

脉冲功率电源故障诊断方法研究*

熊诗成

(海军研究院, 北京 100161)

摘要:脉冲功率电源是电磁发射系统中最容易发生故障的薄弱环节,脉冲功率电源故障会使整个系统性能下降。针对脉冲功率电源故障,提出基于多层小波分析提取故障信息的模式搜索支持向量机故障诊断方法。通过建立脉冲功率电源的软故障模型,进行仿真分析获得电流故障数据样本,对故障样本进行离散小波分解,获得指定层细节信息的小波系数作为故障特征量;对故障特征量进行主成分分析,将小波系数进行降维,以便有效地进行故障诊断。通过实验,将所提方法故障诊断结果与其他三种故障诊断结果进行比较,验证了所提方法的有效性。

关键词:脉冲功率电源;故障诊断;小波分析;支持向量机

中图分类号:TM832 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2020)01-038-07

Research on fault diagnosis of pulse power supply

XIONG Shicheng

(Naval Research Academy, Beijing 100161, China)

Abstract: Pulsed power supply is the most vulnerable part of the electromagnetic launch system, and the failure of the pulsed power supply will make the whole system performance decline. Thus, in view of the pulse power supply failure, a model search support vector machine fault diagnosis method based on multi-layer wavelet analysis for fault information extraction was proposed. By establishing the soft fault model of pulse power supply, the current fault data samples were obtained through simulation analysis, and the discrete wavelet decomposition of the fault samples was carried out, then the wavelet coefficients of the specified layer details were obtained as the fault feature quantities. The principal component analysis of the fault feature was carried out, and the dimension of wavelet coefficients was reduced, so that the fault diagnosis was effectively carried out. Through the experiment, the proposed fault diagnosis method was compared with the other three kinds of fault diagnosis results, and the effectiveness of the method was verified.

Keywords: pulse power supply; fault diagnosis; wavelet analysis; support vector machine

脉冲功率电源是电磁发射系统的重要组成部分,它为轨道发射装置在短时间内提供巨大能量。电容储能型脉冲功率电源充放电功率强,技术成熟,脉冲电流波形的调控性较好,适应性广,因此目前在电磁发射领域普遍采用。脉冲功率电源系统中模块数量大,故障诊断困难,对运行可靠性要求高。与常规电气系统不同,脉冲功率电源系统为瞬时工作模式,目前对脉冲功率电源的故障诊断研究还不够深入。

目前对于脉冲功率电源的研究主要集中在其放电优化方面。文献[1]基于200 kJ紧凑化脉冲电源进行全系统仿真及实验,分析电源参数对发射速度的影响。文献[2]采用4组600 kJ脉冲电源系统搭建2.4 MJ的脉冲成形网络,每组电源模块充电电压及触发时序相同,采用同步触发放电

的方式进行放电研究。文献[3]通过仿真研究64 MJ炮口动能轨道式发射装置模型,采用4个独立的脉冲电源模块对发射装置进行放电,分析了系统的能量分配及效率,最后对影响系统尺寸的因素进行了分析。还有许多相关文献对轨道炮进行了相关研究^[4],但是目前对脉冲功率电源的故障诊断少有研究。脉冲功率电源故障模型复杂,存在容差、软故障和非线性等问题,这对其故障诊断技术提出了高要求。

在故障诊断方面,人工智能算法的使用对故障诊断效果有着重要影响。近年来,人工智能算法的发展为故障诊断研究提供了更多选择。其中应用最多的是神经网络和支持向量机(Support Vector Machine, SVM)。支持向量机克服了神经网络结构确定困难、易收敛与局部极小等缺点,有

* 收稿日期:2018-11-20

作者简介:熊诗成(1989—),男,湖北武汉人,工程师,博士, E-mail:812105189@qq.com

效解决了高维数和非线性等问题。而最小二乘支持向量机 (Least Square Support Vector Machine, LSSVM) 不但与 SVM 一样能有效解决分类问题, 而且较标准的 SVM 进行了很大改进, 已经成为当前应用较为广泛的一类 SVM^[5-8]。近年来, 有研究采用粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 对 LSSVM 的核函数参数进行优化, 进一步提高 LSSVM 的分类性能。但是 PSO-LSSVM 易陷入局部最优解, 且优化过程计算量大, 不利于在线算法的实现。

综上所述, 脉冲功率电源故障模型复杂, 存在容差、软故障和非线性等问题, 目前国内外对脉冲功率电源故障诊断少有研究, 并且目前故障诊断方法研究还存在计算量大、易陷入局部最优解等问题。本文将采用基于模式搜索的支持向量机 (Pattern Search Support Vector Machine, PSSVM) 故障诊断方法对脉冲功率电源进行故障诊断研究。

1 脉冲功率电源的拓扑结构与故障分析

1.1 脉冲功率电源系统拓扑结构

电磁发射系统的结构如图 1 所示。图中左半部分为脉冲功率电源系统, 右半部分为发射装置负载。脉冲功率电源的作用是将其存储的电能给轨道负载以提供高功率脉冲电流, 其由若干组依次触发的脉冲成形单元 (Pulse Forming Unit, PFU) 并联而成^[9-10]。电磁发射装置的作用是加速电枢, 并将脉冲电源提供的能量转换为电枢的动能, 其电路模型采用动态负载模型^[11]。

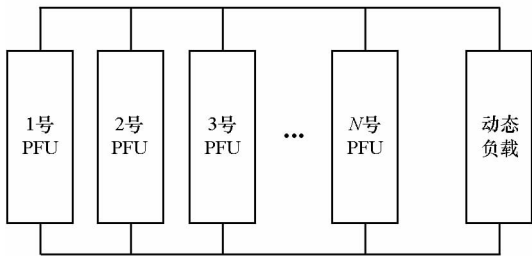


图 1 脉冲功率电源系统模型

Fig. 1 Model of pulse power supply system

每个脉冲功率电源模块主要由高功率密度脉冲电容器 C 、大功率开关硅堆 SCR (通常为晶闸管)、续流硅堆 D (一般为大功率二极管)、脉冲电感器 L 等组成 $R-L-C$ 放电电路, 如图 2 所示。动态负载考虑电枢在轨道中的趋肤效应、接触压力、接触电阻、摩擦力^[11]。

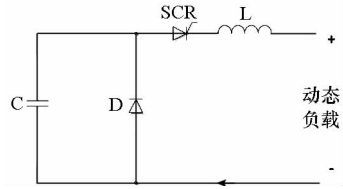


图 2 脉冲功率电源单元

Fig. 2 Pulse power supply unit

1.2 脉冲功率电源故障分析

电磁发射应用中, 脉冲功率电源模块中的电容器会受到一系列不可逆的应力, 导致电容器退化。导致电容器退化的因素主要有电应力、热应力和机械应力。大多数电容器失效模式可以通过电容器等效内阻和等效电容值变化来推测^[11-13]。在电磁发射应用中, 电容值下降超过初始电容值的 5% 时被认为是故障^[14]。同样, 本文认为等效内阻上升超过初始等效内阻的 100% 时被认为是故障。通过观测电容器的电气参数可以判断电容器的电容值和电阻值的改变, 由此可以用来判断电容器是否故障。通常, 电容器的等效电路模型可以由图 3 表示。其中 C 代表容器的主要电容, ESR 代表电容器所有损耗的等效电阻。

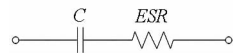


图 3 电容器等效电路模型

Fig. 3 Capacitor equivalent circuit model

电感器的等效电路模型如图 4 所示。脉冲电感器长时间正常运行, 等效电感值 L 和串联等效电阻值都不会发生剧烈变化。但脉冲电感器中线圈通过大电流时, 匝间受到电动力影响会急剧膨胀及轻微形变, 如果匝间有杂质碎屑或铜箔上有毛刺, 极易致层间绝缘扎破, 会造成线圈匝间短路。此时脉冲电感器等效电感值和串联等效电阻值都会下降。类似于脉冲电容器, 当脉冲电感器的电感值下降超过 5% 被认为是故障, 电感器等效串联内阻下降超过 50% 被认为是故障。



图 4 电感器等效电路模型

Fig. 4 Inductor equivalent circuit model

电磁发射应用中的晶闸管和二极管处于高电压、大电流的连续浪涌模式工况, 当通过单次浪涌电流后会产生一个瞬时温升, 如果不能及时冷却, 在多次浪涌电流后, 半导体器件结温会达到其失效温度, 导致性能下降甚至失效。晶闸管和二极

管出现的短路和断路故障为硬故障,此时系统将发生严重损坏。通过分析了解到电容器和电感器的故障为软故障,软故障通过事前测试或监控能预测到。本文将主要研究脉冲功率电源的软故障,主要故障类型如表 1 所示。

表 1 脉冲功率电源软故障类型

Tab.1 Soft fault types of pulse power supply

故障器件	故障类型
无	无故障
电容器	电容器电容值过低 电容器内阻过高
电感器	电感器电感值过低 电感器电阻值过低

1.3 脉冲功率电源放电差异分析

为了量化研究软故障对负载放电电流波形的影响,分别从电流波形的峰值、脉宽和梯形相似率方面对电流波形进行分析。设 C_1 为电容器, D_1 为大功率二极管, L_4 和 R_4 为负载等效电感和电阻,具体模块电路参数设置如表 2 所示。脉宽定义为电流从上升至电流最大峰值的 20% 到下降至电流最大峰值的 20% 之间的时间。为了描述脉冲电流波形与矩形的相似程度,定义脉冲电流在大于其电流峰值 20% 部分所围成的图形面积与该图形对应矩形面积之比为梯形相似率,该比值越大说明电流波形越像矩形波。

表 2 模块电路参数设置

Tab.2 Module circuit parameter setting

参数	大小
电容器电容值 C/mF	2
电容器充电电压 U_0/kV	6
电容器等效串联电阻和线路杂散电阻之和 $R_1/\text{m}\Omega$	2
线路杂散电感 $L_1/\mu\text{H}$	0.1
续流二极管等效串联电阻和线路杂散电阻之和 $R_2/\text{m}\Omega$	0.1
续流二极管等效串联电感和线路杂散电感之和 $L_2/\mu\text{H}$	0.1
脉冲电感器电感和线路杂散电感之和 $L_3/\mu\text{H}$	50
晶闸管通态等效电阻、电感器等效串联电阻和线路杂散电阻之和 $R_3/\text{m}\Omega$	1
负载电阻初始值 $R_0/\text{m}\Omega$	50
负载电感初始值 $L_0/\mu\text{H}$	0
负载电阻变化率 $R_\Delta/(\text{m}\Omega/\text{m})$	0.5
负载电感变化率 $L_\Delta/(\mu\text{H}/\text{m})$	0.5
弹丸质量 m/kg	0.001

1.3.1 电容器容值差异放电分析

按照图 5 的电路,改变电容器的电容值,分别取 2 mF、4 mF、6 mF 进行仿真,放电电流波形如图 6 所示。

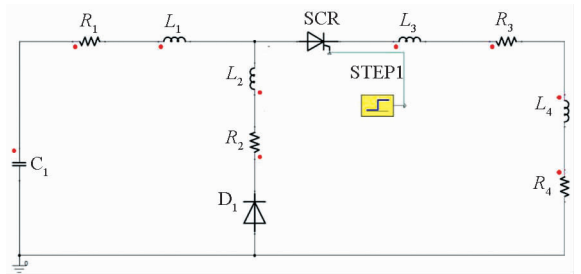


图 5 模块仿真电路

Fig.5 Module simulation circuit

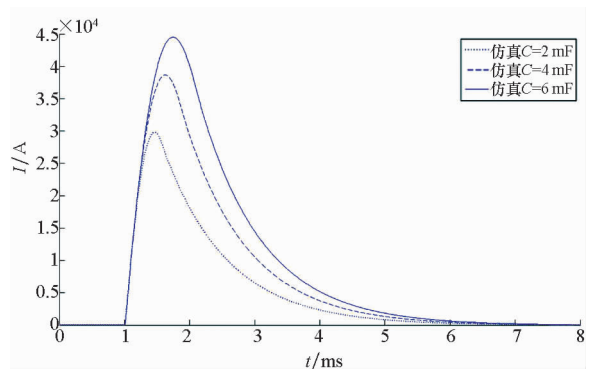


图 6 不同电容值对放电特性的影响

Fig.6 Influence of capacitance value on discharge characteristics

图 6 对应的 3 条仿真电流曲线的电流峰值、脉宽和梯形相似率,如表 3 所示。可以看出当脉冲电容器的电容值增加时,电流峰值随之增大,同时脉宽和梯形相似率也随之增大。

表 3 不同电容值对放电特性的影响

Tab.3 Influence of capacitance value on discharge characteristics

参数	电流峰值/kA	脉宽/ms	梯形相似率
$C = 2 \text{ mF}$	29.8	2.01	0.696 9
$C = 4 \text{ mF}$	38.7	2.22	0.723 8
$C = 6 \text{ mF}$	44.5	2.38	0.745 4

1.3.2 电容器内阻差异放电分析

改变脉冲电容器的串联等效电阻等价于改变支路电阻 R_1 。电阻 R_1 为 2 m Ω 、4 m Ω 、6 m Ω 时进行仿真,得到放电电流结果如图 7 所示。对应电流峰值、脉宽和梯形相似率如表 4 所示。

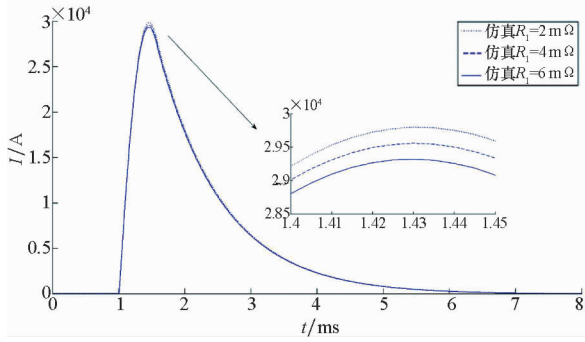


图 7 不同电阻 R_1 对放电特性的影响

Fig. 7 Influence of R_1 value on discharge characteristics

表 4 不同电阻 R_1 对放电特性的影响

Tab. 4 Influence of R_1 value on discharge characteristics

参数	电流峰值/kA	脉宽/ms	梯形相似率
$R_1 = 2 \text{ m}\Omega$	29.8	2.01	0.696 9
$R_1 = 4 \text{ m}\Omega$	29.6	2.05	0.696 7
$R_1 = 6 \text{ m}\Omega$	29.3	2.11	0.696 4

可以看到,当支路电阻 R_1 增大时,放电电流峰值减小,脉宽增加,梯形相似率也是减小的。其中电阻 R_1 对电流峰值影响较大,对脉宽和梯形相似率的影响较小。

1.3.3 电感器电感值差异放电分析

改变电感器的电感值等价于改变支路电感,取 L_3 为 $50 \mu\text{H}$ 、 $60 \mu\text{H}$ 、 $70 \mu\text{H}$ 进行仿真,仿真电流波形如图 8 所示。

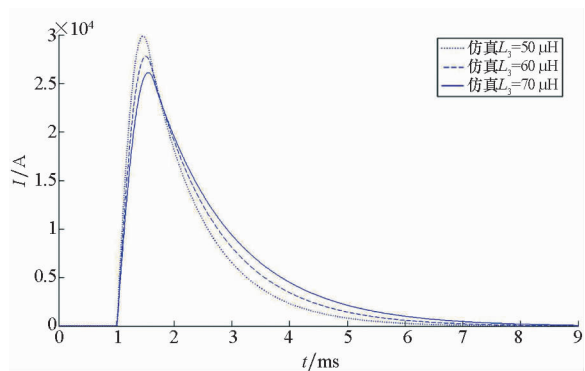


图 8 不同电感 L_3 对放电特性的影响

Fig. 8 Influence of L_3 value on discharge characteristics

放电电流的电流峰值、脉宽和梯形相似率的结果如表 5 所示,可以看出支路电感 L_3 对回路放电特性影响较大。当支路电感 L_3 增大,电流峰值下降,脉宽上升,梯形相似率降低。

1.3.4 电感器内阻差异放电分析

当电阻 R_3 为 $2 \text{ m}\Omega$ 、 $4 \text{ m}\Omega$ 、 $6 \text{ m}\Omega$ 时进行仿真,结果如图 9 所示。由图发现电阻值越大,放电

表 5 不同电感 L_3 对放电特性的影响

Tab. 5 Influence of L_3 value on discharge characteristics

参数	电流峰值/kA	脉宽/ms	梯形相似率
$L_3 = 50 \mu\text{H}$	29.9	2.0	0.696 4
$L_3 = 60 \mu\text{H}$	27.8	2.4	0.688 9
$L_3 = 70 \mu\text{H}$	26.1	2.7	0.685 7

电流波形的峰值越小。电阻值不同对电流波形会造成明显差异。

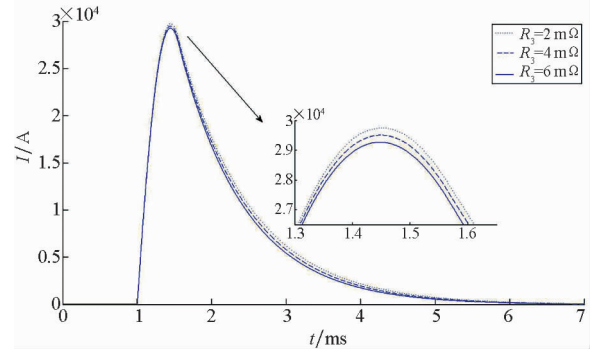


图 9 不同电阻 R_3 对放电特性的影响

Fig. 9 Influence of R_3 value on discharge characteristics

放电电流的电流峰值、脉宽和梯形相似率的结果如表 6 所示。可以看出,随着支路电阻 R_3 的增大,电流峰值下降,脉宽下降。

表 6 不同电阻 R_3 对放电特性的影响

Tab. 6 Influence of R_3 value on discharge characteristics

参数	电流峰值/kA	脉宽/ms	梯形相似率
$R_3 = 2 \text{ m}\Omega$	29.7	1.99	0.695 5
$R_3 = 4 \text{ m}\Omega$	29.5	1.93	0.688 5
$R_3 = 6 \text{ m}\Omega$	29.2	1.88	0.701 3

2 故障诊断方法

2.1 基于多层小波分析的故障特征提取方法

小波由一族小波基函数构成,它可以描述信号时间(空间)和频率(尺度)域的局部特性。采用小波分析最大优点是可对信号实施局部分析,可在任意的时间或空间域中分析信号。小波分析能够发现其他信号分析方法所不能识别的、隐藏于数据之中的表现结构特性的信息,而这些特性对故障识别尤为重要。

从信号分析的角度看,小波分解是将信号通过两组滤波器,得到信号的高频部分和低频部分;然后继续将得到的高频部分通过两组滤波器得到其高频部分和低频部分。此时高、低频信号的长

度都是原信号的一半。采用 Haar 小波对信号进行分解,假设

$$f_j(x) = \sum_{k \in \mathbf{Z}} c_k^j \phi(2^j x - k) \quad (1)$$

那么 f_j 可以分解为:

$$f_j = w_{j-1} + f_{j-1} \quad (2)$$

$$w_{j-1} = \sum_{k \in \mathbf{Z}} d_k^{j-1} \psi(2^{j-1} x - k) \quad (3)$$

$$f_{j-1} = \sum_{k \in \mathbf{Z}} c_k^{j-1} \phi(2^{j-1} x - k) \quad (4)$$

其中,

$$d_k^{j-1} = (c_{2k}^j - c_{2k+1}^j) / 2 \quad (5)$$

$$c_k^{j-1} = (c_{2k}^j + c_{2k+1}^j) / 2 \quad (6)$$

将信号 f 离散化成近似的信号 f_j , 然后利用 Mallat 算法, 将 f_j 分解成不同频率成分:

$$f_j = w_{j-1} + w_{j-2} + \dots + w_0 + f_0 \quad (7)$$

本质上, 对信号 f 进行小波分析就是将信号分解成不同层级的小波分量 $\psi(2^j x - k)$ 。对信号进行小波分解的目的就是找出信号的故障特征。本文采用多层小波高频细节信息作为故障特征值。

2.2 基于模式搜索的支持向量机故障诊断方法

支持向量机通过非线性映射, 把样本空间映射到高维空间, 使得原来线性不可分的问题转化为线性可分的问题。设训练样本集 $(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)$, $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^n, \mathbf{y}_i \in \mathbb{R}, i = 1, 2, \dots, l$ 。 \mathbf{x}_i 为 n 维输入向量, \mathbf{y}_i 为一维输出值, l 为样本。作为非线性映射 $\varphi: \mathbb{R}^n \rightarrow H$, 其中 φ 为高维特征映射, H 为高维特征空间, 从而能够线性可分, 在特征空间 H 中, 拟合样本集为:

$$\mathbf{y}(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \varphi(\mathbf{x}) + b \quad (8)$$

其中, \mathbf{w} 为 n 维权向量, b 为阈值。

本文采用的核函数为径向基核函数:

$$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp\left(-\frac{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

训练支持向量机的过程中, 惩罚系数 c 表示对误差的宽容度, 这个值越高说明越不能容忍出现误差。径向基核函数的 Gamma 参数 g 隐含地决定了数据映射到新的特征空间后的分布。优化选取这 2 个参数, 直接影响故障诊断性能的发。本文采用模式搜索算法对以上 2 个参数进行优化, 并进行交叉验证。

模式搜索算法在寻优空间中选取一个点, 通过此点移动来寻找最优值。令寻优空间 $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, 从中随机选取一个作为初始值。初始的采样范围是整个寻优空间 $\mathbf{d} = \mathbf{b}_{up} - \mathbf{b}_{lo}$ 。下一个寻优点 \mathbf{y} 通过以下方法获得: 首先随机选取一个指标 $R \in$

$\{1, \dots, n\}$, 令 $\mathbf{y}_R = \mathbf{x}_R + \mathbf{d}_R$ 。如果 \mathbf{y} 提升优化目标, 那么 \mathbf{x} 移动到下一个点 \mathbf{y} , 否则反转并且减半寻优空间: $\mathbf{d}_R \leftarrow -\mathbf{d}_R / 2$ 。重复以上步骤, 直至达到优化目标。相对于差分进化算法和粒子群优化算法, 其优化时间大大减少。通过模式搜索算法优化 SVM 中惩罚系数 c 和径向基核函数中 Gamma 参数 g 来提高 SVM 算法分类准确率。对于脉冲电源的故障识别问题, 模式搜索算法比其他方法更合适。

2.3 脉冲功率电源故障诊断实施方法

首先, 对采集到的脉冲功率电源模块的电流信号进行预处理, 执行多层小波变换得到相应的高频小波系数。同时, 采用不同层数的小波分解并将小波逼近系数作为候选特征从而构成候选样本数据集。在获得小波系数后采用主成分分析的方法对样本进行降维以减少故障算法的工作量。最后再将故障特征输入基于模式搜索算法的支持向量机进行训练和测试, 从而达到正确性和诊断的可靠性目的。构造的故障诊断算法流程如图 10 所示。

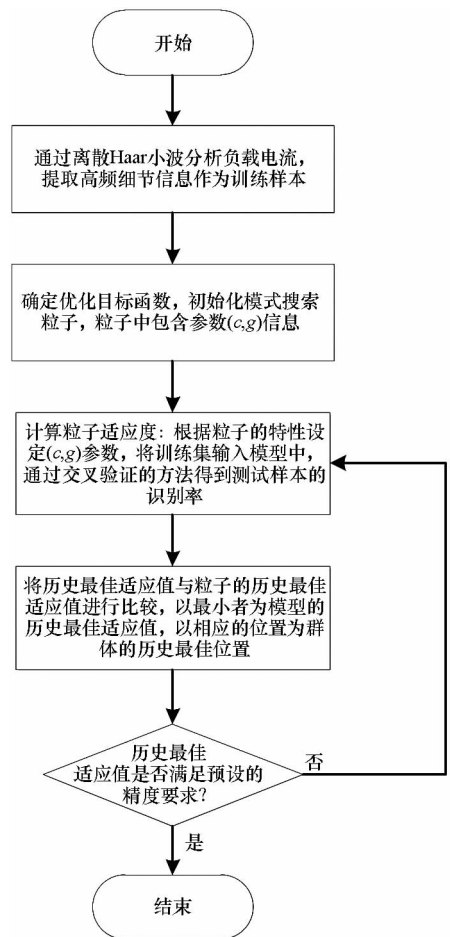


图 10 基于模式搜索的支持向量机流程

Fig. 10 Flow chart of PSSVM

图 10 展示了基于粒子群的最小二乘支持向量机的故障分类方法,该方法采用 Gauss 径向基核的最小二乘支持向量机模型,有 2 个参数(c 和 g)需要进行优化,这 2 个参数对支持向量机的性能有显著影响。该方法基于交叉验证原理,采用模式搜索优化算法对这 2 个参数进行优化,达到最好的故障诊断效果。

3 实验与分析

3.1 仿真实验

在仿真软件中搭建如图 1 所示电路模型,采用 3 个模块进行异步时序放电分析。每个模块中各元件参数值为:电容器标称值 $C = 2 \text{ mF}$,电容器内阻标称值 $R_C = 2 \text{ m}\Omega$,电感器标称电感值 $L = 45 \text{ }\mu\text{H}$,电感器内阻标称值 $R_L = 1 \text{ m}\Omega$ 。3 个模块的触发时序为 $0 \text{ ms} - 0.5 \text{ ms} - 1 \text{ ms}$,其中电容值和电感值的容差为 1%,电容器和电感器的串联等效内阻的容差为 10%。电容值和电感值下降超过 5% 时,影响系统性能,被认为是故障;电容器的串联等效内阻上升超过 100% 被认为是故障;电感器的串联等效内阻下降超过 50%,被认为是故障。本文只考虑脉冲功率模块发生单个软故障时的情形。选择电容器和电感器为潜在的故障元件。每个模块有 4 类故障模式和 1 类正常模式,如表 7 所示。系统中总共有 3 个模块,因此一共有 12 类故障模式和 1 类正常模式。表中 C_i 表示第 i 个模块的电容器电容值, R_{Ci} 表示第 i 个模块的电容器电阻值, L_i 表示第 i 个模块的电感器的电感值, R_{Li} 表示第 i 个模块的电感器电阻值。

表 7 脉冲功率电源单软故障模式

Tab. 7 Single soft fault modes of pulse power supply

故障编号	故障类别	标称值	容差	故障偏离
F1	正常			
F2	$C_1 \downarrow$	2 mF	$\pm 1\%$	-50% ~ -5%
F3	$R_{C1} \uparrow$	2 m Ω	$\pm 10\%$	+100% ~ +200%
F4	$L_1 \downarrow$	45 μH	$\pm 1\%$	-50% ~ -5%
F5	$R_{L1} \downarrow$	1 m Ω	$\pm 10\%$	-100% ~ -50%
F6	$C_2 \downarrow$	2 mF	$\pm 1\%$	-50% ~ -5%
F7	$R_{C2} \uparrow$	2 m Ω	$\pm 10\%$	+100% ~ +200%
F8	$L_2 \downarrow$	45 μH	$\pm 1\%$	-50% ~ -5%
F9	$R_{L2} \downarrow$	1 m Ω	$\pm 10\%$	-100% ~ -50%
F10	$C_3 \downarrow$	2 mF	$\pm 1\%$	-50% ~ -5%
F11	$R_{C3} \uparrow$	2 m Ω	$\pm 10\%$	+100% ~ +200%
F12	$L_3 \downarrow$	45 μH	$\pm 1\%$	-50% ~ -5%
F13	$R_{L3} \downarrow$	1 m Ω	$\pm 10\%$	-100% ~ -50%

建立实际发射过程动态负载的方法,采用 MATLAB 软件进行仿真实验。利用蒙特卡洛分析获得仿真数据以建立训练集和测试集,每种情况中元件的值不是固定不变的,从而保证了故障字典比较完整与合理。通过 MATLAB 建立时域瞬态分析和蒙特卡洛分析获得各个故障的仿真数据。在时域分析中运行时间和固定步长分别为 10 ms 和 0.01 ms。蒙特卡洛分析时,每种情况分析 1100 次,系统一共 13 种状态,仿真模型一共运行 14 300 次,参数服从平均分布。每种故障状态的前 1000 个样本用作训练集,后 100 个样本作为测试集。以 F1 正常情况为例,此时,3 个模块的电容器电容值和电阻值都在自己的容差范围内变化。每个样本包含有 1001 个采样点,即每种故障模式采集到了 1100 个具有 1001 个样本点的时域故障信号样本。然后对采集到的样本进行 Haar 小波包分解,分解得到各层高频细节小波系数,采用第 1 层和第 2 层小波高频细节信息作为故障特征量。小波系数将会经过主成分分析来降维,减少故障分类算法的计算量。

3.2 结果分析

为了验证所提故障诊断方法的效果,基于故障数据,采用基于多层小波分析的随机森林 (Multilayer Wavelet Analysis-Random Forest, MWA-RF)、基于多层小波分析的标准 SVM (MWA-SVM)、标准的 RF 与本文方法 MWA-PSSVM 分别进行故障诊断实验。表 8 给出了采用故障数据时 4 种方法的故障诊断结果。由表可知,MWA-SVM 和标准 RF 方法诊断准确率较低,前者是因为没有进行参数优化,后者是因为没有有效地提取故障特征。本文方法和 MWA-RF 的分类效果较好,但本文方法更加准确有效。

表 8 不同方法的诊断结果比较

Tab. 8 Comparison of diagnosis results under different algorithms

方法	MWA-PSSVM	MWA-RF	MWA-SVM	RF
准确率/%	99.7	98.1	65.7	67.8

4 结论

为了有效地提高脉冲功率电源的安全性,研究了脉冲功率电源的故障诊断方法,提出了基于多层小波分析的模式搜索支持向量机故障诊断方法,结论如下:

1) 提出的脉冲功率电源软故障诊断方法,通

过多层小波分析可以有效地提取故障特征信息,为故障诊断打下基础;

2) 提出的模式搜索方法可以有效地优化 SVM 参数,因此 SVM 分类精度得到提升,从而可以提高脉冲功率电源故障诊断准确率;

3) 对脉冲功率电源进行的动态仿真实验表明本文方法的准确率高于其他三种方法,从而验证了本文方法的有效性。

参考文献 (References)

- [1] Guo X L, Dai L, Zhang Q, et al. Influences of electric parameters of pulsed power supply on electromagnetic railgun system[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 43(9): 3260 - 3267.
- [2] Lee B, Ahn S, Kim S H, et al. Operation of a 2.4-MJ pulsed power system for railgun[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 42(10): 2886 - 2890.
- [3] Bernardes J S, Stumborg M F, Jean T E, et al. Analysis of a capacitor-based pulsed-power system for driving long-range electromagnetic guns[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(1): 486 - 489.
- [4] Gong C, Yu X J, Liu X C. Study on the system efficiency of the capacitive pulsed-power supply[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(5): 1441 - 1447.
- [5] Wang X Y, Fu Z K. A wavelet-based image denoising using least squares support vector machine [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2010, 23(6): 862 - 871.
- [6] Peng X J, Wang Y F. A normal least squares support vector machine (NLS-SVM) and its learning algorithm [J]. Neurocomputing, 2009, 72(16/17/18): 3734 - 3741.
- [7] Mitra V, Wang C J, Banerjee S. Text classification: a least square support vector machine approach [J]. Applied Soft Computing, 2007, 7(3): 908 - 914.
- [8] Li X, Cao G Y, Zhu X J. Modeling and control of PEMFC based on least squares support vector machines [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(7/8): 1032 - 1050.
- [9] Lehmann P. Overview of the electric launch activities at the French-German research institute of Saint-Louis (ISL) [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(1): 24 - 28.
- [10] Dong J N, Zhang J, Li J, et al. The 100 kJ modular pulsed power units for railgun [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 275 - 278.
- [11] Makkessi A, Sari A, Venet P. Metallized polymer film capacitors ageing law based on capacitance degradation [J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(9/10): 1823 - 1827.
- [12] Zhou Y, Zhang D D, Yan P. Modeling of electromagnetic rail launcher system based on multifactor effects [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(5): 1516 - 1522.
- [13] Makkessi M, Sari A, Venet P, et al. Accelerated ageing of metallized film capacitors under high ripple currents combined with a DC voltage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(5): 2435 - 2444.
- [14] Sarjeant W J, Zirnheld J L, Macdougall F. Capacitors [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, 26(5): 1368 - 1392.