

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.08.014

矿用电连接器串联型故障电弧诊断方法研究^{*}

刘艳丽^{1,2} 郭凤仪¹ 朱连勇³ 游江龙¹ 吴仁基¹ 张西瑞¹ 刘丽智¹ 王培龙¹

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院 葫芦岛 125105; 2. 辽宁工程技术大学安全学院 葫芦岛 125105;
3. 国网葫芦岛供电公司 葫芦岛 125099)

摘 要:为提高煤矿井下供电系统的可靠性,在不同电压、电流、功率因数、环境相对湿度条件下,开展了因机械振动引发的串联型故障电弧模拟实验。分析了不同实验参数对故障电弧的影响;提取串联型故障电弧相邻五周期电流信号中的过零点数、归一化后的方差、协方差构成特征向量;建立了基于随机森林分类算法的串联型故障电弧诊断模型,以正常运行及故障电弧电流信号的特征向量构成训练样本和测试样本作为随机森林模型的输入,对样本进行分类,进而诊断是否发生串联型故障电弧。结果表明,该方法能够有效地实现矿用电连接器串联型故障电弧的诊断。

关键词: 矿用电连接器;串联型故障电弧;特征向量;随机森林;故障诊断

中图分类号: TM501 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4027

Study of diagnostic method on series fault arc of mining electric connector

Liu Yanli^{1,2} Guo Fengyi¹ Zhu Lianyong³ You Jianglong¹ Wu Renji¹

Zhang Xirui¹ Liu Lizhi¹ Wang Peilong¹

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;
2. Faculty of Security, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;
3. State Grid Huludao Electric Power Supply Company, Huludao 125099, China)

Abstract:In order to improve the reliability of the coal mine power supply system, the simulation experiment in different voltage, current, power factor and environmental relative humidity conditions is carried out. The influence of different experimental parameters on the arc fault is analyzed, eigenvector constituted by the number of passing zero, normalized variance and covariance of current signals of adjacent five cycles on series arc fault are extracted, and a diagnosis model of series arc fault is established based on random forest classification algorithm. The training samples and test samples constituted by eigenvector of the normal operation and fault arc current signals are served as the input of random forest model, which are sorted to further diagnose whether the series arc fault is occurred. The results show that the method can effectively realize the diagnosis of series arc fault on mining electric connector.

Keywords: mining electric connector; series arc fault; eigenvector; random forests; fault diagnosis

0 引 言

煤矿井下利用电连接器、螺栓实现电缆与电缆之间、电缆终端与电气设备之间的电气连接。由于煤矿井下环境潮湿、空间狭窄、工作面设备搬运频繁,导致电缆外部

损伤、绝缘强度下降、电连接器锈蚀、栓接电缆接头松动等故障时有发生。接触点不存在接触故障时,相当于短路状态,接触电阻较小;存在接触故障的电连接器接触电阻逐渐增大,接触面温度逐渐升高,易产生串联型故障电弧,而存在故障电弧的接触点接触电阻是时变非线性的,很难通过伏安特性描述串联型故障电弧的动态发展过

程。串联型故障电弧电流稳定性较差,常规的过流保护装置无法识别串联型故障电弧。

因串联型电弧故障发生位置不确定,国内外学者一般从电弧故障电流信号入手分析电弧故障特征。文献[14]以分形维数、短时过零率等为特征量从时域角度对电弧故障电流信号进行分析,结合支持向量机、模式匹配识别、神经网络等故障识别算法对民用供电系统的故障电弧进行了诊断识别。文献[5-7]从频域角度,以高次谐波含有率作为特征量对电弧故障的特征进行了分析。文献[8-14]从时频域角度采用小波分析、小波包分析等算法对电弧故障电流信号进行了时频分析,并提取了故障特征量。

本文开展了不同电压、电流、功率因数、环境相对湿度下的串联型故障电弧模拟实验,从时域角度对串联型电弧故障的特性进行分析,提取了矿用电连接器串联型故障电弧电流信号的方差、协方差、过零点数构成特征向量,建立了基于随机森林的串联型故障电弧诊断模型,对正常运行电流信号及因机械振动引发的串联型故障电弧电流信号进行了诊断识别。实验结果证明了方法的有效性。

1 井下串联型电弧故障模拟实验

1.1 实验电路

实验主电路由电源、断路器、井下串联型故障电弧发生器、负载柜、橡胶套电缆组成,其中负载柜用于模拟井下电机类负载,主电路的通断由负载柜自带的断路器完成。主电路如图 1 所示。



图 1 串联型电弧故障实验主电路
Fig. 1 Main circuit of series arc fault experiment

本文参照 GB14287. 4^[15] 标准并结合煤矿井下实际环境设计了井下串联型故障电弧发生器,如图 2 所示。故障电弧模拟发生装置由机械机构、触头、移动电极控制机构、湿度环境执行机构和信号采集与处理 5 部分组成。机械机构主要由绝缘板组成,对整个发生器起固定、支撑和绝缘作用;步进电机驱动电路控制步进电机转动,带动触头往复运动,模拟机械振动产生故障电弧的过程;湿度环境执行结构由超声波雾化器完成;信号采集与处理部分负责采集电弧电流、电弧电压及环境相对湿度信号并传至数据采集卡。为防电磁干扰,移动电极控制电路、信号采集处理电路的电源与主电路隔离,信号由屏蔽线传输。实验主电路及电弧发生器的主要硬件配置如表 1 所示。

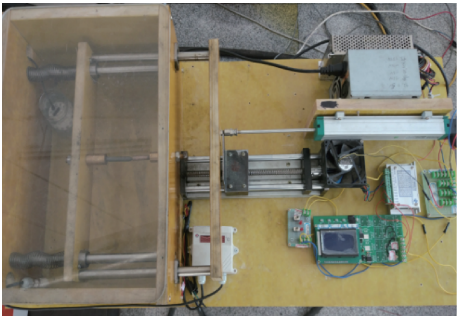


图 2 井下串联型电弧故障模拟发生器
Fig. 2 Simulation generator of series arc fault in the pit

表 1 主电路及电弧发生器的主要硬件配置
Table 1 Main hardware configuration of main circuit and arc generator

名称	型号与参数
实验电源	AC220V 市电电源
变压器(定制)	JMB-15 kVA
调压器	TDGC2-15 kVA
电缆	YZ3 × 4 + 1 × 2.5 mm ²
铜电极	直径 8 mm
绝缘板	60 cm × 40 cm × 1 cm
超声波雾化器	RM-1220
霍尔电流互感器	HAS14Z
电压互感器	DL-PT2021D
单片机	ATmega16
位移传感器	KTC-200
湿度传感器	DHT11

1.2 实验方案

实验在室温下进行,电源电压分别为交流 36 V 和交流 110 V;为模拟井下湿度环境,通过电弧发生器与钢化玻璃构成湿度密闭空间,调节超声波雾化器可使实验环境相对湿度达到 50% 和 90% 两档;试验负载为定制的伏泽单相阻感一体可调负载柜,在两种电压等级下均可得到 20、40、60、80 A 四种回路电流,功率因数调节为 0.9、0.7 和 0.5 三档,能够满足实验对电源电压、电流、功率因数调节的需要;通过调节步进电机可实现移动电极的往复运动,模拟机械振动产生故障电弧现象,振动频率分别为 25 和 15 Hz。

采取表 2 所示的单因素全面正交实验方案,串联型故障电弧实验组别为 11, 21, …, 961;正常运行实验组别为 12, 22, …, 962, 每组实验做 10 次,每次持续 5 min,实验期间同步采集电流、接触点电压等实验数据,通过数采卡传至上位机,采样频率为 10 kHz。

1.3 实验结果分析

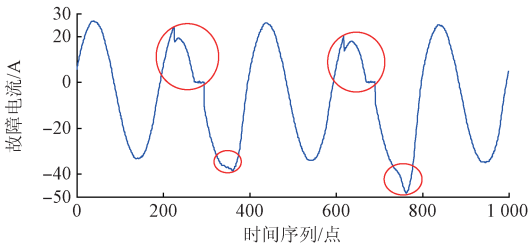
虽然接触电压比回路电流能够更直接地反映矿用电连接器串联型故障电弧特征,鉴于煤矿井下矿用电连接器数量较多、电弧故障发生位置未知、回路电流信号易于

表 2 实验方案

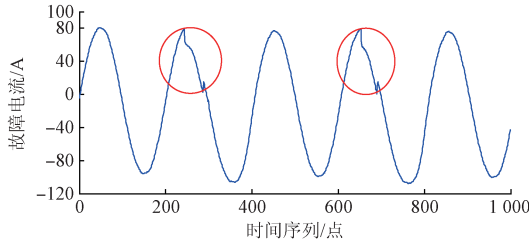
Table 2 Experimental scheme

实验组别	工作电流 (AC)/A	功率因数	环境相对湿度/%	工作电压 (AC)/V	振动频率/Hz
1 ~ 12	20、40、60、80	0.9、0.7、0.5	50	110	25
3 ~ 24	20、40、60、80	0.9、0.7、0.5	90		
25 ~ 36	20、40、60、80	0.9、0.7、0.5	50	36	
37 ~ 48	20、40、60、80	0.9、0.7、0.5	90		
49 ~ 60	20、40、60、80	0.9、0.7、0.5	50	110	15
61 ~ 72	20、40、60、80	0.9、0.7、0.5	90		
73 ~ 84	20、40、60、80	0.9、0.7、0.5	50	36	
85 ~ 96	20、40、60、80	0.9、0.7、0.5	90		

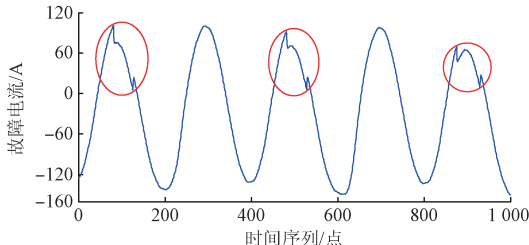
测量等因素,本文重点研究故障回路电流信号以获得机械振动条件下串联型故障电弧的特征。实验获得的串联型故障电弧电流波形如图 3 所示,其中圈中部分为燃弧期间电流情况。



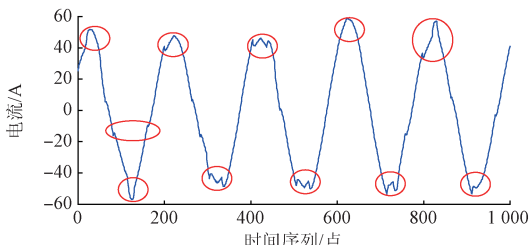
(a) AC 36 V/20 A/功率因数0.9/相对湿度90%/25 Hz
(a) AC 36 V/20 A/power factor 0.9/relative humidity 90%/25 Hz



(b) AC 36 V/60 A/功率因数0.9/相对湿度90%/25 Hz
(b) AC 36 V/60 A/power factor 0.9/relative humidity 90%/25 Hz

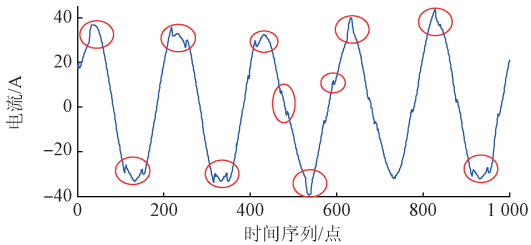


(c) AC 36 V/80 A/功率因数0.9/相对湿度90%/25 Hz
(c) AC 36 V/80 A/power factor 0.9/relative humidity 90%/25 Hz

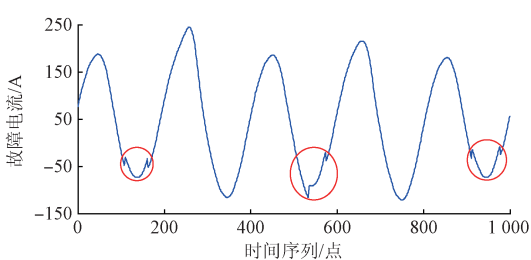


(d) AC 36 V/60 A/功率因数0.9/相对湿度90%/15 Hz
(d) AC 36 V/60 A/power factor 0.9/relative humidity 90%/15 Hz

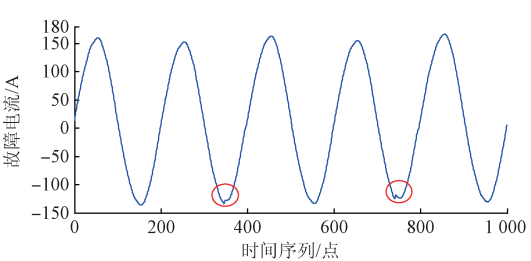
由图 3 可知,1)故障电弧电流稳定性随负载电流变化不明显;2)接触点因机械振动引发的串联型故障电弧相邻半波峰值变化较大,正负半波明显不对称;3)在其他



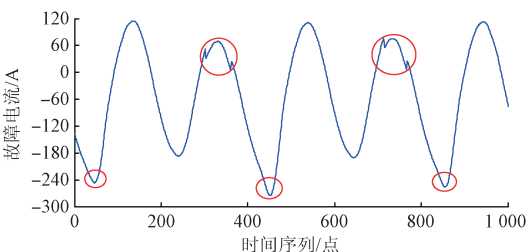
(e) AC 36 V/80 A/功率因数0.7/相对湿度90%/15 Hz
(e) AC 36 V/80 A/power factor 0.7/relative humidity 90%/15 Hz



(f) AC 36 V/80 A/功率因数0.7/相对湿度90%/25 Hz
(f) AC 36 V/80 A/power factor 0.7/relative humidity 90%/25 Hz



(g) AC 110 V/80 A/功率因数0.7/相对湿度90%/25 Hz
(g) AC 110 V/80 A/power factor 0.7/relative humidity 90%/25 Hz



(h) AC 36 V/80 A/功率因数0.5/相对湿度90%/25 Hz
(h) AC 110 V/80 A/power factor 0.5/relative humidity 90%/25 Hz

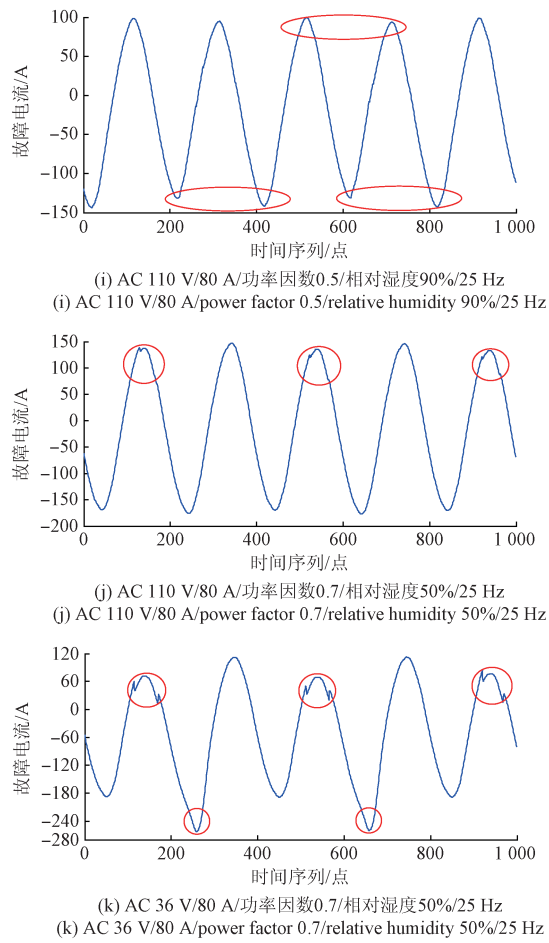


图 3 串联型故障电弧电流波形
Fig. 3 Current waveform of series fault arc

实验条件相同的情况下,触点振动频率越低,接触电阻越大,电流的稳定性越差,越利于电弧重燃;4)在其他实验条件相同的情况下,电源电压越小,接触电阻在回路阻抗中所占比例越大,燃弧后电流的稳定性越差;5)在其他实验条件相同的情况下,受回路中感性元件的影响,功率因数越低,正负半波电流波动越大,燃弧后的半个周波电流幅值越大;在其它实验参数相同的情况下,环境相对湿度越低,越易产生故障电弧。

2 串联型故障电弧特征提取

井下环境恶劣,环境湿度较大,存在瓦斯、煤尘等易燃易爆气体,负载多为一级负荷,因此要求井下串联型故障电弧的检测必须及时、可靠。由图 3 可知,发生串联型故障电弧时,电流信号相邻半波严重不对称,相邻周期电流信号波形也会发生变化;又考虑到故障电弧存在零休现象,因此本文提取相邻 5 周期故障电弧电流信号的方差、协方差、过零点数为特征量。

2.1 串联型故障电弧的方差、协方差分析

为分析串联型故障电弧电流信号每周期的波动程度,利用 MATLAB 函数 var() 计算相邻 5 周期故障电弧电流信号的方差;为分析相邻周期故障电弧电流信号的相关程度,利用 MATLAB 函数 cov() 计算相邻 5 周期故障电弧电流信号的协方差。表 3 列出的方差为每周期电流信号时间序列方差的平均值,协方差为每相邻两周期电流信号时间序列协方差的平均值。

表 3 串联型故障电弧方差、协方差分析
Table 3 Variance and covariance analysis of series fault arc

电源电压/V	工作电流/A	功率因数	振动频率/Hz	环境相对湿度/%	工作状态	方差	协方差
36	20	0.9	25	90	故障	483	474
					正常	474	474
36	40	0.9	25	90	故障	1 840	1 835
					正常	1 821	1 821
36	60	0.9	25	90	故障	4 070	4 009
					正常	3 968	3 967
36	80	0.9	25	90	故障	6 624	6 562
					正常	6 935	6 935
36	80	0.7	25	90	故障	11 416	11 637
					正常	11 590	11 590
36	80	0.5	25	90	故障	13 428	11 756
					正常	11 596	11 596
110	80	0.9	25	90	故障	6 284	6 261
					正常	7 725	7 724
36	80	0.9	15	90	故障	6 899	7 209
					正常	6 935	6 935
110	80	0.9	15	90	故障	6 572	6 542
					正常	7 725	7 724
36	80	0.9	25	50	故障	4 735	4 512
					正常	5 233	5 232
110	80	0.9	25	50	故障	4 425	3 853
					正常	5 448	5 447

由表 3 可知,正常运行时电流方差、协方差相等,而故障电弧电流信号的方差及协方差波动较大。在其他实验参数相同的情况下,方差、协方差均随负载电流增加而增加,随功率因数的增加而减小;正常运行电流信号的方差、协方差随电源电压增加而增加,但故障电弧电流信号的方差、协方差随电源电压而减小;在其他实验条件相同的情况下,振动频率越低,故障电弧电流信号的方差协方差越大;在其他实验条件相同的情况下,故障电弧及正常运行的电流信号方差、协方差均随环境湿度增加而增加。不同实验参数对故障电弧电流稳定性影响规律不同,上述方差、协方差的计算结果体现了实验参数故障电弧电流稳定性的影响。

2.2 过零点数分析

考虑串联型故障电弧会有零休现象,取过零点附近小于 5 周期电流信号最大值 1/10 且大于 5 周期电流最

小值 1/10 采样点为过零点。求过零点数 MATLAB 函数为 $Fnum1 = \text{length}(\text{find}((M1 > (\min(M1)/10)) \& (M1 < (\max(M1)/10))))$,其中 M1 为 5 周期的电流信号时间序列,Fnum1 为 5 周期电流信号的过零点数。由表 4 可见,相同实验条件下,故障电弧电流信号时间序列的过零点数基本都略大于正常运行时的过零点数。

2.3 构建串联型故障电弧特征相量

为比较分析串联型故障电弧、正常运行时电流信号的时域特征,将方差、协方差归一化处理。通过求 5 周期正常运行及故障电弧电流信号方差、协方差及过零点数,构成了串联型故障电弧特征向量 $f1, f1 = [fcm1gy, fcxm1gy, fnum1]$;其中 fcm1gy 为 5 周期电流信号的方差归一化结果;fcxm1gy 为 5 周期电流信号的协方差归一化结果;fnum1 为过零点数归一化的结果,部分实验样本的特征向量如表 4 所示。

表 4 串联型故障电弧特征向量
Table 4 Eigenvector of series fault arc

状态	方差 1	方差 2	方差 3	方差 4	方差 5	协方差 1	协方差 2	协方差 3	协方差 4	过零点数
故障	0.759 9	0.952 0	0.826 1	0.968 8	0.727 1	0.924 6	0.996 9	0.998 9	0.981 1	71
正常	0.999 7	0.999 8	0.999 9	1.000 0	0.999 9	0.999 8	0.999 9	1.000 0	1.000 0	69
故障	0.975 4	0.966 7	0.961 0	0.879 9	0.975 5	0.967 5	0.984 3	1.000 0	0.983 9	69
正常	0.999 8	1.000 0	0.999 5	0.999 8	0.999 6	1.000 0	0.999 9	0.987 7	0.999 8	60
故障	0.960 4	0.996 8	0.981 1	1.000 0	0.975 1	0.987 1	0.998 1	0.998 0	0.987 7	79
正常	0.999 6	1.000 0	0.999 2	0.999 1	0.999 4	1.000 0	0.999 8	0.962 1	0.999 5	61
故障	0.879 0	0.869 9	0.896 3	0.899 5	0.835 7	0.936 4	0.952 1	0.986 3	0.996 6	101
正常	0.998 6	1.000 0	0.998 5	0.999 6	0.999 3	0.999 9	0.999 8	0.981 4	1.000 0	66
故障	0.544 9	0.962 4	0.624 7	0.889 4	0.567 1	0.904 5	0.967 7	0.938 0	0.932 1	84
正常	0.999 5	0.999 6	0.999 3	1.000 0	0.999 9	0.999 6	0.999 5	0.992 2	1.000 0	68
故障	0.903 3	0.470 8	1.000 0	0.788 4	0.832 5	0.943 7	0.954 1	1.000 0	0.867 1	91
正常	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.999 7	0.999 9	1.000 0	1.000 0	0.945 3	0.999 8	67
故障	1.000 0	0.971 4	0.975 4	0.993 1	0.992 5	0.987 7	0.988 3	0.999 0	0.955 5	64
正常	1.000 0	0.999 5	0.999 6	0.999 3	0.999 3	1.000 0	0.999 8	0.987 9	0.999 6	60
故障	0.972 3	0.838 8	0.935 4	0.995 3	0.963 3	0.993 4	0.998 2	0.992 4	0.873 4	70
正常	1.000 0	0.999 7	0.999 8	0.999 8	0.999 8	1.000 0	0.999 9	0.963 4	0.999 9	66
故障	0.910 9	0.998 5	0.897 1	1.000 0	0.997 2	1.000 0	0.990 1	0.993 2	0.996 3	65
正常	0.999 6	1.000 0	0.999 5	0.999 5	0.999 8	1.000 0	1.000 0	0.997 1	0.999 8	66
故障	0.505 0	1.000 0	0.503 6	0.978 2	0.751 2	0.980 1	0.932 2	0.969 9	0.964 3	81
正常	0.999 5	1.000 0	1.000 0	0.999 8	1.000 0	0.999 8	1.000 0	0.999 9	0.999 9	64

3 井下串联型故障电弧的诊断

3.1 基于决策树算法的串联型故障电弧诊断

决策树又称判定树,适用于分类和预测的一种树结构。该方法分类速度快,计算量相对小,容易转化成分类规则^[16]。决策树由结点和边构成,内结点表示特征和属性,外结点表示决策分类结果,边代表判别规则即 if-then 规则。本文采用决策树分类器 $ctree = \text{ClassificationTree. fit}$

(P_train,T_train)对串联型故障电弧进行分类分析。分类器自动将样本中最重要的特征作为根结点,依次作为各分支结点,分类器充分考虑样本数量对诊断模型的影响,并自动选取各个节点的阈值。本文样本总数 1 584 个,训练样本总数 1 200 个,测试样本总数 384 个,其中总样本、训练样本、测试样本中的正常样本和故障样本各占 50%。决策树模型中 1 为故障分类输出,2 为正常分类输出,决策树模型如图 4 所示。决策树的每个分枝根据边代表的属性利用 if-then 规则将特征分类,直至获得分类的结果。

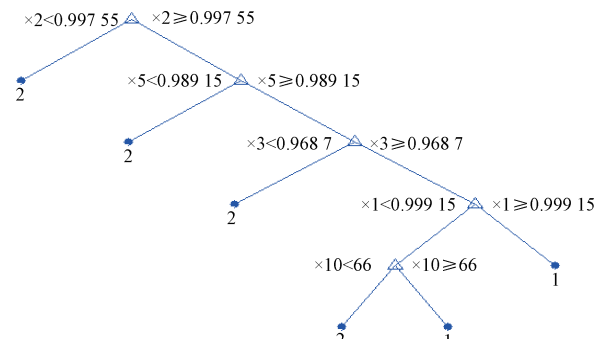


图 4 串联型故障电弧决策树模型
Fig. 4 Decision tree model of series fault arc

测试样本的诊断结果如表 4 所示。测试样本中,正常测试样本误判 0 个,准确率 100%;故障测试样本误判 16 个,准确率为 91.67%;综合准确率 $p3 = 95.83\%$ 。模型对故障测试样本的误判应因决策树诊断模型的过拟合或者模型忽略数据集中属性之间的相关性所导致。

3.2 基于随机森林的串联型故障电弧诊断

近年来,随机森林(random forest)在生物医学和生物信息领域得到应用。随机森林是一种包含多棵决策树的分类器,其中每棵决策树的构造和分类测试均相互独立。它结合了数学上的随机抽样,运用自助法重采样,拟合度较好,分类精度高^[17]。随机森林分类步骤如下。

- 1) 在训练样本集 D 中采用可放回的抽样方法抽出 n 个训练样本, m 个特征组成一个训练数据 D_1 ,再用同样的方法依次组成训练数据 $D_2, D_3, \dots, D_t$ 。
- 2) 采用 C4.5 决策树算法生成 t 棵决策树。
- 3) 用验证集合对 t 棵决策树进行投票,选出在验证集合上出错率最低的决策树作为诊断模型。

本文中 n 取 1 200, m 取 10, t 取 10。测试样本的诊断结果:正常状态 192 个测试样本中,误判 0 个,准确率 $p1 = 100\%$;故障状态样本检测出 187 个,误判 5 个,准确率 $p2 = 97.39\%$;综合准确率 $p3 = 98.70\%$,可见随机森林分类方法成功避免了决策树算法过拟合及忽略数据集中属性之间的相关性,模式识别的准确率明显提高,对串联型故障电弧的诊断效果较好。决策树与随机森林故障电弧诊断效果分析如表 5 所示。

表 5 决策树与随机森林故障电弧诊断效果分析
Table 5 Diagnosis effect analysis of decision tree and random forest fault arc

	决策树	随机森林
测试样本总数	384	384
正常样本误判个数	0	0
正常样本检测准确率/%	100	100
故障样本误判个数	16	5
故障样本准确率/%	91.67	97.39
综合准确率/%	95.83	98.70

3.3 随机森林算法诊断模型的抗扰动能力测试分析

井下供电系统电磁环境复杂,回路电流中掺杂的噪声信号可能会影响随机森林诊断模型对故障电弧的诊断效果,本文对所有样本加入 -20 dB 的高斯白噪声,对图 3(c)加噪后的实验波形如图 5 所示。

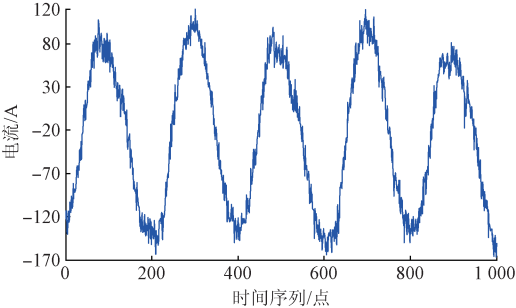


图 5 加入 -20 dB 高斯白噪声后的故障电弧电流波形
Fig. 5 Arc fault current waveform after added -20 dB Gaussian white noise

加噪后的实验样本采用决策树及随机森林方法进行故障诊断,诊断效果如表 6 所示。由表 6 可知,决策树故障电弧诊断模型的诊断准确率受高斯白噪声影响较大,随机森林故障电弧诊断模型的诊断准确率受高斯白噪声影响较小,诊断效果较好。

表 6 样本加噪后决策树与随机森林故障电弧诊断效果分析
Table 6 Fault arc diagnosis effect analysis of decision tree and random forest after the sample added a noise

	决策树	随机森林
测试样本总数	384	384
正常样本误判个数	0	0
正常样本检测准确率/%	100	100
故障样本误判个数	25	7
故障样本准确率/%	86.98	96.35
综合准确率/%	93.49	98.18

4 结 论

矿用电连接器松动接触点因机械振动导致的串联型故障电弧是不连续的,燃弧时间一般小于半个周期,电流幅值略小于正常工作电流;故障电弧电流信号相邻半波峰值变化较大,正负半波明显不对称;发生故障电弧之后的半个周期,电流幅值较大;触点振动频率和负载的功率因数越低,越利于电弧重燃,电流的稳定性越差;环境相对湿度越低,越易产生故障电弧。

对矿用负载而言,相邻五周期电流信号的方差、协方差、过零点数可以作为机械振动引起的串联型故障电弧

的特征量。

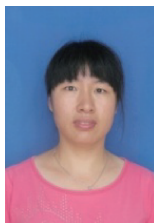
采用随机森林分类分析方法,以相邻五周期电流信号的方差、协方差、过零点数为特征量,可以实现对串联型故障电弧的故障诊断,分类精度较高,故障识别效果较好。

参考文献

- [1] 刘晓明,徐叶飞,刘婷,等. 基于电流信号短时过零率的爱弧故障检测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 125-133.
LIU X M, XU Y F, LIU T, et al. Arc fault detection based on short-time zero crossing rate of current signal [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 125-133.
- [2] 杨凯,张认成,杨建红,等. 基于分形维数和支持向量机的串联电弧故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 70-77.
YANG K, ZHANG R CH, YANG J H, et al. Series arc fault diagnosis method based on fractal dimension and support vector machine [J]. Journal of Electrical Engineering, 2016, 31(2): 70-77.
- [3] BAO J Q, ZHANG Y, DUAN ZH Q, et al. Arc fault identification method based on fractal theory and SVM[C]. International Conference on Power System Technology, 2012:20-22.
- [4] MA SH H, BAO J Q, CAI ZH Y, et al. Arc fault recognition method using box dimension and information dimension as discriminating features[C]. International Conference on Process Equipment, Mechatronics Engineering and Material Science, 2013:137-120.
- [5] 刘媛,邵文权,夏经德. 带并补电抗线路电弧性故障固有频率特征研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(5):48-52.
LIU Y, SHAO W Q, XIA J D. Analysis on inherent frequencies of transmission lines with shunt reactors in arc fault [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(5):48-52.
- [6] LEZAMA J, SCHWEITZER P, WEBER S, et al. Frequency analysis to arcing detection and prototyping FPGA approach [C]. 59th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2013: 1-6.
- [7] PYKER R, SEHWEICKART D L, HORWATH J C, et al. An evaluation of diagnostic techniques relevant to arcing fault current interrupters for direct current power systems infuture aircraft [C]. IEEE Electrical Insulation Conferenceand Electrical Manufacturing Expo, 2005: 126-150.
- [8] 刘晓明,王丽君,侯春光,等. 基于小波包能量熵的低压串联故障电弧诊断[J]. 沈阳工业大学学报, 2013,35(6):606-612.
LIU X M, WANG L J, HOU CH G, et al. Low voltage series arc fault diagnosis based on wavelet packet energy entropy [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2013,35(6): 606-612.
- [9] 刘艳丽,郭凤仪,王智勇,等. 基于信息熵的串联型故障电弧频谱特征研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12):488-495.
LIU Y L, GUO F Y, WANG ZH Y, et al. Research on the spectral characteristics of series arc fault based on information entropy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 488-495.
- [10] 孙鹏,董荣刚,郑志成. 基于小波分析信号特征频段能量变比的故障电弧诊断技术研究[J]. 高压电器, 2010, 46(7):46-50.
SUN P, DONG R G, ZHENG ZH CH. Arc fault diagnosis technology based on the analysis of energy variation of signals characteristic frequency band with wavelet transform [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(7): 46-50.
- [11] 郑昕,许志红. 低压串联型故障电弧通用诊断方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9):991-997.
ZHENG X, XU ZH H. Research on universal diagnostic method for low-voltage series arc fault [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(9):991-997.
- [12] 缪希仁,郭银婷,唐金城,等. 负载端电弧故障电压检测与形态小波辨识[J]. 电工技术学报, 2012, 29(3):237-244.
MIU X R, GUO Y T, TANG J CH, et al. Detection and morphological wavelet identification of arc fault voltage at the load end [J]. Journal of electrical engineering, 2012, 29(3): 237-244.
- [13] 张士文,张峰,王子骏,等. 一种基于小波变换能量与神经网络结合的串联型故障电弧辨识方法[J]. 电工技术学报, 2012, 29(6):290-295.
ZHANG SH W, ZHANG F, WANG Z J, etc. Series arc fault identification method based on energy produced by wavelet transformation and neural network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 29(6): 290-302.
- [14] PAN J J, ZHU H W, CHEN L SH. Time-frequency ridge analysis using on distinguish regular signal from arc-fault signal[C]. IEEE International Workshop on Intelligent Energy System,2014:203-208.

- [15] 中国国家标准化管理委员会. 电气火灾监控系统第4部分:故障电弧探测器 [S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- The China National Standardization Management Committee. Part 4 of electric fire monitoring system: Arc fault detector [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [16] 李胜,张培林,佟若雄. 基于多类 AdaBoost 的故障诊断算法[J]. 电子测量技术,2011,34(8):101-105.
- LI SH, ZHANG P L, TONG R X. Multi-class AdaBoost for fault diagnosis [J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34(8): 101-105.
- [17] 贺思捷,刘大同,彭宇. 遥测数据驱动的无人机飞行状态识别方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 2004-2013.
- HE S J, LIU D T, PENG Y. Flight mode recognition method of the unmanned aerial vehicle based on telemetric data[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9): 2004-2013.

作者简介



刘艳丽, 1981 年出生, 辽宁工程技术大学博士研究生, 现任辽宁工程技术大学讲师。目前主要研究方向为电接触理论及应用、煤矿电气安全。

E-mail: liuyanli19810919@163.com

Liu Yanli was born in 1981, Ph. D. candidate and Lecturer in Liaoning Technical University now. Her present research interests include electrical contact theory and its application, and electrical safety in coal mine.



郭凤仪, 1964 年生, 博士, 现任辽宁工程技术大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为电接触理论及应用、矿山机电工程。

E-mail: fgyuo64@126.com

Guo Fengyi was born in 1964, Ph. D., he is a professor in Liaoning Technical University now. His present research interests include electrical contact theory and its application, and mine electromechanical engineering.