

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.02.046

# 基于优化 SVM 的 BUCK 电路故障诊断方法

许煜辰,王友仁,常烁

(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**核心功率器作为功率变换器的重要组成部分,一旦发生故障,直接影响电路的安全运行。为此设计核心功率器件的加速退化实验方案,采用加速退化实验中退化程度最为严重的电解电容和 SiC MOSFET 功率管代表 DC-DC 变换器的软故障器件。实验设定 5 种工况条件,分别采集每种工况条件下的 4 种电路信号。采用 ReliefF 算法对 48 维特征进行特征优选,采用粒子群算法优化支持向量机(PSO-SVM)进行故障分类,并与 SVM、KNN 分类算法进行对比分析,验证了所提方法的优越性。实验结果表明:PSO-SVM 故障诊断方法可以获得更高的故障诊断率。

**关键词:**功率变换器;SiC MOSFET 功率管;加速退化实验;PSO-SVM

**中图分类号:**TP306.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)02-0220-04

## Fault Diagnosis Method of BUCK Circuit Based on SVM Optimization

XU Yuchen, WANG Youren, CHANG Shuo

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** As an important part of the power converter, the failure of the core power converter will directly affect the safe operation of the circuit. Therefore, this paper designs the accelerated degradation experiment of core power devices, and the electrolytic capacitor and SiC MOSFET power tube with the most serious degradation degree in the accelerated degradation experiment are adopted to represent the soft fault devices of DC-DC converter. Five working conditions are set to collect four circuit signals under each working condition. Relief algorithm is used to optimize the 48-dimensional features, particle swarm algorithm is applied to optimally support vector machine (PSO-SVM) for fault classification, and comparison by SVM and KNN classification algorithm is conducted, which verifies the superiority of the proposed method. The experimental results show that the PSO-SVM fault diagnosis method can obtain higher fault diagnosis rate.

**Keywords:** power converter; SiC MOSFET power tube; accelerated degradation test; PSO-SVM

## 0 引言

功率变换器以其低噪声、高效率、高功率密度等优势,广泛应用于工业、轨道交通、航空航天等领域,担负着电能变换、电能控制等关键作用。功率变换器通常工作于高温、高压、大电流的环境中,可能因器件老化、环境干扰、安装不当和机械振动等原因而出现故障。由于传统的事后维修、预防性维修等方式,存在库存备件投资过剩、计划外维修次数过多、时效性差及效率低等问题<sup>[1]</sup>。

功率变换器故障诊断方法可以分为基于模型的方法、基于信号的方法、基于知识的方法和混合方法<sup>[2]</sup>。CHEN H 等<sup>[3]</sup>通过分析所测的健康模式与单/双晶体管短路或开路模式之间的方均根电流特性变化,开发了一种功率变换电路的故障诊断方法。通过观察感应电流随时间的斜率变化, SHAHBAZI M 等<sup>[4]</sup>提出了一种故障诊断方法,用

于非隔离式 DC-DC 转换器中的开路 and 短路开关故障诊断。MOOSAVI S S 等<sup>[5]</sup>提出了一种基于主成分分析(PCA)和多类相关向量机(PCA-mRVM)的故障诊断方法,以诊断 H 桥多电平逆变器系统中的开路故障。傅宏辉等<sup>[6]</sup>提出了一种基于辅助分类生成对抗网络的功率变换器参数性故障智能诊断方法,由 ACGAN 中生成器构造与真实故障特征分布近似的伪数据,从而将伪数据与真实数据同时用于训练判别器,判别器通过判别真伪数据来训练生成器,结果表明 ACGAN 算法用于故障诊断的优越性。SOUALHI A 等<sup>[7]</sup>提出了一种基于信号和数据驱动的方法,应用于感应电动机的故障检测和诊断,通过信号处理提取了许多故障敏感特征,最后采用数据驱动的分类器对故障模式进行分类。SUN Q 等<sup>[8]</sup>提出了一种结合 DBN 和小波包能量谱来诊断 SEPIC 变换器故障的新方法。

**基金项目:**南京航空航天大学研究生科研与实践创新计划项目(xcxjh20210329)

**第一作者简介:**许煜辰(1998—),男,福建漳州人,硕士研究生,研究方向为故障诊断与健康管,768542365@qq.com。

本文设计了 SiC MOSFET 功率管 DC-DC 变换器,通过实验对电路软故障诊断技术进行研究,采用 ReliefF 算法选取电路故障特征参数,利用 KNN、SVM 和 PSO-SVM 进行电路故障诊断。

### 1 电路故障诊断方法设计

#### 1.1 DC-DC 变换器监测信号选择

在造成功率变换器产生故障原因中,电解电容与功率开关器件失效率比例在所有失效原因中占比高达 64%<sup>[9]</sup>。因此本文将 BUCK 电路中的输出电容与 SiC MOSFET 作为变换器关键功率器件。选择输入电压、输出电压、二极管两端电压 Vdf、PWM 控制信号这 4 种电路信号作为监测信号。图 1 所示为 BUCK 电路拓扑图。

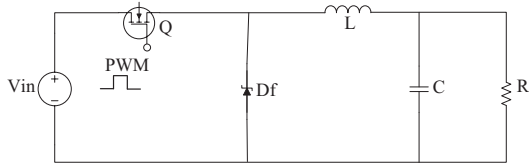


图 1 BUCK 电路拓扑图

#### 1.2 特征参数优选

确定了与电路核心元件衰退特征参数敏感的检测信息后,还必须深入对测试信号进行挖掘与解析,以便得到可以表征核心元件衰退状况的特征参数。在时域、频域中解析监测信号的特征,并运用小波分析与集合经验模式分解方法在时频域中求出电路的特征参数,建立特征参数候选库。计算出 9 个时域特征、11 个频域特征,小波包分析得到 18 个特征参数,集合经验模态分解 (EEMD) 得到 10 个特征参数,构成了 48 维的健康表征参数候选库。

对于已建立的健康特征参数库,需要从中选出最优特征参数。采用 ReliefF 算法进行特征优选,对 48 个电路故障特征参数进行优选,图 2 所示分别为输入电压、输出电压、二极管两端电压、PWM 控制信号这 4 种信号的 48 个电路故障特征参数权重分布。

#### 1.3 PSO-SVM 算法设计

惯性权重  $\omega$  体现的是粒子继承先前速度的能力,在 PSO 算法中,大的惯性权值有利于全局搜索,而较小的更有利于局部搜索,从线性式(1)和非线性式(2)进行惯性权重的选择<sup>[10]</sup>。

$$\omega(k) = \omega_{start} - (\omega_{start} - \omega_{end}) \cdot (T_{max} - k) / T_{max} \quad (1)$$

$$\omega(k) = \omega_{start} - (\omega_{start} - \omega_{end}) [2k/T_{max} - (k/T_{max})^2] \quad (2)$$

式中: $\omega_{start}$ 为初始惯性权重; $\omega_{end}$ 为迭代至最后的惯性权重; $k$ 为当前迭代次数; $T_{max}$ 为最大迭代次数。

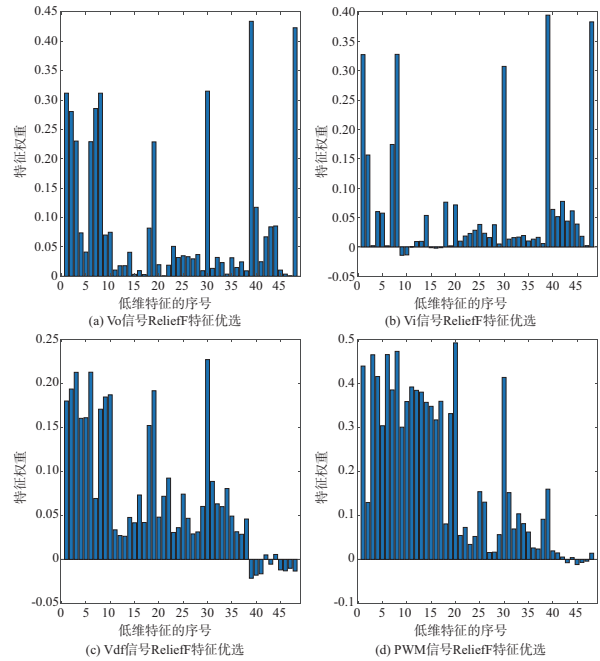


图 2 4 种信号 48 维权重分布图

一般来说惯性权重取值  $\omega_{start} = 0.9$ 、 $\omega_{end} = 0.4$  时算法性能最好,采用线性和非线性两种规则进行惯性权重的选择,如图 3 所示。

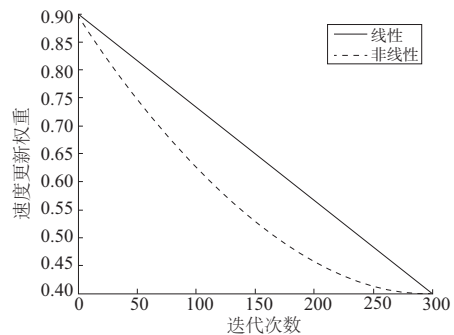


图 3 速度更新权重图

由图 3 可知非线性的规则比线性规则更快地从全局搜索转换到局部搜索。

## 2 实验设计

### 2.1 加速退化实验设计

- 1) 电解电容退化实验
a) 加速应力选择

由于电解电容的老化过程与其工作环境温度密切相关,其故障特征参数对温度变化敏感。因此在电解电容退化实验中选择温度应力作为加速应力,使用恒温试验箱作为高温加速退化实验的实验仪器。

b) 加速退化实验步骤

第一步,在室温条件下(实验中室温为 25 ℃)采用 Agilent 4236B LCR 测试仪对 12 只规格为 470 uF/35 V 的电解电容的电容值  $C$  和等效串联电阻值  $R_{ESR}$  进行测量,测试频率设置为 120 Hz,偏置电压设置为 1 000 mV,每个电解电容测量 5 组数据,并计算 5 组数据的平均值作为电解电容特征参数的健康值,测试电路实物图如图 4 所示。



图 4 电解电容测试实物图

第二步,将恒温试验箱的温度设置为 100 ℃,12 只电解电容放入恒温试验箱中,在高温应力下对其模拟加速退化,实验装置如图 5 所示。每 30 h 取出,冷却至室温,采用 Agilent 4236B LCR 测试仪进行 5 次测量,计算平均值并进行记录。

使用 Agilent 4236B LCR 测试仪进行测试电解电容的电容值  $C$ ,Agilent 4236B LCR 测试仪的精度是 0.1%。

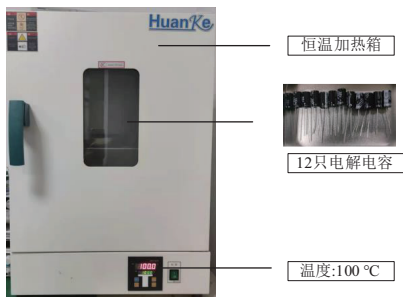


图 5 电解电容加速退化实验装置

2) SiC MOSFET 退化实验

设计高低温冲击实验作为 SiC MOSFET 功率管的加速退化实验。在两个极端温度之间被动循环加热冷却器件,从而导致整个功率开关器件模块温度发生较大变化,通过加速封装互连的退化,

利用器件内部材料热膨胀系数的不匹配来加速器件封装退化,引起由于蠕变和疲劳损伤造成的器件失效。本节设计的温度冲击循环实验中加热和冷却装置需要保持温度恒定,与功率循环老化实验相比,能够实现更精确的温度控制。

实验将 SiC MOSFET 功率管器件放置在加热装置内保持一定的时间,然后在另一个冷却装置内保持一定的时间,且放置时间足够长,保证被测器件具有均匀的温度分布。由于两个装置之间的转换时间不会加速老化,因此应该尽可能缩短两个装置间转移的时间(本实验中被测 SiC MOSFET 功率管的最高结温为 150 ℃)。参考国家标准 GJB 150.5A—2009,实验步骤如下。

a) 在室温下采用搭建的测试电路对 12 只型号为 C2M0080120D 的 SiC MOSFET 功率管的漏源极导通电阻值  $R_{ds,on}$  进行测量,每个 SiC MOSFET 功率管测量 5 组数据,取 5 组数据的平均值作为漏源极导通电阻特征参数的初始值。

b) 对 12 只型号为 C2M0080120D 的 SiC MOSFET 功率管进行温度冲击循环实验,设置加热装置的温度为 150 ℃,在 150 ℃下保持 30 min,然后迅速将 SiC MOSFET 功率开关管放置在 0 ℃的低温冷却装置下保持 30 min(转移时间控制在 2 min 内),此时温度差  $\Delta T$  为 150 ℃。

2.2 实验平台设计

实验平台如图 6 所示,主要由电路部分和数据采集两部分组成。其中电路部分由 BUCK 电路、供电模块以及 mcu 与检测电路组成的 PID 控制模块、滑动功率电阻器(10 Ω/500 W)组成;实验数据采集部分由 Handyscope HS4 四通道数据采集卡(最大分辨率:16 位)、PC 机(联想 YOGA14S)、数据卡上位机软件 Tiepie Multi Channel(设置采样频率为 5 MHz)组成。

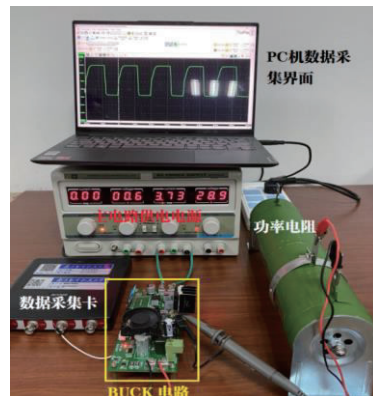


图 6 实验平台图

### 2.3 实验方案设计

#### 1) 故障模式设置

针对 DC-DC 变换器的软故障诊断,设置了 4 种电路故障模式。主要考虑器件的早期失效情况,设置电解电容故障下的电容值  $C$  降低初始值的 5%~20%,等效串联电阻  $R_{ESR}$  升高初始值的 5%~100%;SiC MOSFET 功率管故障模式下的导通电阻值升高初始值的 5%~20%,如表 1 所示。

表 1 DC-DC 变换器故障模式表

| 故障编号 | 故障器件名称          | 故障模式描述  |
|------|-----------------|---|
| 1    | Normal          | 电路无故障   |
| 2    | 电容 $C$          | 电容容值 $C$ 减小 5%~20%,等效阻抗增大 5%~100%                             |
| 3    | SiC MOSFET      | 漏源极导通电阻增大 5%~20%  |
| 4    | $C$ 、SiC MOSFET | 电容容值 $C$ 减小 5%~20%,等效阻抗增大 5%~100%,SiC MOSFET 漏源极导通电阻增大 5%~20% |

#### 2) 工况条件设置

在设置了 4 种故障模式的情况下,为了模拟实际工况变化情况对实验电路与故障诊断效果的影响,通过调节直流稳压电源电压值与滑动功率电阻值,使电路工作在不同的输入电压与输出负载。设置了 5 种电路工作状况条件,如表 2 所示,其中标准工作状况设置工况编号为 1。

表 2 DC-DC 变换器工作状况表

| 工况编号 | 工况设置                                |
|------|-------------------------------------|
| 1    | 输入+28 V 直流电压,负载电阻 2.5 $\Omega$ (标况) |
| 2    | 输入+24 V 直流电压,负载电阻 2.5 $\Omega$      |
| 3    | 输入+32 V 直流电压,负载电阻 2.5 $\Omega$      |
| 4    | 输入+28 V 直流电压,负载电阻 5 $\Omega$        |
| 5    | 输入+28 V 直流电压,负载电阻 10 $\Omega$       |

### 2.4 实验电路故障诊断结果分析

由于在 2.1 节中对电解电容和 SiC MOSFET 功率管进行了加速退化实验,元器件的故障特征参数发生了改变,因此利用元器件退化前后表征器件的健康状态和早期退化状态,可以得到电路 4 种故障模式下的信号。由于电解电容退化程度最为严重的电容值减小了初始值的 11%,SiC MOSFET 功率管的导通电阻增加了初始值的 10%,因此已经达到 2.3 节设置的软故障模式的条件。

把特征优选后的特征参数作为 3 种故障诊断分类器 KNN、SVM、PSO-SVM 的输入,图 7 为 5 种工况共 1 000 组样本,200 组作为训练组,800 组作为测试组同时训练,进行故障诊断的实验结果分析。

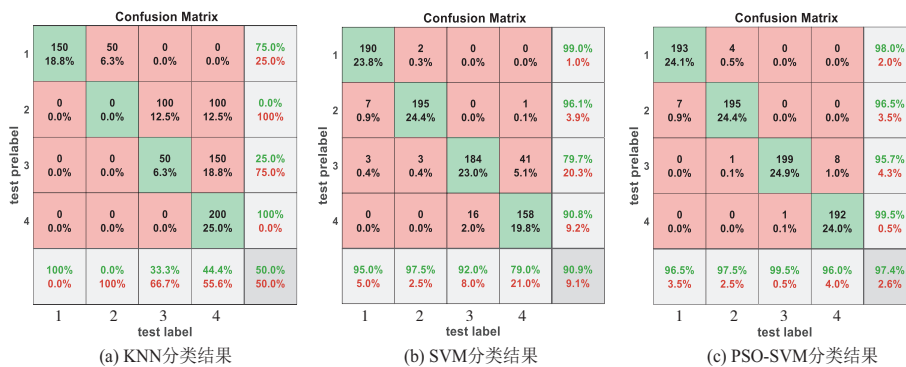


图 7 实验电路诊断结果

图 7(a) 显示 KNN 分类器对 ReliefF 提取的故障特征数据集的整体故障诊断率达 50.0%。图 7(b) 表明 SVM 算法对 ReliefF 提取的故障特征数据集的整体故障诊断率达 90.9%。图 7(c) 表明 PSO-SVM 算法对 ReliefF 提取的故障特征数据集有极好的故障诊断效果,故障诊断率达 97.4%。

## 3 结语

本文设计了基于 SiC MOSFET 功率管的 DC-DC BUCK 电路。针对 DC-DC 变换器的软故障,研究了基于 KNN、SVM 和 PSO-SVM 的故障诊断方法。选用加速退化实验中退化程度最为严重的 (下转第 273 页)

标纸按照工艺要求设置 10 个检测点,每个检测点平均耗时约为 5 s;而人工使用台式色差仪检测时,每个检测点平均耗时为 1 min,自动检测装置效率提升了 11 倍。按照每月平均 120 批的条盒和小包商标纸需要检测,每批次抽取 5 张商标纸,每张取 5 个检测点,与人工检测方式相比,采用自动检测方式,一年减少人工作业时间 600 h。

### 3 结语

以广州卷烟厂在用商标纸为对象对该卷烟商标纸色差自动检测装置,进行了测试,结果表明:与人工操作台式色差仪检测方式相比,以单张商标纸设置 10 个采样点为例,采用色差自动检测装置,单点检测效率提高了 11 倍,检测稳定性明显提升;节省人力成本 600 h/年。该装置使用方便,

可在商标纸色差检测工作中推广。

### 参考文献:

[1] 李超,范多青,李娥贤,等. 基于机器视觉识别的高光性镭射商标纸色差测量方法研究[J]. 昆明学院学报,2019,41(3):30-33.

[2] 郭丽娟,李超,张承明,等. 近红外和色差仪对卷烟商标色差分析的对比[J]. 纸和造纸,2015,34(6):59-61.

[3] 杨冬梅,侯鹏娟,李江彩君,等. 软包商标脱色性能检测装置的设计与研究[J]. 设备管理与维修,2023(15):58-60.

[4] 陈壮,陈闪. 基于优化 ICP 算法的机器人双目相机点云配准[J]. 机械制造与自动化,2022,51(5):163-166.

[5] YC/T 330—2014 卷烟条与盒包装纸印刷品[S].

收稿日期:2024-03-07

(上接第 223 页)

电解电容和 SiC MOSFET 功率管作为 DC-DC 变换器的软故障器件,将采集的电路信号计算特征参数,采用 ReliefF 算法选取故障特征参数,采用故障诊断方法进行分析。对比分析 3 种故障诊断结果,表明使用 PSO-SVM 方法对 BUCK 电路进行故障诊断效果最好,可以有效地诊断 DC-DC 变换器的软故障。

### 参考文献:

[1] 孙权. 功率变换器故障辨识与健康状态评估关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.

[2] 高鹏飞. 峰值电流控制模式 DC-DC BUCK 变换器的斜坡补偿研究[J]. 通信电源技术,2019,36(6):127-128.

[3] CHEN H, LU S L. Fault diagnosis digital method for power transistors in power converters of switched reluctance motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2013,60(2):749-763.

[4] SHAHBAZI M, JAMSHIDPOUR E, POURE P, et al. Open- and short-circuit switch fault diagnosis for nonisolated DC-DC converters using field programmable gate array [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2013,60(9):4136-4146.

[5] MOOSAVI S S, DJERDIR A, AIT-AMIRAT Y, et al.

Artificial neural network-based fault diagnosis in the AC-DC converter of the power supply of series hybrid electric vehicle [J]. IET Electrical Systems in Transportation,2016,6(2):96-106.

[6] 傅宏辉,王友仁,孙灿飞,等. 基于 ACGAN 的功率变换器参数性故障诊断方法[J]. 机械制造与自动化,2019,48(6):159-163.

[7] SOUALHI A, CLERC G, RAZIK H. Detection and diagnosis of faults in induction motor using an improved artificial ant clustering technique[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2013,60(9):4053-4062.

[8] SUN Q, WANG Y R, JIANG Y Y, et al. Fault diagnosis of SEPIC converters based on PSO-DBN and wavelet packet energy spectrum [C]//2017 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Harbin). Harbin, China: IEEE,2017:1-7.

[9] CEN Z H, STEWART P. Condition parameter estimation for photovoltaic buck converters based on adaptive model observers [J]. IEEE Transactions on Reliability,2017,66(1):148-160.

[10] 李爱国,覃征,鲍复民,等. 粒子群优化算法[J]. 计算机工程与应用,2002,38(21):1-3,17.

收稿日期:2022-09-14