

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.08.023

基于区域化形态滤波的分合闸线圈电流信号特征值提取方法研究

黄森年,朱革兰,王智东

(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640)

摘要:针对断路器分合闸线圈电流信号特征值提取效率不能满足在线监测系统要求的问题,对断路器在线圈尺寸偏小、弹簧力矩偏小、线圈电阻偏大和控制电压偏低等4种故障下线圈电流信号的特点进行了归纳,说明了线圈电流信号区域化的可行性,对数学形态学的基本运算、结构元素及具备抗干扰能力的区间搜索求极值方法进行了研究,提出了一种数学形态滤波结合区间搜索求极值的特征值提取方法。利用ZF7A-12断路器实验平台分别进行了正常状态及4种故障状态实验以获取实验数据,并在Matlab中把该方法与传统小波结合求导方法进行了仿真对比。仿真结果表明:在5种状态下,该方法均能准确而高效地提取特征值,它与传统方法的特征值提取误差分别为4%和5%,同时其算法耗时仅为传统方法的25%。

关键词:特征区域;数学形态滤波器;分合闸线圈电流信号;区间搜索;特征值提取

中图分类号:TM561

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)08-0933-05

Feature value extraction of coil current signal based on local morphological filter

HUANG Sen-nian, ZHU Ge-lan, WANG Zhi-dong

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to solve the problem that the extraction efficiency of the coil current signal (CCS) characteristic values (CVs) of the circuit breaker could not meet the requirements of the on-line monitoring system, the characteristics of CCSs of four faults, including coil size smaller, spring torque smaller, coil resistance larger, control voltage lower, were summarized, which described the feasibility of regionalization of the CCS. After the analysis of the basic operations and structural elements of mathematical morphology and an anti-jamming method of finding extremum by interval searching, a method based on mathematical morphology filtering and interval searching was presented to extract CVs. The normal state and four fault states were tested on the ZF7A-12 experimental platform and experimental data was obtained, then the proposed method was compared with the traditional wavelet-derivation method (TWDM) in matlab. The experimental results show that the proposed method can extract CVs accurately and efficiently in all five states, whose error is only 4% and that of TWDM is 5%, while it takes only 25% of the time.

Key words: feature regions; morphological filter; tripping and closing coil current signal; interval detection; feature value extraction

0 引言

断路器是电网保护与控制的核心设备,及时发现其机械故障是保障电网安全稳定运行的基础^[1-2]。根据国际大电网会议(CIGRE)的调查显示^[3],44%的断路器重大故障是机械故障,目前对断路器机械故障识

别(CBMFR)主要基于机械信号和电气量信号两大类。振动信号受断路器结构、加速度传感器位置、各种环境噪音等因素的影响,包含较大的且难以滤除的噪音,导致监测结果出错;而分合闸线圈电流信号(以下简称线圈电流信号)不仅包含分合闸起始时间,还包含线圈、电磁铁、机械传动等多个机构状态信息^[4],且易于

测量,通过对其特征值分析,可以反映这些机构的健康状况,具有信息量丰富、易获取、干扰相对较小等优点,是当前研究的热点。

目前,基于线圈电流信号的机械状态评估研究大多关注从既得的特征值中判断故障类型的方法^[8-9],而对于如何从现场海量受噪信号中快速准确提取特征值的研究较少。由于各种原因,现场测量的线圈电流信号波形中不可避免出现大量的尖峰和沟壑,需要通过适当的滤波算法对受噪信号进行预处理,滤除信号中的噪音,同时最大程度地保留信号原有特性,进而结合一定算法提取其特征值。小波分析与求导结合是线圈信号特征值提取的常用方法^[10],它先用小波阈值滤波去噪,再以小波突变点检测截取信号,最后通过求导提取特征值。该方法结果较准确,但算法复杂,对硬件要求高,不利于在线监测系统的应用;中值滤波与区间搜索结合的方法提取线圈信号特征值具有更高的效率^[11],该方法算法简单,对硬件要求低,但准确度较低。

本研究提出一种基于区域化数学形态滤波结合区间搜索求极值的线圈信号特征值提取方法。

1 采样信号特征区域化

利用线圈信号监测断路器机械状态有以下两个特点:(1)通过分析信号中几个重要的特征值来实现;(2)断路器严重故障时,信号波形有较为明显的畸变^[12],而存在故障隐患或故障并未发展至严重阶段时,其线圈电流信号波形与正常运行状态下的电流曲线波形的变化趋势并无明显差异。4种故障隐患,它们与正常状态时相比仍然具有相同数量的特征值,且特征值在横轴相对位置漂移程度不大,如图1所示。

基于以上特点,本研究提出截取特征值附近信号段进行区域化滤波的方法,如图2所示。

为了获取 (t_0, i_0) 至 (t_4, i_4) 5个特征值,本研究在线圈电流曲线上截取3个包含了特征值的特征区域。根据现场试验数据,考察5个特征值在不同故障隐患下偏移情况。特征区域一:以起始电流时间 t_0 坐标为中心,前后各5ms;特征区域二:以铁芯启动电流时间 t_1 与铁芯停止电流时间 t_2 之间的中点时间坐标 $(t_1 + t_2)/2$ 为中心,前后各5ms;特征区域三:以最大工作电流时间 t_4 与终止电流时间 t_5 之间的中点时间坐标 $(t_3 + t_4)/2$ 为中心,前后各10ms。

2 并行交替混合的形态滤波器

数学形态滤波是利用结构元素对待处理信号进行膨胀、腐蚀、开、闭等形态运算,实现对受噪信号的削峰

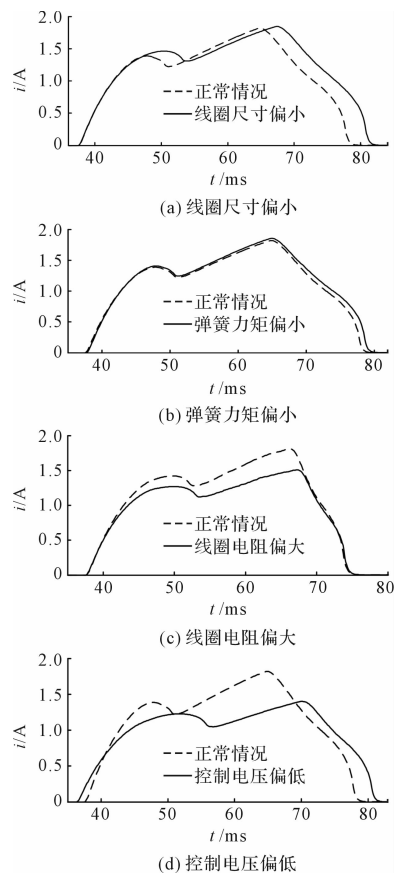


图1 4种故障信号

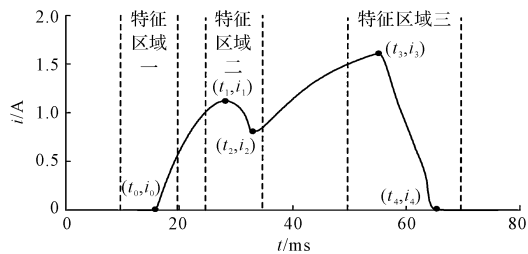


图2 3个特征区域

填谷,从而滤除信号中的噪音。由于线圈电流信号是一维函数,下面只对一维信号的形态运算进行介绍^[13]。设待处理信号 $f(n)$ 是一维采样信号,其定义域为 $D[f] = \{0, 1, 2, \dots, N\}$; $g(m)$ 为一维的结构元素函数,其定义域为 $D[g] = \{0, 1, 2, \dots, M\}$ 。其中, N 和 M 都为整数,且 $N \gg M$ 。则结构元素 $g(m)$ 对信号 $f(n)$ 腐蚀和膨胀运算分别定义为:

$$(f \ominus g)(n) = \min \{f(n+m) - g(m)\} \quad (1)$$

$$(f \oplus g)(n) = \max \{f(n-m) + g(m)\} \quad (2)$$

先对信号进行腐蚀运算再进行膨胀运算即为开运算,先对信号进行膨胀运算再进行腐蚀运算即为闭运算,开、闭运算数学表达如下:

$$(f \circ g)(n) = (f \ominus g \oplus g)(n) \quad (3)$$

$$(f \cdot g)(n) = (f \oplus g \ominus g)(n) \quad (4)$$

为了减少滤波后信号偏移,本研究采用基于形态

开闭运算的交替混合滤波^[14],其数学表达如下:

$$(f \text{ ah } g)(n) = \frac{[(f) \text{ oc}(g) + (f) \text{ co}(g)](n)}{2} \quad (5)$$

式中:oc—开闭运算,即先开运算后闭运算;co—闭开运算,即先闭运算后开运算。

结构元素的形状、长度对形态滤波效果产生决定性的影响^[15]。对于不同的信号,要选取合适的结构元素才能达到很好滤波效果。线圈电流波形所含噪音主要为随机噪音和脉冲噪音,大量仿真结果表明,半圆形结构元素适合处理随机噪音且半径介于待分析信号幅值的1/50到1/10效果较好,三角形结构元素适合处理脉冲噪音且长度至少大于脉冲噪音宽度与采样周期之比^[16-17]。

综合考虑滤波效果和运算效率,本研究选用幅值为32 mA,长度为11的三角形结构元素和幅值为16 mA,长度为9的半圆形结构元素来进行并行交替混合滤波,如图3所示。

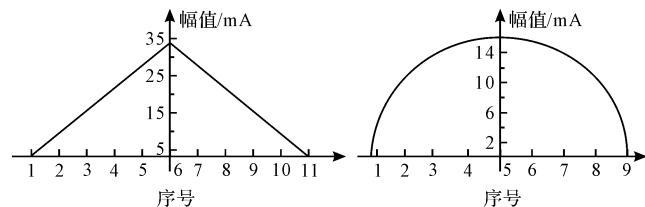


图3 结构元素

3 区间搜索提取特征值

对于线圈电流信号的5个特征值,由于 (t_0, i_0) 和 (t_4, i_4) 是信号的起点及终点,其确定是较为简单的^[18],关键在于 (t_1, i_1) 、 (t_2, i_2) 、 (t_3, i_3) 这3个特征值的提取。经过区域化形态滤波后,特征区域部分仍存在少量噪音,若使用简单求极值方法(如二阶差分法)确定特征值位置,必然会导致较大的误差。本研究介绍一种利用区间单调性确定特征值位置的方法,该方法分为4步:

(1) 选定窗口 W_1 ,把待分析数字信号分割成多个长度与窗口 W_1 相等的区间。每一区间采样值与前一区间对应的采样值一一对应比较,若超过50%的采样值大于前一区间则给该区间所有采样值赋值1,反之赋值0,长度与待分析信号相同,由0与1构成的序列;

(2) 确定单调性变化点。即确定所有从0变1上升沿或从1变0下降沿;

(3) 确定备选极值点。对第二步中单调性变化点进行筛选,若某从1变0的点后的窗口 W_2 内的值均为0,则该点为备选极大值点,同理,若某从0变1的点后的窗口 W_2 内的值均为1,则该点为备选极小

值点;

(4) 确定准确极值点。选定置信长度 k ,对第(3)中备选极值点进行筛选,若某备选极大值点前有 k 个以上的1点,则该点为极大值点,同理,若某备选极小值点后有 k 个以上的1点,则该点为极小值点。

区间搜索法原理图如图4所示。

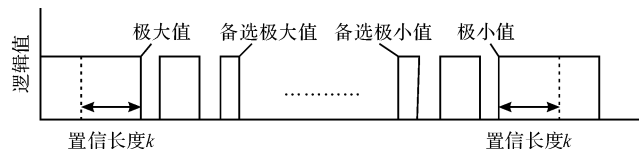


图4 区间搜索法

4 实验及结果分析

下面就提取结果准确性和运算速率对本研究提出的区域化形态滤波结合区间搜索求极值法(以下称方法一)与小波滤波结合求导法(以下称方法二)在Matlab中进行比较。

方法一—结构元素的选用如第2节所述,区间搜索的参数选择为 $W_1 = 5, W_2 = 7, K = 10$ 。综合考虑线圈电流信号特点(低频分量主要分布在0~300 Hz)、分析精度、运算效率、频带分辨率以及减少信号轮廓畸变,方法二选择db4 4层小波全局阈值滤波。

4.1 提取结果准确性的比较

本研究以ZF7A-12 126 kV断路器为实验对象,对第1节所提的4种故障隐患及正常状态分别进行实验,具体实验条件如下:

(1) 正常状态。分合闸线圈、分合闸弹簧、操作电压均未做调整,进行分闸实验,记录A相分闸线圈电流信号;

(2) 线圈尺寸偏小。调节A相分闸线圈长度至原长度的80%,进行分闸实验,记录A相分闸线圈电流信号;

(3) 弹簧力矩偏小。调节A相分闸弹簧,使其弹簧力矩减小至原力矩80%,进行分闸实验,记录A相分闸线圈电流信号;

(4) 线圈电阻偏大。串联20 Ω电阻于A相分闸线圈,进行分闸实验,记录A相分闸线圈电流信号;

(5) 控制电压偏低。控制电压从直流220 V降低至176 V,进行分闸实验,记录A相分闸线圈电流信号。

为模拟断路器工作现场复杂的电磁环境,本研究对以上试验所得线圈信号加入信噪比为30 dB的白噪音,同时在序列第400、520、550、740数据点分别加入幅值为0.2 mA、0.1 mA、0.25 mA、0.33 mA的脉冲噪音,分别以方法一、二进行特征值提取,结果如图5所示。

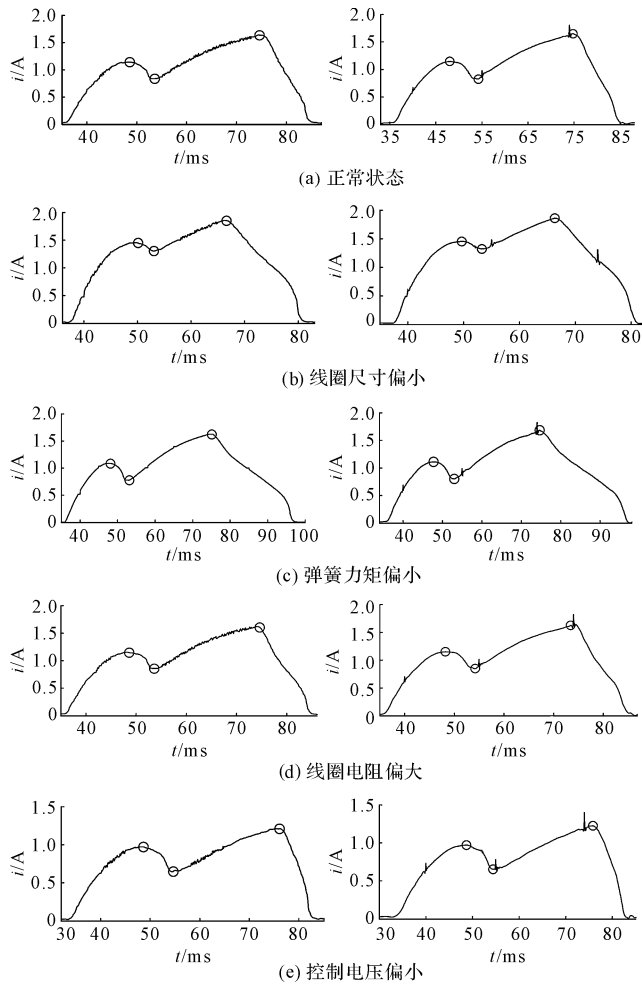


图 5 特征值提取结果

每一分图中,左图为方法一提取结果,右图为方法二提取结果。在 5 种状态下,方法一的非特征区域没经过滤波,但并不影响特征值提取,其提取结果与方法二结果接近。

为了量化比较两种方法的提取效果,本研究定义归一化偏差距离的概念来衡量特征值提取偏差,其数学表达式如下:

$$d_i = \sqrt{\frac{(t_i - t_i^*)^2}{t_i^{*2}} + \frac{(i_i - i_i^*)^2}{i_i^{*2}}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: (t_i, i_i) , (t_i^*, i_i^*) —第 i 个特征点在时间-电流图像中通过特征值提取所得坐标和准确坐标。

归一化偏差距离 d_i 越大,特征值提取偏差就越大。

本研究对正常状态及 4 种故障隐患状态,分别计算特征值 (t_1, i_1) 、 (t_2, i_2) 、 (t_3, i_3) 的归一化偏差距离 d_1 、 d_2 、 d_3 ,结果如表 1 所示。

在 5 种状态中,方法一与方法二均能较为准确地提取特征值(归一化偏差距离在 5% 以内),而且提取的特征值与原信号特征值的偏差是接近的,表明了本研究所提方法的有效性。同时,也可以看到方法二的平均归一化偏差距离比方法一略大。原因在于小波阈值

滤波在滤去噪音的同时也滤去了原信号的某些细节分量,造成了信号轮廓的畸变^[19-20]。

表 1 归一化偏差距离

断路器状态	方法一/(%)			方法二/(%)		
	d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3
正常状态	2.07	3.09	1.90	1.80	3.45	1.86
线圈尺寸小	1.57	2.46	1.42	1.62	3.33	1.70
弹簧力矩小	1.01	2.14	1.01	1.84	4.22	3.10
线圈电阻大	1.78	3.84	0.69	1.88	3.44	2.80
控制电压低	2.20	3.43	0.88	2.35	4.93	2.60
平均值	1.73	2.99	1.18	1.90	3.87	2.41

4.2 运算速率的比较

算法的运算速率与所使用运算的类型、次数密切相关,可通过统计两种特征值提取方法应用于同线圈信号的乘除法、加减法等运算的次数来比较两者的运算速率。

由形态运算介绍可知,当信号序列长度为 N ,结构元素长度为 n ,交替混合滤波需要 N 次除法、 $8(N-n+1) \times n$ 次的加法运算以及 $8(N-n+1)$ 次的序列长为 n 的取最大值运算。忽略备选极值点的筛选,对于长度为 N 的序列,区间搜索需要 $N * W_1$ 次减法运算。

Matlab 中离散小波包变换采用 Mallat 算法^[21], $x_k^{(j-1)}$ 与平滑分量 $x_k^{(j)}$ 、细节分量 $d_k^{(j)}$ 之间的基本关系为:

$$x_k^{(j)} = \sum_n h_0(n-2k)x_n^{(j-1)} \quad (7)$$

$$d_k^{(j)} = \sum_n h_1(n-2k)x_n^{(j-1)} \quad (8)$$

式中: $h_0(k)$ —低通滤波器系数, $h_1(k)$ —高通滤波器系数。

$x_k^{(j)}$ 通过 $x_k^{(j-1)}$ 与 $h_0(k)$ 作卷积运算后再取奇数序号元素求得,同样的, $d_k^{(j)}$ 通过 $x_k^{(j-1)}$ 与 $h_1(k)$ 作卷积运算后再取奇数序号元素求得。

若 $\sum x_k^{(j)} = M$, $h_0(k)$ 和 $h_1(k)$ 序列长度为 H ,则分解重构过程经过乘法次数为 $4MH$,加法次数为 $4M(H-1)$ 。求导通过差分法实现,忽略备选极值点的筛选,对于长度为 N 的序列,需要 $N-1$ 次除法, $2(N-1)$ 次减法。

本研究选用的线圈电流信号序列长度为 1 000,方法一截取长度为 400,三角形结构元素长度为 11(并行滤波,耗时以较长结构元素算),区间搜索窗口 $W_1 = 5$ 。方法二中 db4 小波滤波器系数序列长度为 8,作 db44 重小波分解,两种方法的运算次数如表 2 所示。

表 2 运算次数比较

方法	乘除/次	加减/次	取最大值/次	等价加法*/次
方法一	400	36 320	3 120	69 120
方法二	61 543	54 918	/	301 090

*取极值耗时为加法 10 倍,乘除法耗时为加法 4 倍

由表 2 可知,方法二的等价加法次数约为方法一

的 4.4 倍,方法一的运算速率更快。尤其当信号序列长度更长时,优势更明显,如图 6 所示。

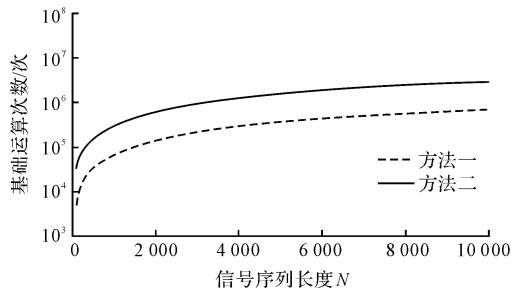


图 6 等价加法次数

以图 6 可知,当 $N \geq 1000$ 时,方法二等价加法次数仍为方法一的 4.3 倍左右。

5 结束语

断路器线圈电流信号包含许多断路器的状态信息,针对其特点,本研究提出了采样信号特征区域化的路线方法,采用将区域化形态滤波法与区间搜索求极值提取特征值相结合,并与小波滤波结合求导法进行了比较。通过对两种特征值提取算法的剖析及 Matlab 仿真,说明本研究所提算法的误差小于 4%,在监测断路器轻微故障状态时具有较好的精度,运算耗时仅为小波法的 25%。

参考文献 (References):

[1] 邓永辉. 高压开关设备典型故障案例汇编(2006-2010年)[M]. 北京:中国电力出版社,2013.

[2] 陈荣辉,李淑仪. 低压断路器机械寿命试验探讨[J]. 机电工程技术,2015,44(7):151-153.

[3] RAO Pei-lei, HUANG Jian, HU Xiao-guang, et al. Testing of circuit breakers using coil current characteristics analysis [C]. International Conference on Control and Automation Christchurch, New York: IEEE,2009.

[4] 李劲彬,全江涛,陈隽,等. 基于分合闸线圈电流的某换流站开关故障分析[J]. 高压电器,2015,51(2):141-145.

[5] ASGHAR A, KAZEMI R, VAKILIAN M, et al. Circuit breaker automated failure tracking based on coil current signature[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014,29(1):283-290.

[6] SAUGATA S, BISWA S, ANURAG K, et al. A real-time data-driven algorithm for health diagnosis and prognosis of a circuit breaker trip assembly[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2015,62(6):3822-3831.

[7] ZHENG Yu-huang. A model-based fault detection framework for vacuum circuit breaker by trip coil analysis[J]. Journal of Software,2014,9(1):251-257.

[8] 杨凌霄,朱亚丽. 基于概率神经网络的高压断路器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(10):62-67.

[9] 齐昕,张育臣,唐喜,等. 基于 IEC 61850 的配网成套开关状态监测系统研制[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(6):109-114.

[10] 孙银山,张文涛,张一茗,等. 高压断路器分合闸线圈电流信号特征提取与故障判别方法研究[J]. 高压电器,2015,51(9):134-139.

[11] JOHAL H, MOUSAVI M J. Coil current analysis method for predictive maintenance of circuit breakers[C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago: IEEE,2008.

[12] 李大卫,徐党国,孙云生,等. 基于分合闸线圈电流的断路器缺陷诊断及试验方法研究[J]. 高压电器,2015,51(8):114-118.

[13] 彭鑫霞,关永刚,高凯,等. 应用形态学滤波方法去除高压断路器线圈电流信号的噪声[J]. 高压电器,2015,51(7):1-7.

[14] 陈平,李庆民. 基于数学形态学的数字滤波器设计与分析[J]. 中国电机工程学报,2005,25(11):60-65.

[15] 李安娜,吴熙,蒋平,等. 基于形态滤波和 Prony 算法的低频振荡模式辨识的研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(3):137-142.

[16] 王璞. 数学形态学在电力系统继电保护中的应用研究[D]. 西安:西安工程大学机电工程学院,2009.

[17] 赵昭,刘利林,张承学. 形态学滤波器结构元素选取原则研究与分析[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(14):21-35.

[18] 马静,徐岩,王增平. 利用数学形态学提取暂态量的变压器保护新原理[J]. 中国电机工程学报,2006,26(6):19-23.

[19] IMANELYASI, SADEGH ZARMEHI. Elimination noise by adaptive wavelet threshold[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology,2009,6745(2):462-466.

[20] PENG Z K, JACKSON M R, RONGONG J A, et al. On the energy leakage of discrete wavelet transform[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2009,23(2):330-343.

[21] 虞湘宾,董涛. 一种离散小波变换的快速分解和重构算法[J]. 东南大学学报:自然科学版,2002,32(4):564-568.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

黄森年,朱草兰,王智东. 基于区域化形态滤波的分合闸线圈电流信号特征值提取方法研究[J]. 机电工程,2017,34(8):933-937.

HUANG Sen-nian, ZHU Ge-lan, WANG Zhi-dong. Feature value extraction of coil current signal based on local morphological filter[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(8):933-937.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>