基于灰色关联度的框架式断路器故障诊断方法*

孙曙光[1],张 强[1],杜太行[1],王佳兴[1],王 岩[2]
(1. 河北工业大学控制科学与工程学院 天津 300130;2. 天津市百利电气有限公司 天津 300385)

摘 要:针对断路器故障诊断技术中智能识别算法过于复杂的问题,提出了一种基于灰色关联度的框架式断路器故障诊断方法,该方法利用灰色综合关联度描述故障特征序列曲线之间的几何相似度来判断故障的归属,充分利用故障特征本身的变化趋势。其首先提取触头振动信号局部均值分解能量矩或分合闸线圈电流信号集合经验模态分解能量矩,经归一化后形成能量矩序列,将该能量矩序列与不同故障状态下的参考序列进行灰色综合关联分析,根据最大关联度原则确定故障类型,其中灰色综合关联度各指标的权值系数利用熵值赋权法得到。对断路器触头分合闸机械结构故障和操作附件分合闸线圈回路故障进行了诊断测试,结果表明,该方法能够准确有效地完成对断路器不同故障的诊断。

关键词: 框架式断路器;故障诊断;能量矩;熵值赋权;灰色综合关联度
中图分类号: TM561 TH165.3 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 470.40

Fault diagnosis method of frame-type circuit breaker based on grey correlation degree

Sun Shuguang[1], Zhang Qiang[1], Du Taihang[1], Wang Jiaxing[1], Wang Yan[2]
(*1. School of Control Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;*
2. Tianjin Benefo Electric Co., Ltd., Tianjin 300385, China)

Abstract: Aiming at the problem that the intelligent recognition algorithm is too complicated in the fault diagnosis technology of circuit breaker, a fault diagnosis method of frame-type circuit breaker is proposed based on grey correlation degree. This method uses the grey comprehensive correlation degree to describe the geometric similarity among the fault characteristic sequence curves to judge the type of the fault and makes full use of the changing trend of the fault feature itself. Firstly, the method extracts the local mean decomposition energy moment of the contact vibration signal or the ensemble empirical mode decomposition energy moment of switching coil current signal, which are normalized to form the energy moment sequence. Secondly, the grey comprehensive correlation analysis between the resulting energy moment sequence and the referring sequences under different fault states. Finally, according to the principle of maximum correlation degree, the fault type is determined, and the weight coefficients of various indices of the grey comprehensive correlation degree are obtained with entropy weight method. The diagnosis and testing on the switching mechanical structure fault of the circuit breaker contact and the switching coil circuit fault of operating accessory were conducted, and the results show that the proposed method can achieve the diagnosis of different faults for the frame-type circuit breaker accurately and effectively.

Keywords: frame-type circuit breaker; fault diagnosis; energy moment; entropy weight; grey comprehensive correlation degree

0 引 言

近年来,断路器故障诊断技术发展迅速,尤其以智能识别算法为基础的诊断方式不断涌现,如支持向量机[1]、神经网络[2]、专家系统[3]、模糊聚类[4]等,智能识别算法诊断模型需建立在故障特征具有一定区分性的基础上才能进行分类,只考虑故障特征的有效分类,而缺乏对故障特征本身的研究,同时诊断模型需要大量的有效数据进行训练,这对于寿命次数有限的框架式断路器来说是不

收稿日期:2017-07 Received Date: 2017-07
*基金项目:天津市科技特派员项目(16JCTPJC51700)资助

利的。因此以有限的数据特征,较小的运算量,同时保证较高的准确率为前提的诊断方法为断路器故障诊断技术提供了一种新的研究思路。灰色综合关联度通过描述故障特征序列曲线之间的几何相似度来判断故障归属[5],充分利用故障特征本身的变化趋势,同时摆脱了智能识别算法模型复杂的束缚。

灰色关联分析是灰色系统理论中的重要内容,其基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密,曲线越接近,相应序列之间的关联度越大,反之就越小[6]。灰色关联分析只需要少量数据,计算量小,不要求数据服从某个典型的概率分布或数据之间有着较大的区分性[5]。目前灰色关联度算法模型构建主要从序列间发展过程或量级的相近性和序列发展趋势或曲线形状的相似性两个角度出发[7],国内外学者根据实际需要,构造出了许多灰色关联度模型,如 B 型关联度[8]、T 型关联度[9]、灰色绝对关联度[6]、灰色相对关联度[6]、灰色面积关联度[10]等。上述关联度分析仅从相似性或相近性单一角度考虑,随着研究的不断深入,同时考虑两序列相近性和相似性的灰色综合关联度逐渐成为研究热点。文献[5]利用灰色绝对关联度与相对关联度联合构成灰色综合关联度对高压直流输电系统进行换相失败故障诊断;文献[11]利用灰色综合关联度对天然气管道内的腐蚀影响因素进行分析。上述灰色综合关联度分析中没有考虑到指标权重对诊断结果的影响,将所有指标的重要性一致对待,这显然与实际情况不符。本文在故障诊断的过程中考虑故障特征相似性和相近性的基础上,利用熵值赋权法对灰色绝对关联度、灰色相对关联度和 T 型关联度指标权重进行分析计算,基于断路器触头振动信号和分合闸线圈电流信号进行分类辨识。

断路器故障诊断技术可通过检测断路器运行过程中的多种参数完成,如振动[12]、声音[13]、线圈电流[14]、动触头行程[15]、主轴转角[16]等,相较于声音信号易受外界噪声污染,动触头行程信号和主轴转角信号需要破坏断路器的本体机械结构,断路器振动信号和分合闸线圈电流信号不仅具有非侵入式检测的特点,并且对断路器状态的细微变化具有高敏感性,更适合作为断路器监测参数。

故障特征是故障诊断技术的基础,故障特征提取的好坏将直接影响故障诊断的准确性。断路器分合闸振动信号为典型的非线性非平稳信号,分合闸线圈电流为含有谐波分量的近似工频的交流信号,上述信号均具有一定的复杂性,不利于直接进行时、频域特征提取,而多状态空间分析作为一种常用的非线性信号分析方法,能够挖掘原始信号在不同状态空间内的故障信息,因此有必要对振动信号和电流信号进行多尺度分解。由于振动信号典型的非线性非平稳性特性,使故障特征任意分布于某一分量中,局部均值分解(local mean decomposition, LMD)具有对信号内全部数据一致性分解的特点[17],适用于振动信号分析;线圈电流信号中正弦信号为强信号成分,在一定程度上将其他弱信号成分淹没,使弱信号特征无法体现,而用集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)得到的某些分量恰好对应着弱信号成分,能够达到凸显局部特征的目的[18],这也是一般 EEMD 得到的分量较 LMD 得到的分量多的原因。结合上述两种信号特点,将 LMD 与 EEMD 分别用于对振动信号和分合闸线圈电流信号的多尺度分解。断路器非正常状态下测量信号的空间能量分布与正常状态下相比会发生变化,利用上述多分辨分析方式分析信号,可以使本不明显的信号频率特征在不同分辨率的若干子空间中以显著的能量变化形式表现出来,从而提取出反映系统运行状态的特征信息[19]。传统的频带能量特征没有考虑到各个分解频带上沿时间轴分布的特点,可能导致提取的特征参数不能准确反映信号的特征,而能量矩将时间序列的能量与数据时间轴相结合,不仅兼顾了能量值的大小,对于能量值随时间的变化规律也进行了考量,因此本文将能量特征以能量矩的形式表现出来。

综上所述,本文将灰色综合关联分析应用于断路器触头振动信号与操作附件分合闸线圈电流信号中完成对断路器分合闸机械结构与分合闸线圈回路的故障诊断。将振动信号与线圈电流信号经过多尺度分解后,求取各分量的能量矩特征,归一化构成能量矩序列,将此序列与不同故障状态下的参考序列进行灰色综合关联度分析,进而实现对断路器的故障诊断。

1 灰色综合关联度分析

灰色关联分析是对系统发展变化趋势提供量化度量的客观工具,灰色综合关联度将各单项关联度进行组合,充分利用各单项关联度的优点,最大限度的整合各单项关联度提供的信息,避免由于仅采取某一单项关联度所带来的信息丢失。

1.1 单项灰色关联度

1.1.1 灰色绝对关联度

灰色绝对关联度的基本思想是描述时间序列曲线变化趋势的接近程度,即反映两序列的相似程度,具有对称性、唯一性和可比性,可用于研究多因素的关联分析。灰色绝对关联度的计算思路如下:

设系统行为序列 $X_i=(x_i(1),x_i(2),\cdots,x_i(n))$ 和序列 $X_j=(x_j(1),x_j(2),\cdots,x_j(n))$ 长度均为 n,其始点零化像序列分别为 $X_i^0=X_i-x_i(1)$,$X_j^0=X_j-x_j(1)$,另外记 $s_i=\int_1^n(X_i^0)\mathrm{d}t$,$s_j=\int_1^n(X_j^0)\mathrm{d}t$,$s_i-s_j=\int_1^n(X_i^0-X_j^0)\mathrm{d}t$。则 X_i 与 X_j 的灰色绝对关联度 ε_{ij} 为:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1 + |s_i| + |s_j|}{1 + |s_i| + |s_j| + |s_i - s_j|} \tag{1}$$

由式(1)可知,ε_{ij} 只与 X_i 与 X_j 的几何形状有关,与序列的几何空间位置无关,X_i 与 X_j 几何相似程度越大,灰色绝对关联度 ε_{ij} 越大,反之,越小,当 X_i 与 X_j 完全相似时,$\varepsilon_{ij} = 1$。

1.1.2　灰色相对关联度

灰色相对关联度描述的是 X_i 与 X_j 相对于初始点的变化速率之间的关系,与某一个单一的观测值无关。设序列 X_i 与 X_j 初始值 $x_i(1)$,$x_j(1)$ 均不为0,则定义其初始值像序列为 $X'_i = \frac{X_i}{x_i(1)}$,$X'_j = \frac{X_j}{x_j(1)}$,则序列 X_i 与 X_j 在第 k 点的关联系数为:

$$\gamma(x_i(k), x_j(k)) = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \tag{2}$$

其中:

$$\gamma_1 = \min_j \min_k |x_i(k) - x_j(k)| + \xi \max_j \max_k |x_i(k) - x_j(k)| \tag{3}$$

$$\gamma_2 = |x_i(k) - x_j(k)| + \xi \max_j \max_k |x_i(k) - x_j(k)| \tag{4}$$

式中:ξ 为分辨系数,$\xi \in [0,1]$,通常取0.5。则序列 X_i 与 X_j 的灰色相对关联度 γ_{ij} 为:

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} \gamma(x_i(k), x_j(k)) \tag{5}$$

由式(5)可知,γ_{ij} 只与序列 X_i 与 X_j 相对于初始点的变化速率有关,X_i 与 X_j 相较于初始点的变化速率越接近,灰色相对关联度 γ_{ij} 越大,反之,则越小。

1.1.3　灰色 T 型关联度

T 型关联度的基本思想是按照时间序列曲线相对变化势态的接近程度来计算关联度,即利用两序列增量的构成比来定义关联系数[20]。

对于时间区间 $[a,b]$,令 $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$,$[a,b] = \bigcup_{k=2}^{n} \Delta t_k$,$\Delta t_k \cap \Delta t_{k-1} = \varphi$,$k = 2,3,\cdots,n$。

设两原始序列分别为 $X_i = (x_i(t_1), x_i(t_2), \cdots, x_i(t_n))$ 和 $X_j = (x_j(t_1), x_j(t_2), \cdots, x_j(t_n))$,对在时间区间 $[a,b]$ 上的序列进行如下处理:

$$y_m(t_k) = x_m(t_k) - x_i(t_{k-1})$$
$$m = 1,2;k = 2,3,\cdots,n \tag{6}$$

$$D_m = \frac{\sum_{k=2}^{n} |y_m(t_k)|}{n-1}, \quad Z_m(t_k) = \frac{y_m(t_k)}{D_m} \tag{7}$$

因此,当 $z_1(k) = z_2(k) = 0$ 时,序列 X_i 与 X_j 在第 k 点的关联系数 $\xi(t_k) = 1$;当 $z_1(k)$ 与 $z_2(k)$ 不同时为 0 时有:

$$\xi(t_k) = \frac{\operatorname{sgn}(z_1(t_k) \cdot z_2(t_k))}{1 + \frac{1}{2}\|z_1(t_k) - z_2(t_k)\| + \frac{1}{2}\left[1 - \frac{\min(|z_1(t_k)|, |z_2(t_k)|)}{\max(|z_1(t_k)|, |z_2(t_k)|)}\right]} \tag{8}$$

序列 X_i 与 X_j 的灰色 T 型关联度 ξ_{ij} 为:

$$\xi_{ij} = \frac{1}{b-a}\sum_{k=2}^{n} \Delta t_k \cdot \xi(t_k) \tag{9}$$

由式(9)可知,当两序列在对应各时段 Δt_k 内增量相等或接近于相等时,增量的构成差与构成比均趋于0,两时间序列在此段时间内的关联系数就越大,越趋近于1,反之,则越小,趋近于0。

1.2　灰色综合关联度

假设时间序列 X_i 与 X_j 长度相同且初始点非0,X_i 与 X_j 的灰色绝对关联度、灰色相对关联度和 T 型关联度值分别为 ε_{ij}、γ_{ij}、ξ_{ij},则时间序列 X_i 与 X_j 的灰色综合关联度为:

$$R_{ij} = w_1\varepsilon_{ij} + w_2\gamma_{ij} + w_3\xi_{ij} \tag{10}$$

式中:w_1、w_2、w_3 分别为各单项灰色关联度的权值系数。灰色关联度 R_{ij} 不仅反映了时间序列 X_i 与 X_j 的几何相似程度,还根据其相对于初始点的变化速率与序列相对变化态势反映时间序列之间的相近程度。

1.3　熵值赋权法

在灰色综合关联分析法中,各单项灰色关联度的权重有着举足轻重的作用。传统的灰色综合关联分析中,通常会用到主观赋权法,但该方法主观性太强、个体差异性较大,为了减少主观随意性,利用熵值赋权法排除主观因素的影响,其充分有效地利用指标数据,是一种基于指标变异程度,利用信息熵对各指标权重进行赋值的方法,从而较为客观的得出指标权重[21]。某一指标的信息熵越大,表明指标值的变异程度越大,提供的信息量越多,在综合评价中起到的作用就越大,其权重就应该越大,相反,信息熵越小,指标权重也越小。熵值赋权法的计算步骤如下。

1)设评价矩阵 $X = (x_{ij})_{m\times n}$,即有 m 维 n 个指标,$i = 1,2,\cdots,m$,$j = 1,2,\cdots,n$,指标标准化处理方法为:

$$P_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^{m} x_{ij} \tag{11}$$

式中:P_{ij} 为标准化的指标数据。

2)各评价指标的信息熵为 $E_j = \sum_{i=1}^{m} P_{ij}\ln P_{ij} / \ln m$。如果 $p_{ij} = 0$,则定义 $\lim_{p_{ij}\to 0} P_{ij}\ln P_{ij} = 0$。即得到 n 个指标的信息熵为 $E_1, E_2, \cdots, E_n$。

3)根据信息熵计算各指标权重 w_j:

$$w_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^{n} (1 - E_j) \tag{12}$$

2　基于灰色关联度的框架式断路器故障诊断方法

综上所述,本文基于灰色关联度的框架式断路器故

障诊断中参考序列及权值系数构建步骤如下。

1)采集断路器发生不同机械故障时的分合闸振动信号以及操作附件线圈回路不同故障下的分合闸线圈电流信号,并对上述振动信号与电流信号分别进行去噪预处理。

2)对不同故障下多个样本振动信号与电流信号进行多尺度分解,并进行能量矩计算,对求得的同一尺度下的能量矩进行归一化处理,构成能量矩序列。

3)按照平均值法求出每种状态下对应的特征序列,将其作为参考序列,并计算该参考序列与所属故障下多个样本能量矩序列的 3 种单项灰色关联度值,根据单项灰色关联度值由熵值赋权法计算得到不同故障状态下 3 种单项灰色关联度的权值系数。特征序列和权值系数构建完成后,故障诊断步骤如下:

(1)采集需要诊断部位的相应信号,并进行去噪、多尺度分解、能量矩计算和归一化处理;

(2)计算上述得到的能量矩序列与不同故障参考序列的灰色绝对关联度、灰色相对关联度与灰色 T 型关联度值,并结合权值系数计算灰色综合关联度值;

(3)由关联度最大原则,比较综合关联度值大小,即可诊断出该测试信号所属的故障类型。

框架式断路器故障诊断流程如图 1 所示。

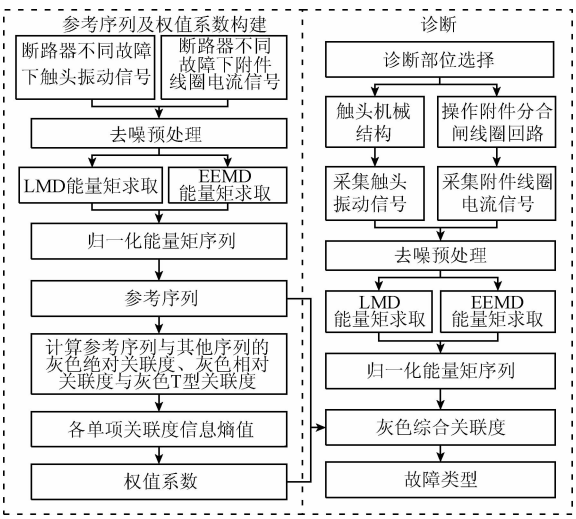


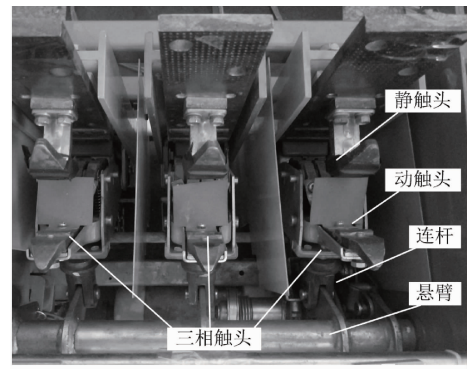
图 1 框架式断路器故障诊断流程

Fig. 1 Fault diagnosis flow chart for the frame-type circuit breaker

3 基于触头振动信号的故障诊断实例分析

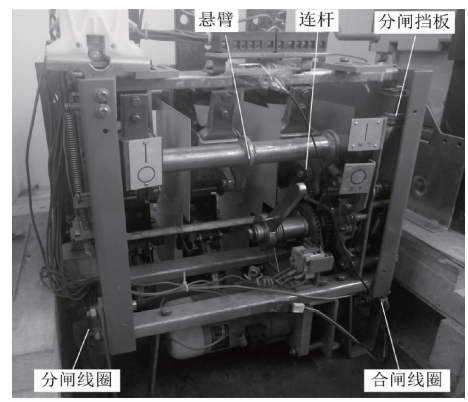
3.1 振动信号采集

本文以 DW15-1600 低压断路器为研究对象,其触头及连锁部分机械结构复杂,如图 2(a)所示。在断路器运行过程中,由于振动、磨损等因素易造成三相不同期、虚假合闸和分闸不彻底等主要故障,本文基于上述故障进行分析,人为调整断路器三相触头的连杆长短模拟三相不同期故障,即 A 相不同期、B 相不同期和 C 相不同期;调整后退触头系统的悬臂模拟虚假合闸故障;在分闸挡板间多加垫片,模拟分闸不彻底故障,具体操作位置如图 2(b)所示。



(a) 触头及连锁部分机械结构

(a) Mechanical structure of the contact and interlocking parts



(b) 故障设置具体操作位置

(b) Specific operating position of the fault setting

图 2 DW15-1600 机械结构

Fig. 2 Mechanical structure of DW15-1600

本文通过构建框架式断路器故障信号采集系统完成对断路器振动信号和操作附件线圈电流信号的采集,该系统通过工控机控制断路器的动作过程,数据采集卡 PCL-818HD 将加速度传感器 LC0159 采集的振动信号与电流传感器 CHF-10P 采集的电流信号传输给工控机,其中,加速度传感器垂直安装于断路器试品的基座横梁中间相位置,电流传感器与操作附件中合、分闸线圈电气连接线相连。

采集正常以及上述 5 种故障下的振动信号,如图 3 所示,从图 3 中可以看出,振动信号复杂,呈现出非线性非周期性的特点,不同故障信号仅凭肉眼无法看出区别。

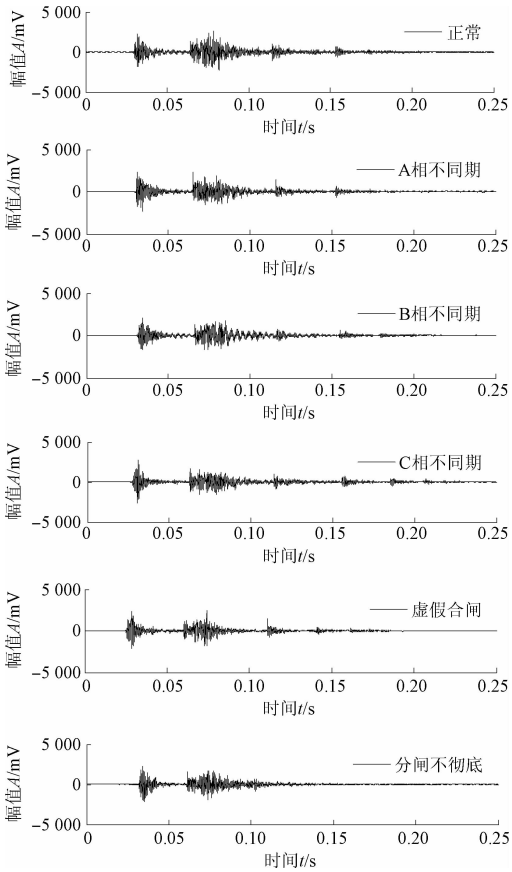


图 3　不同故障下振动信号波形

Fig. 3　The vibration signal waveforms under different fault states

3.2　特征提取与故障诊断

实测信号中往往夹杂着大量噪声,采用小波基为‘sym3’的 3 层小波包分解对振动信号进行去噪预处理。利用 LMD 方法对不同故障下的去噪振动信号进行自适应分解,其中,正常下的振动信号 LMD 分解结果如图 4 所示。不同故障下的振动信号均自适应分解为 8 个尺度 PF 分量,各 PF 分量从高频到低频依次分布。

对图 4 中 8 个 PF 分量按照式(13)进行能量矩计算:

$$E_i = \sum_{k_1=1}^{n_1} (k_1 \Delta t) \mid c_i(k_1 \Delta t) \mid^2 \tag{13}$$

式中:c_i 为分量序列,Δt 为采样时间间隔,n_1 为序列长度。6 种不同故障下的能量矩计算结果如图 5 所示。从图中可知:不同故障的同一尺度 PF 分量由于故障特性不同,能量矩值存在差异;同一故障下不同尺度 PF 分量的能量矩差异较大,且存在数个量级差异,使得不同故障间同一尺度 PF 分量的能量矩值差异不再明显,存在混叠现象,不易进行故障特征提取,因此对同一个样本的多个 PF 分量之间进行归一化意义不大,本文采取对同一尺度下的 PF 分量进行归一化的方式对能量矩值进行处理。归一化公式为式(14)。

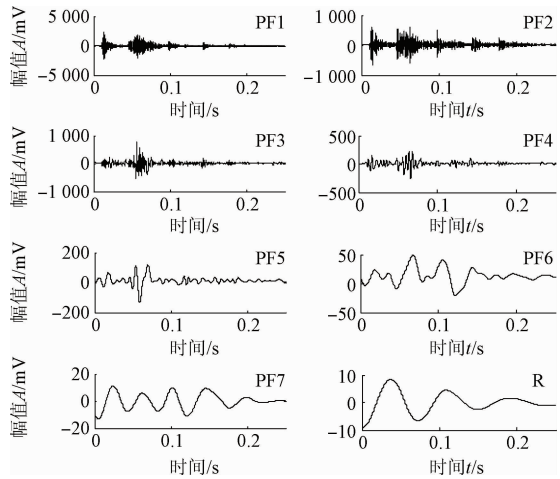


图 4　正常下振动信号 LMD 分解

Fig. 4　LMD decomposition of the vibration signal under normal state

$$z = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{14}$$

式中:z 为 x_i 归一化后的数值,$z \in [0,1]$,$x_{\min}$、$x_{\max}$ 分别为序列中同一尺度下的最小值和最大值。

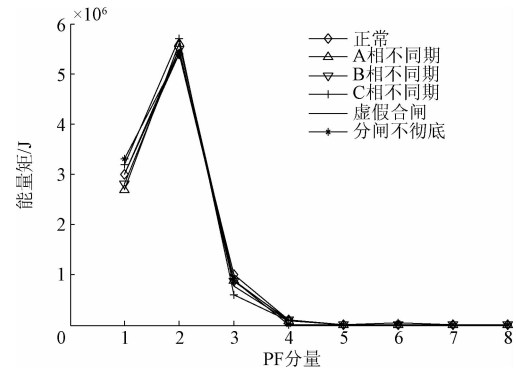


图 5　不同故障下各 PF 分量的能量矩

Fig. 5　The energy moments of PF components under different fault states

对不同故障下 PF 分量的能量矩值进行归一化,以 1 个样本数据为例,结果如图 6 所示,可以看出,不同故障下得到的归一化能量矩序列折线相较于图 5 差异化更加明显,不同故障之间折线变化几乎不再重叠,即能量矩序列折线具有不同的相似性与相近性,以此作为故障信息能够较容易地将故障区分开来。

利用同一样本的 8 个归一化能量矩值建立能量矩序列,该序列即表征对应故障的故障信息。每种故障均采集 10 个样本,计算该 10 个样本的归一化能量矩值平均值,以此作为该故障的参考序列。以 $T_1 \sim T_6$ 分别表示正常、A 相不同期、B 相不同期、C 相不同期、虚假合闸、虚假分闸 6 种不同故障的参考序列。

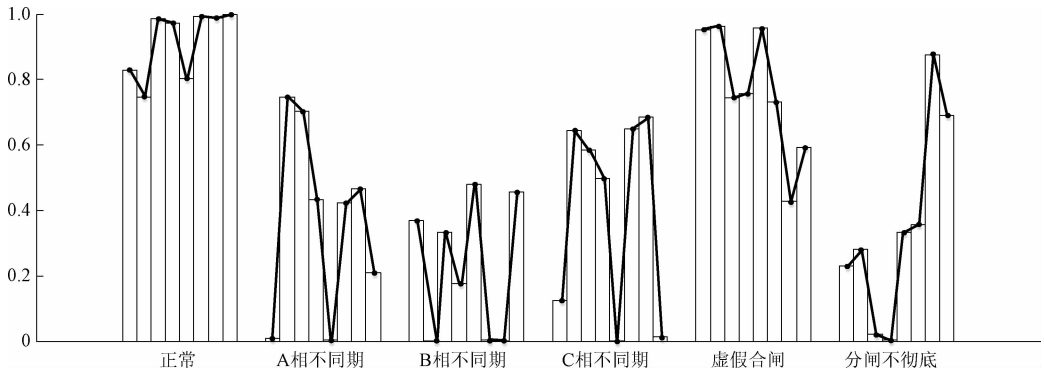


图 6 不同状态下各 PF 分量能量矩的纵向归一化结果

Fig. 6 Vertical normalization results of PF component energy moments under different states

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}T_1\\T_2\\T_3\\T_4\\T_5\\T_6\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.803\,7 & 0.747\,2 & 0.993\,1 & 0.991\,6 & 0.804\,5 & 0.994\,0 & 0.998\,6 & 0.996\,1\\0.005\,4 & 0.760\,1 & 0.703\,6 & 0.413\,9 & 0.007\,2 & 0.453\,8 & 0.480\,1 & 0.223\,4\\0.359\,8 & 0.024\,7 & 0.309\,2 & 0.176\,5 & 0.459\,2 & 0.024\,8 & 0.001\,7 & 0.489\,2\\0.152\,9 & 0.643\,8 & 0.572\,4 & 0.476\,9 & 0.013\,8 & 0.627\,7 & 0.672\,9 & 0.017\,6\\0.968\,4 & 0.973\,6 & 0.757\,3 & 0.728\,2 & 0.956\,7 & 0.641\,2 & 0.387\,5 & 0.572\,9\\0.203\,9 & 0.258\,7 & 0.003\,1 & 0.022\,7 & 0.307\,8 & 0.335\,6 & 0.843\,9 & 0.689\,1\end{bmatrix} \tag{15}$$

计算某种故障下的参考序列与该故障 10 个样本的归一化能量矩序列的灰色绝对关联度、灰色相对关联度和灰色 T 型关联度,以正常下振动信号为例,特征序列与 10 个样本的归一化能量矩序列的单项灰色关联度值如表 1 所示。从表 1 中可以看出,样本不同,但单项灰色关联度值接近,且单项灰色关联度值均达到 0.9 以上,说明该参考序列能够代表该故障信息进行后续的灰色综合关联分析。

表 1 正常下不同样本各单项灰色关联度值

Table 1 Monomial grey correlation degree values for different samples under normal state

样本	绝对关联度	相对关联度	T 型关联度
1	0.934 7	0.956 8	0.903 7
2	0.921 9	0.963 7	0.942 7
3	0.970 1	0.928 2	0.934 5
4	0.927 7	0.913 7	0.910 2
5	0.945 8	0.947 1	0.943 3
6	0.983 2	0.971 0	0.904 4
7	0.990 1	0.953 4	0.912 7
8	0.947 2	0.940 7	0.935 8
9	0.936 7	0.971 3	0.923 2
10	0.919 1	0.910 1	0.910 7

利用上述不同样本的同一单项关联度值,根据熵值赋权法即可计算各单项关联度值的权值系数,不同故障下各单项灰色关联度的权值系数如表 2 所示,不难发现,不同故障的单项灰色关联度权值系数都有着明显的区别,且占有一定比重,说明不论从相似性还是从相近性的单一角度考虑归一化能量矩值序列的变化趋势都将直接造成最终的灰色关联分析存在误差。

表 2 不同故障下各单项灰色关联度权值系数

Table 2 Weigh coefficients of monomial grey correlation degree under different fault states

故障	绝对关联度	相对关联度	T 型关联度
正常	0.411 3	0.360 8	0.227 9
A 相不同期	0.395 9	0.269 3	0.334 8
B 相不同期	0.423 7	0.377 1	0.199 2
C 相不同期	0.323 3	0.228 4	0.448 3
虚假合闸	0.397 2	0.374 5	0.228 3
分闸不彻底	0.401 2	0.203 7	0.395 1

以 F1 ~ F6 分别代表断路器处于上述 6 种不同的状态,利用单项灰色关联度权值系数计算灰色综合关联度,诊断结果如表 3 所示,R1 ~ R6 分别表示待诊断信号归一化能量矩序列与 6 种不同状态下特征序列的灰色综合关联度值,关联度值最大的故障类型即为诊断结果,可以看

出,故障诊断结果与实际故障原因一致。对上述故障进行传统的灰色综合关联分析,即各单项灰色关联指标权值相等,诊断结果如表 4 所示,诊断效果并不理想,误诊断比例较大,充分说明灰色关联综合分析中各指标权重等价是与实际情况不相符的,合理运用指标权重对诊断效果至关重要。

表 3　基于振动信号的灰色综合关联度故障诊断结果

Table 3　Fault diagnosis results of grey comprehensive correlation degree based on vibration signal

故障	R1	R2	R3	R4	R5	R6	结果
F1	0.886	0.201	0.089	0.233	0.067	0.157	F1
F2	0.224	0.901	0.174	0.517	0.110	0.074	F2
F3	0.078	0.186	0.851	0.037	0.261	0.154	F3
F4	0.248	0.482	0.046	0.954	0.079	0.134	F4
F5	0.054	0.121	0.247	0.102	0.903	0.201	F5
F6	0.169	0.069	0.165	0.143	0.193	0.897	F6

表 4　传统灰色综合关联度故障诊断结果

Table 4　Fault diagnosis results of traditional grey comprehensive correlation degree

故障	R1	R2	R3	R4	R5	R6	结果
F1	0.743	0.382	0.658	0.104	0.049	0.275	F1
F2	0.369	0.872	0.675	0.506	0.294	0.077	F2
F3	0.674	0.591	0.621	0.282	0.089	0.103	F1
F4	0.093	0.557	0.316	0.483	0.501	0.221	F2
F5	0.081	0.307	0.129	0.464	0.734	0.624	F5
F6	0.317	0.101	0.183	0.183	0.661	0.767	F6

4　基于线圈电流信号的故障诊断实例分析

4.1　合、分闸线圈电流信号分析

本文试验对象的操作附件采用交流电磁系统,操作附件中合闸电磁铁为装甲式螺管电磁铁,分闸电磁铁为拍合式电磁铁,分合闸线圈电压均为380 V。断路器是否能够进行有效地分合闸操作,其完全依靠于操作附件中分合闸电磁铁的有效运行。断路器动作时产生剧烈震动会造成线圈松动等,由此引起电磁铁铁芯发生偏移,产生卡涩故障,严重时烧毁线圈,本文在动铁芯轴部与线圈间塞入细铁丝模拟铁芯卡涩;该断路器复杂的机械结构易发生卡涩,将会直接阻断动铁芯行程,导致合闸失败,通过在脱扣推动连杆滑动上升椭圆空间内塞入木楔可模拟该故障;在发生铁芯行程不足故障时,铁芯行程减小,导致磁路气隙长度变长,以致磁阻减小,从而降低驱动功率,线圈长时间通电,直接造成线圈烧毁,铁芯行程不足故障可通过在动铁芯顶部粘贴一定数量的橡胶垫实现;线圈电压不足将直接降低驱动功率,严重时造成合闸失效,可通过电动调压器人为调节供电电压完成,合闸线圈结构如图 7 所示。本文主要对上述合闸过程中常见的铁芯卡涩、机械结构卡涩、铁芯行程不足和线圈电压不足故障进行分析,通过故障模拟试验采集上述故障下的合闸线圈电流,每种故障均进行多次重复性试验,电流波形重复性较好,如图 8 所示。

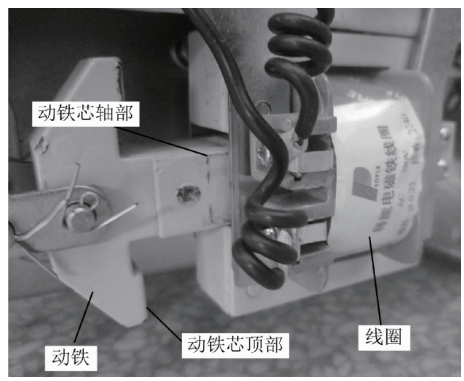
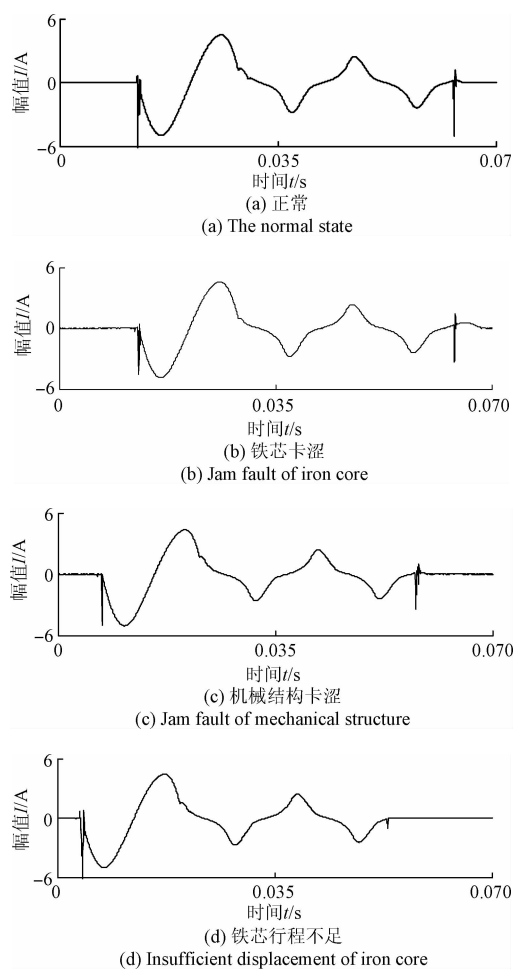
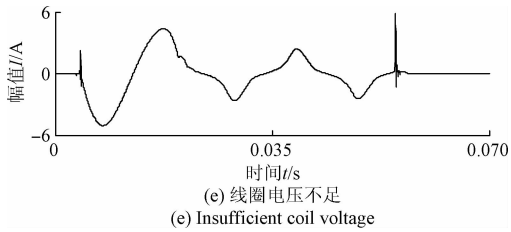


图 7　合闸线圈结构

Fig. 7　Structure of the closing coil





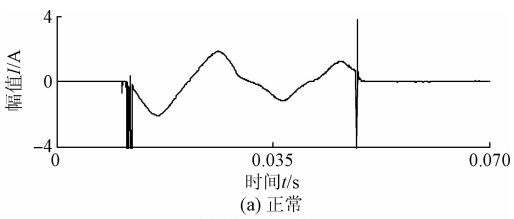
(e) 线圈电压不足
(e) Insufficient coil voltage

图 8 不同故障下合闸线圈电流信号

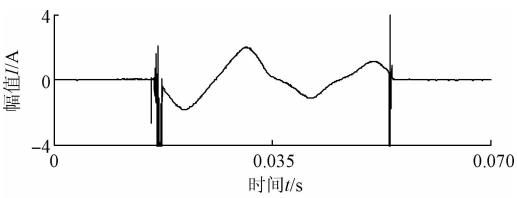
Fig. 8 Closing coil current signals under different fault states

从图 8 中可以看出,合闸线圈电流信号初始为正弦信号,后期呈现出畸变,即随着气隙逐渐减小,产生磁饱和,磁化电流不再是正弦量,电流变为具有周期对称特点的尖顶波,且电流峰值逐渐减小,对其进行频谱分析,发现电流信号中含有谐波分量。

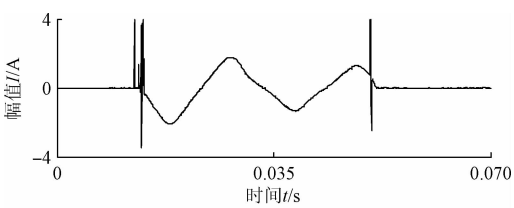
分闸线圈回路常见故障有顶杆阻力异常、衔铁行程不足、线圈电压不足等。本文利用弹性绳拴住顶杆推片,模拟分闸顶杆在行程中所受阻力异常;在衔铁上粘贴硬纸片模拟衔铁行程不足;分闸线圈电压不足故障模拟同合闸线圈。采集断路器处于上述多种状态下的分闸线圈电流,如图 9 所示。从图 9 中可以看出,分闸线圈电流信号持续时间较合闸短,这是由于分闸线圈衔铁行程较短与分闸速度较快所致。



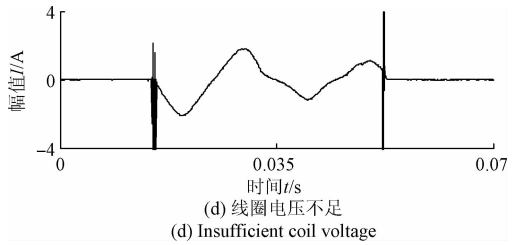
(a) 正常
(a) The normal state



(b) 顶杆阻力异常
(b) Abnormal resistance of the push rod



(c) 衔铁行程不足
(c) Insufficient displacement of the armature



(d) 线圈电压不足
(d) Insufficient coil voltage

图 9 不同故障下分闸线圈电流信号

Fig. 9 Opening coil current signals under different fault states

4.2 合闸线圈故障特征提取与诊断

对采集的合闸线圈电流信号进行滤波窗口为 50 的均值滤波处理。对不同故障下去噪后的合闸线圈电流信号进行自适应 EEMD 分解,其中,正常下 EEMD 分解结果如图 10 所示,不同故障下的电流信号均自适应分解为 11 个尺度 IMF 分量,则能量矩序列维数为 11 维。

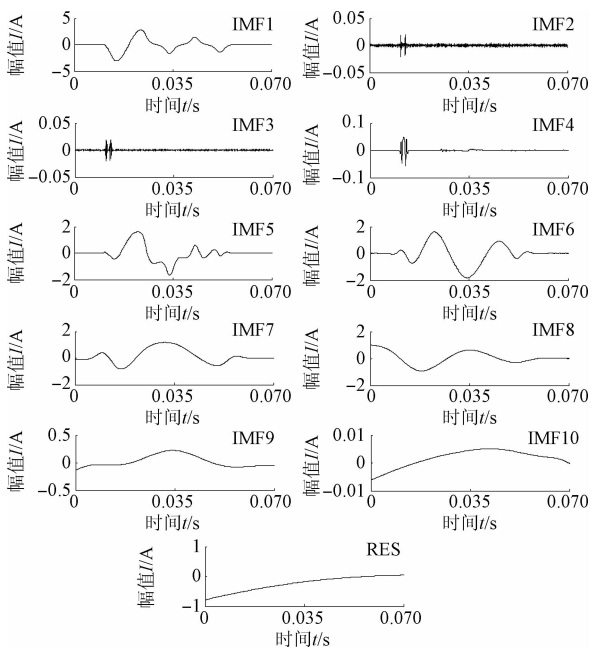


图 10 正常下合闸线圈电流信号 EEMD

Fig. 10 EEMD decomposition of the closing coil current signal under normal state

对不同故障下同一尺度的 IMF 分量能量矩按照式(14)进行归一化处理,归一化后的结果如图 11 所示,不同故障的归一化能量矩序列折线之间差异较大,有利于后续故障诊断中的灰色综合关联分析。

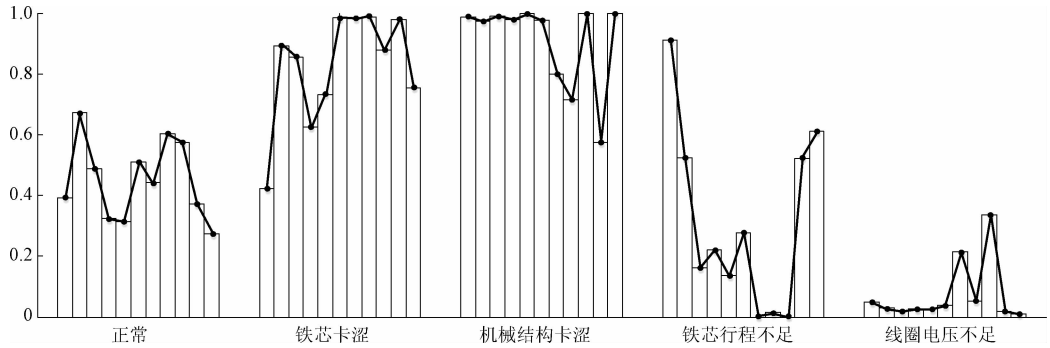


图 11　合闸线圈电流各 IMF 分量能量矩归一化结果

Fig. 11　Normalization results of the IMF component energy moments of the closing coil current signal

采用相同的处理方式,计算每种故障下采集的合闸线圈电流信号 10 个样本归一化能量矩序列的平均值,以此作为合闸线圈电流信号的故障参考序列,以 $T'_1 \sim T'_5$ 表示合闸线圈回路中正常、铁芯卡涩、机械结构卡涩、铁芯行程不足和线圈电压不足 5 种不同故障的参考序列,如式(16)所示。

$$\boldsymbol{T}' = [T'_1 \quad T'_2 \quad T'_3 \quad T'_4 \quad T'_5]^{\mathrm{T}} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.401\,2 & 0.681\,8 & 0.487\,7 & 0.312\,9 & 0.321\,1 & 0.519\,6 & 0.431\,9 & 0.611\,7 & 0.568\,7 & 0.361\,2 & 0.268\,8 \\ 0.432\,9 & 0.910\,2 & 0.878\,7 & 0.612\,0 & 0.707\,2 & 0.982\,8 & 0.989\,1 & 0.991\,2 & 0.898\,6 & 0.980\,2 & 0.771\,9 \\ 0.986\,8 & 0.974\,5 & 0.989\,1 & 0.979\,8 & 0.963\,9 & 0.977\,1 & 0.812\,5 & 0.736\,4 & 0.949\,3 & 0.573\,8 & 0.977\,2 \\ 0.907\,6 & 0.454\,5 & 0.153\,7 & 0.235\,2 & 0.136\,0 & 0.270\,4 & 0.004\,1 & 0.030\,1 & 0.014\,7 & 0.494\,3 & 0.612\,3 \\ 0.031\,2 & 0.028\,1 & 0.015\,6 & 0.014\,4 & 0.025\,3 & 0.038\,2 & 0.215\,8 & 0.017\,3 & 0.336\,1 & 0.013\,2 & 0.008\,5 \end{bmatrix} \tag{16}$$

计算本故障下参考序列与 10 个样本的归一化能量矩序列的绝对关联度、相对关联度和 T 型关联度,并利用熵值赋权法计算单项灰色关联度值的权值系数,合闸线圈电流的各权值系数如表 5 所示。

表 5　基于合闸线圈电流的各单项灰色关联度权值系数

Table 5　Weigh coefficients of monomial grey correlation degrees based on closing coil current

故障	绝对关联度	相对关联度	T 型关联度
正常	0.206 1	0.538 2	0.235 1
铁芯卡涩	0.389 0	0.415 6	0.195 4
机械结构卡涩	0.477 5	0.287 4	0.235 1
铁芯行程不足	0.216 2	0.396 1	0.387 7
线圈电压不足	0.335 7	0.207 9	0.456 4

利用上述权值系数对 5 种不同状态下的合闸线圈回路故障进行诊断,即进行灰色综合关联度计算,结果如表 6 所示,待诊断信号所属的故障类型与实际故障类型之间的灰色综合关联度值最大,且远大于其他灰色综合关联度值,诊断结果与故障类型一致,说明灰色综合关联分析对于断路器合闸线圈回路故障诊断具有良好的实用性。

表 6　基于合闸线圈电流的灰色综合关联度故障诊断结果

Table 6　Fault diagnosis results of grey comprehensive correlation degree based on closing coil current

故障	R1	R2	R3	R4	R5	结果
F1	0.934 6	0.127 7	0.323 2	0.106 2	0.267 1	F1
F2	0.126 4	0.923 7	0.110 2	0.153 8	0.334 1	F2
F3	0.316 7	0.117 7	0.893 4	0.095 6	0.059 8	F3
F4	0.110 7	0.158 6	0.101 1	0.954 3	0.125 8	F4
F5	0.263 8	0.328 9	0.063 2	0.124 7	0.901 2	F5

4.3　分闸线圈故障特征提取与诊断

分闸线圈电流信号与合闸具有相似的特性,因此可采用相同的信号处理方式,经 EEMD 分解为 11 个尺度 IMF 分量,对不同故障下同一尺度的 IMF 分量进行归一化能量矩计算,以此求出不同故障的参考序列,计算参考序列与多个样本归一化能量矩序列的单项灰色关联度,结合熵值赋权法确定权值系数,分闸线圈回路中正常、顶杆阻力异常、衔铁行程不足和线圈电压不足 4 种不同状态权值系数计算结果如表 7 所示。

表 7 基于分闸线圈电流的各单项灰色关联度权值系数

Table 7 Weigh coefficients of monomial grey correlation degrees based on opening coil current

故障	绝对关联度	相对关联度	T 型关联度
正常	0.543 1	0.231 2	0.225 7
顶杆阻力异常	0.386 4	0.186 3	0.427 3
衔铁行程不足	0.229 3	0.440 1	0.330 6
线圈电压不足	0.347 4	0.267 7	0.384 9

假设断路器分闸线圈回路分别处于上述 4 种的状态,利用表 7 中各单项灰色关联度权值系数进行基于灰色综合关联度的故障诊断,灰色综合关联度值计算结果如表 8 所示,诊断结果与实际断路器分闸线圈回路故障类型一致,因此,基于灰色综合关联分析的故障诊断方法也适用于断路器分闸线圈回路故障诊断。

表 8 基于分闸线圈电流的灰色综合关联度故障诊断结果

Table 8 Fault diagnosis results of grey comprehensive correlation degree based on opening coil current

故障	R1	R2	R3	R4	结果
F1	0.953 7	0.106 2	0.341 1	0.156 7	F1
F2	0.096 8	0.901 2	0.089 3	0.142 2	F2
F3	0.352 2	0.100 1	0.936 6	0.163 9	F3
F4	0.148 8	0.146 7	0.155 9	0.940 8	F4

5 结 论

利用灰色综合关联度描述待诊断信号提取的故障特征序列与实际故障参考序列之间的关联度,本文提出一种基于灰色关联度的低压框架式断路器故障诊断方法。利用的多分辨分析法 LMD 和 EEMD 分别对断路器触头振动信号与操作附件线圈电流信号进行自适应分解,信号分解方式结合信号本身的属性,分解效果更好;求取各分量的能量矩值,由于结合时间轴信息,故障特征提取较传统的能量值更加有效;利用绝对关联度、相对关联度和 T 型关联度相结合从不同角度考虑两序列曲线的关联程度,避免了单一角度描述的缺陷;同时各单项灰色关联度权值系数利用熵值赋权法确定,充分利用关联度指标本身数据,排除主观因素的影响,相对于传统的等权系数法更加符合实际。实验结果表明,无论是对于断路器触头振动信号,还是对于操作附件中分合闸线圈电流信号,灰色综合关联分析均能够有效、准确地进行故障诊断。该方法简单合理,摆脱了目前智能诊断复杂算法的约束,具有较好的实用价值,为断路器故障诊断提供了一种新方法和新思路。

参考文献

[1] 黄南天, 张书鑫, 蔡国伟, 等. 采用 EWT 和 OCSVM 的高压断路器机械故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12):2773-2781.
HUANG N T, ZHANG SH X, CAI G W, et al. Mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breakers utilizing empirical wavelet transform and one-class support vector machine[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12): 2773-2781.

[2] 徐建源, 张彬, 林莘, 等. 能谱熵向量法及粒子群优化的 RBF 神经网络在高压断路器机械故障诊断中的应用[J]. 高电压技术, 2012, 38(6):1299-1306.
XU J Y, ZHANG B, LIN X, et al. Application of energy spectrum entropy vector method and RBF neural networks optimized by the particle swarm in high voltage circuit breaker mechanical fault diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6):1299-1306.

[3] 黄建, 胡晓光, 巩玉楠,等. 高压断路器机械故障诊断专家系统设计[J]. 电机与控制学报,2011,15(10): 43-49.
HUANG J, HU X G,GONG Y N, et al. Machinery fault diagnosis expert system for high voltage circuit breaker[J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(10): 43-49.

[4] 孙曙光, 赵黎媛, 杜太行, 等. 基于电机电流分析的万能式断路器机械故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 952-960.
SUN SH G, ZHAO L Y, DU T H, et al. Diagnosis on the mechanical fault of universal circuit breaker based on motor current analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 952-960.

[5] 徐松林, 黄少先. 基于小波能量谱和灰色综合关联度的 HVDC 换相失败故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3):85-89.
XU S L, HUANG SH X. Fault diagnosis of commutation failures in the HVDC system based on the wavelet energy spectrum and grey comprehensive relationship degree[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3):85-89.

[6] 刘思峰, 党耀国. 灰色系统理论及其应用[M]. 5 版. 北京:科学出版社,2010.
LIU S F, DANG Y G. Gray system theory and its application[M]. 5th Ed. Beijing: Science Press, 2010.

[7] 李济沅, 邱玉婷, 于竞哲, 等. 基于灰色关联度和 TOPSIS 的真空断路器运行状态综合评估[J]. 高压电器, 2017, 53(3):242-247.
LI J Y, QIU Y T, YU J ZH, et al. State complex evaluation of vacuum circuit breaker based on grey correlation degree and TOPSIS method[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 242-247.

[8] 王清印. 灰色 B 型关联分析[J]. 华中理工大学学报: 自然科学版, 1989, 17(6):77-82.

WANG Q Y. The grey relational analysis of B-mode[J]. Journal of Huazhong University of Science &Technology, 1989, 17(6):77-82.

[9] 唐五湘. T 型关联度及其计算方法[J]. 数理统计与管理, 1995, 14(1):34-37.
TANG W X. The concept and computation method of T's correlation degree[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 1995, 14(1):34-37.

[10] 孙才新, 李俭, 郑海平, 等. 基于灰色面积关联度分析的电力变压器绝缘故障诊断方法[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 24-29.
SUN C X, LI J, ZHENG H P, et al. A new method of faulty insulation diagnosis in power transformer based on degree of area incidence analysis[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 24-29.

[11] 董菲菲, 罗贤运, 吕保和. 天然气管道内腐蚀影响因素的灰色综合关联度分析[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(5):15-18.
DONG F F, LUO X Y, LV B H, Analysis of impact factors of natural gas pipeline internal corrosion based on the grey comprehensive correlation[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(5):15-18.

[12] 缪希仁, 吴晓梅, 石敦义, 等. 采用 HHT 振动分析的低压断路器合闸同期性辨识[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11):154-161.
LIAO X R, WU X M, SHI D Y, et al. Switching synchronism identification of low voltage circuit breaker HHT analysis to vibration signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(11):154-161.

[13] 赵书涛, 王亚潇, 李沐峰, 等. 基于声振联合特征熵的断路器故障诊断方法[J]. 华北电力大学学报:自然科学版, 2016, 43(6):20-24.
ZHAO S T, WANG Y X, LI M F, et al. Breaker fault diagnosis with sound and vibration characteristic entropy[J]. Journal of North China Electric Power University: Nature and Science, 2014, 29(11): 154-161.

[14] 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.
SUN Y SH, ZHANG W T, ZHANG Y M, et al. Research on feature value extraction and fault recognition of coil current signal in high-voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9):134-139.

[15] 方昕. 基于 DSP 的高压断路器触头行程检测系统的研究[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(5):891-894.
FANG X. Detection system of high voltage circuit breaker contact travel based on DSP[J]. Computer & Digital Engineering, 2015, 51(9):134-139.

[16] 李永林, 余砾, 李旭旭, 等. 基于最优合闸速度设计 126 kV 真空断路器操动机构凸轮轮廓[J]. 高压电器, 2017, 53(3):197-204.
LI Y L, YU L, LI X X, et al. Optimization design of operating mechanism cam profile for a 126 kV vacuum circuit breaker based on an optimal closing velocity[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3):197-204.

[17] 张亢. 局部均值分解方法及其在旋转机械故障诊断中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
ZHANG K. Research on local mean decomposition method and its application to rotating machinery fault diagnosis[D]. Changsha: Hunan University, 2012.

[18] 刘觉晓. 基于 EEMD 的滚动轴承振动故障特征提取与诊断研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
LIU J X. Research on extraction and diagnosis of fault feature of vibration of rolling based on EEMD[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

[19] 林圣, 何正友,罗国敏. 基于小波能量矩的输电线路暂态信号分类识别方法[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 30-34.
LIN SH, HE ZH Y,LUO G M. A wavelet energy moment based classification and recognition method of transient signals in power transmission line[J]. Power System Technology, 2008, 32(20): 30-34.

[20] 黄浩, 王浩华. 灰色 T 型关联度的改进与实证[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(1):131-139.
HUANG H, WANG H H. Improvements on the gray T-related degree[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46(1): 131-139.

[21] 朱福林, 张波, 王娜,等. 基于熵权灰色关联度的印度服务外包竞争力影响因素实证研究[J]. 管理评论, 2017, 29(1): 53-61.
ZHU F L, ZHANG B, WANG N, et al. An empirical study on the competitiveness factors of service off shoring in India based on entropy and gray correlation methods[J]. Management Review, 2017, 29(1): 53-61.

作者简介

孙曙光(通讯作者),分别在 2002 年、2005 年和 2009 年于河北工业大学获得学士、硕士和博士学位,现为河北工业大学副教授,主要研究方向为电器检测与试验。
E-mail:sunshuguang_2000@163.com

Sun Shuguang (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Hebei University of Technology in 2002, 2005 and 2009, respectively. Now he is an associate professor in Hebei University of Technology. His main research interest is electric apparatus test.