第 52 卷 第 6 期：2623-2631 高电压技术 Vol.52, No.6: 2623-2631
2026 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250858

基于电流波形短时条件局部峰值率的直流串联电弧检测方法

唐　欣，周帅师，刘林声
（电网防灾减灾全国重点实验室(长沙理工大学)，长沙 410114）

摘　要：光伏组件由于接头松脱、器件老化、绝缘破裂等原因产生直流拉弧现象，而直流电弧由于没有过零点特性一旦产生就难以自行熄灭，极易引发火灾，带来严重危害，因此快速准确地检测出串联电弧至关重要。该文从时域角度出发对串联电弧进行研究，采用短时局部峰值率的方法分析电流信号，将固定时间窗口内条件局部峰值率的平均值和前后短时条件局部峰值率的提升比作为时域特征，输入随机森林算法中训练模型，最终基于随机森林模型构建了直流串联电弧检测算法。该研究搭建了含有多种工况变化、线路阻抗的直流串联电弧实验平台，设计多种电路模拟实际工况，通过实验平台采集串联电弧波形数对算法检测结果进行验证。验证结果表明，该算法能够有效识别串联电弧，且具有物理意义清晰、计算量少、运行时间快等特点。

关键词：光伏系统；直流电弧；串联电弧；局部峰值率；故障检测；随机森林

DC Series Arc Detection Method Based on Short-term Local Peak Rate of Current Waveform

TANG Xin, ZHOU Shuaishi, LIU Linsheng
(State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid(Changsha University of Science and Technology), Changsha 410114, China)

Abstract：Photovoltaic modules may experience direct current arcing due to loose joints, aging of devices, insulation rupture, and other reasons. However, direct current arcing, without zero crossing characteristics, is difficult to extinguish on its own and can easily cause fires, posing serious hazards. Therefore, it is crucial to quickly and accurately detect series arcing. we studied series arc from the perspective of time domain. The method of short-term local peak rate is used to analyze the current signal. The average value of local peak rate under fixed time window conditions and the improvement ratio of local peak rate before and after short-term conditions are used as time domain features. The model is trained in the random forest algorithm, and finally a DC series arc detection algorithm is constructed based on the random forest model. We established a DC series arc experimental platform with various operating conditions and line impedances, designed multiple circuits to simulate actual operating conditions, and verified the algorithm detection results by collecting series arc waveform data through the experimental platform. The verification results show that the algorithm can effectively identify series arcs and has the characteristics of clear physical meaning, low computational complexity, and fast running time.

Key words：photovoltaic system; DC arc; series arc; local peak rate; fault detect; random forest

0　引言

随着人口的增加和社会的发展，全球对能源的需求不断增加，传统能源如煤炭、石油等资源日益稀缺，而光伏发电作为一种可再生的能源形式得到大力推广，光伏发电为人们带来绿色清洁能源的同时，其安全运行问题也备受关注，以某 10 MW 分布式电站为例，其触点数量就超过 8 万个，它们都存在产生直流电弧的可能[1]。不同于交流电，直流串联电弧不存在过零点和平肩区，这就意味着电弧一旦产生就难以熄灭，光伏系统不间断供电的方式也为电弧的持续燃烧提供了条件。

直流电弧可分为并联电弧和串联电弧两类，当发生并联电弧时电流会发生突增，可以通过熔断保险丝或限流设备发现这种故障并切除，而发生串联电弧时相当于在线路中串入一个非线性电阻，电弧电流往往小于线路工作的正常电流，系统中的断路

基金资助项目：国家自然科学基金(52377167)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52377167).

器、熔断器等保护装置无法对其进行有效的保护[2]。因此，对光伏系统直流串联电弧故障的识别与保护已经成为了研究热点。针对光伏发电系统直流故电弧故障的危害性，我国已制定《光伏发电系统直流电弧故障回路保护技术要求》,要求对直流侧电压大于 80 V 的光伏系统进行直流电弧保护[3]。

对于直流电弧故障的检测，国内外专家从多个不同的角度进行研究，主要分为两类，一种是利用电弧发生时的弧光、电磁等物理特性检测故障电弧。文献[4]利用声学传感器、红外接收器和铜线绕制的圆筒天线，分别检测电弧的噪声、热量和电磁辐射信号，输入神经网络算法实现电弧故障检测。文献[5]利用天线和声学传感器分别检测电弧故障发生时的电磁信号和声学信号，达到检测电弧的目的。文献[6]利用两种不同类型的天线(棒形天线和环形天线)检测故障电弧发生时的电磁辐射信号实现电弧的检测。文献[7]针对电弧燃烧起始阶段，提出一种用于故障电弧电磁辐射测量的 3 阶 Hilbert 分形天线设计方法，还分析了测量距离对电弧电磁辐射信号强度的影响，为故障电弧定位研究奠定了基础。文献[8]证明了电弧电流、电极间距是决定电弧特性的主要因素，为小电流直流电弧特性研究提供了新思路。文献[9]采用 4 阶 Hilbert 分形天线检测直流故障电弧产生的电磁辐射特性，研究了电极材料、直径和电流等因素对电磁辐射检测的影响。以上基于电弧弧光、弧声、电磁辐射特性的检测方法主要研究的是电弧的辐射特性，根据频谱特征进行故障检测，但是受到环境的影响较大，且还受到传感器性能的制约，主要适用于开关柜[10]，在大型光伏电站中检测电弧故障并不适用。

另一种方法是在时域和频域的角度对直流电弧进行检测，通过提取电弧发生时的特征，构建特征矩阵，使用机器学习算法分类达到识别故障电弧的目的。基于故障电弧电流、电压时频域特性的检测方法是目前直流故障电弧检测方法中的主流方法。文献[11]从时频域角度对直流微网故障电弧信号特性进行研究，比较不同负载对故障电弧检测算法的影响。采用快速傅里叶变换(fast Fourier transform，FFT)分析电流信号，将频谱积分作为第 1 个特征，进行完整集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition，CEEMD)分解将本征模函数(intrinsic mode function，IMF)IMF7、IMF8 分量作为第 2 特征，提出阈值比较的检测方法。文献[12]提出了一种基于熵权法和随机森林算法的直流串联电弧故障检测方法，利用 FFT 进行频域计算，结合峰峰值、均值、标准差等时域特征构建混合判据，输入随机森林模型进行判断。文献[13]对不同电压等级下直流电弧进行分析，对比时域和频域下的特征指标，提出了适用于 750 V 系统的检测算法。文献[14]利用小波变换在时-频域中对电弧电流进行分析，采用 d5 小波系数进行故障电弧检测。文献[15]根据直流电弧的伏安特性，提出来一种综合利用线路电流和电源电压信息的直流串联电弧检测方法，利用检测电流的下降率、电流平均变化率、线路电流和电源电压交流分量的标准差来检测直流电弧。文献[16]提出了一种针对不同操作条件的串联电弧检测方法。利用双树复小波变换(dual-tree complex wavelet transform，DT-CWT)将电流信号分解然后利用改进的矩阵构造方法提取每个小波分量的奇异值，从而有效降低构建高维特征的计算成本。文献[17]针对小波变换处理信号冗余度大的问题，提出先对电流信号进行小波变换得到特征值构建特征矩阵，再对特征矩阵进行奇异值分解，从而提取更具区分度的电流信号特征参数，显著提高了检测准确率。上述方法需要进行时频变换，计算量较大，使得电弧检测所需硬件条件较高、实时性变差。

本文从时域角度出发，进行故障特征提取，针对光伏直流系统搭建模拟电弧实验平台，采集不同电压、电流等级下串联电弧的电流波形，再引入短时条件局部峰值率(short time-conditional local peaks rate，ST-CLPR)的分析方法提取时域特征，构建特征矩阵，最后采用随机森林算法训练模型达到串联电弧的检测与识别目的。

1 串联电弧实验平台及电弧特性分析

1.1 实验平台搭建

本文参考 UL1699B 标准，搭建了如图 1 所示串联直流电弧实验平台，平台元件参数如表 1 所示。实验平台由光伏模拟源、串联电弧发生器(arc fault generator, AFG)和负载部分构成回路，负载部分包括纯阻性负载、DC-AC 逆变器负载、DC-DC 变流器负载，其中 DC-AC 逆变器采用全桥拓扑，DC-DC 部分采用 Buck-Boost 变换器，通过调节 S_1—S_6 开关的通断即可实现不同的电路拓扑[18]，实验装置的实物图已移至附录(见图 A1)。

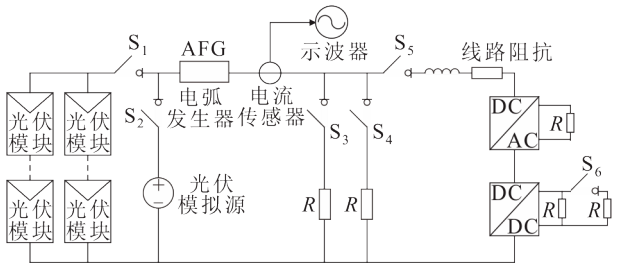


图 1　光伏系统直流串联电弧模拟实验平台

Fig.1　Photovoltaic system DC series arc simulation experimental platform

表 1　实验平台元件主要参数

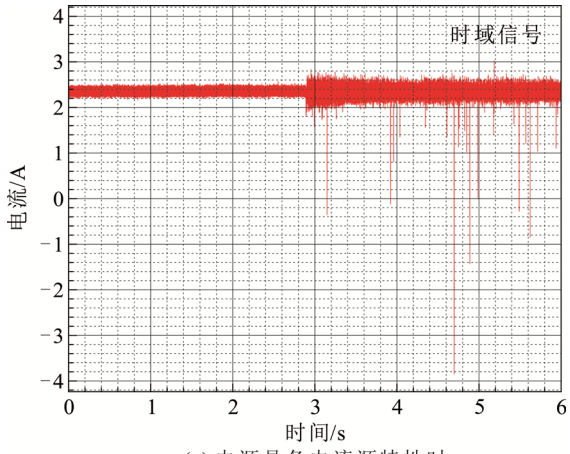
Table 1　Main parameters of experimental platform components

元件类型	参数/型号	数值
光伏模块	最大功率点电压/V	36.6
	最大功率点电流/A	5.18
光伏模拟源	最大输出功率/kW	40
DC-DC 变换器	最大输出功率/kW	8
	开关频率/kHz	10
DC-AC 逆变器	最大输出功率/kW	8
	开关频率/kHz	20
线路阻抗	阻值/Ω	5
线性电阻 *R*	阻值/Ω	50
	额定功率/kW	6
电流传感器	PINTECH-PT-2710	DC-200 MHz

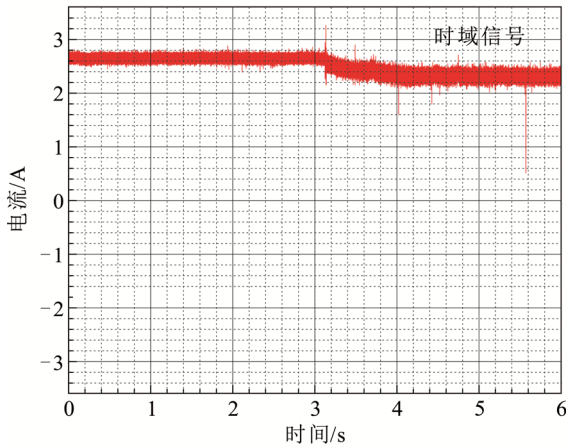
电弧发生器(AFG)通过步进电机控制铜棒电极的移动产生间隙，从而产生电弧，来模拟直流线路电缆断开和接头松动导致发生串联电弧的情况。设置电极移动距离为 1 mm，移动速度为 1 mm/s，每次实验前对铜电极进行打磨避免电极碳化物影响实验结果。通过实验平台中开关器件的通断可以实现纯阻性负载、DC-DC 负载和混合负载之间的切换，从而模拟不同的负载工况。采用 PINTECH-PT-2710 电流探头采集电流信号，示波器为 TEKTRONIX-MSO46，采样频率设置为 250 kHz。参考标准 UL1699B 将电流探头放置在光伏模拟源侧，记录故障电弧发生前后电路电流变化，导入 MATLAB 中对实验数据进行分析。

1.2　串联电弧电流波形分析

实验采集到的电弧波形如图 2 所示，当光伏系统串联电弧发生时，电流出现波动，其中夹杂交流分量，串联电弧发生前后回路电流平均值并没有明显减小，仅表现为比较剧烈的上下波动，电流波形图如图 2(a)所示；当电源具备电压源特性时，串联电弧发生后回路电流平均值会减小，同时电流上下



(a) 电源具备电流源特性时



(b) 电源具备电压源特性时

图 2　实验采集到的电弧电流波形

Fig.2　Waveform of arc current collected in the experiment

波动，电流波形图如图 2(b)所示。

直流串联电弧电流的物理过程具有动态性和无序性。在电弧燃烧过程中，受到电极材料蒸发和电弧电流本身磁场因素的影响，电弧电流的波形不断变化，在短时间内电流幅值会发生大的变化，这种变化可以作为识别串联电弧的特征。

2　串联电弧电流时域特征提取

由串联电弧电流波形可知，受阴极表面放电过程的影响，电弧故障发生后电流波形与正常状态相比波动幅值和杂乱程度均增大，可以在时域上对这种波动进行分析，借鉴信号处理的方法,采用短时条件局部峰值率(局部信号峰值高于其邻峰的某个预定义阈值水平的比率)对电流波形进行分析[19]。为使检测方法方便应用，需对电流信号进行加窗处理，计算一定时间窗口内信号的局部峰值率，为避免降噪对重要信息造成破坏，本文直接对原始信号进行特征提取与分析。

2.1 短时加窗处理

电流信号经过采样后为 $y(m)$，实际上是无限长的，为了检测达到实时性目的，处理中需对数据进行分帧处理，相当于乘以一个有限长的窗函数，如式(1)所示。

$$y(m)=\sum_{n=-\infty}^{\infty}x(n)\omega(n-m) \tag{1}$$

式中：m 为时间窗长度。式(1)可以理解为离散信号 $x(n)$经过一个单位冲激响应为 $\omega(n-m)$的非递归型有限冲激响应(finite impulse response，FIR)滤波器产生的输出。

为了得到短时的电流信号，选择矩形窗对电流信号进行加窗操作，窗函数在电流信号上滑动，将其分成帧处理。采用矩形窗对信号进行处理，矩形窗定义如下：

$$\omega(n)=\begin{cases}1, & 0\le n\le L-1\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{2}$$

式中：L 为窗口长度。

对信号数据进行加窗处理为实现在每个时间窗口内都能够完成故障判断提供了基础，窗口的长度选取经过实验验证得到，窗口长度过长和过短都会导致特征变量特性不明显。经实验验证，在设备采样频率为 250 kHz 的条件下，设置时长为 0.8 s 的时间窗长时，在时间窗内能够完成故障检测和判断且特征较为清晰，由于采样频率为 250 kHz，故设置每段采样信号长度为 20 万个点。

2.2 进行 ST-CLPR 处理

计算信号条件局部峰值率作为一种时域信号处理方法，可以从时域上发现信号的变化，该方法具有计算简单快速的特点，条件局部峰的定义如下：将一个样本与它相邻的两个样本比较，若样本值均大于相邻两个样本超过条件差分阈值 Δ，就可将其确定为一个条件局部峰[20]，即：

$$\begin{cases}x_{\mathrm{f}}(m)-x_{\mathrm{f}}(m-1)>\Delta\\ x_{\mathrm{f}}(m+1)-x_{\mathrm{f}}(m)\le-\Delta\end{cases} \tag{3}$$

式中：$x_{\mathrm{f}}(m)$表示采样到的信号数据，条件差分阈值 Δ 可以通过对信号求导，观察电弧前后导数的变化，来确定差分阈值 Δ 的选取。

在一个固定单位帧窗口内，统计被标为局部峰的个数 N_{clp}除以单位帧内总的点个数 M 的比值，得到单位帧的局部峰值率，即：

$$C_{\mathrm{LPR}}=\frac{N_{\mathrm{clp}}}{M} \tag{4}$$

ST-CLPR 的求取算法流程如下：

1）对电流信号采样数据进行滤波处理，滤除低频分量，防止对检测结果的干扰。

2）对信号分解，形成信号帧矩阵，确定帧长度、跳动步长，计算时间向量输出帧矩阵。

3）选取合适的差分阈值 Δ，Δ 为局部峰值与其相邻峰值之间的最小高度差，阈值的选取关乎电弧检测的精准度。

4）计算被标记为局部峰值的峰个数占单位帧内点总数的百分比，输出 ST-CLPR 的值。

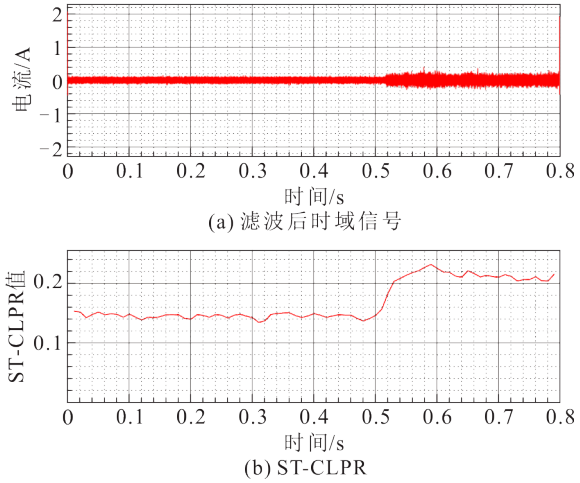
本文设计了 DC-DC 负载侧发生串联电弧、DC-DC 负载投切、线性电阻负载侧发生串联电弧、系统平衡点运行等 4 种工况，利用本文方法进行处理，检测算法用到的参数如表 2 所示。

表 2 信号处理所用参数

Table 2 Parameters used in signal processing

类型	参数	数值
Δ	差分阈值	0.02
M	每一帧包含点数	2 500 点
L	窗口长度	2 500 点
每段采样信号	采样频率/kHz	250
	采集点数	200 000
	时长/s	0.8
	分帧个数 N	80
每一帧	帧时长/s	0.01

通过实验平台采集不同工况下不同电压、电流等级的实验波形，先对信号进行滤波处理，滤除 20 kHz 以下电流分量，避免在实际工程应用中，存在 20 kHz 以下分量对检测工程干扰。经 ST-CLPR 分析不同工况下实验数据输出结果见图 3—图 6，这些图中每段采样信号被分成 80 个时长为 0.01 s



(a) 滤波后时域信号

(b) ST-CLPR

图 3 DC-DC 负载侧发生串联电弧

Fig.3 A series arc occurs on the DC-DC load side

的单位帧，每个单位帧得到一个 ST-CLPR 值，共计得到 80 个 ST-CLPR 值。

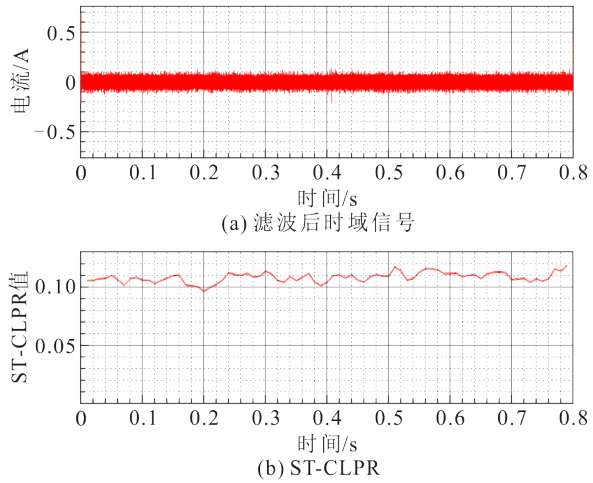


图 4　DC-DC 负载投切工况

Fig.4　DC-DC load switching conditions

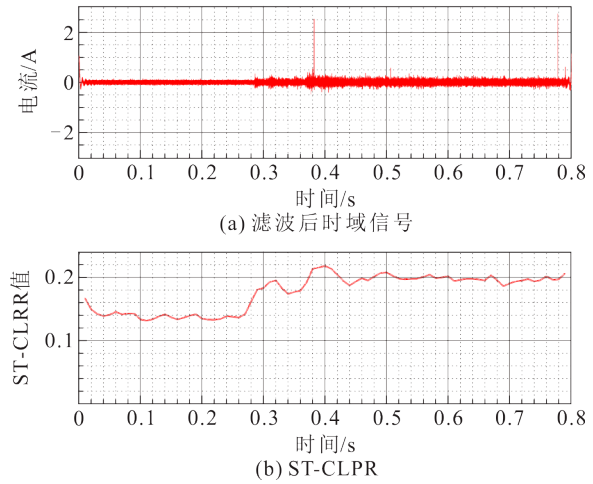


图 5　线性电阻负载侧发生串联电弧

Fig.5　A series arc occurs on the load side of a linear resistor

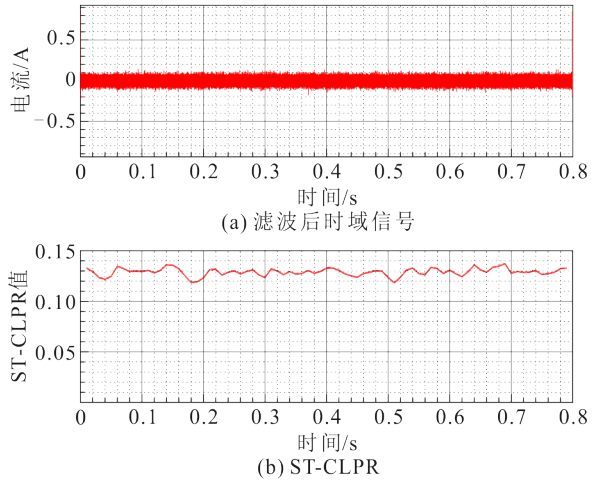


图 6　平衡点运行

Fig.6　Balance point operation

由上述 ST-CLPR 计算数值波形图可以看出，在单位时间窗口内，串联电弧工况的 ST-CLPR 相比于非电弧工况会发生突增，单位时间内前后 ST-CLPR 平均值变化明显，可以采用 ST-CLPR 的变化作为分类指标。

2.3　时域特征分析

为能够获得串联电弧的时域故障特征量，将一个固定时间窗口内将采样数据分为 N 帧，求取每一帧的 ST-CLPR，然后求这个时间窗内 ST-CLPR 的平均值作为一个特征量 K_1，即：

$$K_1=\frac{\sum_{i=1}^{N}S_{\mathrm{T-CLPR}i}}{N} \tag{5}$$

式中：N 表示单位采样信号中帧数目，本文为 80，分子表示单位采样时间内 80 个帧输出 ST-CLPR 值（$S_{\mathrm{T-CLPR}i}$）的总和，分子分母相除得到单位时间窗口内 ST-CLPR 的平均值 K_1。

此外，在一个时间窗将采样数据平均分为两段，如图 7 所示，由式(5)分别求出每段内 ST-CLPR 的平均值记作 K_{11} 和 K_{12}，再以式(6)构建特征值提升比 K_2 作为检测电弧的另一个特征量[21]：

$$K_2=\frac{K_{12}}{K_{11}} \tag{6}$$

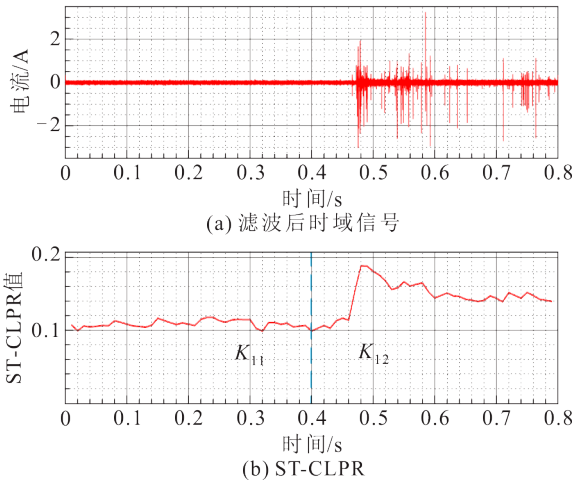


图 7　串联电弧电流及检测特征

Fig.7　Series arc current and detection characteristics

为验证该判别方法的可行性，采集了工作电流在 1~10 A 范围内的电流正常工况和电弧工况波形数据，经过本文方法求得的 400 组特征量 K_1、K_2 如图 8 所示。从图 8 中可以看出，非电弧和发生串联电弧两种工况下特征量 K_1、K_2 值存在明显的差异。

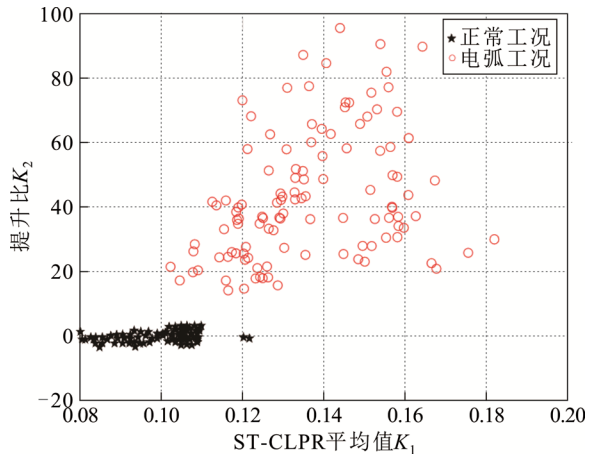


图 8 不同工况下本文方法获得的特征量

Fig.8 Feature quantities obtained by the method in this article under different operating conditions

3 基于随机森林的直流串联电弧检测算法

直接使用特征量 K_1 和 K_2 识别串联电弧时，需要选取合适的阈值，为克服数据集中的噪声和异常值的影响，本文采用随机森林算法。

随机森林算法通过自举重采样的方法从原始样本中提取多个样本，对每个自举样本进行决策树建模，然后将多个决策树的预测结果结合起来，通过投票得到最终的预测结果，实现样本分类[12]。

本文构建的直流串联电弧检测算法的流程图如图 9 所示。

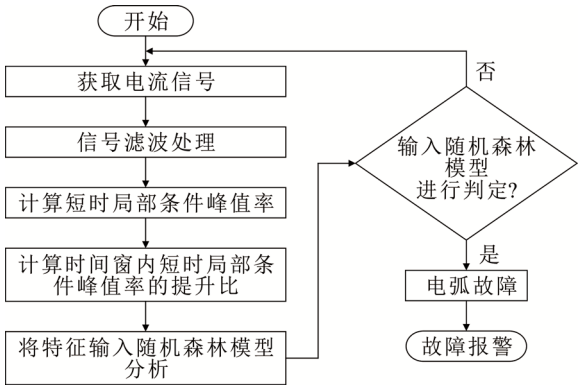


图 9 直流串联电弧检测算法流程图

Fig.9 Flowchart of DC series arc detection algorithm

为验证所提方法的准确性及适用性，通过模拟实验平台采集电流数据，电流范围从 1 A 到 10 A，电压范围从起弧电压 80 V 到 500 V，为模拟负载投切可能对电弧检测算法的影响，采集了不同电流下进行负载投切的数据作为干扰选项混入数据集中，生成了由非电弧工况和串联电弧工况组成的电流波形 641 个样本。并对电流数据进行短时局部条件峰值率计算，输出时域特征组成特征矩阵，检测算法用到参数如表 2 所示。

将 641 个样本划分为训练集和测试集，其中训练集定为 513 个样本(包括平衡点运行工况 205 个，负载投切 33 个，电弧数据 275 个)，进行检测算法训练，对每一组数据进行标签处理，非电弧工况(包括平衡点运行工况和负载投切工况)标签为 1，串联电弧工况标签为 2。

利用训练后的检测算法对测试集(包含 128 个样本，其中平衡点运行工况 38 个，负载投切 18 个，电弧数据 72 个)中的样本进行了识别，识别结果如表 3 和图 10 所示，该模型对于测试集串联电弧检测综合准确率达到 98.4%，表明本文检测算法能够很好对非电弧工况、串联电弧工况进行识别。

表 3 训练集与测试集识别结果

Table 3 Recognition results of training and testing sets

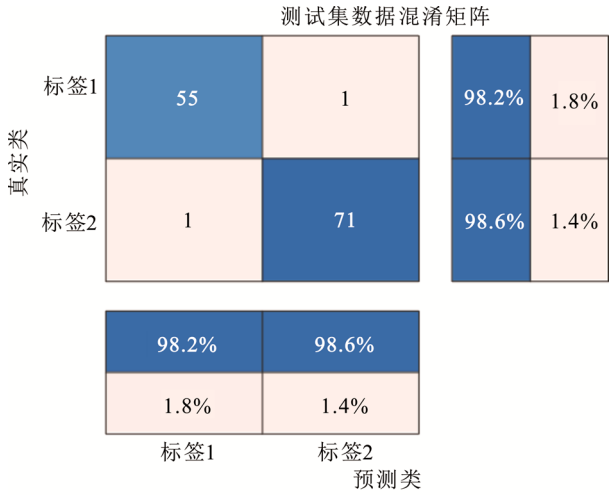
数据集	状态	样本数目	诊断准确率/%
训练集	非电弧工况	238	100
	电弧工况	275	100
测试集	非电弧工况	56	98.2
	电弧工况	72	98.6

为了验证本文所提方法的性能，选取了几种主流的直流电弧检测算法作为对照，包括支持向量机(support vector machine，SVM)和卷积神经网络(convolutional neural network，CNN)。通过对这些算法的检测准确率、计算量和运行时间进行对比，评估本文方法的优势。在对比实验中，训练和测试数据集均来源于实验平台采集的直流电弧故障数据，在指标选择上，本文采用准确率、召回率以及计算所需时间作为主要衡量标准，检测结果如表 4 所示。

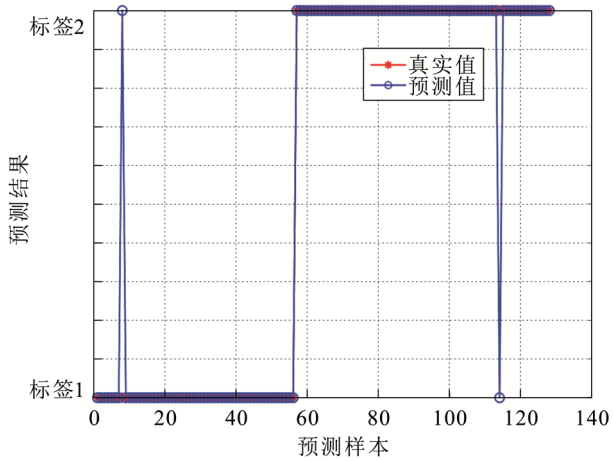
从表 4 可以看出，本文方法在检测准确率和召回率方面均优于其他算法，分别达到 98.5%和 97.8%，较 SVM 方法提高了 5.3%和 5.3%，此外，本文方法的计算时间仅为 258 ms，显著优于 SVM 方法所用的 453 ms 和 CNN 方法的 508 ms，表明本文方法在准确性和实时性上具备显著优势，适用于工程应用。

4 结论

本文基于搭建的光伏直流串联电弧实验平台，采集不同电压、电流等级下的串联电弧电流波形，



(a) 测试集输出结果



(b) 测试集输出结果对比

图 10　测试集输出结果

Fig.10　Test set output results

表 4　不同算法检测准确率

Table 4　Accuracy of different algorithms

算法	准确率/%	召回率/%	计算时间/ms
本文算法	98.4	97.8	258
SVM	93.2	92.5	453
CNN	96.4	95.9	508

进而获得了不同工况及不同负载下的串联电弧电流数据，通过计算短时条件局部峰值率(ST-CLPR)的方法对故障电弧实现检测，并得到以下几点结论：

1）对电流数据进行短时条件局部峰值率分析发现，采用短时条件局部峰值率平均值和提升比作为检测特征量，在直流串联电弧发生时有明显变化，可以作为识别直流串联电弧检测的特征量。

2）本文基于时域特征量构建了一种故障电弧检测算法，并在不同工况(包括不同电路拓扑、电压等级、负载电流水平以及负载投切等干扰项)下验证了其准确性和适用性。

3）通过与主流算法的对比实验可以看出，本文提出的基于随机森林模型的直流电弧检测方法在准确率、召回率和计算效率等方面均表现出一定优势，这表明本文方法不仅能够有效提取直流电弧故障特征信号，还能够满足实际工程中对实时性和低计算量的需求，未来研究将进一步优化方法的适用性，拓展其在更复杂场景中的应用潜力。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] 汪倩，陈思磊，孟羽，等. 低压直流系统故障电弧检测技术研究综述[J]. 高压电器，2023，59(5)：93-103.
WANG Qian, CHEN Silei, MENG Yu, et al. Review of research on DC arc fault detection technology in low voltage DC system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 93-103.

[2] 牟龙华，王伊健，蒋伟，等. 光伏系统直流电弧故障特征及检测方法研究[J]. 中国电机工程学报，2016，36(19)：5236-5244.
MU Longhua, WANG Yijian, JIANG Wei, et al. Study on characteristics and detection method of DC arc fault for photovoltaic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5236-5244.

[3] 中国电力企业联合会. 光伏发电系统直流电弧保护技术要求：GB/T 39750-2021[S]. 北京：中国标准出版社，2021.
China Electricity Council. Technical Requirements for DC Arc Protection in Photovoltaic Power Generation Systems: GB/T 39750-2021[S]. Beijing, China: China Standards Press, 2021.

[4] SIDHU T S, SACHDEV M S, SAGOO G S. Detection and location of low-level arcing faults in metal-clad electrical apparatus[C]//Proceedings of the Seventh International Conference on Developments in Power System Protection. Amsterdam, Netherlands: IET, 2001: 157-160.

[5] VASILE C, IOANA C, DIGULESCU A, et al. Electromagnetic and acoustic bimodality for the detection and localization of electrical arc faults[C]//Proceedings of SPIE 10010, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies. Constanta, Romania: SPIE, 2016: 1001004.

[6] KIM C J. Electromagnetic radiation behavior of low-voltage arcing fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 416-423.

[7] 王尧，张彦风，牛峰，等. 光伏直流电弧电磁辐射特性分析与测量方法[J]. 电工技术学报，2019，(14)：2913-2921.
WANG Yao, ZHANG Yanfeng, NIU Feng, et al. Characterization and measurement method of DC arc electromagnetic radiation for photovoltaic systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(14): 2913-2921.

[8] 朱冠南，杨晓艺，高宇航，等. 小电流直流电弧的动态模拟及其稳态特性研究[J]. 电测与仪表，2020，57(1)：42-48.
ZHU Guannan, YANG Xiaoyi, Gao Yuhang, et al. Study on dynamic simulation and steady-state characteristics of small current DC arcs[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(1): 42-48.

[9] XIONG Q, JI S C, LIU X J, et al. Electromagnetic radiation characteristics of series DC arc fault and its determining factors[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(11): 4028-4036.

[10] 蔡彬，陈德桂，吴锐，等. 开关柜内部故障电弧的在线检测和保护装置[J]. 电工技术学报，2005，20(10)：83-87.
CAI Bin, CHEN Degui, WU Rui, et al. Online detecting and protec-

tion system for internal faults arc in switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(10): 83-87.

[11] 吴春华，林夏苗，李智华，等. 直流微电网系统电弧故障特征及检测方法[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4307-4316.
WU Chunhua, LIN Xiamiao, LI Zhihua, et al. Arc fault characteristics and detection method of DC microgrid system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4307-4316.

[12] LIU Y J, LI Y, LI G L, et al. Dc series arc fault detection based on random forest combined with entropy weight method[C]//2022 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the era of Artificial Intelligence (ICSMD). Harbin, China: IEEE, 2022: 1-6.

[13] 刘国强，李国春，郝亚楠，等. 低压直流配电网强弱电弧特征及检测算法[J]. 中国电力，2024，57(2)：94-102.
LIU Guoqiang, LI Guochun, HAO Yanan, et al. Characteristics and detection algorithm of strong and weak arc in low voltage DC distribution network[J]. Electric Power, 2024, 57(2): 94-102.

[14] MIAO W C, ZHOU X Y, WANG F, et al. DC arc fault detector based on wavelet transform for DC microgrid[C]//2022 7th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). Shanghai, China: IEEE, 2022: 413-418.

[15] LU Q W, YE Z Y, SU M M, et al. A DC series arc fault detection method using line current and supply voltage[J]. IEEE Access, 2020, 8: 10134-10146.

[16] GUO F Y, GAO H X, WANG Z Y, et al. Detection and line selection of series arc fault in multi-load circuit[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(11): 5089-5098.

[17] YIN Z D, WANG L, ZHANG B, et al. An integrated DC series arc fault detection method for different operating conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 12720-12729.

[18] 赵双乐，刘志峰，侯晓鑫，等. 逆变器启动工况下光伏直流串联电弧故障识别方法[J]. 高电压技术，2024，50(10)：4691-4702.
ZHAO Shuangle, LIU Zhifeng, HOU Xiaoxin, et al. Diagnosis of photovoltaic DC series arc fault under inverter startup conditions[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4691-4702.

[19] ZHIVOMIROV H, KOSTOV N. A method for signal change detection via short-time conditional local peaks rate feature[J]. Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2022, 15(2): 106-109.

[20] 张硕，胡雷，徐元栋. 基于多层窄带局部峰值因子的变桨轴承故障特征提取[J]. 轴承，2024，(9)：108-115.
ZHANG Shuo, HU Lei, XU Yuandong. Fault feature extraction of pitch bearings based on multi-layer narrow band local crest factor[J]. Bearing, 2024, (9): 108-115.

[21] 孟羽，陈思磊，吴子豪，等. 基于随机共振方法增强光伏直流故障电弧检测特征的研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(6)：2396-2406.
MENG Yu, CHEN Silei, WU Zihao, et al. Research on feature enhancement of DC arc fault detection in photovoltaic systems based on stochastic resonance[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2396-2406.



唐　欣
1975—，男，博士，教授，博导
主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用
E-mail: tangxin_csu@163.com

TANG Xin
Ph.D., Professor



周帅师(通信作者)
1999—，男，硕士生
主要从事直流电弧检测方面的工作
E-mail: 760643561@qq.com

ZHOU Shuaishi
Corresponding author

收稿日期　2025-06-10　在线出版日期　2025-08-22　　编辑　陈　蔓

附录 A

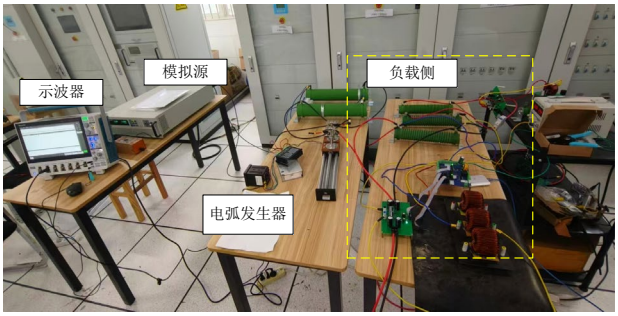


图 A1　光伏系统直流串联电弧模拟实验平台实物图

Fig.A1　Experimental platform for photovoltaic system DC series arc simulation