

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241316

基于改进自适应 S 变换的电能质量扰动实时检测方法

位俊明¹, 吕世轩², 王伟², 郑丽君¹, 刘鑫¹, 胡润泽¹

(1. 煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室(太原理工大学), 山西 太原 030024;

2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001)

摘要: 针对复合电能质量扰动检测算法实时性差、时频分辨率低的问题, 提出了一种基于改进自适应 S 变换(improved adaptive S transform, IAST)的电能质量扰动实时检测方法。构建全局自适应高斯窗作为 IAST 的核函数, 可随检测频率变化自适应调整窗函数有效窗长及频谱, 避免为提高时频分辨率频繁切换窗口参数, 降低算法复杂度。以增强信号能量集中度为参数调优目标选取窗口参数, 确保对各类扰动的精确时频定位。采用自动阈值法确定实际扰动信号的主频点, 并对主频点进行时频变换, 进一步提高算法执行效率。仿真和实测结果表明, 相比于现有复合电能质量扰动检测算法, 该检测方法实时性好、时频分辨能力强、计算复杂度低, 适用于复杂电能质量扰动实时准确检测。

关键词: 电能质量扰动; 自适应高斯窗; 时频分析; 改进 S 变换

Real time detection method for power quality disturbances based on improved adaptive S-transform

WEI Junming¹, LÜ Shixuan², WANG Wei², ZHENG Lijun¹, LIU Xin¹, HU Runze¹

(1. Shanxi Key Laboratory of Mining Electrical Equipment and Intelligent Control (Taiyuan University of Technology), Taiyuan 030024, China; 2. State Grid Shanxi Electric Power Company Electric Power Science Research Institute, Taiyuan 030001, China)

Abstract: Aiming at the problems of poor real-time performance and low time-frequency resolution in existing detection algorithms for composite power quality disturbances, a real-time power quality disturbance detection method based on improved adaptive S-transform (IAST) is proposed. A globally adaptive Gaussian window is constructed as the kernel function of the IAST, allowing the effective window length and frequency spectrum to adapt dynamically with the detection frequency. This avoids the need for frequent switching of window parameters to improve time-frequency resolution, thereby reducing algorithm complexity. The window parameters are optimized with the objective of enhancing signal energy concentration, ensuring accurate time-frequency positioning of various types of disturbances. An automatic thresholding method is used to determine the dominant frequency points of the actual disturbance signals, which are then subjected to time-frequency transformation to further improve computational efficiency. Simulation and experimental results show that, compared with existing algorithms for detecting composite power quality disturbances, the proposed method offers superior real-time performance, strong time-frequency resolution, and low computational complexity, making it suitable for accurate real-time detection of complex power quality disturbances.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Shanxi Province (No. 202403021211215 and No. 202303021222032).

Key words: power quality disturbance; adaptive Gaussian window; time-frequency analysis; improved S-transform

0 引言

在“双碳”目标提出及能源革命稳步进行的背

景下, 电网可再生能源渗透率持续上升, 大量电力电子设备及非线性负载接入电力系统, 导致电力系统中的电能质量扰动出现强随机、宽频带、多耦合的特点^[1-2], 所引起的电能质量问题复杂多样, 对工业生产和居民生活造成了严重影响。同时, 随着信息化程度的提高, 各类精密电子设备对电能质量的

基金项目: 山西省自然科学基金项目资助(202403021211215, 202303021222032)

要求越来越高。快速、准确地检测各类电能质量扰动并提取扰动数据, 对其进行长期监测或智能化分析, 可以及时准确地获取各类扰动事件特征, 为电能质量评估和治理提供关键信息。但现有检测方法往往难以同时满足快速响应和高精度的需求, 因此, 本文提出一套能够高效检测各类扰动且适于嵌入式系统实现的电能质量扰动检测方法, 对于提高电力供应的可靠性及智能电网技术的发展具有重要意义^[3]。

时频分析是实现电力扰动信号检测的基础技术, 目前已有多种基于信号处理技术的时频分析方法应用于电能质量扰动检测领域^[4], 如短时傅里叶变换^[5]、小波变换^[6]、希尔伯特变换^[7]、S 变换^[8]等。其中, S 变换(S-transform, ST)可视为短时傅里叶变换和小波变换的结合, 其时频矩阵能很好地表征电能质量时域扰动特征和频域扰动特征, 已成为当下最流行的电能质量扰动检测方法之一。

然而, S 变换的高斯窗函数标准差与其检测频率是固定反比关系, 时频检测能力单一, 限制了其适用的电能质量扰动类型。因此, 部分文献采用 Blackman、Bohman、Kaiser 等窗函数替代高斯窗^[9-11], 从而提高电能质量扰动检测方法对各类场景的适应能力。但是, 根据海森堡测不准原理, 高斯窗具备较其他窗函数更佳的局部时频分辨率^[12]。为了在保留高斯窗函数特性的同时进一步提高时频检测能力, 有学者提出广义 S 变换^[13-14], 即在高斯窗的基础结构上引入不同的调节因子, 以增加窗口宽度调节的自由度, 从而提高检测时频分辨率, 但调节因子的选取无具体依据, 缺乏系统参数选择方案, 且当扰动信号频率跨度较大时仍然不能满足时频分析需求。文献[15-17]将扰动频率划分为多个区段并对应使用不同的调节因子, 从而针对性地提高对各类扰动检测的时频分辨率。但是, 此类方法本质上使用了两个或两个以上的高斯窗, 窗函数结构复杂, 需要随检测频率的变化频繁调换窗口参数, 导致算法复杂度高、执行速率慢, 且无法同时检测包含多种类型的复合电能质量扰动, 普适性弱。由此可见, 在应对各类复杂电能质量扰动时, 上述改进算法均未能兼顾扰动检测的准确性、快速性和普适性, 无法满足对电力信号实时、高效监测的需求^[18]。

针对上述问题, 本文根据准确、快速检测新型电力系统电能质量扰动的需求, 提出一种基于改进自适应 S 变换的电能质量扰动实时检测方法。首先, 构建全局自适应高斯窗, 单一窗口结构即可满足复杂电能质量扰动检测的时频分析需求, 降低窗函数的复杂度。之后, 以增强信号能量集中度的参数调优方案作为参数选取依据, 提高算法时频定位能力。结合所提高斯窗和参数调优策略, 合并采用自动阈

值法筛除非主频点, 进一步降低计算复杂度, 提高算法执行效率。最后, 分别在仿真和硬件平台验证该方法的有效性。实验结果表明, 本文所提方法能够在保证检测准确性较高的同时, 兼顾算法的快速性和普适性, 适宜嵌入式系统实现。

1 电能质量扰动特征

根据扰动特征可将电能质量扰动分为以下两类:

1) 时域内扰动, 如电压暂降、电压中断等, 主要特征为短时段内工频电压幅值的无规律波动。

2) 频域内扰动, 如暂态振荡、暂态脉冲等, 主要特征为短时段内出现工频外随机频率成分扰动。

在实际电力系统中, 不同扰动域内的扰动也会同时出现形成复合扰动^[19-20], 图 1 为部分单一扰动及同时包含时频两域内扰动的复合扰动波形。

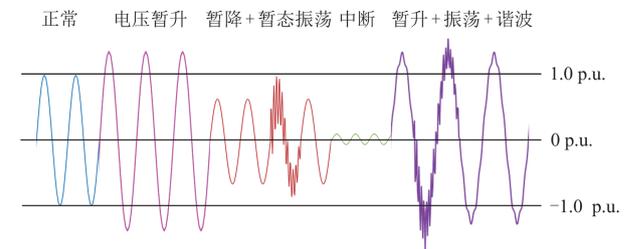


图 1 常见电能质量扰动波形图

Fig. 1 Common power quality disturbance waveforms

针对不同类型扰动的特征, 检测过程中对于时域内扰动需要保证较高的时间分辨率, 以便准确地提取出扰动幅值及持续时间等特征信息; 对于频域内扰动需要较高的频率分辨率来提高频率检测精度。

2 不同类型 ST 及自适应 S 变换

2.1 传统 ST 及其他改进 ST

S 变换是一种可逆的时频分析方法, 对于任一 时域信号 $x(t)$, S 变换的定义为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \omega_s(\tau - t, f) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

式中: 参数 τ 为控制高斯窗口在时域内位置的时移因子; f 为信号频率; $\omega_s(\tau - t, f)$ 为高斯窗函数。

ST 中的高斯窗函数为

$$\omega_s(\tau - t, f) = \frac{1}{\sigma_s(f)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2}{2\sigma_s(f)^2}} \quad (2)$$

高斯窗的标准差 $\sigma_s(f)$ 是关于信号频率 f 的函数, 如式(3)所示。

$$\sigma_s(f) = 1/|f| \quad (3)$$

由式(3)可以看出, 传统 ST 中窗口标准差与频率 f 之间是固定的反比关系, 导致其窗口与检测信

号间适应性较差, 检测范围相对有限。为了增加控制窗口标准差的自由度, 文献[13]提出一种广义 S 变换(generalized S transform, GST), 其窗函数定义为

$$\omega_{\text{GST}}(\tau-t, f) = \frac{\alpha |f|^\beta}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\alpha^2 f^{2\beta} (\tau-t)^2}{2}} \quad (4)$$

广义 S 变换在式(2)的基础上引入幅度拉伸因子 α 和频率尺度拉伸因子 β , 提高了时频分辨率调节的灵活性。结合扰动特征的检测需求, 希望在检测频率较低时具有较高的时间分辨率, 检测频率较高时具有较高的频率分辨率。但此方法并未根本改变窗宽与检测频率成反比的关系, 随着检测频率增加, 窗宽会变窄, 时频分辨率的变化趋势与检测需求趋势相反, 导致其时频特征提取的准确度降低。

为改变此种趋势, 使得窗函数能够适应不同频率范围的扰动时频分析需求, 文献[15]提出一种二窗口检测方法——双分辨率 S 变换(double resolution S transform, DRST), 定义为

$$S_{\text{DRST}}(\tau, f) = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{\sqrt{g_l |f|}}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 g_l |f|}{2}} e^{-j2\pi ft} dt & f \leq 1.5f_0, g_l > |f| \\ \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{\sqrt{g_h |f|}}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 g_h |f|}{2}} e^{-j2\pi ft} dt & f > 1.5f_0, g_h < |f| \end{cases} \quad (5)$$

式中: f_0 为工频, $f_0 = 50 \text{ Hz}$; g_l 和 g_h 分别为低频段和高频段内的窗宽调节因子。DRST 将扰动信号的频率范围划为低频区和高频区, 并使用不同的调节因子, 以改变窗宽与频率间的固定反比趋势, 提高不同频段扰动的时频分辨率。但是, 该方法增加了窗函数结构和算法的复杂度, 导致检测效率较低。

2.2 改进自适应 S 变换

为了提高窗函数对各种频率扰动的适应性, 同时能够更加高效地对扰动信号进行时频变换, 本文设计了一种单一结构即可满足复杂扰动时频分析需求的全局自适应高斯窗。

根据海森堡测不准原理, 窗宽越窄, 时间分辨率越高, 但频率分辨率会降低, 相反, 窗宽越宽, 频率分辨率越高, 但时间分辨率会降低, 时间和频率分辨率不能同时达到最优, 同时, 为了使得检测算法更加高效, 所设计的窗函数保持了单一窗口结构, 且其窗宽是根据基于检测频率的标准差 $\sigma(f)$ 自适应调整的。

所设计的窗函数定义为

$$\omega(\tau-t, f) = \frac{1}{\sigma(f)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2}{2\sigma^2(f)}} \quad (6)$$

全局自适应高斯窗的标准差 $\sigma(f)$ 为

$$\sigma(f) = 1/|\lambda_1 f + \lambda_2| \quad (7)$$

标准差可由两个窗宽调节因子 λ_1 和 λ_2 灵活控制, 令窗宽调节因子 $\lambda_1 < 0$, 并结合 λ_2 共同将 $\lambda_1 f + \lambda_2$ 的整体值控制为正数, 则由式(7)可知, 当检测频率 f 增加或减小时, 标准差 $\sigma(f)$ 会随之增加或减小, 窗宽也会相应变宽或变窄。这一方面保证随着检测频率增加频率分辨率会相应提高, 确保对于振荡暂态、谐波等频域扰动检测的频率分辨精度, 另一方面也能在基频处保持较高的时间分辨率, 以准确地监测电压幅值的变化及其发生时间等特征信息。图 2 为全局自适应高斯窗的时域窗宽及其频谱。

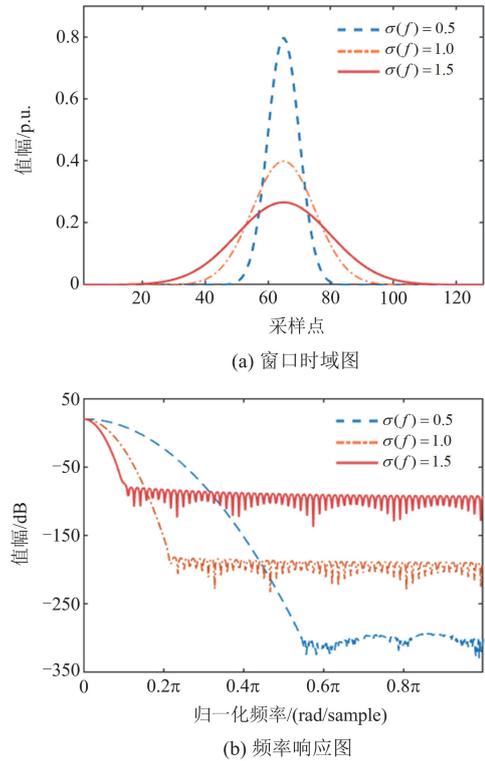


图 2 全局自适应高斯窗时域窗宽及其频谱

Fig. 2 Global adaptive Gaussian window time domain window width and spectrum

由图 2(a)可以看出, 标准差为 0.5 时, 时域有效窗宽较窄, 而图 2(b)中则对应了较宽的主瓣及幅度较低的旁瓣, 提供了较高的时间分辨率, 随着检测频率增加, 标准差增加至 1.5 时, 其频率响应中的主瓣变窄, 提供了高频分辨率。因此, 所提全局自适应高斯窗能够满足复杂扰动时频分析的要求, 且窗函数复杂度低。

基于全局自适应高斯窗, 改进自适应 S 变换(improved adaptive S transform, IAST)的定义为

$$S_{\text{IAST}}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{|\lambda_1 f + \lambda_2|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 |\lambda_1 f + \lambda_2|^2}{2}} e^{-j2\pi ft} dt \quad (8)$$

利用卷积定理和快速傅里叶反变换, 可得

$$S_{\text{IAST}}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\alpha + f) e^{-\frac{2\pi^2\alpha^2}{|\lambda_1 f + \lambda_2|^2}} e^{j2\pi\alpha\tau} d\alpha \quad (9)$$

式中: $X(\alpha + f)$ 为信号 $x(\tau)$ 在频域内经频移 α 后的傅里叶变换结果。

综合上述不同形式 S 变换的特点可知, IAST 解决了广义 S 变换时频分辨率差和多分辨率类 S 变换窗函数结构复杂、检测效率低的问题, 能够兼顾检测算法的准确性及执行效率。

3 基于增强能量集中参数调优方案的 IAST 及其快速算法

窗宽调节因子 λ_1 和 λ_2 的取值直接决定了 IAST 的检测效果, 为此, 本节提出了以增强信号能量集中度为目标的参数选取方案。同时, 为了进一步提高算法检测效率, 构建了基于自动阈值法的快速计算方案及其实现方法。

3.1 基于增强能量集中的参数调优方案

目前众多方法在参数选取方面缺乏系统的依据, 未能充分考虑检测信号自身的性质。为此, 本文提出一种以增强 IAST 信号能量集中度为目标函数的参数优化方案, 提高信号检测的能量集中度及窗口与信号间的适应性。能量集中度^[21]应用于改进自适应 S 变换的定义为

$$E_{\text{IAST}} = \frac{1}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_{\text{IAST}}^{\lambda_1, \lambda_2}(\tau, f)| d\tau df} \quad (10)$$

式中: E_{IAST} 为基于 IAST 计算所得的信号能量集中度; $S_{\text{IAST}}^{\lambda_1, \lambda_2}(\tau, f)$ 为归一化的 IAST 时频计算结果, 定义为

$$S_{\text{IAST}}^{\lambda_1, \lambda_2}(\tau, f) = \frac{S_{\text{IAST}}^{\lambda_1, \lambda_2}(\tau, f)}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_{\text{IAST}}^{\lambda_1, \lambda_2}(\tau, f)|^2 d\tau df}} \quad (11)$$

式中: $S_{\text{IAST}}^{\lambda_1, \lambda_2}(\tau, f)$ 为 IAST 对扰动信号的原始时频分析结果。

参数调优方案的目标是使所检测信号的能量集中度最大, 根据海森堡测不准原理, 时间分辨率和频率分辨率无法同时提高, 其中一方过高或过低又会导致能量向实际信号之外扩散, 因此, 在保证能量集中度增强的同时, 需要以时频分辨率间的权衡作为约束, 此种条件下的参数取值是使窗口能够适应复杂扰动信号的关键。首先设置约束条件如式(12)所示。

$$\sigma_{\text{low}} \leq \sigma(f) \leq \sigma_{\text{up}} \quad (12)$$

式中: σ_{low} 和 σ_{up} 分别决定了时间分辨率和频率分辨

率的上限, 对于离散形式的信号采样序列, 可将 σ_{low} 替换为 nT_s , T_s 为信号的采样周期, n 为大于等于 1 的整数, 在本文中取为 5, 则式(12)左半部分 $\sigma(f) \geq \sigma_{\text{low}}$ 可转换为约束条件一, 如式(13)所示。

$$1/|\lambda_1 f + \lambda_2| \geq nT_s \quad (13)$$

其中: $f_{\text{min}} < f < f_{\text{max}}$, 最大频率 f_{max} 在考虑采样定理的基础上由检测信号决定, 最小频率 f_{min} 设为 1 Hz, 则式(13)可转化为

$$nT_s \times (\lambda_1 f_{\text{min}} + \lambda_2) - 1 \leq 0 \quad (14)$$

同理, 将式(12)的 $\sigma(f) \leq \sigma_{\text{up}}$ 转换为约束条件二, 如式(15)所示。

$$1/|\lambda_1 f_{\text{max}} + \lambda_2| - uT_s \leq 0 \quad (15)$$

式中: u 为频率分辨率调节系数, 本文取为 300, 即 uT_s 为 0.06。除了以时间和频率分辨率作为约束之外, 同样也需要对参数自身进行合理范围的限制, 以提高参数优化的速度, 整体参数优化方案为

$$\begin{aligned} \max_{\lambda_1, \lambda_2} \quad & \arg \frac{1}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_{\text{IAST}}^{\lambda_1, \lambda_2}(\tau, f)| d\tau df} \\ \text{s.t.} \quad & nT_s (\lambda_1 f_{\text{min}} + \lambda_2) - 1 \leq 0 \\ & 1/(\lambda_1 f_{\text{max}} + \lambda_2) - uT_s \leq 0 \\ & \lambda_1 \in (-0.1, -0.0015) \\ & \lambda_2 \in (15, 35) \end{aligned} \quad (16)$$

采用内点法可得到能够增强能量集中度且兼顾时频分辨率权衡的参数解, 能够在复合扰动检测中取得满意的效果。

3.2 自动阈值法

对于信号长度为 N 的扰动信号, 传统 ST 在计算过程中的时间复杂度为 $O(N^3)$, 经频域内使用正、逆傅里叶变换计算可降至 $O(N^2 \log_2 N)$ ^[22]。然而, 在参数选定合理的基础上, 实际计算分析信号的过程中大多能量都集中在主要频率点附近, 其他频点所包含的大多为非关键特征信息, 却需要消耗大量计算资源。因此, 本文采用基于傅里叶频谱的自动阈值法将非主频点剔除, 仅对主频点做改进时频计算, 构建改进自适应 S 变换的快速算法(improved adaptive fast S-transform, IAFST)。

以一个包含电压暂降和 3 种不同幅值谐波成分的电压信号为例, 自动阈值法的原理为首先对扰动信号进行傅里叶变换得到频谱图, 初步判定频率分布情况, 同时根据实际扰动信号特点设定阈值, 将频谱图中幅值高于此阈值的频率成分定义为主频点, 并自动剔除其余非主频点, 基本过程如图 3 所示。考虑到需要去除噪声干扰的影响, 且部分持续

时间较短的扰动频谱幅值可能较小, 本文将阈值设定为 0.02 p.u., 最终仅对筛选后的主频点进行时频分析。对于长度为 N 的信号, 使用正、逆傅里叶变换并依次计算所有频率点的时间复杂度为 $O(N^2 \log_2 N)$, 而经自动阈值法确定的主频点数量 v 远小于 N , 从而可将 IAST 计算的时间复杂度降至 $O(N \log_2 N)$ 。

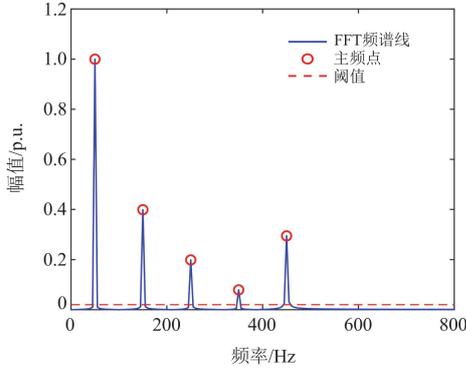


图3 自动阈值法示意图

Fig. 3 Schematic for automatic thresholding method

此外, 采用自动阈值法的另一优势是无须另外计算傅里叶频谱, 因为计算扰动信号的 FFT 属于 S 变换固有步骤, 从而可以进一步节省运算量。

3.3 快速算法实现

为了便于 IAFST 算法在数字信号处理器中实现, 现推导其离散形式及实现步骤。

对于采样周期为 T_s 、采样长度为 N 的输入信号, 将式(9)中的 τ 和 f 分别离散化为 mT_s 和 $\frac{k_i}{NT_s}$, 并仅计算主频点部分, 可得到 IAFST 的离散形式, 如式(17)所示。

$$S_{\text{IAFST}}\left(mT_s, \frac{k_i}{NT_s}\right) = \sum_{l=0}^{N-1} X\left(\frac{l+k_i}{NT_s}\right) W\left(\frac{l}{NT_s}, \frac{k_i}{NT_s}\right) e^{\frac{j2\pi lm}{N}} \quad (17)$$

式中: k_i 为信号经自动阈值法筛选出的主频点; m , $l=0,1,2,\dots,N-1$, $i=1,2,\dots,v$, $X\left(\frac{l+k_i}{NT_s}\right)$ 为式(9)

中 $X(\alpha+f)$ 的离散形式, $W\left(\frac{l}{NT_s}, \frac{k_i}{NT_s}\right)$ 为自适应高斯窗的离散傅里叶变换。具体的 IAFST 算法实现流程如图 4 所示。

4 实验及分析

4.1 复合扰动检测实验

考虑到电力系统故障及大量可再生能源并网会引起电压波形畸变、不同频率成分等扰动共存的情

况^[23], 本文首先设计了包含电压暂降、振荡暂态及谐波的复合扰动测试方案, 以验证 IAST 检测算法的性能。

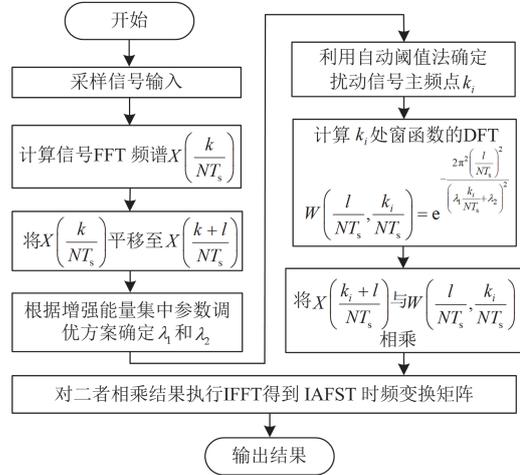


图4 IAFST 算法流程图

Fig. 4 Flowchart of IAFST algorithm

在参考 IEEE 电力质量监测规程 IEEE Std 1159-2019^[24] 的基础上, 本文在 Matlab 中所设置复合扰动信号的数学模型如式(18)所示, 设置采样频率为 5 kHz, 采样点数为 1000, 在实验条件相同的情况下, 对比不同算法时频分析效果。

$$\begin{aligned} x(t) = & \varepsilon(t \geq 0 \ \& \ t < 0.08 | t > 0.16) \times \sin(2\pi f_0 t) + \\ & 0.6 \times (\varepsilon(t - 0.08) - \varepsilon(t - 0.16)) \times \sin(2\pi f_0 t) + \\ & [\varepsilon(t - 0.08) - \varepsilon(t - 0.18)] \times 0.7 \times \sin(5 \times 2\pi f_0 t) + \\ & [\varepsilon(t - 0.02) - \varepsilon(t - 0.12)] \times \sin(14 \times 2\pi f_0 t) + \\ & 1.3e^{-\frac{t-0.11}{0.03}} (\varepsilon(t - 0.11) - \varepsilon(t - 0.14)) \times \\ & \sin(29 \times 2\pi f_0 (t - 0.14)) \end{aligned} \quad (18)$$

式中: $\varepsilon(t)$ 是阶跃函数, 该信号包含了 0.08~0.16 s 内幅值为 0.6 p.u. 的电压暂降, 伴随 0.08~0.18 s 及 0.02~0.12 s 之间的 5 次和 14 次时变谐波及 0.11~0.14 s 内频率为 29 倍工频的暂态振荡。分别使用 GST、DRST(高频结构参数)、IAST 对该复合扰动信号进行时频分析, 同时, 分别计算经过 3 种方法分析后的信号能量集中度 E_{GST} 、 E_{DRST} 和 E_{IAST} , 最终得到的二维时频变换结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 相比于 GST 和 DRST, 以增强能量集中调优方案作为参数选择依据的 IAST 有着最优的能量集中性能, 在整个时频平面上保持了良好的时频分辨率, 进而有利于提高扰动特征提取的精度。其中, IAST 的窗宽调节因子经优化后取值分别为 $\lambda_1 = -0.0016$ 和 $\lambda_2 = 21.84$ 。

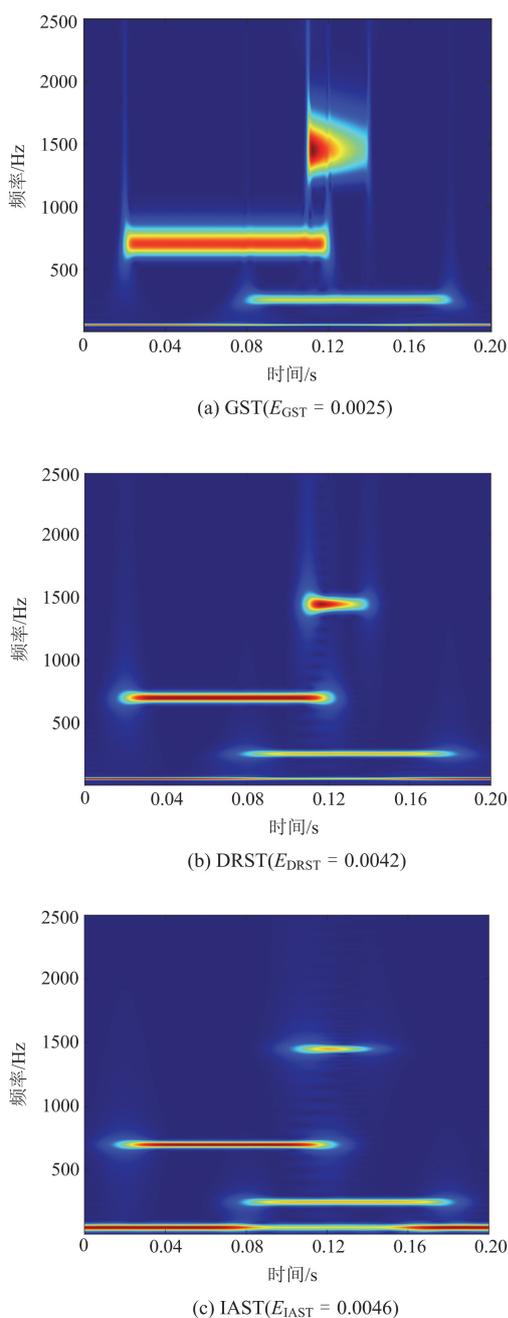


图 5 不同算法对式(18)信号的时频分析结果

Fig. 5 Time-frequency analysis results of signals in Eq. (18) with different algorithms

在二维时频矩阵的基础上可进一步提取出扰动信号具体特征信息。其中, 在实际检测时将使用 IAFST, 仅对主频部分进行时频计算特征信息提取。图 6 为 3 种算法在各自二维时频矩阵中所提取出的特征信息曲线。

由图 6 可以看出, 对于包含多种频率成分的复合扰动信号, GST 有着较好的基频幅值检测表现,

但随着检测频率增加其频率分辨率逐渐降低, 甚至出现频率混叠的现象, 无法准确检测高频成分。DRST(高频段结构)相对于 GST 提高了高频处的频率分辨率, 但其基频幅值曲线与实际扰动信号波形偏差较大, 无法准确检测基频处的扰动强度大小, 如果切换 DRST 的低频结构参数又会降低频率检测精度。而 IAFST 的基频幅值曲线最为接近实际信号的波形, 其能够在准确提取出扰动幅值的同时, 对于高频成分也具备良好的频率检测能力, 且检测过程无须切换窗口参数。

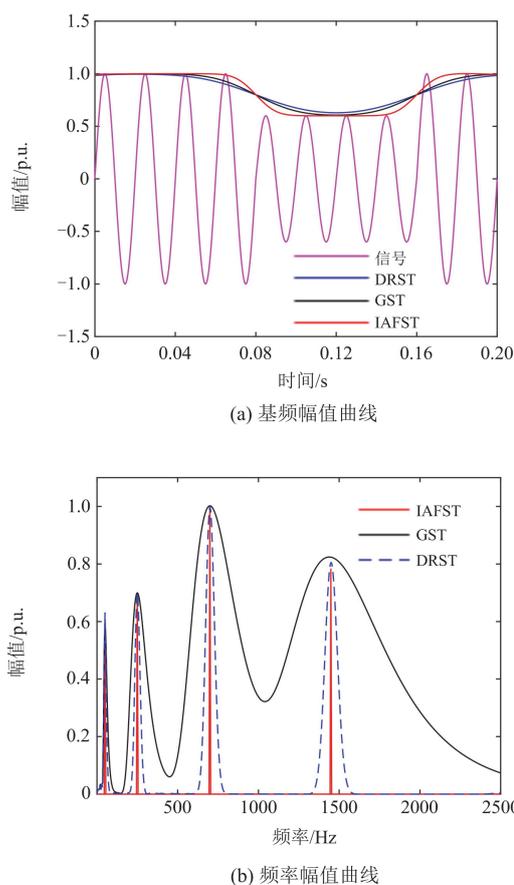


图 6 不同算法特征提取曲线

Fig. 6 Feature extraction curves of different algorithms

由此可知, 当检测信号包含多种扰动类型时, GST 的时频分析能力较低, DRST 无法同时检测包含时频两域的复合扰动, 不具备普适性, IAFST 则可以高效地满足各类扰动时频分析需求。

4.2 实际应用中的算法性能对比

为了进一步验证 IAFST 算法在实际应用中扰动信号检测的表现, 本文搭建了电能质量扰动检测实验平台测试算法的性能, 实验平台结构如图 7 所示。其中, 扰动信号源采用基于 Matlab/Simulink 的

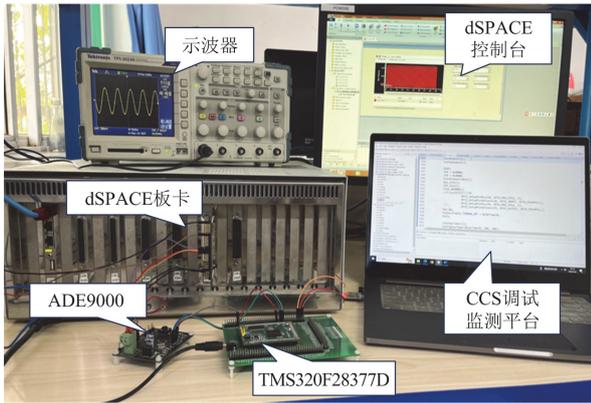


图 7 电能质量扰动检测实验平台

Fig. 7 Experimental platform for power quality disturbance detection

半实物仿真平台 dSPACE，由电能质量信号采集芯片 ADE9000 对电能质量扰动信号实时采集，DSP 采用的是具有双核架构的 TMS320F28377D，DSP 与

ADE9000 通过 SPI 通信实现实时数据交换，获取采集芯片的电能信号并负责检测算法的执行。

参照《电能质量 电压暂升、电压暂降与短时中断》(GB/T 30137—2024)^[25]及 IEEE Std 1159-2019 中对于各类电能质量扰动的定义，通过 dSPACE 设置了 5 类包含时频两域复合扰动的电压信号，采样频率为 5 kHz，采样点数为 1000，测试算法的准确性和快速性。

其中，准确性以各类扰动特征信息的检测值与真实值之间的相对误差来衡量，各类扰动主要特征信息包括扰动幅值、持续时间、频率成分。进行复合扰动测试时的相对误差值为其各成分的平均相对误差。另外，由于 DRST 无法同时准确检测包含不同频段的复合扰动，本文对其采取切换窗口操作。即在检测高频扰动时调用其高频结构参数，检测基频扰动时则切换低频结构参数，并取误差较小者作为其最终检测结果。3 种算法的扰动检测准确度测试结果如表 1 所示。

表 1 不同扰动检测算法准确度对比

Table 1 Comparison of the accuracy of different perturbation detection algorithms

扰动类型	幅值相对误差/%			持续时间相对误差/%			频率检测相对误差/Hz		
	IAFST	DRST	GST	IAFST	DRST	GST	IAFST	DRST	GST
电压暂升	0.023	0.038	0.49	0	0.025	0.52	0	0	0
电压中断	0.054	0.054	3.17	0.010	0.020	0.63	0	0	0
暂升 + 暂态振荡	0.042	0.048	2.30	0.057	0.052	0.20	0	0	4.9
暂降 + 27 次谐波	0.018	0.021	4.10	0.030	0.030	0.50	0	0	4.9
暂降 + 9 次谐波 + 19 次谐波	0.019	0.040	5.20	0.010	0.020	0.40	0	0	7.5

由表 1 可知，IAFST 与 DRST 均能保持较小的检测误差，IAFST 不需要切换参数，对全频段范围扰动均能保持良好的适应性，DRST 能够保证较高准确性的前提是不停切换高低频段的结构参数，算法复杂、检测效率低。虽然 GST 也不需要切换窗口参数，但其检测精度远远低于 IAFST，随着检测频率增加其频率分辨率不断下降，存在频率检测误差，高次谐波和基频处扰动的幅值识别误差也较大。

GB/T 30137—2024 规定暂态电压幅值测量相对误差限为 0.2%，持续时间的测量误差不超过±1 个周期，结合表 1 中的测试结果可知，IAFST 的测量准确性均高于 GB/T 30137—2024 中的检测要求。

电能质量扰动检测算法的执行速度是保证检测实时性的关键指标，直接关系到电能质量监测系统能否快速响应复杂电网环境中的突发扰动事件，为了验证各类算法在实际应用中的实时性表现，本文在 DSP 的开发平台 CCS 环境中分别测试了不同算法在检测多种类型扰动时的执行时间，测试结果如表 2 所示。

表 2 不同扰动检测算法执行时间对比

Table 2 Comparison of execution time of different perturbation detection algorithms

扰动类型	计算时间/ms		
	IAFST	DRST	GST
电压暂升	1.5	3.2	17.2
电压中断	1.4	3.4	18.2
暂升 + 暂态振荡	1.8	5.5	19.6
暂降 + 27 次谐波	1.6	5.7	18.9
暂降 + 9 次谐波 + 19 次谐波	1.9	6.2	20.3

由表 2 可知，IAFST 拥有最快的执行速度，这正是得益于全局自适应高斯窗的普适性及采用基于自动阈值法的快速计算方案。DRST 算法的运行时间较长，原因是其在检测各类扰动时增加了判断频段和调用窗口的环节，增加了算法的复杂度和系统的计算负担，比如检测复合扰动时需要分别检测并综合不同频率成分扰动的特征信息，所需执行时间的延长程度更为明显。GST 窗口结构并不复杂，计算耗时却最长，是由于其未配备快速计算方案，导

致附带大量冗余计算占用计算资源。

结合表 1 中不同算法对多种类型扰动的准确度检测结果及各算法的特点和执行时间, 同时考虑到电力系统对于电力信号监测的实时、高效等需求, 将以上 3 种扰动检测算法的性能总结如表 3 所示。

表 3 实际应用中不同典型算法性能对比

Table 3 Performance comparison of different typical algorithms in practical applications

检测方法	准确性	快速性	普适性	实际表现
GST	低	低	无	差
DRST	高	一般	无	一般
IAFST	高	高	有	优秀

从表 3 可以看出, 对比当前主流的 S 变换改进形式, 在检测多种类型电能质量扰动时, IAFST 不仅能够做到保证高检测准确性, 同时也具备更好的快速性和普适性, 更适合应用于电能质量扰动实时检测系统, 在电能质量扰动随机、连续发生需要长期监测的场景下, 其优势将进一步凸显。

5 结论

针对复合电能质量扰动检测算法实时性差、时频分辨率低的问题, 本文提出了一种基于改进自适应 S 变换的电能质量扰动实时检测方法 IAFST, 主要结论如下。

1) 设计全局自适应高斯窗, 其窗宽及频谱特性可随检测频率变化自适应改变, 单一窗口即可满足各类电能质量扰动的时频分析需求, 简化了窗函数结构, 降低了算法复杂度。

2) 通过基于增强能量集中的参数调优方案确定窗函数调节因子, 构建采用自动阈值法的 IAST 快速算法, 能够在保证检测准确性的情况下大幅降低计算量, 进一步提高算法执行效率。

3) 对比 3 种改进算法对多种类型电能质量扰动信号检测的性能表现, 实验结果表明, 改进自适应 S 变换的快速算法相比于其他算法能够兼顾检测准确性、快速性、普适性, 计算复杂度低、可执行性强, 能够基于嵌入式系统实现电能质量扰动实时监测。

参考文献

[1] 龚正, 邹阳, 金涛, 等. 基于特征融合并行优化模型的电能质量扰动分类方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 1017-1027.
GONG Zheng, ZOU Yang, JIN Tao, et al. Classification method of power quality disturbances based on optimized parallel model of features merging[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 1017-1027.

[2] 贺虎成, 王承海, 辛钟毓, 等. 一种组合重构的电能质

量扰动特征提取方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 34-44.
HE Hucheng, WANG Chenghai, XIN Zhongyu, et al. A feature extraction method for power quality disturbance based on reconstructed combination[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 34-44.

[3] 王燕. 电能质量扰动检测的研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 174-186.
WANG Yan. Review of research development in power quality disturbance detection[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 174-186.

[4] 汪飞, 全晓庆, 任林涛. 电能质量扰动检测与识别方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4104-4120.
WANG Fei, QUAN Xiaoqing, REN Lintao. Review of power quality disturbance detection and identification methods[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4104-4120.

[5] 黄建明, 瞿合祚, 李晓明. 基于短时傅里叶变换及其谱峭度的电能质量混合扰动分类[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3184-3191.
HUANG Jianming, QU Hezuo, LI Xiaoming. Classification for hybrid power quality disturbance based on STFT and its spectral kurtosis[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3184-3191.

[6] 王康, 席燕辉, 胡康, 等. 一种新的基于深度置信网络的电能质量扰动分类方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(1): 171-177.
WANG Kang, XI Yanhui, HU Kang. A novel classification method for power quality disturbance based on deep belief network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(1): 171-177.

[7] SAHANI M, DASH P K. FPGA-based online power quality disturbances monitoring using reduced-sample HHT and class-specific weighted RVFLN[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(8): 4614-4623.

[8] 李琦, 许素安, 施阁, 等. 基于 S 变换和 IWOA-SVM 的复合电能质量扰动识别[J]. 智慧电力, 2023, 51(5): 30-35, 50.
LI Qi, XU Su'an, SHI Ge, et al. Identification of composite power quality disturbance based on S-transform and IWOA-SVM[J]. Smart Power, 2023, 51(5): 30-35, 50.

[9] 李建文, 秦刚, 李永刚, 等. 基于布莱克曼窗与窗宽比的 S 变换电能质量扰动特征提取[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2769-2779.
LI Jianwen, QIN Gang, LI Yonggang, et al. Feature extraction based on S-transform of Blackman window and window ratio in power quality disturbances[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2769-2779.

[10] 袁莉芬, 张成林, 尹柏强, 等. 基于最优 Bohman 窗的改进 S 变换电能质量扰动特征精确快速提取方法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(11): 3796-3805.
YUAN Lifen, ZHANG Chenglin, YIN Baiqiang, et al.

- Accurate and fast feature extraction method of power quality disturbances based on modified S-transform of optimal Bohman window[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(11): 3796-3805.
- [11] 尹柏强, 陈奇彬, 李兵, 等. 基于改进 Kaiser 窗快速 S 变换和 LightGBM 的电能质量扰动识别与分类新方法[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(24): 8372-8384.
- YIN Baiqiang, CHEN Qibin, LI Bing, et al. A new method for identification and classification of power quality disturbance based on modified Kaiser window fast S-transform and LightGBM[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(24): 8372-8384.
- [12] LIANG Chengbin, TENG Zhaosheng, LI Jianmin, et al. Improved S-transform for time-frequency analysis for power quality disturbances[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(4): 2942-2952.
- [13] 尹柏强, 何怡刚, 朱彦卿. 一种广义 S 变换及模糊 SOM 网络的电能质量多扰动检测和识别方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(4): 866-872.
- YIN Baiqiang, HE Yigang, ZHU Yanqing. Detection and classification of power quality multi-disturbances based on generalized S-transform and fuzzy SOM neural network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(4): 866-872.
- [14] 兰金晨, 朱革兰, 李松奕. 基于广义 S 变换突变识别的暂稳态谐波检测方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(23): 40-46.
- LAN Jinchen, ZHU Gelan, LI Songyi. Detection method of transient and steady state harmonics based on generalized S-transform mutation recognition[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(23): 40-46.
- [15] 李建闽, 林海军, 梁成斌, 等. 基于双分辨率 S 变换和学习向量量化神经网络的电能质量扰动检测方法[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(16): 3453-3463.
- LI Jianmin, LIN Haijun, LIANG Chengbin, et al. Detection method of power quality disturbances based on double resolution S transform and learning vector quantization neural network[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(16): 3453-3463.
- [16] TANG Qiu, QIU Wei, ZHOU Yicong. Classification of complex power quality disturbances using optimized S-transform and kernel SVM[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(11): 9715-9723.
- [17] 杨剑锋, 姜爽, 石戈戈. 基于分段改进 S 变换的复合电能质量扰动识别[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(9): 64-71.
- YANG Jianfeng, JIANG Shuang, SHI Gege. Classification of composite power quality disturbances based on piecewise-modified S transform[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(9): 64-71.
- [18] 李盼, 娄钊瑜, 马康, 等. 一种自适应 S 变换在电能质量特征提取中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(22): 7660-7668.
- LI Pan, LOU Zhaoyu, MA Kang, et al. Application of adaptive S-transform in power quality feature extraction[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(22): 7660-7668.
- [19] 王飞, 王立辉, 周少武, 等. 基于双分支并联的特征融合电能质量扰动分类方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(5): 178-187.
- WANG Fei, WANG Lihui, ZHOU Shaowu, et al. A dual-branch parallel-based feature fusion approach for power quality disturbance classification[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(5): 178-187.
- [20] CAICEDO J E, AGUDELO-MARTÍNEZ D, RIVAS-TRUJILLO E, et al. A systematic review of real-time detection and classification of power quality disturbances[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(1): 30-66.
- [21] MOUKADEM A, BOUGUILA Z, ABDESLAM D O, et al. A new optimized Stockwell transform applied on synthetic and real non-stationary signals[J]. *Digital Signal Process*, 2015, 46: 226-238.
- [22] 袁莉芬, 李松, 尹柏强, 等. 基于自适应快速 S 变换和 XGBoost 的心电信号精确快速分类方法[J]. *电子与信息学报*, 2023, 45(4): 1464-1474.
- YUAN Lifeng, LI Song, YIN Baiqiang, et al. Accurate and fast ElectroCardioGram classification method based on adaptive fast S-transform and XGBoost[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(4): 1464-1474.
- [23] 毕贵红, 鲍童语, 陈臣鹏, 等. 基于混合分解多尺度时频图和 Res-GRU-AT 的电能质量复合扰动识别[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(4): 12-25.
- BI Guihong, BAO Tongyu, CHEN Chenpeng, et al. Composite PQDs identification based on a hybrid decomposition multi-scale time-frequency map and Res-GRU-AT[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(4): 12-25.
- [24] IEEE. IEEE recommended practice for monitoring electric power quality: IEEE Std 1159—2019[S]. New York, USA: IEEE, 2019.
- [25] 中国国家标准化管理委员会. 电能质量—电压暂升、电压暂降与短时中断: GB/T 30137—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- Standardization Administration of the P. R. C. Power quality—voltage swell, voltage dips and short interruptions: GB/T 30137—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.

收稿日期: 2024-09-28; 修回日期: 2025-01-09

作者简介:

位俊明(2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量检测及分析; E-mail: weijunming1553@163.com

郑丽君(1981—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子变压器。E-mail: bench621@163.com

(编辑 周金梅)