型(FOM)的最大相对误差分别为3.9%和3.5%,计算速度相较FOM提升4 447倍;所提反演方法可准确辨识ITSC故障,单次反演仅耗时12 s。**【结论】**所提方法为面向数字孪生的ALIP健康管理系统提供了方法支撑,有助于提升设备及新一

基金项目:国家国防科技工业局项目(HNKF202305)
State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense Project (HNKF202305)

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

代核电系统的运行可靠性。

关键词: 圆柱式线性感应电磁泵;漏磁检测;磁场降阶;粒子群优化;匝间短路

0 引言

圆柱式线性感应电磁泵(Annular Linear Induction Pump, ALIP)凭借无机械磨损、全密封运行的特性,成为液态金属快堆冷却剂循环的核心装备之一[1-3]。然而,电磁泵长期处于高温、强振动及腐蚀性介质环境中,定子绕组绝缘层易出现脆化甚至破损,进而引发匝间短路(Inter-Turn Short Circuit, ITSC)故障。该故障可能进一步导致冷却剂泄漏,造成放射性安全风险。因此,实现 ALIP ITSC 的快速定位与诊断,对保障设备及反应堆运行安全具有重要意义[4-5]。

目前,针对旋转电机及部分直线电机的故障诊断研究已趋于成熟,形成了基于振动信号分析[6-7]、温度监测[8-9]以及电气参数特征提取等多种方法[10-11]。文献[12]从振动信号中提取非线性特征用于 ITSC 故障识别。文献[13]提出一种融合电流信号与红外热图像的分析方法,用于定位电机故障区域。文献[14]利用涡流脉冲热成像手段检测绕组缺陷,并据此确立缺陷类型与热特征之间的对应规律。文献[15]提出电压不平衡下基于负序电流补偿和融合卷积块注意力模块的卷积神经网络的感应电机 ITSC 故障辨识方法。然而,ALIP 结构特殊,其振动信号易受流体湍流及机械共振等干扰,难以有效提取;电气参数受限于 ALIP 初级绕组的结构特点及单频供电条件,对早期微弱 ITSC 故障的敏感度不足。电磁场是机电能量转换的物理媒介,ITSC 故障将直接导致绕组安匝分布失衡与局部电流畸变,其空间磁场分布形态能够反映绕组状态的变化。因此,利用磁场信号开展故障辨识,具有物理机理清晰、故障特征直接及抗干扰能力强等固有优势。近年来,基于磁场反演获取目标参数成为研究热点[16-19]。文献[20]通过对空间磁场信息进行反演,获取复杂电磁环境下的被测电流信息。文献[21]采用差分进化算法,通过表面磁场反演三芯电缆相电流。然而,这类方法高度依赖正演模型的精度与效率,而传统有限元计算耗时较长,难以满足在线场景的实时求解需求。

为突破正演计算的效率瓶颈,模型降阶(Model Order Reduction, MOR)被引入物理场数值计算领域[22-24]。其核心思想是将高维物理场投影至低维子空间进行近似描述,以可控的精度损失换取计算速度的大幅提升。该方法已在不同领域中得到成功应用。例如,在航空航天领域,文献[25]采用本征正交分解(Proper Orthogonal Decomposition, POD)对高维数据进行降维,实现了飞行器表面压力系数的快速预测;文献[26]针对航空发动机涡轮机剩余寿命预测问题,提出基于降阶模型(Reduced-Order Model, ROM)与应力场快速映射的方法。在电力设备领域,文献[27-28]对油浸式变压器进行 MOR,验证了 ROM 的计算效率和精度。然而,现有 MOR 相关研究多聚焦于正演问题的加速求解,将其作为代理模型嵌入逆向反演流程的研究尚不充分。特别是 ALIP 这类核电关键设备,如何利用 ROM 实现 ITSC 故障的快速在线辨识,仍有待深入研究。

因此,为实现对 ALIP ITSC 故障的快速辨识,本文首先建立 ALIP 全阶仿真模型,并基于 POD 和深度神经网络(Deep Neural Network, DNN)建立磁场 ROM;然后,提出一种基于外壳稀疏磁通测量值的故障参数反演辨识方法;最后,通过搭建故障模拟与漏磁检测平台,验证所构建的 ROM 的计算效率与反演辨识的准确性。

1 物理模型与试验

1.1 ALIP 结构与电磁分析

ALIP 结构如图 1(a)所示,主要由初级和次级两部分构成。初级包括外壳、定子铁心、内铁心及绕组线圈;次级包括液态金属钠、泵沟及热绝缘层。ALIP 具体参数如表 1 所示。

ALIP 工作原理如图 1(b)所示。当定子绕组通入三相电流时,定子铁心中产生沿轴向移动的行波主磁场,该磁场在液态金属钠中感应出电流,感应电流与行波磁场相互作用产生电磁力,驱动液态金属钠沿泵沟定向流动。当绕组发生 ITSC 时,短路匝内产生巨大环流。该环流一方面削弱原有主磁通;另一方面在短路匝周围形成显著的漏磁场,漏磁场沿磁路向外扩散传播,在对应短路

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

位置的电磁泵外壳表面表现出局部磁通密度增强现象。

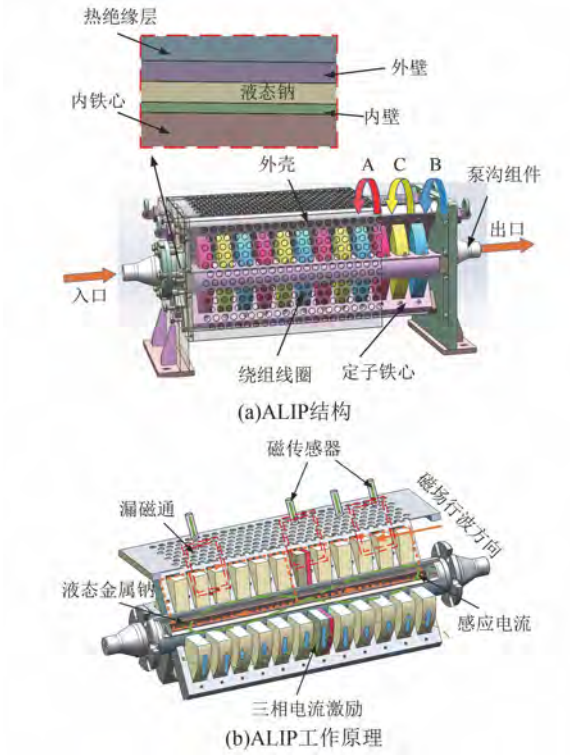


图 1　ALIP 结构及工作原理

Fig. 1　ALIP structure and working principle

表 1　ALIP 参数

Tab. 1　ALIP parameters

参数名称	参数值
额定电压/V	380
每线圈匝数	24
额定电流/A	130
极对数	2
并联支路数	1
铁心间气隙/mm	12.3
接线方式	Y

1.2　物理试验平台

为验证所提 ALIP 模型及降阶反演算法的有效性,开展液态金属电磁泵定子 ITSC 故障试验。试验平台依托专为液态金属电磁泵故障模拟研究设计的小型钠回路物理试验平台搭建,主要由流体循环系统、加热温控系统、氩气置换、压力控制系统、特征信号同步监测系统以及数据采集控制系统组成。

鉴于液态金属电磁泵启停周期较长,为便于在试验中实现并切换定子 ITSC 故障工况,本文为 A、B、C 三相绕组分别设计了专用故障绕组,短路匝通过引线与外部自动开关相连。完成 ALIP 组装后,首先进行匝间绝缘和直流电阻测试,以确认绕组无初始故障。随后按接线图布置测量设备,在正常工况下启动电磁泵,调节频率和电压以控制流量,记录并保存数据。待磁场稳定后,切换至故障状态,重复上述测试步骤。

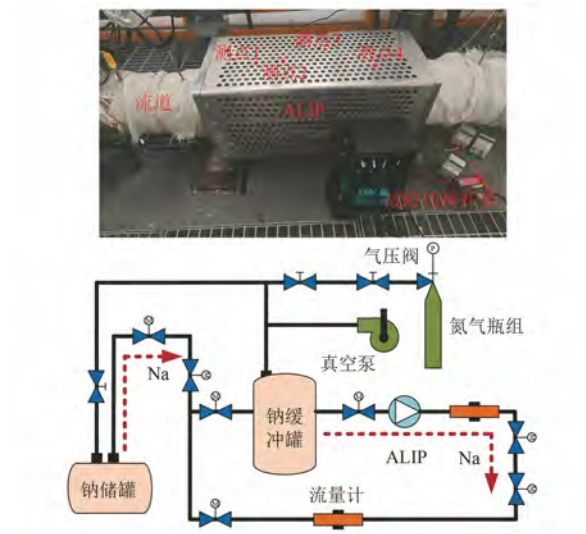


图 2　物理试验平台

Fig. 2　Physical experimental platform

为实现外壳表面漏磁场信号的无损检测,设计了如图 3 所示的专用传感器调节机构。该调节机构依据泵壳表面开孔间距与传感器探头距外壳表面的气隙距离定制加工,可确保磁场传感器的精确定位。传感器采用 TMR2103 芯片(工作电压范围为 1.8~5.5 V),并加装金属屏蔽罩,以抑制外界电磁干扰及热辐射对测量精度的影响。试验时,在外壳表面选取 4 个测点,通过调节支架上的滑动轮可实现传感器的上下移动,以满足不同轴向位置的测量需求。

1.3　技术路线

本文基于 ITSC 故障引发的漏磁场畸变特征,提出一种绕组 ITSC 故障快速辨识方法,整体技术路线框架如图 4 所示。

(1)数据集构建:依据 ALIP 的实际运行工况,选取对其磁场分布影响较大的参数作为变量,采用拉丁超立方采样方法对不同短路位置与短路匝数进行工况采样。在各采样工况下开展全阶有限元仿真,获取磁场快照矩阵;随后采用 POD 提

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

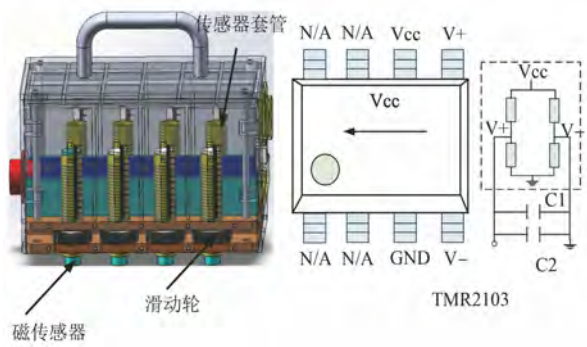


图 3　传感器调节机构

Fig. 3　Sensor adjustment mechanism

取快照矩阵的主导模态及对应的模态系数，确保所选模态的能量占系统总能量的 99.9% 以上。

（2）代理模型训练：将运行工况参数作为输入，POD 提取的模态系数作为输出，通过 DNN 进行训练，建立工况参数与模态系数之间的非线性映射关系。

（3）模态系数预测：对于任意新工况，仅需将工况的运行参数输入至训练好的代理模型，即可快速获得对应的模态系数预测值。

（4）物理场重构：将 POD 提取的主导模态与预测得到的模态系数进行线性组合，即可快速重构 ALIP 磁场分布。

（5）故障参数反演：以外壳表面稀疏磁通测点数据作为观测输入，将 ROM 作为正向计算器嵌入粒子群优化（Particle Swarm Optimization，PSO）算法中，对故障匝数与短路位置进行反演优化。每次迭代过程中调用磁场 ROM，直至算法收敛。

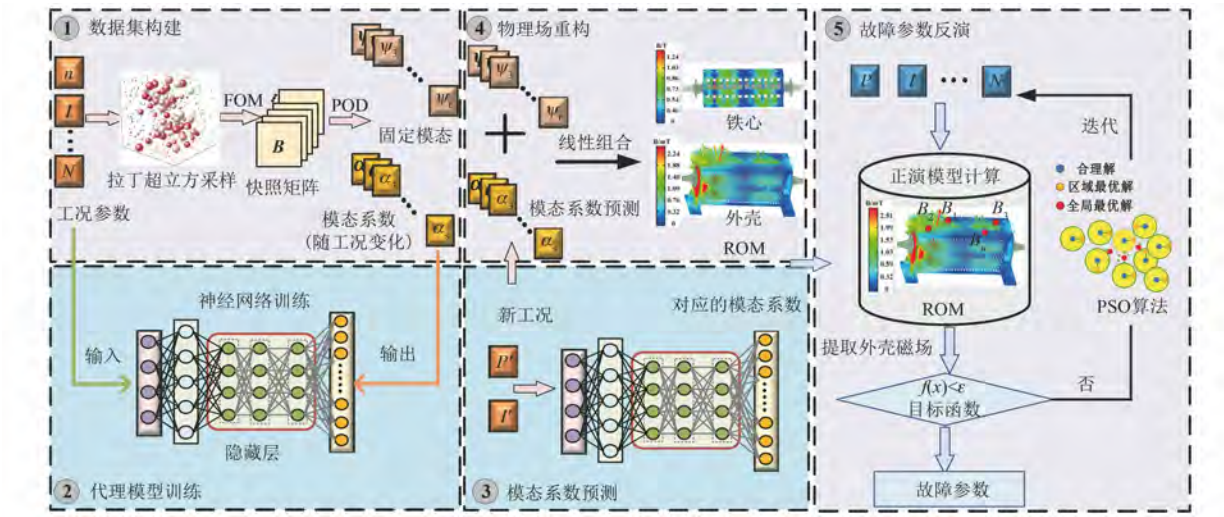


图 4　技术路线框架图

Fig. 4　Framework of the technical roadmap

2　ALIP 电磁场全阶有限元分析

为降低有限元计算的复杂度，对绕组线圈进行简化处理，将故障线圈等效为健康绕组与故障绕组的叠加。简化模型如图 5 所示，其等效电导率 σ_{eq} 为

$$\sigma_{eq}=\frac{N_{total}\cdot S_w}{S}\cdot\sigma_w \tag{1}$$

式中：σ_w 为导线电导率；S 为绕组总截面积；N_{total} 为线圈总匝数；S_w 为单匝导线截面积。

2.1　电磁场基本方程

电磁场中的任一媒介均遵循麦克斯韦方程组。根据电磁泵工作原理，其工频电源频率较低，位移电流可忽略不计。此外，ALIP 运行中液态金属的流动涉及电磁场与流体场的耦合作用：在行

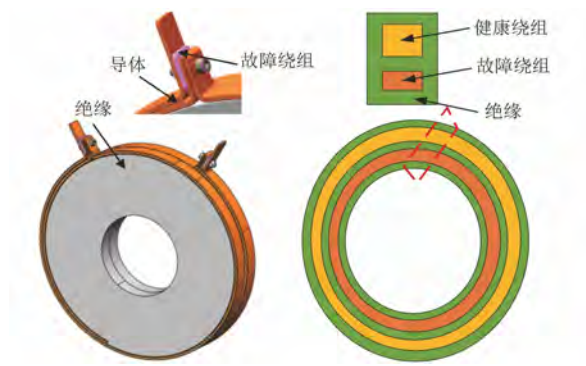


图 5　绕组线圈简化模型

Fig. 5　Simplified model of winding coil

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

波磁场激励下,金属钠内部除感应电流外,还存在动生电流分量。ALIP 电磁场的基本描述方程为

$$\begin{cases}\nabla(\nabla\times\boldsymbol{A})-\nabla^2\boldsymbol{A}=\\ \mu_0\sigma\left(-\dfrac{\partial\boldsymbol{A}}{\partial t}+\boldsymbol{v}\times\nabla\times\boldsymbol{A}\right)+\mu_0\boldsymbol{J}_s\\ \nabla\cdot\left[\mu_0\sigma\left(-\dfrac{\partial\boldsymbol{A}}{\partial t}+\boldsymbol{v}\times\nabla\times\boldsymbol{A}\right)+\mu_0\boldsymbol{J}_s\right]=0\end{cases}\tag{2}$$

式中:σ 为电导率;μ_0 为真空磁导率;$\boldsymbol{J}_s$ 为外部电流密度;$\boldsymbol{A}$ 为矢量磁势;$\boldsymbol{v}$ 为液态金属的流速。

ALIP 泵沟内的液态金属可视作牛顿流体。在忽略自身重力且不计能量变化的条件下,其流动状态可由质量守恒方程和动量守恒方程描述:

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\boldsymbol{v})=0\\ \rho\left[\dfrac{\partial v}{\partial t}+(\boldsymbol{v}\cdot\nabla)\boldsymbol{v}\right]=-\nabla p_e+\eta\nabla^2\boldsymbol{v}+f\end{cases}\tag{3}$$

式中:ρ 为流体密度;η 为流体动力黏度;f 为流体所受外部体积力密度;p_e 为静压。

当液态金属以匀速流动时,其与管壁间的摩擦损耗可忽略不计。由式(3)可知,此时电磁力与静压梯度相平衡,液态金属流经 ALIP 产生的压差 Δp_e 可表示为

$$\Delta p_e=\int_l\boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B}\mathrm{d}l\tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{J}$、$\boldsymbol{B}$ 分别为液态金属中的感应电流密度、磁感应强度;l 为 ALIP 的轴向长度。

ALIP 环形管道内,液态金属的黏性作用引发流体质点间及流体与管壁间的流动阻力,该阻力将部分机械能转化为热能,考虑上述能量损耗后,液态金属流经 ALIP 产生的实际压差 Δp 为

$$\Delta p=\Delta p_e-f_D\frac{\rho l v^2}{2D_h}\tag{5}$$

式中:f_D 为摩擦阻力系数;D_h 为环形管道的水力直径。

2.2　全阶有限元结果分析

根据所建立的计算模型,在 380 V、50 Hz 条件下进行仿真,得到 A 相线圈短路 5 匝时 ALIP 外壳与铁心磁场云图如图 6 所示。ALIP 外壳与铁心磁场强度分别为 10.25 mT 与 1.24 T,单次全阶时谐电磁场仿真耗时 4.2 h。正常工况下,ALIP 定子线圈通入对称三相交流电时,产生行波磁场并在内外铁心中移动,磁场分布均匀。然而,由于铁心采用分段结构,存在气隙与接缝以及线圈端部磁路不连续,会形成少量不穿过定子铁心的漏磁场从外壳流出。当发生 ITSC 故障时,短路环流导致故障线圈局部安匝分布失衡,使得故障位置对应的铁心区域磁通密度显著增大;同时,三相电流不对称引起行波磁场畸变,导致外壳漏磁场增强。

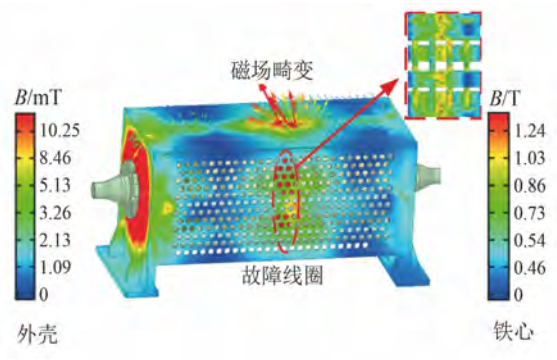


图 6　A 相线圈短路 5 匝时 ALIP 外壳与铁心磁场云图

Fig. 6　Magnetic field cloud map of ALIP shell and iron core when 5 turns of phase A coil are short-circuited

为分析测点布局对不同位置短路的空间分辨能力,提取 A、B、C 三相短路 5 匝工况下 4 个测点的磁通密度,如表 2 所示。可以看出,各测点的磁通密度随短路位置不同呈现明显差异。A 相短路时,测点 2 响应最强,为 9.85 mT;B 相短路时,测点 1 响应最强,为 10.17 mT;C 相短路时,测点 4 响应最强,为 9.97 mT。结果表明,沿轴向布置的 4 个测点对不同位置短路具有不同的灵敏度,能够有效捕捉短路位置的空间信息,为故障定位提供区分依据。

表 2　不同短路位置下各测点磁通密度

Tab. 2　Magnetic flux density at each measuring point under different short-circuit locations

短路位置	测点 1 磁通密度/mT	测点 2 磁通密度/mT	测点 3 磁通密度/mT	测点 4 磁通密度/mT
A 相短路	7.36	9.85	8.61	5.32
B 相短路	10.17	5.62	4.26	4.18
C 相短路	6.08	8.21	4.36	9.97

3　ALIP 的电磁场 ROM 构建

为实现 ALIP 磁场分布的快速求解,引入 MOR 技术构建代理模型,以拉丁超立方采样生成的多样化故障工况样本为基础,依托全阶有限元

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

仿真构建快照矩阵，并结合 POD 与模态系数回归，获得 ROM。将该模型作为后续故障反演的正演计算核心，大幅提升参数辨识效率。

3.1 拉丁超立方采样

ROM 的构建需要在样本空间内采样，以获取不同工况下的数据集。为兼顾代理模型的精度与泛化能力，采样需兼顾样本的代表性与空间填充性。本文采用拉丁超立方分层采样方法生成工况样本，选取绕组短路位置 P、短路匝数 N、三相电流幅值 I 及运行频率 f 作为输入变量，各变量对电磁泵磁场分布均有影响，其取值范围如表 3 所示。

表 3 输入变量及其采样范围

Tab. 3 Input variables and their sampling ranges

输入变量	采样范围
短路位置 P	1~12
短路匝数 N	0~24
三相电流 I/A	120~160
运行频率 f/Hz	50~60

为建立工况参数与模态系数之间的映射关系，本文共采集 200 个样本点构成样本空间，涵盖 ALIP 不同故障类型与短路程度，以保证 ROM 对全域工况的适应性。其中，训练集 160 组、测试集 40 组，样本分布如图 7 所示。

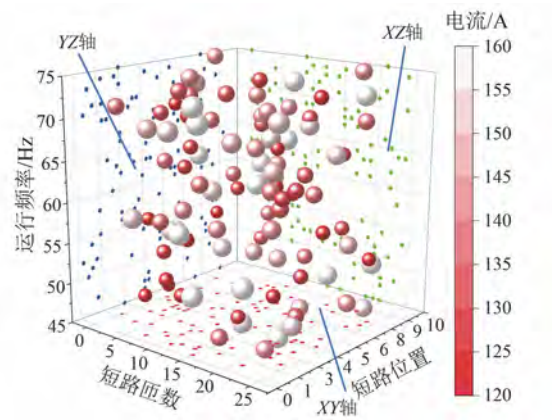


图 7 样本分布

Fig. 7 Sample distribution

3.2 POD 降阶原理

POD 是一种从高维数据中提取主要特征以实现 MOR 的有效方法，其基本原理是对快照矩阵进行奇异值分解，获得一组正交基（即固有模态）及对应的模态系数，随后根据各模态的能量贡献率选取前 s 阶主导模态，即可将原始电磁场分布近似表示为所选模态与对应系数的线性组合，从而实现复杂电磁场模型的高效降维，其原理如图 8 所示。

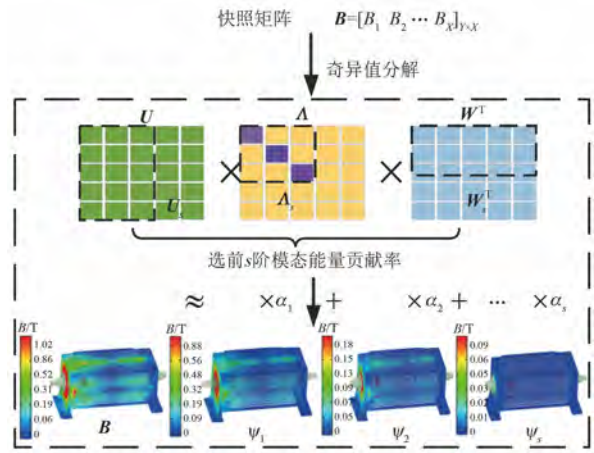


图 8 POD 降阶原理图

Fig. 8 Schematic diagram of POD reduced order

快照矩阵 $\boldsymbol{B}$ 由 ALIP 全阶有限元仿真在 X 种工况、Y 个节点上的磁场数据组合而成的，定义如式（16）所示：

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1X} \\ B_{21} & B_{22} & \cdots & B_{2X} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{Y1} & B_{Y2} & \cdots & B_{YX} \end{bmatrix}_{Y\times X} \tag{6}$$

为获取 ALIP 电磁场的固有模态，对 $\boldsymbol{B}$ 进行奇异值分解，如式（7）所示：

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{U}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{U}\in\mathbf{R}^{Y\times Y},\boldsymbol{\Lambda}\in\mathbf{R}^{Y\times X},\boldsymbol{W}\in\mathbf{R}^{X\times X} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{W}$ 分别为左正交矩阵、右正交矩阵；$\boldsymbol{\Lambda}$ 为对角矩阵。

$\boldsymbol{U}$ 的列向量 $\boldsymbol{u}_i$ 构成一组正交基，为构建 ROM，选取前 s 个列向量作为降阶子空间的正交基；$\boldsymbol{\Lambda}$ 的对角元素 λ_i 反映对应正交基在系统中的能量贡献，通常选前 s 个正交基使其累计能量占比超过 99.9%。累计能量占比 η_s 表达式为

$$\eta_s=\sum_{i=1}^{s}\lambda_i/\sum_{i=1}^{X}\lambda_i \tag{8}$$

根据占比能量确定模态阶数后，矩阵可表示为 $\boldsymbol{B}\approx\boldsymbol{U}_s\boldsymbol{\Lambda}_s\boldsymbol{W}_s^{\mathrm{T}}$，模态矩阵 $\boldsymbol{\psi}$ 以及对应的模态系数矩阵 $\boldsymbol{\alpha}$ 为

$$\boldsymbol{\psi}=[\psi_1,\psi_2\cdots\psi_s]=\boldsymbol{U}_s \tag{9}$$

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

$$\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1^{\mathrm{T}}, \alpha_2^{\mathrm{T}} \cdots \alpha_s^{\mathrm{T}}] = \boldsymbol{\Lambda}_s \boldsymbol{W}_s^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

式中:ψ_i、α_i 分别为第 i 阶 POD 模态、模态系数。

由此可将 ALIP 电磁场重构为

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{U}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}} \approx \boldsymbol{U}_s\boldsymbol{\Lambda}_s\boldsymbol{W}_s^{\mathrm{T}} \approx \sum_{i=1}^{s} \alpha_i \psi_i \tag{11}$$

3.3　模态系数的 DNN 预测

由降阶原理可知,POD 模态由 ALIP 系统本身的物理属性决定,而模态系数则随运行工况的差异而改变,其求解速度直接决定 ROM 的计算效率。为此,本文引入 DNN 来建立工况参数与模态系数之间的非线性映射关系,以替代传统的系数求解过程,进一步提升计算效率。

DNN 模型结构如图 9 所示,包含输入层、5 层隐含层和输出层。输入层接收工况参数(短路位置、短路匝数、电流幅值及运行频率),并将其传递至隐含层;各隐含层神经元对输入信号进行加权求和,再经激活函数进行非线性变换后输出,隐含层的层数直接影响网络对复杂映射关系的拟合能力;输出层将最后一层隐含层的结果进行整合,生成模态系数的最终预测值。

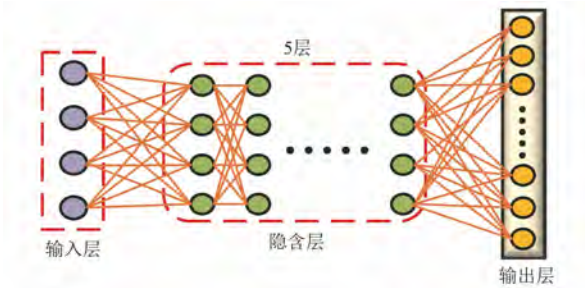


图 9　DNN 模型结构

Fig. 9　DNN model structure

隐含层输入与输出之间的关系可表示为

$$y_j = \phi\left[\sum_{i=1}^{n} (w_{i,j}x_i + b_j)\right] \tag{12}$$

式中:y_j 为第 j 个神经元的输出;x_i 为上一层中第 i 个神经元的输入;$w_{i,j}$ 为第 j 个神经元对应于第 i 个输入的权重;b_j 为第 j 个神神经元的阈值;ϕ 非线性激活函数,用于增强网络对复杂非线性关系的拟合能力。

3.4　ROM 验证

本文数值计算采用的硬件环境为 Intel Core i7-9700 处理器(3.00 GHz,16 核),内存 32 GB,操作系统为 Windows 10 专业版。

基于全阶有限元仿真获得的各工况电磁场数据,构建快照矩阵并实施模态分解,得到 200 组样本对应的模态及模态系数。根据式(8)计算各阶模态的能量贡献率,以确定主导模态的截断阶数,结果如图 10 所示。由图 10 可知,前 14 阶模态的累计能量占比已达 99.9%,满足工程计算精度要求。

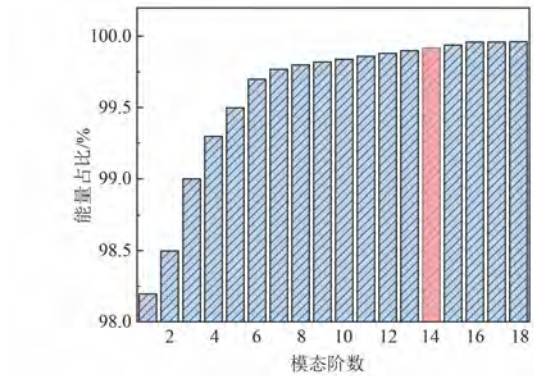


图 10　各阶模态累计能量占比

Fig. 10　Cumulative energy proportion of each mode

为检验 ROM 的求解精度,将 ROM 计算值分别与全阶模型(Full-Order Model, FOM)仿真值及试验数据进行对比,并引入绝对误差 ε 和相对误差 δ 两项指标进行定量评估。ε、δ 定义如式(13)、(14)所示:

$$\varepsilon = \left(\sum_{i=1}^{m} |B_{\mathrm{FOM}}^i - B_{\mathrm{ROM}}^i|\right)/m \tag{13}$$

$$\delta = \left(\sum_{i=1}^{m} \frac{|B_{\mathrm{FOM}}^i - B_{\mathrm{ROM}}^i|}{B_{\mathrm{FOM}}^i}\right)/m \tag{14}$$

式中:B_{FOM}^i 为第 i 个节点处磁场的 FOM 仿真值;B_{ROM}^i 为第 i 个节点处磁场的 ROM 计算值;m 为 ALIP 磁场求解域的节点总数。

在 40 组测试工况下,分别采用 ROM 与 FOM 对外壳及铁心磁场进行求解,两者间的误差如图 11 所示。结果表明,对于外壳磁场和铁心磁场,两模型的最大绝对误差分别为 0.072 mT 和 0.064 mT,最大相对误差分别为 3.9% 和 3.5%。可见,ROM 在全场域内求解精度较高。

在不同短路位置及短路程度下,采用 ROM 求解得到的 ALIP 外壳与铁心磁场分布如图 12 所示。正常工况下,外壳与铁心磁场分布均匀,无明显畸变。当发生 ITSC 时,故障线圈产生的短路环流导致局部安匝分布失衡,进而引起外壳表面漏

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

磁场畸变；与此同时，铁心相应区域的磁通密度局部增强，且随着短路匝数的增加而加剧。可见，ROM 能够准确再现 ITSC 引起的 ALIP 磁场畸变规律。

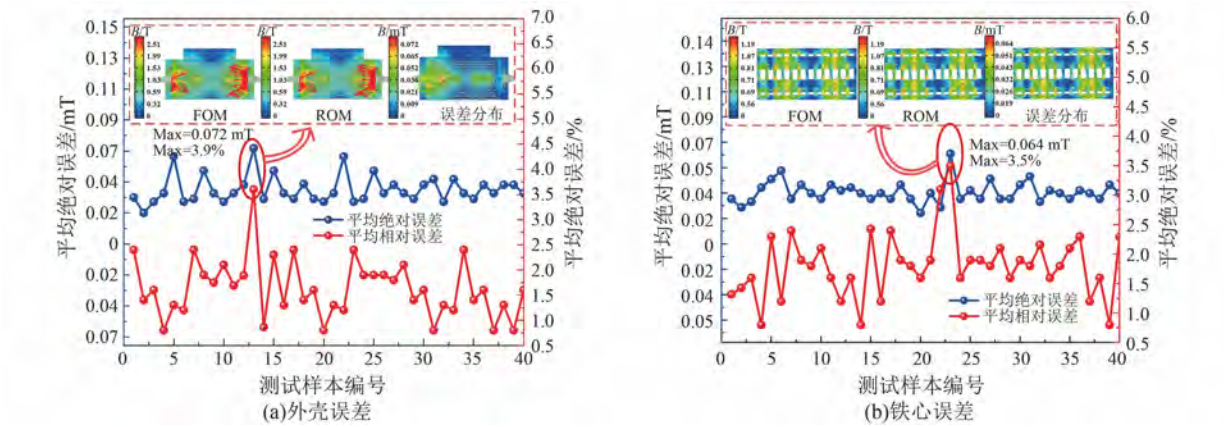


图 11　ROM 计算值与 FOM 仿真值的误差

Fig. 11　Error between ROM calculated value and FOM simulated value

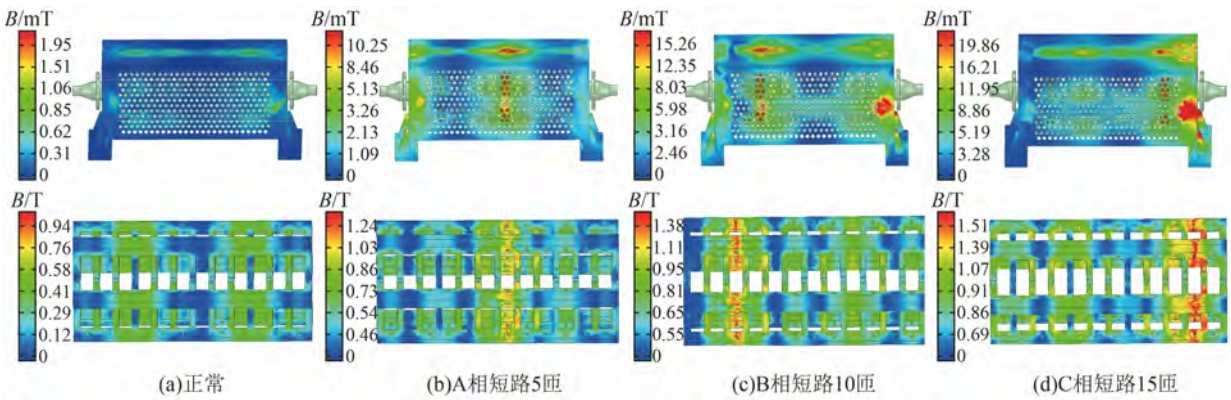


图 12　不同短路位置及程度下 ALIP 外壳与铁心磁场分布

Fig. 12　Magnetic field distribution of ALIP shell and iron core under different short-circuit positions and degrees

为验证 ROM 在实际测量条件下的计算精度，在 4 个测点处，将短路 1 匝工况下的 ROM 计算值与试验测量值进行对比，结果如表 4 所示。其中，δ_{FOM}、δ_{ROM} 分别为 FOM 仿真值、ROM 计算值与试验测量值间的相对误差。

由表 4 可知，ROM 计算值与 FOM 仿真值基本一致；且 ROM 计算值与试验值吻合较好，最大相对误差为 4.85%，最小为 2.93%，表明 ROM 在实测条件下具有较高的计算精度。

不同短路程度下 FOM 与 ROM 的单次求解耗时如表 5 所示。可以看出，ROM 的平均耗时为 3.4 s；FOM 的平均耗时为 4.2 h，是 ROM 的 4 447 倍。结果表明，ROM 在不同故障程度下均能保持稳定的加速效果，计算效率远优于传统有限元方法，能够满足工程实时分析的效率需求。

表 4　不同短路位置下 ROM 计算值与试验测量值对比

Tab. 4　Comparison of measured and ROM-computed values at different measuring points

短路位置	测点位置	试验值/mT	FOM/mT	ROM/mT	δ_{FOM}/%	δ_{ROM}/%
3 号线圈	测点 1	4.92	5.05	5.12	2.64	4.07
	测点 2	7.75	7.92	7.98	2.19	2.97
	测点 3	5.24	5.38	5.46	2.67	4.20
	测点 4	2.54	2.61	2.65	2.76	4.33
6 号线圈	测点 1	6.89	7.06	7.14	2.47	3.63
	测点 2	5.46	5.58	5.62	2.20	2.93
	测点 3	3.25	3.34	3.38	2.77	4.00
	测点 4	3.64	3.73	3.78	2.47	3.85
12 号线圈	测点 1	1.03	1.06	1.08	2.91	4.85
	测点 2	2.65	2.73	2.76	3.02	4.15
	测点 3	3.68	3.78	3.83	2.72	4.08
	测点 4	5.89	6.04	6.11	2.55	3.73

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

表 5　不同短路程度下 ROM 与 FOM 计算耗时

Tab. 5　Computational time of ROM and FOM under different short-circuit degrees

短路程度	FOM 耗时/h	ROM 耗时/s	速度比
5 匝短路	4.3	2.7	5 733
10 匝短路	4.4	3.8	4 168
15 匝短路	3.9	3.7	3 794
平均值	4.2	3.4	4 447

4　基于 PSO 的 ALIP ITSC 辨识

为实现 ALIP ITSC 的快速辨识,将 ROM 和 PSO 算法相结合,构建故障参数反演框架,以外壳表面稀疏磁通测点数据、三相电流及运行频率为输入,反演求解故障参数,从而实现绕组 ITSC 的准确辨识。

4.1　PSO 算法原理和故障参数反演

PSO 算法的基本原理是通过迭代更新粒子的位置与速度,使种群逐步收敛至全局最优位置。本文采用 PSO 算法求解 ALIP ITSC 故障参数反演问题,具体流程如图 13 所示。

粒子速度和位置更新如式(15)、(16)所示:

$$v_{i,j}^{k+1} = w \cdot v_{i,j}^{k} + c_1 r_1 (p_{\text{best},i,j} - x_{i,j}^{k}) + c_2 r_2 (g_{\text{best},i} - x_{i,j}^{k}) \tag{15}$$

$$x_{i,j}^{k+1} = x_{i,j}^{k} + v_{i,j}^{k+1} \tag{16}$$

式中:c_1、c_2 分别为个体、种群的学习因子;r_1、r_2 为[0,1]内的随机数;$v_{i,j}^{k}$、$x_{i,j}^{k}$ 和 $v_{i,j}^{k+1}$、$x_{i,j}^{k+1}$ 分别为第 k 和 k+1 次迭代时粒子 i 在空间维度 j 的速度、位置;$p_{\text{best},i,j}$、$g_{\text{best},i}$ 分别为个体最优值、全局最优值;w 为惯性因子,其随迭代过程逐渐减小,以此加快粒子群的收敛速度。

反演过程的准确性取决于目标函数的设计。该函数用于量化外壳测点处的仿真磁场值与实测磁场值间的偏差。其中,仿真值通过 ROM 根据 ALIP 输入参数计算得到。

目标函数为

$$f(N,P) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{8} |B_{\text{sim},i} - B_{\text{meas},i}|} \tag{17}$$

式中:$B_{\text{sim},i}$、$B_{\text{meas},i}$ 分别为第 i 个测点处仿真磁场值、实测磁场值。

4.2　绕组 ITSC 在线辨识结果与验证

为验证所提反演方法的有效性,设置三种 ITSC 故障工况:3 号线圈短路 5 匝、6 号线圈短路 10 匝以及 12 号线圈短路 15 匝。将故障工况下外壳测点处的磁场测量值作为反演模型的输入,驱动 ROM 与 PSO 算法进行故障参数求解,反演结果如图 14 所示。

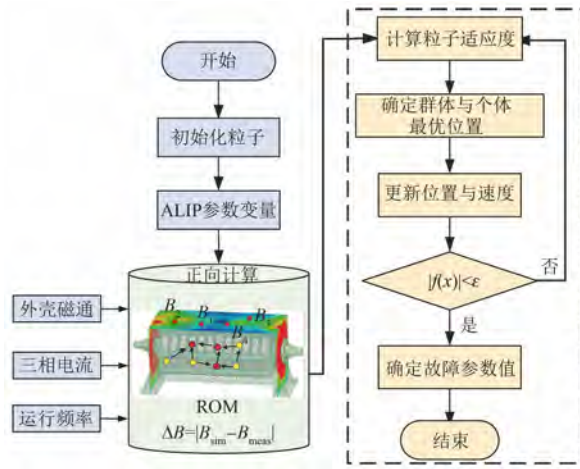


图 13　ALIP 故障反演流程

Fig. 13　ALIP fault inversion process

3 号线圈短路 5 匝时的反演结果如图 14(a)所示。正常情况下,ALIP 每相线圈总匝数为 24 匝。反演结果显示,线圈 3 的匝数为 18.7 匝,较正常值减少 5.3 匝,与预设短路匝数(5 匝)基本吻合;其余线圈的反演匝数分布在 22~24 匝之间,均接近正常值。由此可判定故障位于线圈 3。

6 号线圈短路 10 匝时的反演结果如图图 14(b)所示。反演结果显示,线圈 6 的反演匝数为 14.3 匝,较正常值减少 9.7 匝,与预设短路匝数(10 匝)较为接近;其余线圈匝数均接近正常值。由此可判定故障位于线圈 6。

12 号线圈短路 15 匝的反演结果如图 14(c)所示。反演结果显示,线圈 12 的反演匝数为 11.4 匝,较正常值减少 13.6 匝,与预设短路匝数(15 匝)存在一定偏差,但仍显著低于正常线圈匝数;其余线圈反演结果均接近正常值。由此可判定故障位于线圈 12。

三次反演过程中,单次反演耗时 12 秒。反演结果表明,在 5 匝及以上短路程度下,所提方法能够准确识别故障位置,且反演匝数与预设值具有较好的一致性。

为评估观测噪声对反演精度的影响,在测点磁通密度观测值中分别添加 5%、10% 和 15% 的高斯白噪声,对每种噪声水平下的各故障工况进行

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

20 次独立反演，结果如图 15 所示。可以看出，在 5% 和 10% 噪声水平下，故障线圈的反演匝数中位数与无噪声工况基本一致，箱体范围变化较小，表明反演结果对轻度噪声不敏感；当噪声增大至 15% 时，箱体明显变宽，且出现个别偏离值，但中位数仍接近预设值，说明算法在噪声干扰下仍能保持对故障匝数估计的统计无偏性，具备一定的抗噪能力。

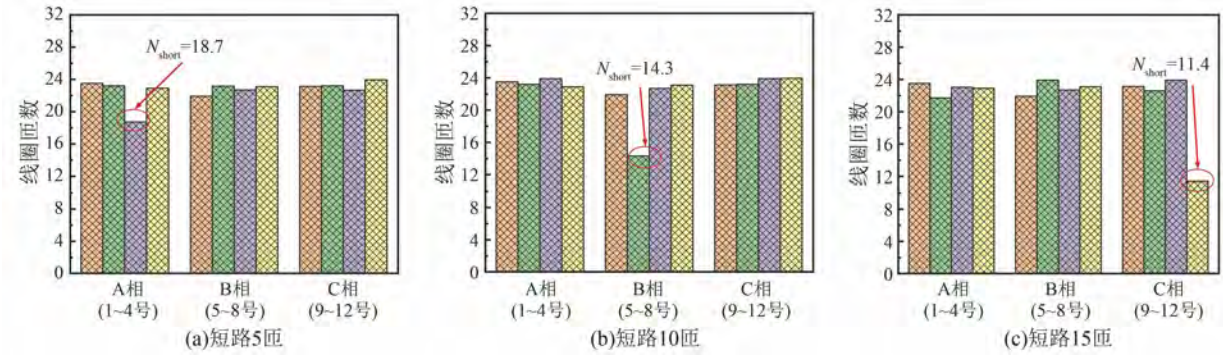


图 14　故障反演结果

Fig. 14　Fault inversion results

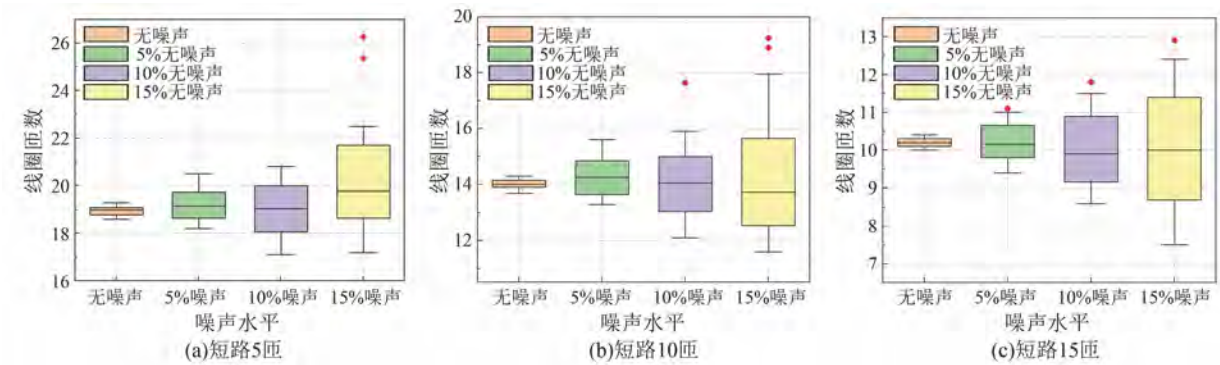


图 15　不同噪声水平下故障线圈反演匝数

Fig. 15　Inverted turn numbers of the fault coil under different noise levels

匝数短路故障反演模型的误差主要来源于以下几个方面。

（1）模型简化与等效误差。在建立 ALIP 全阶有限元模型时，为降低计算复杂度，对绕组端部结构、铁心叠片细节及气隙几何特征进行了合理简化，并对材料非线性磁化特性进行了分段线性近似。这些简化处理与实际物理结构之间存在一定差异，导致仿真磁场分布与真实工况存在固有偏差，进而影响反演结果的精度。

（2）ROM 截断误差。采用 POD 构建磁场 ROM 时，仅保留能量占比前 14 阶的主导模态（累计能量占比 99.9%），舍弃了能量占比较小的高阶模态。被截断的高频细节信息虽然对整体磁场分布贡献微弱，但在局部漏磁场畸变特征提取中可能引入微小误差，尤其对微弱短路故障的灵敏性产生影响。

5　结语

本文提出了一种基于 POD-MOR 与 PSO 算法的 ALIP ITSC 故障快速辨识方法，为 ALIP 的健康状态在线监测与评估提供了有效的技术手段，主要结论如下。

（1）搭建了 ALIP 故障模拟与漏磁检测物理试验平台，在分析电磁泵绕组结构与电磁场分布特性的基础上，构建了电磁场全阶有限元模型，对不同短路位置及短路程度下的漏磁场与铁心磁场进行计算，为 ROM 提供了准确的数值计算基础。

（2）通过拉丁超立方采样生成不同故障工况下的样本数据集，采用 POD 算法提取电磁场主导模态，并结合 DNN 建立运行工况参数与模态系数之间的非线性映射，构建 ALIP 电磁场 ROM。结果表明：ROM 将单次计算平均时长从 FOM 的

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

4.2 h 缩减至 3.4 s,计算效率提升 4 447 倍;对于外壳漏磁与铁心磁场,ROM 计算值与 FOM 仿真值的最大相对误差分别为 3.9% 和 3.5%。

(3)以外壳表面稀疏磁通测点数据为观测输入,将 ROM 作为正向计算器嵌入 PSO 算法中,以故障参数为优化变量、仿真磁场值与实测磁场值的偏差为目标函数,实现了绕组 ITSC 故障的快速反演辨识。结果表明:在 5 匝及以上短路程度下,所提方法能准确识别故障线圈位置,反演匝数与预设值吻合良好;单次反演平均耗时 12 s,验证了该方法在 ALIP ITSC 在线辨识中的高效性与实用性。

(4)本文方法仍存在一定局限性。对于轻微程度的短路故障,由于漏磁场畸变特征较弱,反演灵敏度不足;此外,当前反演框架仅针对单线圈短路故障,尚未对多线圈同时短路等复杂故障模式进行验证。后续研究将围绕微弱故障特征增强、传感器布局优化、多故障模式识别以及与数字孪生平台的深度融合展开,以进一步提升 ALIP 健康状态运维的数智化水平。

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

刘伟进行了数值仿真、试验平台搭建以及论文撰写,刘洋进行了数据采集、论文的审核与修改,秦风、苏华参与了试验平台搭建,所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

Liu Wei performed the numerical simulation, experimental platform construction, and manuscript writing. Liu Yang carried out the data collection as well as review and revision of the paper. Qin Feng and Su Hua participated in experimental platform construction. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参 考 文 献

[1] Aizawa K, Chikazawa Y, Kotake S, et al. Electromagnetic pumps for main cooling systems of commercialized sodium-cooled fast reactor [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2011, 48(3): 344-352.

[2] Kirillov I R, Obukhov D M, Ogorodnikov A P, et al. Comparison of computer codes for evaluation of double-supply-frequency pulsations in linear induction pumps [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 231(2): 177-185.

[3] Kim B Y, Jeong J Y. Electromagnetic pump in sodium thermal-hydraulic test facility: Design and control issues [C]// 2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems, Jeju, South Korea, 2017: 272-275.

[4] Qi P, Li Y G, Ma M H. Diagnosis and location of inter-turn short circuit fault in pumped storage unit [J]. Renewable Energy, 2024, 223: 119977.

[5] Qi P, Li Y G, Ma M H, et al. Diagnosis of inter-turn short circuit in excitation winding of pumped storage unit based on frequency-resolved circulation spectrum [J]. IET Electric Power Applications, 2023, 17(1): 14-35.

[6] 万书亭, 李和明, 李永刚, 等. 基于定子振动特征的转子绕组短路故障识别[J]. 振动工程学报, 2005, 18(3): 342-345.
Wan S T, Li H M, Li Y G, et al. The diagnosis method of generator rotor winding inter-turn short circuit fault based on stator vibration characteristic [J]. Journal of Vibration Engineering, 2005, 18(3): 342-345.

[7] 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 armature winding inter-turn short circuit in aerospace generators [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(1): 22-35.

[8] 何水龙, 沈徐红, 蒋占四, 等. 基于 FEM 的双馈发电机定子匝间短路表征因子研究[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(7): 109-115.
He S L, Shen X H, Jiang Z S, et al. Research on characteristic factor of inter-turn short circuit faults of stator winding for DFIG based on FEM [J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(7): 109-115.

[9] Zhang W, He Y L, Xu M X, et al. Loss, thermal and mechanical responses of rotor in marine

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

generators under SISC degree and load variation [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification，2025，11(2)：5156-5168.

[10] Boileau T，Leboeuf N，Nahid-mobarakeh B，et al. Synchronous demodulation of control voltages for stator interturn fault detection in PMSM [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2013，28(12)：5647-5654.

[11] 李俊卿，王罗，李永刚，等. 水轮发电机励磁绕组匝间短路转子热应力计算与分析[J]. 电机与控制应用，2018，45(8)：116-123.
Li J Q，Wang L，Li Y G，et al. Calculation and analysis of rotor thermal stress for inter-turn short circuit of hydro generator excitation winding [J]. Electric Machines & Control application，2018，45(8)：116-123.

[12] 夏焰坤，李欣洋，任俊杰，等. 基于 CEEMDAN-HT 的永磁同步电机匝间短路振动信号故障特征提取研究[J]. 振动与冲击，2024，43(5)：72-81.
Xia Y K，Li X Y，Ren J J，et al. Fault feature extraction of inter-turn short circuit vibration signals in PMSM based on CEEMDAN-HT [J]. Journal of Vibration and Shock，2024，43(5)：72-81.

[13] 张香瑞. 基于红外图像特征分析的电机电气故障定位方法研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2024.
Zhang X R. Research on motor electrical fault location method based on infrared image feature analysis [D]. Xi'an：Xi'an University of Architecture and Technology，2024.

[14] 彭昱. 电机绕组电磁红外热成像缺陷无损检测技术研究[D]. 长沙：湖南大学，2023.
Peng Y. Research on electromagnetic infrared thermography for defect non-destructive testing technology of motor winding [D]. Changsha：Hunan University，2023.

[15] 任超凡，王超帆，王陈博，等. 电压不平衡条件下感应电机匝间短路故障识别[J]. 电机与控制学报，2026，30(3)：21-29.
Ren C F，Wang C F，Wang C B，et al. Interturn short-circuit fault identification in induction motors under voltage unbalance conditions [J]. Electric Machines and Control，2026，30(3)：21-29.

[16] Huang J，Song Z，Xie S，et al. Cogging torque functional inversion theory-based optimization of circumferential stiffness in claw-pole magnetic levitation torque motors with auxiliary slots [J]. Flow Measurement and Instrumentation，2026，107.

[17] Deng L，Du B，Cai H B，et al. Self-generated magnetic field in plasma reconstructed byusing inverse abel transformation in proton radiography[J]. Acta Physica Sinica，2022，71(24).

[18] Hao W，Wen H F，Gao Z，et al. Traversal window inversion of 3-D boundary of micro magnetic target based on quantum imaging technique [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，2024，73.

[19] Deng S，Chen H，Wan F G，et al. Research on defect image inversion method based on multiple lift-off values magnetic memory signals [J]. Measurement and Control，2025，58(7)：881-891.

[20] 李鹏，马浩宇，田兵，等. 复杂电磁环境下基于球谐函数分解的磁场传感数据反演电流方法[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2365-237.
Li P，Ma H Y，Tian B，et al. Novel current inversion method of magnetic field sensing data based on spherical harmonics decomposition in complex electromagnetic environment [J]. High Voltage Engineering，2023，49(6)：2365-237.

[21] 王航，黄炳，廖雁群，等. 基于表面磁场反演的三芯电缆相电流测量方法[J]. 中国电机工程学报，2025，45(3)：1182-1194.
Wang H，Huang B，Liao Y Q，et al. Phase current measurement of three-core cables based on inverse analysis of sur-face magnetic field[J]. Proceedings of the CSEE，2025，45(3)：1182-1194.

[22] 徐超群，关向雨，张杭，等. 基于模型降阶和粒子群优化的感应电机温升快速计算和绕组异常热源辨识方法[J]. 电机与控制学报，2026，30(3)：104-116.
Xu C Q，Guan X Y，Zhang H，et al. A method for rapid temperature rise calculation and winding anomalous heat source identification in induction motors based on model order reduction and particle swarm optimization [J]. Electric Machines and Control，2026，30(3)：104-116.

[23] Yang M，Kim S，Sun X，et al. Deep-learning-based reduced-order modeling to optimize recuperative burner operating conditions [J]. Applied Thermal Engineering，2024，236：121669.

[24] Guo Z，Yan S，Xu X Y，et al. Twin-model based on model order reduction for rotating motors [J]. IEEE

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

Transactions on Magnetics, 2022, 58(9): 8206304.

[25] 潘柏霖, 刘哲, 王鹏宇, 等. 基于 POD 和轻量残差网络的飞行器表面压力系数预测方法研究[J]. 飞行力学, 2026, 44(3): 22-27.
Pan B L, Liu Z, Wang P Y, et al. Research on surface pressure coefficient prediction method of aircraft based on POD and lightweight residual network [J]. Flight Dynamics, 2026, 44(3): 22-27.

[26] 赵炎, 陈若琦, 沈天宝, 等. 面向视情维修的航空发动机涡轮叶片剩余寿命预测方法[J]. 航空动力学报, 2025, 40(8): 68-78.
Zhao Y, Chen R Q, Shen T B, et al. Remaining life prediction method for aero-engine turbine blades oriented to on-condition maintenance [J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 40(8): 68-78.

[27] 赵庆贤, 刘云鹏, 刘刚, 等. 基于 POD-DNN 降阶模型的油浸式变压器绕组稳态温升快速计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(6): 2423-2436.
Zhao Q X, Liu Y P, Liu G, et al. Fast calculation of steady temperature rise of oil-immersed transformer windings based on POD-DNN reduced order model [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(6): 2423-2436.

[28] 杨帆, 胡星宇, 王鹏博. 油浸式电力变压器温升计算场路耦合和降阶模型研究[J]. 电工技术学报, 2025, 40(13): 4071-4084.
Yang F, Hu X Y, Wang P B. Study on temperature rise calculation and reduced-order model of oil-immersed transformer with field-circuit coupling [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(13): 4071-4084.

收稿日期:2026-07-15
收到修改稿日期:2026-09-01

作者简介:

刘　伟(1981—),男,硕士,高级工程师,研究方向为核电设备可靠性管理、机电设备监测诊断,kinder1125@163.com;

*通信作者:刘　伟(1981—),男,硕士,高级工程师,研究方向为核电设备可靠性管理、机电设备监测诊断,kinder1125@163.com。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.