

doi: 10.7690/bgzdh.2024.09.013

基于 Schavemaker 模型和小波分析的航空 EWIS 故障电弧检测技术

张志亮^{1,2}, 王希彬¹, 贾临生¹, 戴洪德¹

(1. 海军航空大学航空基础学院, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 32151 部队, 河北 邢台 054000)

摘要: 针对航空线路系统故障电弧检测问题, 在分析故障电弧的成因和基本特征的基础上, 设计一种基于小波分析的故障电弧检测算法。分析基于 Schavemaker 电弧模型的交流串联故障电弧发生电路, 采用 sym5 小波对故障电弧电流数据进行分解, 提取出电流的高频部分, 并提出基于高频分量 d_3 标准差的故障电弧检测方法, 基于 Simulink 对该算法进行仿真验证。仿真结果表明: 该方法比传统的小波分解后直接设定阈值检测故障电弧方法区分度高, 能快速准确地确定故障电弧的存在, 为工程实践提供有益参考。

关键词: 故障电弧; 故障电弧检测; 电弧模型; 小波分析; 波动率

中图分类号: V242 **文献标志码:** A

Fault Arc Detection Technology for Aviation EWIS Based on Schavemaker Model and Wavelet Analysis

Zhang Zhiliang^{1,2}, Wang Xibin¹, Jia Linsheng¹, Dai Hongde¹

(1. School of Basic Science for Aviation, Naval Aviation University, Yantai 264001, China;

2. No. 32151 Unit of PLA, Xingtai 054000, China)

Abstract: Aiming at the problem of fault arc detection in aviation line system, based on the analysis of the causes and basic characteristics of fault arc, a fault arc detection algorithm based on wavelet analysis is designed. This paper analyzes the AC series arc fault circuit based on Schavemaker arc model, uses sym5 wavelet to decompose the fault arc current data, extracts the high frequency part of the current, and proposes a fault arc detection method based on the d_3 standard deviation of the high frequency component, and simulates the algorithm based on Simulink. The simulation results show that the proposed method has a higher degree of discrimination than the traditional method of directly setting the threshold after wavelet decomposition, and can quickly and accurately determine the existence of fault arc, which provides a useful reference for engineering practice.

Keywords: fault arc; fault arc detection; arc model; wavelet analysis; fluctuation rate

0 引言

飞机在飞行过程中如果出现故障电弧, 可能会引燃周围易燃物、导致信号传输失效及引发飞机火灾等事故, 对飞行安全造成严重影响。历史上由故障电弧引起的事故案件屡有发生。1998年9月2日, 一架麦道 MD-11 飞机由于故障电弧引燃周围易燃物导致飞机火灾, 207名乘客及22名机组人员全部遇难^[1]。由此可见, 飞机故障电弧严重威胁飞行安全, 航空 EWIS 故障电弧的研究已成为近年来电气研究领域的热点问题之一。

故障电弧检测研究主要包括电弧建模、故障电弧电流特征提取和故障电弧检测算法等方面^[2]。目前国内外应用较多的电弧模型有 Cassie 电弧模型、Mayr 电弧模型、Habedank 电弧模型^[3]、改进的 Mayr 电弧模型^[4]等。其中, Cassie 电弧模型和 Mayr 电弧模型提出的时间最早, 二者均基于能量平衡理论,

而 Habedank 电弧模型是将 Cassie 和 Mayr 电弧模型串联构成, 改进的 Mayr 电弧模型是在 Mayr 电弧模型的基础上丰富了电弧模型参数。故障电弧特征分析主要采用的方法有傅立叶分析^[5]和小波分析^[6]等。故障电弧检测算法主要有神经网络算法^[7]、支持向量机法^[8]、Chirp-zeta 变换法^[9]、ABCD 矩阵系数法^[10]等。其中, 神经网络算法和支持向量机主要应用于低压配电系统, Chirp-zeta 变换法和 ABCD 矩阵系数法主要应用于飞机等负载类型少的场景。这些算法需要训练样本, 而且计算量较大。

针对航空线路系统故障电弧问题, 笔者在分析故障电弧的成因和基本特征的基础上, 分析了基于 Schavemaker 电弧模型的交流串联故障电弧发生电路, 基于 sym5 小波对电流数据进行分析, 实现对故障电流的特征提取, 并提出一种改进的计算高频分量 d_3 波动率的方法对故障电弧进行检测, 最后基

收稿日期: 2024-05-17; 修回日期: 2024-06-20

基金项目: 国防科技项目基金(F062102009); 山东省高等学校青年创新团队(2020KJN003)

第一作者: 张志亮(1987—), 男, 河北人, 硕士。

于 Simulink 对笔者所提故障电弧检测算法进行了仿真验证。

1 航空故障电弧概述

故障电弧是高导电性气体电离时的一种自持放电现象，是一种高阻抗故障，由于电路中存在高阻抗，限制电流超过其断开阈值，传统的保护装置（例如继电器、断路器和保险丝等）难以检测^[11]。故障电弧的出现往往由于松连接、疏忽的损伤或绝缘老化等^[12]。

故障电弧依据飞机供电方式可分为直流和交流 2 种；依据故障发生的位置又可以分为串联、并联和接地。文中主要研究飞机交流串联故障电弧。

交流 115 V/400 Hz 是目前飞机上最主要的交流供电方式之一，飞机交流串联故障电弧虽然在电压幅值、频率以及所处的复杂环境方面具有一定特殊性，但是同样具有交流电的普遍特征^[13]，如图 1 所示。

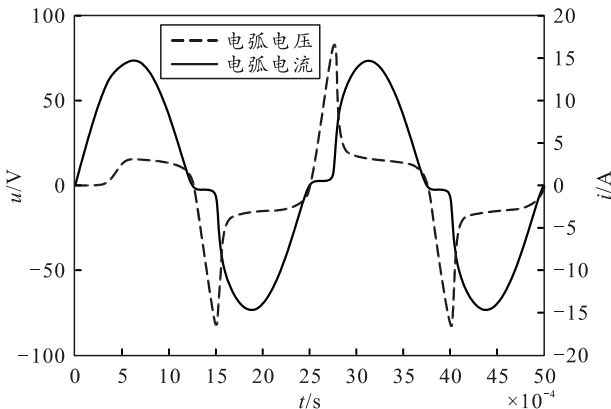


图 1 典型交流串联故障电弧波形

结合上图及航空电气系统的特点，总结出航空交流串联故障电弧具有如下基本特征^[14]：

- 1) 电弧存在高频噪声。
- 2) 电弧可能是间歇发生的，即电弧在电流过零处出现熄弧且不能复燃；也可能是持续的、有一定周期性发生的，即电弧在电流过零处熄灭后可重新复燃。
- 3) 电弧可等效为一个电阻，因此串联故障电弧电流比正常时的电流要小。
- 4) 出现故障电弧时，每半个周期会出现一段电流值近似为零的情况，称为电流的“平肩部”，且是随机的。由于存在一段零休区域，因此故障电弧电流的变化率要大于正常电流的变化率。
- 5) 出现故障电弧时，故障点两端的电压畸变较大，在电流过零点处电压变化率最大。

2 电弧模型

2.1 简化的 Schavemaker 模型原理

Schavemaker 模型表达式为^[15]：

$$\frac{1}{g} \left(\frac{dg}{dt} \right) = \frac{1}{\tau_s} \left(\frac{e_a \cdot i_a}{\max(e_{arc} \cdot |i_a|, p_e + p_1 \cdot e_a \cdot i_a)} - 1 \right) \quad (1)$$

式中： g 为单位长度电弧电导； τ_s 为 Schavemaker 电弧时间常数； e_a 为电弧电压； i_a 为电弧电流； e_{arc} 为大电流时的电弧电压常量； p_e 为单位长度电弧散出功率； p_1 为电弧散失功率系数。

p_1 与断路器内灭弧介质热阻导致的压力有关，通常低压交流电路中不存在断路器，可以舍去，则上式简化为

$$\frac{1}{g} \left(\frac{dg}{dt} \right) = \frac{1}{\tau_s} \left(\frac{e_a \cdot i_a}{\max(e_{arc} \cdot |i_a|, p_e)} - 1 \right) \quad (2)$$

由于交流电弧电流值 $|i_a|$ 过零前属于大电流范围，有 $p_e < e_{arc} \cdot |i_a|$ ，则 $\max(e_{arc} \cdot |i_a|, p_e) = e_{arc} \cdot |i_a|$ ，因此式(2)变为：

$$\frac{1}{g} \left(\frac{dg}{dt} \right) = \frac{1}{\tau_s} \left(\frac{e_a \cdot i_a}{e_{arc} \cdot |i_a|} - 1 \right) \quad (3)$$

当电弧达到稳定燃烧状态时，在大电流区域电路阻抗远远大于电弧电阻，电流取决于原电路参数^[16]。此时电弧处于低阻态，只有 $i_a = i(t)$ 是未知数，式(3)可化为线性微分方程形式：

$$R_a \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{R_a} \right) = \frac{1}{\tau_s} \left(\frac{e_a}{e_{arc}} - 1 \right) \quad (4)$$

与 Cassie 模型类似，求解上式得：

$$\frac{1}{R_a} = e^{-t/\tau_s} \left[\frac{1}{R_o} + \frac{1}{\tau_s \cdot e_{arc}} \int_0^t i_a(t) e^{t/\tau_s} dt \right] \quad (5)$$

式中 R_o 为 $t=0$ 时的电阻。设 $i_a(t) = I_m \omega t$ ， $\omega t \ll \pi/2$ ，代入式(5)得：

$$1/R_a = (t/\tau - 1)/R_s + (1/R_o - 1/R_s) e^{-t/\tau_s} \quad (6)$$

式中： $R_s = \sqrt{2} \cdot e_{arc} / (I_m \cdot \omega \cdot \tau_s) = e_{arc} / (I \cdot \tau_s)$ ； I 为大电流区域电流的有效值。

当 $R_o = R_s$ 时，式(6)就是电弧稳定燃烧时的方程，此时电弧电压 e_a 应为：

$$e_a = i_a R_a = \sqrt{2} e_{arc} \frac{t/\tau_s}{t/\tau_s - 1} = \sqrt{2} e_{arc} \frac{t}{t - \tau_s} \quad (7)$$

由式(7)知，由于 $\tau_s \ll t$ ，因此 e_a 为常数，式(4)适用于电弧过零前的低阻态情况。

当电弧电流接近过零区域时， $p_e > e_{arc} \cdot |i_a|$ ，则 $\max(e_{arc} \cdot |i_a|, p_e) = p_e$ ，方程式(2)变为：

$$\frac{1}{g} \left(\frac{dg}{dt} \right) = \frac{1}{\tau_s} \left(\frac{e_a \cdot i_a}{p_e} - 1 \right) \quad (8)$$

可以看出式(8)与 Mayr 模型方程形式相同^[17]，因此 Schavemaker 模型也能描述电弧电流接近过零区域时电弧高电阻状态。

综上所述，简化的 Schavemaker 模型可随着电弧电流的变化改变方程形式，在低阻态时采用类似 Cassie 模型的形式描述电弧，在高阻态时采用类似 Mayr 模型的形式描述电弧，能更好地反映飞机交流故障电弧的特性。

2.2 Schavemaker 模型电弧动态仿真

根据前述模型原理，可将电弧等效为一种压控电流源，保证其外特性符合要求，利用 Matlab/

Simulink 中的 PSB 模块 (电力系统模块) 和微分方程编辑器 (differential equation editor, DEE) 搭建电弧仿真模型，如图 2 所示。

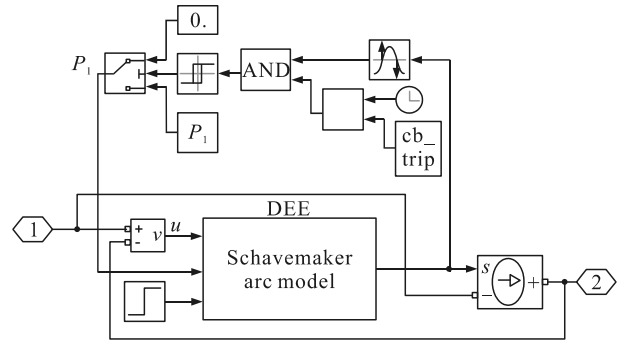


图 2 电弧仿真模型

将上述电弧模型作为子系统，搭建电弧仿真电路如图 3 所示。该电路具有测量电路总电压、电弧电压、电弧电流、电弧电阻的功能，并且能将测量值输出到 Matlab 工作区中。

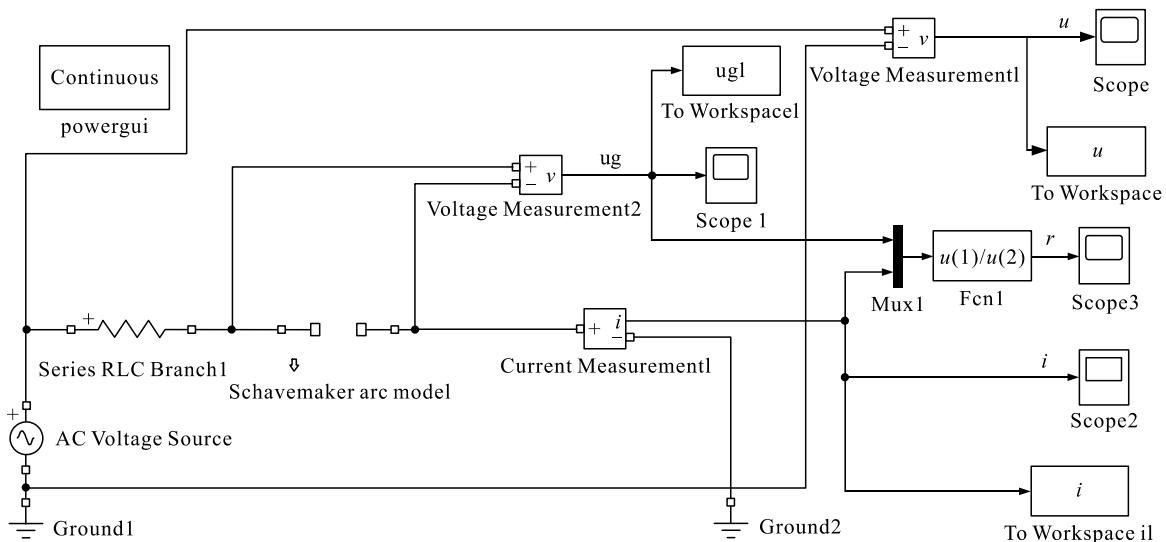


图 3 电弧仿真电路

3 小波分析原理

小波变换具有多分辨率分析的特性，相当于把信号多次通过高频滤波器和低频滤波器进行逐级分解，得到多组高频和低频信号^[18]。

设函数 $\psi(t) \in L^2(R)$ ，若其傅立叶变换 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足：

$$C_\psi = \int_R |\hat{\psi}(\omega)|^2 d\omega / |\omega| < \infty \quad (9)$$

则 $\psi(t)$ 为一个基本小波或母小波。将 $\psi(t)$ 进行平移和伸缩后，得到一个小波函数：

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in R; \quad a \neq 0 \quad (10)$$

式中： b 为平移因子； a 为伸缩因子。

对于任意函数 $f(t) \in L^2(R)$ ，其连续小波变换为：

$$\psi_f(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (11)$$

式中 $\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$ 是基本小波 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的共轭。

令 $a = a_o^m$ ， $b = kb_o a_o^m$ ，代入式(11)中得到离散小波变换为：

$$WT_f(m,k) = \langle f, \psi_{m,k} \rangle = |a_o|^{-\frac{m}{2}} \int_R f(t) \overline{\psi(a_o^{-m}t - kb_o)} dt \quad (12)$$

式中： $a_o > 1$ ； $b_o > 0$ ； $m, k \in Z$ 。

一般取 $a_o=2$ ， $b_o=1$ ，使离散小波成为二进正交

小波:

$$\psi_{m,k}(t) = 2^{-m/2} \int_R f(t) \psi(2^{-m}t - k) dt. \quad (13)$$

假设用 S 代表原始信号, D_i 代表第 i 次分解得到的高频系数, A_i 代表第 i 次分解得到的低频系数, 若将原始信号进行 $n=3$ 次分解^[19], 过程如图 4 所示。

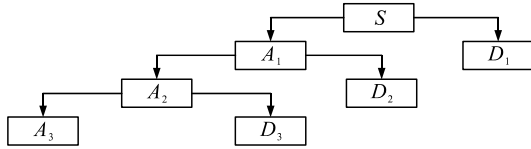


图 4 多分辨率分解

则原始信号可表示为:

$$S = A_1 + D_1 = A_2 + D_1 + D_2 = A_3 + D_1 + D_2 + D_3. \quad (14)$$

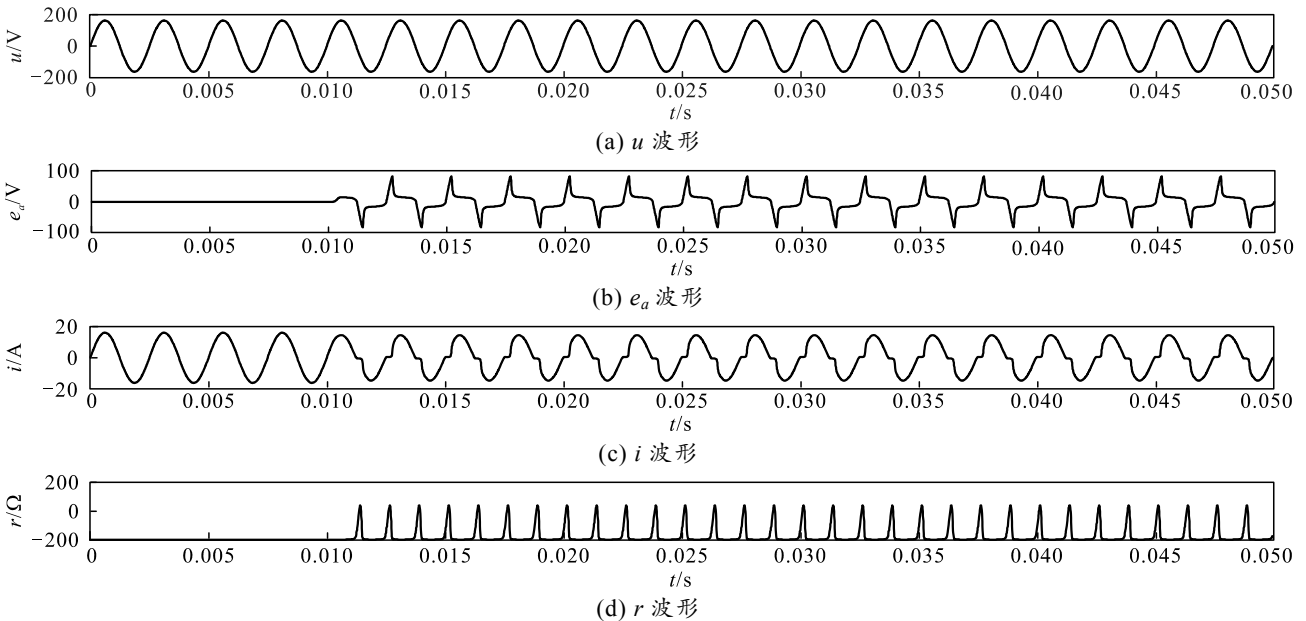


图 5 u 、 e_a 、 i 、 r 波形

4.2 电流信号的小波分解

选择小波基考虑的特性主要有对称性、正交性、紧支性等, $coifN$ 、 $symN$ 、 dbN 小波都满足条件, 在航空故障电弧检测方面 $symN$ 小波区分度较高, 更

低频系数 A_i 与高频系数 D_i 中所包含的频率范围为:

$$\left. \begin{aligned} D_i &: [2^{-(i+1)} f(s), 2^{-i} f(s)] \\ A_i &: [0, 2^{-(i+1)} f(s)] \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

式中: $f(s)$ 为原始信号采样频率; i 为分解次数。

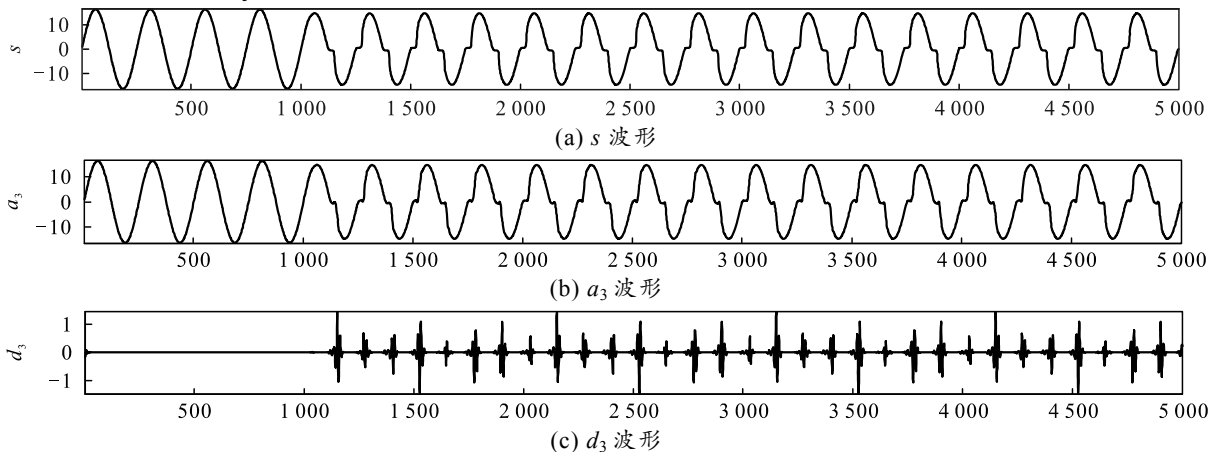
4 故障电弧检测仿真

4.1 故障电弧仿真

设置交流电源参数为 115 V/400 Hz, 纯阻性负载 $R=10 \Omega$; 电弧模型主要参数为 $\tau=0.5e-4 s$, $p_e=40 W$, $g(0)=5000 s$, 电弧发生时刻为 0.01 s, 仿真时长为 0.05 s, 如图 5 所示。

适合故障电弧研究^[20]。笔者选取 $sym5$ 小波来提取飞机故障电弧电流信号的特征分量。

用 $sym5$ 小波对第 5 个周期以后出现故障电弧的电流波形进行 3 层分解, 如图 6 所示。



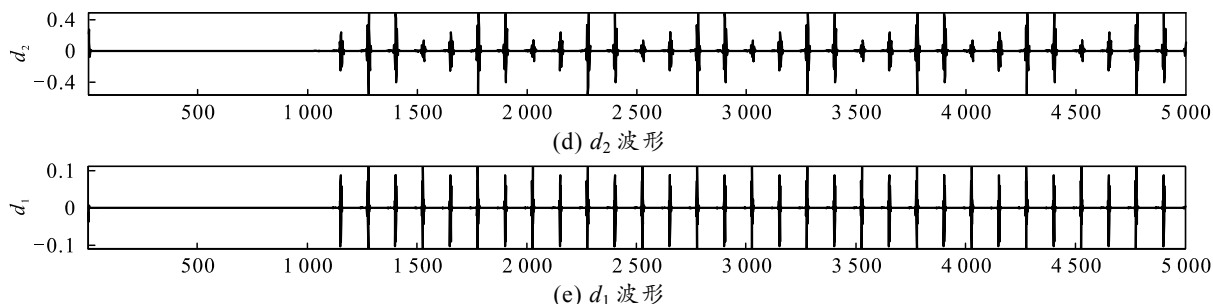


图6 电流波形分解

由上图可以看出，正常电流小波分解后高频系数几乎为零，而故障电流小波分解的高频分量在零休区域达到模极大值。

4.3 故障电弧特征提取

单纯使用小波分解后的高频分量作为故障电弧的特征参量，存在难以设置阈值和检测不方便的问题。为实现实时检测，对每个周期的波形高频分量计算标准差。

设 σ_i 为第 i 个周期的小波高频系数标准差， N 为一个周期内采样点的个数， x_j 为第 j 个采样点的数据， \bar{x}_i 为第 i 个周期采样点的算术平均值，则标准差 σ_i 可表示为：

$$\sigma_i = \sqrt{\left[(x_1 - \bar{x}_i)^2 + (x_2 - \bar{x}_i)^2 + \dots + (x_j - \bar{x}_i)^2 \right]} / N, \quad j=1, 2, \dots, N. \quad (16)$$

根据上述公式，设置在第 5 个周期以后产生故障电弧，对电流波形进行小波分解，绘制 20 个周期的周期标准差值如图 7 所示。

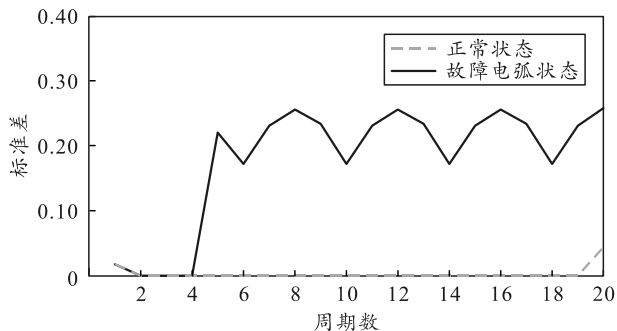


图7 正常状态与故障电弧状态周期标准差对比

由上图可以看出，故障电弧状态的周期标准差值远大于正常状态的周期标准差值；因此，取波形的周期标准差值 0.1 作为阈值，判断是否发生故障电弧。

4.4 故障电弧检测

依据相关标准，若在 100 ms 内检测到超过 8 个电弧信号时，则判断该电路发生故障电弧^[21]。

将电流数据经 sym5 小波 3 层分解，根据 sym5 小波分析高频分量 d_3 来检测故障电弧，实时检测高频分量 d_3 的每个周期标准差 σ 与给定的阈值进行比较。当标准差值大于阈值，计数 1 次，即：

$$\begin{cases} k_i = 0; & \sigma_i < r \\ k_i = 1; & \sigma_i > r \end{cases}, \quad i=1, 2, \dots. \quad (17)$$

式中： k_i 为比较后的输出值； σ_i 为每个周期标准差； r 为阈值。

将每个周期的输出值累加，看是否 ≥ 8 ，即满足下式：

$$y = \sum k_i \geq 8. \quad (18)$$

满足则判断发生了故障电弧，应发出预警信号。

5 结束语

航空交流串联故障电弧具有低压交流电弧相同的动态特性，只是幅值、频率有所不同，电流波形会出现零休现象，利用小波分析能有效提取故障信息进行电弧检测。基于 Schavemaker 电弧模型仿真航空交流串联电路，在对电流信号进行 sym5 小波分解后，采用检测每个周期的波形高频分量标准差的方法。与设定的阈值进行比较，通过判断规定时间内是否累计 8 次以上超过阈值来进行判别，从而高效检测故障电弧是否发生，通过计算机仿真，验证了该方法的可行性，而且该方法更易于嵌入式实现。

参考文献：

- [1] 杨冰. 瑞航空 111 号班机空难——一段夺命电弧改变了航空史[J]. 现代班组, 2016, (2): 24.
- [2] 左剑凯, 曲娜, 陈嘉彤, 等. 基于 Schavemaker 模型的串联电弧故障仿真研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2020, 16(2): 45-51.
- [3] HABEDANK U. Application of a new arc model for the evaluation of short-circuit breaking tests[J]. IEEE transactions on power delivery, 1993, 8(4): 1921-1925.

[4] 郭凤仪, 王鑫, 刘艳丽. 基于 Mayr 模型改进的适用于串联故障电弧的新模型[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(2): 67-71.

[5] 丁鑫, 竺红卫, 殷浩楠, 等. 基于快速傅里叶变换(FFT)的交流电器电弧快速检测法[J]. 电器与能效管理技术, 2015(21): 8-12.

[6] 崔芮华, 李英男, 王传宇, 等. 基于小波能量矩的航空交流串联电弧故障识别算法研究[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(11): 1-9.

[7] 韩旭, 王蒙. 基于遗传算法优化 BP 神经网络的故障电弧识别[J]. 测控技术, 2016, 3(12): 21-25, 29.

[8] 陈奎, 陈博博. 基于改进暂态相关分析和支持向量机的电弧故障选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 66-73.

[9] YARAMASU A, CAO Y, LIU G, et al. Aircraft electric system intermittent arc fault detection and location[J]. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, 2015, 51(1): 40-51.

[10] GEORGIJEVIC N L, JANKOVIC M V, SRDIC S, et al. The detection of series arc fault in photovoltaic systems based on the arc current entropy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(8): 5917-5930.

[11] SPYKER R, SCHWEICKART D L, HORWATH J C, et al. An evaluation of diagnostic techniques relevant to arc fault current interrupters for direct current power systems in future aircraft[C]//IEEE Electrical Insulation Conference and Electr. Manufacturing Expo, IEEE, 2005: 146-150.

[12] ARUNACHALAM S, DIONG B. A parametric model

approach to arc fault detection for DC and AC power systems[C]//Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference 41st IAS Annual Meeting. IEEE, 2006(5): 2249-2255.

[13] HICKMAN G, GERARDI J, FIELD, S, et al. An acoustic-based wiring diagnostic system for aircraft[C]//Presented at the Aerospace Technology Conference and Exposition. SAE Technical Paper, Nov, 2009.

[14] 王莉, 曹璐, 严仰光. 航空交流故障电弧特性的研究[J]. 低压电器, 2011(2): 19-23.

[15] SCHAVEMAKER P H, VAN D S L. An improved Mayr-type arc model based on current-zero measurements [circuit breakers][J]. IEEE Transactions on Power delivery, 2000, 15(2): 580-584.

[16] 姜斌峰, 王莉. 低压交流电线故障电弧模型研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(4): 20-24.

[17] SCHAVEMAKER P, VAN D S L. The arc model blockset[C]//proceedings of the Proceedings of the Second IASTED International Conference Power and Energy Systems (EuroPES). Crete, Greece, F, 2002.

[18] 刘明才. 小波分析及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 152-155.

[19] 王希彬. 飞机故障电弧检测[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2020: 47-49.

[20] 崔芮华, 王绍敏, 刘焱. 基于小波包技术和熵理论的航空故障电弧特征频段研究[J]. 电气工程学报, 2017, 12(1): 1-8.

[21] 金勇, 马光辉. 航空电弧断路器的研究及应用[J]. 航空制造技术, 2014(14): 92-94.

(上接第 35 页)

[10] 周子东, 李东伟, 李国胜, 等. 基于逐步回归的 AdaBoost-SVR 模型在海上风电项目造价预测中的应用[J]. 太阳能学报, 2020, 41(7): 259-264.

[11] 王轩, 杨文波. 建筑工程造价预测模型的设计与实现[J]. 微型电脑应用, 2019, 35(8): 95-97, 104.

[12] 徐文慧, 申建红, 陈雪, 等. 基于 RS-RBFNN 的建筑工程造价预测模型[J]. 青岛理工大学学报, 2021, 42(3): 96-102.

[13] 安冰妹. 基于 BIM 建筑工程造价参数误差校正系统设

计详解——评《建筑工程造价技巧与实例详解》[J]. 林产工业, 2020, 57(4): 121.

[14] 俞敏, 王愿翔, 闫园, 等. 架空线路改造工程造价的组合预测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1): 24-30.

[15] 翁志坚, 邱晨杰, 邱福祥, 等. 基于马尔科夫优化的灰色 GM (1, 1) 沉降预测模型及应用[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(29): 12065-12070.

[16] 李海燕, 任长江. 基于 BIM 技术的绿色建筑工程造价快速估算模型[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2020, 51(5): 962-966.