DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514038

# 基于子带平均峭度图和 TMSST 的高压直流接触器特性参数测量*

孙曙光[1],王子航[1],王景芹[2],崔玉龙[3],颜豪磊[4]

(1. 河北工业大学人工智能与数据科学学院 天津 300130; 2. 河北工业大学智能配用电装备与系统全国重点实验室 天津 300130; 3. 北京化工大学信息科学与技术学院 北京 100029; 4. 瑞安市万通机电制造有限公司 瑞安 325200)

**摘 要**:针对高压直流接触器动态特性参数的非侵入式测量需求,以及短时分析法在不同型号接触器间的适应性不足和迁移性有限的问题,提出了一种基于子带平均峭度图和时间重分配多同步压缩变换(TMSST)的测量方法。首先,将滑窗分帧与双树复小波包变换(DTCWPT)相结合,对接触器合闸声音信号进行预处理,获取多个小波子带,通过对小波子带进行重排并计算平均峭度,构建子带平均峭度图,并选择峭度值最大的频带作为最优频带以重构信号,提取有效的碰撞冲击成分。随后,采用 TMSST 对重构信号中的碰撞冲击事件进行时频表示和能量压缩,并通过时频包络谱峰值的时频系数来表征冲击特征,精准定位动、静触头碰撞和动铁碰撞冲击时刻,最终测量出接触器吸合时间、超程时间等关键动态特性参数。为验证方法的有效性,搭建了接触器动态特性测试系统,并在多型号接触器、不同传感器布置条件下进行了实验测试。结果表明,所提方法在不同类型高压直流接触器特性参数测量中均表现出较高的测量精度,其平均绝对误差(MAE)与均方根误差(RMSE)均不超过 0.35 ms;与短时分析法相比,平均 MAE 与 RMSE 降低了 39%以上。所提方法对传感器布局的依赖性小,对不同类型接触器的泛化能力强,从而具有较高的工程应用潜力。

**关键词**:高压直流接触器;特性参数;子带平均峭度图;时间重分配多同步压缩变换;声冲击特性

**中图分类号**:TM572.1 TH165.3 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:470.40

# HVDC contactor characteristic parameters measurement based on subband averaging kurtogram and TMSST

Sun Shuguang[1], Wang Zihang[1], Wang Jingqin[2], Cui Yulong[3], Yan Haolei[4]

(*1. School of Artificial Intelligence, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Power Distribution Equipment and System, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 3. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 4. Ruian Wantong Electromechanical Manufacturing Co., Ltd., Ruian 325200, China*)

**Abstract**: Aiming at the demand for non-intrusive measurement of dynamic characteristic parameters in HVDC contactors, as well as the limited adaptability and transferability of short-time analysis methods across different contactor models, a measurement method based on subband averaging kurtogram and time-reassigned multisynchrosqueezing transform (TMSST) is proposed. First, a combination of sliding window framing and dual-tree complex wavelet packet transform (DTCWPT) is applied to preprocess the closing acoustic signal of the contactor. Multiple wavelet subbands are obtained and rearranged, and the average kurtosis is calculated to construct the subband averaging kurtogram. The subband with the highest kurtosis is selected as the optimal frequency band for signal reconstruction, enhancing the effective collision-induced impact components. Subsequently, TMSST is employed for time-frequency representation and energy concentration of the collision impact events. The time-frequency coefficients corresponding to the peaks in the time-frequency envelope spectrum are used to characterize the impact features, enabling precise localization of the impact instants of the movable and stationary contact collision and the armature collision, and accurate measurement of the key dynamic characteristic parameters of the

收稿日期:2025-05-13 Received Date: 2025-05-13

*基金项目:河北省中央引导地方科技发展资金(246Z2101G)项目资助

contactor, such as closing time and overtravel time. To evaluate the effectiveness of the proposed method, a dynamic characteristic testing system is established, and experimental tests are conducted under various contactor models and sensor layouts. Results show that the proposed method achieves high measurement accuracy in characteristic parameter estimation for various types of HVDC contactors, with both mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE) maintained within 0.35 ms. Compared with the short-time analysis methods, the average MAE and RMSE are reduced by over 39%. In addition, it exhibits low dependence on the sensor layout and strong generalization capability across different contactor types, demonstrating considerable potential for engineering applications.

**Keywords**: HVDC contactor; characteristic parameters; subband averaging kurtogram; time-reassigned multisynchrosqueezing transform; acoustic impact characteristics

## 0 引 言

高压直流接触器广泛应用于新能源汽车、储能系统、航空航天、风能和光伏等领域,是直流配电与控制系统中的关键组件[1]。其动态特性参数能有效反映运行状态,精准测量这些参数有助于实现早期故障预警,提升系统可靠性和安全性[2]。传统的直流回路测量方法虽能直接获取这些参数,但难以实现在线监测。相比之下,基于振声等非侵入式测量方法不仅能在接触器正常运行状态下提取其特性参数,还能在高压、大电流环境下兼顾安全性与实时性。

开关电器在动作过程中会产生包含丰富瞬时信息的振声信号,通过识别其中的冲击事件并建立与动态行为的映射关系,可有效提取动态特性参数[3-4]。相关学者在开关电器特性参数提取方面已取得显著进展。万书亭等[5]提出了一种基于振动信号的断路器特性参数提取方法,并采用基于短时能熵比的双门限法,实现了断路器合闸过程中关键振动时刻的检测。王静君等[6]针对低信噪比问题,探讨了短时能量法在断路器机械振动信号中的应用,有效提取了断路器分合闸过程中的振动事件。张伟等[7]通过分析断路器在不同超程状态下的振动信号,采用短时能量法准确判定刚分、刚合时刻,进而精确获取分合闸时间。此外,杜太行等[8]基于声信号敏感成分的峭度特征,实现了声学事件边界的分割与标定,间接测量了交流接触器的动态特性参数。鉴于声学监测相较于振动检测具备无接触、布置灵活的优势,选择基于声信号进行特性参数分析。

然而,上述短时分析法均基于时域信号的局部特征提取,依赖人工设置的固定阈值进行冲击事件识别,并且多针对单一试品验证,缺乏对不同型号开关电器的适应性研究。由于高压直流接触器型号多样,且制造公差、老化等因素导致声信号特性存在显著差异,固定阈值策略难以兼顾所有样本,进而影响方法的稳定性与适用性。同时,部分接触器冲击事件间隔较近,易发生混淆,增加了冲击时刻识别的难度。此外,实际信号中除待测冲击特征外,还包含多种干扰成分,进一步降低了识别精度。因此,亟需一种无需阈值调整、具有更强适用性与迁移性、且抗干扰能力强的检测方法。

高压直流接触器的声信号中的冲击成分具有显著的短时宽频特性,几乎覆盖可听声所有频段,给时频分析带来较大挑战。且除真实的碰撞冲击外,声信号中还常伴随与主冲击特征相似的干扰响应,在此称为伪冲击事件。其主要包括接触器内部次级机械响应,如弹簧回弹和附加碰撞产生的微弱瞬时能量;主冲击激发结构模态或壳体共振在一定频段引起的延迟性波动;以及环境噪声、电磁干扰和振动耦合等外部突变信号[9]。上述干扰成分会影响待测冲击事件的准确识别与特性参数提取,因此需从原始信号中提取最能表征目标冲击事件的最优频带,并据此重构信号,以增强主冲击成分,抑制伪冲击干扰。在瞬态信号处理中,谱峭度常用于提取冲击事件对应的特征频带。Antoni[10]提出的快速谱峭度(fast kurtogram, FK)方法通过滤波器组分解并选取峭度最大的频带,有效提取了故障频带,但存在频带划分粗糙及频带选取偏差等问题。Lei 等[11]引入小波包变换优化了频带划分精度,但存在频带泄漏问题。为此,冯思茜等[12]引入双树复小波包变换(dual-tree complex wavelet packet transform, DTCWPT),在保持低能量泄漏与平移不变性的同时改进了频带划分,但对非高斯噪声仍较敏感。Wang 等[13]进一步提出结合滑窗分帧与子带平均峭度计算的方法,有效提升了 FK 的鲁棒性。基于上述研究,可采用滑动窗口对接触器合闸声音信号进行分帧,并对每帧信号进行 DTCWPT 分解,得到多个小波子带。通过重排子带并计算其平均峭度,构建子带平均峭度图,从中选取最优频带。在逆 DTCWPT 重构过程中仅保留该频带系数,从而抑制干扰成分,增强目标冲击特征。

经最优频带滤波保留有效冲击成分后,精确识别与定位冲击时刻是量化特性参数的关键。传统短时分析法多依赖时域能量波动,单一的时域或频域方法难以全面表征瞬态特性,且对不同试品的阈值设定适应性差、迁移性弱。为克服这一局限,可考虑引入时频分析方法,利用时频能量集中特性识别冲击事件,实现更高精度的特征提取。时频分析可将信号映射至二维时频域,直观展现能量随时间与频率的变化,有助于提升冲击事件的识别

准确率[14-16]。传统的短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)和连续小波变换等典型时频分析方法,为提取非平稳信号的时频特征提供了有效手段[17-19]。然而,这些方法存在能量扩散问题,难以清晰表征冲击时刻的频率特征。针对振声信号中的冲击脉冲成分,He 等[20]提出时间重排的同步压缩变换(time-reassigned synchrosqueezing transform, TSST),通过群延迟(group delay, GD)算子重分配时频系数,提升了时间聚焦能力。但 TSST 在细节放大时仍存在时频模糊,对冲击事件易混淆的接触器识别效果有限。在此基础上,Yu 等[21]提出时间重分配多同步压缩变换(time-reassigned multisynchrosqueezing transform, TMSST),通过多次迭代优化显著减少时频模糊,提高能量集中度,使冲击脉冲特征更加清晰。将 TMSST 应用于重构后的声信号,可获得高度集中的时频表示,实现对混淆冲击事件的有效分离与准确刻画。在时频表征基础上,进一步通过时频包络谱分析提取冲击主频,对应的时频系数可精确描述其瞬时特性[22]。基于该方法可准确定位冲击时刻,并进一步计算相关特性参数。

综上,针对短时分析法在不同型号高压直流接触器动态特性参数测量中的适应性差、迁移性弱的问题,提出了一种基于子带平均峭度图和 TMSST 的测量方法。为有效抑制伪冲击成分干扰并突出目标冲击特征,将滑窗分帧与 DTCWPT 分解相结合,构建子带平均峭度图并重构声信号。为克服短时分析法对阈值设置的依赖,引入 TMSST 进行高分辨率时频分析,利用其能量聚集性来识别目标冲击事件并分离混淆事件,从而提升对不同型号接触器的适应性。通过提取时频包络谱中的峰值时频系数,精确定位冲击时刻,从而实现特性参数的高精度测量。

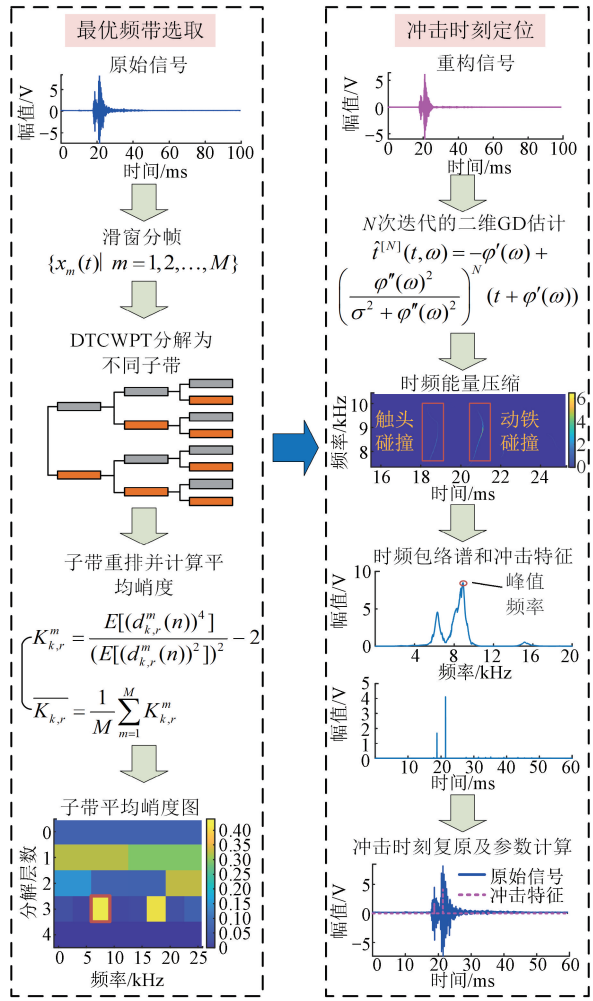



图 1　特性参数测量整体流程

Fig. 1　The overall process of characteristic parameters measurement

## 1　接触器动态特性参数测量方法

基于接触器动态特性测试系统,采集高压直流接触器合闸过程中的线圈电压、线圈电流、触头回路电压及声音信号。获取声音信号后,测量流程如图 1 所示。首先对原始信号进行滑窗分帧,得到多个子信号,并对每个子信号进行 DTCWPT 分解,获得多个小波子带。随后,对小波子带进行重排,并计算相应的子带平均峭度,生成子带平均峭度图。从中筛选出峭度值最大的频带作为最优频带,仅保留该频带的系数,并将其余子带系数置 0,以此对最优频带信号进行重构。

接着,对重构信号进行多次迭代的二维 GD 估计,并通过压缩算子将时频能量集中到 GD 轨迹中。在此基础上,计算各个频率点的时频包络谱,提取包络谱中的峰值频率,并获取该频率在时频谱中的对应时频系数,作为冲击事件的瞬时特征,从而实现对冲击时刻的精准定位。最终,根据定位结果计算接触器的动态特性参数。

### 1.1　最优频带选取

为克服非高斯噪声引起的峭度波动对最优频带选择的干扰,采用滑动窗口将采集到的接触器合闸声音信号 $x(t)$ 划分为 $M$ 个子信号 $\{x_m(t)\mid m=1,2,\cdots,M\}$,以增强局部特征的可识别性,并对每个子信号执行 DTCWPT 分解。该方法通过实部树与虚部树的并行小波包分解,实现对信号的复数域分析与重构,兼具良好的平移不变性与频谱局部性。以两层分解与重构为例,其滤波器组结构如图 2 所示。

分解重构过程中,虚部树的采样点嵌入实部树中,实现信息互补。DTCWPT 的小波函数及尺度函数可表示为:

$$\varphi(t)=\varphi_h(t)+\mathrm{j}\varphi_g(t) \tag{1}$$

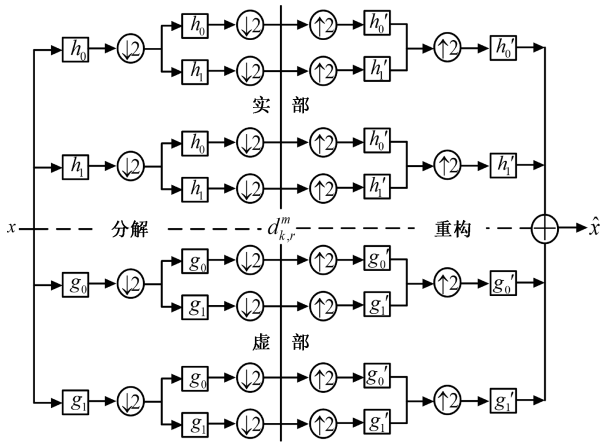



图 2 DTCWPT 分解与重构

Fig. 2 DTCWPT decomposition and reconstruction

式中：$\varphi_h(t)$、$\varphi_g(t)$ 为 2 个实小波；$t$ 为时间；$h$ 为实部树；$g$ 为虚部树。

在分解过程中，实部树使用低通和高通滤波器 $\boldsymbol{h}_0$ 和 $\boldsymbol{h}_1$，虚部树则使用滤波器 $\boldsymbol{g}_0$ 和 $\boldsymbol{g}_1$。在重构过程中，实部树和虚部树分别对应滤波器组 $\boldsymbol{h}'_0$,$\boldsymbol{h}'_1$ 和 $\boldsymbol{g}'_0$,$\boldsymbol{g}'_1$。通过 DTCWPT 分解，获得的第 $n$ 个分量的小波系数 $d_l(n)$ 和尺度系数 $c_l(n)$ 分别为：

$$\begin{cases} d_l(n) = d_l^a(n) + \mathrm{j}d_l^b(n) = \\ 2^{\frac{l}{2}}\left[\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\varphi_h(2^l t - n)\,\mathrm{d}t + \right. \\ \left. \mathrm{j}\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\varphi_g(2^l t - n)\,\mathrm{d}t\right] \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} c_l(n) = c_l^a(n) + \mathrm{j}c_l^b(n) = \\ 2^{\frac{l}{2}}\left[\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\varphi_h(2^l t - n)\,\mathrm{d}t + \right. \\ \left. \mathrm{j}\int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\varphi_g(2^l t - n)\,\mathrm{d}t\right] \end{cases} \tag{3}$$

式中：$a$ 为实部；$b$ 为虚部；$l$ 为分解尺度；$x(t)$ 为输入信号。小波系数和尺度系数的重构过程即为分解的逆过程，其表达式为：

$$\begin{cases} d_l(t) = 2^{\frac{l-1}{2}}\left[\sum_n d_l^a(n)\varphi_h(2^l t - n) + \right. \\ \left. \sum_k d_l^b(n)\varphi_g(2^l t - k)\right] \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{c}_l(t) = 2^{\frac{l-1}{2}}\left[\sum_n \boldsymbol{c}_l^a(n)\varphi_h(2^l t - n) + \right. \\ \left. \sum_k \boldsymbol{c}_l^b(n)\varphi_g(2^l t - k)\right] \end{cases} \tag{5}$$

式中：$k$ 为平移系数。重构的声信号 $\hat{x}(t)$ 可表示为：

$$\hat{x}(t) = \sum d_l(t) + \sum c_l(t) \tag{6}$$

对每个子信号进行 DTCWPT 分解后，可获得多个小波子带，记为 $d_{k,w}^m(n)$。随后，对分解得到的子带进行重排，具体操作为：

用二进制编码 $[n_{k-1},n_{k-2},\cdots,n_1,n_0]$ 表示错误排列顺序的整数 $w$，有：

$$w = 1 + \sum_{m=0}^{k-1} 2^m n_m \tag{7}$$

用二进制编码 $[n'_{k-1},n'_{k-2},\cdots,n'_1,n'_0]$ 表示正确排列顺序的整数 $r$，则有：

$$r = 1 + \sum_{m=0}^{k-1} 2^m n'_m \tag{8}$$

$$n'_m = \begin{cases} n_m, & m = k-1 \\ \mathrm{mod}(n_m + n_{m+1},2), & 0 \leqslant m < k-1 \end{cases} \tag{9}$$

式中：mod 表示取模运算操作。通过上述过程，可以实现子带重排，从而得到重排后的重构子带 $d_{k,r}^m(n)$，然后计算每个子信号 $x_m(t)$ 在子带的峭度，即：

$$K_{k,r}^m = \frac{E[(d_{k,r}^m(n))^4]}{(E[(d_{k,r}^m(n))^2])^2} - 2 \tag{10}$$

最后，计算各子带的平均峭度并绘制峭度图，以可视化各频带对冲击特征的响应强度。各子带的平均峭度计算公式如式(11)所示。

$$\overline{K_{k,r}} = \frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M} K_{k,r}^m \tag{11}$$

从中选取平均峭度值最大的子带作为最优频带，并基于该频带进行逆 DTCWPT，从而实现接触器合闸声音信号的有效重构。

### 1.2 冲击时刻定位

1) 时间重分配多同步压缩变换

重构后的声音信号表现为具有显著变频特征的冲击信号，可将其进一步二阶泰勒展开为：

$$\hat{x}(\xi) = A(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\varphi(\omega)+\varphi'(\omega))(\xi-\omega)+0.5\varphi''(\omega)(\xi-\omega)^2} \tag{12}$$

式中：$A(\omega)$ 和 $\varphi(\omega)$ 表示频域中的声信号幅度和相位；$-\varphi'(\omega)$ 表示 GD。高斯窗函数的 STFT 为：

$$\hat{g}(\omega) = \sqrt{2\sigma\pi}\mathrm{e}^{-0.5\sigma\omega^2} \tag{13}$$

采用高斯窗函数处理，声信号的 STFT 可表示为：

$$G(t,\omega) = (2\pi)^{-1}\int_{-\infty}^{+\infty}\hat{x}(\xi)\hat{g}(\xi-\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\xi-\omega)t}\,\mathrm{d}\xi \tag{14}$$

将式(12)和(13)代入式(14)中，得到：

$$\begin{cases} G(t,\omega) = \sqrt{2\sigma\pi}A(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\varphi(\omega)}(2\pi)^{-1}\times \\ \int_{-\infty}^{+\infty}\mathrm{e}^{0.5(\varphi'(\omega)-\sigma)(\xi-\omega)^2}\mathrm{e}^{\mathrm{i}(t+\varphi'(\omega))(\xi-\omega)}\mathrm{d}\xi = \\ A(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\varphi(\omega)}\sqrt{\frac{\sigma}{\sigma-\mathrm{i}\varphi''(\omega)}}\mathrm{e}^{-\frac{(t+\varphi'(\omega))^2}{2\sigma-2\mathrm{i}\varphi''(\omega)}} \end{cases} \tag{15}$$

由于时频能量在 GD 轨迹周围扩散，为提升能量集中度，TSST 首先推导出了声信号的二维 GD 估计，具体结果如式(16)所示。

$$\hat{t}(t,\omega)=-\varphi'(\omega)+\frac{\varphi''(\omega)^2}{\sigma^2+\varphi''(\omega)^2}(t+\varphi'(\omega)) \tag{16}$$

将 $t=-\varphi'(\omega)$ 代入式(16),可以得到:

$$\hat{t}(-\varphi'(\omega),\omega)=-\varphi'(\omega) \tag{17}$$

由式(17)可知 $t=-\varphi'(\omega)$ 是 $\hat{t}(t,\omega)$ 的不动点,可采用不动点迭代算法来减小 $-\varphi'(\omega)$ 与 $\hat{t}(t,\omega)$ 的误差。设 $\hat{t}^{[N]}(t,\omega)$ 表示经过 $N$ 次迭代后的二维 GD 估计,则有:

$$\hat{t}^{[N]}(t,\omega)=-\varphi'(\omega)+\left(\frac{\varphi''(\omega)^2}{\sigma^2+\varphi''(\omega)^2}\right)^N(t+\varphi'(\omega)) \tag{18}$$

当迭代次数足够大时,$\hat{t}^{[N]}(t,\omega)$ 将无限接近 $-\varphi'(\omega)$,即:

$$\lim_{N\to\infty}\hat{t}^{[N]}(t,\omega)=-\varphi'(\omega) \tag{19}$$

然后沿着时间方向进行一维积分,将模糊的时频能量压缩到 GD 轨迹中,得到:

$$T_s^{[N]}(u,\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty}G(t,\omega)\delta(u-\hat{t}^{[N]}(t,\omega))\,\mathrm{d}t \tag{20}$$

式中:$(u,w)$ 为经能量压缩后的时频平面,经过足够次数的迭代,可以推导出:

$$\lim_{N\to\infty}T_s^{[N]}(u,\omega)=\hat{x}(\omega)\hat{g}(0)\delta(u+\varphi'(\omega)) \tag{21}$$

由式(21)可知,经过足够次迭代后,可以有效地将式(20)时频域的能量压缩到 GD 轨迹中,从而实现接触器冲击事件能量在时频域的集中表征。

2) 冲击特征提取

不同冲击事件的间隔时间是声音信号的重要特征,其准确测量依赖于对各冲击时刻的精确定位。在获得高能量聚集的时频表示基础上,通过计算时频包络谱并提取其峰值频率对应的时频系数,可提取冲击事件的瞬时特征并确定其发生时刻。其核心步骤包括:对各频点计算时频包络谱,确定峰值频率,并提取对应时频系数以实现精确定位。其数学表达如式(22)、(23)所示。

$$TFES(\omega)=\max\left|\int_{-\infty}^{+\infty}(|T_s^{[N]}(u,\omega)|-\phi(\omega))\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\xi u}\mathrm{d}u\right| \tag{22}$$

$$ITF(u)=|T_s^{[N]}(u,\mathrm{argmax}_\omega[TFES(\omega)])| \tag{23}$$

式中:$TFES(\omega)$ 代表 $|T_s^{[N]}(u,\omega)|$ 的时频包络谱;$\phi(\omega)$ 代表 $T_s^{[N]}(u,\omega)$ 在尺度 $\omega$ 上的均值;$ITF(u)$ 代表冲击事件的瞬时脉冲特征。由此获取冲击事件在时域中的显著特征,从而实现冲击时刻的精确定位。

## 2　接触器动态特性参数分析

高压直流接触器的结构如图 3 所示。通电时,线圈产生电磁力,驱动动铁芯及推动杆向上运动,使动触头与静触头发生碰撞并完成吸合。触头闭合后,动铁芯继续上行,最终撞击轭铁板完成合闸过程。断电后,电磁场消失,弹簧释放能量促使动触头与静触头分离,动铁芯在复位力作用下向下运动并撞击轭铁板,完成分断。

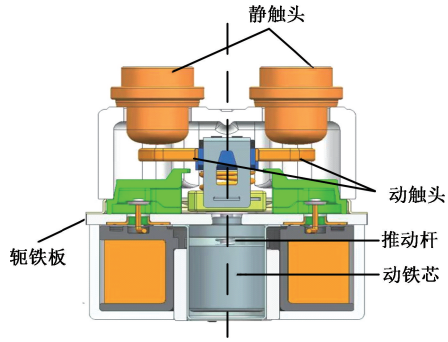



图 3　高压直流接触器结构

Fig. 3　Structure of HVDC contactor

在接触器动作过程中,动、静触头碰撞与动铁芯撞击轭铁板会产生明显的冲击信号,冲击时刻的准确定位是动态特性参数提取的关键。吸合时间指从线圈通电到触头闭合所经历的时间,决定接触器的响应速度与控制精度;超程时间指触头闭合后动铁芯继续运动至撞击轭铁板所经历的时间,影响触点压力和分断能力。两者的准确测量不仅直接关系到接触器的运行可靠性,还可反映结构磨损、弹簧疲劳等退化行为,因而被广泛应用于寿命预测与健康状态评估[23-24]。鉴于此,重点对上述两个参数进行检测。

## 3　应用实例及实验分析

### 3.1　试验系统

构建了如图 4 所示的接触器动态特性测试系统,包括虚拟仪器模块、逻辑控制模块和数据采集模块。上位

图 4　接触器动态特性测试系统

Fig. 4　Contactor dynamic characteristic testing system

机软件基于 LabVIEW 开发,通过 TCP/IP 协议与 PLC 通信,PLC 控制驱动模块实现接触器的合、分闸动作。线圈电压、线圈电流及触头回路电压通过 EM9118B 进行采集,该采集卡可实现 16 位、450 kHz 的高速同步数据采集;声信号则由 EM9108C 采集,可实现 24 位、256 kHz 的同步数据采集,适用于瞬时动态声信号的捕捉。压力场型传感器 MPA253 紧贴接触器表面。考虑到接触器动作过程中声信号能量主要集中在 20 kHz 以内[25],为有效捕获动作过程中的瞬态特征,采样率均设定为 50 kHz,采集时长 0.1 s,以确保信号不失真的同时兼顾数据处理效率。

### 3.2 接触器声信号分析

选取 3 种类型的高压直流接触器 A、B、C,并采集了多组合闸声音数据,其波形如图 5 所示。在闭合过程中,存在动、静触头碰撞和动铁芯撞击轭铁板冲击事件。不同型号接触器的两个碰撞冲击事件的发生时刻存在较大差异,且有的会存在混淆现象。

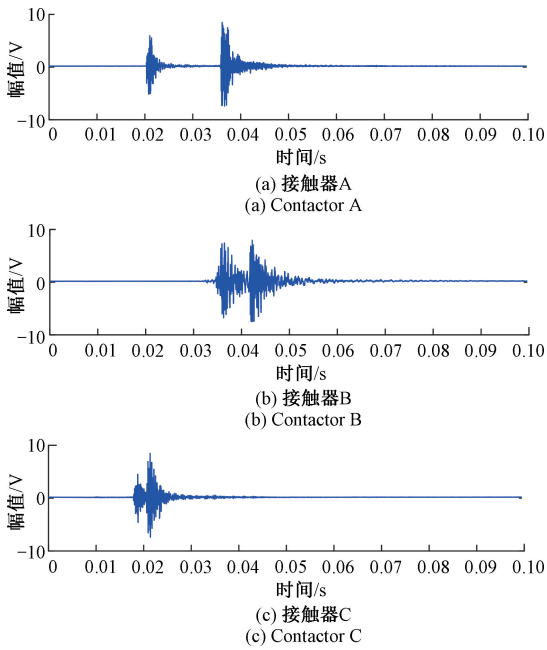



图 5 不同接触器的声信号

Fig. 5 Acoustic signals of different contactors

以接触器 C 为例,其两个冲击事件发生时刻较为接近,使得精确定位更加困难。图 6 展示了接触器 C 的线圈电流、触头回路电压、声信号及声事件短时能量计算结果。

$T_1$ 时刻对应触头碰撞,$T_2$ 时刻对应动铁碰撞。通过准确定位这两个碰撞冲击时刻,可以计算吸合时间 $T_0$ ~ $T_1$ 和超程时间 $T_1$ ~ $T_2$。测试信号时域波形的峰值所在的时间位置可作为冲击信号发生时刻的替代[26]。从声信号的短时能量峰值分布来看,除了目标冲击事件的峰值外,还存在多个伪冲击事件峰值,这些额外峰值使得精准定位 $T_1$ 和 $T_2$ 更加复杂。

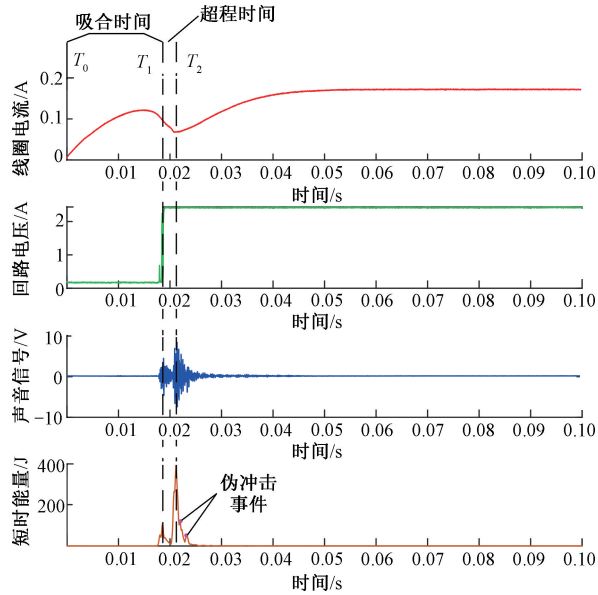



图 6 接触器 C 声事件分析

Fig. 6 Acoustic event analysis of contactor C

文献[5-8]中所述的短时能量法、短时能熵比法和短时峭度法等均需为两次碰撞冲击事件设定阈值,分别判断触头碰撞和动铁碰撞的时刻。采用上述方法对接触器进行了测试,如图 7 所示,目标冲击事件峰值以实心圆标出。结果表明,短时能量法和短时能熵比法的能量峰值在不同接触器间存在显著差异,需根据型号设定合理的

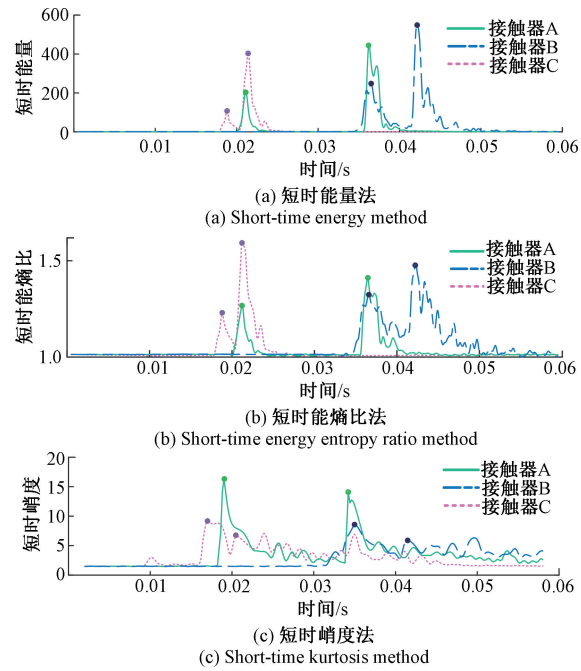



图 7 不同接触器短时分析结果

Fig. 7 Short-time analysis results of different contactors

阈值以精确定位冲击时刻。短时峭度法在接触器 A 上的识别效果较好,能够清晰识别冲击事件并呈现明显峰值;然而,对于其他接触器,冲击峰值不明显,识别效果较差,且同样依赖阈值设定,泛化能力不足。

此外,即便是同型号接触器,制造工艺偏差、触头磨损和退化等因素仍会导致声信号特征的差异。如图 8 所示,接触器 $C_1$ 与 $C_2$ 虽为同一型号,但其短时能量碰撞冲击峰值存在明显差异,表明短时分析法难以适应个体差异,阈值选择会影响冲击事件定位和参数测量的精度。

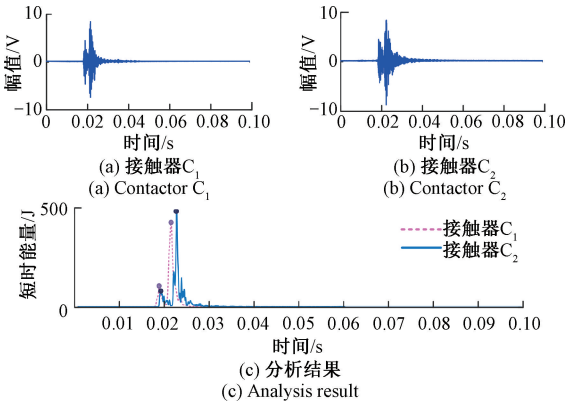



图 8　接触器 C 声信号短时能量分析

Fig. 8　Acoustic signals short-time energy analysis of contactor C

### 3.3　特性参数测量实例

下面将采用所提方法对动态特性参数进行测量,以验证其性能优势。

1) 接触器 A

根据文献[13]中的分帧设置,在接触器 A 声音信号采样点数为 5 000 的条件下,可将其划分为 125 帧,并对每帧子信号进行 4 层 DTCWPT 分解。随后,对各帧分解所得的子带进行重排并计算其平均峭度,最终生成子带平均峭度图,如图 9 所示。

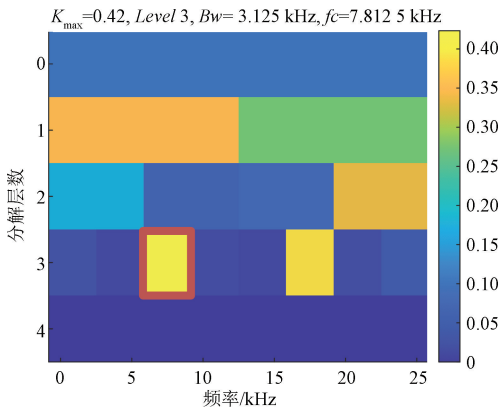



图 9　子带平均峭度图

Fig. 9　Subband averaging kurtogram

图 9 中颜色最深的区域对应最优频带,表明该频带内峭度值最高,目标冲击成分主要集中于此处,该频带的最大峭度值 $K_{max}$ 为 0.42,位于分解层 *Level* 3,带宽 *Bw* 为 3.125 kHz,中心频率 *fc* 为 7.812 5 kHz。

在提取最优频带后,仅保留该频带的成分,并利用 DTCWPT 的逆变换对信号进行重构,以突出目标冲击特征。图 10(a)表明相较原始信号,重构后毛刺与异常峰值得到有效抑制,伪冲击事件明显削弱,同时目标冲击事件得以保留和增强,且冲击时刻 $T_1$ 与 $T_2$ 位置保持不变,确保了重构信号的准确性与可靠性。图 10(b)表明仅保留目标冲击事件能量集中的频带进行重构后,信号的时频特性更为突出,为后续瞬时冲击特征提取提供了有力支持。

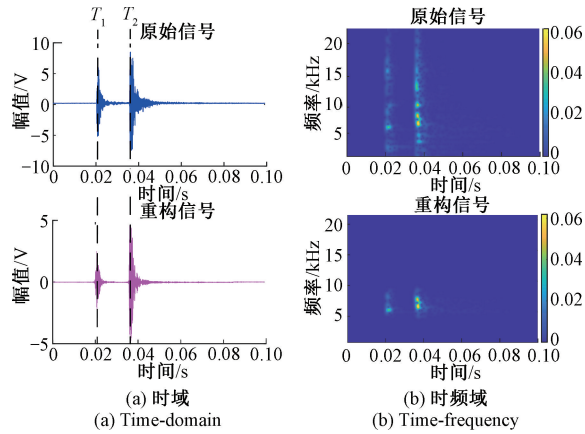



图 10　原始与重构信号对比

Fig. 10　Comparison of original and reconstructed signals

获得重构信号后,为更清晰地表征时频域冲击事件,采用 TMSST 方法即通过 *N* 次迭代的二维 GD 估计压缩信号时频能量。Renyi 熵越低表示能量分布越集中。如图 11 所示,不同型号接触器的 Renyi 熵随迭代次数变化,当 *N* 超过 7 时熵值已基本收敛并保持稳定。因此,选取 *N* = 10 作为迭代次数,兼顾能量压缩效果与计算效率。

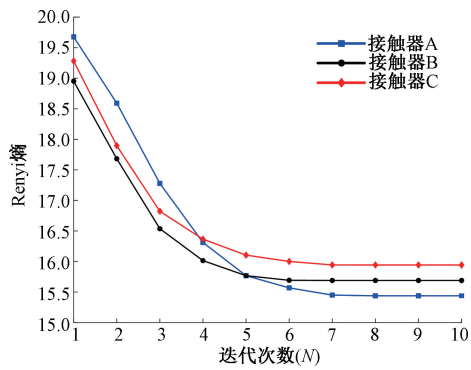



图 11　Renyi 熵随迭代次数变化

Fig. 11　Variation of Renyi entropy with iteration number

图 12 为接触器 A 重构信号经 TMSST 处理后的时频图,其中放大的两个区域分别对应触头碰撞与动铁碰撞冲击事件,冲击事件能量分布集中、特征清晰,为特性参数提取提供了可靠依据。

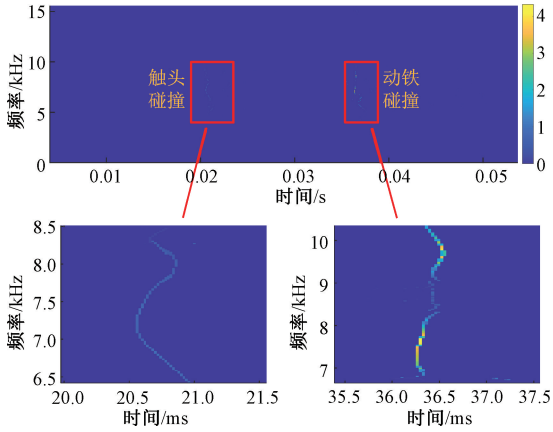



图 12 接触器 A TMSST 结果

Fig. 12 TMSST result of contactor A

在获得能量集中的时频表示后,根据式(22)计算各频率点下的时频包络谱,其中 $TFES(w)$ 的最大频率点用于表征冲击事件的瞬时特征,即 $ITF(u)$。图 13(a)显示了时频包络谱的计算结果,其中在 7.266 kHz 处的冲击特征最为显著;其对应的时频系数如图 13(b)所示,清晰展现了触头碰撞与动铁碰撞两个冲击脉冲特征。基于 2 次冲击脉冲的发生时刻及其时间间隔,可提取接触器的关键动态特性参数,即吸合时间与超程时间。

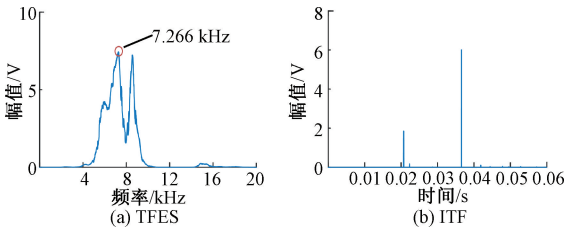



图 13 接触器 A 冲击特征提取

Fig. 13 Impact feature extraction of contactor A

接触器 A 的测量结果如图 14 所示,采用所提方法提取到的吸合时间和超程时间分别为 20.78 和 15.95 ms,与以直流回路法为参考的测量结果相差仅 0.16 和 0.11 ms,表明所提方法具有良好的测量精度。

2) 接触器 B

与接触器 A 相比,接触器 B 的声音信号中碰撞冲击事件的幅值和发生时刻均发生了显著变化,其特性参数表现为吸合时间延长,超程时间缩短。在接触器 B 上,基于短时能量法分别确定了触头碰撞和动铁碰撞冲击事件对应的能量阈值 $e_1$ 和 $e_2$,即对应时刻 $T_1$ 和 $T_2$ 的短时能量峰值。将该阈值组直接应用于接触器 A 时,识别结果如图 15 所示。

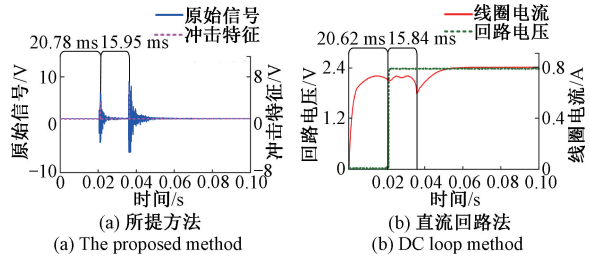



图 14 接触器 A 参数测量结果

Fig. 14 Measurement results of contactor A parameters

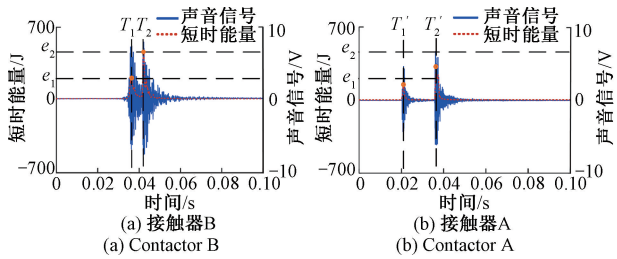



图 15 同一阈值在不同型号接触器上的识别效果

Fig. 15 Recognition performance of a unified threshold on different types of contactors

由于接触器 A 中触头碰撞冲击事件 $T_1'$ 对应的短时能量峰值较小,而设定的 $e_1$ 偏高,导致 $T_1'$ 时刻的触头碰撞冲击事件未被检测到,反而误识别了 $T_2'$ 时刻附近的能量值,进而将动铁碰撞误判为触头碰撞,导致真正的触头碰撞无法被识别。反之,若将适用于接触器 A 的能量阈值直接应用于接触器 B,由于接触器 B 中各碰撞冲击事件对应的能量峰值相对较大,设定的阈值偏低,导致两个碰撞冲击事件被提前识别,影响事件定位的准确性和参数测量结果。由此可见,不同型号接触器需各自设定能量阈值,难以实现统一适配。采用所提方法对信号重构后,进行时频能量压缩,结果如图 16 所示。

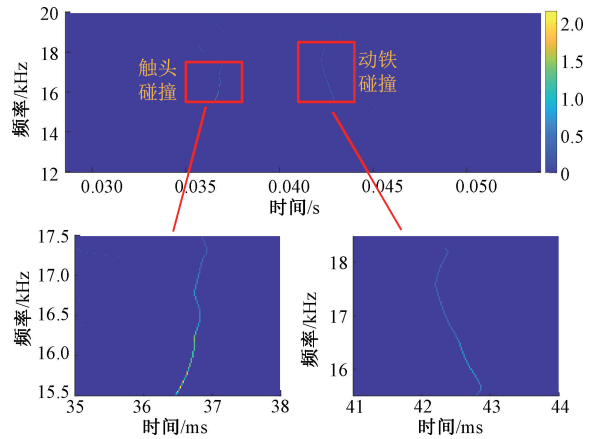



图 16 接触器 B TMSST 结果

Fig. 16 TMSST result of contactor B

可见,依托 TMSST 的能量集中特性,准确识别了两次碰撞冲击事件,并消除了对阈值的依赖。接着,通过计算时频包络谱并提取其峰值,获得的峰值频率及对应的冲击脉冲特征如图 17 所示,清晰标定了触头与动铁碰撞冲击事件的时刻,并可据此计算相关特性参数。

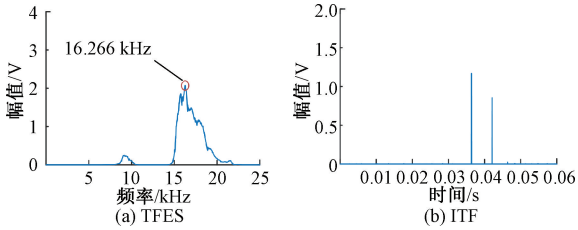



图 17　接触器 B 冲击特征提取

Fig. 17　Impact feature extraction of contactor B

图 18 展示了所提方法与直流回路法在接触器 B 上的测试结果,二者测量结果接近。同时,接触器 B 的线圈电流和回路电压波形与接触器 A 存在显著差异,反映了两者在制造工艺和结构设计上的不同,进而导致其声信号特征的差异。尽管接触器 A 与 B 在声信号特征上有所不同,所提方法仍能准确测量其特性参数,充分验证了其广泛的适用性和迁移性。

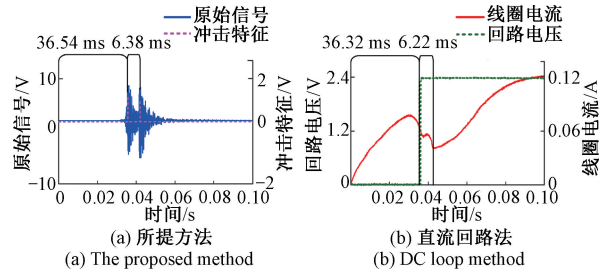



图 18　接触器 B 参数测量结果

Fig. 18　Measurement results of contactor B parameters

3) 接触器 C

与接触器 A 和 B 相比,接触器 C 在声音信号的幅值和冲击时刻上不仅存在显著差异,还由于 2 个冲击事件间隔过短导致信号混叠,增加了识别难度。针对这一问题,分别采用 STFT、TSST 和 TMSST 对重构信号进行时频分析并对比结果。图 19 表明,传统 STFT 能量扩散严重,时频图模糊且不同冲击事件难以分离;TSST 虽能在 GD 轨迹上聚集能量,但在细节放大后依然不清晰,限制了冲击时刻和瞬态特征的准确提取。相比之下,TMSST 为各冲击分量提供了更集中、清晰的时频表征,有效分离了混叠的冲击事件,显著提升了时频分析分辨率和识别精度。

在获得能量集中且冲击事件有效分隔的时频表示后,计算时频包络谱并提取峰值频率以表征冲击特征,如图 20 所示。

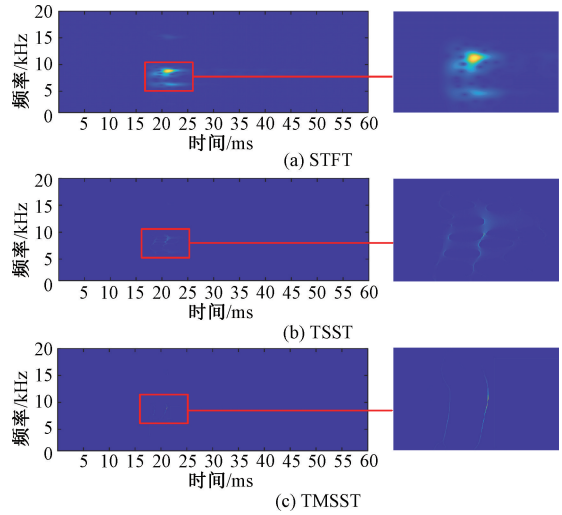



图 19　不同方法时频分析

Fig. 19　Time-frequency analysis of different methods

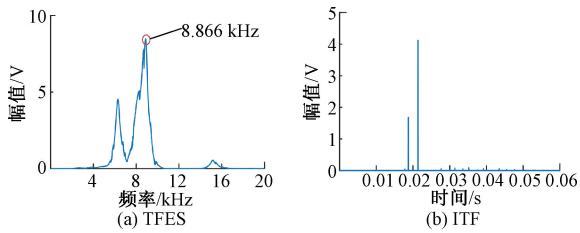



图 20　接触器 C 冲击特征提取

Fig. 20　Impact feature extraction of contactor C

将其还原至原始信号并对比直流回路法结果,如图 21 所示,可见即使冲击事件间隔仅为 2.58 ms、存在信号混叠,所提方法仍能准确定位冲击时刻,且测量误差较小,体现了其优异的分辨能力。

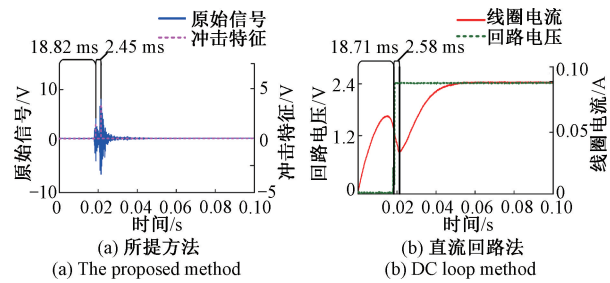



图 21　接触器 C 参数测量结果

Fig. 21　Measurement results of contactor C parameters

上述实验结果表明,所提方法能够适应不同型号接触器的动态特性参数测量,具备良好的自适应定位能力,能够有效分隔混淆冲击事件,无需阈值调整即可准确提取关键参数。除上述接触器外,部分结构特殊的接触器因线圈电流变化不明显,无法通过直流回路法反映动铁碰撞,导致超程时间无法测得,而声信号可有效表征该过程,优势更为明显。

### 3.4 传感器布局影响分析

在此主要分析所提方法对声音传感器布局的依赖性。以测量难度较大的接触器 C 为例,研究了传感器不同位置和距离对测量结果的影响。将声传感器分别布置在接触器的正面、侧面和上方,如图 22 所示。其中,正面位置设置 2 种条件:1)传感器紧贴接触器表面,2)传感器与接触器保持 2 cm 的间距;其余位置均为紧贴接触器。在这 4 种布置条件下分别采集 50 组数据,以分析不同位置和距离下声音信号的特征差异。

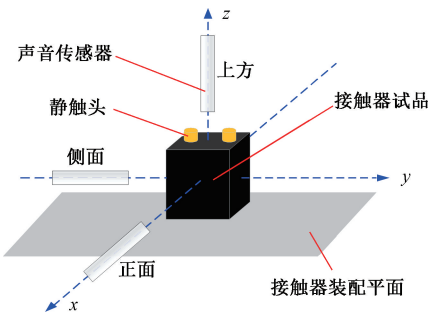



图 22 传感器位置示意图

Fig. 22 Sensor positions diagram

图 23 表明,当传感器紧贴接触器时,正面与侧面采集的波形形态相似,侧面波形幅值略低;上方波形中触头碰撞冲击更为突出。当传感器距接触器 2 cm 时,由于声波传播距离增加,波形幅值进一步衰减。总体来看,传感器布局主要影响声音幅值,对其他特性影响较小。然而,幅值变化导致的能量波动降低了短时分析法的适应性,而所提方法通过时频能量集中特性识别冲击事件,不依赖声能量幅值变化,具有更高的稳定性。

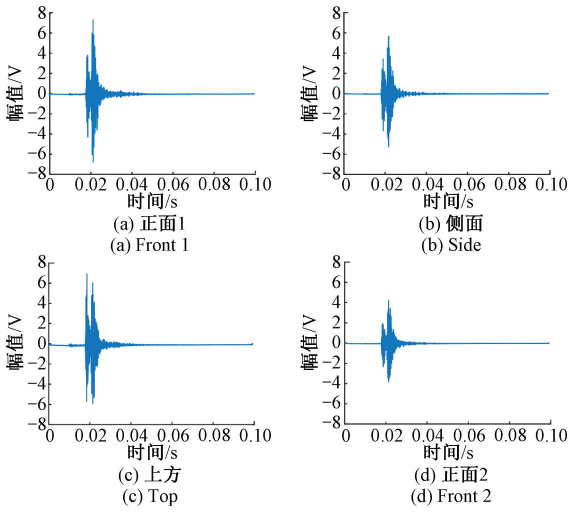



图 23 不同布置条件下的声信号

Fig. 23 Acoustic signals under different placements

为验证所提方法在不同位置和距离下采集的声音信号测量结果的稳定性,引入平均绝对误差(mean absolute error, MAE)和均方根误差(root mean square error, RMSE),以直流回路法测量结果作为参照,对测量结果进行量化评估,其计算公式如式(24)、(25)所示。

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|\hat{y}_i - y_i| \tag{24}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - y_i)^2} \tag{25}$$

式中:$n$ 表示样本数量;$\hat{y}_i$ 和 $y_i$ 分别为第 $i$ 个样本的预测值与真实值。

针对不同布置条件下采集的数据,计算特性参数的 MAE 和 RMSE,结果如表 1 所示。尽管采集位置和距离变化导致声信号幅值不同,所提方法测量结果依然保持较低误差,对传感器布局依赖性小,充分验证了其良好的鲁棒性和工程适应性。

**表 1 不同布置条件下的测量误差**

**Table 1 Measurement errors under different placements**

| 传感器位置 | 特性参数 | 性能指标 | |
|---|---|---|---|
| | | *MAE* | *RMSE* |
| 正面 1 | 吸合时间 | 0.30 | 0.33 |
| | 超程时间 | 0.22 | 0.25 |
| 侧面 | 吸合时间 | 0.28 | 0.32 |
| | 超程时间 | 0.31 | 0.34 |
| 上方 | 吸合时间 | 0.24 | 0.26 |
| | 超程时间 | 0.24 | 0.27 |
| 正面 2 | 吸合时间 | 0.32 | 0.37 |
| | 超程时间 | 0.25 | 0.28 |

### 3.5 测量误差对比分析

为评估子带平均峭度图选取的最优频带对声音信号重构后时频处理效果的提升,针对 3 款接触器各进行 50 次实验。分别将原始信号和重构信号作为 TMSST 的输入,并计算了接触器动态特性参数对应的 MAE 与 RMSE 指标,测试结果见表 2。对比分析表明,经最优频带重构后,参数的测量误差显著降低,说明该方法能有效提取目标冲击事件并抑制伪冲击事件的干扰,从而提高了参数提取的准确性。

最后,为验证所提方法在准确性与性能提升方面的优势,基于各型号接触器 50 次实验结果,采用所提方法、短时能量法及短时能熵比法进行动态特性参数测量。其中,短时能量法与短时能熵比法针对每款试品单独设置了阈值,并分别计算 MAE 与 RMSE 指标。对比结果如图 24 所示。

**表 2　信号处理误差对比**

**Table 2　Signal processing error comparison**

| 接触器型号 | 特性参数 | 性能指标(原始信号) | | 性能指标(重构信号) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | *MAE* | *RMSE* | *MAE* | *RMSE* |
| A | 吸合时间 | 0.52 | 0.59 | 0.22 | 0.25 |
| | 超程时间 | 0.43 | 0.49 | 0.23 | 0.26 |
| B | 吸合时间 | 0.55 | 0.65 | 0.25 | 0.28 |
| | 超程时间 | 0.49 | 0.56 | 0.28 | 0.31 |
| C | 吸合时间 | 0.53 | 0.62 | 0.31 | 0.35 |
| | 超程时间 | 0.56 | 0.67 | 0.26 | 0.29 |

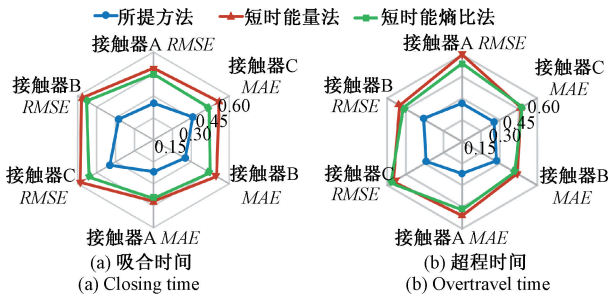



图 24　不同方法误差分析结果

Fig. 24　The error results of different methods

在吸合时间测量中,所提方法相较短时能量法和短时能熵比法的平均 RMSE 分别降低了 46.34% 和 40.93%,平均 MAE 分别降低了 45.83% 和 39.53%;在超程时间测量中,平均 RMSE 分别降低了 47.88% 和 45.57%,平均 MAE 分别降低了 45.77% 和 43.79%。结果表明,所提方法在不同型号接触器及不同特性参数测量中均表现出更高的测量精度。

## 4　结　　论

针对高压直流接触器动态特性参数的非侵入式测量,提出了一种基于子带平均峭度图和 TMSST 的测量方法,主要结论为:

1)采用滑窗分帧结合 DTCWPT 分解生成子带平均峭度图后,有效提取了包含目标冲击事件的最优频带,并基于该频带实现了声信号的重构。重构后的信号显著增强了目标冲击特征,同时有效抑制了伪冲击事件对参数测量的干扰,为后续的时频压缩分析奠定了坚实基础。

2)利用 TMSST 在时频域能量集中的特性有效识别出了两个目标冲击事件,避免了短时分析法中人为设定阈值的不足,其多次迭代进一步集中时频能量,有效克服了接触器冲击事件的混淆问题;通过选取时频包络谱峰值对应的时频系数作为冲击特征,实现了触头碰撞与动铁碰撞冲击时刻的精准定位,从而显著提升了参数的计算精度。

3)经试验测试,所提方法在 3 款不同高压直流接触器的动态特性参数测量中均表现出较高准确性:吸合时间的 MAE 分别为 0.22、0.25 和 0.31 ms,RMSE 分别为 0.25、0.28 和 0.35 ms;超程时间的 MAE 分别为 0.23、0.28 和 0.26 ms,RMSE 分别为 0.26、0.31 和 0.29 ms,各项误差均未超过 0.35 ms。与短时分析法相比,平均 MAE 与 RMSE 降低了 39% 以上。且所提方法对传感器的布局依赖性小,为高压直流接触器的非侵入式检测提供了有效技术支撑,具备良好的工程应用前景。

在实际应用中,高压直流接触器的运行状态可能受温度、湿度和机械振动等因素影响。未来研究应进一步考虑这些因素,扩展实验数据并优化算法,以提升方法在复杂工况下的稳健性与泛化能力,增强其工程适应。

## 参考文献

[1] 程显,张钰峥,葛国伟, 等. 铜蒸气对密封直流接触器氢-氮混合气体电弧特性的影响[J]. 高电压技术, 2024, 50(11):4951-4960.
CHENG X, ZHANG Y ZH, GE G W, et al. Effect of copper vapour on the arc characteristics of hydrogen-nitrogen gas mixtures in sealed DC contactors[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11):4951-4960.

[2] 鄢呈旸,王立军,张闻哲, 等. 并联双线圈式直流接触器电磁机构合闸动作特性[J]. 电力工程技术,2024, 43(1):201-211.
YAN CH Y, WANG L J, ZHANG W ZH, et al. Closing performance of electromagnetic mechanism in parallel dual-coil DC contactors[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1):201-211.

[3] 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 SH T, GUO H S, DOU L J, 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.

[4] 孙曙光,王泽伟,陈静, 等. 基于卷积变分自编码和多头自注意力机制的断路器剩余机械寿命预测[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(3):106-118.
SUN SH G, WANG Z W, CHEN J, et al. Remaining mechanical useful life prediction for circuit breaker based on convolutional variational autoencoder and multi-head self-attention[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(3):106-118.

[5] 万书亭,豆龙江,李聪, 等. 基于振动信号的高压断路

器合闸特性参数在线检测方法研究[J]. 振动工程学报,2019, 32(2):359-367.
WAN SH T, DOU L J, LI C, et al. Study on on-line detection of high voltage circuit breaker closing characteristic parameters based on vibration signal[J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(2): 359-367.

[6] 王静君,王飞,杨元威, 等. 短时能量法在断路器机械振动信号分析中的应用[J]. 高压电器, 2017, 53(12):14-19.
WANG J J, WANG F, YANG Y W, et al. Application of the short-time energy method in the analysis of circuit breaker mechanical vibration signals[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(12):14-19.

[7] 张伟,王冠霖,谭佳明, 等. 基于振动信号的超程变化情况下断路器刚分刚合时刻识别方法研究[J]. 高压电器, 2019, 55(11):184-190.
ZHANG W, WANG G L, TAN J M, et al. Research on the identification method of circuit breaker just-opening and just-closing moments under overtravel variations based on vibration signals[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11):184-190.

[8] 杜太行,安泽璋,姜泽, 等. 基于声峭度特征事件分割的接触器动态特性参数非侵入式测量[J/OL]. 电测与仪表, 1-8[2025-05-10].
DU T H, AN Z ZH, JIANG Z, et al. Non-invasive measurement of contactor dynamic characteristic parameters based on kurtosis feature for acoustic event segmentation[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 1-8[2025-05-10].

[9] 杨文英,刘兰香,刘洋, 等. 考虑碰撞弹跳的接触器动力学模型建立及其弹跳特性影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(9):1900-1911.
YANG W Y, LIU L X, LIU Y, et al. Establishing of contactor dynamic model considering collision bounce and analysis of influencing factors of bounce characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(9):1900-1911.

[10] ANTONI J. Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(1):108-124.

[11] LEI Y G, LIN J, HE ZH J, et al. Application of an improved kurtogram method for fault diagnosis of rolling element bearings[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(5):1738-1749.

[12] 冯思茜, 王家序, 张新, 等. 基于共振解调新方法的滚动轴承故障诊断[J/OL]. 中国机械工程, 1-10[2025-05-10].
FENG S Q, WANG J X, ZHANG X, et al. Rolling bearing fault diagnosis using a new resonance demodulation method[J/OL]. China Mechanical Engineering, 1-10[2025-05-10].

[13] WANG L, LIU ZH W, CAO H R, et al. Subband averaging kurtogram with dual-tree complex wavelet packet transform for rotating machinery fault diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 142:106755.

[14] 崔岩,方春华,文中, 等. 基于时频谱图和自适应动态权重 PSO-CNN 的外破振动信号识别[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(1):144-152.
CUI Y, FANG CH H, WEN ZH, et al. Vibration signal identification of external force failure based on time-frequency spectrum and adaptive dynamic weight PSO-CNN algorithm[J]. Foreign electronic measurement technology, 2023, 42(1):144-152.

[15] 唐圣学,马晨阳,勾泽. 基于时频特征融合与 GWO-ELM 的棒控电源早期故障状态辨识方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1):121-130.
TANG SH X, MA CH Y, GOU Z. Early fault state identification method of rod control power supply based on time-frequency feature fusion and GWO-ELM[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 121-130.

[16] 孙曙光,张婷婷,王景芹, 等. 基于连续小波变换和 MTL-SEResNet 的断路器故障程度评估[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6):162-173.
SUN SH G, ZHANG T T, WANG J Q, et al. Fault degree evaluation of circuit breaker based on continuous wavelet transform and MTL-SEResNet[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(6):162-173.

[17] 吴宸之,李炜,房琪, 等. 基于小波包混合优化的欠定盲源分离方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(9):213-224.
WU CH ZH, LI W, FANG Q, et al. Underdetermined blind source separation method basedon wavelet packet hybrid optimization[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(9):213-224.

[18] 孙世政,秦鸿宇,何盛港, 等. 基于信号特征分析和多小波变换的机械手滑动觉感知研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8):299-307.
SUN SH ZH, QIN H Y, HE SH G, et al. Research on sliding perception of manipulators based on signal feature analysis and multi wavelet transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8):299-307.

[19] 张承琰,郑明魁,刘会明, 等. 一种基于类小波变换的无线电频谱监测数据无损压缩方法[J]. 电子测量与

仪器学报, 2024, 38(7):152-158.
ZHANG CH Y, ZHENG M K, LIU H M, et al. Lossless compression method for radio spectrum data based onwavelet-like transform [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(7):152-158.

[20] HE D, CAO H R, WANG SH B, et al. Time-reassigned synchrosqueezing transform: The algorithm and its applications in mechanical signal processing[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 117: 155-179.

[21] YU G, LIN T R, WANG ZH H, et al. Time-reassigned multi-synchrosqueezing transform for bearing fault diagnosis of rotating machinery[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(2):1486-1496.

[22] 韩波. 基于小波变换的时频后处理方法及在挖掘机振动信号分析中的应用[D]. 青岛:山东大学, 2022.
HAN B. Time-frequency postprocessing methods based on wavelet transform with application to vibration signals analysis of excavator[D]. Qingdao:Shandong University, 2022.

[23] 陈昇,刘亮,孙凯革. 基于超程时间退化特性的电磁接触器寿命预测方法[J]. 电器与能效管理技术, 2024(2):66-71.
CHEN SH, LIU L, SUN K G. Life prediction method of electromagnetic contactor based on overtravel time degradation characteristics [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2024(2):66-71.

[24] 沙淼,袁东辉,刘洋, 等. CR400BF 动车组线路接触器早期故障统计分析[J]. 机车电传动, 2021(2):146-153.
SHA M, YUAN D H, LIU Y, et al. Early failure statistics analysis of the line contactor of CR400BF EMU[J]. Electric Drive for Locomotives, 2021(2): 146-153.

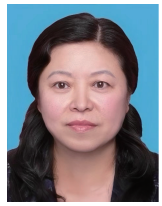
[25] 陈帆. 面向动态特性的接触器运行状态非侵入式检测[D]. 天津:河北工业大学, 2023.
CHEN F. Non-invasive detection of contactor operation state oriented to dynamic characteristics[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2023.

[26] GUO P, ZHU L M, WU Z M, et al. Autonomous profile tracking for multiaxis ultrasonic measurement of deformed surface in mirror milling[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70:3520113.

## 作者简介

**孙曙光**,分别在 2002 年、2005 年和 2009 年于河北工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为河北工 c 业大学副教授,主要研究方向为智能检测与故障诊断。
E-mail:sunshuguang_2000@ 163. com

**Sun Shuguang** received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Hebei University of Technology in 2002, 2005 and 2009, respectively. He is currently an associate professor at Hebei University of Technology. His main research interests include intelligent detection and fault diagnosis.



**王景芹**(通信作者),分别在 1984 年、1986 年和 1997 年于河北工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为河北工业大学教授,主要研究方向为电接触和可靠性。
E-mail:jqwang@ hebut. edu. cn

**Wang Jingqin** (Corresponding author) received her B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Hebei University of Technology in 1984, 1986 and 1997, respectively. She is currently a professor at Hebei University of Technology. Her main research interests include electrical contact and reliability.

**崔玉龙**,分别在 1990 年、1993 年和 2003 年于河北工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为北京化工大学副教授,主要研究方向为电力电子技术应用。
Email: 2003500070@ buct. edu. cn

**Cui Yulong** received his B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Hebei University of Technology in 1990, 1993, and 2003, respectively. He is currently an associate professor at Beijing University of Chemical Technology. His main research interests include applications of power electronics technology.

**颜豪磊**,在 2011 年于广西财经学院获得学士学位,现为瑞安市万通机电制造有限公司总经理,中级经济师,主要研究方向为电工电气设备和仪器。
Email: yanhaolei1989@ 163. com

**Yan Haolei** received his B. Sc. degree from Guangxi University of Finance and Economics in 2011. He is currently the general manager of Wonton Electromechanical Manufacturing Co., Ltd. in Ruian and holds the title of intermediate economist. His main research interests include electrical equipment and instrumentation.