DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.76 **中图分类号**：TM74 **文献标志码**：A

负荷等值阻抗参数在非线性负荷分析中的研究现状及展望

张 逸，康燕艺，郑宗华
(福州大学电气工程与自动化学院，福州 350108)

摘要：随着新能源、电力电子等技术快速发展，非线性负荷在电力系统中的占比日益增加，导致电网电能质量问题日益严重。负荷等值阻抗参数是分析非线性负荷特性的重要参数之一，系统梳理负荷等值阻抗参数辨识技术及应用领域的研究现状，并展望未来研究方向和应用趋势。首先，阐述负荷等值阻抗参数的基本原理；其次，对现有负荷等值阻抗参数辨识方法进行梳理分析，指出不同参数辨识方法的精度、适用范围和优缺点；再次，综述负荷等值阻抗参数在谐波分析和瞬时无功计算中的应用；最后，探讨负荷等值阻抗参数进一步的研究方向，并对目前领域以外的扩展应用进行展望。

关键词：负荷等值阻抗参数；非线性负荷；参数辨识；谐波源识别；谐波源定位与责任划分

Status Quo and Prospects of Researches on Load Equivalent Impedance Parameters in Nonlinear Load Analysis

ZHANG Yi, KANG Yanyi, ZHENG Zonghua
(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: With the rapid development of new energy and power electronics technologies, the proportion of nonlinear loads in power systems is increasingly growing, leading to more severe power quality issues in power grid. The identification of load equivalent impedance parameters is one of the important methods for analyzing the characteristics of nonlinear loads. The status quo of researches on the load equivalent impedance parameter technology and its application fields is systematically sorted out, and the research directions and application trends in the future are forecasted. First, the basic principle for load equivalent impedance parameters is elaborated upon. Second, the existing load equivalent impedance parameter identification methods are analyzed, and the accuracy, applicable scope, advantages and disadvantages of different parameter identification methods are pointed out. Third, the applications of load equivalent impedance parameters in harmonic analysis and instantaneous reactive power calculation are reviewed. Finally, further research directions for load equivalent impedance parameters are discussed, and the prospects for extended applications beyond the fields at present are given.

Keywords: Load equivalent impedance parameter; nonlinear load; parameter identification; harmonic source identification; harmonic source localization and responsibility division

在能源结构转型和电力电子技术飞速发展的双重驱动下，新型电力系统中非线性负荷的比例显著上升[1]。非线性负荷的高比例接入加剧了电力系统中的谐波污染问题，可能干扰电网中敏感负荷和设备的正常运行，甚至引发故障，对电力系统的稳定运行带来潜在的风险[2]。其中，负荷的非线性特性是其产生谐波的根本原因，为了更好地理解和辨识谐波成因，并制定针对性治理策略，分析非线性负荷的特性尤为重要。

目前分析非线性负荷的特性主要是利用神经

收稿日期：2024-12-07；**修回日期**：2025-01-08；**录用日期**：2025-02-05；**网络首发日期**：2025-02-11
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51777035)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 51777035

网络、广义 S 变换[3]、傅里叶变换、小波变换、Prony 算法等谐波分析方法，对负荷产生的谐波进行识别、量化和分析。然而此类方法往往关注采样数据的外部特征，未能深入探究非线性负荷的内在特性。相比之下，从负荷阻抗的角度入手，辨识非线性负荷的等值阻抗参数能从根本上捕捉非线性负荷的特性[4]。因此，准确辨识负荷等值阻抗参数对于非线性负荷特性分析至关重要。当前负荷等值阻抗参数的研究和应用已经涵盖了谐波源负荷识别、谐波源定位、谐波责任划分、非线性负荷瞬时无功功率计算等方面。负荷等值阻抗参数因其能够从根本上准确地表征负荷特性，未来有望扩展到目前领域以外的更多应用。

本文首先介绍负荷等值阻抗参数的基本原理；其次，分析并归纳现有负荷等值阻抗参数辨识方法，对不同方法的精度、适用范围和优缺点进行梳理；再次，分析目前其在谐波分析和瞬时无功计算领域中的应用现状；最后，讨论负荷等值阻抗参数进一步的研究方向，并对其扩展应用领域进行展望。

1　负荷等值阻抗参数的基本原理

负荷等值阻抗参数的概念最初由 Moustafa 在 2000 年提出[5]，指的是在电力系统分析中，将实际负荷的复杂特性简化为 1 个等值阻抗。具体而言，负荷等值阻抗参数 $Z(t)$ 分为时变电阻 $R(t)$ 和时变电抗 $X(t)$ (包括感抗和容抗)2 个部分，可以表示为 $Z(t)=R(t)+\mathrm{j}X(t)$，其中 j 为虚数单位。负荷等值阻抗参数的辨识需基于负荷时域等值电路模型，电路等效图如图 1 所示。图中，$u(t)$ 和 $i(t)$ 分别为负荷端口处的电压和电流瞬时值。

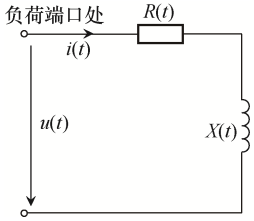


图 1　负荷时域等值电路等效图

Fig. 1 Equivalent diagram of time-domain circuit under load

由于大部分负荷呈现感性[6]，阻感型电路模型应用范围最广。以戴维南定律为基础，由图 1 可得，阻感型负荷端口处的电压、电流关系为

$$u(t)=i(t)R(t)+\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}[L(t)i(t)] \tag{1}$$

式中，$L(t)$为时变电感。

2　负荷等值阻抗参数的辨识方法

准确辨识负荷等值阻抗参数对于分析非线性负荷特性至关重要。本节将展开介绍多点辨识和单点辨识 2 类方法，归纳总结不同方法的精度、适用范围和优缺点。

2.1　基于最小二乘法的参数辨识方法

以阻感型等值模型为基础，基于多点辨识的思路，假设负荷等值阻抗参数在相邻的若干个采样点上的值相等(以相邻 2 个采样点值相等为例)，结合式(1)可建立矩阵方程

$$\begin{bmatrix}u(t_1)\\u(t_2)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}i(t_1) & i'(t_1)\\i(t_2) & i'(t_2)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}R(t)\\L(t)\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：$u(t_1)$、$u(t_2)$ 和 $i(t_1)$、$i(t_2)$ 分别为相邻采样点的电压、电流瞬时值；$i'(t_1)$ 和 $i'(t_2)$ 分别为 $i(t_1)$ 和 $i(t_2)$ 的求导值。

利用最小二乘法解该矩阵方程[6-9]，式(2)可等值为

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}+\boldsymbol{\delta} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}u(t_1)\\u(t_2)\end{bmatrix}$；$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}i(t_1) & i'(t_1)\\i(t_2) & i'(t_2)\end{bmatrix}$；$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}R(t)\\L(t)\end{bmatrix}$；$\boldsymbol{\delta}$ 为量测噪声向量。

考虑到电阻和电感是非负的，因此可采用非负条件下的线性最小二乘法求解式(3)，按照最小二乘准则，使观测值与模型预测值之间的残差平方和最小，建立目标函数为

$$J(\boldsymbol{X})=\min_{X}\left\|\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}-\boldsymbol{B}\right\|_2^2 \qquad \text{s.t. } \boldsymbol{X}\geqslant 0 \tag{4}$$

式中，$\min\|.\|_2^2$ 为误差平方和最小值。

基于最小二乘法[10]的参数辨识方法简单易行，计算速度快，能够较为准确地辨识单相负荷等值阻

抗参数。其不足之处在于受采样间隔的影响较大，假定最小二乘估计区间内的非线性负荷等值阻抗参数不变或变化很小，此时采样间隔过大会导致测量矩阵奇异，求取结果不正确。此外，对于严重非线性负荷，如果采样间隔过小，负荷特性的剧烈变化会导致各个参数点之间差异较大，由于最小二乘法的原理是最小化参数与拟合曲线之间的距离平方和，因此较大的差异会被显著放大，导致参数辨识结果不正确。

2.2 基于奇异值分解法的参数辨识方法

针对上述最小二乘法无法处理病态方程的问题，可以通过增量变换、奇异值分解 SVD(singular value decomposition)法、正交变换法等方法进行求解。文献[11-12]和文献[13-20]采用奇异值分解法求取负荷等值阻抗参数，能够在矩阵病态的情况下求取最小二乘解中的唯一最小范数解。

设 $\boldsymbol{A}\in\boldsymbol{R}_{m\times n}$，存在正交矩阵 $\boldsymbol{V}\in\boldsymbol{R}_{m\times m}$ 和 $\boldsymbol{U}\in\boldsymbol{R}_{n\times n}$，$\boldsymbol{A}$ 可分解为

$$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{V}\begin{bmatrix}\mathrm{diag}(\sqrt{\lambda_1},\sqrt{\lambda_2},\cdots,\sqrt{\lambda_r}) & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}_{m\times n}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

式中：$\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_r$ 为 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}$ 的特征值，且 $\lambda_1\geqslant\lambda_2\geqslant\cdots\geqslant\lambda_r\geqslant 0$；$\sqrt{\lambda_1},\sqrt{\lambda_2},\cdots,\sqrt{\lambda_r}$ 为 $\boldsymbol{A}$ 的奇异值；r 为 $\boldsymbol{A}$ 的秩，$r\leqslant\min(m,n)$。

$\boldsymbol{A}$ 的广义逆矩阵 $\boldsymbol{A}^{+}$ 为

$$\boldsymbol{A}^{+}=\boldsymbol{U}\begin{bmatrix}\mathrm{diag}(\sqrt{\lambda_1},\sqrt{\lambda_2},\cdots,\sqrt{\lambda_r})^{-1} & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}_{m\times n}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

$\boldsymbol{A}^{+}$ 不依赖 SVD 中 $\boldsymbol{V}$ 和 $\boldsymbol{U}$ 的选取，代入式(3)的线性方程组可得解 $\hat{\boldsymbol{X}}$ 为

$$\hat{\boldsymbol{X}}=\boldsymbol{U}\begin{bmatrix}\mathrm{diag}(\sqrt{\lambda_1},\sqrt{\lambda_2},\cdots,\sqrt{\lambda_r})^{-1} & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B} \tag{7}$$

此方法解决了最小二乘法在测量矩阵奇异时无法求解的问题，提高了辨识的准确性。但是，实际求解的负荷等值阻抗参数波形中仍出现异常值，分析可知，式(2)经整理可得式(3)，式(3)中的分母过零时，负荷等值阻抗波形会产生异常值。因此，尽管奇异值分解等数值精度提高方法可以应用在参数求解过程中，但对于最终结果的改善效果并不显著[16]。

$$\begin{bmatrix}R(t)\\ L(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{u(t_1)i'(t_2)-u(t_2)i'(t_1)}{i(t_1)i'(t_2)-i(t_2)i'(t_1)}\\ \dfrac{u(t_2)i(t_1)-i(t_2)u(t_1)}{i(t_1)i'(t_2)-i(t_2)i'(t_1)}\end{bmatrix} \tag{8}$$

2.3 基于$\alpha\beta$坐标变换的两点参数辨识方法

针对式(8)中因分母过零导致异常值的问题，文献[21-23]提出基于 $\alpha\beta$ 坐标变换的三相对称负荷等值参数辨识方法，先对三相电压进行 $\alpha\beta$ 坐标变换，即

$$\begin{bmatrix}u_\alpha(t)\\ u_\beta(t)\end{bmatrix}=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}1 & -\dfrac{1}{2} & -\dfrac{1}{2}\\ 0 & \dfrac{\sqrt{3}}{2} & -\dfrac{\sqrt{3}}{2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_{\mathrm{a}}(t)\\ u_{\mathrm{b}}(t)\\ u_{\mathrm{c}}(t)\end{bmatrix} \tag{9}$$

式中：$u_\alpha(t)$、$u_\beta(t)$ 为三相电压经 $\alpha\beta$ 变换后的电压分量；$u_{\mathrm{a}}(t)$、$u_{\mathrm{b}}(t)$、$u_{\mathrm{c}}(t)$ 分别为 a、b、c 三相电压瞬时值。

电流与电压同理，$i_\alpha(t)$、$i_\beta(t)$ 为三相电流经 $\alpha\beta$ 变换后的电流分量，$i_{\mathrm{a}}(t)$、$i_{\mathrm{b}}(t)$、$i_{\mathrm{c}}(t)$ 分别为 a、b、c 三相电流瞬时值。同时，三相对称负荷满足：$R_{\mathrm{a}}(t)=R_{\mathrm{b}}(t)=R_{\mathrm{c}}(t)$、$L_{\mathrm{a}}(t)=L_{\mathrm{b}}(t)=L_{\mathrm{c}}(t)$，结合式(1)与回归的思想，得参数解为

$$R(t)=\frac{i_\alpha(t_1)u_\alpha(t_1)+i_\alpha(t_2)u_\alpha(t_2)}{u_\alpha^2(t_1)+u_\alpha^2(t_2)+u_\beta^2(t_1)+u_\beta^2(t_2)}+\frac{i_\beta(t_1)u_\beta(t_1)+i_\beta(t_2)u_\beta(t_2)}{u_\alpha^2(t_1)+u_\alpha^2(t_2)+u_\beta^2(t_1)+u_\beta^2(t_2)} \tag{10}$$

$$X(t)=\frac{u_\alpha(t_1)i_\beta(t_1)+u_\alpha(t_2)i_\beta(t_2)}{u_\alpha^2(t_1)+u_\alpha^2(t_2)+u_\beta^2(t_1)+u_\beta^2(t_2)}-\frac{u_\beta(t_1)i_\alpha(t_1)+u_\beta(t_2)i_\alpha(t_2)}{u_\alpha^2(t_1)+u_\alpha^2(t_2)+u_\beta^2(t_1)+u_\beta^2(t_2)} \tag{11}$$

由式(10)和式(11)可以看出，其参数分母在正常运行状态下均大于 0，因此避免了分母过零点而导致的异常值问题，求解精度高，但是其求解对象需满足三相电阻参数和三相电感参数分别相等，导致方法适用范围小，仅适用于辨识三相对称负荷等值阻抗参数，不适用单相或三相不对称负荷的等值阻抗参数求解。

2.4 基于正弦逼近的单点辨识方法

为了能够实时跟踪获取负荷等值阻抗参数，文

献[13]提出基于正弦逼近的单点辨识方法，先对电压、电流信号进行正弦逼近处理，再对电流信号的正弦逼近表达式进行求导，最后代入式(1)可得非线性负荷等值阻抗参数求解公式，可表示为

$$R(t)=\frac{B_{\mathrm{i}}'(t)A_{\mathrm{v}}(t)-A_{\mathrm{i}}(t)A_{\mathrm{v}}(t)\omega-B_{\mathrm{i}}(t)B_{\mathrm{v}}(t)\omega-B_{\mathrm{v}}(t)A_{\mathrm{i}}'(t)}{A_{\mathrm{i}}(t)B_{\mathrm{i}}'(t)-A_{\mathrm{i}}^2(t)\omega-B_{\mathrm{i}}(t)A_{\mathrm{i}}'(t)-B_{\mathrm{i}}^2(t)\omega} \tag{12}$$

$$X(t)=\frac{A_{\mathrm{i}}(t)B_{\mathrm{v}}(t)-B_{\mathrm{i}}(t)A_{\mathrm{v}}(t)}{A_{\mathrm{i}}(t)B_{\mathrm{i}}'(t)-A_{\mathrm{i}}^2(t)\omega-B_{\mathrm{i}}(t)A_{\mathrm{i}}'(t)-B_{\mathrm{i}}^2(t)\omega} \tag{13}$$

式中：$A_{\mathrm{v}}(t)$、$B_{\mathrm{v}}(t)$为电压信号的多项式函数；$A_{\mathrm{i}}(t)$、$B_{\mathrm{i}}(t)$为电流信号的多项式函数；$A_{\mathrm{i}}'(t)$、$B_{\mathrm{i}}'(t)$为$A_{\mathrm{i}}(t)$、$B_{\mathrm{i}}(t)$的求导形式；ω为角频率。

此方法舍弃了分段线性化的思想，提高参数辨识精度的同时也提高了负荷参数辨识的实时性，但正弦逼近法的结果受拟合窗大小的影响，选取不当的拟合窗可能导致拟合结果不准确。此外，对于非线性度高的负荷，需要多次迭代和复杂的计算过程。

不同负荷等值阻抗参数辨识方法的精度、适用范围和优缺点见表 1。

表 1　不同负荷等值阻抗参数辨识方法的比较

Tab. 1 Comparison among different identification methods for load equivalent impedance parameters

类型	方法	适用对象	精度	优点	缺点
多点辨识	最小二乘法	单相、三相负荷	较低	简单易行，计算速度快。	病态矩阵求解不准确，无法避免系数分母过零问题。
	奇异值分解法	单相、三相负荷	中	能够处理病态或接近奇异的矩阵，提供稳定的解。	无法避免系数分母过零问题。
	基于$\alpha\beta$坐标变换的两点参数辨识法	三相对称负荷	较高	辨识精度较高，能够避免因系数分母过零而产生异常值的问题。	计算过程较为复杂，方法适用性低。
单点辨识	正弦逼近法	单相负荷	较高	实时性较高，辨识精度较高。	受拟合窗大小影响，需要多次迭代求解，计算过程较为复杂。

3　负荷等值阻抗参数的应用场景

3.1　谐波分析应用总体框架

在第 2 节求解时域等值电路模型参数后，如何有效提取负荷等值阻抗参数的特征，满足后续应用需求是关键技术问题。目前常用的特征量包括：①基本统计特征，包括方差、最值、均值等；②熵值，用于评估负荷等值阻抗参数的复杂性；③非线性度，用于反映与负荷谐波发射水平的关系；④频率特征，通过傅里叶变换提取周期性特征。利用这些特征量可以实现基于负荷等值阻抗参数的谐波源负荷识别、谐波源定位及谐波责任划分。图 2 为负荷等值阻抗参数在谐波分析应用的总体框架。其中，谐波源负荷识别是基础，旨在通过提取负荷等值阻抗参数特征量识别出产生谐波的负荷类型。谐波源定位及责任划分是谐波源负荷识别的延伸，谐波源定位通过提取负荷等值阻抗参数非线性度等特征信息来确定用户侧谐波源所在的节点；谐波责任划分进一步评估和明确各个谐波源在产生谐波方面的责任大小，为谐波责任追究、治理费用的分摊等提供依据。

3.2　谐波源负荷识别

谐波源负荷识别指的是识别电力系统中引起电流或电压波形畸变的谐波源负荷[5]。虽然线性负荷本身不会引发波形畸变，但受大量电力电子设备接入的影响，背景电压谐波含量增加，导致线性负荷也会产生谐波电流。因此，仅凭判断负荷电流的谐波含量不足以准确识别谐波源负荷。采用负荷等值阻抗参数进行谐波源负荷识别，通过提取负荷等值阻抗参数特征，不仅能有效区分线性负荷和非线性负荷，还能识别谐波源负荷的类型。文献[6]利用非线性与线性负荷等值时域模型的差异，通过计算负荷与线性 RL 模型的一致程度来判断负荷是否为

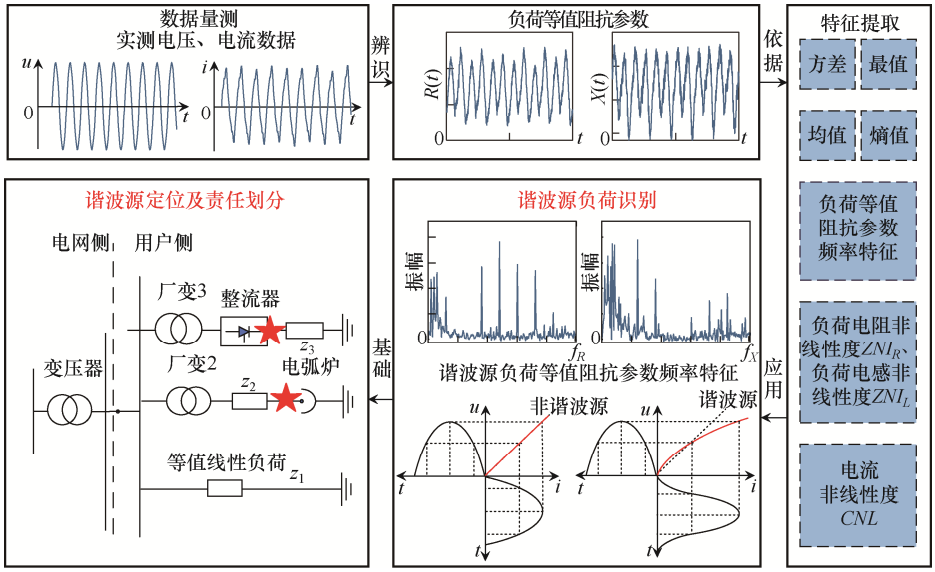


图 2 负荷等值阻抗参数在谐波分析应用的总体框架

Fig. 2 Overall framework for application of load equivalent impedance parameters in harmonic analysis

谐波源，模型误差小表示负荷为非谐波源，否则为谐波源；文献[11]对阻感型负荷和阻容型负荷分别建立时域等值电路模型，通过奇异值分解法辨识负荷等值阻抗参数，当参数非线性变化时说明该负荷为谐波源负荷，反之，为非谐波源负荷；进一步地，文献[23]构建阻感型负荷时域等值电路模型，基于$\alpha\beta$坐标变换计算负荷等值阻抗参数，提取非线性特征来判断谐波源负荷类型，实现谐波源负荷类型的非侵入式识别；为了提高负荷类型识别的准确性，文献[24-25]在文献[23]的基础上将盲源分离算法与负荷等值阻抗参数结合，得到各支路负荷等值阻抗参数，并提取其频率特征与典型谐波源负荷等值阻抗参数的频率特征进行比较分析，进而识别各支路谐波源负荷具体类型。

3.3 谐波源定位及责任划分

谐波源定位及责任划分的核心目标是正确定位谐波源的具体位置，并定量评估其对电网谐波污染的实际贡献度。利用负荷等值阻抗参数表征谐波源负荷自身固有的特性，能够克服背景谐波与系统侧谐波阻抗等参数变化的干扰，实现谐波源定位及谐波责任划分，其基本流程如图 3 所示。

文献[8]从阻感型负荷等值时域模型出发，利用最小二乘法辨识负荷等值阻抗参数，提出适用于单相和三相负荷的谐波源定位方法。为了准确量化并对比各谐波源间的责任，引入了负荷非线性度指标来划分各谐波源所产生的谐波污染责任，即

$$i_{\text{pcc-linear}}(t)=\frac{v_{\text{pcc}}(t)}{\frac{2}{N}\sum_{i=1}^{2/N}R(t_i)}+\frac{1}{\frac{2}{N}\sum_{i=1}^{2/N}L(t_i)}\int v_{\text{pcc}}\mathrm{d}t \tag{14}$$

$$D_{\text{NL}}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N}\frac{i_{\text{pcc-linear}}(t)-i_{\text{pcc}}(t)}{i_{\text{pcc}}(t)}} \tag{15}$$

式中：$i_{\text{pcc-linear}}(t)$为假设负荷完全呈线性时，公共连接点的电流瞬时值；$v_{\text{pcc}}(t)$、$i_{\text{pcc}}(t)$分别为公共连接点处的瞬时电压、电流；N=1/(fT_{inv})，f为基波频率，T_{inv}为离散化的时间间隔；$R(t_i)$、$L(t_i)$分别为负荷等值阻抗参数中的电阻参数、电感参数；D_{NL}为负荷非线性度。

文献[6]利用非线性和线性负荷等值模型参数之间的差异，实现了线性负荷、线性电源和谐波源的识别与定位。文献[21]改进负荷等值阻抗参数的辨识方法，针对单母线下各馈线的谐波责任分摊问题，以负荷功率作为权重，定义基于负荷等值阻抗参数的谐波责任划分指标，以直观表征各谐波源对系统谐波的污染责任大小，即

$$C_{\text{NL}}(t)=\sqrt{\frac{\sum_{N\in\{A,B,C\}}\left\{\left[i_N(t)-i_N^{\text{eq}}(t)\right]/i_N^{\text{eq}}(t)\right\}^2}{3}} \tag{16}$$

$$\beta_i=\frac{\left(\sum_t^T C_{NL}(t)/T\right)\times\sqrt{\sum_t^T S_i(t)^2/T}}{\sum_{i=1}^{I}\left[\left(\sum_t^T C_{NL}(t)/T\right)\times\sqrt{\sum_t^T S_i(t)^2/T}\right]} \quad (17)$$

式中：$C_{\mathrm{NL}}(t)$ 为第 i 个用户的在 t 时刻的电流非线性度；$i_N(t)$ 为 a、b、c 中某相的实际畸变电流；$i_N^{\mathrm{eq}}(t)$ 为对应相序的等效线性负荷电流；β_i 为第 i 个用户的谐波责任；$S_i(t)$ 为第 i 个用户在 t 时刻的视在功率；T 为分析的时间窗。

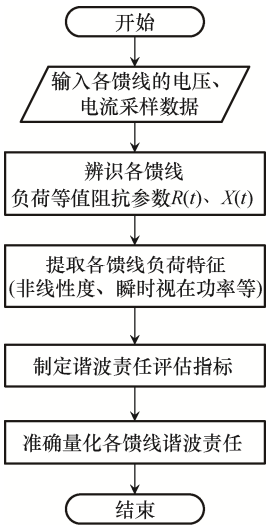


图 3　基于负荷等值阻抗参数的谐波源定位及责任划分基本流程

Fig. 3 Basic process of harmonic source localization and responsibility division based on load equivalent impedance parameters

基于负荷等值阻抗参数的谐波源定位及责任划分方法理论上不受系统侧谐波阻抗的影响，结果准确性高，且原理简单，具有较强的可行性和实用性。

3.4 非线性负荷瞬时无功功率计算

传统的正弦功率理论难以分析非正弦情况下的功率现象，故对非线性负荷进行瞬时功率理论研究尤为重要。非正弦瞬时功率理论的概念最早由日本学者 Akagi 等提出[18]，但其非正弦瞬时功率理论的物理意义不够明确。针对该问题，文献[19]通过构建 1 个电感与电阻串联的时域等效模型来模拟非线性负荷，运用最小二乘法辨识负荷等值阻抗参数，基于该参数推导瞬时功率，并将其分为瞬时有功功率和无功功率 2 个部分。该方法不仅适用于非正弦信号，还适用于非周期信号的功率分析；文献[20]基于坡印廷定理(Poynting theorem)的瞬时功率理论将负荷等效为时变电阻和时变电容并联的模型，提出了新型负载辨识方法，实时反映非线性负荷的功率流动情况及运行状况。

3.5 应用现状

负荷等值阻抗参数辨识作为分析非线性负荷特性的重要方法之一，在谐波分析和瞬时无功功率计算的应用中具有以下优势：通过辨识非线性负荷等值阻抗参数能够从本质上提取负荷自身固有的非线性特性，排除其他谐波源经背景谐波电压引入的畸变干扰；利用负荷等值阻抗参数计算非正弦条件下的瞬时无功功率，与正弦瞬时功率理论相统一，符合实际能量流动，反映负荷随时间变化而消耗、存储和产生的功率特征。

然而，负荷等值阻抗参数的应用同时面临以下挑战。

(1)数据质量要求高：电压电流测量数据的质量对负荷等值阻抗参数辨识结果有较大影响，参数辨识过程需要高频采样，因此对数据量测装置硬件性能要求较高。

(2)系统假设的准确性问题：实际含有谐波源的电力系统具有不对称运行的特性，而在辨识三相谐波源负荷参数时常假设系统是三相对称系统，这种并不准确的假设将影响谐波源负荷特性分析的结果。

(3)工程实用性问题：关于负荷等值阻抗参数的非线性度在谐波分析的工程实际应用与推广方面，以及其对于不同系统、不同电压等级下谐波责任划分的实用性问题，尚需进一步研究。

4　负荷等值阻抗参数研究及应用展望

4.1 负荷等值阻抗参数研究的挑战

虽然现有负荷等值阻抗参数的研究在谐波分析和瞬时无功计算中得到了应用，但仍然存在一些尚未解决的问题有待研究。

(1)完善负荷时域等值电路模型结构。传统的负荷时域等值电路通常把非线性负荷简化为仅由时变电阻和时变电抗串联组成的低阶电路，这种简化往往会使模型与实际内部结构复杂的非线性负荷不匹配，导致参数辨识过程中遗漏关键信息。因此，为了更准确地反映非线性负荷的复杂内部机理，需要改进现有的负荷时域等值电路模型结构。

(2)研究三相不对称非线性负荷的等值阻抗参数辨识方法。三相不对称负荷由于存在不对称性和相间耦合，难以基于单相模型准确辨识其负荷等值阻抗参数，现有关于三相不对称非线性负荷的等值阻抗参数辨识方法研究相对不足。在实际电力系统中，诸如交流电弧炉、电力机车等不对称非线性负荷并不鲜见。因此应该进一步研究能够考虑三相不对称非线性负荷的不对称性和相间耦合的等值阻抗参数辨识方法。

(3)提取负荷等值阻抗参数的多维度特征信息。鉴于当前研究普遍侧重负荷等值阻抗参数的单一维度特征(如非线性度)提取，获取的负荷特性信息较为片面，无法全面反映负荷的实际特性，其应用范围受到限制。因此，未来的研究应致力于探索如何充分提取负荷等值阻抗参数的多维度信息。特别是应关注那些能够揭示内在复杂性的特征，比如时序相关性特征。为此，研究可尝试引入时序图转换方法，旨在实现负荷等值阻抗参数的二维化处理，直观展示参数间的动态关联。在此基础上，可结合深度学习[26]等先进算法同步提取和分析负荷等值阻抗参数的一维与二维特征，通过特征融合技术，将不同维度的特征信息有效整合，以更全面反映非线性负荷的复杂特性，为后续应用提供更强有力的支撑。

4.2 负荷等值阻抗参数的未来应用展望

负荷等值阻抗参数能够从本质上表征负荷的关键电气特性，包括暂态和稳态特性，全面反映电压和电流之间的关系。充分利用负荷等值阻抗参数的特征信息有助于将其拓展应用至谐波源建模及配电网单相接地故障选线与测距。

(1)谐波源建模。现有的谐波源模型鲜有研究将机理性建模和数据驱动建模 2 种建模思路融合得到一个既具有明确物理意义又具备高通用性的谐波源模型[27]。未来研究可以探索基于负荷等值阻抗参数的数据驱动型谐波源负荷建模方法，其基本思路如图 4 所示。该思路以机理性建模[28]为基础，引入负荷等值阻抗参数以表征谐波源负荷特性，利用数据驱动算法辨识负荷等值阻抗参数，可提取含多工况谐波源负荷的等值阻抗参数特征量，以输出不同工况下的谐波源负荷电流，建立既具有物理意义，又能适用于不同类型负荷的通用谐波源模型。

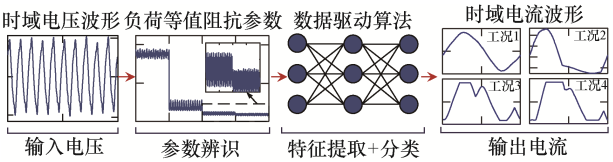


图 4 基于负荷等值阻抗参数的谐波源建模基本思路

Fig. 4 Basic approach for modeling harmonic sources based on load equivalent impedance parameters

(2)配电网单相接地故障选线与测距。在非有效接地的配电网中，发生单相接地故障通常会伴随着故障电流微弱、过渡电阻多变等特征，这些特征导致传统基于单端阻抗法的故障测距技术精度受限[29]。针对该问题，可以借鉴负荷等值阻抗参数的应用思路改进基于单端阻抗法的故障测距技术。由于故障时大部分暂态信号均经故障点与地构成流通回路，可考虑建立零序时域等值电路模型，推导关于瞬时电压、电流的时域故障测距方程。通过利用故障后的暂态信息，结合参数辨识技术优化求取过渡电阻、等值对地电容及故障距离等参数，以实现精确的故障测距。该思路能够直接对影响测距精度的关键参数进行估计和矫正，理论上不受过渡电阻、故障初始相角变化等因素影响，同时避免了双端测距的采集同步问题，降低了设备投资。

5 结论

本文综述了负荷等值阻抗参数在非线性负荷分析中的研究进展。首先介绍了负荷等值阻抗参数

的基本概念；其次，对现有负荷等值阻抗参数辨识方法进行了详细的分析与总结，探讨了不同参数辨识方法的精度、适用范围和优缺点；再次，归纳了负荷等值阻抗参数应用场景；同时，总结了负荷等值阻抗参数应用的优势，即基于负荷等值阻抗参数的谐波分析方法有效克服了背景谐波与系统侧谐波阻抗等参数变化的干扰。此外，本文还指出了负荷等值阻抗参数的应用在数据质量要求、系统假设的准确性及工程实用性等方面还存在挑战。

在非线性负荷内部机理日趋复杂的背景下，本文讨论了负荷等值阻抗参数进一步的研究方向，首先需要进一步完善负荷时域等值电路模型结构、研究三相不对称非线性负荷的等值阻抗参数辨识，以准确地反映非线性负荷的复杂内部机理。未来的研究还需探索如何充分提取负荷等值阻抗参数的多维度信息，促进后续应用进一步推广和完善。本文还对目前领域以外的扩展应用进行初步展望，包括：谐波源负荷建模、配电网单相接地故障选线与测距，希望为后续研究提供参考。

参考文献：

[1] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
Zhou Xiaoxin, Chen Shuyong, Lu Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205. (in Chinese)

[2] Gong Chenbin, Wang Qinghao, Chen Gang, et al. Research on harm of harmonics on electrical equipment [J]. Advanced Materials Research, 2014, 986-987: 1846-1849.

[3] 卢其威, 王涛, 李宗睿, 等. 基于小波变换和奇异值分解的串联电弧故障检测方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 208-217.
Lu Qiwei, Wang Tao, Li Zongrui, et al. Detection method of series arcing fault based on wavelet transform and singular value decomposition [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 208-217. (in Chinese)

[4] 陈治道, 朱茜, 肖代波, 等. 非线性负荷特性等值阻抗的获取方法[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(11): 47-55.
Chen Zhidao, Zhu Qian, Xiao Daibo, et al. A method for obtaining equivalent impedance of nonlinear load characteristic [J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40 (11): 47-55. (in Chinese)

[5] Moustafa A A, Moussa A M, El-Gammal M A. Separation of customer and supply harmonics in electrical power distribution systems [C]// Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings. Orlando, FL, USA, 2000: 1035-1040.

[6] 张晨浩, 李洋, 宋国兵, 等. 基于模型识别的配电网谐波源定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5803-5812.
Zhang Chenhao, Li Yang, Song Guobing, et al. Harmonic source location method for distribution networks based on model recognition [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5803-5812 . (in Chinese)

[7] Liu Yamei, Gong Hualin, Xiao Xianyong, et al. Harmonic source location at the point of common coupling based on the nonlinearity index of load [C]// 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, China, 2009: 1-5.

[8] 龚华麟, 肖先勇. 基于负荷时域等值模型非线性度的谐波源定位[J]. 四川电力技术, 2009, 32(1): 9-12, 68.
Gong Hualin, Xiao Xianyong. Harmonic source location based on non-linearity index of time-domain equivalent model [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2009, 32 (1): 9-12, 68. (in Chinese)

[9] 龚华麟, 肖先勇. 非线性度法在配电网谐波源探测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 30-34.
Gong Hualin, Xiao Xianyong. Application of non-linearity degree method in harmonic source detecting in distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 30-34. (in Chinese)

[10] 范兴明, 封浩, 张鑫. 最小二乘算法优化及其在锂离子电池参数辨识中的应用[J]. 电工技术学报, 2024, 39(5): 1577-1588.
Fan Xingming, Feng Hao, Zhang Xin. Optimization of least squares method and its application in parameter identification of lithium-ion battery model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(5): 1577-1588. (in Chinese)

[11] 唐昆明, 蔡明, 罗建, 等. 基于奇异值分解的非线性负荷谐波源定位方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 96-100.
Tang Kunming, Cai Ming, Luo Jian, et al. Harmonic source location based on singular value decomposition method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 96-100. (in Chinese)

[12] 苏沛. 基于负荷特性分析的谐波检测方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
Su Pei. Study on harmonic detection based on load characteristic analysis method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)

[13] 蔡明. 基于参数辨识的配电网谐波源判别方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
Cai Ming. Study on harmonic sources identification based on parameter identification method in power distributed system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)

[14] 朱茜. 基于参数辨识的配电网非线性负荷特性分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
Zhu Qian. Analysis of characteristic of nonlinear load in distribution network based on parameter identification [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)

[15] 马锐, 贾学翠, 张永康, 等. 基于三次样条插值法的储能锂电池建模与参数辨识[J]. 电源学报, 2023, 21(1): 133-141.
Ma Rui, Jia Xuecui, Zhang Yongkang, et al. Modeling and parameter identification of li-ion battery for energy storage based on cubic spline interpolation [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(1): 133-141. (in Chinese)

[16] Tang Kexuan, Shen Chen, Liang Shuo, et al. Outlier issues in harmonic source location based on parameter identification method [C]// 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). Boston, MA, USA, 2016: 1-5.

[17] 丁同, 陈红坤, 吴斌, 等. 多谐波源定位及谐波责任量化区分方法综述[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 19-30.
Ding Tong, Chen Hongkun, Wu Bin, et al. Overview on location and harmonic responsibility quantitative determination methods of multiple harmonic sources [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 19-30. (in Chinese)

[18] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits [J]. Inst of Electrical Engineers of Japan, 1983, 2: 1375-1386.

[19] 唐昆明, 王洪亮, 罗建, 等. 一种基于参数辨识的单相瞬时功率理论研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 16-19, 25.
Tang Kunming, Wang Hongliang, Luo Jian, et al. A single-phase instantaneous power theory based on parameter identification [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 16-19, 25. (in Chinese)

[20] 王洪亮. 电力系统非正弦信号下功率测量研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
Wang Hongliang. Study on power measurement of electric power system under nonsinusoidal signal [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)

[21] 张逸, 刘必杰, 林才华, 等. 基于负荷等值阻抗参数的谐波责任划分方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(8): 3487-3501.
Zhang Yi, Liu Bijie, Lin Caihua, et al. Harmonic responsibility division method based on load equivalent impedance parameters [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3487-3501. (in Chinese)

[22] Zhang Yi, Liu Bijie, Lin Caihua, et al. Equivalent impedance parameter calculation of three-phase symmetrical loads for harmonic source location [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 12(1): 251-260.

[23] Zhang Yi, Lin Caihua, Shao Zhenguo, et al. A non-intrusive identification method of harmonic source loads for industrial users [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(5): 4358-4369.

[24] 张逸, 陈书畅, 刘必杰, 等. 基于盲源分离的工业谐波源负荷分类识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(10): 3850-3861.
Zhang Yi, Chen Shuchang, Liu Bijie, et al. Industrial harmonic source load classification and identification method based on blind source separation [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 3850-3861. (in Chinese)

[25] 齐屹, 陈书畅, 林才华, 等. 基于阻抗分离的工业谐波源非侵入式识别方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(10): 148-158.
Qi Yi, Chen Shuchang, Lin Caihua, et al. Non-invasive identification method for industrial harmonic source based on impedance separation [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(10): 148-158. (in Chinese)

[26] 王玉梅, 张家康. 基于卷积神经网络多判据融合的井下电网故障选线方法[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 110-117.
Wang Yumei, Zhang Jiakang. Fault line selection method for mine power grid based on fusion of multiple criteria of convolutional neural network [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 110-117. (in Chinese)

[27] 陈思源, 景巍巍, 史明明, 等. 新能源接入背景下的谐波源建模方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 162-175.
Chen Siyuan, Jing Weiwei, Shi Mingming, et al. Review of harmonic source modeling methods with the background of renewable energy access [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 162-175. (in Chinese)

[28] 王佳佳, 周念成, 王强钢, 等. 电网电压不平衡下串联型12脉波整流装置的频域谐波建模[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 69-78.
Wang Jiajia, Zhou Niancheng, Wang Qianggang, et al. Frequency-domain harmonic modeling of series-type 12-pulse rectifier under unbalanced voltage condition [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30 (5): 69-78. (in Chinese)

[29] 肖舒严. 基于零序电流频域特征的配网单相接地故障选线与测距方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
Xiao Shuyan. Fault line detection and location of single-phase fault in distribution networks based on frequency domain features [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)



张逸

作者简介：

张逸(1984—　)，男，博士，副教授。研究方向：电能质量，主动配电网及电力大数据分析。E-mail：zhangyi@fzu.edu.cn。

康燕艺(1999—　)，女，硕士研究生。研究方向：电能质量分析。E-mail：554294882@qq.com。

郑宗华(1984—　)，男，通信作者，博士，讲师。研究方向：无线电能传输技术，微波/毫米波集成电路设计与应用。E-mail：zhengzh0706@fzu.edu.cn。

(责任编辑：耿越)