

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.04.006

适用于不同对中度的断路器手车梅花触头啮合尺寸计算

王 刚¹, 彭彦卿¹, 庄志坚², 熊逸伟³

(1. 厦门理工学院电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361024; 2. ABB(中国)有限公司中压产品技术中心, 福建 厦门 361101; 3. 国家电网娄底供电公司, 湖南 娄底 417000)

摘要: 针对现有可移开式开关柜无法确认断路器手车梅花触头啮合尺寸是否符合要求的情况,提出了一种基于底盘车驱动电机运行数据,适用于不同触头对中度的啮合尺寸计算方法。首先,分析了触头对中度对啮合尺寸的影响;其次,详细说明了啮合尺寸计算要点,包括利用位于电流曲线上的等效啮合点计算啮合尺寸和以支持向量机算法定位等效啮合点位置;为使支持向量机分类模型满足不同对中度下的定位要求,对啮入阶段样本进行重构,构建可以表征等效啮合点位置与触头对中度的特征向量;最后,采集新数据,对比方法计算结果和人工测量结果。结果表明:方法在不同对中度下,可以较为精确的计算啮合尺寸。方法为断路器手车梅花触头啮合尺寸计算提供一种新思路。

关键词: 高压断路器; 梅花触头啮合尺寸; 无刷直流电机运行数据; 三次样条插值; 支持向量机

Meshing Distance Calculation for Tulip Contacts of Circuit Breaker Handcart Applicable to Different Concentricity

WANG Gang¹, PENG Yanqing¹, ZHUANG Zhijian², XIONG Yiwei³

(1. School of Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 2. ABB (China) Co., Ltd., Power Product Medium Voltage Technology Center, Fujian xiamen 361101, China; 3. State Grid Loudi Power Supply Company, Hunan Loudi 417000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the meshing distance of tulips contacts of circuit breakers cannot be measured, a method to calculate the tulip contacts' meshing distance of circuit breakers which was suitable for different concentricity of the tulip contacts based on the operating data of driving motor of chassis car was proposed. First, the influence of concentricity of tulip contacts on the meshing distance was analyzed. Secondly, the essential points to calculate the meshing distance was described in detail, including the calculation of meshing distance by using equivalent meshing point on the current curve and employing support vector machine algorithm to locate the equivalent meshing point. In order to make the model meet the requirements of positioning equivalent meshing point under different concentricity, the samples of meshing-beginning stage were reconstructed. The eigenvector which could indicate the position of the equivalent meshing points and the concentricity was constructed. Finally, new data was sampled to examine the method. The results show that the accuracy of the algorithm was good under different concentricity and it could provide with a new idea to measure the meshing distance of contacts.

Key words: high voltage circuit breaker; meshing distance of tulip contacts; operation data of a BLDCM; cubic spline interpolation; support vector machine

0 引言

可移开式高压开关柜内,断路器手车梅花触头

啮合尺寸是影响设备健康的重要因素。啮合尺寸减小时,触头间平均压力减小^[1],接触电阻增大;啮合尺寸不足会削弱触头承载电动斥力的能力,可能

收稿日期:2019-10-17; 修回日期:2019-12-29

基金项目:福建省自然科学基金(2019J01867)。

Project Supported by Fujian Provincial Natural Science Foundation(2019J01867).

造成断路器被斥开而引起拉弧。因此,在触头啮合时,确定啮合尺寸是否符合要求对断路器安全运行具有重要意义。

梅花触头啮合尺寸受其与静触头对中度的影响。当触头间出现对中偏差时,作为连接触臂和静触头“桥梁”,梅花触头方向出现偏移,不同触指的啮合尺寸出现明显差异。在确定啮合尺寸时,通常以最小触指啮合尺寸为梅花触头啮合尺寸。因为该触指最有可能在电动斥力作用下与静触头脱离接触^[2],导致接触电阻剧增,甚至烧毁触头。不同的开关柜中,梅花触头和静触头对中度不同;在断路器投入运行之后,由于电力或设备形变等原因,可能导致触头间对中偏差增大。因此,能够适用于不同对中度是啮合尺寸测量方法具有应用价值的前提。

近年来,针对如何确定触头啮合尺寸的问题,许多学者做出了研究。但提出的方法存在成本偏高、精度有待提高、未考虑对中度影响等问题。元宏峰^[3]在梅花触头内侧加装带刻度的内套、滑块、行程开关、无线发射等装置,实现了啮合距离的测量。触头啮合时,静触头推动滑块;达到规定啮合尺寸(ABB公司规定中压断路器啮合尺寸最小为15 mm)时,行程开关动作,无线发射装置发送“合格”信号;啮合尺寸由内套记录。该方法虽然可以测量啮合尺寸,但未考虑对中度影响,且成本偏高。李萌锋等^[4]学者利用激光测距仪测量B相触臂和开关门之间的距离,结合开关柜内部尺寸计算啮合尺寸,并通过RS-485/232接口将计算结果传输到显示屏上。该方法不仅存在成本偏高、未考虑对中度对测量结果的影响等问题,而且不能确定能否以单相啮合尺寸衡量断路器整体啮合效果。陈武^[5]在静触头加装纸板,通过读取纸板位移量计算啮合尺寸。该方法未考虑触头对中度影响,且通过纸板位移确定啮合尺寸的方法不能保证测量精度。

可移开式高压开关柜中,底盘车驱动电机是梅花触头啮合过程的动力源^[6-8]。电机所受阻力与对中度关系密切,导致电枢电流在啮合过程中出现明显变化。文中提出了一种基于底盘车驱动电机运行数据的啮合尺寸计算方法。分析了触头间对中偏差对啮合尺寸的影响;对适用于不同对中度下的啮合尺寸计算方法进行了阐述;最后,采集新数据验证方法的计算精度。

1 对中偏差对啮合尺寸的影响

在可移开式高压开关柜组装或生产过程中,断路器手车梅花触头和静触头会出现不同程度的对

中偏差。文[9]表明,当触头对中度偏差小于5 mm时,接触电阻变化不大;如果对中偏差达到5 mm以上,接触电阻迅速增加。文中考虑对中度对接触电阻的影响,并结合ABB公司断路器生产情况,将对中偏差程度分为3个等级,见表1。

表1 对中偏差

Table 1 Concentricity deviation

偏差等级	偏差相数	偏心距离/mm
无偏差	0	0
中度偏差	1	5
严重偏差	2	5、6

利用偏心距离(触头圆柱部分在底板上的映射中心和底板中心的距离)为5 mm和6 mm的两种静触头代替原静触头,实现对中偏差,见图1。

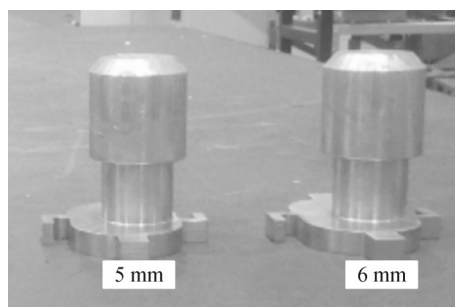


图1 试验用静触头

Fig. 1 Static contacts for experiment

静触头为原触头时啮合情况见图2。

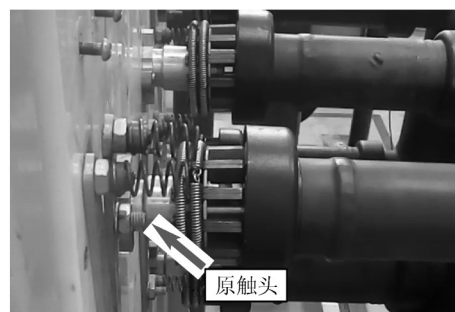


图2 对中良好时啮合情况

Fig. 2 Meshing without concentricity deviation

用有偏心距离的静触头替换原触头后,啮合情况见图3。



图3 对中偏差下啮合情况

Fig. 3 Meshing with concentricity deviation

在现代生产条件下,因对中偏差过大导致只有部分触头啮合的情况已鲜见,本文对这种情况不作考虑。为衡量断路器整体啮合效果,取三相触头平均啮合尺寸为断路器啮合尺寸。对比图2、3中啮合情况,对中偏差会减小断路器啮合尺寸。

底盘车驱动电机所受阻力不仅与对中偏差有关,也与梅花触头弹簧系数、接触面摩擦系数和底盘车运动阻力有关。为降低以上因素对试验的影响,文中使用的断路器为一台尚未出厂的VD4型12 kV断路器,认为在试验期间,弹簧系数变化不大;啮合前,在静触头表面涂抹润滑油。润滑油不仅记录各触指的啮合尺寸,也降低触头表面摩擦系数对试验的影响;定期调整试验台夹紧程度并清理导轨,使底盘车运动阻力保持稳定。

2 啮合尺寸计算方法

以无刷直流电机为底盘车驱动电机,电机本体中有霍尔元件,并在控制器内加装电流采样电路、电源模块和通信模块。控制器利用霍尔元件信号计算电机实时转速,利用电流采样电路采集实时电流信息,通过通信模块上传至上位机程序。

文中所用电机为深圳恒驱电机有限责任公司研发的B4275M型无刷直流电机,额定电压为24 V,额定功率为33 W。电源模块将外部220 V交流电变为24 V直流电。此时,电枢电流只受阻力影响且与电机阻力成正比。

采样间隔为100 ms时,任取5组不同对中度下电流数据并绘制曲线,见图4。

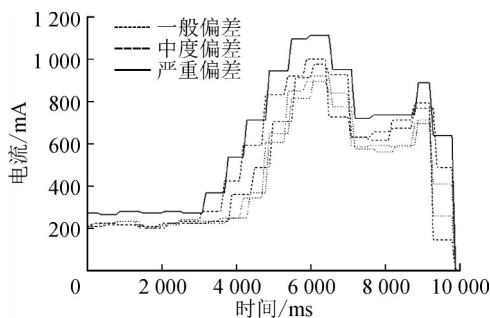


图4 不同对中度电流曲线

Fig. 4 Current curves under different concentricity

由图4可知,不同对中度下电枢电流变化趋势基本一致。触头没有接触时,电流曲线较为平稳;触头接触初期,电机所受阻力快速增加直至达到最大值,称为啮入阶段。

2.1 等效啮合点

针对电流曲线在不同对中度下变化趋势相同的特点,提出利用等效啮合点、转速数据与底盘车

丝杆螺距来计算啮合尺寸。其中文章底盘车丝杆螺距为10 mm,转速数据由下位机上传至上位机。为说明等效啮合点的概念,将某次啮合过程电流与转速数据绘制成曲线,见图5。

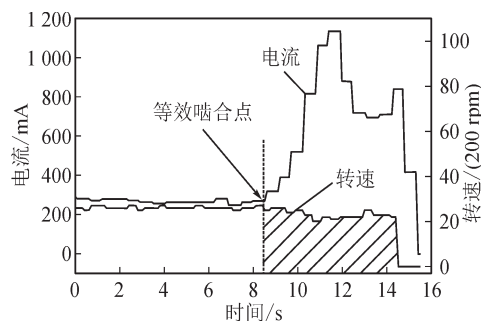


图5 电机电流和转速曲线

Fig. 5 Curves of motor's current and speed

在触头接触时,存在一个点,从该点的对应时刻到电机停转,电机旋转(即图5中阴影部分)产生的断路器位移等于啮合尺寸,这个点称为等效啮合点(下称啮合点)。

设啮合点对应时刻为 t_0 ,转速为零的时刻为 t_1 ,期间电机转速为 $r(t)$ 。则从 t_0 到 t_1 ,断路器手车移动距离为:

$$l = \int_{t_0}^{t_1} \frac{r(t)}{k} dt \times 10 \quad (1)$$

式(1)中: l 等于啮合尺寸; k 为减速比。

2.2 啮合点定位方法

由于三相触头在啮合时存在同期性问题,则啮合点在时域上一定滞后于电流上升阶段起始点,超前于电流最大值。以电流上升阶段数据点为分析样本,通过训练支持向量机分类模型,构造最接近啮合点的超平面。超平面将样本点为两类:“啮合前”和“啮合后”。其中“啮合前”包含啮合点和时域上超前于啮合点的样本点。因此,分类为“啮合前”且处于时序末尾的点的点为啮合点,见图6。

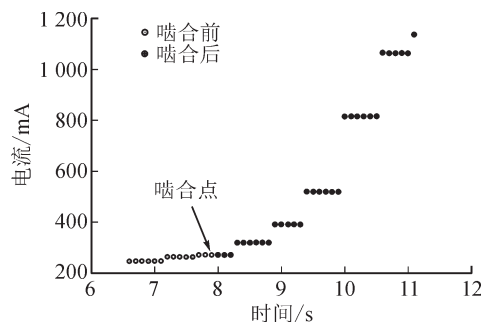


图6 样本点分类示例

Fig. 6 Sample points classification example

2.3 样本重构

从图6可知,分类算法的作用是在啮合点处将样本构成的“时域队列”分为两类。由于机械扰动

或电机自身原因,啮合点在“队列”中的位置并不固定,需要寻找可以表征啮合点位置的特征,且该特征须具有唯一性。文章利用啮合点电流值(下称啮合值)表征样本时序。由于控制器采样频率不足,图6中样本点分布为“阶梯型”,与实际情况不符。与此同时,“阶梯型”分布使啮合值不具有唯一性。为逼近实际电流曲线,同时使啮合值具有唯一性,利用三次样条插值对样本进行重构^[10-14]。

重构时,保留每级“阶梯”最左侧点,因为该点处于数据更新的时刻,电流值较为准确。将图6中样本重构后样本分布见图7。

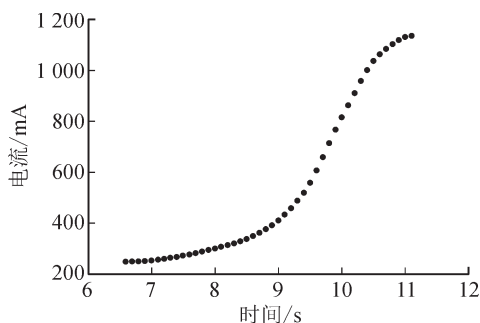


图7 重构后样本分布

Fig. 7 Distribution of samples after restructure

从图7可知,曲线重构之后,啮合值具有唯一性,样本电流值与时刻具有一一对应关系。因此,将重构后电流值作为样本特征之一。

2.4 构建特征向量

为确定表征不同对中度的特征,采集3种对中偏差下各30组电流数据,截取电流上升阶段曲线并插值。利用人工测量结果标定啮合点位置。每种偏差各任取3组数据绘图,见图8。

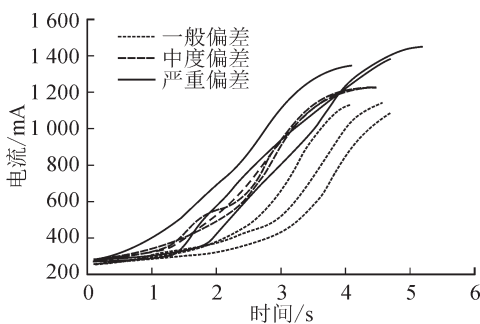


图8 不同对中偏差下插值曲线

Fig. 8 Curves generated by interpolation under different concentricity deviations

人工方法,即在静触头涂抹油漆或者凡士林,依靠痕迹确认啮合尺寸。目前,生产商主要依靠人工方法确认啮合尺寸是否符合要求。

图8中黑色实心点为啮合点所在位置。同一偏差下,不同啮合过程中,调整阶段最大值(下称最大值)之间相差不大;当偏差增加,最大值增加,啮合值

也增加。为更好地验证以上结论,统计90组数据的最大值和啮合值,见图9。

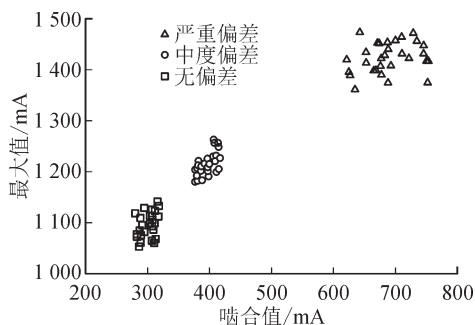


图9 最大值和啮合值随对中偏差变化的分布

Fig. 9 Distribution of the maximum and meshing value with the change of the changing of concentricity deviation

以啮合值与最大值为坐标的特征点具有聚集特性,即相同对中偏差下,最大值与啮合值相差不大。啮合值与最大值呈正相关,最大值变化趋势可以表征啮合值变化趋势。以最大值作为样本点特征向量元素之一。

以最大值和样本电流值构建特征向量,不仅可以表征样本点时序,而且能够适应不同对中度的分类要求。

2.5 分类模型训练

支持向量机(support vector machine, SVM)是一种基于超平面的分类模型。相对于神经网络等并行算法^[15-19],SVM具有结构简单、推广能力强、学习预测时间短等优点。SVM算法尤其适合小样本分类问题,广泛应用于故障诊断中^[20-24]。

截取90组数据内啮入阶段电流并进行插值重构,为所有样本点构建二维特征向量。根据人工测量结果为数据标定啮合点。其中啮合点及时域上超前啮合点标签为“-1”,时域上滞后于啮合点的样本标签为“1”。利用构建的特征向量和标签训练分类模型并保存。

2.6 样本分类算例

取某次啮合过程中调整阶段电流数据并进行插值,部分数据见表2。

构建特征向量,利用训练好的分类模型进行分类,结果见表3。

根据分类结果,时序为16的点为啮合点。提取啮合点时刻信息,根据式(1)可计算啮合尺寸。

3 试验验证

3.1 试验设备与验证流程

试验设备包括12 kV手车式真空断路器一台,电动底盘车一台,无刷直流电机、控制器,上位机以

表2 插值前后数据对比		
Table 2 Comparison between original data and data generated by interpolation mA		
时序	原始电流	插值后电流
1	248	248.000 0
2	248	251.165 4
3	248	254.153 5
4	248	256.947 6
5	248	259.531 2
6	248	261.887 5
7	264	264.000 0
8	264	265.684 2
9	264	266.990 5
10	264	268.254 8
11	264	268.817 2
12	272	272.000 0
13	272	276.037 2
14	272	282.501 2
15	272	290.764 8
16	272	300.183 9
17	272	310.143 8
18	320	320.000 0

表3 分类结果			
Table 3 Result of the classifying mA			
时序	特征向量		分类结果
	最大电流	样本电流	
1	1 103	248.000 0	-1
2	1 103	251.165 4	-1
3	1 103	254.153 5	-1
4	1 103	256.947 6	-1
5	1 103	259.531 2	-1
6	1 103	261.887 5	-1
7	1 103	264.000 0	-1
8	1 103	265.684 2	-1
9	1 103	266.990 5	-1
10	1 103	268.254 8	-1
11	1 103	268.817 2	-1
12	1 103	272.000 0	-1
13	1 103	276.037 2	-1
14	1 103	282.501 2	-1
15	1 103	290.764 8	-1
16	1 103	300.183 9	-1
17	1 103	310.143 8	1
18	1 103	320.000 0	1

及试验台等,见图10。

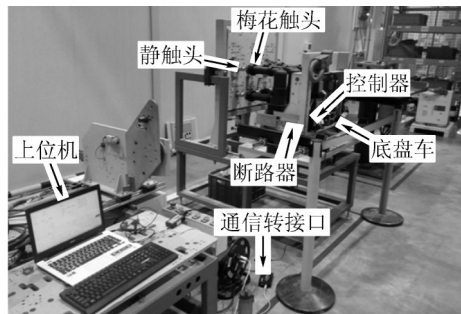


图10 试验设备

Fig. 10 Equipment for the experiment
无刷直流电机本体在电动底盘车内部,控制器输入电源为AC220 V,经电源模块后为无刷直流电机供电,将采集到的电流数据由通信转接口传至上位机。

通过采集新数据,对比人工测量结果和方法计算结果,验证流程见图11。

3.2 验证结果

每种对中偏差各采集20组实验数据,将计算啮合尺寸与人工测量结果对比。其中,“无偏差”对比结果见图12。

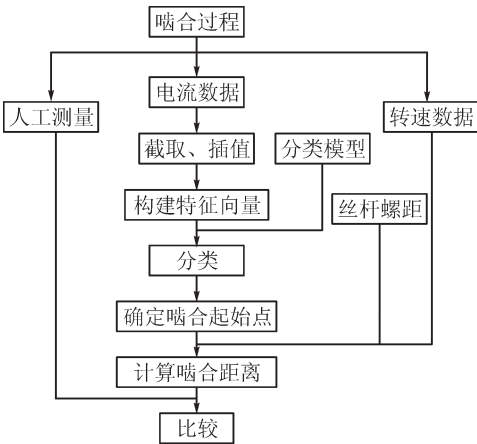


图11 验证流程

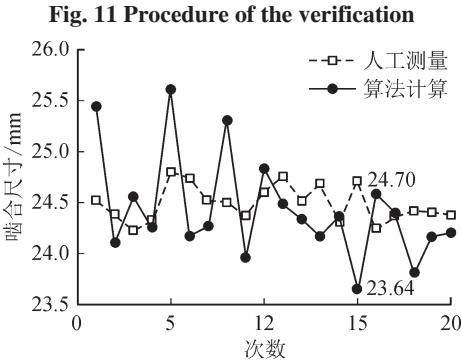


图12 “无偏差”结果对比

Fig. 12 Comparison between results under “no deviation”

“中度偏差”结果对比结果见图13。

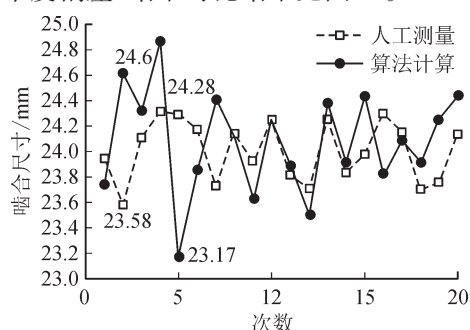


图13 “中度偏差”结果对比

Fig. 13 Comparison between results under “medium deviation”

“严重偏差”对比结果见图14。

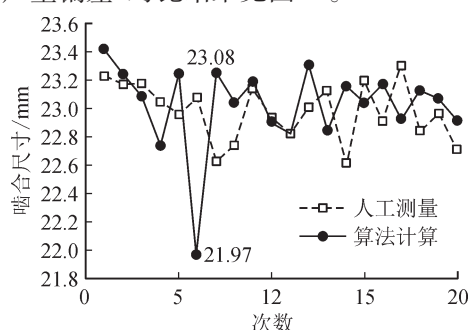


图14 “严重偏差”结果对比

Fig. 14 Comparison between results under “serious deviation”

将算法结果与人工测量结果相差1 mm以内的计为“合格”，大于1 mm计为“不合格”。“中度偏差”下，18组数据合格，2组不合格；“无偏差”和“严重偏差”下，分别出现1组不合格。

4 结论

1)在现代生产背景下，提出以三相梅花触头平均啮合尺寸为断路器啮合尺寸，进而提出了通过定位电流曲线上啮合点计算啮合尺寸的方法，并对等效啮合点定位方法进行了说明，为实现断路器手车梅花触头啮合尺寸自动化测量提供了一种新思路。

2)针对设备采样频率低的情况，利用三次样条插值进行样本重构，使啮合值具有唯一性的同时，赋予了样本电流值表征样本时序的能力。

3)以不同对中度下最大值表征对中偏差，以重构后样本电流值表征时序，利用支持向量机定位等效啮合点，计算啮合尺寸。经试验验证，方法能适应不同对中度下啮合尺寸的计算。与工程常用的人工测量结果对比，精度较高，方法具有一定的工程应用价值。

4)以无刷直流电机作为底盘车驱动电机，文中

所介绍的方法用电枢电流和转速数据实现梅花触头啮合尺寸的计算，无需专门传感器，降低了工况检测成本。

参考文献:

- [1] 黄勔哲, 陈丽安. 断路器手车触头过热性故障机理分析及防止措施[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 237-242.
HUANG Mengzhe, CHEN Li'an. Overheating fault mechanism analysis on circuit breaker handcart contact with measure to prevent[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1): 237-242.
- [2] 王红艳. 12 kV 可移开式手车断路器的电动力分析及改进[J]. 高压电器, 2016, 52(9): 50-54.
WANG Hongyan. Electrodynamics force analysis and design improvement of 12 kV withdrawable circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9): 50-54.
- [3] 元宏峰. 断路器手车梅花触头对接深度测量装置的研发[J]. 绍兴文理学院学报, 2016, 36(8): 31-34.
YUAN Hongfeng. Research and development of measuring device for contact depth of plum blossom contact of circuit breaker[J]. Journal of Shaoxing University, 2016, 36(8): 31-34.
- [4] 李萌锋, 黄初指, 苏东青, 等. 基于激光测距技术的10 kV 开关柜手车安全位移监测[J]. 自动化应用, 2013, (3): 83-84.
LI Mengfeng, HUANG Chuzhi, SU Dongqing, et al. Monitor of 10 kV switch cabinet handcart safety based on laser ranging technique[J]. Automation Application, 2013(3): 83-84.
- [5] 陈武. 开关柜手车插入深度简易检测方法[J]. 农村电气化, 2015, 37(2): 24-26.
CHEN Wu. Simple test method for insertion depth of switchgear handcart[J]. Rural Electrification, 2015, 37(2): 24-26.
- [6] 戴冬云, 武月德, 喻冬梅, 等. 集成式电动底盘车监控单元设计与应用[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 185-190.
DAI Dongyun, WU Yue, YU Dongmei, et al. Design and application of integrated control and supervisory electric chassis unit[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 185-190.
- [7] 骆虎, 喻冬梅, 戴冬云, 等. 基于IPM模块的智能断路器电动底盘车控制电路设计[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 166-170.
LUO Hu, YU Dongmei, DAI Dongyun, et al. Design of the control circuit of electric chassis vehicle based on intelligent circuit breaker of IPM module[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 166-170.
- [8] 赵俊生, 吕杰辉. KYN28A-12型中置柜配用的电动底盘车设计[J]. 高压电器, 2010, 46(9): 69.
ZHAO Junsheng, LYU Jiehui. Design of electric chassis

- equipped with KYN28A-12 cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 69.
- [9] 王香梅. 关于高压断路器触头震动的讨论[J]. 电子制作, 2014, 24(9): 246-247.
- WANG Xiangmei. Discussion about the vibration of contacts of high voltage circuit breaker[J]. Practical Electronics, 2014, 24(9): 246-247.
- [10] 刘 灏, 杨智伟, 毕天舒, 等. 基于优先级分配策略的PMU数据恢复方法[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2814-2820.
- LIU Hao, YANG Zhiwei, BI Tianshu, et al. PMU data recovery method based on priority allocation strategy[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2814-2820.
- [11] 杨 为, 柯艳国, 朱胜龙, 等. 基于样条插值和线性拟合分析的高压断路器弹簧机构状态检测[J]. 高压电器, 2017, 53(6): 147-153.
- YANG Wei, KE Yanguo, ZHU Shenglong, et al. Condition detection of spring mechanism of high-voltage circuit breaker based on spline interpolation and linear fitting analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 147-153.
- [12] 颜 伟, 耿 路, 周 雷, 等. 基于海清和三次样条插值算法的舰船雷达散射面优化分析方法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(3): 579-586.
- YAN Wei, GENG Lu, ZHOU Lei, et al. Optimization analysis method on ship RCS based on sea conditions and cubic spline interpolation algorithm[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(3): 579-586.
- [13] 蔡艳平, 徐光华, 李艾华, 等. EMD局部积分均值增量插值改进算法及其在转子故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2016, 35(19): 81-87.
- CAI Yanping, XU Guanghua, LI Ai' hua, et al. A improved EMD algorithm based on local integral average constraint cubic spline interpolation by adding dense points and its application in rotary machine fault diagnosis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(19): 81-87.
- [14] 李 博, 孙建军, 王朝亮, 等. 考虑高次谐波影响的智能配电合并单元改进采样数据同步方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 20-27.
- LI Bo, SUN Jianjun, WANG Chaoliang, et al. Improved sampling synchronization method used by merging unit in smart distribution network considering higher harmonic effects[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 20-27.
- [15] TENG W, CHENG H, DING X, et al. DNN - based approach for fault detection in a direct drive wind turbine [J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(10): 1164-1171.
- [16] WANG H L, ZHOU G B. State of charge prediction of super capacitors via combination of Kalman filtering and back propagation neural network[J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(4): 588-594.
- [17] BACN P D, KIM J. Non-mutually exclusive deep neural network classifier for combined modes of bearing fault diagnose[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1129.
- [18] 唐 波, 刘 任, 江浩田, 等. 基于BP神经网络的IGBT模块开关损耗求解[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 27-32.
- TANG Bo, LIU Ren, JIANG Haotian, et al. Solution of switching loss of igbt module based on back propagation neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 27-32.
- [19] 马宏忠, 徐 艳, 魏海增, 等. 基于LVQ神经网络的高压断路器机械故障诊断方法[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 30-36.
- MA Hongzhong, XU Yan, WEI Haizeng, et al. Mechanical fault diagnosis method of high voltage circuit breaker based on LVQ neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 30-36.
- [20] 李从志, 郑近德, 潘海洋, 等. 基于精细复合多尺度散步熵与支持向量机的滚动轴承故障诊断方法[J]. 中国机械工程, 2019, 30(14): 1713-1719.
- LI Congzhi, ZHENG Jinde, PAN Haiyang, et al. Fault diagnosis method of rolling bearings based on refined composite multiscale dispersion entropy and support vector machine[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(14): 1713-1719.
- [21] 李自强, 魏 磊, 韩大鹏, 等. 基于相空间重构的高压断路器机械故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 129-135.
- LI Ziqiang, WEI Lei, HAN Dapeng, et al. Research on mechanical fault diagnosis of high voltage vacuum circuit breaker based on space reconstruction[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 129-135.
- [22] 李 兵, 刘明亮, 杨 平, 等. EWT与GS-SVM在断路器机械故障诊断中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(8): 1422-1430.
- LI Bing, LIU Mingliang, YANG Ping, et al. Application of EWT and GS-SVM in mechanical fault diagnosis of circuit breakers[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(8): 1422-1430.
- [23] 高 伟, 陈伟凡, 杨耿杰, 等. 基于奇异值分解和多级支持向量机配电网故障类型识别[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(2): 62-71.
- GAO Wei, GAO Weifan, YANG Gengjie, et al. Fault type identification for distribution network based on singular value decomposition and multi-level support vector machine [J]. Journal of Electronic and Instrumentation, 2018, 32(2): 62-71.
- [24] 郁 琛, 吕友杰, 段荣华, 等. 基于偏互信息法与支持向量机的覆冰闪络故障预警[J]. 电力系统自动化, 2018,

- [11] 李中原. 纳米 SiO_2 、 MgO 、 ZnO 复合硅橡胶介电性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
LI Zhongyuan. Research on the dielectric characteristics of nano- SiO_2 、 MgO 、 ZnO compositing silicone rubber[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [12] LI J, HUANG Z, WANG F, et al. One-step preparation of transparent super-hydrophobic coatings using atmospheric arc discharge[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(5): 093118.
- [13] HUANG Z, LI J, WANG F, et al. Fabrication of super-hydrophobic surface with discarded silicone under arc exposure[J]. RSC Advances, 2015, 5(125):103739-103743.
- [14] LIAO W Y, JIA Z C, GUAN Z C, et al. Reducing ice accumulation on insulators by applying RTV silicone coating[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(6):1446-1454.
- [15] 蒋兴良, 温作铭, 孙才新. 复合绝缘子表面水滴撞击特性的数值模拟与伞裙结构分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19):7-12.
JIANG Xinliang, WEN Zuoming, SUN Caixin. Numerical simulation of water droplet impingement on composite insulator surface and analysis of shed configuration[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 7-12.
- [16] 吴继臣, 徐 刚. 全国主要城市冬季太阳辐射强度的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(10):1236-1239.
WU Jichen, XU Gang. A study of the solar radiation intensity in winter in the main cities of the country[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35 (10): 1236-1239.
- [17] 固体绝缘材料体积电阻率和表面电阻率试验方法: GB/T 1410—2006[S]. 2006.
Methods of test for volume resistivity and surface resistivity of solid electrical insulating materials: GB/T 1410—2006 [S]. 2006.
- [18] 何梓年. 太阳吸收率与热发射率[J]. 太阳能, 1981(4):13-15.
HE Zinian. The solar absorption rate of[J]. Solar Energy and Heat Emission, 1981(4): 13-15.
- 舒立春(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为高电压与绝缘技术、输电线路覆冰及防护。
兰斯琦(1964—), 男, 硕士研究生, 从事复杂大气环境中输电线路外绝缘(通讯作者)。

(上接第41页)

42(2): 92-98.

YU Chen, LYU Youjie, DUAN Ronghua, et al. A forecast method of icing flashover fault based on partial mutual information method and support vector machine[J]. Automatic of Electric Power System, 2018, 42(2): 92-98.

王 刚(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电器

智能化及其应用。

彭彦卿(1966—), 女, 教授, 硕士研究生导师, 博士, 研究方向为智能控制、复杂系统的建模与优化、电力电子与电力传动。

庄志坚(1986—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事智能中压断路器的研究。