基于多源振动信号的断路器机械特性时间参量测量方法

姜宁波[1] 陈 磊[1*] 牛小波[1] 万书亭[2] 王震远[1]
1.山东理工大学电气与电子工程学院,淄博,255000
2.华北电力大学河北省电力机械装备健康维护与失效预防重点实验室,保定,071000

摘要:针对断路器机械特性时间参量在线测量困难的问题,提出一种基于多源振动信号的断路器机械特性时间参量测量方法,重点解决从振动信号中定位断路器关键机械动作对应的振动冲击响应区间并提取其特征时刻的问题。利用改进的鱼鹰优化算法对变分模态分解的关键参数进行自适应寻优,并基于寻优结果对断路器振动信号进行分解;对分解后的信号分量进行有效分量筛选与融合,并联合掩模加权重构实现信号提纯;设计了一种振动事件增强特征函数即短时鲁棒差峭积,用于强化振动冲击特征;最后,利用改进的双门限端点检测法实现断路器机械特性时间参量的提取。实验结果表明,所提方法能够有效实现断路器机械特性时间参量的在线测量,多种工况下最大误差保持在5%以内,具有较高的工程应用价值。

关键词:断路器机械特性;鱼鹰优化算法;变分模态分解;掩模加权;双门限端点检测
中图分类号:TM561
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.11.010 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Measurement Method for Mechanical Characteristic Time Parameters of Circuit Breakers Based on Multi-source Vibration Signals

JIANG Ningbo[1] CHEN Lei[1*] NIU Xiaobo[1] WAN Shuting[2] WANG Zhenyuan[1]
1.School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong, 255000
2.Hebei Key Laboratory of Electric Machinery Health Maintenance & Failure Prevention, North China Electric Power University, Baoding, Hebei, 071000

Abstract: To address the challenges of online measurement of circuit breakers' mechanical characteristic time parameters, a novel measurement method was proposed based on multi-source vibration signals. The central objective was to locate the vibration shock response intervals corresponding to key mechanical actions of circuit breakers and extract their characteristic instants from vibration signals. Firstly, the improved osprey optimization algorithm was utilized to adaptively optimize the key parameters of variational mode decomposition, and the vibration signals of the circuit breakers were decomposed based on the optimization results. Secondly, the decomposed signal components were effectively screened and fused, and then combined with mask-weighted reconstruction to achieve signal purification. Furthermore, a vibration event enhancement feature function, namely the short-time robust differential kurtosis, was designed to enhance the vibration shock characteristics. Finally, the improved double-threshold endpoint detection method was utilized to extract the mechanical characteristic time parameters of the circuit breakers. Experimental results show that the proposed method may effectively realize online measurement of circuit breakers' mechanical characteristic time parameters, under multiple operating conditions, the maximum error is maintained within 5%, showing high engineering application value.

Key words: circuit breaker mechanical characteristic; osprey optimization algorithm; variational mode decomposition; mask weighting; double-threshold endpoint detection

0 引言

利用断路器在特定电压或电流相位上精确投切电力设备,是构建新型电力系统、提升电网智能化水平的关键环节,对抑制操作过电压、降低涌流冲击和保障系统稳定运行具有重要作用[1-2]。作为电力系统中最主要的控制和保护设备,断路器的动作可靠性直接关系到电网的安全运行与电能质量[3]。选相控制需将断路器动作时间参量预先

收稿日期:2025-09-10
基金项目:国家自然科学基金(52275109);山东省自然科学基金(ZR2023QE050)

配置于控制系统中，因此，实现精准控制的核心在于持续修正断路器在长期运行中产生的动作时间偏差，这对断路器动作时间参量的实时监测提出了明确需求[4]。

断路器本质上是一种通过机械结构的快速运动来实现电路开断与闭合的关键保护装置，其可靠性与内部机械结构的设计、动力学性能及材料耐久性密切相关[5]。目前，通常利用线圈电流信号、动触头行程曲线和触头变位信号来获取断路器机械特性时间参量，提取这些信号的波形拐点即可得到关键部件的动作时刻[6]。然而，该方法所依赖的电流传感器、位移传感器、角度传感器和光电编码器等，通常需要侵入设备内部并与内部零件交叉布置，实施复杂、成本较高，难以实现断路器机械特性时间参量的实时监测[7-8]。

在断路器动作过程中，其内部结构按预设时序运动，伴随的挤压、碰撞、摩擦等动作均会激发机械振动，振动信号耦合了丰富的机械状态信息，因此，通过对振动信号进行分析，可实现断路器机械特性的非侵入式检测[9]。由于断路器振动信号具有强烈的非平稳、非周期和非线性特点，现有研究多采用先进的时频分析方法从中提取具有明显区分性的特征，并结合机器学习方法进行状态判别，从而实现断路器机械状态的评估[10-11]。这类方法虽可用于断路器健康状态的定性判断，但难以准确量化具体的机械特性时间参量。

断路器振动信号实质上是内部多个零部件振动响应叠加与衰减的结果。若能对振动信号有效解耦、增强特征，则有望从中提取机械特性时间参量。已有研究借鉴语音信号中人声检测思路，通过在短时尺度上计算能量、过零率、谱熵等特征以强化振动特征表征，初步验证了振动信号用于提取时间参量的可行性[12-14]。然而，该类方法通常基于单一信号进行分析，且存在预处理不足、特征干扰显著等问题，导致漏判率、误判率较高，严重限制了可提取时间参量的数量与准确性。

针对上述问题，本文提出了一种基于多源振动信号的断路器机械特性时间参量提取方法。在信号降噪基础上，设计了一种名为“短时鲁棒差峭积”的特征函数及相适应的事件判定方法，以增强振动事件的表征能力，从而实现高精度的振动事件定位及机械特性时间参量测量。首先利用改进的鱼鹰优化算法（improved osprey optimization algorithm，IOOA）对变分模态分解（variational mode decomposition，VMD）进行参数组合寻优，并基于寻优结果对原始振动信号进行分解；然后筛选有效分量进行融合完成初步降噪，再结合基于事件时间窗的掩模加权进一步抑制噪声，进而完成信号降噪处理；随后，计算降噪后信号的鲁棒差峭积；最终，通过改进的双门限端点检测法从多源振动信号特征函数波形中定位振动事件并测量机械特性时间参量。

1　断路器合闸过程时间参量分析

断路器的机械特性时间参量是评价其动作性能的核心指标之一，常作为评估断路器动作可靠性、诊断机械状态以及验证设计合理性的关键依据[15]。这些参量能够精确地反映断路器操动机构内部零件的协同动作效率与能量传递过程的时序特性。以配CT14型弹簧操动机构的35 kV等级SF6高压断路器为例，典型操动机构的结构图见图1，其合闸动作过程概括如下。

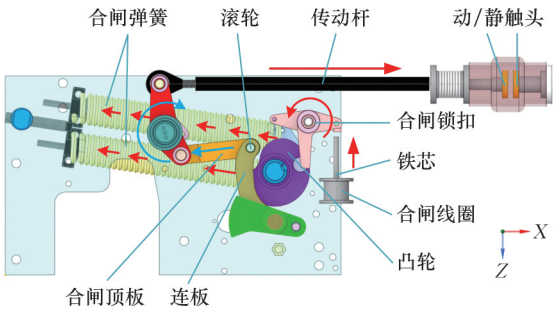


图1　CT14弹簧操动机构结构图

Fig.1　Structural diagram of the CT14 spring operating mechanism

1）0～T_1阶段。合闸线圈通电产生电磁力，当电流达到阈值时，铁芯在电磁力驱动下开始运动，并于T_1时刻撞击合闸锁扣使其解锁。

2）T_1～T_2阶段。合闸锁扣解锁后合闸弹簧开始释放能量，至T_2时刻凸轮在主轴带动下旋转并挤压滚轮，进而驱动传动杆带动动触头开始运动。

3）T_2～T_3阶段。传动杆在合闸弹簧释放能量的驱动下持续运动，至T_3时刻断路器动、静触头达到刚合状态。

4）T_3～T_4阶段。动触头在惯性作用下继续运动，至T_4时刻到达行程最远位置。

5）T_4～T_5阶段。在触头弹簧与缓冲弹簧的耦合作用下，缓冲装置通过阻尼作用吸收部分机械能，以减小运动部件冲击并抑制动触头回弹，动触头从最大行程位置开始回弹，至T_5时刻动触头达到最大回弹位置。

在断路器的动作过程中，其操动机构零件依据预设的运动逻辑进行动作，在此过程中零件间的相互碰撞、转动、摩擦等动作均会激发一系列具有时序的机械振动，这些振动事件相互叠加，最终

构成观测到的整体振动信号。同步采集断路器动作过程中的动触头行程曲线、合闸线圈电流和动触头变位信号，并提取这些信号的波形拐点作为断路器合闸关键机械动作特征时刻的实际基准值（如合闸锁扣解锁、动静触头刚合、动触头到达最大行程和动触头回弹触底等）。振动信号与机械动作时间参量存在一定的对应关系，如图2所示，其中红色虚线代表特征时刻基准线。

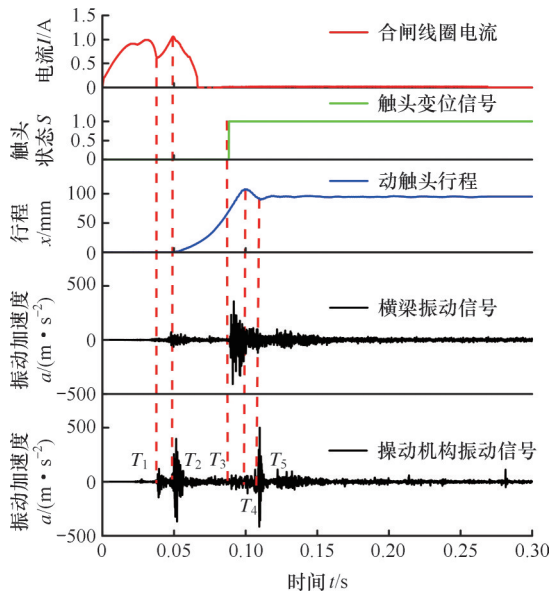


图2 多源信号下断路器合闸特征时刻标定

Fig.2 Calibration of circuit breaker closing characteristic instants under multi-source signals

值得注意的是，对于断路器动作过程中产生的振动信号，其特性会受到振动传递路径复杂性、冲击类型、振源距离及传感器安装位置等多种因素的影响。不同测点所采集的信号在冲击强度与响应时序上存在显著差异。基于安装便利性与靠近振源的原则，本文选取振动响应较为明显的横梁处与操动机构本体处的振动信号进行协同分析。

具体而言，T_3特征时刻对应动、静触头刚合过程，该过程会产生较为明显的振动冲击，其冲击类型主要表现为中高频结构振动。该振动在经由传动杆向外传递的过程中能量衰减显著，因此在操动机构本体测点信号中响应微弱、难以清晰辨识。相比之下，横梁位置邻近该振源，对特征时刻T_3对应的振动冲击响应捕获能力更强、信号特征更为明确。合闸锁扣解锁和凸轮与滚轮碰撞动作分别对应特征时刻T_1和T_2，且直接发生于操动机构内部，属于近场振动；动触头到达最大行程与动触头回弹触底对应特征时刻T_4和T_5，其振动冲击可通过传动杆直接传递至操动机构本体。由此可知，在操动机构处采集的振动信号对上述特征时刻对应的振动冲击响应更为敏感，响应波形更为完整清晰。本研究在横梁及操动机构本体处等典型位置布置传感器，同步采集合闸过程中的振动信号，振动信号时域波形与实际断路器机械特性时间参量对比如图3所示，其中红色虚线代表特

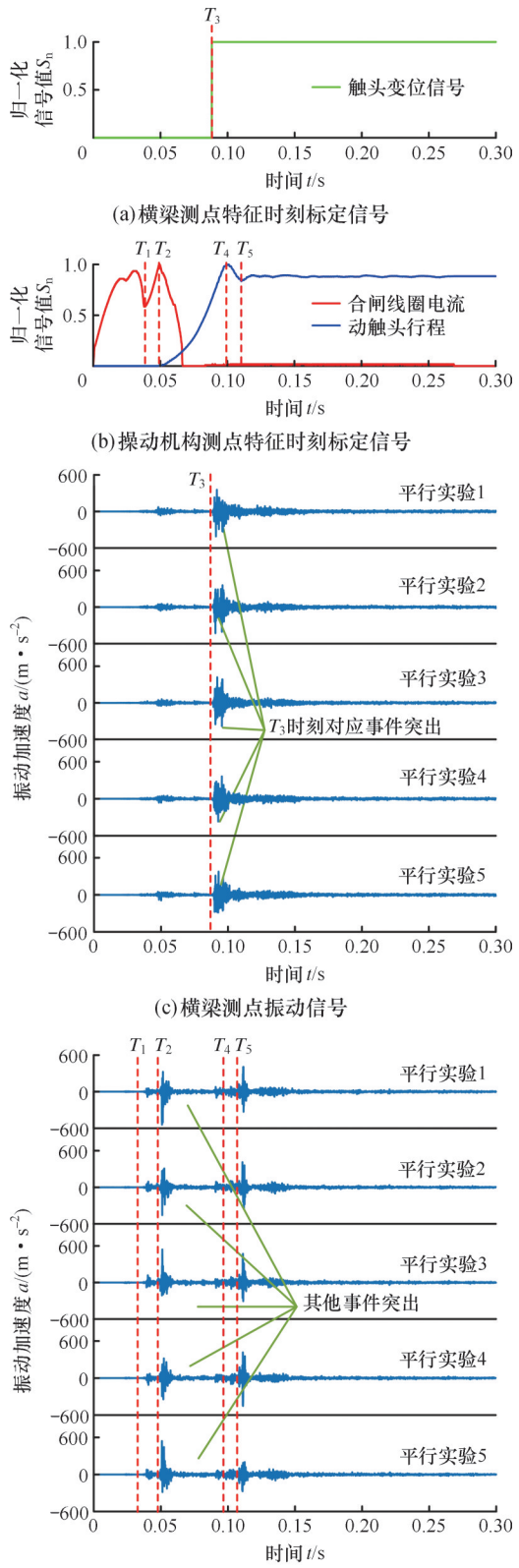


图3 横梁/操动机构振动信号冲击响应对比

Fig.3 Comparison of vibration impact responses at the crossbeam and operating mechanism

征时刻基准线。

从图3中可以看出，实验数据与理论预期一致：不同测点对各特征时刻对应的振动冲击响应具有较为明显的区分度。横梁振动信号对T_3特征时刻对应的动、静触头刚合振动冲击响应最为明显，而操动机构振动信号则对特征时刻T_1、T_2、T_4和T_5对应的振动冲击响应更为强烈，它们分别对应合闸锁扣解锁、凸轮与滚轮碰撞、动触头到达最大行程和动触头达到最大回弹位置。由此可知，采用横梁与操动机构振动信号的联合分析策略，是实现断路器合闸过程振动事件完整提取的一种合理且高效的方法，这也是本文研究的重点内容。

2　振动信号降噪

2.1　VMD算法基本原理

变分模态分解（VMD）是一种基于变分框架的自适应且非递归的信号分解方法，可将复杂信号自适应地分解为若干带宽受限且彼此分离的本征模态函数（intrinsic mode function，IMF）[16-17]。VMD的主要原理如下。

1）构造变分问题。以最小化各IMF分量频谱带宽之和为目标，以各IMF分量的线性叠加之和等于原始信号为约束条件，将信号分解问题转化为约束变分优化问题，其表达式如下：

$$\left.\begin{aligned}&\min_{\{u_k\},\{\omega_k\}}\left(\sum_{k=1}^{K}\left\|\partial_t\left(\left(\delta(t)+\frac{\mathrm{j}}{\pi t}\right)*u_k(t)\right)\exp(-\mathrm{j}\omega_k t)\right\|_2^2\right)\\&\text{s.t.}\ \sum_{k=1}^{K}u_k(t)=f(t)\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

式中：K为预设的分解模态数，即VMD分解得到的IMF分量个数；$f(t)$表示原始信号；ω_k为第k个IMF分量的中心角频率；$\delta(t)$表示狄拉克函数；“*”表示卷积运算；$\partial_t(\cdot)$表示对括号内函数关于时间t求偏导；$u_k(t)$表示第k个IMF分量，即第k个本征模态函数；j为虚数单位。

2）求解变分问题。引入拉格朗日乘子和二次惩罚因子，将约束变分问题转化为无约束的增广拉格朗日形式，其表达式如下：

$$\begin{aligned}L(\{u_k\},\{\omega_k\},\lambda)=&\\\alpha\sum_{k=1}^{K}\left(\left\|\partial_t\left(\left(\delta(t)+\frac{\mathrm{j}}{\pi t}\right)*u_k(t)\right)\exp(-\mathrm{j}\omega_k t)\right\|_2^2+\right.&\\\left.\left\|f(t)-\sum_{k=1}^{K}u_k(t)\right\|_2^2+\left\langle\lambda(t),f(t)-\sum_{k=1}^{K}u_k(t)\right\rangle\right)&\end{aligned}\tag{2}$$

式中：λ为拉格朗日乘子；α为二次惩罚因子；$\langle\cdot,\cdot\rangle$表示内积运算。

随后通过交替方向乘子法和梯度下降算法进行迭代求解，逐步逼近变分模型最优解。需要指出的是，VMD方法的分解性能高度依赖于其参数分解模态数K和二次惩罚因子α，若参数选择不当则会导致模态混叠、过分解或欠分解等问题，从而影响后续特征提取的准确性。传统的人为经验试凑或网格搜索等方法不仅效率低下，且难以在复杂的非线性系统中找到全局最优参数组合。为自适应地精准优化VMD参数，本文提出了一种改进的鱼鹰优化算法（IOOA），通过引入停滞扰动和自适应收敛因子以平衡全局探索与局部开发能力，可以避免陷入局部最优陷阱并提高寻优精度。

2.2　改进鱼鹰优化算法基本原理

鱼鹰优化算法（OOA）是一种模拟自然界鱼鹰狩猎行为的群体智能优化算法，目的是在高维、非线性、复杂优化问题中寻求全局最优解，OOA结合了生物行为建模、动态更新机制和全局局部搜索平衡机制，具有收敛速度快、全局搜索能力强、参数简单等特点[18-19]，但存在可行域约束和扰动范围固定的缺陷，有早熟收敛风险。本文对OOA进行改进，通过拉丁超立方采样（Latin hypercube sampling，LHS）初始化种群分布，并对参与寻优的种群个体预先进行有效性筛选，以减少早期搜索盲区；同时，引入停滞检测与大范围扰动机制，使扰动步长随迭代轮次动态收缩，以避免陷入局部最优解，从而可提高收敛稳定性。利用IOOA对VMD参数组合进行自适应寻优，主要包括如下5个阶段。

1）种群初始化阶段。利用LHS对分解模态数K和二次惩罚因子α两个参数维度进行采样。设种群个数为N，将每个参数维度等分为N个子区间，并在每个子区间内随机抽取一个采样点；随后对不同维度的采样点进行随机排列组合，形成覆盖整个参数空间的LHS采样矩阵$\boldsymbol{H}=[h_{ij}]_{N\times 2}$，避免了传统随机采样的偏倚缺陷，计算表达式为

$$h_{ij}=\frac{\pi_j(i)-1+r_{ij}}{N}\tag{3}$$

式中：h_{ij}为第i个个体在第j个参数维度上的归一化采样值，$i=1,2,\cdots,N$，$j=1,2$，其中第1维对应分解模态数K，第2维对应二次惩罚因子α；$\pi_j(i)$为第i个个体在第j个参数维度上的子区间编号；r_{ij}为(0,1)上的均匀随机数。

在参数空间中，依据h_{ij}将第i个种群个体映射为一组VMD参数组合(K_i,α_i)，其计算表达式为

$$\left.\begin{aligned}K_i&=round(K_{\min}+h_{i1}(K_{\max}-K_{\min}))\\\alpha_i&=\alpha_{\min}+h_{i2}(\alpha_{\max}-\alpha_{\min})\end{aligned}\right\}\tag{4}$$

式中：K_i、α_i分别为第i个个体的分解模态数和二次惩罚因子；$K_{\max}$、$K_{\min}$分别为分解模态数的上下限，$\alpha_{\max}$、$\alpha_{\min}$分别为二次惩罚因子的上下限；$round(\cdot)$表示四舍五入取整函数。

2）猎物搜寻阶段。对初代种群设置约束指标筛选有效个体，利用有效个体补齐机制形成满足种群个体数量的初始解集；然后对有效个体执行VMD分解，将最大互相关与谱峭度积分的乘

积作为适应度函数，将个体分解后各IMF的适应度函数值之和作为该个体适应度值，以衡量该个体在解空间中的优劣。

3)捕食阶段。通过每个个体的适应度值对种群进行筛选，保留适应度值较优的前3个体作为精英个体，对精英个体执行轻微扰动，对非精英个体的70%围绕当前最优解进行自适应动态扰动，以实现K和α随迭代次数的自适应动态更新，扰动公式和个体位置更新公式如下：

$$\Delta K_i = \max\left(1, round\left(3\left(1-\frac{q}{q_{\max}}\right)\right)\right) \tag{5}$$

$$\Delta \alpha_i = 0.03 + 0.1\left(1-\frac{q}{q_{\max}}\right) \tag{6}$$

$$K_i^{\text{new}} = round\left(K_i + r\left(K_{\text{best}} - K_i\right)\right) + \rho_i \tag{7}$$

$$\alpha_i^{\text{new}} = \alpha_i + r\left(\alpha_{\text{best}} - \alpha_i\right) + \eta_i \tag{8}$$

式中：ΔK_i为第i个个体在分解模态数K方向上的整数扰动步长；$\Delta\alpha_i$为第i个个体在二次惩罚因子α方向上的扰动幅值；q为当前迭代次数；$q_{\max}$为最大迭代次数；r为[0，0.7]内的随机因子；K_{best}、α_{best}分别为当前全局最优分解模态数和二次惩罚因子；ρ_i为整数随机扰动量，在整数集合$\{-\Delta K_i, \Delta K_i\}$中均匀取值；$\eta_i$为连续随机扰动量，在区间$(-\Delta\alpha_i, \Delta\alpha_i)$内均匀取值；$K_i^{\text{new}}$、$\alpha_i^{\text{new}}$分别为更新后的分解模态数和二次惩罚因子。

对剩余30%的非精英个体执行常规随机扰动，以保证种群多样性。将扰动后的个体作为下一轮迭代候选解，对猎物(全局最优解)进行俯冲式搜索，以强化局部收敛能力。

4)停滞扰动阶段。若连续3轮最优解未发生明显变化，为防止陷入局部最优，则强制执行停滞扰动，对非精英个体进行大幅扰动，以增强种群多样性，使得寻优结果更为合理。

5)输出结果。当满足收敛准则或达到最大迭代次数后，算法输出最优参数组合及对应的分解结果，从而实现VMD参数组合的高效寻优。各阶段交替进行、紧密衔接，形成从粗略探索到精细搜索的寻优闭环。

2.3 掩模加权二次降噪

尽管VMD能将原始振动信号自适应分解为一系列模态分量，然而部分模态中仍会不可避免地掺杂高频噪声，这会影响后续时间参量提取的准确性。为此，本文引入基于事件感知的掩模加权方法，对有效IMF融合后的信号进行二次降噪处理，在增强冲击成分的同时抑制噪声干扰[20]。关键步骤如下：①对易混淆的干扰事件窗口采用带平顶的余弦渐变陷波技术以实现有效振动事件信号的平滑进入与退出，从而降低边界不连续导致的振动事件偏移；②有效振动事件窗口采用升余弦局部增益进行振动特征局部强化，利用平滑包络在不引入突变的前提下增强瞬态成分。

具体执行时，首先利用优化得到的VMD参数组合对原始振动信号进行分解，随后依据最大互相关与波形匹配方差的乘积值将分解后的IMF划分为有效信号主导分量或噪声主导分量，通过对有效信号主导分量进行融合，然后执行掩模加权处理，最终完成振动信号去噪，整体流程如图4所示。

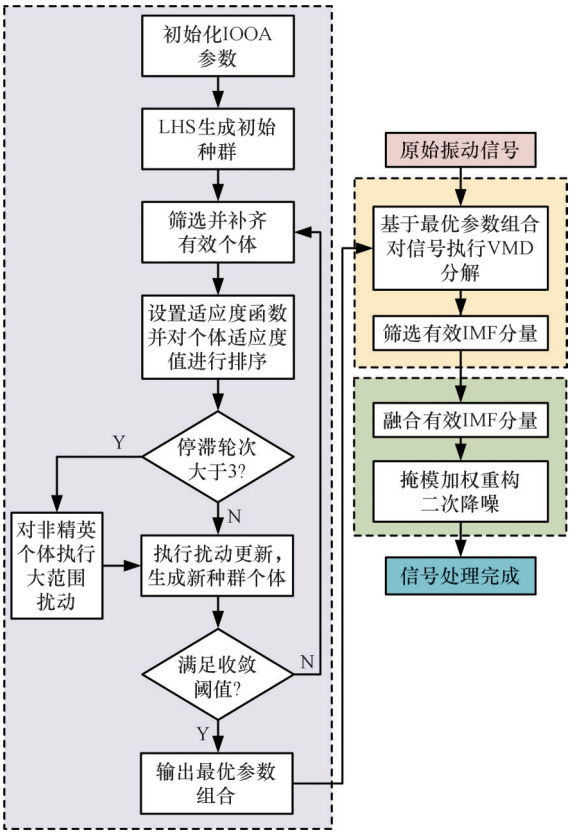


图4 IOOA-VMD参数寻优及振动信号降噪流程

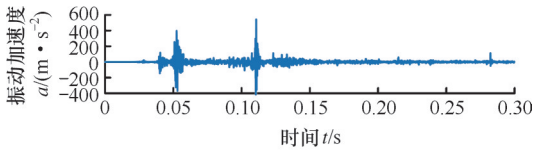
Fig.4 Flowchart of IOOA-VMD parameter optimization and vibration signal denoising

3 断路器机械特性时间参量测量方法

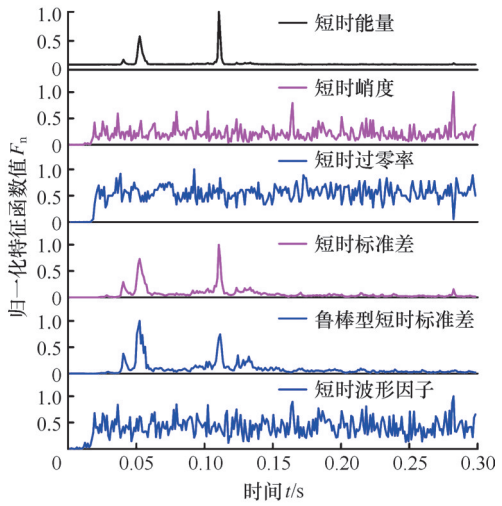
高压断路器在分合闸过程中产生的机械振动信号具有典型的瞬态、非平稳特性，其波形由一系列表征特定机械振动事件的冲击成分构成。准确定位这些振动事件，对获取断路器的机械特性时间参量、评估其操动机构状态至关重要。

针对此类非平稳信号中瞬态事件的定位需求，本文采用基于滑动窗口的短时分析方法，通过对信号分帧处理将其视为短时平稳信号，进而逐帧提取可有效表征突变行为的特征时间参量。断路器振动信号通常包含多个宽频瞬态冲击，且存在脉冲干扰和宽频噪声，传统特征参数在此类复杂工况下的区分能力往往不足。为提高振动事件检测的鲁棒性与敏感性，本文系统考察了多种时

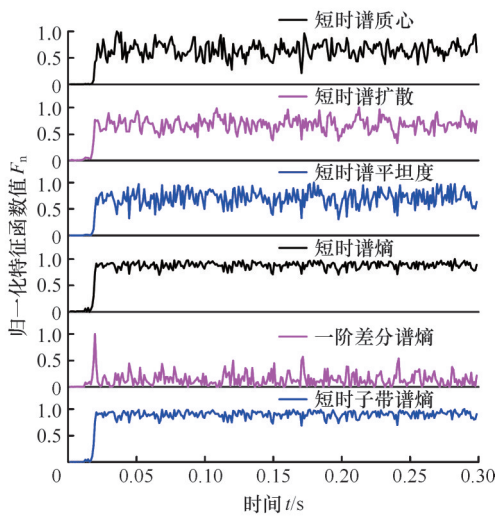
域和频域特征函数对振动信号的表征效果，如图5所示。通过对比发现，时域特征在区分振动与非振动事件方面表现较好，如图5b所示；而频域特征函数由于振动信号本身机械冲击的宽频特性及噪声在频带上的重叠，导致表征效果相对模糊，如图5c所示。



(a)操动机构信号



(b)不同时域特征函数信号表征



(c)不同频域特征函数信号表征

图5　时域特征函数和频域特征函数的表征效果对比

Fig.5　Comparison of the characterization effects of time-domain characteristic functions and frequency-domain characteristic functions

基于上述分析，本文将能够表征信号短时波动程度的短时标准差与对瞬态冲击响应敏感的短时峭度相结合，初步构建新的复合特征函数——短时差峭积。其中，短时标准差用于描述振动信号在局部时间窗内的幅值离散程度，短时峭度用于表征瞬态冲击成分引起的尖峰突变特征。对短时标准差和短时峭度进行归一化处理以消除量纲影响，随后将二者相乘从而增强对振动冲击响应的表征能力。设振动信号为$x(n)$，为减少频谱泄漏并平衡主瓣宽度与旁瓣衰减，采用汉明窗函数对信号进行加窗分帧处理，设x_i表示第i帧信号，$x_i(l)$表示第i帧信号中第l个采样点值，$l=1,2,\cdots,L$，其中L为每帧采样点数。将帧长设置为3 ms、帧移设置为1 ms。x_i的短时标准差计算公式如下：

$$\sigma_i=\sqrt{\frac{\sum_{l=1}^{L}(x_i(l)-\bar{x}_i)^2}{L-1}} \tag{9}$$

式中：$\bar{x}_i$为第i帧信号的均值。

x_i的短时峭度计算公式如下：

$$Kurt_i=\frac{\frac{1}{L}\sum_{l=1}^{L}(x_i(l)-\bar{x}_i)^4}{\left(\frac{1}{L}\sum_{l=1}^{L}(x_i(l)-\bar{x}_i)^2\right)^2} \tag{10}$$

常规标准差对异常值过于敏感，会影响突变点的识别精度。为抑制由于脉冲干扰等非平稳噪声引起的统计特征波动，引入鲁棒型短时标准差，用中位数绝对值偏差替代均值、绝对偏差代替平方差以提高抗干扰能力。第i帧信号x_i的鲁棒型短时标准差估计量计算公式如下：

$$\sigma_{r,i}=median(|x_i(l)-median(x_i)|)\quad l=1,2,\cdots,L \tag{11}$$

式中：$median(x_i)$表示第i帧信号的中位数，该指标可以降低噪声影响，能更为稳定地刻画信号的真实波动水平。

最终，将鲁棒型短时标准差估计量$\sigma_{r,i}$与短时峭度$Kurt_i$相结合进而构造短时鲁棒差峭积（以下简称“鲁棒差峭积”），其计算公式如下：

$$F_i=\sigma_{r,i}\cdot Kurt_i \tag{12}$$

式中：F_i为第i帧信号的鲁棒差峭积。

常规差峭积与鲁棒差峭积的对比如图6和图7所示。可以看出，利用常规差峭积表征振动信号时，其短时标准差项对瞬时异常值较为敏感，容易在背景段形成异常尖峰，从而会降低振动冲击响应定位的准确性并增加误判风险。本文采用鲁棒型短时标准差估计量替代常规短时标准差，利用中位数绝对偏差降低异常采样点对局部波动特征的影响，使特征函数波形过渡更加平滑，有效抑制了背景段突发噪声干扰，从而提高了振动冲击响应定位的稳定性和时间参量提取精度。

此外，为实现振动信号中冲击事件的精确测量，需采用有效的端点检测策略。振动事件与非振动事件的区分类似于语音信号中的静音区间和

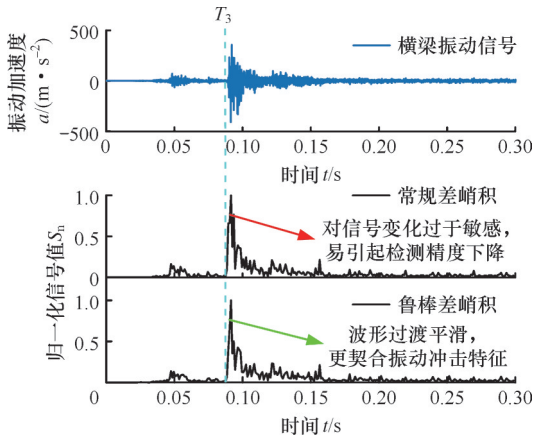


图6 横梁振动信号表征效果对比

Fig.6 Comparison of characterization effects of crossbeam vibration signals

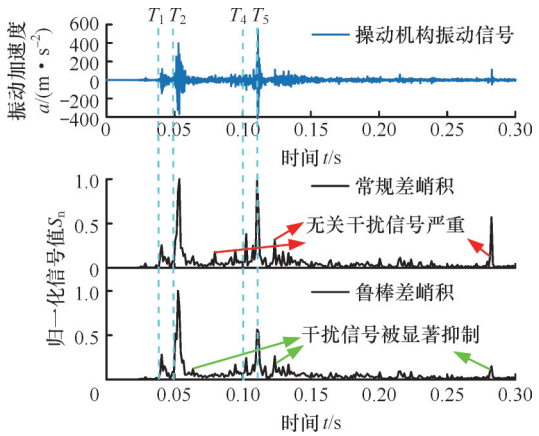


图7 操动机构振动信号表征效果对比

Fig.7 Comparison of characterization effects of vibration signals of operating mechanisms

发音区间，语音信号中的经典方法是通过短时能量和短时过零率联合双门限法定位发音区间，但伴随信噪比的减小，检测效果逐渐变差甚至失效，且在其他领域中的适用性不强。单特征参数双门限端点检测法在振动信号检测领域中的适用性较强，通过设置高、低两个阈值来实现冲击事件的判定：依据特征函数设置高、低门限阈值，当特征函数超过低门限阈值时，可能处于有效振动信号，若在接下来的几帧内超过高门限阈值，则将高门限阈值相交点判定为振动冲击事件的起始点，系统进入事件状态；随后寻找起始点之后特征函数与低门限阈值的交点确定事件结束点，从而完成一次有效振动信号的判定。单参数双门限端点检测的精度严重依赖于阈值的设定，且在实际应用中不同运行状态下振动信号的特征函数分布往往存在显著差异，导致固定阈值的双门限端点检测方法的适应性和鲁棒性不足，难以适应复杂工况下的精确检测需求。

针对该问题，本文从振动冲击信号的物理特性出发，发现特征函数的波形与振动冲击信号具有同步突增的特点。基于这一现象，提出一种改进的双门限冲击检测策略：在常规设置阈值基础上，通过事件状态机进行前置判断，未处于振动事件期间时事件状态机置0，搜寻特征函数波形与高阈值相交点前的最近波谷或差分变化率大于0.01的点作为冲击事件起点，此时事件状态机置1，继续寻找低阈值相交点之后的最近波谷作为该次振动事件的结束点，从而完成振动事件时间参量的测量。该策略更贴合振动冲击发生的物理过程，有助于提高事件定位的准确性和鲁棒性。

4 实验验证与结果分析

4.1 实验采集合闸振动信号

本文以配CT14型弹簧操动机构35 kV电压等级的SF6高压断路器为实验对象开展验证研究。选用量程为5000 m/s^{2}的DH131E型压电式加速度传感器采集振动信号。根据多次实验结果，当加速度传感器分别安装在横梁处和操动机构外壳处时采集到的振动信号对振动冲击的表征比较清晰，两处传感器的安装位置分别如图8和图9所示。

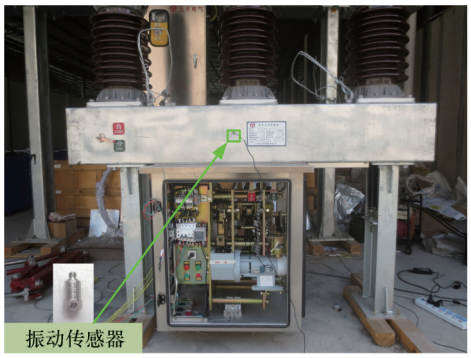


图8 振动传感器安装于横梁处示意图

Fig.8 Schematic diagram of vibration sensor installed at the crossbeam

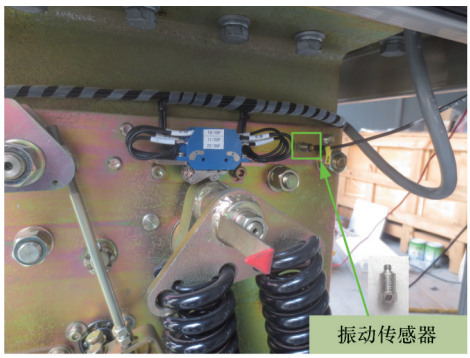


图9 振动传感器安装于操动机构外壳处示意图

Fig.9 Schematic diagram of vibration sensor installed on the housing of the operating mechanism

为便于多信号对照和时间参量标定，信号采集过程中同时采用汉迪电子高压开关特性测试仪和角速度传感器以同步采集合闸过程中的动触头变位信号和行程曲线。本实验所用的LW42A-40.5型SF6断路器技术规定指出该断路器合闸时间为80±15 ms，考虑到动静触头闭合后续的最大行程限位和反弹触底过程，将采集信号时长设置为300 ms，以确保完整捕获合闸过程中的有效振动事件。对于采样频率，断路器合闸过程中包含的弹簧释放、触头撞击等瞬态冲击分量频率分布在1～5 kHz，伴随的环境噪声和脉冲干扰也均为宽频分布。根据信号采样定理，采样频率通常要大于信号中最高有效频率分量的2倍，若采样频率偏低，则会导致冲击信号的高频细节部分丢失，振动冲击特征被削弱，故将信号采样频率设置为10 kHz。

4.2　振动信号降噪

利用IOOA对用于振动信号处理的VMD参数组合进行寻优。设定分解模态数K的范围为[3,8]，其中K为整数；二次惩罚因子α范围为[400,2500]，种群规模为20，最大迭代次数为10；将最大互相关与谱峭度积分的乘积作为适应度函数，最终获得分解模态数和二次惩罚因子的最优参数组合为(7,1440.7)。然后利用该最优参数组合对振动信号执行VMD分解，具体结果如图10和图11所示。

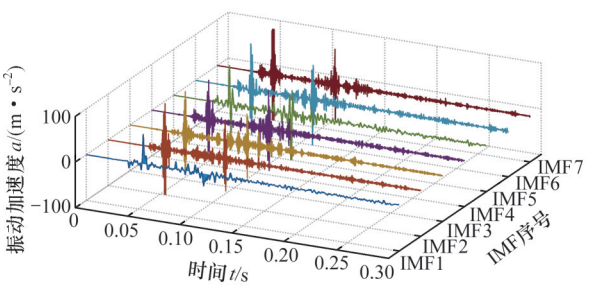


图10　最优参数组合下的IMF分量时域分布

Fig.10　Time-domain distribution of IMF component under optimal parameter combination

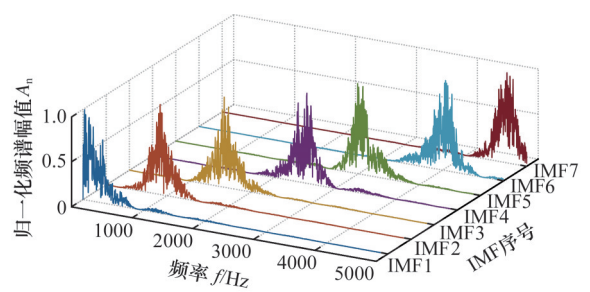


图11　最优参数组合下的IMF分量频谱分布

Fig.11　Spectrum distribution of IMF component under optimal parameter combination

分析图10和图11中信号分解后的IMF分量时域图和对应频谱可见，各个IMF分量之间的模态混叠程度较低、频带分离明显，验证了本文方法在断路器振动信号分解中具有良好的性能。

基于最大互相关与波形匹配方差的乘积对IMF分量进行有效性筛选，如图12所示，可以看出，IMF4、IMF6、IMF7与原始信号的相关性最强，被选定作为有效信号主导分量。

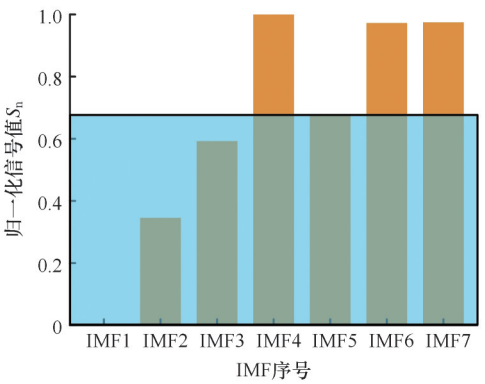


图12　有效信号分量筛选

Fig.12　Effective signal component screening

为进一步提高信号质量、抑制噪声干扰，本文采用掩模加权重构对有效IMF融合信号进行二次降噪。其中振动信号事件窗口采用升余弦进行强化增益，非事件窗口采用余弦陷波进行削弱，然后重构得到最终的降噪信号。将降噪前后信号在时域上的变化和鲁棒差峭积特征函数波形进行对比，如图13和图14所示。

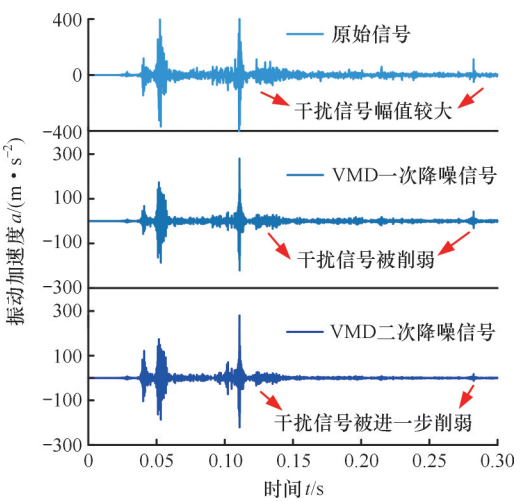


图13　振动信号降噪前后时域波形对比

Fig.13　Comparison of the time-domain waveforms of vibration signals before and after noise reduction

分析图13可知，对振动信号进行有效IMF融合一次降噪后干扰信号被削弱，微弱振动事件冲击信号得到初步加强，在进行掩模加权重构二次降噪后干扰信号几乎完全被压制，有效振动事件

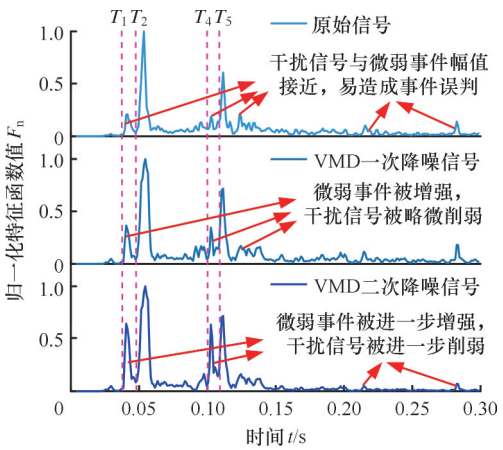


图14 振动信号降噪前后特征函数波形对比

Fig.14 Comparison of characteristic function waveforms of vibration signals before and after noise reduction

信号进一步得到了强化。

分析图14可知，原始信号经过VMD一次和VMD二次降噪后背景干扰成分逐步减弱，特征时刻 T_1～T_5对应的振动冲击响应逐渐增强；鲁棒差峭积特征函数中有效冲击响应峰值与非事件区背景波动之间的区分度明显提高，有利于冲击事件的精准定位。

4.3 断路器合闸过程时间参量测量

进一步采用双门限端点检测法定位振动冲击响应区间，并提取其对应的关键机械动作特征时刻，传统双门限端点检测法与本文提出的改进双门限端点检测方法所提取的关键时间参量对比如图15和图16所示。

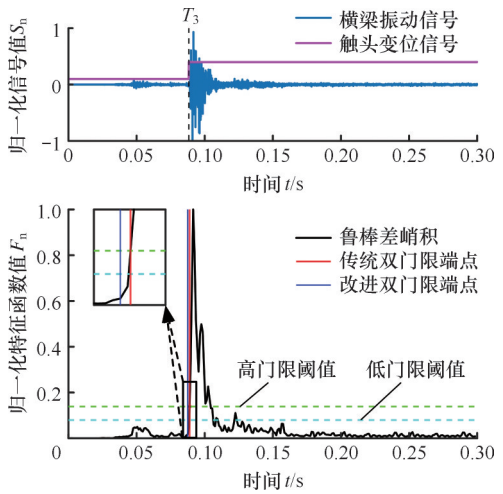


图15 横梁振动信号的两种方法测量效果对比

Fig.15 Comparison of the measurement effects of beam vibration signals by two methods

针对不同位置振动信号的特征响应差异，依据鲁棒差峭积特征函数对振动冲击响应的表征效果制定了差异化提取策略：横梁处振动信号主要

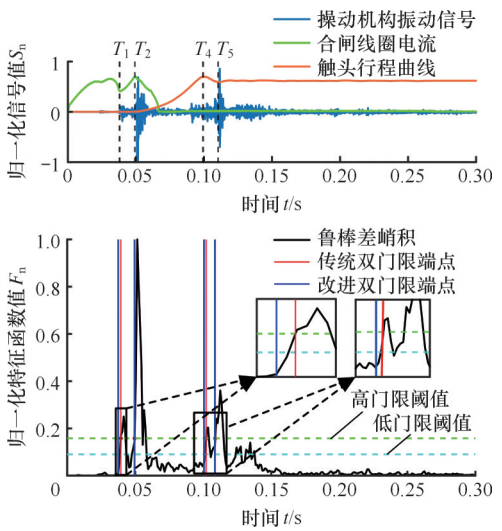


图16 操动机构振动信号的两种方法测量效果对比

Fig.16 Comparison of the measurement effects of vibration signals of operating mechanisms by two methods

用于提取动、静触头刚合对应的特征时刻 T_3，操动机构外壳处振动信号则用于提取特征时刻 T_1、T_2、T_4和 T_5。通过对比从合闸线圈电流信号、动触头的行程曲线和变位信号中所获得的实际值可知，两种双门限端点检测方法均可实现振动冲击响应区间的定位，但改进方法所得到的时间参量更为精确。

为精确量化传统双门限端点检测方法与改进双门限端点检测方法在时间参量提取精度上的差异，表1中给出了两种方法提取结果的误差对比。结果表明，本文所提改进双门限端点检测方法提取的特征时刻 T_1～T_5与实际值之间的相对误差在0.61%～2.63%之间，满足实际工程应用的精度需求。

表1 两种双门限端点检测方法的提取结果对比

Tab.1 Comparison of extraction results between two dual-threshold endpoint detection methods

时间参量	实际值/ms	传统双门限法		改进双门限法	
		提取时刻/ms	相对误差/%	提取时刻/ms	相对误差/%
T_1	38.0	40.5	3.95	38.5	1.32
T_2	49.2	50.5	2.64	49.5	0.61
T_3	88.3	90.5	2.49	87.5	0.91
T_4	99.3	102.5	3.22	100.5	1.21
T_5	110.4	109.5	0.82	107.5	2.63
误检事件个数		0		0	
漏检事件个数		0		0	

为进一步验证本文所提鲁棒差峭积特征函数在时间参量提取方面的优越性，选取了多种适用于非平稳信号分析的经典特征函数作为对比，包括短时加权能峭积、短时能熵比、短时差零积，这

些特征函数在信号处理领域具有代表性，能够从能量、频率、分布特性等不同角度表征冲击事件。各特征函数均结合改进双门限法对振动事件进行定位，如图17和图18所示。各特征函数的相对误差见表2。

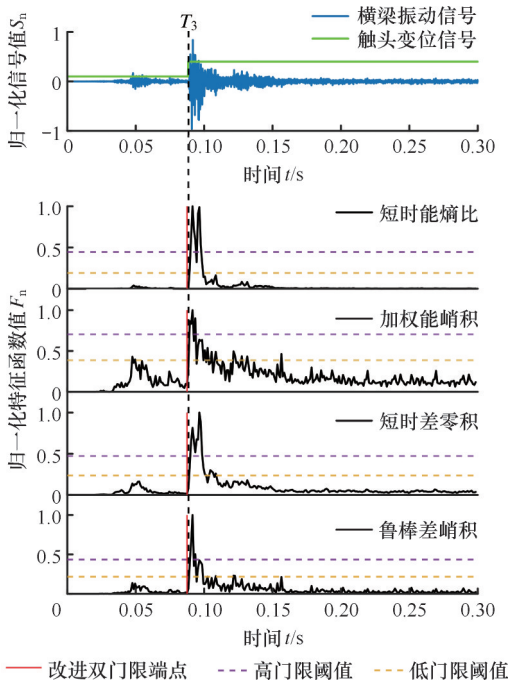


图17　横梁振动信号不同特征函数提取效果对比

Fig.17　Comparison of the extraction effects of different characteristic functions of crossbeam vibration signals

由图17和表2可以看出，横梁振动信号中特征时刻T_3对应的动、触静头刚合接触产生的振动冲击响应较为明显，各种特征函数均能准确地提取特征时刻T_3。

分析图18和表2可得，加权能峭积通过对峭度和短时对数能量施加不同权重，在一定程度上改善了提取性能，但受特征函数自身局限性限制，导致特征时刻提取精度较差且存在事件误检，最大误差达9.21%；短时能熵比和短时差零积特征函数在对操动机构处信号进行振动事件测量时，特征时刻T_4对应的微弱振动冲击响应易丢失，存在事件漏检问题，且测量精度仍存在不足，最大误差达6.58%。综合来看，本文提出的鲁棒差峭积特征函数可在不影响断路器内部结构排布和正常运行的情况下准确、完整地提取出断路器合闸过程中的关键机械动作特征时刻，最大误差仅为2.63%。

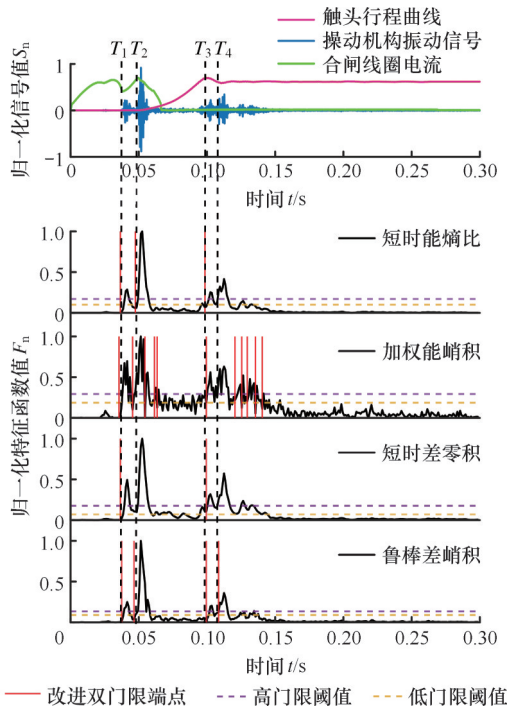


图18　操动机构信号不同特征函数提取效果对比

Fig.18　Comparison of the extraction effects of different characteristic functions of signals in operating mechanisms

表2　本文特征函数与其他特征函数的提取精度对比

Tab.2　Comparison of extraction accuracy between the proposed feature function and other feature functions

时间参量	实际值/ms	加权能峭积		短时能熵比		短时差零积		鲁棒差峭积	
		提取值/ms	相对误差/%	提取值/ms	相对误差/%	提取值/ms	相对误差/%	提取值/ms	相对误差/%
T_1	38.0	34.5	9.21	37.5	1.32	35.5	6.58	38.5	1.32
T_2	49.2	47.5	3.46	47.5	3.46	47.5	3.46	49.5	0.61
T_3	88.3	87.5	0.91	87.5	0.91	87.5	0.91	87.5	1.69
T_4	99.3	100.5	1.21					100.5	1.21
T_5	110.4	103.5	6.25	106.5	3.53	106.5	3.53	107.5	2.63
误检事件个数		1		0		0		0	
漏检事件个数		0		1		1		0	

4.4　时间参量测量方法鲁棒性验证

随着断路器运行时间的累积与开断次数的增加，常会出现合闸弹簧疲劳、传动机构变形及缓冲性能下降等典型故障，这些缺陷会直接影响操动机构动作的一致性，并导致振动信号发生波形畸变与时序偏移。为验证本文所提方法的鲁棒性，采集了4种状态下断路器合闸过程中的振动信号，进而利用本文所提方法测量故障状态下的断路器机械特性时间参量，测量结果如表3所示。

分析表3可得，本文所提时间参量测量方法

表3 不同工况下断路器机械特性时间参量提取结果

Tab.3 Extraction results of mechanical characteristic time parameters of the circuit breaker under different operating conditions

断路器工况	时间参量	时间参量提取结果		
		实际值/ms	提取值/ms	相对误差/%
正常	T_1	38.0	37.5	1.32
	T_2	49.2	49.5	0.61
	T_3	88.3	87.5	0.91
	T_4	99.3	100.5	1.21
	T_5	110.4	108.5	1.72
合闸弹簧疲劳	T_1	37.4	37.5	0.27
	T_2	50.6	50.5	0.20
	T_3	91.0	91.5	0.55
	T_4	104.7	101.5	3.06
	T_5	115.8	112.5	2.85
传动机构变形	T_1	38.1	38.5	1.05
	T_2	47.5	47.5	0
	T_3	80.8	81.5	0.87
	T_4	93.7	95.5	1.92
	T_5	104.5	103.5	0.96
缓冲性能下降	T_1	38.3	38.5	0.52
	T_2	49.4	47.5	3.85
	T_3	87.1	87.5	0.46
	T_4	100.6	101.5	0.89
	T_5	110.4	107.5	2.63

在断路器不同工况下均能完整、准确地提取关键机械动作特征时刻T_1～T_5。

为进一步验证算法的鲁棒性，针对断路器4种工况分别开展10次平行实验，采用本文方法进行时间参量测量，相对误差分布如图19所示。

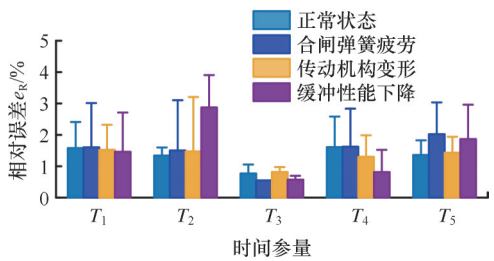


图19 四种工况下时间参量相对误差分布

Fig.19 Relative error distribution of time parameters under four working conditions

由图19可得，本文所提方法在断路器4种工况下均能稳定测量关键时间参量，且相对误差控制在5%以内，满足工程实用要求，进一步验证了本文所提方法在断路器机械特性监测方面的实用价值与鲁棒性。

5 结论

针对断路器机械特性时间参量在线测量问题，本文在分析断路器合闸过程的基础上提出了一种基于多源振动信号的断路器机械特性时间参量测量方法，为断路器机械状态检测提供了新思路。通过理论分析与实验验证，得出以下结论：

1)断路器的振动信号中蕴含其机械结构的动作信息，通过增强振动信号中的冲击特征，能够有效凸显关键机械结构动作发生的时间信息。

2)利用改进的鱼鹰优化算法(IOOA)对变分模态分解(VMD)关键参数进行寻优，并结合掩模加权二次降噪处理，显著抑制了振动信号中的杂波干扰，提高了信号质量。

3)所设计的鲁棒差峭积特征函数能够有效增强冲击响应特征，结合改进的双门限端点检测方法可实现振动冲击响应区间的准确定位，并提取关键机械动作特征时刻，实现机械特性时间参量测量，最大相对误差仅为2.63%。在不同工况下开展多次验证，相对误差控制在5%以内，表现出了良好的工程适用性。

后续将持续开展改进算法研究，进一步提高本文所提时间参量测量方法在多工况下的适应性与稳定性，推动该方法在断路器智能运维中的实际应用。

参考文献：

[1] 刘晓明，田俊，贾冠龙，等. 具有耦合电感的限流型混合直流断路器拓扑设计与分析[J]. 中国电机工程学报，2023，43(22)：8885-8897.
LIU Xiaoming，TIAN Jun，JIA Guanlong，et al. Topology Design and Analysis of Current-limiting Hybrid DC Circuit Breaker with Coupling Inductor[J]. Proceedings of the CSEE，2023，43(22)：8885-8897.

[2] 徐文佳，郑彬，项祖涛，等. 特高压断路器开断大容量高抗时的电磁暂态特性[J]. 电网技术，2021，45(6)：2465-2471.
XU Wenjia，ZHENG Bin，XIANG Zutao，et al. Electromagnetic Characteristics of UHV AC Circuit Breakers Switching High Voltage Shunt Reactor with Large Capacity[J]. Power System Technology，2021，45(6)：2465-2471.

[3] 陈文华，张文，潘骏，等. 小型断路器操作机构的动作可靠性分析[J]. 中国机械工程，2015，26(21)：2918-2922.
CHEN Wenhua，ZHANG Wen，PAN Jun，et al. Action Reliability Analysis of Operating Mechanism in Miniature Circuit Breaker[J]. China Mechanical Engineering，2015，26(21)：2918-2922.

[4] 王永兴，张一帆，倪辉，等. 基于现场运行数据和L-M神经网络算法的滤波器场断路器合闸动作时间预测方法[J]. 高电压技术，2025，51(11)：5481-5491.
WANG Yongxing，ZHANG Yifan，NI Hui，et al. Prediction Method of Closing Action Time of Filter Field Circuit Breaker Based on Field Operation Data and L-M Neural Network Algorithm[J]. High Voltage Engineering，2025，51(11)：5481-5491.

[5] 王顺亮，李明，辛清明，等. 具备快速重合闸能力的低损耗低成本双向固态式直流断路器[J]. 电力系统保护与控制，2025，53(12)：128-138.

WANG Shunliang, LI Ming, XIN Qingming, et al. A Low-cost Bidirectional Solid-state DC Circuit Breaker with Low Power Loss and Fast-reclosing Capability[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(12): 128-138.

[6] 唐政，严英杰，姚聪伟，等. 基于多源信号特征时序联合分析的高压断路器弹簧操动机构故障诊断方法[J]. 高电压技术，2026，52(2)：919-930.
TANG Zheng, YAN Yingjie, YAO Congwei, et al. Fault Diagnosis Method for Spring Operating Mechanism of High-voltage Circuit Breaker Based on Joint Analysis of Multi-source Signal Feature Time Series[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(2): 919-930.

[7] 李建鹏，赵冀宁，孟延辉，等. 高压断路器操动机构非侵入式多信息检测及故障诊断研究[J]. 高压电器，2024，60(7)：128-137.
LI Jianpeng, ZHAO Jining, MENG Yanhui, et al. Research on Non-invasive Multi-information Detection and Fault Diagnosis for Operating Mechanism of High Voltage Circuit Breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 128-137.

[8] WENG L, XIA J, ZHANG Z, et al. Online Measurement Method for Circuit Breaker Mechanical-time Characteristics Based on Transient Voltage and Current Signal Feature Extraction[J]. Energies, 2025, 18(1): 24.

[9] 万书亭，郭胡森，豆龙江，等. 基于电振联合特征的高压断路器多故障诊断[J]. 电子测量技术，2024，47(20)：140-149.
WAN Shuting, GUO Husen, DOU Longjiang, et al. Multi-fault Diagnosis of High-voltage Circuit Breakers Based on Joint Characteristics of Electric Vibration[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(20): 140-149.

[10] 赵书涛，曾瑞，刘会兰，等. 基于振动和电流信号多域特征联合的高压断路器储能状态辨识方法[J]. 电力自动化设备，2023，43(8)：181-187.
ZHAO Shutao, ZENG Rui, LIU Huilan, et al. Energy Storage State Identification Method of High-voltage Circuit Breaker Based on Multi-domain Feature Combination of Vibration and Current Signals[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(8): 181-187.

[11] BETTAHAR T, CHEMSEDDINE R, BENAZZOUZ D. Faults' Diagnosis of Time-varying Rotational Speed Machinery Based on Vibration and Acoustic Signals Features Extraction, and Machine Learning Methods[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2023, 11(5): 2333-2347.

[12] 韦金泉，罗丽燕，王玫，等. 一种基于能零积的改进端点检测算法[J]. 计算机应用与软件，2024，41(7)：215-221.
WEI Jinquan, LUO Liyan, WANG Mei, et al. An Improved Endpoint Detection Algorithm Based on Energy-zero-product[J]. Computer Applications and Software, 2024, 41(7): 215-221.

[13] 何良，丁登伟，李献伟，等. 特高压换流变真空有载分接开关振动及电机电流信号自适应分离方法[J]. 电机与控制学报，2023，27(8)：73-79.
HE Liang, DING Dengwei, LI Xianwei, et al. Adaptive Separation Method of Vibration and Motor Current Signal of Vacuum On-load Tap-changer for Converter Transformer[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(8): 73-79.

[14] 陈文杰，苏振兴，孙先涛，等. 噪声环境下外骨骼设备语音信号的特征提取[J]. 吉林大学学报(工学版)，2024，54(10)：3050-3057.
CHEN Wenjie, SU Zhenxing, SUN Xiantao, et al. Feature Extraction of Speech Signals of Exoskeleton Devices in Noise Environments[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(10): 3050-3057.

[15] 孙曙光，张伟，王景芹，等. 基于动作过程振动检测的低压断路器机械寿命预测[J]. 仪器仪表学报，2020，41(12)：146-157.
SUN Shuguang, ZHANG Wei, WANG Jingqin, et al. Mechanical Life Prediction of Low-voltage Circuit Breaker Based on Vibration Detection during Operation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 146-157.

[16] 任义建，刁延松，吕建达，等. 基于VMD和FCM聚类算法的海上风机支撑结构损伤识别方法[J]. 振动与冲击，2025，44(8)：184-191.
REN Yijian, DIAO Yansong, LYU Jianda, et al. Damage Identification Method of Offshore Wind Turbine Support Structure Based on VMD and FCM Clustering Algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(8): 184-191.

[17] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational Mode Decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.

[18] 罗潇远，刘杰，杨斌，等. 基于改进鱼鹰优化算法与VMD-LSTM的超短期风电功率预测[J]. 太阳能学报，2025，46(3)：652-660.
LUO Xiaoyuan, LIU Jie, YANG Bin, et al. Ultra Short-term Wind Power Prediction Based on Improved Osprey Optimization Algorithm and VMD-LSTM[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(3): 652-660.

[19] 赵锐，卢西旺，岳子翔. 基于OOA-VMD-SVD的结构振动信号降噪研究[J]. 中国测试，2025，51(10)：148-159.
ZHAO Rui, LU Xiwang, YUE Zixiang. Research on Structural Vibration Signal Denoising Based on OOA-VMD-SVD[J]. China Measurement & Testing, 2025, 51(10): 148-159.

[20] 江家麒. 基于掩膜估计的语音增强算法研究[D]. 成都：电子科技大学，2020.
JIANG Jiaqi. A Research on Speech Enhancement Algorithm Based on Mask Estimation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.

（编辑　胡佳慧）

作者简介：姜宁波，男，1999年生，硕士研究生。研究方向为电力设备状态检测。E-mail：15635556028@163.com。陈　磊*（通信作者），男，1993年生，讲师。研究方向为电力设备状态检测。E-mail：lei.chen@sdut.edu.cn。

本文引用格式：
姜宁波，陈磊，牛小波，等. 基于多源振动信号的断路器机械特性时间参量测量方法[J]. 中国机械工程，2026，37(11)：2774-2785.
JIANG Ningbo, CHEN Lei, NIU Xiaobo, et al. Measurement Method for Mechanical Characteristic Time Parameters of Circuit Breakers Based on Multi-source Vibration Signals[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(11): 2774-2785.