DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.36 **中图分类号**：TM711 **文献标志码**：A

计及背景谐波时变特征的系统谐波阻抗估计方法

王小明[1]，郑 浩[2]，赵文广[1]，文 一[3]，朱明星[3](中国电源学会高级会员)，丁 同[3]

(1.国网安徽省电力有限公司电力科学研究院，合肥 230601；2.国网安徽省电力有限公司，合肥 230022；3.安徽大学电气工程与自动化学院，合肥 230601)

摘要：准确估计系统谐波阻抗是开展谐波溯源的关键。现有方法大多基于背景谐波保持不变或平滑波动的前提，但在新型电力系统中，背景谐波电压或系统谐波阻抗通常呈现非平滑波动特征，甚至在某些时间断面发生突变，导致现有方法产生较大的计算误差。针对此，提出1种计及背景谐波时变特征的系统谐波阻抗估计方法。首先，利用二分滑动 T 极大值，辨识出背景谐波的多个突变点，据此将公共连接点PCC(point of common coupling)处谐波监测数据划分为若干连续非平滑波动的区间；然后，在每个数据区间内，考虑相邻采样点背景谐波波动较小的特征，基于综合最小波动量原理开展系统谐波阻抗估计，并引入矩阵稀疏技术降低计算时间复杂度；最后，利用仿真和实际工程案例数据开展对比分析，结果表明，所提方法相比现有方法可以更加准确地估计系统谐波阻抗，且具有更高的计算效率。

关键词：系统谐波阻抗；背景谐波突变；连续非平滑波动；二分滑动 T 极大值；综合最小波动量

Utility Harmonic Impedance Estimation Method Considering Time-varying Characteristics of Background Harmonics

WANG Xiaoming[1], ZHENG Hao[2], ZHAO Wenguang[1], WEN Yi[3], ZHU Mingxing[3], *Senior Member, CPSS*, DING Tong[3]

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230601, China; 2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: An accurate estimation of utility harmonic impedance is the key to harmonic source determination. Most of the existing methods are based on the premise that the background harmonics keep constant or fluctuate smoothly. However, the background harmonic voltage or utility harmonic impedance generally exhibits unsmooth fluctuation patterns in the novel power system, and there are even abrupt changes in some time sections, which leads to large calculation errors in the existing methods. To solve this problem, an estimation method for utility harmonic impedance considering the time-varying characteristics of background harmonics is proposed. First, this method identifies multiple abrupt change points of background harmonics by means of the binary sliding T maximum, and the measured harmonic data at a point of common coupling (PCC) is divided into several intervals of continuous unsmooth fluctuation accordingly. Then, with the consideration of the small variation of background harmonics between adjacent sampling points, utility harmonic impedance estimation is carried out based on the principle of comprehensive minimum fluctuation within each data interval, and the matrix sparse technique is introduced to reduce the computational time complexity. Finally, simulations and field data are adopted to conduct a

收稿日期：2024-10-21；**修回日期**：2024-11-22；**录用日期**：2024-12-05；**网络首发日期**：2024-12-11

基金项目：国家电网有限公司科技资助项目(52120524000X)

This work is supported by the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China under the grant 52120524000X

comparative analysis, and results indicate that compared with the existing methods, the proposed method can more accurately estimate the utility harmonic impedance and demonstrate a higher computational efficiency.

Keywords: Utility harmonic impedance; abrupt change in background harmonics; continuous unsmooth fluctuation; binary sliding *T* maximum; comprehensive minimum fluctuation

随着各类电力电子设备大规模接入新型电力系统源网荷端，发射了大量谐波并向全网进一步渗透[1]，导致谐波污染问题日益严峻，并呈现强随机性和时变性等新特征[2]，对谐波监测、分析与治理提出了更高要求。为了加强谐波监管，国家发展和改革委员会发布了第 8 号令《电能质量管理办法(暂行)》[3]，国外有关机构则提出了“谐波奖惩性制度”的构想[4]。这些工作都强调了开展谐波溯源的迫切需求和重要意义，而实现谐波溯源的关键在于准确估计系统谐波阻抗。

现有系统谐波阻抗估计方法主要可分为“干预式”和“非干预式”这 2 类[5]。其中，“非干预式”方法因依靠实测数据驱动且不会对电网正常运行造成干扰，得到了更加广泛的应用，主要包括波动量法[6]、线性回归法[7]、独立矢量协方差法[8]、独立分量分析法[9]等。上述方法大多基于背景谐波电压或系统谐波阻抗保持不变的前提，但是，风电、光伏等波动性新能源大规模并入电网，导致背景谐波电压动态时变；电网运行方式变化或电力设备投切，造成系统谐波阻抗随时间变化，从而影响了传统“非干预式”方法的准确性。

为了应对背景谐波参数(背景谐波电压和系统谐波阻抗)时变对准确估计系统谐波阻抗的不利影响，国内外学者相继提出了谐波筛选分段与背景谐波建模 2 类方法[10]。谐波筛选分段法利用稀疏 *k*-means[11]、动态时间弯曲距离[12]、线性动态聚类[13]等技术对公共连接点 PCC(point of common coupling)谐波监测数据进行筛选，识别出背景谐波参数相对保持稳定的数据区间，并分段计算系统谐波阻抗。背景谐波建模法通过构建背景谐波电压和系统谐波阻抗波动特性的表征模型，采用部分线性核估计[14]、阻抗波动最小准则[15]、最小加权变化量[16]等技术对模型参数进行辨识。这些工作为系统谐波阻抗估计领域的发展做出了积极贡献。

然而，现有研究大多聚焦背景谐波参数连续平滑波动的场景。在新型电力系统中，逆变型新能源发电和电力电子型负荷的谐波发射水平存在显著的随机性与波动性，网架拓扑和阻抗参数也动态变化，上述源网荷侧的不确定性因素导致背景谐波电压和系统谐波阻抗往往呈现非平滑波动特征[17]。特别地，由于短路故障、大容量电源、负荷或电容器投切等因素，可能引起背景谐波参数在某些时间断面发生突变。现有方法未考虑背景谐波突变、连续非平滑波动等特征对系统谐波阻抗估计造成的干扰，可能在上述场景下难以达到预期的计算精度。

针对上述问题，提出 1 种计及背景谐波时变特征的系统谐波阻抗估计方法。首先，利用二分滑动 *T* 极大值检验法，辨识背景谐波电压和系统谐波阻抗的多个突变点，并将 PCC 处实测谐波数据划分为若干连续非平滑波动的区间；然后，计及各数据区间内相邻采样点背景谐波波动相对较小的特征，提出基于综合最小波动量原理的系统谐波阻抗求解方法，并引入矩阵稀疏技术减小计算冗余度；最后，通过仿真和实际案例分析，对所提方法的有效性进行验证。

1　系统谐波阻抗估计模型

在 PCC 处将系统侧背景谐波等效为谐波电压源，将非线性用户等效为谐波电流源，构建折算到同一电压等级的谐波分析等效模型[18]，如图 1 所示。图中：$\dot{U}_{\mathrm{S},h}$ 为 h 次背景谐波电压；$Z_{\mathrm{S},h}$ 为 h 次系统谐波阻抗；$\dot{U}_{\mathrm{PCC},h}$ 与 $\dot{I}_{\mathrm{PCC},h}$ 分别为 PCC 处 h 次谐波电压与电流；$\dot{I}_{\mathrm{C},h}$ 为 h 次用户谐波电流；$Z_{\mathrm{C},h}$ 为 h 次用户谐波阻抗；h=2, 3, 4, …

根据基尔霍夫电压定律，由图 1 可得

$$\dot{U}_{\mathrm{PCC},h}=\dot{I}_{\mathrm{PCC},h}Z_{\mathrm{S},h}+\dot{U}_{\mathrm{S},h} \tag{1}$$

由式(1)可见，若假设分析时段内 $\dot{U}_{\mathrm{S},h}$ 和 $Z_{\mathrm{S},h}$ 保

持恒定，则$\dot{U}_{\mathrm{PCC},h}$与$\dot{I}_{\mathrm{PCC},h}$之间存在线性关系，可利用线性回归法等传统“非干预式”方法计算$Z_{\mathrm{S},h}$。但实际情况下背景谐波参数通常具有动态时变性，导致传统方法失效。谐波筛选分段与背景谐波建模等改进方法将$\dot{U}_{\mathrm{S},h}$和$Z_{\mathrm{S},h}$视为变量，但大多仅关注其平滑波动场景。由于新型电力系统中$\dot{U}_{\mathrm{S},h}$和$Z_{\mathrm{S},h}$往往呈现非平滑波动甚至发生突变，现有方法容易产生较大的计算误差。因此，有必要研究适用于背景谐波参数非平滑波动及突变场景的系统谐波阻抗估计方法。

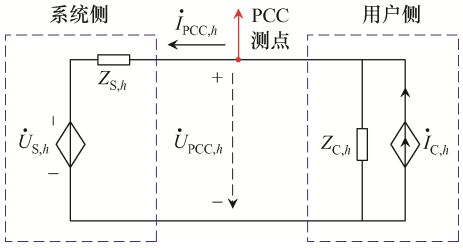


图 1 系统谐波阻抗估计模型

Fig. 1 Model of utility harmonic impedance estimation

2 基于二分滑动 T 极大值的背景谐波突变点辨识

当背景谐波参数发生大幅度突变时，突变点附近的系统谐波阻抗估计值一般会远离实际值，因此需要事先开展突变点辨识。背景谐波突变会导致PCC处实测谐波电压或电流的突变，此种信号中高频含量较高，且变化并无周期性。滑动T检验法[19]常用于检测突变点，可以检验2段正态或近似正态的数据是否具有相同的均值，该方法输入参数少，但其只能实现单个突变点的准确识别。由于分析时段内背景谐波参数往往存在多个突变点，因此本文在滑动T检验法的基础上提出1种新型多突变点辨识方法，即二分滑动T极大值法。

根据滑动窗理论[20]，首先确定滑动窗宽和滑动步长。为了保证遍历所有实测谐波数据并提高突变点辨识的精度，选择滑动步长r=1。传统滑动T检验法采用固定的滑动窗宽，这可能导致突变点错误辨识或遗漏，鉴于此，采用可调节的滑动窗宽，其取值方式为

$$W(i)=2^{\mathrm{floor}\{\log_2^n\}+1-i} \qquad i=1,2,\cdots \tag{2}$$

式中：floor{·}为向下取整的函数；n为待分析的实测谐波数据的长度。

由式(2)可见，$W(i)$是公比为2的等差数列。由于后续的T检验需要将每个窗口进行等分，而$W(i)/2$=1对T检验而言无实际意义，因此$W(i)$的最小值应为4。

将每个滑动窗内的数据平均分为2段，长度各为$W(i)/2$，然后依次进行T检验。统计量T_i的计算方法为

$$\begin{cases} T_i=\dfrac{\bar{X}_{\mathrm{LW}}-\bar{X}_{\mathrm{RW}}}{S_i} \\ S_i=\sqrt{\dfrac{S_{\mathrm{LW}}^2}{W(i)/2}+\dfrac{S_{\mathrm{RW}}^2}{W(i)/2}} \end{cases} \tag{3}$$

式中：$\bar{X}_{\mathrm{LW}}$、$\bar{X}_{\mathrm{RW}}$分别为滑动窗内左段、右段数据的平均值；S_{LW}与S_{RW}分别为滑动窗内左段、右段数据的标准差。

按照滑动窗宽$W(i)$和滑动步长r=1遍历实测谐波数据，将所有数据分为J个窗口，依次对J组数据进行T检验，根据式(3)计算其统计量T_i，并确定所有的极大值$T_{i,\mathrm{peak}}$。此外，查询T检验表，得到自由度$W(i)-2$和显著性水平α对应的统计量$T_{W(i)-2,\alpha/2}$。为了保证每个滑动窗内最多只有1个突变点，对极大值$T_{i,\mathrm{peak}}$进行3步筛选：第1步筛选，若$T_{i,\mathrm{peak}}>T_{W(i)-2,\alpha/2}$，则将对应的极大值点视为嫌疑突变点，记作$T_{i,\mathrm{peak1}}$；第2步筛选，若2个相邻$T_{i,\mathrm{peak1}}$的间隔大于$W(i)-1$，则将其记作$T_{i,\mathrm{peak2}}$；第3步筛选，若$T_{i,\mathrm{peak2}}$在其前后$W(i)/2$的范围内依旧是最大值，则将其记作$T_{i,\mathrm{peak3}}$，并视为最终辨识出的突变点。引入上述多重筛选机制，有助于识别真实的突变点，有效避免暂态过程等“伪突变”的干扰。而且，根据国标GB/T 14549—1993和GB/T 17626.30—2023中规定的谐波测量方法，取3 s的统计值进行存储，也有助于区分谐波和暂态过程，因此，暂态的变化不会影响所提方法的性能。

由上述分析可以看出，滑动窗宽的选取将会影响突变点辨识结果。如果$W(i)$过小，由T检验表可知，此时$T_{W(i)-2,\alpha/2}$非常大，难以找到满足筛选条件

的突变点，可能出现漏检的情况；如果 $W(i)$过大，某个滑动窗内可能存在多个突变点，此时待检验的 2 段数据不再呈正态或近似正态分布，从而导致 T 检验结果无效。采用可调节的滑动窗宽，有助于选取合适的 $W(i)$，降低漏检和误检发生的概率，保障突变点辨识的准确性。需要说明的是，若多个不同窗宽检测到的突变点一致，则选用最大窗宽，因为其包含更加丰富的数据信息，辨识结果可信度更高。

3　基于综合最小波动量的系统谐波阻抗估计

3.1 基本原理

以第 2 节辨识出的背景谐波突变点为界，实测谐波数据被划分成若干个区间，每个数据区间对应的 $\dot{U}_{\mathrm{S},h}$ 和 $Z_{\mathrm{S},h}$ 通常并非随时间变化的连续可导函数，造成许多现有方法难以取得预期效果。因此，在估计 $Z_{\mathrm{S},h}$ 时有必要考虑背景谐波参数的非平滑波动特征。

将式(1)改写为矩阵方程形式为

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}=\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}+\boldsymbol{U}_{\mathrm{S},h} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}=\left[\dot{U}_{\mathrm{PCC},h}(1)\quad \dot{U}_{\mathrm{PCC},h}(2)\quad \cdots\quad \dot{U}_{\mathrm{PCC},h}(n)\right]^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}=\begin{bmatrix}\dot{I}_{\mathrm{PCC},h}(1) & 0 & \cdots & 0\\ 0 & \dot{I}_{\mathrm{PCC},h}(2) & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ 0 & 0 & \cdots & \dot{I}_{\mathrm{PCC},h}(n)\end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}=\left[Z_{\mathrm{S},h}(1)\quad Z_{\mathrm{S},h}(2)\quad \cdots\quad Z_{\mathrm{S},h}(n)\right]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{S},h}=\left[\dot{U}_{\mathrm{S},h}(1)\quad \dot{U}_{\mathrm{S},h}(2)\quad \cdots\quad \dot{U}_{\mathrm{S},h}(n)\right]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

式中，上标“T”表示矩阵转置。

考虑到每个数据区间内 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{S},h}$ 和 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}$ 呈现连续非平滑波动，可认为 2 个相邻采样点间的 $\dot{U}_{\mathrm{S},h}$ 和 $Z_{\mathrm{S},h}$ 变化相对较小[21]。在此基础上，构造 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{S},h}$ 和 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}$ 波动量综合最小化的目标函数，表示为

$$\min\left\{\left\|\boldsymbol{B}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}\right\|_2+\lambda\left\|\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}_{\mathrm{S},h}\right\|_2\right\} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}-1 & 1 & 0 & \cdots & 0\\ 0 & -1 & 1 & & \vdots\\ \vdots & & \vdots & & 0\\ 0 & \cdots & 0 & -1 & 1\end{bmatrix}_{(n-1)\times n} \tag{10}$$

式中，$\|\ \|_2$ 表示 2 范数；λ 为权重系数。通过调节 λ，使得 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{S},h}$ 和 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}$ 的波动量对目标函数有相同水平的贡献，达到将目标函数最小化的目的。λ 的取值可以参考文献[16]中提出的方法，即

$$\lambda=\underset{\lambda\in\left[10^{-8},10^{8}\right]}{\arg\min}\left\{\left|\rho a_1-a_2\right|\right\} \tag{11}$$

式中：a_1 和 a_2 分别为 $\left\|\boldsymbol{B}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}\right\|_2$ 和 $\left\|\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}_{\mathrm{S},h}\right\|_2$ 对式(9)所示目标函数最小化的归一化贡献；ρ 为 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}$ 的平滑系数，与 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}$ 的平滑程度成正比。由于实际工程中 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{S},h}$ 的波动程度一般大于 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}$，因此选择 $\rho=10$ 以保持式(9)中 2 个元素对目标函数最小化贡献的相对平衡。a_1 和 a_2 的取值方法可表示为

$$\begin{cases}a_1=\dfrac{\mathrm{mean}\left\{\left|\boldsymbol{B}\hat{\boldsymbol{Z}}_{\mathrm{S},h}\right|\right\}}{\mathrm{mean}\left\{\left|\hat{\boldsymbol{Z}}_{\mathrm{S},h}\right|\right\}}\\ a_2=\dfrac{\mathrm{mean}\left\{\left|\boldsymbol{B}\hat{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{S},h}\right|\right\}}{\mathrm{mean}\left\{\left|\hat{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{S},h}\right|\right\}}\end{cases} \tag{12}$$

式中，$\hat{\boldsymbol{U}}_{\mathrm{S},h}$ 和 $\hat{\boldsymbol{Z}}_{\mathrm{S},h}$ 分别为 h 次背景谐波电压和系统谐波阻抗的估计值。

将式(9)进一步展开得到

$$\begin{aligned}&\lambda\left\|\boldsymbol{B}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}\right\|_2+\left\|\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}_{\mathrm{S},h}\right\|_2=\lambda\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}+(\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}-\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h})^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}(\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}-\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h})=\lambda\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}+\\&\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}-\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}-\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}+\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}+\boldsymbol{U}_{\mathrm{S},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}_{\mathrm{S},h}=\\&\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}^{\mathrm{H}}(\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}+\lambda\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}^{\mathrm{H}}-\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}+\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}(\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}+\\&\lambda\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}-\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}(\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}+\lambda\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}-\\&\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}+\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}=\left\|(\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}+\lambda\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{1/2}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{S},h}-(\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}+\right.\\&\left.\lambda\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1/2}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}\right\|_2-\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}(\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}{}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}+\lambda\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}+\\&\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}\end{aligned} \tag{13}$$

式中，上标“H”表示共轭矩阵。

式(13)所得最终结果中的 2 范数项为正值，其余项为常数。为了实现目标函数最小化，可将 2 范数项设为 0，进而求解系统谐波阻抗，即

$$\hat{\boldsymbol{Z}}_{\mathrm{S},h}=(\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}+\lambda\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\cdot \boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h} \tag{14}$$

3.2 矩阵稀疏技术

在原始算法中，由式(6)和式(10)可知，矩阵 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}$ 为对角线元素不为 0、其余元素均为 0 的 $n\times n$ 阶稀疏矩阵，矩阵 $\boldsymbol{B}$ 为 2 条对角线元素不为 0、其余元素均为 0 的 $(n-1)\times n$ 阶稀疏矩阵。上述 0 元素也会参与式(9)~式(14)的计算，但均无实际意义，反而使计算时间复杂度明显增加，尤其是当矩阵维度较高时，原始算法的计算效率将大打折扣。鉴于此，对 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 进行稀疏表示

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}=\begin{bmatrix}\dot{I}_{\mathrm{PCC},h}(1) & & & \\ & \dot{I}_{\mathrm{PCC},h}(2) & & \\ & & \vdots & \\ & & & \dot{I}_{\mathrm{PCC},h}(n)\end{bmatrix} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}-1 & 1 & & \\ & -1 & 1 & \\ & & \vdots & \vdots \\ & & & -1 \quad 1\end{bmatrix}_{(n-1)\times n} \tag{16}$$

这使得计算过程中产生的 0 元素无需参与后续计算，从而达到节约计算时间的效果。原始算法和改进算法的计算时间复杂度对比见表 1，可见，原始算法的计算时间复杂度为 $O(n^3)$，而改进算法为 $O(n^2)$。因此，$\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 经稀疏处理，可以在不改变计算步骤的前提下显著提升计算效率。

3.3 所提方法实施流程

综上所述，所提方法包括 2 个阶段：首先进行背景谐波突变点辨识，根据突变点将实测谐波数据划分为若干连续非平滑波动的区间；然后在每个数据区间内开展系统谐波阻抗估计。具体实施流程如图 2 所示。

表 1 2 种算法的计算时间复杂度对比

Tab. 1 Comparison of computational time complexity between two methods

算法步骤	原始算法	改进算法
$\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}$	$n\times n\times(n-1)$	$n\times(n-1)$
$\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}$	$n\times(n-1)\times n$	n^2
$\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}$	n^3	n^2
$\lambda\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}$	$n\times(n-1)\times n$	n^2
$(\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}+\lambda\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}$	n^3	n^2
$(\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}+\lambda\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}$	n^3	n^2
$(\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}+\lambda\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\cdot \boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}$	$n\times n\times(n-1)$	$n\times(n-1)$
$(\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}+\lambda\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\cdot \boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}$	$n\times(n-1)\times n$	n^2
$(\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}+\lambda\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\cdot \boldsymbol{I}_{\mathrm{PCC},h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}_{\mathrm{PCC},h}$	n^2	n
总计	$8n^3-4n^2$	$8n^2-n$

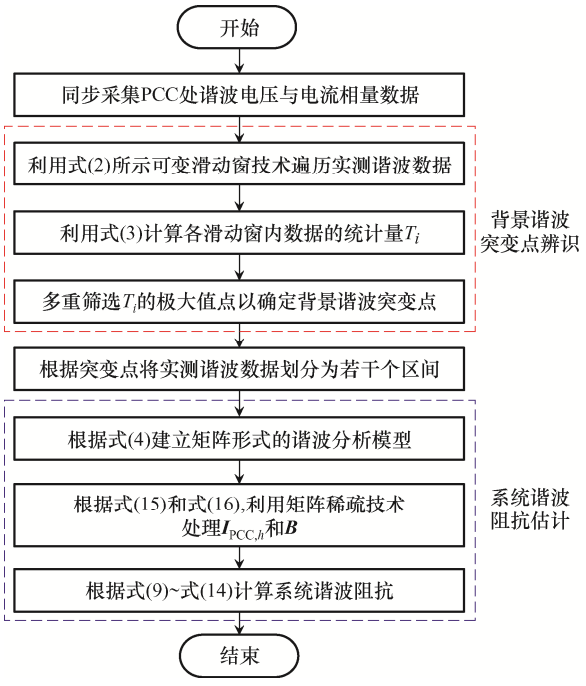


图 2 所提方法实施流程

Fig. 2 Flow chart of proposed method

4 算例分析

4.1 仿真参数设置

为验证所提方法的有效性，基于 MATLAB/

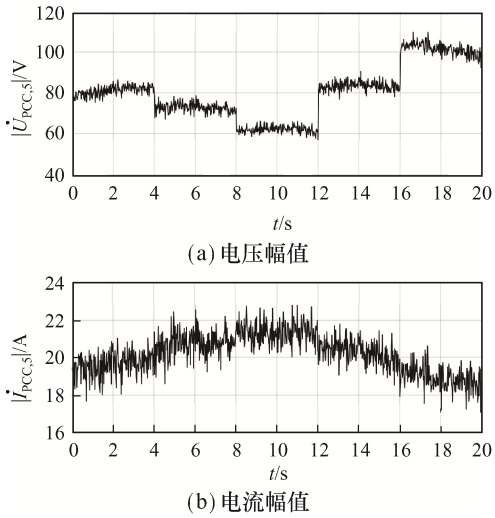
Simulink 构建如图 1 所示的系统谐波阻抗估计模型。以 5 次谐波为例，分析流程同样适用于其他频次谐波。具体仿真参数见表 2。

设置仿真时长为 20 s，每 0.02 s 采样 1 次，共得到 1 000 组样本数据。为了模拟背景谐波参数突变场景，令 $\dot{U}_{S,5}$ 在 4 s 和 16 s 发生突变，$Z_{S,5}$ 在 8 s 和 12 s 发生突变。由于用户侧谐波电流源不直接参与系统谐波阻抗估计，且谐波电流源突变仅造成 PCC 处谐波数据突变点和区间划分数量的增加，不会影响所提方法利用区间内数据计算系统谐波阻抗的性能，因此仿真分析中未设置 $\dot{I}_{C,5}$ 发生突变。图 3 为仿真时段内 PCC 处 5 次谐波电压和电流幅值的变化趋势。

表 2　仿真参数设置

Tab. 2 Setting of simulation parameters

参数	均值	正弦波动	随机扰动
$\dot{I}_{C,5}$/A	20∠35°	20%	±10%
$Z_{C,5}$/Ω	2+j20	20%	±10%
$\dot{U}_{S,5}$/V	10∠120°(0~4 s) 30∠120°(4~16 s) 20∠120°(16~20 s)	20%	±5%
$Z_{S,5}$/Ω	0.10+j2.5 (0~8 s) 0.08+j2.0 (8~12 s) 0.12+j3.0 (12~20 s)	20%	±5%



(a) 电压幅值

(b) 电流幅值

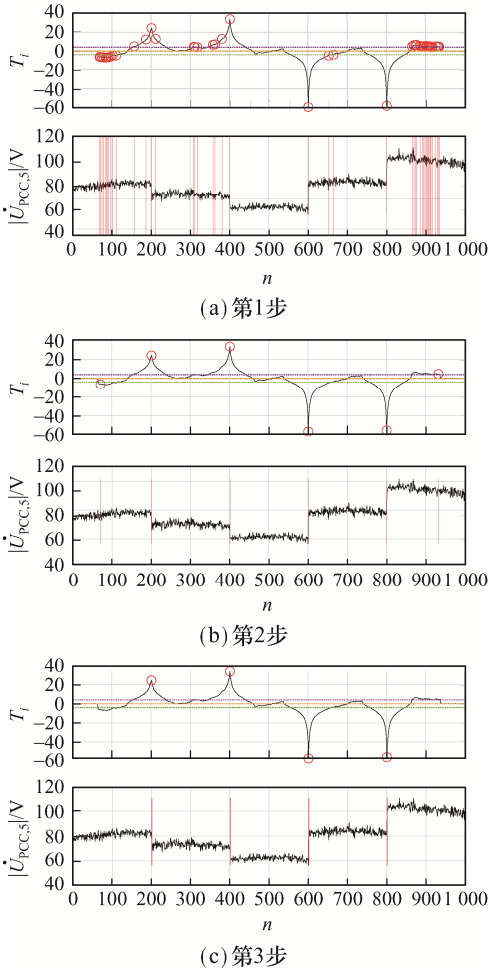
图 3　PCC 处 5 次谐波电压与电流幅值变化趋势

Fig. 3 Varying trends of 5th harmonic voltage and current amplitudes at PCC

4.2　背景谐波突变点辨识方法有效性分析

由图 3 可见，整个采样时间内 $|\dot{U}_{PCC,5}|$ 比 $|\dot{I}_{PCC,5}|$ 的突变点位置更容易分辨，且突变时刻与背景谐波参数突变时刻一一对应，因此采用所提二分滑动 T 极大值法来检测 $|\dot{U}_{PCC,5}|$ 的突变点。

图 4 为滑动窗宽为 2^7、显著性水平 α/2=0.001 时的突变点多重筛选示意，可见，第 1 步筛选初步锁定所有嫌疑的统计量 T_i 极大值点，第 2 步筛选通过附加约束条件缩小选择范围，第 3 步筛选最终确定背景谐波突变点。由此可见，所提方法在滑动窗宽选取合适的情况下表现出良好的辨识性能。



(a) 第1步

(b) 第2步

(c) 第3步

图 4　突变点的 3 步筛选结果

Fig. 4 Three-step screening results of abrupt change points

为了检验滑动窗宽取值造成的影响，在不同滑动窗宽下开展突变点辨识，结果见表 3。

由表 3 可知：当 $W(i)$设置过小(如 $W(i)=2^2$)时，自由度 $W(i)-2$ 也过小，由 T 检验表可知，此时判

表 3 不同滑动窗宽下的突变点辨识结果对比

Tab. 3 Comparison of identification results of abrupt change points with different sliding window widths

滑动窗宽 $W(i)$	突变点
2^2	—
2^3	234、401、601、801
2^4~2^7	201、401、601、801
2^8	201、601

断指标 $T_{W(i)-2,\alpha/2}$ 非常大，难以找到满足 $T_{i,\text{peak}}>T_{W(i)-2,\alpha/2}$ 的极大值点，从而易导致突变点漏检的情况；当 $W(i)$设置过大(如 $W(i)=2^8>200$)时，在 1 个滑动窗内包含了 2 个突变点，导致窗内数据分布差异信息被掩盖，此时也会引起漏检；当 $W(i)$取值合适(如 $W(i)=2^3$~2^7)时，漏检和误检可以被有效避免，辨识出的突变点与预设的背景谐波参数突变时刻一一吻合，从而验证了所提可变窗宽技术的优势。考虑到较大的窗宽蕴含了更丰富的数据信息，本仿真算例选择 $W(i)=2^7$ 作为滑动窗宽。

进一步地，分别采用滑动 T 检验法和所提方法进行对比分析，二者的突变点辨识结果见表 4。滑动 T 检验法由于未进行 T 极大值多重筛选，故只能识别出单个突变点。相比之下，所提方法引入了可变窗宽技术和多重筛选机制，从而得到更准确的多突变点辨识结果。

表 4 不同方法的突变点辨识结果对比

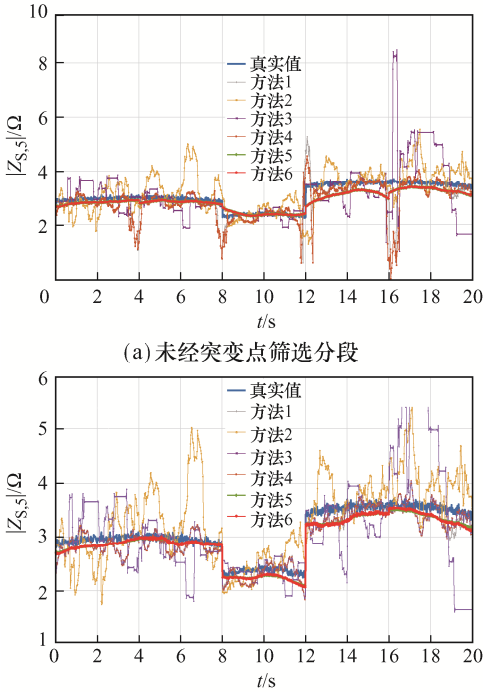
Tab. 4 Comparison of identification results of abrupt change points between different methods

方法	突变点
滑动 T 检验法	601
所提方法	201、401、601、801

4.3 系统谐波阻抗估计方法有效性分析

分别采用 6 种方法计算系统谐波阻抗：方法 1 为线性回归法，方法 2 为波动量法，方法 3 为主导波动量法，方法 4 为独立矢量协方差法，方法 5 为最小加权变化量法，方法 6 为所提方法。此外，为了检验是否进行突变点辨识对系统谐波阻抗估计精度的影响，分别采用原始数据和经突变点筛选分段后的数据进行分析。

图 5 为 6 种方法在是否经突变点筛选分段情况下的 5 次系统谐波阻抗估计结果。为了进一步量化对比各方法的计算精度，引入平均绝对百分比误差 MAPE(mean absolute percentage error)[22]，计算结果见表 5。



(a) 未经突变点筛选分段

(b) 经突变点筛选分段

图 5 5 次系统谐波阻抗估计结果

Fig. 5 Estimated results of 5th utility harmonic impedance

表 5 5 次系统谐波阻抗计算误差对比

Tab. 5 Comparison of calculation errors of 5th utility harmonic impedance

方法	MAPE/%	
	未经突变点筛选分段	经突变点筛选分段
方法 1	9.560 5	5.642 1
方法 2	15.573 6	13.534 0
方法 3	17.576 5	15.620 9
方法 4	10.743 5	6.512 7
方法 5	6.198 3	3.359 1
方法 6	6.195 6	3.348 7

由图 5 和表 5 中可见，在未进行突变点辨识和数据分段时，前 4 种方法的计算误差较大，这是由于这些方法依赖于背景谐波参数保持不变的前提，在背景谐波突变点附近的计算结果易偏离真实值；而后 2 种方法计及了背景谐波参数的波动特征，因此体现出计算精度方面的优势。经突变点辨识和数

据分段后，6 种方法的计算精度均有所提升，这表明背景谐波筛选分段有助于改善系统谐波阻抗估计的准确性，证明了开展突变点辨识的必要性；所提方法的计算误差仍小于前 5 种方法，这是因为经筛选分段后的谐波数据呈现连续非平滑波动特征，所提方法通过最小化背景谐波参数的综合波动量，能够妥善处理这种时变特性，因此相比其他方法能够更为准确地估计系统谐波阻抗。

鉴于方法 5 和方法 6 的计算误差较为接近，为了进一步证明所提方法的优势，对 2 种方法的计算时间进行对比，结果见表 6。可以看出，方法 6 所需的计算时间相比方法 5 缩短了 83%。这是由于方法 5 涉及高维矩阵运算，计算时间复杂度较高，而所提方法通过引入稀疏矩阵技术，降低了计算时间复杂度，从而显著提升了计算效率，表明所提方法具有更佳的谐波阻抗在线计算应用前景。

表 6　2 种方法的计算时间对比

Tab. 6 Comparison of calculation time between two methods

方法	计算时间/s
方法 5	26.541 4
方法 6	4.410 3

5　工程实例分析

利用某地铁牵引供电系统实际案例数据进一步验证所提方法的实用性。该系统中 110 kV 牵引变电站由上级电网 220 kV 变电站供电，其 35 kV 母线连接地铁负荷，网络拓扑如图 6 所示。

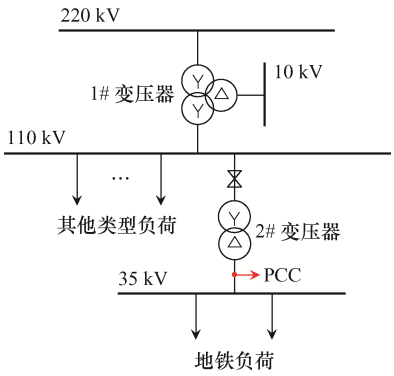


图 6　某地铁牵引供电系统拓扑

Fig. 6 Topology of a subway traction power supply system

将 2#变压器低压侧出线作为 PCC，利用录波设备测量 PCC 处的电压和电流波形数据，测试时间为 22 h，采样频率为 6.4 kHz。利用离散傅里叶变换对录波数据进行谐波分析，分析时间间隔为 5 s，共获取 15 840 组谐波数据样本。因分析结果显示 11 次谐波含量较高，故以 11 次谐波为例，图 7 为测试时段内 PCC 处 C 相谐波电压幅值变化趋势。可见，PCC 处 11 次谐波电压在第 4 h 和第 21 h 附近发生突变。

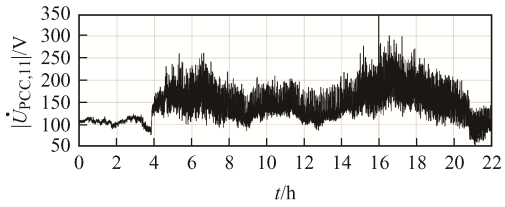
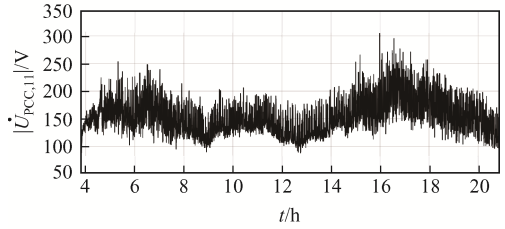


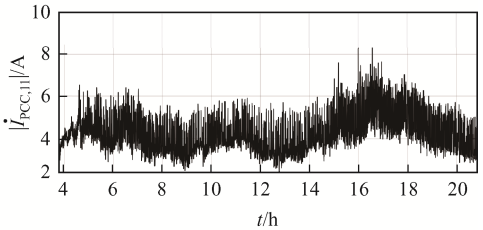
图 7　PCC 处 C 相 11 次谐波电压幅值变化趋势

Fig. 7 Varying trend of 11th phase-C harmonic voltage amplitude at PCC

利用所提二分滑动 T 极大值法对图 7 所示谐波时序数据开展突变点辨识，根据滑动窗宽自适应调节结果设置 $W(i)=2^{10}$，显著性水平 $\alpha/2=0.001$，结果显示突变点位于第 2 751 个和第 14 998 个样本点，分别对应测试时间的第 3.8 h 和第 20.8 h，与观察结果吻合。选取 2 个突变点之间的 PCC 处谐波电压与电流数据用于系统谐波阻抗估计，如图 8 所示。



(a) 电压幅值



(b) 电流幅值

图 8　2 个突变点间的 PCC 处 11 次谐波幅值数据

Fig. 8 Eleventh harmonic amplitude data at PCC between two abrupt change points

利用 4.3 节所述的 6 种方法分别计算 11 次系统谐波阻抗，结果如图 9 所示。

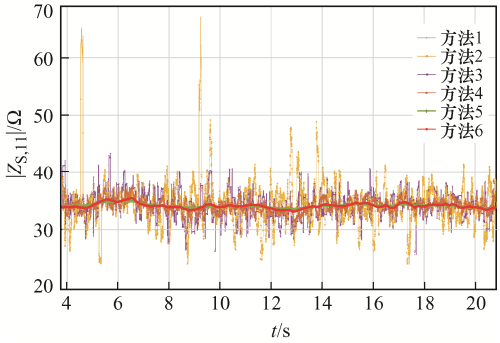


图 9 11 次系统谐波阻抗估计结果

Fig. 9 Estimated results of 11th utility harmonic impedance

由于该案例中 11 次系统谐波阻抗的真实值未知，为了定量评价各方法在实际应用中的性能，根据文献[23-24]提出的系统稳定运行时较短时间内系统谐波阻抗基本不变这一特征，引入波动率 VIX(volatility index)指标[25]，用于度量系统谐波阻抗估计值的离散程度，可表示为

$$\mathrm{VIX}=\frac{1}{\sum_{k=1}^{n}\left|\hat{Z}_{\mathrm{S},11}(k)\right|\Big/n}\cdot\sqrt{\sum_{k=1}^{n}\left[\left|\hat{Z}_{\mathrm{S},11}(k)\right|-\sum_{k=1}^{n}\left|\hat{Z}_{\mathrm{S},11}(k)\right|\Big/n\right]^{2}\Big/n} \tag{17}$$

式中，$|\hat{Z}_{\mathrm{S},11}(k)|$为第 k 个样本处的 11 次系统谐波阻抗估计值。

6 种方法的波动率计算结果见表 7。由图 9 和表 7 可见，所提方法的系统谐波阻抗估计值最为稳定，且波动率小于其他 5 种方法，仅为 1.477 1%。由于所采用的实测谐波数据位于 2 个突变点之间，分析时段内系统谐波阻抗真实值未发生明显改变，而且系统谐波阻抗主要与变压器谐波阻抗有关，在较短的时间内通常相对稳定，因此波动率越小表明计算结果越可信，所提方法相比其他方法表现出更好的鲁棒性和工程适用性。

表 7 不同方法的波动率对比

Tab. 7 Comparison of VIX among different methods

方法	VIX/%
方法 1	4.409 5
方法 2	16.340 2
方法 3	8.810 7
方法 4	4.410 6
方法 5	2.016 0
方法 6	1.477 1

进一步地，对比所提方法和方法 5 的计算耗时，结果见表 8。可见，所提方法仅耗时 27.643 8 s，相比方法 5 的计算时间缩短了 96%，显著改善了计算效率，展现出更佳的工程应用前景。

表 8 工程案例中 2 种方法的计算时间对比

Tab. 8 Comparison of calculation time between two methods in the field case

方法	计算时间/s
方法 5	703.178 2
方法 6	27.643 8

6 结论

针对背景谐波参数非平滑波动乃至突变场景下的系统谐波阻抗估计问题，本文提出 1 种计及背景谐波时变特征的两阶段方法。通过仿真分析与工程实例验证，得出如下结论。

(1)所提二分滑动 T 极大值法根据样本容量采用可调节的滑动窗宽，并引入 T 检验统计量极大值多重筛选机制，能够更加准确地识别背景谐波参数的多个突变点，有助于缓解背景谐波突变对系统谐波阻抗估计精度的不利影响。

(2)所提综合最小波动量法通过最小化背景谐波电压和系统谐波阻抗的综合波动，能够妥善应对背景谐波连续非平滑波动特征，相比现有方法可以更加准确地估计系统谐波阻抗，而且在实际工程应用中表现出更好的计算稳定性。

(3)在计算系统谐波阻抗过程中引入矩阵稀疏技术，免于 0 元素参与复杂的矩阵运算，可以有效降低计算时间复杂度，提升计算效率。仿真和实测数据分析结果显示，所提方法的计算耗时相比现有方法分别缩短了 83%和 96%，展现出更好的实际工程应用前景。

参考文献：

[1] 朱明星，张晓刚. LED 驱动电路超高次谐波发射机理研

究[J]. 电源学报, 2021, 19(2): 198-206.
Zhu Mingxing, Zhang Xiaogang. Study on supraharmonics emission mechanism for LED drive circuit [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(2): 198-206. (in Chinese)

[2] 黄珺，杨快荣，何许国，等. 单相矩阵式 WPT 系统网侧电流谐波抑制策略[J]. 电源学报，2025，23(2)：171-178.
Huang Jun, Yang Kuairong, He Xuguo, et al. Harmonic suppression strategy for grid-side current in single-phase matrix converter based wireless power transfer system [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 171-178. (in Chinese)

[3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会第 8 号令. 电能质量管理办法(暂行)[EB/OL]. [2024-01-10]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/fzggwl/202401/t20240110_1363202.html.

[4] Budhavarapu J, Thirumala K, Mohan V, et al. Tariff structure for regulation of reactive power and harmonics in prosumer-enabled low voltage distribution networks [J]. Energy Economics, 2022, 114: 106309.

[5] 刘子腾，徐永海，陶顺. 新能源并网下谐波责任定量评估方法研究现状与展望[J]. 电力自动化设备，2020，40(11)：203-213.
Liu Ziteng, Xu Yonghai, Tao Shun. Research status and prospect of harmonic responsibility quantitative evaluation method under grid-connection of new energy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 203-213. (in Chinese)

[6] 汤波，林顺富，陈光，等. 居民配电网负荷谐波电流发射水平评估方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 533-542.
Tang Bo, Lin Shunfu, Chen Guang, et al. The harmonic current emission level of the residential loads in the distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 533-542. (in Chinese)

[7] 林顺富，李育坤，程卫健，等. 一种改进递推最小二乘的系统谐波阻抗估计方法[J]. 电网技术，2023，47(7)：2879-2890.
Lin Shunfu, Li Yukun, Cheng Weijian, et al. Improved recursive least square method for system harmonic impedance estimation [J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2879-2890. (in Chinese)

[8] Hui Jin, Yang Honggeng, Lin Shunfu, et al. Assessing utility harmonic impedance based on the covariance characteristic of random vectors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1778-1786.

[9] Karimzadeh F, Esmaeili S, Hosseinian S H. A novel method for noninvasive estimation of utility harmonic impedance based on complex independent component analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30 (4): 1843-1852.

[10] 邵振国，林洪洲，陈飞雄，等. 采用区间动态状态估计的局部不可观系统谐波源定位[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2391-2402.
Shao Zhenguo, Lin Hongzhou, Chen Feixiong, et al. Harmonic source location in the partial unobservable system based on interval dynamic state estimation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2391-2402. (in Chinese)

[11] 王俊雄，臧天磊，符玲，等. 一种适应风机接入的配电网谐波责任划分方法[J]. 电网技术，2020，44(11)：4377-4386.
Wang Junxiong, Zang Tianlei, Fu Ling, et al. Harmonic responsibility determination method for distribution network with wind turbines integration [J]. Power System Te- chnology, 2020, 44(11): 4377-4386. (in Chinese)

[12] Zheng Xian, Xiao Xianyong, Wang Yang. Harmonic impedance measurement based on an improved binary regression algorithm and dynamic time warping distance [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 130: 106907.

[13] 林潇，邵振国，陈飞雄，等. 采用线性动态聚类的谐波责任区间估计[J]. 中国电机工程学报，2023，43(11)：4284-4295.
Lin Xiao, Shao Zhenguo, Chen Feixiong, et al. Harmonic responsibility interval estimation based on linear dynamic clustering [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(11): 4284-4295. (in Chinese)

[14] 贾秀芳，张韶光，华回春，等. 部分线性核估计方法在谐波责任分摊问题中的应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 63-68.
Jia Xiufang, Zhang Shaoguang, Hua Huichun, et al. Application of kernel estimation with partial linear method for

harmonic contributions determination [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 63-68. (in Chinese)

[15] 徐方维, 王川, 郭凯, 等. 基于无相位实测数据的系统侧谐波阻抗估计方法改进[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3149-3158.
Xu Fangwei, Wang Chuan, Guo Kai, et al. An improved utility harmonic impedance estimation method based on measurement data without phase angle [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3149-3158. (in Chinese)

[16] Wang Chuan, Xu Fangwei, Shu Qin, et al. A noninvasive method to estimate the variable utility harmonic impedance [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(3): 1747-1754.

[17] 华回春, 刘哲, 贾秀芳. 谐波阻抗估计的非光滑部分线性回归方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 120-126.
Hua Huichun, Liu Zhe, Jia Xiufang. Unsmooth and partially linear regression model for harmonic impedance estimation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 120-126. (in Chinese)

[18] 李天楚, 容斌, 伍智鹏, 等. 两级式单相变频器超高次谐波发射机理研究[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 161-170.
Li Tianchu, Rong Bin, Wu Zhipeng, et al. Study on supraharmonics emission mechanism for two-stage single-phase frequency converter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 161-170. (in Chinese)

[19] 薛雨婷, 李谢辉, 王磊, 等. 1976—2017 年西南地区夏季不同等级降水时空变化特征[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 137-145.
Xue Yuting, Li Xiehui, Wang Lei, et al. Spatial and temporal change characteristics of different grades of precipitation in summer in southwestern China from 1976 to 2017 [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2022, 44(2): 137-145. (in Chinese)

[20] Yang Dongchuan, Li Mingzhu, Guo Jue, et al. An attention-based multi-input LSTM with sliding window-based two-stage decomposition for wind speed forecasting [J]. Applied Energy, 2024, 375: 124057.

[21] Shu Qin, Liu Tongyu, Xu Fangwei. A new algorithm for calculating utility harmonic impedance [J]. Electric Power Systems Research, 2021, 191: 106893.

[22] 王瑜, 臧天磊, 符玲, 等. 考虑背景谐波电压变化的多谐波源谐波责任划分[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 55-61.
Wang Yu, Zang Tianlei, Fu Ling, et al. Harmonic contribution partition of multiple harmonic sources considering background harmonic voltage fluctuation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 55-61. (in Chinese)

[23] 赵熙, 杨洪耕. 基于贝叶斯定理的系统谐波阻抗估计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2935-2943.
Zhao Xi, Yang Honggeng. Utility harmonic impedance estimation based on Bayes theorem [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2935-2943. (in Chinese)

[24] Shu Qin, Wu Yayue, Xu Fangwei, et al. Estimate utility harmonic impedance via the correlation of harmonic measurements in different time intervals [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 2060-2067.

[25] 张逸, 刘必杰, 邵振国, 等. 基于高斯过程回归的谐波源不确定性通用模型[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 992-1002.
Zhang Yi, Liu Bijie, Shao Zhenguo, et al. General and uncertain harmonic source model based on Gaussian process regression [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 992-1002. (in Chinese)



王小明

作者简介：

王小明(1987—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：电力系统电能质量。E-mail：316855097@qq.com。

郑浩(1976—)，男，硕士，正高级工程师。研究方向：电网设备运检管理。E-mail：zhengh1811@ah.sgcc.com.cn。

赵文广(1993—)，男，博士，高级工程师。研究方向：电力系统电能质量。E-mail：643370597@qq.com。

文一(1999—)，男，硕士。研究方向：电力系统谐波溯源。E-mail：1549532373@qq.com。

朱明星(1968—)，男，中国电源学会高级会员，硕士，教授。研究方向：电能质量分析与控制。E-mail：xysah@163.com。

丁同(1994—)，男，通信作者，博士，讲师。研究方向：电能质量分析与控制。E-mail：dingtong@ahu.edu.cn。

(责任编辑：耿越)