第 52 卷 第 2 期：694-706 高电压技术 Vol.52, No.2: 694-706
2026 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250089

电力系统广义负荷建模及动静参数辨识方法

郑宗生，夏俊康，廖建权，刘一雄，刘子琦，戴　桐
（四川大学电气工程学院，成都 610065）

摘　要：电力系统负荷特性深刻影响着系统安全稳定运行，准确的负荷建模是电力系统稳定分析和控制的核心环节。随着电动汽车、变频空调、储能设备等新型负荷的广泛接入，传统的负荷建模方法面临适应性差、准确性不足、缺乏跟踪能力等问题。为了适应新型电力系统负荷差异化特性，该文提出了一种具有多场景适应能力的电力系统广义负荷建模方法。在负荷模型构建方面，融合指数恢复模型及状态空间模型在动态特征表征及特征泛化的优势，提出了电力系统多场景广义负荷模型，该模型能够准确模拟负荷的复杂动态特性，特别是在大扰动环境下展示出良好的适应性。在负荷模型辨识方面，设计了负荷动静模式切换判据，有效区分负荷的动静运行模式，并采用递推最小二乘方法进行模型参数的实时辨识，有效提升模型参数辨识结果的准确性，同时增强了负荷模型对于系统故障、负荷切换等场景的动态跟踪能力。最后，采用 Cramér-Rao 下界对负荷模型参数进行校验，确保辨识结果的理论一致性和有效性。

关键词：广义负荷建模；新型负荷元件；参数辨识；动静判据；参数校验

Generalized Load Modeling and Dynamic and Static Parameter Identification Method for Power System

ZHENG Zongsheng, XIA Junkang, LIAO Jianquan, LIU Yixiong, LIU Ziqi, DAI Tong
(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The load characteristics of power system have a profound impact on the safe and stable operation of power system. Accurate load modeling is the core link of power system stability analysis and control. With the wide access of new loads such as electric vehicles, variable frequency air conditioners, and energy storage equipment, the traditional load modeling methods face problems such as poor adaptability, lack of accuracy, and lack of tracking ability. In order to adapt to the load differentiation characteristics of the new power system, a generalized load modeling method with multi-scenario adaptability is proposed in this paper. In the aspect of load model construction, combined the advantages of exponential recovery model and state space model in dynamic feature representation and feature generalization, a multi-scenario generalized load model of power system is proposed, which can accurately simulate the complex dynamic characteristics of load, especially in large disturbance environment. In the aspect of load model identification, the criteria for dynamic and static mode switching of load are designed to effectively distinguish the dynamic and static operation modes of load, and the recursive least squares method is used for real-time identification of model parameters, which effectively improves the accuracy of model parameter identification results, and enhances the dynamic tracking ability of load model for system failure, load switching and other scenarios. Finally, the Cramér-Rao lower bound is used to verify the load model parameters to ensure the theoretical consistency and effectiveness of the identification results.

Key words: generalized load modeling; new load components; parameter identification; dynamic and static criteria; parameter verification

0　引言

电力系统负荷建模是电力系统分析与控制的核心环节之一，负荷对电力系统的安全稳定性具有重要影响，特别是对电压稳定性、频率稳定性和短路电流的影响[1-4]。随着电力电子负荷的广泛接入，这些影响变得更加显著和复杂。新型电力电子负荷，如逆变器、变频器及其他基于电力电子技术的设备，具有较强的动态响应和非线性特性。例如，电压波动和频率变化会引起这些负荷的快速响应，并可能导致功率波动和负荷波动，这使得传统的负荷模型无法准确反映其在电力系统中的实际行为[5-8]。因

基金资助项目：国家电网公司科技项目(5200-202455396A-3-3-ZX)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5200-202455396A-3-3-ZX).

此，建立能够准确体现电力电子负荷动态特性，尤其是其非线性响应、功率波动和频率响应等特征的负荷模型，对于提升电力系统的稳定性和可靠性至关重要[9-12]。

负荷建模大致可以分为机理建模和非机理建模两大类。机理建模包括静态多项式模型、经典负荷模型和综合负荷模型等，其中静态多项式模型通称为 ZIP 模型，由恒阻抗(*Z*)、恒电流(*I*)和恒功率(*P*)3 种成分并联组成；经典负荷模型则由 ZIP 模型和感应电机模型并联构成；综合负荷模型则在经典负荷模型的基础上，进一步加入了母线无功补偿系统、配网等效阻抗等模块。由于这些模型面对新型电力电子负荷时，往往难以准确描述其复杂的动态特性，因此，主要适用于常规条件下的负荷建模工作。对于新型负荷及一些特殊场景，许多学者提出了其他类型的负荷模型。例如，文献[13]基于小信号分析法构建了一种异步电机机电暂态时间尺度频率响应模型，提出了考虑异步电机频率响应的系统频率模型和负荷侧最低惯量评估模型；文献[14]则建立了考虑不同容量电动机、非线性照明负荷、并联电容和串联阻抗等元件，并结合变压器饱和特性的综合负荷模型。然而，上述机理模型在面对一些电力电子负荷时，由于其组成复杂、用电行为难以把握，往往存在响应无法精确跟踪、参数识别困难等问题。

为了应对这些挑战，近些年来众多学者提出了非机理负荷模型，这类模型并不直接体现负荷的物理特性，而是将其视为“黑箱系统”，通过大量实测数据建立系统输入与输出之间的关系模型。目前，常见的非机理负荷模型包括文献[15-16]中的指数模型 (exponential model, EXP) 和指数恢复模型 (exponential recovery model, ERLM)以及文献[17]中的 E 负荷模型，这些模型通过一系列微分方程表述负荷的动态响应。然而，这些模型在面对大扰动电压或负荷动态变化时，往往表现出适应性不足。随着电力系统的复杂性和故障类型的多样化，电压扰动幅度增大的情况变得越来越常见。大部分文献中模拟的电压扰动通常不会超过 25%，而在应对更大幅度的电压波动时，现有模型的建模精度和鲁棒性往往存在不足[18-19]

此外，大多数文献并未充分考虑更加复杂的场景，例如电压持续扰动且负荷组成发生实时变化。在这些特殊场景中，系统参数会随时间动态变化，对辨识方法的实时性和适应性提出更高要求。粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)等离线优化方法虽能提供固定参数，但无法实时调整以应对动态环境；最小二乘支持向量机(least squares support vector machines, LS-SVM) 和卡尔曼滤波(Kalman filtering, KF)在静态或弱非线性场景下表现优异，但面对复杂、高非线性变化时往往难以快速响应。相比之下，递归最小二乘法(recursive least squares, RLS)以其递归计算特性和对实时数据的动态适应能力，在参数辨识的精度和效率上表现出独特优势，尤其适用于负荷组成持续变化或外部扰动频繁的复杂环境。尽管深度学习和强化学习等方法近年来在参数辨识中崭露头角，但其对大量训练数据和长时间计算的依赖限制了其在实时应用中的表现，而 RLS 凭借快速收敛和低计算成本在复杂场景中更能准确反映系统特性[20-21]。

本文面向含新型电力电子负荷的广义负荷建模及参数辨识需求，提出了一种新的电力系统广义负荷建模方案。首先通过修正非线性动态刻画函数及引入非线性静态增益系数，提出适应传统负荷和电力电子负荷多模态特征的广义动静负荷模型；随后通过动静判据来识别负荷的动态和静态特性，考虑负荷的切换及故障等引起的系统结构变化，采用自适应参数辨识方法进行实时的模型参数辨识，并通过 Cramér-Rao 下界(Cramér-Rao lower bound，CRLB) 对参数的估计精度进行校验；最后在 CloudPss 仿真平台上验证了所提方案的有效性。本文通过负荷模型的建立与参数识别，构建适应于新型电力系统复杂负荷动态特性的广义负荷模型。通过与传统 3 种负荷模型对比，并在复杂仿真场景中验证所提模型在多变工况下的精确性与可靠性。本研究预期将提高新型电力系统广义负荷建模的精度，特别是在电力电子负荷广泛应用的微电网和智能电网中，为电力系统的稳定性分析与控制提供更加准确的模型支持。

1 电力系统广义负荷建模方案

电力系统负荷建模是一个复杂的动态过程，涉及多种电力电子负荷的非线性时变特性以及负荷之间的空间交互与耦合特性。准确的负荷建模对于电力系统的运行与稳定性至关重要，因为它直接影响到系统的负荷预测、调度优化及故障恢复等关键决策。现有的负荷建模方法虽然在某些特定场景下取得了一定成效，但在面对新型电力电子负荷和复杂

动态变化时，往往存在适应性差、准确性不足、缺乏跟踪能力等问题。本章针对现有负荷建模方法存在的问题，提出了一种电力系统广义负荷建模方案，以提高负荷建模的精度和适应性，为电力系统的优化调度和稳定性分析提供更加可靠的模型支持。

目前，关于电力系统广义负荷建模主要面临以下问题：

1）适应性差：传统负荷建模方法通常基于经验公式或简单的数学模型，如静态多项式模型(ZIP模型)、经典负荷模型和感应电机模型等，这些方法仅针对特定类型的负荷。由于电力系统负荷的多样性和变化性，传统方法难以适应新型电力电子负荷(如逆变器、直流变换器等)的复杂动态特性。系统负荷类型或工作条件发生变化时，传统模型往往无法提供足够的适应性和灵活性，导致建模结果失真。

2）准确性不足：传统负荷建模方法往往依赖于单一场景的假设或固定的参数，这使得其在描述复杂的负荷特性时存在局限。

3）缺乏跟踪能力：电力系统负荷的动态特性具有时变性，尤其是在引入大量电力电子负荷后，负荷的变化会呈现出较强的时变特性和非线性行为。传统的负荷建模方法多为静态或基于线性假设的模型，缺乏对负荷变化过程的动态跟踪能力。

针对上述问题，本文提出了基于动静模型模型(dynamic-static model，DS)的电力系统广义负荷建模方案，本方案包括负荷建模、参数辨识两方面，方案的结构框架如图 1 所示，其具体实现流程如下：

1）基于 ERLM，提出了一种新的 DS 模型。与传统的 EXP 和 ERLM 模型相比，DS 模型能够更好地拟合传统负荷和新型电力电子负荷的功率响应，具有更高的精度和适应性。

2）采用动静判据识别系统运行状态，在静态时采用幂指数修正法辨识静态参数，在动态时计算模型输入特征动态部分并辨识动态参数。该判据的引入使得负荷的动态参数和静态参数辨识更加准确，从而有效减少了模型参数辨识过程中的误差。

3）采用 RLS 进行动态参数辨识。考虑到负荷端电压频繁扰动和负荷实时变化的复杂场景，本文选用 RLS 进行参数辨识，以便及时应对负荷变化，提高参数调整的响应速度和准确性。

4）使用 CRLB 对模型参数进行校验。通过这一方法，确保所得到的模型参数接近理论值，从而

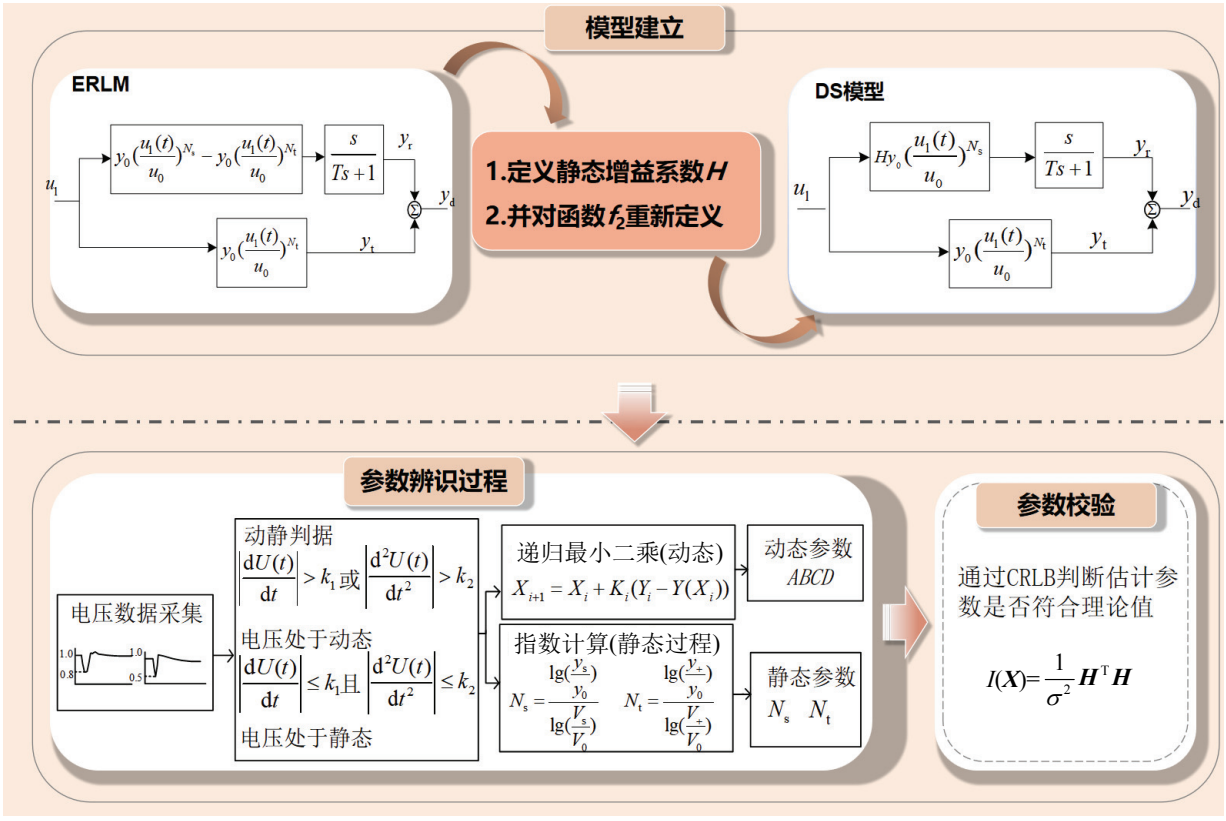


图 1　电力系统广义负荷建模框架图

Fig.1　Generalized load modeling framework diagram for power system

增强了参数的可信度和模型的可靠性。

2 电力系统广义负荷模型-DS 模型

基于 ERLM 模型，本文提出了一种新的电力系统负荷模型—DS 模型。该模型在保留 ERLM 模型优点的同时，通过改进函数表达形式，引入动态特性修正项并重新定义模型的非线性函数表达式，增强了模型对电压扰动和动态响应的适应能力，更加准确地描述了负荷在复杂电力系统中的动态行为，为动态负荷建模提供了一种新的解决方案。

ERLM 模型可以由两个非线性函数和一个一阶线性传递函数来表示，如图 2 所示。具体来说，方框图表示的下分支是一个非线性函数，用 f_1 表示，描述有功或无功功率的稳态响应，该非线性的输入为时变电压 $u_l(t)$。另一方面，上支路由两个不同的分量组成，第 1 部分由函数 f_2 描述，是作用于时变输入电压的另 1 个非线性函数；第 2 部分由 $G(s)$描述，是一个一阶线性传递函数，增益和极分别等于 $1/T$ 和$-1/T$，$G(s)$函数用于近似有功功率或无功功率的暂态响应。ERLM 模型的数学表达式定义为式(1)—(4)：

$$y_d(t)=y_r(t)+f_1(u_l(t)) \tag{1}$$

$$T\cdot\dot{y}_r(t)+y_r(t)=f_2(u_l(t)) \tag{2}$$

$$f_1(u_l(t))=y_t(t),\ f_2(u_l(t))=y_s(t)-y_t(t) \tag{3}$$

$$y_s(t)=y_0\left(\frac{u_l(t)}{u_0}\right)^{N_s},\ y_t(t)=y_0\left(\frac{u_l(t)}{u_0}\right)^{N_t} \tag{4}$$

式中：$y_d(t)$为时刻 t 总负荷的有功或无功响应；y_r 为描述负荷暂态过程的状态变量；T 为时刻 t 的时间常数；u_l 为负荷端口电压；y_s 和 y_t 为两个辅助函数，分别与负荷的暂态和稳态非线性特性相关；参数 N_s 和 N_t 为电压指数；u_0 和 y_0 表示扰动前稳态电压幅值和扰动前的总功耗。

ERLM 模型属于指数恢复模型，作为一种动态模型，能够较好地捕捉系统中时间变化的特性。然而，在静态条件下，ERLM 模型的表现存在一定局限性，因为它的结构过于依赖动态响应，无法充分拟合系统的静态特征。这在实际应用中尤其明显，当系统处于静态状态或负荷变化较小的情况下，ERLM 模型的预测精度可能不足。

因此，针对上述问题，本文在 ERLM 模型的基础上引入了非线性静态增益系数 H，并对 f_2 函数以及传递函数重新定义，这样能够有效补充模型在静态条件下的不足，使得模型在静态和动态条件下均能表现出较好的拟合效果。通过引入静态增益系数，模型在动态响应的同时，也能够更准确地拟合系统的静态特征，从而提高了整体建模的精度和鲁棒性。

修正后的负荷模型如图 3 所示，将其简称为 DS 模型，该模型的具体结构由式(5)—(7)描述。

$$f_1(u_l(t))=y_0\left(\frac{u_l(t)}{u_0}\right)^{N_t},\ f_2(u_l(t))=Hy_0\left(\frac{u_l(t)}{u_0}\right)^{N_s} \tag{5}$$

$$G(s)=\frac{s}{Ts+1} \tag{6}$$

$$y_d(t)=f_2(u_l(t))\cdot G(s)+f_1(u_l(t)) \tag{7}$$

为了更加明确地展示本文所提出的模型响应与传统 ERLM 模型响应之间的差异。将 ERLM 模型的数学表达式(1)—(4)改写成微分方程的形式如式(8)所示：

$$T\frac{\mathrm{d}y_d^*(t)}{\mathrm{d}t}+y_d^*(t)=u_l^*(t) \tag{8}$$

其中：

$$\begin{aligned} y_d^*(t)&=\frac{y_d}{y_0}-\left(\frac{u_l(t)}{u_0}\right)^{N_t}\\ u_l^*(t)&=\left(\frac{u_l(t)}{u_0}\right)^{N_s}-\left(\frac{u_l(t)}{u_0}\right)^{N_t}\end{aligned} \tag{9}$$

从数学表达式的角度来看，式(8)存在一定的不足。该式将负荷的动态响应简化为与输入变量电压的直接关系，而未能同时考虑输入信号的稳态和动态部分的细节。具体而言，式(8)中，输入变量电压的变化并未区分稳态部分和动态部分，导致该表达式无法准确地捕捉负荷在电压波动下的复杂响应。由于电力系统负荷的功率响应既涉及稳态操作，又包括动态变化，式(8)在面对复杂负荷(特别是电力电

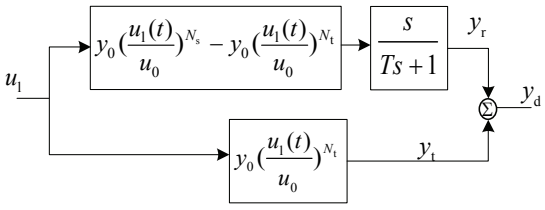


图 2 ERLM 模型框图

Fig.2 Block diagram of ERLM model

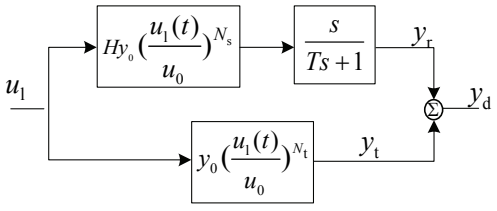


图 3 DS 负载模型框图

Fig.3 Block diagram of DS load model

子负荷)时，难以精确地模拟有功和无功功率的瞬态响应。

相比之下，DS 模型引入了更多的动态修正项，能够更精细地描述负荷的动态响应。将 DS 模型的数学表达式(5)—(7)同样改写成微分方程的形式如式(10)所示：

$$T\frac{\mathrm{d}y_{\mathrm{d}}^{*}(t)}{\mathrm{d}t}+y_{\mathrm{d}}^{*}(t)=H\frac{\mathrm{d}u^{*}(t)}{\mathrm{d}t} \tag{10}$$

其中：

$$u^{*}(t)=\left(\frac{u_{\mathrm{l}}(t)}{u_0}\right)^{N_{\mathrm{s}}} \tag{11}$$

通过对比式(8)和式(10)，发现式(10)能够更好地描述具有非线性或复杂动态特性的系统。相比式(8)，式(10)考虑了系统的输入变化率以及增益因子的作用，能够更准确地捕捉输入对系统响应的影响。

为了简化 DS 模型结构，提高参数辨识的精度和优化计算效率，引入 4 个参数量 A、B、C、D，得到本文提出的最终模型数学表达式如式(12)所示：

$$\begin{cases}y_{\mathrm{p}}^{*}(k)=Ay_{\mathrm{p}}^{*}(k-1)+B(u_{\mathrm{p}}^{*}(k)-u_{\mathrm{p}}^{*}(k-1))\\ y_{\mathrm{q}}^{*}(k)=Cy_{\mathrm{q}}^{*}(k-1)+D(u_{\mathrm{q}}^{*}(k)-u_{\mathrm{q}}^{*}(k-1))\end{cases} \tag{12}$$

其中：

$$\begin{cases}u_{\mathrm{p}}^{*}(t)=\left(\dfrac{u_{\mathrm{l}}(t)}{u_0}\right)^{N_{\mathrm{sp}}}\\ u_{\mathrm{q}}^{*}(t)=\left(\dfrac{u_{\mathrm{l}}(t)}{u_0}\right)^{N_{\mathrm{sq}}}\end{cases} \tag{13}$$

y_{p}^{*}、y_{q}^{*} 以及参数 A、B、C、D 分别为式(14)和(15)所示：

$$\begin{cases}y_{\mathrm{p}}^{*}(t)=y_{\mathrm{p}}(t)-y_{\mathrm{p0}}\left(\dfrac{u_{\mathrm{l}}(t)}{u_0}\right)^{N_{\mathrm{tp}}}\\ y_{\mathrm{q}}^{*}(t)=y_{\mathrm{q}}(t)-y_{\mathrm{q0}}\left(\dfrac{u_{\mathrm{l}}(t)}{u_0}\right)^{N_{\mathrm{tq}}}\end{cases} \tag{14}$$

$$\begin{cases}A=1-\Delta t/T_{\mathrm{p}}\ ,\quad B=H_{\mathrm{p}}y_{0\mathrm{p}}/T_{\mathrm{p}}\\ C=1-\Delta t/T_{\mathrm{q}}\ ,\quad D=H_{\mathrm{q}}y_{0\mathrm{q}}/T_{\mathrm{q}}\end{cases} \tag{15}$$

式中：$y_{\mathrm{p}}(t)$和 $y_{\mathrm{q}}(t)$分别为时刻 t 总负荷的有功和无功响应；y_{p0} 和 y_{q0} 分别为扰动前稳态的有功和无功响应；H_{p} 和 H_{q} 分别表示有功和无功的静态函数增益系数；N_{tp} 和 N_{sp} 表示有功的静态电压指数；N_{tq} 和 N_{sq} 表示无功的静态电压指数；T_{q} 和 T_{p} 分别表示有功和无功的时间常数；Δt 则为取样步长。

3 广义负荷模型动静参数辨识及校验

在现有研究中，许多新型负荷模型的提出往往忽视了参数辨识过程对模型精度和稳定性的关键作用，尤其是在电压扰动频繁、负荷实时变化的复杂场景下。本文针对这一问题，提出了一种创新性的参数辨识方法，旨在提高负荷模型在复杂环境中的准确性和稳定性。首先，本文引入了动静判据，用于识别系统的运行状态。该方法能够动态区分系统的静态和动态阶段，从而在不同状态下选择合适的辨识策略。在静态阶段，采用幂指数修正法辨识静态参数，确保在系统处于稳定状态时能够准确捕捉负荷的静态特性；在动态阶段，模型输入的特征动态部分通过 RLS 方法实时更新动态参数，有效应对电压和负荷的快速变化。结果显示，RLS 相比传统参数估计方法，具备更高的实时性和自适应性。RLS 能够通过递归更新参数，有效应对负荷和电压的快速变化，确保负荷模型在复杂环境下的精确性和稳定性。此外，本文还引入了 CRLB，对模型参数的估计精度进行了校验，进一步验证了所采用的辨识方法的可靠性和准确性。

3.1 参数辨识

为了确保负荷建模的准确性和可靠性，动静判据的使用能够有效区分系统运行状态(静态或者动态)，避免建模过程中因运行特性混淆而引发的误差积累，对提升负荷建模的整体精度和系统的动态跟踪能力具有重要意义。

3.1.1 动静判据

由于 DS 模型的输入端电压信号(u_{l})同时包含静态部分(u_{s})和动态部分(u_{d})，功率的动态响应仅与电压的动态过程相关，因此对输入电压的动静状态进行区分至关重要。

$$u_{\mathrm{l}}=u_{\mathrm{s}}+u_{\mathrm{d}} \tag{16}$$

为此，本文引入电压的一阶导数如式(17)和二阶导数如式(18)作为判据，通过综合分析电压信号的变化特性，判断输入电压何时发生扰动。

$$\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{l}}(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{u_{\mathrm{l}}(t)-u_{\mathrm{l}}(t-\Delta t)}{\Delta t} \tag{17}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2u_{\mathrm{l}}(t)}{\mathrm{d}t^2}=\frac{\dfrac{\mathrm{d}u_{\mathrm{l}}(t)}{\mathrm{d}t}-\dfrac{\mathrm{d}u_{\mathrm{l}}(t-\Delta t)}{\mathrm{d}t}}{\Delta t} \tag{18}$$

式(17)表示电压的瞬时变化速度，式(18)表示电压变化趋势，可以进一步捕捉动态行为，通过分别设置阈值 k_1、k_2 来判断输入电压的状态，从而来选择参数辨识流程。动静判据如下所示：

1）当 $\left|\dfrac{\mathrm{d}u_{\mathrm{l}}(t)}{\mathrm{d}t}\right|\le k_1$ 且 $\left|\dfrac{\mathrm{d}^2u_{\mathrm{l}}(t)}{\mathrm{d}t^2}\right|\le k_2$ 时，系统处于

稳态，此时的端口电压仅包含静态部分，可进行静态参数辨识。

2）当$\left|\frac{\mathrm{d}u_1(t)}{\mathrm{d}t}\right|>k_1$或$\left|\frac{\mathrm{d}^2u_1(t)}{\mathrm{d}t^2}\right|>k_2$时，系统处于动态，此时的端口电压包含静态部分和动态部分，在动态参数辨识时需将静态部分的数据剔除，以确保动态识别过程仅基于系统的暂态响应。

通过对端口电压进行分析，如图 4 所示可知：在 2 s 之前，电压处于稳态。一阶导数和二阶导数的数值接近 0，表明此时系统无明显的动态变化。2 s 时，电压受到扰动的影响，一阶导数和二阶导数迅速增大，系统进入动态变化阶段。根据电压响应图可知，在 2 s 至 7 s 之间，电压持续发生显著变化，一阶导数和二阶导数的波动幅度较大，反映出系统处于动态波动状态。7 s 之后，电压逐渐趋于稳定，且一阶导数和二阶导数的波动幅度也逐步减小，表明系统进入稳态。从图像数据分析发现，电压受扰动后重新恢复稳态时，一阶导数的数值范围介于−0.12 和 0.08 之间，二阶导数的取值范围介于−20 和 20 之间。因此，可以将电压稳态的静态阈值设定为：一阶导数和二阶导数的绝对值分别不超过 0.12 和 20，以此作为判断电压进入稳态的标准。可设k_1=0.12；k_2=20。

结合上述分析，可以得到：在 2 s 前，电压的一阶导数和二阶导数均小于所设置的阈值，此时电压处于稳态；2 s 时，电压发生扰动，一阶导数和二阶导数开始迅速增大并超过阈值，系统进入动态变化阶段；直到 7 s，电压趋于稳定，一阶导数和二阶导数重新回到阈值范围，电压由动态转为稳态。由此验证了动静判据进行系统状态识别的有效性。

3.1.2　静态参数辨识

在识别到系统处于静态时，采用幂指数修正法辨识静态参数，电压指数 N_s 和 N_t 的计算式参照文献[22]。如式(19)所示：

$$N_s=\frac{\lg(\frac{y_{ss}}{y_0})}{\lg(\frac{u_{ss}}{u_0})},\ N_t=\frac{\lg(\frac{y_+}{y_0})}{\lg(\frac{u_+}{u_0})} \tag{19}$$

式中：u_{ss} 和 y_{ss} 分别表示扰动后新稳态下的电压幅值和负载功率消耗；u_+和 y_+表示扰动后瞬时电压和功率。

3.1.3　动态参数识别

在识别到系统处于动态时，结合广义负荷模型

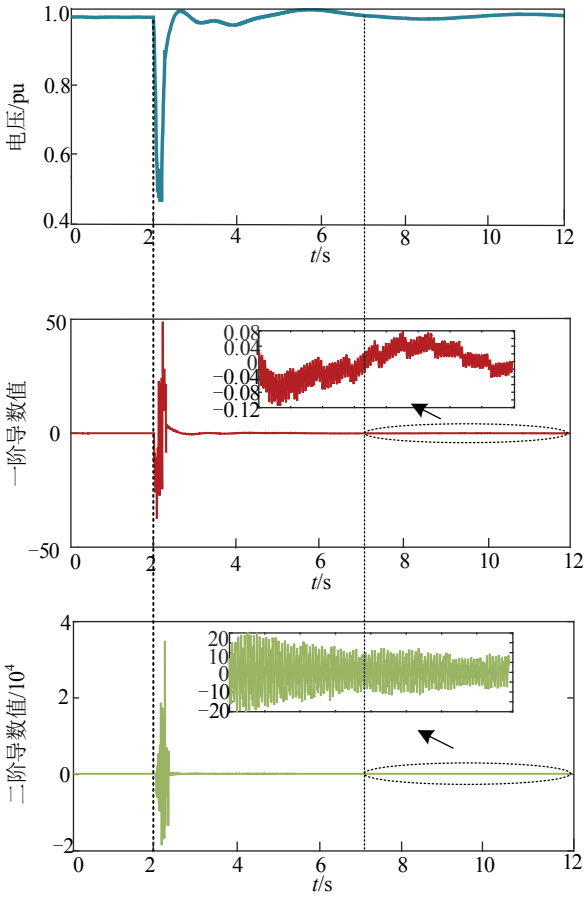


图 4　电压的数值及一阶二阶导数

Fig.4　The numerical value and first- and second-derivatives of voltage

与静态参数，采用 RLS 实时更新动态参数。在 RLS 中，参数估计是通过最小化误差的加权平方和来进行的，更新的目标是减小模型预测值与测量值之间的误差。

根据广义负荷模型，式(12)可以改写成线性系统模型，如式(20)所示：

$$\begin{cases}y_p^*(k)=[A\ \ B]\boldsymbol{V}_p^{\mathrm{T}}\\ y_q^*(k)=[C\ \ D]\boldsymbol{V}_q^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{20}$$

式中：$\boldsymbol{V}_p$ 和 $\boldsymbol{V}_q$ 分别为系统模型的有功和无功响应的观测矩阵，定义如式(21)所示：

$$\begin{cases}\boldsymbol{V}_p=[y_p^*(k-1)\ \ \ u^*(k)-u^*(k-1)]\\ \boldsymbol{V}_q=[y_q^*(k-1)\ \ \ u^*(k)-u^*(k-1)]\end{cases} \tag{21}$$

其中，DS 模型的有功响应参数向量($\boldsymbol{X}_{DSP}$)和无功响应参数向量($\boldsymbol{X}_{DSQ}$)如式(22)所示：

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}_{DSP}=[A\ \ B]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{X}_{DSQ}=[C\ \ D]^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{22}$$

参数向量的估计过程即为使计算模型向量$\boldsymbol{y}_d$与

包含有功/无功功率所有测量值的向量 $\boldsymbol{y}_{\text{measured}}$ 之间的误差最小化，如式(23)所示：

$$\min \sum_{i=1}^{N}(y_{\text{d}}(i)-y_{i_\text{measured}})^2 \tag{23}$$

式中：N 为测量样本个数；$\boldsymbol{y}_{\text{measured}}$ 为向量形式的测量数据集；$y_{\text{d}}(i)$和 y_{i_measured} 分别是变量 $\boldsymbol{y}_{\text{d}}$ 和 $\boldsymbol{y}_{\text{measured}}$ 第 i 个样本。

RLS 通过递归地更新参数向量，逐步逼近最优解，其更新式如下：

$$\boldsymbol{X}_{i+1}=\boldsymbol{X}_i+\boldsymbol{K}_i(\boldsymbol{y}_{i_\text{measured}}-\boldsymbol{y}_{\text{d}}(i)) \tag{24}$$

式中：$\boldsymbol{X}$ 为模型的参数向量；$\boldsymbol{X}_i$ 为当前迭代步长的参数向量；$\boldsymbol{K}_i$ 为增益矩阵，定义如下：

$$\boldsymbol{K}_i=\frac{\boldsymbol{P}_i}{\lambda+\boldsymbol{X}_i^{\text{T}}\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{X}_i} \tag{25}$$

式中：$\boldsymbol{P}_i$ 是协方差矩阵；λ 是遗忘因子，用于控制旧数据的影响。通过递归更新，RLS 算法在每次迭代中调整参数，使误差逐渐减小。协方差矩阵 $\boldsymbol{P}_i$ 的更新式如下：

$$\boldsymbol{P}_i=\frac{1}{\lambda}(\boldsymbol{P}_i-\boldsymbol{K}_i\boldsymbol{X}_i^{\text{T}}\boldsymbol{P}_i) \tag{26}$$

3.2 模型参数校验

为评估 DS 模型参数是否符合理论值，将采用 CRLB 来进行校验。CRLB 的数学形式为：

$$\boldsymbol{V}_{\text{ar}}(\hat{\boldsymbol{X}})\geq(\boldsymbol{I}(\boldsymbol{X}))^{-1} \tag{27}$$

式中：$\boldsymbol{V}_{\text{ar}}(\hat{\boldsymbol{X}})$表示参数估计值 $\hat{\boldsymbol{X}}$ 的方差矩阵；$\boldsymbol{I}(\boldsymbol{X})$为 Fisher 信息矩阵(fisher information matrix, FIM)，定义如下：

$$\boldsymbol{I}(\boldsymbol{X})=-E\left(\frac{\partial^2\ln p(\boldsymbol{y}_{\text{d}}\mid\boldsymbol{X})}{\partial\boldsymbol{X}\partial\boldsymbol{X}^{\text{T}}}\right) \tag{28}$$

式中：E 表示取数学期望；$p(\boldsymbol{y}_{\text{d}}\mid\boldsymbol{X})$ 表示观测向量 $\boldsymbol{y}_{\text{d}}$ 在参数 $\boldsymbol{X}$ 条件下的概率密度。

Fisher 信息矩阵本质上反映了观测数据中关于参数θ的信息量，信息量越大，对参数估计的方差约束越严格。

针对本文所提的关于 DS 模型如式(12)，Fisher 信息矩阵可以表达为：

$$\boldsymbol{I}(\boldsymbol{X})=\frac{1}{\sigma^2}\boldsymbol{V}^{\text{T}}\boldsymbol{V} \tag{29}$$

式中：$\boldsymbol{V}$ 为有功或无功响应的观测矩阵；假设系统的噪声分布符合高斯分布，σ^2 为噪声方差。

为了验证模型参数是否符合理论数值，需要计算得到模型参数的均方根误差(mean square error, MSE)M_{SE}。MSE 的定义如下：

$$M_{\text{SE}}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\boldsymbol{X}_i-\hat{\boldsymbol{X}}_i)^2 \tag{30}$$

4 仿真验证

在 CloudPss4.0 仿真平台采用 IEEE 10 机 39 节点系统进行仿真验证，平台配置为 Intel i7 处理器、32 GB 内存的计算环境，能够满足大规模电力系统的动态仿真需求。仿真过程中，系统的采样频率设为 1 kHz，步长为 1 ms，仿真时长为 15 s。如图 5 所示，其中，母线 16 上接不同负载，并在母线上设置接地电阻，来模拟负载端口电压扰动。

为验证本文提出的建模方案能够同时适应传统负荷(如阻抗负荷、电动机负荷等)和电力电子负荷(如机车负荷、储能负荷、空调负荷等)在多时间尺度下的动态特性，选择 3 种不同类型的负荷进行验证：算例 1 采用经典综合负荷(感应电机+静态负载)，算例 2 和 3 则分别采用储能负载和电力机车负载。通过对比不同负荷模型(EXP 模型，ERLM 模型，E 负荷模型，DS 模型)在不同电压扰动条件下的拟合精度，进一步验证 DS 模型的优越性。为验证本文提出的建模方案对系统多场景的跟踪性能，算例 4 采用经典综合负荷并考虑负荷切换及故障引起的系统结构变化。为确保不同负荷模型之间的公平对比，并提高实验结果的一致性与可比性，本研究选择了 RLS 作为统一的参数辨识方法。本文采用均方根误差(root mean square error，RMSE)作为数值评价指标来评估模型的拟合精度，RMSE 的计算式如式(31)所示：

$$R_{\text{MSE}}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_{i_\text{measured}}-y_{\text{d}}(i))^2} \tag{31}$$

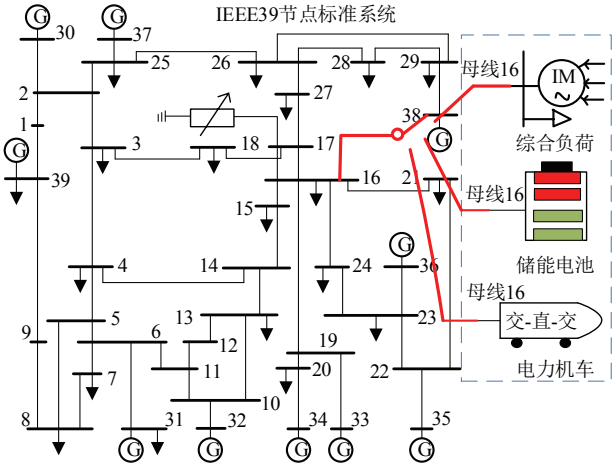


图 5 仿真系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of simulation system

4.1 算例 1

在算例 1 中，综合负荷连接到母线 16 上，涵盖了两种主要的负荷类型：感应电机和静态负载，其中，感应电机的总容量为 8.9 MVA，静态负载的额定功率为 2.2 MVA。为了分析负荷的动态响应，在仿真的第 2 s 对负荷两端施加电压扰动见图 6。

图 7 和图 8 为综合负荷的有功和无功功率响应曲线及采用不同负荷模型的估计曲线。为了准确量化不同负荷模型对综合负荷的拟合效果，表 1 给出了 4 种负荷模型拟合实际功率时的 RMSE 数值。

由上述 4 种模型的功率拟合曲线以及 RMSE 数值可知：在电压扰动约为 50%的情况下，各模型展示了不同的响应特性。DS 模型的拟合效果最佳，能够精准反映综合负荷在扰动初期(2 s 左右)的快速上升及恢复过程，同时在稳态阶段与实测值几乎完全重合。这一优越表现也体现在表中最低的误差值(R_{MSE}=0.003 1(有功)，R_{MSE} =0.003 2(无功))，说明其对综合负荷动态特性建模的高精度。E 负荷模型次之，其拟合曲线较好地跟随了实测值的动态变化趋势，但在扰动后的振荡恢复阶段存在一定偏差，其 RMSE 的误差值也明显高于 DS 模型。相比之下，EXP 模型和 ERLM 模型的拟合性能较差。EXP 模型的拟合曲线错误地反映扰动后的快速动态变化，功率变化过于平缓，振荡特性缺失，与实测值差距较大，其 RMSE 的误差值远高于前两种模型。而 ERLM 模型在动态响应的初期表现最差,功率拟合曲线严重偏离实测值，其 RMSE 的误差值最高。

通过模型辨识过程得到的参数如表 2 所示。为验证 DS 模型在算例 1 中辨识得到的参数的可靠性，通过 CRLB 来进行校验。DS 模型参数的 MSE 与 CRLB 如表 3 所示。可以看出，DS 模型参数的 MSE 均大于其对应的 CRLB，且其与 CRLB 非常接近，证明了模型参数辨识结果的可靠性。

4.2 算例 2

算例 2 则是将算例一中的综合负荷换成储能电池，同样通过在母线 16 设置两相接地故障，在第 2 s 时，负荷端引起的电压阶跃扰动如图 9 所示。所使用的储能系统的总容量为 0.1 MWh，充放电速率为 0.02 MW/s。电池作为一种可控负荷，不仅具有能量存储功能，还能够通过电力电子变换器快速调节其输出功率。图 10—图 11 分别为储能电池的有功和无功功率响应曲线。通过综合负荷和储能负荷的电压和功率响应曲线可以得出：两者的电压响应

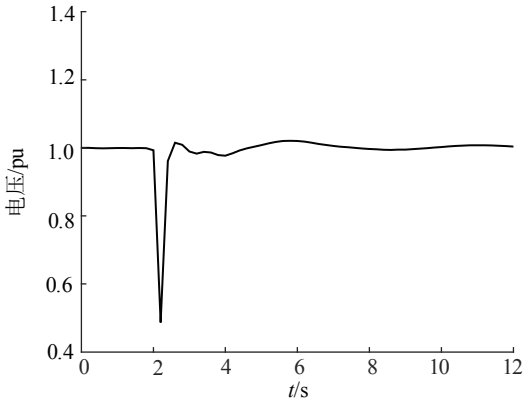


图 6 综合负荷电压跌落 50%

Fig.6 Voltage drop of integrated load 50%

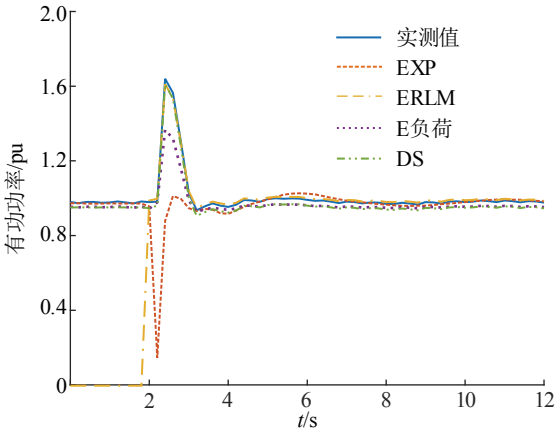


图 7 综合负荷有功功率响应

Fig.7 Integrated load active power response

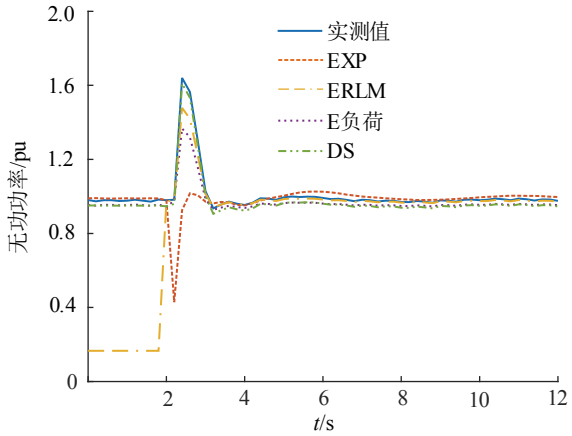


图 8 综合负荷无功功率响应

Fig.8 Integrated load reactive power response

和功率响应存在显著差异，电力电子式负荷在扰动下表现出更好的动态和稳态性能，其电压跌落幅度较小，恢复时间更短，且稳态电压接近初始值。同时，功率响应的峰值和振荡幅度较低，动态更平稳。而综合负荷对扰动更敏感，电压跌落幅度较大，恢

表 1 算例 1 中不同负荷模型下的 RMSE 数值

Table 1 RMSE values under different load models in example 1

模型	RMSE(有功)	RMSE(无功)
EXP	0.165 4	0.151 2
ERLM	0.407 3	0.407 4
E 负荷	0.009 3	0.009 2
DS	0.003 1	0.003 2

表 2 算例 1 中 DS 模型的参数

Table 2 Parameter of DS Model in example 1

参数	A	B	C	D	N_{sp}	N_{sq}
数值	0.979 8	−1.267 7	0.907 7	−1.246 8	1.602 7	1.013 5
参数	N_{tp}	N_{tq}	T_p	T_q	H_P	H_q
数值	2.660 4	1.789 4	0.049 5	0.010 8	−0.062 7	−0.013 5

表 3 算例 1 中 DS 模型参数 MSE 与 CRLB

Table 3 MSE and CRLB of DS model parameters in example 1

指标	A	B	C	D
MSE	0.008 62	0.002 85	0.001 15	0.001 30
CRLB	0.008 24	0.002 34	0.001 01	0.001 01

复时间较长，稳态电压存在偏差，功率响应中峰值较高且振荡明显，稳定性较差，动态恢复能力弱于电力电子式负荷。

为了量化 4 种负荷模型在综合负荷拟合方面的性能差异，表 4 展示了它们拟合真实功率时的 RMSE 值。

由上述 4 种模型的功率拟合曲线以及 RMSE 数值可知：DS 模型与实测值的拟合效果最佳，能够精准捕捉动态响应过程，包括扰动初期的快速下降、上升以及后续振荡的幅度和频率。这一点与表 4 中 RMSE(有功)和 RMSE(无功)最小相一致，表明其对储能电池负荷特性的建模精度最高。E 负荷模型的拟合曲线紧随其后，虽然整体趋势较为接近实测值，但在振荡频率和幅值上与实测值存在一定偏差，尤其在初期响应阶段略有过冲，其 RMSE 的误差值虽较低，但仍高于 DS 模型。EXP 模型和 ERLM 表现较差从图中可以看出，EXP 模型未能准确捕捉振荡特性，功率恢复过程偏平稳，与实测值差距较大，ERLM 模型虽然在动态响应过程中比 EXP 模型稍好，但在振荡幅值和频率的拟合上存在明显不足，两者的 RMSE 的误差值均显著高于前两个模型。

通过模型辨识过程得到的参数如表 5 所示。为验证 DS 模型在算例二中辨识得到的参数符合理论值，如表 6 所示：DS 模型参数的 MSE 与 CRLB 非常接近，且 DS 模型参数的 MSE 均大于其对应的 CRLB。

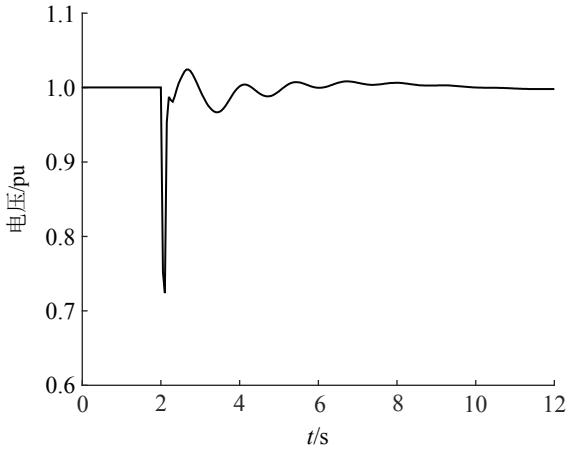


图 9 储能电池(充电)电压跌落 28%

Fig.9 Voltage drop of energy storage battery (charging) by 28%

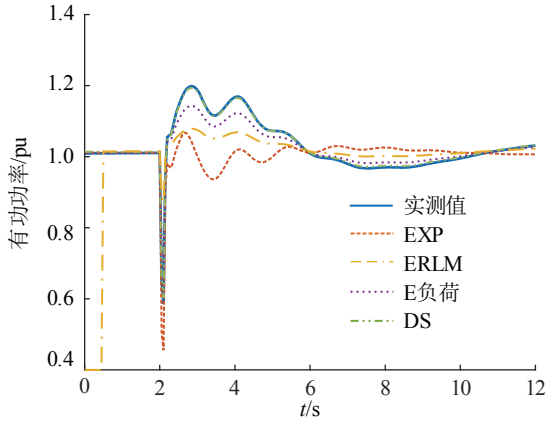


图 10 储能电池(充电)有功功率响应

Fig.10 Active power response of energy storage battery (charging)

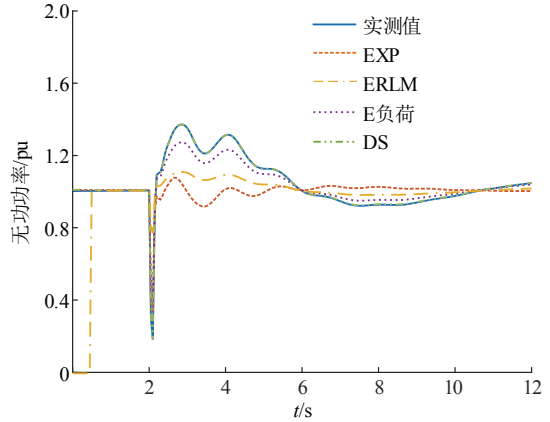


图 11 储能电池(充电)无功功率响应

Fig.11 Reactive power response of energy storage battery (charging)

4.3 算例 3

算例 3 考虑了交-直-交电力机车负荷，额定功率为 2 MW，功率因数为 0.95，负载变化率为 0.1 MW/s，接线位置以及故障设置与前两个算例相

表 4　算例 2 中不同负荷模型下的 RMSE 数值

Table 4　RMSE values under different load models in example 2

模型	RMSE(有功)	RMSE(无功)
EXP	0.045 5	0.039 5
ERLM	0.204 1	0.204 1
E 负荷	0.001 1	0.003 4
DS	0.000 6	0.000 7

同，2 s 时在负载端口产生 20%的电压阶跃扰动如图 12 所示。图 13—图 14 分别为机车端口的有功和无功的功率响应曲线。通过电压和功率响应曲线可以看出：电力机车负荷在电压和功率响应特性上具有显著区别于综合负荷与储能负荷的特点。电压响应方面，电力机车的跌落幅度较小(约 20%)，动态过程中存在轻微振荡，且恢复速度适中，稳态电压接近 1.0 pu，表现出较好的动态与稳态平衡能力。功率响应方面，电力机车的功率波动幅度适中，振荡特性显著但快速衰减，稳态恢复较快，相较于储能负荷的平滑响应与综合负荷的剧烈波动，更能体现动态特性与非线性复杂性。

表 7 列出了 4 种负荷模型拟合机车真实功率的 RMSE 数值，用以量化模型的拟合精度。

由上述 4 种模型的功率拟合曲线以及 RMSE 数值可知：DS 模型实测值的吻合度最高，其曲线能够精准捕捉扰动初期的快速下降、恢复阶段的峰值响应以及后续振荡的幅度与频率，拟合误差最小，表现为 R_{MSE}=0.004 6(有功)、R_{MSE}=0.006 3(无功)，显示了其优越的动态响应能力和稳态精度；其次是 E 负荷模型，其拟合曲线与 DS 模型在整体趋势上较为一致，但其 RMSE 的误差值相较于 DS 仍略高；EXP 模型和 ERLM 仍表现最差，EXP 模型在负荷稳态响应方面表现出较好的拟合效果，但在处理电压扰动引起的动态变化时，其适应性和灵敏度不足；ERLM 则是在动态部分拟合效果更为突出，但在静态部分拟合效果较弱。

通过模型辨识过程得到的参数如表 8 所示。在算例 3 中 DS 模型参数的 MSE 与 CRLB 几乎接近，且大于 CRLB 如表 9 所示，由此证明辨识得到的参数符合理论值。

4.4　算例 4

算例 4 模拟了在 6 s 内发生 3 次不同类型接地故障(两相，单相，三相)的情境，同时，在不同的故障时刻调整了综合负荷中动态负荷的占比率，从

表 5　算例 2 中 DS 模型的参数

Table 5　Parameter of DS Model in example 2

参数	A	B	C	D	N_{sp}	N_{sq}
数值	0.689 8	0.681 1	0.901 0	0.389 0	2.003 8	1.004 0
参数	N_{tp}	N_{tq}	T_p	T_q	H_P	H_q
数值	1.878 7	0.956 5	0.098 0	0.010 1	0.097 0	0.010 0

表 6　算例 2 中 DS 模型参数 MSE 与 CRLB

Table 6　MSE and CRLB of DS model parameters in example 2

指标	A	B	C	D
MSE	0.005 12	0.000 48	0.007 15	0.001 25
CRLB	0.004 89	0.000 40	0.006 85	0.001 15

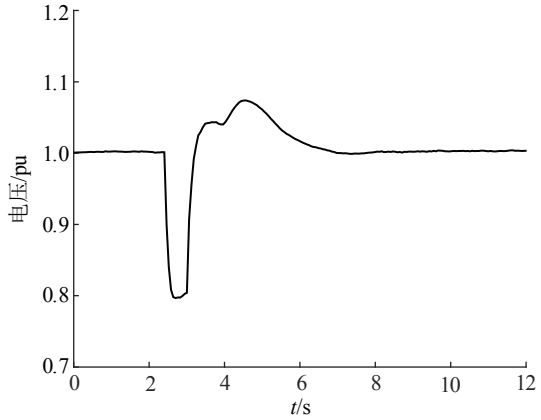


图 12　电力机车电压跌落 20%

Fig.12　Voltage drop of electric locomotive by 20%

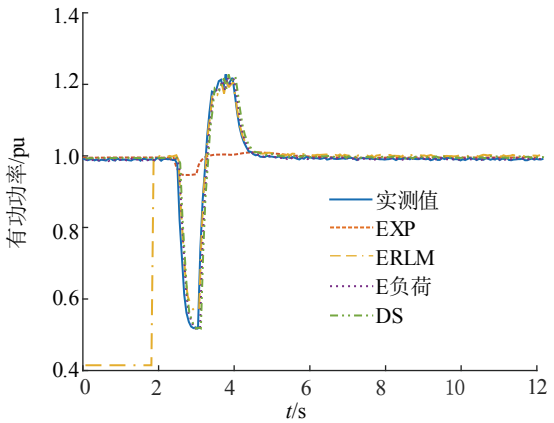


图 13　电力机车有功功率响应

Fig.13　Active power response of electric locomotives

0.2 到 0.4 再到 0.6，此调整旨在模拟了电力系统在多场景切换过程中的结构变化及其对 DS 模型参数的影响。在参数辨识方面，虽然采用 PSO 算法能够确定一组初始参数，但由于该方法仅提供一次性的参数识别，未能适应连续变化的系统动态。相对

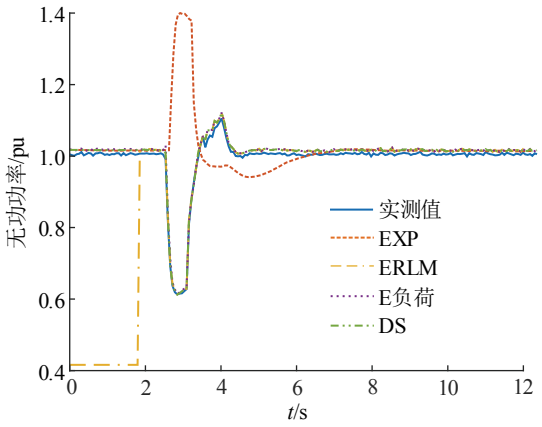


图 14 电力机车无功功率响应

Fig.14 Reactive power response of electric locomotives

而言，RLS 算法表现出更高的适应性，它通过持续更新模型参数，有效响应了系统结构的实时变化。这一对比明确指出，在多场景切换过程中，系统结构和负荷模型参数的变化使得采用固定参数的方法不再适合，而需要采用能够实时调整和更新参数的方法，以确保模型预测的准确性和系统分析的有效性。图 15—图 17 分别为综合负荷两端电压，有功，无功响应曲线。

为了进一步量化不同的参数辨识方法对负荷模型建立的准确性，表 10 列出了分别采用 PSO 和 RLS 两种方法辨识模型参数得到的负荷模型拟合实际功率时的 RMSE 数值。

通过采用 PSO和 RLS 对模型辨识过程得到的参数如表 11 所示。通过算例 4 中功率拟合曲线以及 RMSE 数值表明：采用 PSO 辨识参数的拟合曲线在负荷变化的动态过程中与实测值偏差较大，尤其是在快速变化的瞬态阶段(如 6 s 附近的尖峰响应)。采用 RLS 辨识参数的拟合曲线在动态响应的全过程中均能较好地跟随实测值，尤其是在快速变化阶段能够及时调整，体现了较高的动态适应能力。由此证明：通过 PSO 得到的一组负荷模型参数无法有效应对复杂的电力系统扰动和负荷变化，导致模型在动态场景中的适应性和准确性较差。而在线识别(如 RLS)能够通过实时测量数据动态调整模型参数如表 11 中根据负荷的改变而改变模型的参数(3 组)，这种动态调整的能力显著提高了模型在复杂场景下的精度和系统的鲁棒性，更适用于具有高动态特性的场景建模。

为了更全面地评估所提模型的表现，本文选择了综合负荷有功功率响应作为研究对象，并对 4 种

表 7 算例 3 中不同负荷模型下的 RMSE 数值

Table 7 RMSE values under different load models in example 3

模型	RMSE(有功)	RMSE(无功)
EXP	0.179 3	0.247 2
ERLM	0.224 4	0.223 4
E 负荷	0.004 7	0.007 3
DS	0.004 6	0.006 3

表 8 算例 3 中 DS 模型的参数

Table 8 Parameter of DS model in example 3

参数	A	B	C	D	N_{sp}	N_{sq}
数值	0.978 9	1.954 6	0.934 5	−1.221 5	2.567 4	1.287 2
参数	N_{tp}	N_{tq}	T_p	T_q	H_P	Hq
数值	1.520 4	1.325 6	0.047 4	0.015 7	0.046 4	0.014 7

表 9 算例 3 中 DS 模型参数 MSE 与 CRLB

Table 9 MSE and CRLB of DS model parameters in example 3

指标	A	B	C	D
MSE	0.003 04	0.007 56	0.009 15	0.006 15
CRLB	0.002 89	0.006 96	0.008 85	0.006 00

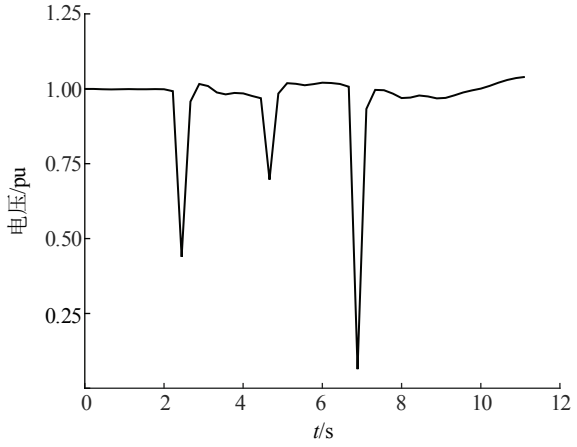


图 15 综合负荷三次电压跌落

Fig.15 Tertiary voltage drop of integrated load

负荷模型在该负荷下的拟合效果进行了对比分析。具体来说，考察了每种模型在不同电压扰动条件下，对综合负荷有功功率的拟合精度，特别关注它们在电压扰动幅度变化时的表现。电压扰动分别设置为下降 25%、50%和 75%，通过对比模型在这些不同电压扰动下的 RMSE 值和误差分布，进一步评估了各模型在面对电压扰动时的适应性和鲁棒性，进而验证了 DS 模型在该负荷下的优势，见图 18。

图 18 表明，随着电压扰动百分比的增大，所有负荷模型的 RMSE 值均呈现上升趋势，这表明电

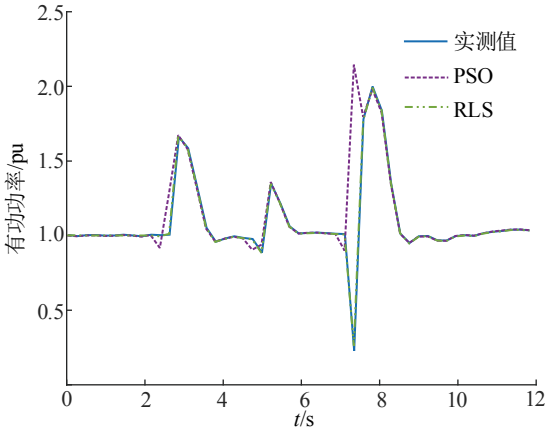


图 16　综合负荷有功功率响应

Fig.16　Integrated load active power response

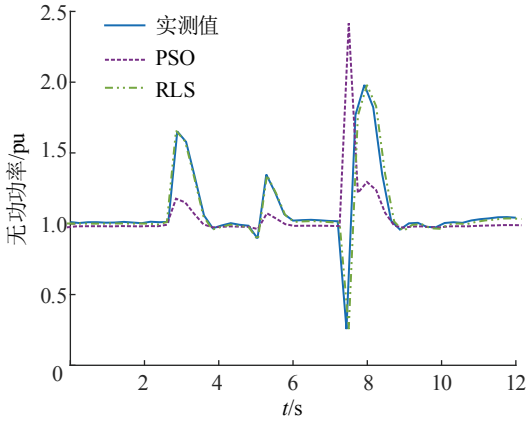


图 17　综合负荷无功功率响应

Fig.17　Integrated load reactive power response

表 10　DS 模型在不同参数辨识方法下的 RMSE 数值

Table 10　RMSE values of DS model under different parameter identification methods

算法	RMSE(有功)	RMSE(无功)
RLS	0.302 8	0.281 4
PSO	0.446 7	0.446 9

表 11　算例 4 中 DS 模型的参数

Table 11　Parameter of DS model in example 4

辨识方法	*A*	*B*	*C*	*D*
PSO	0.743 9	−0.800 2	1.678 9	0.553 4
RLS	0.979 8	−1.267 7	0.907 7	−1.246 8
	3.389 0	1.708 8	2.269 0	−0.769 8
	0.778 9	−0.887 7	1.778 9	0.450 1

压扰动情况对各模型的拟合精度产生了显著影响。尽管如此，DS 模型在所有电压扰动条件下均显著优于 EXP 模型和 ERLM 模型，表现出更高的拟合精度和较低的误差值。随着电压扰动幅度的增大，DS 模型相较于 E 负荷模型的优势逐渐更加突出。由此可见，DS 模型在处理电压扰动时，具备更强的适应性和鲁棒性，因此，在多种电压扰动条件下，DS 模型的整体表现优于其他模型。

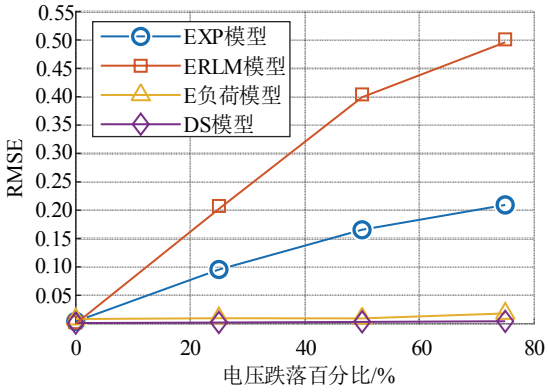


图 18　电压扰动下 4 种负荷模型拟合误差对比

Fig.18　Comparison of fitting errors for four load models under voltage disturbance

5　结论

本文针对广义电力系统负荷建模问题，提出了一种基于广义负荷模型（DS 模型）的建模与辨识方案，为电力系统在新型负荷广泛接入背景下的稳定分析与控制奠定了基础。具体内容如下：

1）在负荷模型的构建上，融合指数恢复模型和状态空间模型的优势，通过引入动态特性修正项，显著提升了模型对非线性负荷的拟合能力和对电压扰动的适应性。

2）在负荷模型的辨识上，设计了动静模式切换判据，有效区分动静运行模式，避免静态数据对动态参数辨识的干扰；并通过递推最小二乘法实现了模型参数的实时更新，相较于优化算法 PSO，在动态跟踪速度和精度上表现出显著优势。

3）本文通过复杂场景验证了广义负荷建模及参数辨识的优势，并通过 CRLB 校验了模型参数辨识结果的可靠性。

需要指出的是，本文提出的 DS 负荷模型主要聚焦于电压扰动下的有功与无功功率响应。然而，在某些特殊场景下，频率响应可能对负荷的动态行为产生影响，这一点尚未在现有模型中得到充分考虑。未来的研究可以进一步探索如何将频率响应纳入 DS 负荷模型，以全面提升模型对电力系统中复杂负荷行为的适应性。

参考文献 References

[1] 肖秋瑶，杨 騑，宋政湘. 考虑碳交易和电动汽车充电负荷的工业园区综合能源系统调度策略[J]. 高电压技术，2023，49(4)：1392-1401.
XIAO Qiuyao, YANG Kun, SONG Zhengxiang. Scheduling strategy of industrial parks integrated energy system considering carbon trading and electric vehicle charging load[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1392-1401.

[2] 赵静波，鞠 平，施佳君，等. 电力系统负荷建模研究综述与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版)，2020，48(1)：87-94.
ZHAO Jingbo, JU Ping, SHI Jiajun, et al. Review and prospects for load modeling of power system[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 87-94.

[3] 刘 沆，赵海彭，文 明，等. 考虑负荷灵活分配的综合能源系统站-网-荷协同规划方法[J]. 高电压技术，2023，49(1)：118-127.
LIU Hang, ZHAO Haipeng, WEN Ming, et al. Station-grid-load collaborative planning method for integrated energy system considering flexible distribution of load[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 118-127.

[4] 李 娟，丁坚勇. 电力系统负荷建模和算法的研究及进展[J]. 高电压技术，2008，34(10)：2209-2215.
LI Juan, DING Jianyong. Power system load modeling and parameter identification algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2209-2215.

[5] 石景海，贺仁睦. 动态负荷建模中的负荷时变性研究[J]. 中国电机工程学报，2004，24(4)：85-90.
SHI Jinghai, HE Renmu. Load time-variantion study in dynamic load modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 85-90.

[6] 朱振青，王步云，黄文英，等. 电力负荷实用建模方法[J]. 电力系统自动化，1999，23(19)：34-39.
ZHU Zhenqing, WANG Buyun, HUANG Wenying, et al. Practical load modeling method for power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(19): 34-39.

[7] 董 坤，赵剑锋，孙睿晨，等. 含新型负荷元件的电力负荷建模方法研究现状与展望[J]. 电力系统自动化，2023，47(23)：70-83.
DONG Kun, ZHAO Jianfeng, SUN Ruichen, et al. Research status and prospects of modeling methods for power loads with new load elements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23): 70-83.

[8] 廖思阳，皮山泉，徐 箭，等. 新型电力系统直控式负荷多层级协同调控关键技术综述[J]. 高电压技术，2023，49(9)：3669-3683.
LIAO Siyang, PI Shanquan, XU Jian, et al. Review of key technologies for multi-level cooperative regulation of direct-controlled loads in new power systems[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3669-3683.

[9] 兰天楷，孙华东，王 琦，等. 考虑分布式新能源的有源综合负荷模型[J]. 电工技术学报，2024，39(23)：7365-7378.
LAN Tiankai, SUN Huadong, WANG Qi, et al. Active synthesis load model considering distributed renewable energy source[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(23): 7365-7378.

[10] 吴沛萱，叶洪波，崔 勇，等. 主导负荷参数类噪声辨识的数据处理方法[J]. 电网技术，2021，45(6)：2335-2341.
WU Peixuan, YE Hongbo, CUI Yong, et al. Data processing method of ambient signal-based dominant load parameter identification[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2335-2341.

[11] 陈 辰，马恒瑞，陈来军，等. 基于用户群体划分的多步短期负荷预测方法[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4213-4222.
CHEN Chen, MA Hengrui, CHEN Laijun, et al. Multi-step short-term load forecasting method based on user group division[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4213-4222.

[12] 赵熙临，龚楚峰，付 波. 一种风电场经 VSC-HVDC 并网的 VSG 变参数负荷频率控制策略[J]. 高电压技术，2024，50(1)：117-126.
ZHAO Xilin, GONG Chufeng, FU Bo. A VSG variable parameter load frequency control strategy for wind farms connected to the grid by VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 117-126.

[13] 周 涛，陈 中，王 毅，等. 计及异步电机频率响应的电力系统最低惯量评估[J]. 电力系统保护与控制，2022，50(20)：22-31.
ZHOU Tao, CHEN Zhong, WANG Yi, et al. Evaluation of minimum inertia in power systems considering frequency response of induction machines[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 22-31.

[14] PAIDI E S N R, NECHIFOR A, ALBU M M, et al. Development and validation of a new oscillatory component load model for real-time estimation of dynamic load model parameters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 618-629.

[15] KONTIS E O, CHRYSOCHOS A I, PAPAGIANNIS G K, et al. Modeling of nonlinear dynamic power system loads using the vector fitting technique[C]//Proceedings of the 2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Coimbra, Portugal: IEEE, 2016: 1-6.

[16] HILL D J. Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1): 166-176.

[17] 鞠 平，杨 杰，金宇清，等. 电力电子接口负荷的动静综合模型[J]. 电力自动化设备，2023，43(10)：9-14.
JU Ping, YANG Jie, JIN Yuqing, et al. Composite dynamic-static model of power electronic interfaced loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 9-14.

[18] MITRENTSIS G, LENS H. A dynamic active distribution network equivalent for enhancing the generalization capability of the exponential recovery model in stability studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2709-2712.

[19] ROUHANI A, ABUR A. Real-time dynamic parameter estimation for an exponential dynamic load model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3): 1530-1536.

[20] 邓 俊，崔浩瀚，晁璞璞，等. 基于主导特性解析的双馈风机控制器参数高效并行辨识方法[J]. 电力自动化设备，2025，45(4)：60-66.
DENG Jun, CUI Haohan, CHAO Pupu, et al. Efficient parallel identification method of DFIG controller parameters based on dominant response characteristic analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(4): 60-66.

[21] 夏玉香，李成成，李跃峰. 采用改进递归最小二乘法的电动负载模拟器参数在线辨识[J/OL]. 机械科学与技术，2024：1-7[2024-12-13]. https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20240073.
XIA Xiangyu, LI Chengcheng, LI Yuefeng. Research on parameter identification of electric load simulator using the improved recursive least squares method[J/OL]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2024: 1-7[2024-12-13]. https://doi.org/10.13433/j.cnki. 1003-8728.20240073.

[22] KONTIS E O, PAPADOPOULOS T A, CHRYSOCHOS A I, et al. Measurement-based dynamic load modeling using the vector fitting technique[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 338-351.



郑宗生
1989—，男，博士，副研究员，硕导
研究方向为电力系统稳定与控制等
E-mail: zongshengzheng@scu.edu.cn

ZHENG Zongsheng
Ph.D.
Associate professor



廖建权(通信作者)
1994—，男，博士，副研究员，硕导
主要研究方向为直流输/配电系统保护与控制、电力系统稳定分析与控制等
E-mail: jquanliao@scu.edu.cn

LIAO Jianquan
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2025-01-20 在线出版日期 2025-04-28 编辑 陈 蔓