

基于 PSO 优化 CNN 的四象限脉冲整流器 故障诊断技术研究

陈润泽*

[大连交通大学 詹天佑学院(中车学院), 辽宁 大连 116028]

Research on Fault Diagnosis Technology for Four-Quadrant Pulse Rectifiers Based on PSO-Optimized CNN

Chen Runze*

[Zhan Tianyou College (CRRC College), Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China]

Abstract: [Objective] Open-circuit faults of insulated-gate bipolar transistor (IGBT) in four-quadrant pulse rectifiers exhibit strong concealment characteristics, which can inevitably induce grid-side current distortion, power factor degradation, and DC-side voltage fluctuation. Traditional convolutional neural network (CNN) model applied to fault diagnosis is restricted by low diagnosis accuracy and easy trapping in local optimal solutions. To address these limitations, this paper adopts the particle swarm optimization (PSO) algorithm and proposes an intelligent fault diagnosis method integrating wavelet transform and the PSO-CNN. [Methods] Firstly, a single-phase two-level four-quadrant pulse rectifier model was established based on Simulink. Seven graded voltage fluctuation operating conditions and ten different IGBT open-circuit fault states were set to simulate complex and realistic equipment operation scenarios. Subsequently, grid-side current and DC-side voltage signals were collected. A six-layer wavelet decomposition was performed on the signals using the db3 wavelet basis, and normalized feature vectors were constructed by combining the frequency band energy coefficients. Considering the feature differences between current and voltage signals, a dual-channel CNN was built to extract fault features of grid-side current and DC-side voltage respectively. On this basis, the PSO algorithm was introduced to adaptively optimize the key hyperparameters of the CNN. [Results] Weighted F1-score and confusion matrix were taken as quantitative evaluation metrics for model performance, and comparative tests were conducted between the proposed PSO-CNN model and the traditional CNN model. The experimental results showed that compared with the traditional CNN model, the PSO-CNN model increased the weighted F1-score from 0.45 to 0.92. It

effectively reduced the misclassification of faults with overlapping features and maintained stable fault diagnosis performance under voltage fluctuation conditions, with only minor recognition deviations in a small number of highly similar fault categories. [Conclusion] The combination of wavelet transform and PSO algorithm significantly enhance the feature extraction ability and classification reliability of the CNN model. The presented intelligent diagnosis method is suitable for real-time condition monitoring of four-quadrant pulse rectifiers, and it provide a feasible and reliable technical reference for intelligent operation and maintenance as well as performance improvement of various power electronic conversion devices.

Key words: particle swarm optimization; convolutional neural network; four-quadrant pulse rectifier; fault diagnosis

摘要: [目的]四象限脉冲整流器绝缘栅双极型晶体管(IGBT)开路故障具有较强隐蔽性,极易引发网侧电流畸变、功率因数衰减及直流母线电压波动。应用于故障诊断领域的传统卷积神经网络(CNN)模型存在诊断精度低、易陷入局部最优解的缺陷。针对上述问题,本文引入粒子群优化(PSO)算法,提出一种融合小波变换与 PSO-CNN 的智能故障诊断方法。【方法】首先基于 Simulink 搭建单相两电平四象限脉冲整流器模型,设置 7 种梯度电压波动工况与 10 种不同的 IGBT 开路故障状态,模拟复杂、真实的设备运行场景。随后采集网侧电流与直流侧电压信号,采用 db3 小波基对信号进行 6 层小波分解,并结合频带能量系数构建标准化特征向量。考虑到电流与电压信号的特征差异,构建双通道 CNN,分别提取网侧电流与直流侧电压的故障特征。在此基础上,引入 PSO 算法对 CNN 关键超参数进行自适应优化。【结果】选取加权 F1 分数与混淆矩阵作为模型性能的定量评价指标,将所提

PSO-CNN 模型与传统 CNN 模型进行对比。试验结果表明,相较于传统 CNN 模型,PSO-CNN 模型可将加权 F1 分数由 0.45 提升至 0.92,且能有效改善特征重叠故障的误分类问题,在电压波动工况下仍可保持稳定的故障诊断能力,仅在少量高度相似的故障类别中存在轻微识别偏差。【结论】小波变换与 PSO 算法相结合,显著提升了 CNN 模型的特征提取能力与分类可靠性。所提智能诊断方法适用于四象限脉冲整流器的实时状态监测,可为各类电力电子变流装置的智能运维与性能优化提供可行、可靠的技术参考。

关键词: 粒子群优化;卷积神经网络;四象限脉冲整流器;故障诊断

0 引言

四象限脉冲整流器作为电力电子领域的关键设备,凭借能量双向流动、运行效率高等优势,被广泛应用于电机驱动、电能质量调控以及新能源系统^[1-2]。该设备工况复杂、运行环境多变,易出现器件损坏与外界干扰问题,其中绝缘栅双极型晶体管(Insulated-Gate Bipolar Transistor, IGBT)开路故障最为常见。IGBT 开路故障隐蔽性强^[3-4],会造成网侧电流畸变、功率因数下降以及直流电压波动,同时引发后端逆变器电流失衡、谐波增大,导致电机转矩不稳定^[5]。此类故障不会直接造成系统停机,但长期故障运行会恶化设备性能,极易诱发二次故障,严重威胁牵引传动系统安全^[6-7]。

卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)具备优异的特征自主提取能力^[8],能够捕捉波形畸变、频率波动等细微故障特征,且能凭借局部连接、参数共享机制减少参数量、降低过拟合风险,现已广泛应用于工业故障诊断领域^[9]。为进一步解决传统人工调参主观性强、模型精度低且易陷入局部最优的问题,本文引入粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法。PSO 算法结构简单、收敛速度快且寻优能力强,无需遗传算法的交叉、变异操作,可依靠个体最优与全局最优粒子更新位置,完成超参数自适应寻优。在此基础上,结合小波变换优异的时频分析能力,构建 PSO-CNN 故障诊断模型,实现四象限脉冲整流器 IGBT 开路故障的高精度识别,为电力电子设备智能诊断提供技术参考^[10]。

1 四象限脉冲整流器 IGBT 故障分析与工况选取

1.1 四象限脉冲整流器 IGBT 故障分析

四象限脉冲整流器拓扑如图 1 所示。图中, U_N 、 I_N 、 L_N 和 R_N 分别为网侧电压、电流、滤波电感和等效电阻; i_{dc} 为直流母线电流; L_2 、 C_2 分别为二次滤波电感、二次滤波电容; i_2 为 LC 支路电流; C_d 为支撑电容; i_c 为流过 C_d 的电流; i_d 为负载电流。

四象限脉冲整流器正常运行时,网侧输出电流呈正弦波形^[11],但是当 IGBT 的开关管 T1~T4 发生开路故障时,网侧电流、直流侧电压波形会发生变化,输出电流呈非正弦波形^[12],因此可以通过检测网侧电流、直流侧电压,得到各个故障情况的波形图^[13]。四象限脉冲整流器 IGBT 运行状态可以分为无故障、单管故障(T1、T2、T3、T4)以及双管故障三类。其中,双管故障分为同一桥臂故障(T1T2、T3T4)、上桥臂故障(T1T3)、下桥臂故障(T2T4)以及交叉桥臂故障(T1T4、T2T3)四类。因此四象限脉冲整流器 IGBT 开路故障类型有 10 类^[14-15]。

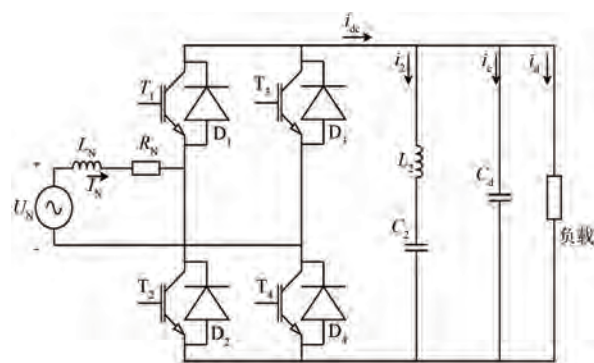


图 1 四象限脉冲整流器拓扑图

Fig. 1 Topology diagram of four-quadrant pulse rectifier

每个 IGBT 内部通常寄生一个反向导通的续流二极管,以提供感性负载产生的反向电流路径^[16],实现能量的双向流动与电流的连续性。与 IGBT 相比,续流二极管作为被动器件,其寄生于 IGBT 内部或以模块形式外接,导通过程不依赖控制信号,而是由电路自然响应触发,工作过程短、热应力小^[17],发生开路故障的概率远低于 IGBT。此外,若续流二极管发生开路故障,将导致负载电流无法续流,进而引发母线电压尖峰、电路失衡甚至系统保护停机,使整流器难以继续运行并掩盖

波动的适应性与故障诊断的鲁棒性。

Grid Voltage (kV)	Power Output (%)
18	0
19	84
22.5	100
29	100
31	0

图 2 网压-功率发挥百分比曲线

Fig. 2 Grid voltage-power utilization percentage curve

2.1 四象限脉冲整流器建模

在 Matlab/simulink 中建立单相两电平四象限脉冲整流器模型,如图 3 所示,并采用前馈直接电流控制^[18],如图 4 所示。仿真时间设置为 1 s,求解器类型为变步长 ode45。图中, i_N 、 u_N 分别为示波器采集的网侧电流、直流侧电压; i_{N1} 为送入控制模块的网侧电流反馈信号; V_{dc} 、 V_{dc}^* 分别为直流侧电压、直流侧电压参考值; i_{N2} 为网侧电流前馈变量; u_{N1} 为网侧电压前馈变量。

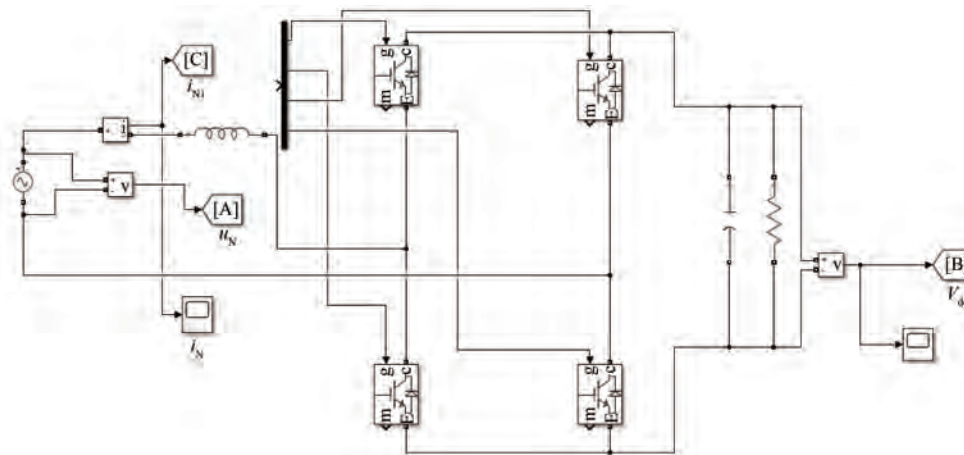


Fig. 3 Single-phase two-level four-quadrant pulse rectifier model

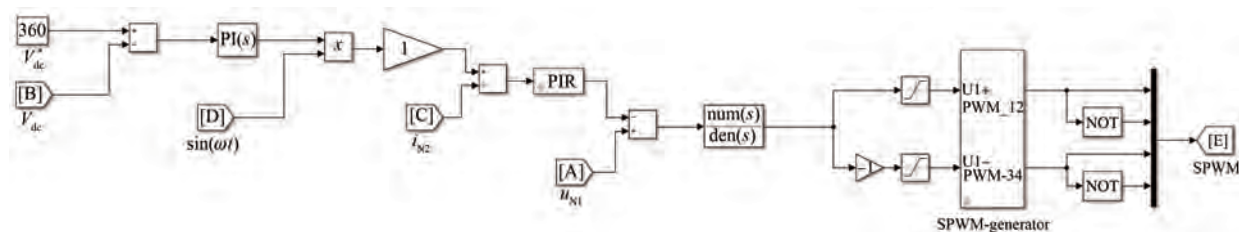


Fig. 4 Feedforward direct current control block diagram

以工况 1 为例, 设置交流侧电压为 722.5 V, 改变前馈直接电流控制策略中直流侧电压参考值、比例积分 (Proportional-Integral, PI) 控制器增益以及带宽以保证控制策略的稳定, 采集正常状态下的网侧电流、直流侧电压信号, 如图 5

所示。在 722.5 V 电压工况下, 设置四象限脉冲整流器 IGBT 的 10 种故障类型, 得到对应故障状态下的网侧电流和直流侧电压波形。以 T1 开路为例, 网侧电流和直流侧电压波形如图 6

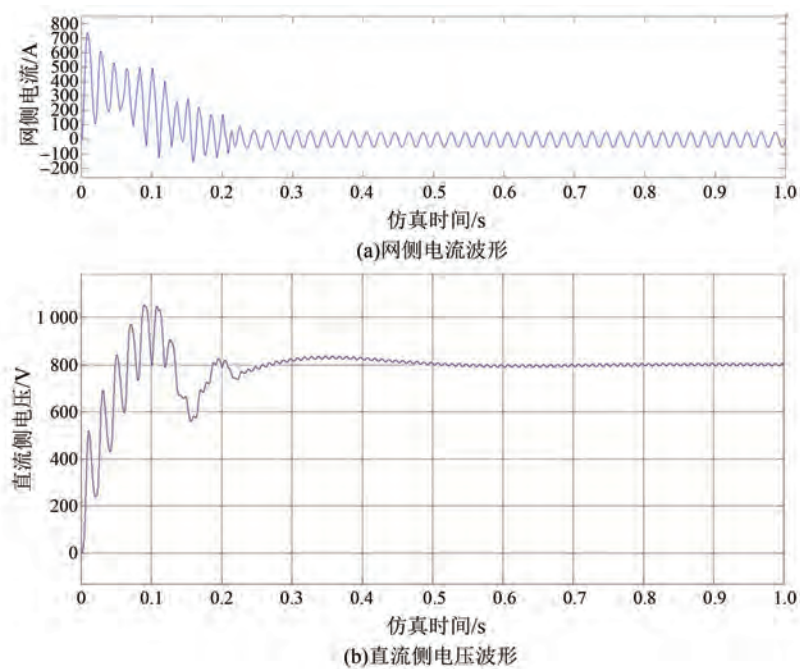


图 5 正常状态下的网侧电流和直流侧电压波形

Fig. 5 Waveforms of grid-side current and DC-side voltage under normal operating conditions

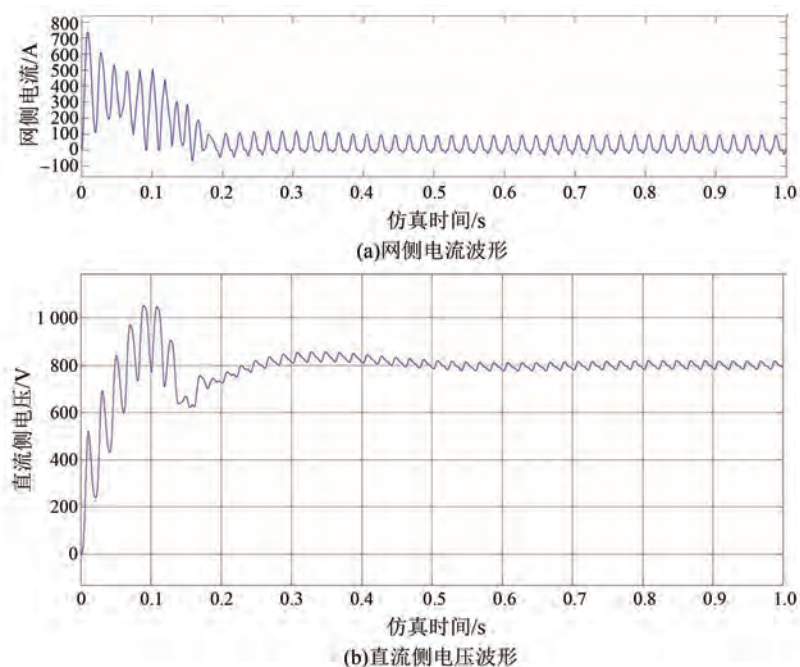


图 6 T1 开路故障下的网侧电流和直流侧电压波形

Fig. 6 Waveforms of grid-side current and DC-side voltage under T1 open-circuit fault

2.2 小波变换与能量分析

小波变换在信号处理中优势显著,可精准捕捉信号的时频特征,尤其适配瞬态、突发等非平稳信号处理^[19]。小波变换将信号分解为不同尺度、频率的小波函数,实现时频分析、去噪、分解与重构,被广泛应用于音视频及图像处理领域^[20]。

在 Matlab 中借助小波工具箱对信号进行小波变换编程,以 `simData` 变量名定义网侧电流,以 `simData1` 变量名定义直流侧电压,记录数据点时间并导出波形图。结合前馈直接电流控制策略的响应时间,选取 0.25~1 s 为有效分析时段,如图 7 所示。

采用 db3 小波基对信号进行 6 层小波分解,得到 T1 开路故障下的网侧电流和直流侧电压小波分解图,如图 8 所示。小波分解聚焦信号时域局部特征与几何形态变化,分解图横轴以采样点序号替代绝对时间/频率,可直观呈现信号多尺度局部细节,不受采样率与时间刻度限制。采样频率设为 10^5 Hz。

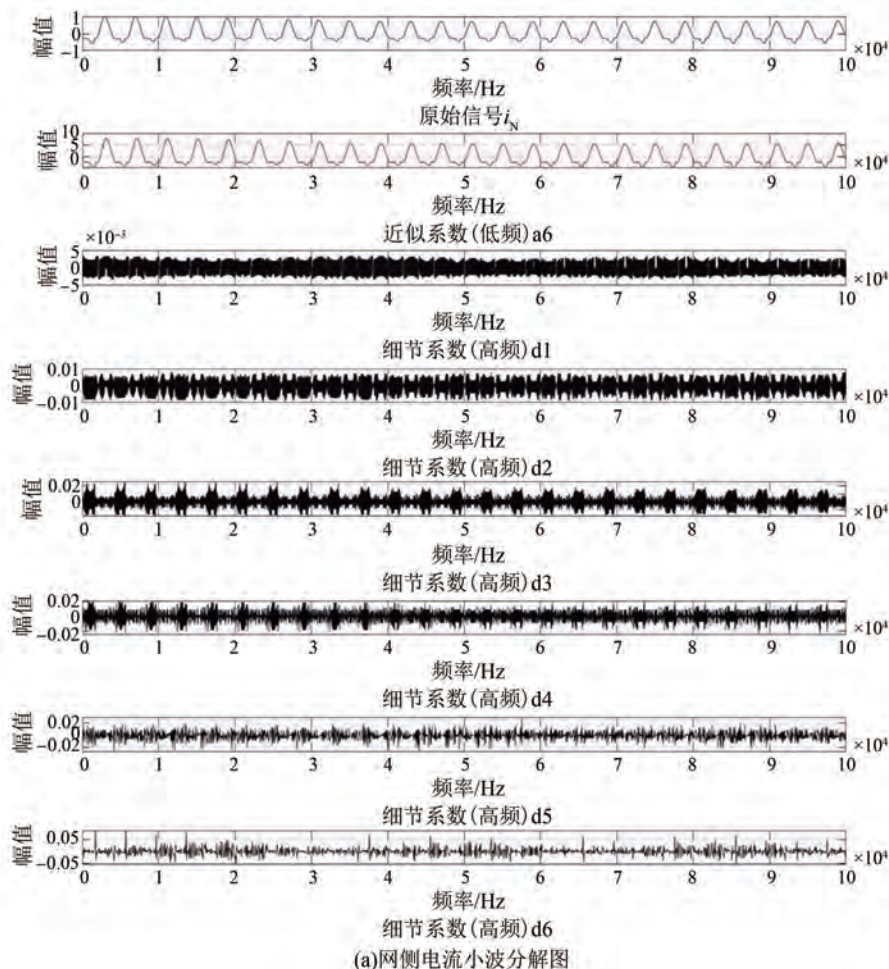
图 8 中各分解结果自上而下依次为原始信号、近似系数 a_6 及细节系数 $d_1 \sim d_6$,各频段划分如表 1 所示。



图 7 网侧电流配置数据属性

Fig. 7 Data attributes of grid-side current configuration

正常状态下网侧电流小波分解图如图 9 所示。用同样的处理方法,对其余电压工况下的直流侧电压及网侧电流进行小波分解。



(a)网侧电流小波分解图

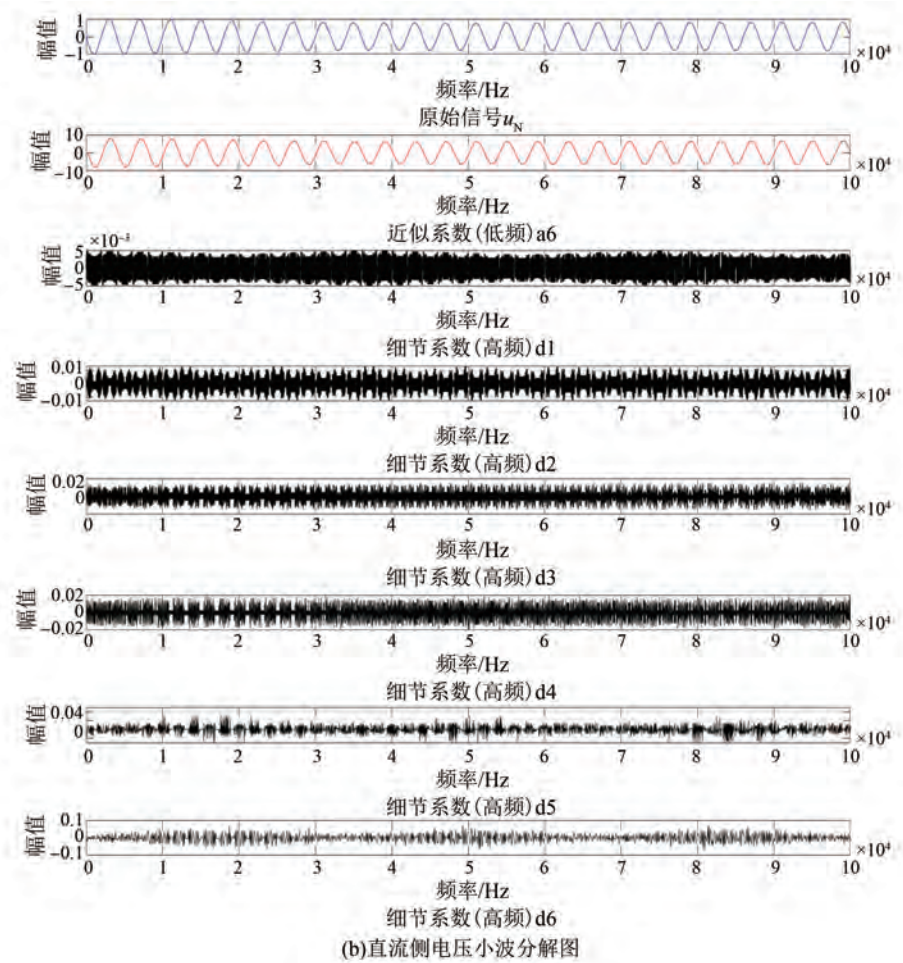


图 8 T1 开路故障下的网侧电流和直流侧电压小波分解图

Fig. 8 Wavelet decomposition diagrams of grid-side current and DC-side voltage under T1 open-circuit fault

表 1 6 层小波分解的频段划分

Tab.1 Frequency band division of 6-level wavelet decomposition

系数	频率范围/Hz	物理含义
d1	25 000~50 000	最高频分量, 噪声、尖峰突变
d2	12 500~25 000	次高频分量, 快速波动成分
d3	6 250~12 500	中高频分量, 中速波动成分
d4	3 125~6 250	中频分量, 周期性波动成分
d5	1 562.5~3 125	中低频分量, 次谐波成分
d6	781.25~1 562.5	低频细节分量, 慢变化成分
近似系数	a6	最低频轮廓分量, 信号的整体趋势

2.3 故障特征向量提取

经过小波变换后,故障波形被分解为多个频带,但这些系数维度高、信息冗余^[21]。通过计算能量系数可以提取各频带的主要特征,突出故障差异,降低数据维度,便于神经网络高效学习和分类^[22]。对工况 1 小波分解得到的 6 个高频段、1 个低频段信号进行能量系数分解,如式(1)所示:

$$E_j = \begin{cases} \sum_{k=1}^n |d_j(k)|^2, j = 1, 2, \dots, 6 \\ \sum_{k=1}^n |a_6(k)|^2, j = 7 \end{cases} \tag{1}$$

根据式(1)通过小波分解以及能量变换得到正常状态以及 10 种开路故障状态对应的能量系数。表 2 和表 3 为第二档位即 785.6 V 网压工况时的网侧电流能量系数和直流侧电压能量系数。

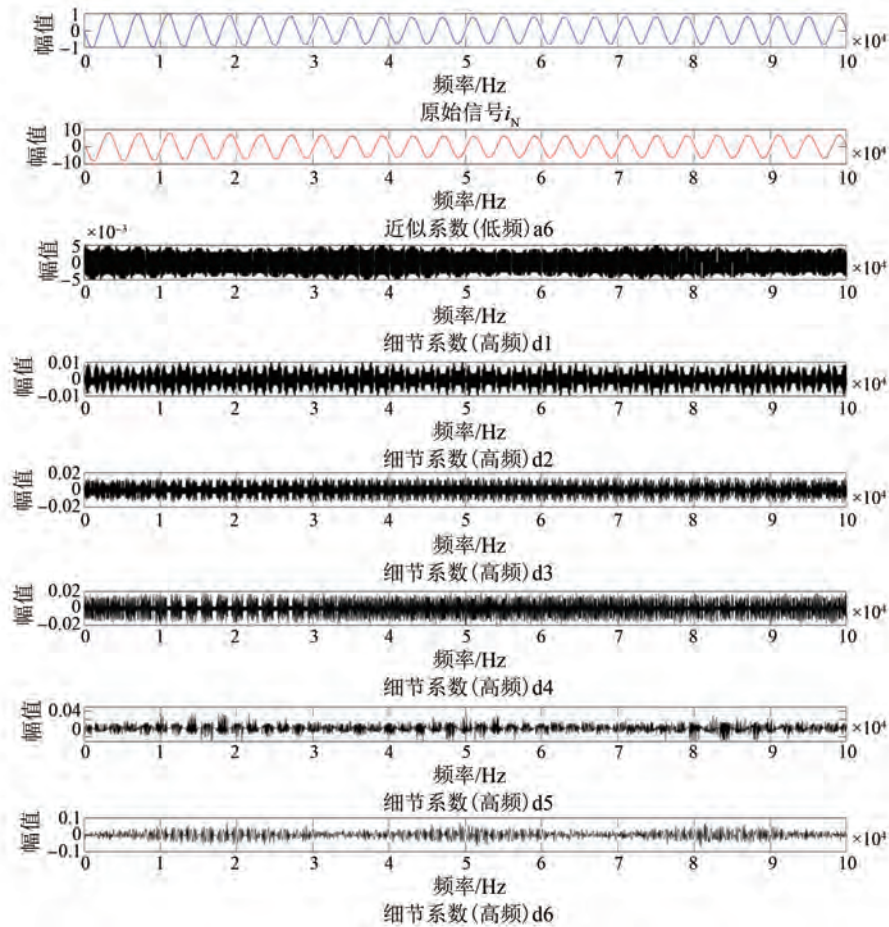


图 9 正常状态下网侧电流小波分解图

Fig. 9 Wavelet decomposition of grid-side current under normal operating conditions

表 2 网侧电流能量系数

Tab. 2 Energy coefficients for grid-side current

状态	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7
正常	0.371 6	1.381 8	0.735 1	0.679 7	0.371 9	1.133 9	48 900.352 2
T1	0.134 5	0.565 4	0.993 4	0.512 3	0.224 2	0.517 9	24 216.760 2
T2	0.090 3	0.376 2	0.626 8	0.331 4	0.148 4	0.325 9	16 174.051 3
T3	0.091 2	0.379 1	0.636 1	0.332 6	0.150 7	0.323 9	16 313.660 7
T4	0.134 9	0.566 9	0.990 5	0.515 8	0.234 5	0.534 9	24 281.583 5
T1T2	0.083 5	0.584 1	3.826 3	1.324 2	0.751 2	4.379 6	33 490.672
T3T4	0.084 8	0.593 5	3.889 4	1.347 7	0.717 9	4.288 2	34 023.779 2
T1T3	0.083 3	0.589 8	3.891 6	1.307 7	0.756 9	4.326 6	33 861.608 1
T2T4	0.083 9	0.587 3	3.815 2	1.355 8	0.717 5	4.369 9	33 580.839 7
T1T4	0.120 2	0.438 8	0.233 9	0.186 9	0.087 7	0.288 3	21 220.578 2
T2T3	0.095 6	0.354 1	0.186 2	0.150 6	0.071 4	0.232 4	16 487.141 4

3 基于 PSO 的 CNN 的四象限脉冲整流器故障模型

3.1 PSO 算法过程

PSO 算法从一群随机生成的粒子(即潜在的解决方案)开始,通过一系列迭代过程寻找问题的最优解。在每一轮迭代中,每个粒子都会根据个体最优位置和整个粒子群的全局最优位置来调整自己的状态。粒子的速度和位置更新表达式为

$$\begin{aligned}v_i &= v_i + c_1 rand \times (pb_i - X_i) + \\&\quad c_2 rand \times (gb - X_i) \\X_i &= v_i + X_i\end{aligned}\tag{2}\tag{3}$$

式中: $i=1,2,\cdots,N,N$ 为粒子群中的粒子总数; v_i 为粒子 i 的速度, v_i 的最大值为 $v_{\max}>0$,如果 $v_i>v_{\max}$,则 $v_i=v_{\max}$; $rand$ 为 $[0,1]$ 内均匀分布的随机数; X_i 为粒子的当前位置; c_1 和 c_2 为学习因子,通常 $c_1=c_2=2$; pb_i 为粒子 i 的个体最优位置; gb 为整个粒子群的全局最优位置。

表 3 直流侧电压能量系数

Tab. 3 Energy coefficients for DC-side voltage

状态	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7
正常	0.003 7	0.002 1	0.002 2	0.000 8	0.004 5	0.034 8	10 664.368 4
T1	0.001 8	0.001 2	0.001 2	0.000 4	0.002 1	0.018 4	9 020.911 2
T2	0.000 7	0.000 5	0.000 5	0.000 2	0.000 8	0.007 1	7 743.056 3
T3	0.000 7	0.000 5	0.000 5	0.000 2	0.000 8	0.007 0	7 747.117 2
T4	0.001 8	0.001 2	0.001 2	0.000 4	0.002 1	0.018 3	9 031.799 8
T1T2	0.014	0.086 3	0.028 7	0.009 4	0.030 2	0.403 6	7 496.365 1
T3T4	0.015	0.092 5	0.030 8	0.009 5	0.032 0	0.433 8	7 924.609 9
T1T3	0.014 7	0.090 1	0.031 2	0.009 6	0.031 3	0.426 2	7 949.439 3
T2T4	0.014 2	0.088 4	0.028 2	0.009 2	0.030 7	0.412 3	7 545.592 8
T1T4	0.001 8	0.001 1	0.001 2	0.000 5	0.002 0	0.015 6	10 178.003 6
T2T3	0.000 7	0.000 4	0.000 4	0.000 2	0.000 7	0.005 5	7 536.159 2

根据式(2)和式(3)得到 PSO 的标准形式,如式(4)所示:

$$\begin{aligned}v_i &= \omega v_i + c_1 rand \times (pb_i - X_i) + \\&\quad c_2 rand \times (gb - X_i)\end{aligned}\tag{4}$$

式中: ω 为惯性因子, $\omega>0$ 。

ω 较大,全局寻优能力强,局部寻优能力弱; ω 较小,全局寻优能力弱,局部寻优能力强。

本文构建基于 CNN 的故障诊断模型,并引入 PSO 算法对关键超参数进行寻优,以提升模型分类精度^[23]。针对网侧电流通道的 PSO 算法优化卷积核数量、卷积核大小及 Dropout 层参数^[24];针对直流侧电压通道,PSO 算法优化全连接层神经元数量与 Dropout 层参数。其中,全连接层神经元数量决定电压特征的非线性表达能力,Dropout 层用于提升模型的泛化能力^[25]。模型以验证集加权 F1 分数作为适应度函数,通过 PSO 算法高效遍历超参数空间,自动获取最优超参数组合。

3.2 模型训练与验证

本文模型训练及验证均采用 Python 编程语言开发环境,试验用计算机配置为 Intel core i5-13600KF CPU、16G 内存。选用加权 F1 分数与混淆矩阵作为预测模型性能的定量评价指标,将本文所提 PSO-CNN 模型与传统 CNN 模型进行比较^[26],结果如图 10 所示。

由图 10(a)可知,利用 PSO 算法优化超参数后,F1 分数从 0.45 上升到 0.92,说明所提 PSO-CNN 模型对各类故障的判断更准、稳定性更高且泛化能力更强。

由图 10(b)可知,大部分故障都能被正确识别,11 类里有 8 类完全没出错,说明模型对这些故障的判断很可靠。但也有几类故障容易混淆,例如 T1T4 和 T3、T4 和 T1T3、T2T4 和正常,后续可通过特征增强或样本重采样进一步提升模型的分辨能力^[27]。整体而言,该混淆矩阵验证了优化

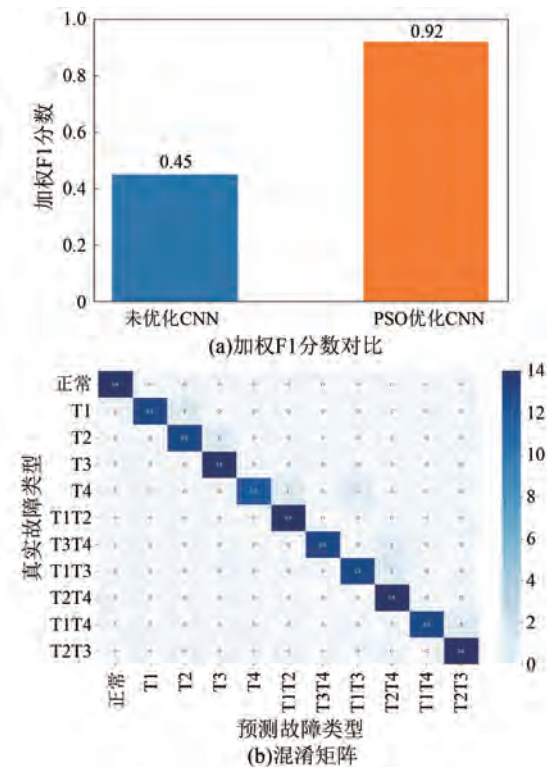


图 10 两种神经网络模型预测结果对比

Fig. 10 Comparison of prediction results for two neural network prediction models

后模型的高精度识别能力和较强的泛化能力,具备实际应用的可行性。

4 结语

针对四象限脉冲整流器易发生 IGBT 开路故障的实际问题,本文提出了一种融合小波变换与 PSO-CNN 的智能诊断方法。通过 Simulink 仿真构建典型故障数据集,并引入能量系数特征构建机制,显著提升了数据的可判别性与模型输入的时频特征表达能力。在此基础上,通过 PSO 算法对 CNN 模型结构参数进行全局优化,训练结果表明,优化后模型的加权 F1 分数由 0.45 提升至 0.92,在多个故障类别中实现了 100% 的识别准确率,模型在收敛速度、分类精度与鲁棒性方面均优于传统 CNN 模型。上述结果充分验证了所提方法在电力电子系统 IGBT 故障智能诊断中的有效性与实用性。该研究不仅为提升四象限脉冲整流器的健康状态感知能力提供了新的技术思路,也为电力电子系统的智能运维与可靠性保障提供了理论支撑与工程参考。

受制于试验硬件条件、平台建设成本与高压试验安全要求,本次研究仅基于仿真环境完成算法验证,后续可进一步搭建实物试验平台,采集 IGBT 开路故障实测信号,依托真实工况数据进一步完善模型测试,推动该诊断方法落地于轨道车辆四象限脉冲整流器实际工程场景。

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

本文为独立研究成果,全部研究工作由陈润泽独立完成,涵盖研究方案设计、文献调研梳理、仿真建模、仿真测试与数据采集、数据分析、稿件全文撰写、稿件修改与审核校对等全部工作流程。陈润泽已阅读并同意最终稿件提交。

This paper was an independent research achievement. All research work was completed solely by Chen Runze, including scheme design, literature research and sorting, simulation modeling, simulation testing and data collection, data analysis, manuscript writing, revision and review. Chen Runze has read the last version of paper and consented for submission.

参考文献

- [1] 李伟,李颖奇,候雷浩,等. 单相四象限整流器故障诊断方法研究[J]. 电气传动, 2024, 54(10): 90-96.
- Li W, Li Y Q, Hou L H, et al. Fault detection method research of single-phase four-quadrant rectifier [J]. Electric Drive, 2024, 54(10): 90-96.
- [2] 王敏,王莹,陈凯,等. 绝缘栅双极型晶体管故障检测方法: 综述与展望[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(8): 1-14.
- Wang M, Wang Y, Chen K, et al. Fault diagnosis of insulated gate bipolar transistors: Overview and prospect [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2024, 38(8): 1-14.
- [3] 党忆涵,徐传芳,王绍祖. 牵引整流器单管 IGBT 开路故障诊断[J]. 电机与控制应用, 2025, 52

- (3): 294-304.
- Dang Y H, Xu C F, Wang S Z. Open circuit fault diagnosis of single-tube IGBT in traction rectifier [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(3): 294-304.
- [4] 朱琴跃, 李姚霖, 谭喜堂, 等. 基于逆变器多模态输出电压的 IGBT 微小故障特征提取[J]. *电机与控制学报*, 2023, 27(1): 65-79.
- Zhu Q Y, Li Y L, Tan X T, et al. Extraction method for incipient fault characteristic parameters of IGBT based on multi-mode output voltage of inverter [J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(1): 65-79.
- [5] 赵金涛, 郭凯凯, 高雄, 等. 基于电流矢量分析的 PMSM 系统开路故障诊断方法[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(1): 64-73.
- Zhao J T, Guo K K, Gao X, et al. Open-circuit fault diagnosis method for PMSM systems based on current vector analysis [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(1): 64-73.
- [6] 王军, 丁荣军. 中国高速列车健康监测与管理: 进展及展望[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(2): 232-242.
- Wang J, Ding R J. Prognostics and health management of high-speed trains in China: Progress and prospect [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(2): 232-242.
- [7] 向超群, 李佳怡, 冯江华, 等. 城市轨道交通碳化硅三电平牵引变流器应用探索[J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(5): 2001-2013.
- Xiang C Q, Li J Y, Feng J H, et al. Exploration of application of three-level inverters based on wide bandgap devices in urban rail traction [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21(5): 2001-2013.
- [8] 施以旋, 毛庆洲, 戴焕云, 等. 基于电机振动的动车组牵引逆变器故障诊断研究[J]. *机车电传动*, 2024(2): 101-107.
- Shi Y X, Mao Q Z, Dai H Y, et al. Research on fault diagnosis of EMU traction inverter based on motor vibration [J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2025, 26(3): 25-31.
- [9] 王紫阳. 基于深度学习的 IGBT 健康状态评估及剩余寿命预测[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
- Wang Z Y. IGBT health status assessment and remaining useful life prediction based on deep learning [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023.
- [10] Chen H T, Jiang B, Ding S X, et al. Data-driven fault diagnosis for traction systems in high-speed trains: A survey, challenges, and perspectives [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(3): 1700-1716.
- [11] 翟道宇, 孙燕楠. 基于卷积神经网络和格拉姆角差场的四象限脉冲整流器故障诊断方法[J]. *电气技术*, 2025, 26(1): 23-32.
- Zhai D Y, Sun Y N. Fault diagnosis method for four-quadrant pulse rectifiers based on convolutional neural network and Gramian angular difference field [J]. *Electrical Engineering*, 2025, 26(1): 23-32.
- [12] 陈怡薇, 徐永海, 袁敞, 等. 基于切换调制策略的 ANPC 三电平逆变器开路故障诊断方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(2): 27-37.
- Chen Y W, Xu Y H, Yuan C, et al. Research on open-circuit fault diagnosis method of ANPC three-level inverter based on switching modulation strategy [J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(2): 27-37.
- [13] 姚芳, 陆乐, 王刘浏, 等. 基于输入电流和输出电压的 Vienna 整流器单管开路故障诊断方法[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(3): 82-89.
- Yao F, Lu L, Wang L L, et al. Method of single switch open circuit fault diagnosis in Vienna rectifier based on input currents and output voltage [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(3): 82-89.
- [14] 张权芝. 两电平牵引变流器系统多 IGBT 开路故障诊断方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- Zhang Q Z. Research on multiple open-circuit fault diagnosis method of IGBTs for two-level traction converter system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [15] 曹阅洋, 向大为, 李豪. 基于高频开关振荡的变流器非接触式状态监测技术研究[J]. *电气工程学报*, 2024, 19(3): 23-30.
- Cao Y Y, Xiang D W, Li H. Research on non-contact condition monitoring of converter IGBTs based on high-frequency switching oscillations [J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2024, 19(3): 23-30.
- [16] 袁文迁, 季一润, 袁茜, 等. 基于输运系数的 IGBT 开通瞬态过程耦合规律分析[J]. *电气工程*

- 学报, 2024, 19(3): 70-83.
- Yuan W Q, Ji Y R, Yuan X, et al. Analysis of the coupling relationship of IGBT turn-on transient process based on transport coefficient [J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(3): 70-83.
- [17] 刘人宽, 李辉, 于凯, 等. 焊接型 IGBT 器件封装状态监测方法分析[J]. 电工技术, 2022, 15: 71-78.
- Liu R K, Li H, Yu K, et al. Analysis of package condition monitoring method of wire-bonded IGBT devices [J]. Electrical Engineering, 2022, 15: 71-78.
- [18] 王保民, 杨九河, 周锦祥, 等. 基于 MBSE 的动车组牵引变流器研究[J]. 机车电传动, 2024, 6: 133-139.
- Wang B M, Yang J H, Zhou J X, et al. Research and analysis of traction converter for EMU based on MBSE [J]. Electric Drive for Locomotives, 2024, 6: 133-139.
- [19] 时维国, 吴宁. 基于小波包变换和 SVM 的三电平逆变器故障诊断[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(2): 91-95+100.
- Shi W G, Wu N. Fault diagnosis of three-level inverter based on wavelet packet transform and support vector machine [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(2): 91-95+100.
- [20] Kou L, Liu C, Cai G W, et al. Fault diagnosis for power electronics converters based on deep feedforward network and wavelet compression [J]. Electric Power Systems Research, 2020, 185: 106370.
- [21] 王卓. 基于小样本学习的高速列车牵引变流器故障诊断研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- Wang Z. Fault diagnosis of traction converters for high-speed trains based on small sample learning [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [22] 孔凡文, 毕贵红, 赵四洪, 等. 基于双模式分解多通道输入的 VSC-STATCOM 逆变器故障诊断模型[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(7): 103-118.
- Kong F W, Bi G H, Zhao S H, et al. Fault diagnosis model of VSC-STATCOM inverter based on dual-mode decomposition multi-channel input [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(7): 103-118.
- [23] 陈富昭. 基于多传感器融合的高速列车牵引变流器故障智能诊断技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- Chen F Z. Research on intelligent diagnosis technology of traction converter fault of high-speed train based on multi-sensor fusion [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [24] 杨静, 崔江, 周凡. 基于电流位置关系的 DSEG 整流器开路故障诊断算法[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(6): 44-56.
- Yang J, Cui J, Zhou F. Open-circuit fault diagnosis algorithm of DSEG rectifier based on current position relation [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(6): 44-56.
- [25] 杨雪松, 简捷, 陈思默, 等. 基于规则模型的牵引变流器故障诊断技术研究[J]. 铁道机车车辆, 2025, 45(4): 73-80.
- Yang X S, Jian J, Chen S M, et al. Research on fault diagnosis technology of traction converters based on rule models [J]. Railway Locomotive & Car, 2025, 45(4): 73-80.
- [26] 刘伟, 王澜, 易冠群. 基于多模态三支路异构融合的逆变器开路故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2026, 54(1): 71-82.
- Liu W, Wang L, Yi G Q. Research on open-circuit fault diagnosis of inverters based on multi-modal three-branch heterogeneous fusion [J]. Power System Protection and Control, 2026, 54(1): 71-82.
- [27] Li X D, Wang H Z, Cheng C, et al. A fault detection application based on transfer learning and probably approximately correct in traction systems of high-speed trains [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2026, 75: 3510613.

收稿日期:2026-05-13

收到修改稿日期:2026-06-18

作者简介:

陈润泽(1999—),男,硕士研究生,研究方向为牵引传动系统 PHM 技术,crz1253425938@163.com;

* 通信作者:陈润泽(1999—),男,硕士研究生,研究方向为牵引传动系统 PHM 技术,crz1253425938@163.com。