

基于ISO-LSSVM的变压器故障诊断方法研究

朱益

(国网江苏省电力有限公司无锡供电分公司)

【摘要】变压器在电力系统中占据关键地位，其安全稳定运行直接关乎整个电网的可靠性，传统变压器故障诊断方法存在灵敏度不高、误判率较大等局限。随着机器学习技术发展，基于智能算法的故障诊断方法成为研究热点，其中基于ISO-LSSVM的变压器故障诊断方法因具备良好泛化能力和非线性处理能力备受关注。文章首先对变压器常见故障类型（如过热故障、放电故障、绝缘受潮、机械故障）进行分析，并提取油中溶解气体分析、电气试验参数、温度参数等故障特征，同时对特征数据进行归一化、缺失值和异常值处理等预处理。接着构建基于ISO-LSSVM的故障诊断模型，利用隔离森林进行异常检测和特征选择，通过LSSVM进行故障分类，阐述了模型设计思路、参数选择与优化以及训练与验证过程。最后通过某电力公司1000组变压器故障数据进行实验验证，将其分为700组训练集和300组验证集，与传统SVM和BP神经网络对比，结果显示该方法准确率达92%、召回率为90%、F1值为91%，具有较高诊断准确率和良好泛化能力，为电力系统安全稳定运行提供保障，未来可结合更多故障特征和优化算法进一步提升性能。

【关键词】变压器故障诊断；ISO-LSSVM；故障特征提取；参数优化；实验验证

中图分类号：TM407;TP18

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.147

Research on Transformer Fault Diagnosis Methods Based on ISO-LSSVM

ZHU Yi

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Wuxi Power Supply Branch)

【Abstract】Transformer occupies a key position in the power system. Its safe and stable operation is directly related to the reliability of the entire power grid. The traditional transformer fault diagnosis method has limitations such as low sensitivity and a relatively high misjudgment rate. With the development of machine learning technology, the fault diagnosis method based on intelligent algorithms has become a research hotspot. Among them, the transformer fault diagnosis method based on ISO-LSSVM has attracted much attention because of its good generalization ability and nonlinear processing ability. This paper first analyzes the common fault types of the transformer (such as overheating fault, discharge fault, insulation moisture, mechanical failure), and extracts the fault characteristics such as dissolved gas analysis, electrical test parameters, temperature parameters, etc. in the oil, and preprocesses the characteristic data such as normalization, missing values and abnormal values. Then, a fault diagnosis model based on ISO-LSSVM is built, anomaly detection and feature selection are used for isolated forests, and fault classification is carried out through LSSVM. The model design ideas, parameter selection and optimization, and training and verification process are expounded. Finally, through the experimental verification of 1000 sets of transformer fault data of a power company, it is divided into 700 sets of training sets and 300 sets of verification sets. Compared with traditional SVM and BP neural networks, the results show that the accuracy rate of this method is 92%, the recall rate is 90%, and the F1 value is 91%. It has a high diagnostic accuracy rate and good generalization ability, which provides a guarantee for the safe and stable operation of the power system. In the future, more fault characteristics and optimization algorithms can be combined to further improve the performance.

【Keywords】transformer fault diagnosis; ISO-LSSVM; fault feature extraction; parameter optimization; experimental verification

1 引言

变压器在电力系统中发挥着不可或缺的核心作用，其稳定安全运行直接影响整个电网的稳定性。

目前变压器故障诊断技术主要包括振动法、油纸绝缘电阻法、红外测温法等，但这些传统检测手段在实际应用中存在诸多不足，难以适配现代电力生产的需求。因此，实现变压器故障的精准高效诊断，在实际应用中具有不可忽视的重要意义。

针对传统诊断方法的不足，本文提出一种新型变压器故障检测与诊断模型——智能融合决策系统。该系统中，基于ISO-LSSVM (Isolation-Least Squares Support Vector Machine, 隔离最小二乘支持向量机)的变压器故障检测技术是核心组成部分。该诊断模型在解决传统神经网络收敛速度慢、易陷入局部最优解等问题上效果显著。本文深入探讨基于ISO-LSSVM的变压器故障检测技术，并结合真实

案例验证其实用性^[1]。

2 变压器故障类型与特征分析

2.1 常见故障类型

变压器最常见的四种故障包括过热故障、放电故障、绝缘受潮和机械故障四类,其中过热故障、放电故障都会对破坏变压器的绝缘造成重大损害;绝缘受潮后水分渗透到变压器的内部,有可能导致绝缘性能下降、介质损耗增加等相关故障;机械故障如绕组的变形或固定件的松动等,都可能对变压器的电气特性和整体的机械稳定性带来不利的影响。

2.2 故障特征提取

为了准确诊断变压器故障,需要提取能够反映故障类型的特征参数。

油中溶解气体分析(DGA):变压器内部故障会使绝缘油和固体绝缘材料分解产生多种气体,如氢气(H₂)、甲烷(CH₄)、乙烷(C₂H₆)等。不同故障类型产生的气体种类和含量不同,通过分析这些气体的含量和比例可以判断故障类型。

电气测试的各种参数,例如绕组的直流电阻、绝缘电阻等,这些参数的波动能够有效地反映出变压器电气性能是否处于正常范围内。

温度参数:变压器的油温、绕组温度等都是反映其运行状态的重要指标,异常的温度变化可能预示着故障的发生。

2.3 故障特征数据预处理

在进行故障诊断之前,需要对提取的故障特征数据进行预处理,以提高数据质量和诊断模型的性能。

归一化处理:将不同范围的特征数据映射到[0,1]或[-1,1]区间,消除数据量纲的影响^[2]。

缺失值处理:对于数据中存在的缺失值,可以采用均值填充、中位数填充或插值法等方法进行处理。

异常值处理:通过统计分析或基于机器学习的方法识别并剔除异常值,避免影响诊断结果^[3]。

3 基于ISO-LSSVM的变压器故障诊断模型构建

3.1 模型设计思路

ISO-LSSVM结合了隔离森林(Isolation Forest)

和最小二乘支持向量机(LSSVM)的优点。首先,利用隔离森林对故障特征数据进行异常检测和特征选择,筛选出对故障诊断最具区分度的特征。

筛选出重要特征后,使用LSSVM进行故障分类。LSSVM的优化问题可以表示为: $\min_{w,b,\xi} J(w,\xi) =$

$$\frac{1}{2} w^T w + \frac{C}{2} \sum_{i=1}^n \xi_i^2$$

$$\text{s.t. } y_i (w^T \varphi(x_i) + b) = 1 - \xi_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式(1)中: w 是权重向量, b 是偏置, ξ_i 是松弛变量, C 是惩罚因子, $\varphi(x)$ 是将输入数据 x 映射到高维特征空间的非线性映射函数。

引入拉格朗日乘子,可以得到LSSVM的对偶问题:

$$\max_{\alpha} W(\alpha) = \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, x_j)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0, 0 \leq \alpha_i \leq C, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式(2)中: $K(x_i, x_j) = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j)$ 是核函数,常用的核函数有径向基核函数(RBF):

$$K(x_i, x_j) = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j) \quad (3)$$

求解对偶问题得到 α 和 b 后,LSSVM的决策函数为:

$$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(x, x_i) + b\right) \quad (4)$$

3.2 模型参数选择与优化

在ISO-LSSVM模型中,常用的参数优化技术包括网格搜索方法和粒子群优化算法(PSO)。前者采用简单有效的随机搜索算法,后者则需要大量计算时间。以PSO为研究对象,它的核心理念是模仿鸟类的觅食模式,在参数空间里寻找最佳的参数组合^[5]。

设粒子的位置向量为 $X_i = (C_i, \sigma_i)$

速度向量为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}), i = 1, 2, \dots, m$

m 为粒子数量。每个粒子的适应度值根据交叉验证的准确率计算。

粒子的更新公式为:

$$V_{id}(t+1) = w V_{id}(t) + c_1 r_1 (p_{id} - X_{id}(t)) + c_2 r_2 (g_d - X_{id}(t)) \quad (5)$$

式(5)中: w 是惯性权重, c_1 和 c_2 是学习因子, γ_1 和 γ_2 是[0,1]区间的随机数, p_{id} 是粒子的历史最优位置的第 d 维分量, g_d 是全局最优位置的第 d 维分量。

3.3 模型训练与验证

将预处理后的故障特征数据划分为训练集和验证集,比例一般为7:3或8:2。

使用训练集对ISO-LSSVM模型进行训练,根据优化后的参数构建模型,计算模型的权重向量和偏置。

使用验证集对训练好的模型进行验证,计算模型的准确率、召回率、F1值等评价指标。准确率的计算公式为:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (6)$$

式(6)中:TP是真正例数量,TN是真反例数量,FP是假正例数量,FN是假反例数量。

4 案例分析与实验验证

为验证基于ISO-LSSVM的变压器故障诊断方法的有效性,选取某电力公司的变压器故障数据展开实验。实验数据共1000组样本,其中700组作为训练集,300组作为验证集,故障类型涵盖过热故障、放电故障、绝缘受潮和机械故障四类。

实验过程中,首先对数据进行预处理,运用归一化处理将特征数据映射到[0,1]区间。随后,使用ISO-LSSVM模型进行故障诊断,设置隔离森林的树数量为100,树深度为10,并利用PSO算法对LSSVM的惩罚因子c和核函数参数进行优化,经多次迭代确定最优参数C=100。利用训练集对模型进行训练得到训练好的ISO-LSSVM模型,用其对验证集进行分析,同时与传统的支持向量机(SVM)和BP神经网络进行对比^[1]。

表1 SVM和BP神经网络的准确率、召回率和F1值

模型	准确率/%	召回率/%	F1值/%
ISO-LSSVM	92	90	91
SVM	80	78	79
BP神经网络	85	82	83.5

从表1中不同模型的性能指标数据来看,在变压器故障诊断中,ISO-LSSVM模型展现出了显著优势。其准确率达到92%,意味着该模型能够准确识别出故障类型的比例较高;召回率为90%,表明模型对实际存在的故障能够有效检测出来;F1值为91%,综合体现了模型在精准度和召回率之间的平衡表现良好^[4]。相比之下,SVM模型的准确率为80%,召回率78%,F1值79%,各项指标均低于ISO-LSSVM模

型,反映出其在故障诊断的准确性和全面性上有所不足。BP神经网络虽然在准确率上达到85%,召回率82%,F1值83.5%,比SVM表现稍好,但与ISO-LSSVM相比仍有差距。这充分说明,在变压器故障诊断任务中,ISO-LSSVM模型在故障识别的准确性、完整性以及综合性能方面,相较于传统的SVM和BP神经网络具有明显的优越性,更能满足实际应用中的需求^[5]。

5 结语

本文对基于ISO-LSSVM的变压器故障诊断方法,采用数据预处理方法,构建了基于ISO-LSSVM的故障诊断模型,详细阐述了模型的设计思路、参数选择与优化以及训练与验证过程。

通过实际案例分析和实验验证,结果表明基于ISO-LSSVM的变压器故障诊断方法具有较高的诊断准确率和良好的泛化能力,能够有效地诊断变压器故障,为电力系统的安全稳定运行提供了有力保障。未来,可以进一步研究如何结合更多的故障特征和优化算法,提高模型的性能和实用性。

参考文献

- [1] 王普, 武翠霞, 高学金, 等. 一种基于ISOA-LSSVM的地铁站空调系统能耗预测方法. CN201710098913.5[2025-02-20].
- [2] 高学金, 付龙晓, 武翠霞, 等. 基于ISOA的LS-SVM地铁站空调系统能耗预测模型[J]. 计算机与现代化, 2018(10): 36-43.
- [3] 周利军, 员秀程, 王东阳, 等. 基于电压阻尼振荡的变压器故障绕组识别方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(10): 3218-3231.
- [4] 李雷军, 吴超, 付华, 齐致, 王久阳. 基于油中溶解气体分析的ISSA优化LSSVM变压器故障诊断研究[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(10): 84-94.
- [5] 谢国民, 刘东阳, 刘明. 多策略改进MPA算法与HKELM的变压器故障辨识[J]. 电子测量与仪器学报, 2023(4): 172-182.