



复杂电力动态负荷信号典型特征提取与建模

王婧 陈景霞

Typical feature extraction and modeling of complex power dynamic load signals

WANG Jing, CHEN Jingxia

引用本文:

王婧, 陈景霞. 复杂电力动态负荷信号典型特征提取与建模[J]. 北科大: 工程科学学报, 2025, 47(8): 1731–1741. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.10.31.004

WANG Jing, CHEN Jingxia. Typical feature extraction and modeling of complex power dynamic load signals[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(8): 1731–1741. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.10.31.004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.10.31.004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深度学习在电力系统预测中的应用

A survey of power system prediction based on deep learning

工程科学学报. 2023, 45(4): 663 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.12.21.006>

基于高阶同步压缩变换的行星齿轮箱声音信号共振频带特征提取

Acoustic signal analysis of the resonance frequency region for planetary gearbox fault diagnosis based on high-order synchrosqueezing transform

工程科学学报. 2020, 42(8): 1048 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.07.18.002>

基于声发射特征提取和机器学习的煤破坏状态预测

Applying feature extraction of acoustic emission and machine learning for coal failure forecasting

工程科学学报. 2023, 45(1): 19 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.02.07.003>

基于智能磨矿介质及CNN和优化SVM模型的球磨机负荷识别方法

Ball mill load status identification method based on the convolutional neural network, optimized support vector machine model, and intelligent grinding media

工程科学学报. 2022, 44(11): 1821 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.03.06.001>

多电飞机断路器电弧机理及灭弧技术研究综述

Overview of the arc mechanism and extinguishing in the circuit breaker of a more-electric aircraft

工程科学学报. 2023, 45(4): 611 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.02.28.002>

机理模型与集成学习混合驱动的机器人关节摩擦建模方法

Hybrid friction modeling method for robot joints integrating mechanistic model and ensemble learning

工程科学学报. 2024, 46(6): 1140 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.07.01.001>

复杂电力动态负荷信号典型特征提取与建模

王 婧, 陈景霞[✉]

北京联合大学应用科技学院学院, 北京 100101

✉通信作者, E-mail: yykjtjingxia@buu.edu.cn

摘 要 随着新型电力系统加快构建, 可再生能源和非线性大功率动态负荷大规模应用, 引起了电能计量的严重超差. 为研究复杂电力动态负荷信号中导致电能计量误差的重要特征, 亟需探索负荷信号局部与全局特征提取方法, 以应对已有研究无法准确表征大功率动态负荷信号全局特征的难题. 因此, 本文提出了基于波形域与游程域的典型特征提取与特征建模方法. 首先, 现场采集电气化铁路和电弧炉两类大规模复杂电力动态负荷信号并构建离散数学模型, 在波形域分析其典型特征并提取特征参数; 其次, 研究信号从波形域到游程域的映射方法, 构建游程域特征参数, 表征负荷电流快速随机动态波动的局部和全局特征; 最后, 根据复杂电力动态负荷信号游程域和波形域的典型特征构建约束条件, 基于特征建模方法, 构建具有特定参数的二元动态电流测试信号模型, 并实验分析了测试信号能够反映动态负荷典型特征对电能计量误差的影响, 具备有效性.

关键词 新型电力系统; 电能计量; 智能电能表; 特征建模; 电力动态负荷; 游程域

分类号 TM933

Typical feature extraction and modeling of complex power dynamic load signals

WANG Jing, CHEN Jingxia[✉]

College of Applied Science and Technology, Beijing Union University, Beijing 100101, China

✉Corresponding author, E-mail: yykjtjingxia@buu.edu.cn

ABSTRACT The scale of clean energy and electric energy substitution is expanding with the rapid development of China's new power system and the steady introduction of “dual carbon” strategic goals. Electric energy signals under the high proportion of renewable energy access and high-power dynamic load applications lead to nonlinear random dynamic changes, often causing serious deviations in electric energy measurements and affecting the fairness and rationality of electric energy trading. This study focuses on the energy economy, in the context of problems in implementing the aforementioned national strategies. Furthermore, this study identifies scientific problems, explores the important characteristics of dynamic loads that cause power metering deviations, and analyzes the local and global features of complex power dynamic load signals to address the challenges in accurately characterizing the global features of high-power dynamic load signals in existing research. Additionally, the method of constructing binary dynamic power testing signal models is explored. First, a discrete mathematical model is constructed for complex dynamic load signals of electrified railways and electric arc furnaces collected onsite. The important features of instantaneous voltage and current amplitudes are analyzed and extracted in the waveform domain, which reflects the approximate stability of voltage signals, the fast random dynamic fluctuation characteristics of current signals, the main characteristics of current amplitudes being an approximately Gaussian distribution, and decreasing autocorrelation coefficients. Second, based on run-length sequence mapping, a binary run-length sequence of complex dynamic load signals is constructed to analyze and extract important features, such as local and global run-length mode changes, modulation depth, and impact strength of current amplitudes on electrified railways and electric arc furnaces in the run-length domain. Compared with the

收稿日期: 2024–10–31

基金项目: 北京市自然科学基金资助(3254045); 北京市教育委员会科研计划资助项目(KM202411417002, KM202111417002); 北京联合大学科研资助项目(ZK30202410)

proposed time-, frequency-, and time-frequency domain feature analysis methods proposed, the method suggested in this study has significant advantages in simultaneously extracting the local and global features of complex dynamic electrical-energy signals, characterizing important features such as large-scale fluctuations (large fluctuations), rapid changes over time (fast time-varying), and strong randomness. Finally, constraint conditions are constructed based on the typical characteristics of the run and waveform domains of complex power dynamic load signals. Using feature modeling methods, a binary m-sequence dynamic energy-testing signal model with specific parameters is constructed such that the testing signal reflects the typical features of the dynamic load signal and the most significant factors affecting energy measurement errors and covers the maximum range of feature parameter changes. This can also allow the simultaneous completion of the dynamic error testing of energy meters and the traceability of energy values. A dynamic error-testing system is built for electric-energy measurements, and the dynamic error of the electric-energy meter is tested under binary dynamic electric-energy-testing signal conditions. Experimental verification showed that the test signal reflected the typical characteristics of dynamic loads under the influence of electric-energy measurement errors. The research content of this paper provides a theoretical basis for the analysis of dynamic energy signal characteristics in complex scenarios, the construction of multifeature constraint models, and the dynamic error testing of energy meters.

KEY WORDS new power system; electricity metering; smart meter; feature modeling; power dynamic load; run domain

目前,我国正处于能源转型的关键时期,在“双碳”战略目标的指导下,新型电力系统快速建设,呈现出“双高”和“双随机”特性,即:(1)在供给侧,风能、太阳能和潮汐能等可再生新能源的大规模发电占比不断提高,其输出功率具有较强的“不确定性”、“间歇性”和“随机波动性”^[1];(2)在需求侧,大功率非线性动态负荷比例不断提高,如:炼钢电弧炉、点焊机、电解铝、高铁列车等,导致负荷电流表现出“大波动性”、“强随机性”和“快速时变性”^[2-3].这些特征在给电力系统的安全稳定性带来隐患的同时,也会引起电能计量的严重超差,使电能生产和消耗方面的准确计量和电能表动态误差测试都面临新的挑战.其中,复杂电力动态负荷信号的关键特征提取与动态电能测试信号的构建是亟待解决的两大重要科学与技术问题.

几十年来,随着电力系统的不断发展,国内外学者对电力负荷特征开展了大量研究.2007年,霍成军^[4]对我国西部某城市电网负荷实测数据进行分析,总结出负荷曲线特性具有周期变化的特点.同时总结了居民生活用电负荷具有季节性的规律变化特性,而重工业用电负荷变化波动较大.2015年,Nguyen^[5]分析总结了单个用户与多个用户的日负荷曲线具有随机波动的特点,并计算了均值、方差和相关系数等统计特征量.2018年,Aktas等^[6]监测电网中混合储能光伏发电系统的动态能量输出,分析了光伏电源的输出电压具有稳定性,而输出电流幅度具有随机动态且阶跃变化的特性.2019年,荷兰德温特大学的ten Have等^[7-8]分析了不同负载下水泵瞬时电流波形的特性,提取了4个电流波形样本并分析其波形域特征,试验表明电流瞬时

波形的上升和下降速度是导致电能表超差的重要波形域特征之一.2020年,Li等^[9]构建了4个短时间时频域特征参量,表征电气化铁路负荷信号基波功率和谐波功率占比的变化趋势.Guo等^[10]提出了一种独立研究充电负荷和正常负荷,然后与电网进行综合分析的解耦分析方法,采用蒙特卡罗方法计算充电负荷的平均功率、最大功率、最小功率、波动功率及其参数.2023年,Marulanda-Durango等^[11]提取了电弧炉信号谐波参数与畸变特征对电能计量的影响.韩学等^[12]建立了一种含交流电弧炉负载的三相电力系统仿真模型,得出交流电弧炉在不同参数情况下负载端电流间谐波的产生规律及特性.

综上所述,目前国内外学者研究的复杂电力动态负荷信号特征提取方法可概括为时域特征提取^[4-6,10]、频域谐波特征提取^[11-12]、时频域特征提取^[9]和波形域特征提取^[7-8]四大类.然而,这四类方法多是针对负荷信号在小时、日、周的宏观时间尺度或几个工频周期(毫秒级)的小时间尺度上的特征,而针对电力系统中主要影响电能计量准确性的大功率动态负荷,则无法全面提取负荷信号在长持续时间(≥ 1000 s)内的全局变化特征,即无法表征信号的大范围波动性(大波动性).

在动态电能测试信号建模及电能计量误差测试评价方面,2010年中国计量院的陆祖良等^[13]建立了正弦和梯形包络调幅的动态测试信号时域模型.清华大学的李世松和赵伟^[14]建立了恒定包络的调相与调频动态测试信号时域模型.2011年,郑荐中等^[15]提出了电能表动态误差的直接测量法,采用正弦和梯形包络动态测试信号,测试了电能

表的动态误差,结果表明:在正向功率的条件下,有些电能表出现了+9.84%和-34.79%的动态误差.2014至2019年,王学伟等^[16-18]首先针对通断键控(On-off keying, OOK)动态负荷测试信号,分析其频谱分量,建立了OOK动态测试信号的频域数学模型,提出了暂态、短时和长时三种动态负荷模式.随后,建立了TASK^[19]和伪随机^[20-22]动态测试信号模型,反映负荷信号的快速冲击特性、正负功率潮流特性和周期随机波动特性.2021至2022年,Hosny等^[23]和Yu等^[24]采用OOK动态测试信号模型,反映电流幅度3种周期性长时波动特征,测试周期性波动特征对电能表动态误差的影响.

针对复杂电力动态负荷信号的特征分析和动态电能测试信号建模,国内外学者虽已取得了标志性的研究成果,但还存在如下问题需要解决:(1)如何提取并准确表征复杂电力动态负荷(如电气化铁路和电弧炉负荷)信号“大波动性”、“强随机性”和“快速时变性”的局部和全局特征;(2)如何建立特定的动态电能测试信号模型,以表征这些重要特征,并测试其对电能计量误差的影响.以上问题是新型电力系统发展背景下亟需探索的挑战性难题.

本文将针对现场采集的复杂电力动态负荷信号,研究将负荷信号从波形域映射到游程域的方法,构建特征参量和特征函数,在波形域和游程域表征电气化铁路和电弧炉负荷信号的“大波动性”、“强随机性”和“快速时变性”.同时,建立反映两类动态负荷典型特征的动态电能测试信号模型,测试电能计量的动态误差.

1 复杂电力动态负荷信号波形域特征分析

复杂电力动态负荷信号的特征分析在监控电力系统运行、提高系统运行稳定性和经济性等方面具有重要作用.近年来的研究表明,对复杂电力动态负荷信号进行特征分析也是建立电动态误差测试信号模型的基础.从电能表动态误差测试角度来看,更受关注的负荷信号特征为负荷电压和电流在长持续时间(≥ 1000 s)内的全局变化特征.

1.1 复杂电力动态负荷信号采集与数学模型构建

本文重点针对电力系统中典型的2类特大功率动态负荷——电气化铁路和电弧炉,在负荷工作状态下,采用日置MR8875-30存储记录仪,于公共连接点处PT/CT二次侧进行三相瞬时电压和电流数据的采集,采样频率为50 kHz.

基于先验知识,建立复杂电力动态负荷电压和电流的离散数学模型如下:

$$u_k(n) = U_k \sum_{h_1=1}^{h_1^{\max}} A_{kh_1} \sin(h_1 \omega_1 n T_s + \phi_{kh_1}(n T_s)) \quad (1)$$

$$i_k(n) = I_k \sum_{h_2=1}^{h_2^{\max}} B_{kh_2} \sin(h_2 \omega_1 n T_s + \varphi_{kh_2}(n T_s)) \quad (2)$$

式中, $k=a,b,c$ 表示A、B、C三相, n 为离散点, $T_s=1/f_s$ 为采样时间间隔, f_s 为采样频率, U_k 和 I_k 分别为各相电压与电流幅值, h_1 和 h_2 为表示电压与电流的谐波次数, $h_1^{\max}$ 和 $h_2^{\max}$ 分别为电压与电流谐波的最高次数, A_{kh_1} 和 B_{kh_2} 为电压 h_1 次谐波分量与电流 h_2 谐波分量的相对幅值, $A_{k1}=B_{k1}=1$. $\omega_1=2\pi f_1$ 为角频率, f_1 为工频频率,在理想情况下, $f_1=50$ Hz. $\phi_{kh_1}(n T_s)$ 和 $\varphi_{kh_2}(n T_s)$ 分别为电压 h_1 次谐波分量与电流 h_2 谐波分量的初相位.

1.2 复杂电力动态负荷信号波形域特征分析

为全面分析并表征复杂电力动态负荷信号的“大波动性”、“强随机性”和“快速时变性”,本文首先对电气化铁路和电弧炉信号进行波形域特征分析并提取特征参数,主要包括电压、电流的幅值波动特征,电流的分布特征和自相关特征.

特征(1):幅值波动特征分析与参数提取

现场采集的电气化铁路和电弧炉负荷数据时长分别为3600 s和1230 s,如图1和图2所示,电气化铁路瞬时电压和电流的幅值波动区间分别为[150.76 kV, 164.33 kV]和[9.74 A, 401.86 A].电弧炉瞬时电压和电流的幅值波动区间分别为[46.51 kV, 50.14 kV]和[-57.6 A, 406.8 A].

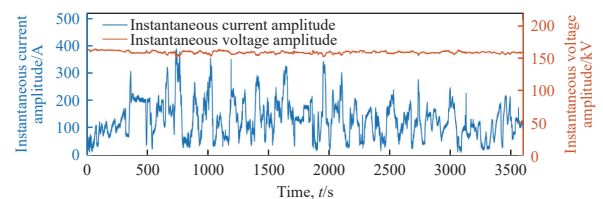


图1 电气化铁路瞬时电压与电流幅值波动曲线

Fig.1 Instantaneous voltage and current amplitude fluctuation curves of the electrified railway system

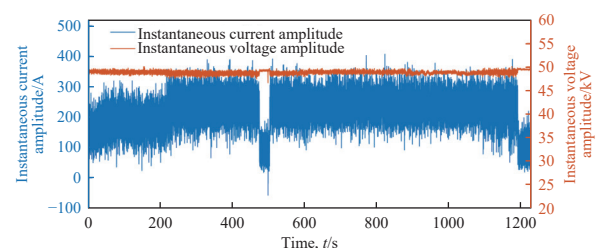


图2 电弧炉瞬时电压与电流幅值波动曲线

Fig.2 Instantaneous voltage and current amplitude fluctuation curves of the electric arc furnace system

可以看出, 电压幅值的波动范围均较小, 具有近似稳定性, 设定 $[u_k(n): U_k, A_{kh1}, h_1\omega_1, \phi_{kh1}(nT_s)]$ 为反映负荷瞬时电压幅值稳态特性的参数. 而电流幅值波动范围均较大, 具有快速随机动态波动特征. 设定 $[i_k(n): I_k, B_{kh2}, h_2\omega_1, \phi_{kh2}(nT_s)]$ 为反映负荷瞬时电流幅值动态特性的参数.

基于负荷瞬时电流幅值的快速随机动态波动特征, 可将瞬时电流看作为随机信号, 为深入研究并提取复杂电力动态负荷信号随机变化的特征函数与特征参数, 以下将进一步研究瞬时电流的分布特征和自相关特征.

特征(2): 分布特征分析与参数提取

对于复杂电力动态负荷瞬时电流 $i_k(n)$ 的分布特性, 特征函数为概率密度函数 pd_i , 特征参数为随机信号的均值 μ_i 和方差 σ_i^2 , 即设定 $[i_k(n): pd_i, \mu_i, \sigma_i^2]$ 为反映负荷瞬时电流分布特征的参数. 本文采用最优直方图曲线拟合法分析离散随机信号的概率密度函数, 首先采用 Terrell 公式计算确定直方图组距为:

$$DIS_i \leq (686\sigma_i^3 / 5\sqrt{7}N_i)^{1/3} \approx 3.729 \cdot \sigma_i \cdot N_i^{-1/3} \quad (3)$$

式中, σ_i 为随机信号的标准差, N_i 为 $i_k(n)$ 的长度, 根据组距计算直方图分组数:

$$g_i = [\max i_k(n) - \min i_k(n)] / DIS_i \quad (4)$$

Terrell 公式同时规定了最小分组数 $\sqrt[3]{2N_i}$.

计算得到每个直方图分组内的概率密度:

$$pd_i = f_{vi} / (N_i \cdot DIS_i) \quad (5)$$

f_{vi} 为分组内随机信号值的频率. 通过连接每个直方图的最高点拟合的曲线为离散随机信号的概率密度函数 pd_i .

最后, 采用 Kullback-Leibler(K-L) 散度检测方法判断 pd_i 的分布特征^[25]:

$$D(pd_i || pd_{ref}) = \int pd_i (\log pd_i / pd_{ref}) dx \quad (6)$$

式中, pd_{ref} 为参考分布特征的概率密度函数, $D(pd_i || pd_{ref})$ 的取值越小, 说明 pd_i 的分布特征与参考分布特征越接近.

采用上述方法得到电气化铁路和电弧炉瞬时电流幅值的概率密度函数如图 3 所示.

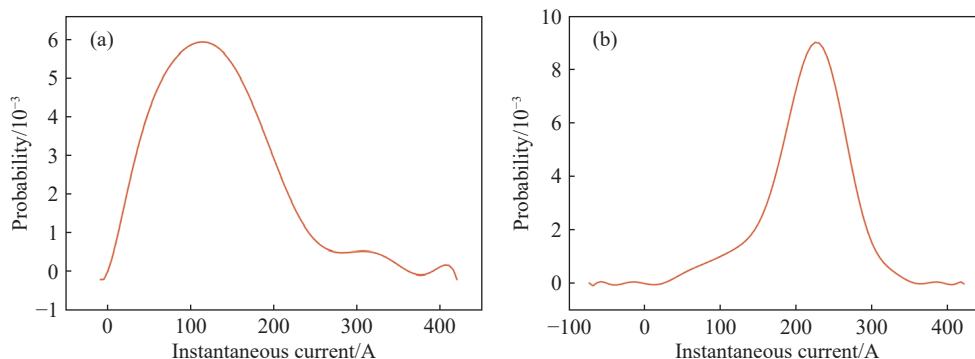


图 3 电气化铁路和电弧炉瞬时电流幅值概率密度函数. (a) 电气化铁路瞬时电流幅值概率密度函数; (b) 电弧炉瞬时电流幅值概率密度函数

Fig.3 Probability density function of instantaneous current amplitude of the electrified railway and electric arc furnace systems: (a) probability density function of instantaneous current amplitude of the electrified railway system; (b) probability density function of instantaneous current amplitude of the electric arc furnace system

通过 K-L 散度检验方法, 判断电气化铁路和电弧炉瞬时电流幅值的分布符合渐进高斯分布.

特征(3): 自相关特征分析与参数提取

自相关特征能够表示随机信号在某个时刻的相关程度, 反映信号随机变化的频率. 复杂电力动态负荷瞬时电流自相关特征的特征函数为自相关函数 $R_i(m_i)$, 特征参数为 $i_k(n)$ 的长度 N_i 和移位间隔 m_i , 设定 $[i_k(n): R_i(m_i), N_i, m_i]$ 为反映负荷瞬时电流自相关特征的参数. 计算 $i_k(n)$ 的自相关函数为:

$$R_i(m_i) = \frac{1}{N_i} \sum_n^{N_i - |m_i| - 1} i_k(n) i_k(n + m_i) \quad (7)$$

分析得到电气化铁路和电弧炉瞬时电流幅值的自相关函数如图 4 所示.

随着移位间隔的增大, 电气化铁路和电弧炉瞬时电流幅值的自相关系数减小, 反映瞬时电流具有快速随机动态波动的特征.

基于以上分析结果, 总结复杂电力动态负荷信号的波形域特征如表 1.

2 复杂电力动态负荷信号游程域特征分析

为进一步分析复杂电力动态负荷电流的波动特征, 本文基于 Cramer 分解定理^[26]和波形域幅值映射理论, 研究提出复杂电力动态负荷信号的游

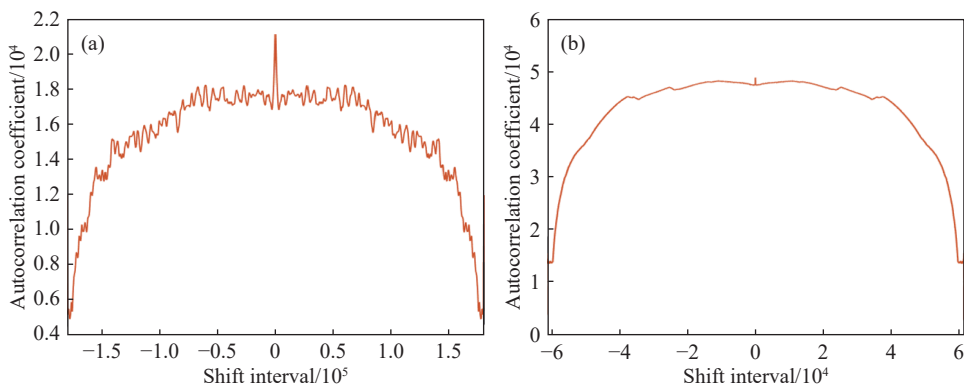


图4 电气化铁路和电弧炉瞬时电流幅值自相关函数。(a) 电气化铁路瞬时电流幅值自相关函数; (b) 电弧炉瞬时电流幅值自相关函数

Fig.4 Autocorrelative function of instantaneous current amplitude of the electrified railway and electric arc furnace systems: (a) autocorrelative function of instantaneous current amplitude of the electrified railway system; (b) autocorrelative function of instantaneous current amplitude of the electric arc furnace system

表1 复杂电力动态负荷信号波形域典型特征

Table 1 Typical characteristics of complex power dynamic load signals in waveform domain

Typical characteristic	Signal	Characteristic parameter	Characterization
Volatility characteristic	Voltage	$[u_k(n): U_k, A_{kh1}, h_1\omega_1, \phi_{kh1}(nT_s)]$	Approximate stability
	Current	$[i_k(n): I_k, B_{kh2}, h_2\omega_1, \varphi_{kh2}(nT_s)]$	Rapid random dynamic fluctuations
Distribution characteristic	Current	$[i_k(n): \text{pd}_i, \mu_i, \sigma_i^2]$	Asymptotic Gaussian distribution
Autocorrelation characteristic	Current	$[i_k(n): R_i(m_i), N_i, m_i]$	As the shift interval increases, the autocorrelation coefficient decreases

程域特征分析方法。

2.1 复杂电力动态负荷电流的游程序列提取

根据数理统计的先验知识, 具有快速随机动态波动的电流属于非平稳随机过程。Cramer 分解定理指出, 任何一个非平稳随机序列都可以分解为确定性趋势成分和平稳的零均值误差成分。因此, 可将式 (1) 的离散电流序列 $i_k(n)$ 分解如下:

$$i_k(n) = i_k^{\text{qs}}(n) + i_k^{\text{d}}(n) \tag{8}$$

式中: $i_k^{\text{qs}}(n)$ 为确定性趋势成分的准稳态项, 表征序列的慢速波动特征; $i_k^{\text{d}}(n)$ 为平稳零均值误差成分的动态项, 表征序列的快速随机动态波动特征。

对电气化铁路和电弧炉的瞬时电流幅值进行分解, 得到动态项和准稳态项的幅值曲线分别如图 5 所示。

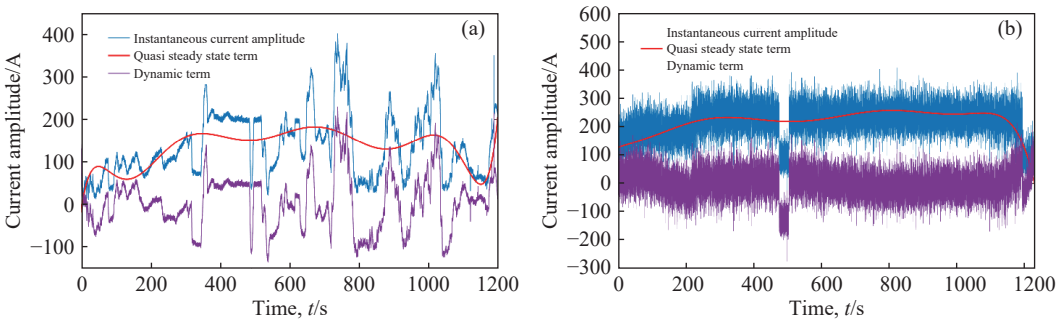


图5 电气化铁路和电弧炉瞬时电流幅值分解曲线。(a) 电气化铁路瞬时电流幅值分解曲线; (b) 电弧炉瞬时电流幅值分解曲线

Fig.5 Instantaneous current amplitude decomposition curves of the electrified railway and electric arc furnace systems: (a) Instantaneous current amplitude decomposition curve of the electrified railway system; (b) Instantaneous current amplitude decomposition curve of the electric arc furnace system

针对复杂电力动态负荷电流的离散序列, 为了更清晰地表征其“大波动性”、“强随机性”和“快速时变性”的全局特征, 本文基于伪随机信号中的游程编码理论, 通过波形域幅值到游程的映

射, 将离散的电流幅值序列转换为二元随机游程序列。

如图 6, 以准稳态项 $i_k^{\text{qs}}(n)$ 为基准, 将离散电流幅值序列 $i_k(n)$ 分别映射为上升游程和下降游程。

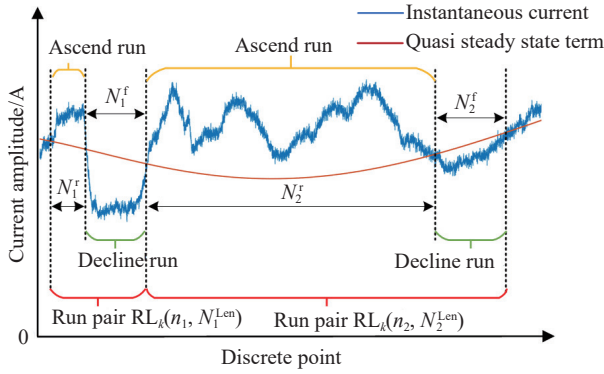


图 6 动态负荷电流幅值游程

Fig.6 Run outcomes of the dynamic load-current amplitude

当电流幅值 $i_k(n)$ 满足如下式 (9):

$$\begin{cases} i_k(n_l) = i_k^{qs}(n_l) \\ i_k(n_l + j) > i_k^{qs}(n_l + j), \quad j = 1, 2, \dots, N_l^r - 1 \\ i_k(n_l + N_l^r) \leq i_k^{qs}(n_l + N_l^r) \end{cases} \quad (9)$$

则定义上升游程:

$$RL_k^r(n_l, N_l^r) = [i_k(n_l), i_k(n_l + 1), \dots, i_k(n_l + N_l^r - 1)] \quad (10)$$

式中, N_l^r 为上升游程长度, n_l 为游程起始离散点序号.

当电流幅值 $i_k(n)$ 满足如下式 (11):

$$\begin{cases} i_k(n_r) = i_k^{qs}(n_r) \\ i_k(n_r + j) < i_k^{qs}(n_r + j), \quad j = 1, 2, \dots, N_l^f - 1 \\ i_k(n_r + N_l^f) \geq i_k^{qs}(n_r + N_l^f) \end{cases} \quad (11)$$

则定义下降游程:

$$RL_k^f(n_r, N_l^f) = [i_k(n_r), i_k(n_r + 1), \dots, i_k(n_r + N_l^f - 1)] \quad (12)$$

$RL_k^f(n_r, N_l^f)$ 即为紧邻上升游程 $RL_k^r(n_l, N_l^r)$ 的下降游程, N_l^f 为下降游程长度, $n_r = n_l + N_l^r$. 将紧邻的上升游程 $RL_k^r(n_l, N_l^r)$ 和下降游程 $RL_k^f(n_r, N_l^f)$ 组成一个游程对:

个游程对:

$$RL_k(n_l, N_l^{Len}) = [RL_k^r(n_l, N_l^r), RL_k^f(n_r, N_l^f)] \quad (13)$$

N_l^{Len} 即为一个游程对的长度, $N_l^{Len} = N_l^r + N_l^f$.

图中, $RL_k^r(n_1, N_1^{Len})$ 和 $RL_k^f(n_2, N_2^{Len})$ 分别代表离散电流幅值序列 $i_k(n)$ 的第一个游程对和第二个游程对.

由式 (8), 动态项 $i_k^d(n)$ 可通过 $i_k^d(n) = i_k(n) - i_k^{qs}(n)$ 计算得到, 则 $i_k^d(n)$ 的游程对表示如下:

$$RL_k^d(n_l, N_l^{Len}) = [RL_k^{dr}(n_l, N_l^r), RL_k^{df}(n_r, N_l^f)] \quad (14)$$

式中, $RL_k^{dr}(n_l, N_l^r)$ 和 $RL_k^{df}(n_r, N_l^f)$ 分别为 $i_k^d(n)$ 的上升游程和下降游程.

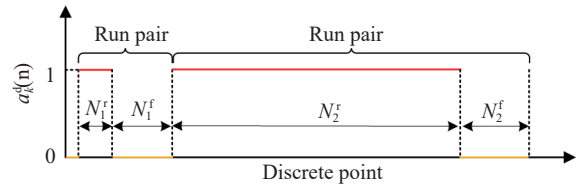
针对 $i_k^d(n)$, 建立二元随机游程序列的映射关系:

$$a_k^d(n) = \begin{cases} 1, & i_k^d(n) > 0 \\ 0, & i_k^d(n) \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

在一个游程对内, 二元随机游程序列 $a_k^d(n)$ 为:

$$a_k^d(n) = \left[\underbrace{1, 1, \dots, 1}_{N_l^r}, \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{N_l^f} \right] \quad (16)$$

$a_k^d(n)$ 的示意图如图 7 所示.

图 7 二元随机游程序列 $a_k^d(n)$ Fig.7 Binary random-run sequence $a_k^d(n)$

针对以上游程序列提取理论, 将电气化铁路和电弧炉的瞬时电流幅值映射为二元随机游程序列如图 8 所示.

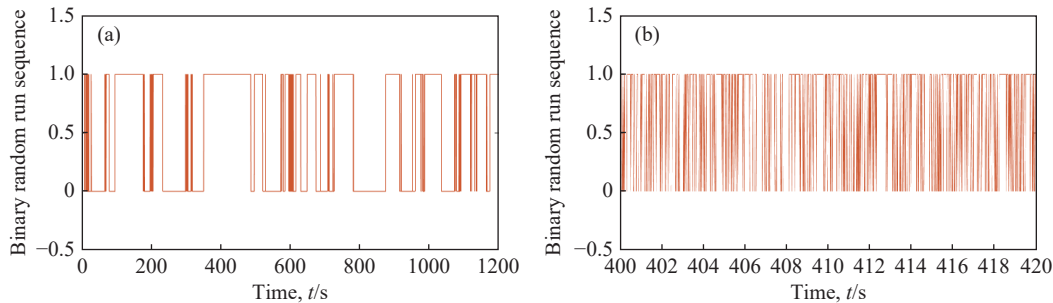


图 8 电气化铁路和电弧炉的二元随机游程序列. (a) 电气化铁路瞬时电流幅值二元随机游程序列; (b) 电弧炉瞬时电流幅值二元随机游程序列

Fig.8 Binary random-run sequence of the electrified railway and electric arc furnace systems: (a) binary random-run sequence of electrified railway system; (b) binary random-run sequence of electric arc furnace system

2.2 复杂电力动态负荷电流游程域特征分析

为进一步表征复杂电力动态负荷电流的关键

特征, 本文基于以上提出的电流游程理论, 在游程域进行负荷电流的特征分析与参数提取, 主要包

括模态变化特征、调制深度特征和冲击强弱特征.

特征(1): 模态变化特征分析与参数提取

复杂电力动态负荷电流的游程模态变化特征表示电流幅值的随机动态变化速度, 设定游程长

度 $[i_k(n):N_l^r, N_l^f]$ 为反映游程模态变化特征的参数. 游程长度越小, 电流幅值变化速度越快. 由式 (16) 和图 8 所示的二元随机游程序列, 本文将复杂电力动态负荷电流的游程模态分为三类, 如表 2 所示.

表 2 复杂电力动态负荷电流游程模态分类

Table 2 Classification of complex power dynamic load-current run mode

Run mode	Duration of run/s	Number of continuous power frequency cycles in the run	Amplitude fluctuation speed
Transient fluctuation	0.02–1	1–50	Especially fast
Short-term fluctuation	1–4	50–200	Fast
Long-term fluctuation	>4	>200	Medium or slow speed

分析所采集的电气化铁路和电弧炉电流的瞬时电流信号, 其中, 在 3600 s 内, 电气化铁路负荷瞬时电流幅值的游程模态中, 游程长度的取值范围为 $25 \leq N_l^r \leq 257$, 暂态波动为 45.95%、短时波动为 40.54%、长时波动为 13.51%; 电弧炉负荷瞬时电流幅值的游程模态中, 游程长度的取值范围为 $24 \leq N_l^r \leq 115$, 暂态波动为 95.56%、短时波动为 4.44%、无长时波动. 可以看出, 电弧炉的负荷瞬时电流幅值变化更快.

为进一步表征复杂电力动态负荷电流的关键特征, 本文基于以上提出的电流游程理论, 在游程域进行负荷电流的特征分析与参数提取, 主要包括模态变化特征、调制深度特征和冲击强弱特征.

特征(2): 调制深度特征分析与参数提取

复杂电力动态负荷电流的游程调制深度特征表示动态电流幅值在每个游程长度内的波动范围, 特征函数为游程调制深度函数 $H_l(i_k)$, 特征参数为 $i_k(n)$ 在一个游程对中的最大值 $\max i_k(n)$ 和最小值 $\min i_k(n)$. 即设定 $[i_k(n):H_l(i_k), \max i_k(n), \min i_k(n)]$ 为反映负荷电流游程调制深度特征的参数. $H_l(i_k)$ 的计算方法如下:

$$H_l(i_k) = \frac{\max i_k(n) - \min i_k(n)}{\max i_k(n) + \min i_k(n)} \times 100\% \quad (17)$$

$H_l(i_k)$ 越大, 电流幅值在每个游程长度内的波动范围越大. 当 $l=1, 2, \dots$ 时, $H_l(i_k)$ 即表示电流在持续观察时间内波动范围的全局特征.

对电气化铁路和电弧炉的瞬时电流幅值在游程域进行调制深度特征分析, 得到电流的调制深度曲线分别如图 9 所示.

其中, 电气化铁路的电流幅值调制深度变化范围为 $0.01\% \leq H_l(i_k) \leq 99.89\%$, 电弧炉的电流幅值调制深度变化范围为 $0.05\% \leq H_l(i_k) \leq 99.95\%$.

特征(3): 冲击强弱特征分析与参数提取

复杂电力动态负荷电流的游程冲击强弱特征表示动态电流幅值在每个游程长度内的冲击强度, 特征函数为游程冲击强度函数 $Q_l(i_k)$, 特征参数为 $i_k(n)$ 在一个上升/下降游程中的最大值 $\max i_k(n)$ 和平均值 $\bar{i}_k(n)$. 设定 $[i_k(n):Q_l(i_k), \max i_k(n), \bar{i}_k(n)]$ 为反映负荷电流游程冲击强弱特征的参数. $Q_l(i_k)$ 的计算方法如下:

$$Q_l(i_k) = \frac{\max i_k(n)}{\bar{i}_k(n)} \quad (18)$$

$Q_l(i_k)$ 越大, 电流幅值在每个游程长度内的冲

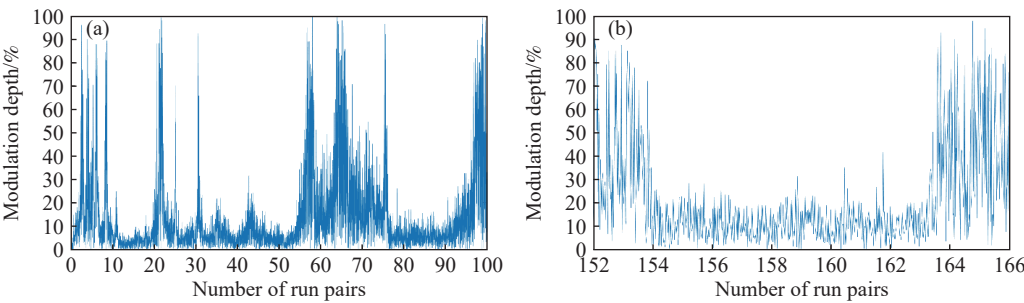


图 9 电气化铁路和电弧炉瞬时电流幅值的游程调制深度特征. (a) 电气化铁路瞬时电流的调制深度特征; (b) 电弧炉瞬时电流的调制深度特征

Fig.9 Instantaneous current modulation depth characteristics of the electrified railway and electric arc furnace systems: (a) instantaneous current modulation depth characteristic of the electrified railway system; (b) instantaneous current modulation depth characteristic of the electric arc furnace system

击强度越大. 当 $l = 1, 2, \dots$ 时, $Q_l(i_k)$ 即表示电流在持续观察时间内冲击强度变化的全局特征, 最大游程冲击强度 $Q_{\max} = \max_{l=1,2,\dots} Q_l(i_k)$.

对电气化铁路和电弧炉的瞬时电流幅值在游程域进行冲击强度特征分析, 得到电流的冲击强度函数曲线分别如图 10 所示.

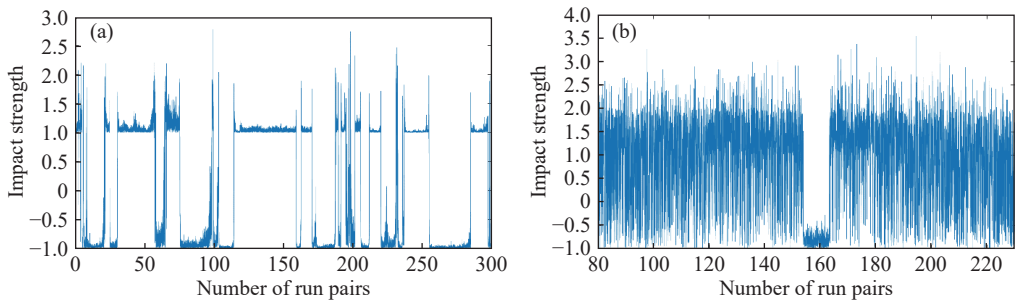


图 10 电气化铁路和电弧炉瞬时电流幅值的冲击强度特征. (a) 电气化铁路瞬时电流的冲击强度特征; (b) 电弧炉瞬时电流的冲击强度特征
Fig.10 Instantaneous current impact strength characteristics of the electrified railway and electric arc furnace systems: (a) instantaneous current impact strength characteristics of the electrified railway system; (b) instantaneous current impact strength characteristics of the electric arc furnace system

其中, 电气化铁路的电流幅值冲击强度的最大值 $Q_{\max} = 2.78$, 电弧炉的电流幅值冲击强度的最大值 $Q_{\max} = 3.55$.

文章以上内容提出了对典型电力动态负荷在波形域和游程域的局部和全局特性分析, 如表 3

所示, 相比于目前国内外已提出的时域、频域和时频域特征分析方法, 本文所提方法具有同时提取复杂动态电能信号的局部和全局特征, 表征信号大范围波动(大波动)、随时间快速变化(快时变)和强随机的重要特征的显著优势.

表 3 本文负荷信号特征分析方法与已有方法的优势对比

Table 3 Comparison of the advantages of load-signal characteristic analysis method in this study with existing methods		
Analysis domain	Characteristic parameter analysis	Evaluation of feature analysis methods
Time domain	Peak of waveform, rise time/rate/peak slope	Regarding the waveform characteristics of low-power loads in local time
Frequency domain	Harmonic amplitude and phase characteristics	Only analyze the impact of harmonic characteristics on energy metering
Time-frequency domain	Harmonic/fundamental active power, Harmonic distortion coefficient, load harmonic factor	Characteristics of harmonic power variation and harmonic current variation within a small time scale
Waveform domain	Volatility, distribution, and distribution characteristics	Global characteristics of rapid amplitude changes in small time scales
Run domain	Run mode, modulation depth, and impact strength characteristics	Local and global features of rapid changes in small time scale

3 二元动态电能测试信号建模与验证

本文在对电气化铁路和电弧炉两类大功率负荷的复杂电力信号进行波形域和游程域典型特征分析的基础上, 针对测试计量的量值溯源要求, 采用特征建模的方法, 构建二元动态电能测试信号模型, 使测试信号能够反映动态负荷信号的典型特征, 涵盖特征参数的最大变化范围, 体现影响电能计量误差的最显著因素. 同时可完成电能表的动态误差测试与电能量值溯源.

3.1 二元动态电能测试信号模型

首先, 建立复杂动态电压和电流测试信号的一般幅值调制模型:

$$u_k^t(n) = v_u(n) U_k \sum_{n_1=1}^{L_k} A_{kn_1} \sin(n_1 \omega_1 n T_s + \phi_{kn_1}(n T_s)) \quad (19)$$

$$i_k^t(n) = v_i(n) I_k \sum_{n_2=1}^{l_k} B_{kn_2} \sin(n_2 \omega_1 n T_s + \varphi_{kn_2}(n T_s)) \quad (20)$$

式中, $v_u(n)$ 和 $v_i(n)$ 分别为电压和电流信号的幅值调制函数. 由于负荷电压具有近似稳定性, 取 $v_u(n) = 1$, 表示电压幅值的小范围波动对电能计量误差的影响可以忽略.

根据图 6 和表 3, 由电流信号的动态项 $i_k^d(n)$ 映射产生的二元随机游程序列 $a_k^d(n)$ 能够反映电流幅值的变化趋势, 具有与瞬时电流幅值相同的特征. 因此, 本文考虑基于二元 m 序列构造电流的幅值

调制函数 $v_i(n)$, 进而建立二元动态电流测试信号模型:

$$i_k^i(n) = v_i(n) I_k \sum_{h_2=1}^{h_2^{\max}} B_{kh_2} \sin(h_2 \omega_1 n T_s + \varphi_{kh_2}(n T_s)) = \left[\sum_{n'=1}^{\infty} a_m(n') g_{n'}(n T_s) \right] I_k \sum_{h_2=1}^{h_2^{\max}} B_{kh_2} \sin(h_2 \omega_1 n T_s + \varphi_{kh_2}(n T_s)) \quad (21)$$

其中, $v_i(n) = \sum_{n'=1}^{\infty} a_m(n') g_{n'}(n T_s)$, n' 表示 m 序列的离散点序号, $g_{n'}(n T_s) = \begin{cases} 1, & n T_s \in [t_0 + (n'-1)T_m, t_0 + n'T_m] \\ 0, & n T_s \notin [t_0 + (n'-1)T_m, t_0 + n'T_m] \end{cases}$, t_0 为 $g_{n'}(n T_s)$ 的第一个过零点时间, T_m 为 m 序列的一个码元时间间隔. $a_m(n')$ 表示二元 m 序列, 根据其产生原理, 可将其进一步表示为:

$$a_m(n') = c_1 a_m(n'-1) \oplus c_2 a_m(n'-2) \oplus \cdots \oplus c_{n_m} a_m(n'-n_m) \quad (22)$$

式中, $\oplus$ 表示模 2 相加, C_r 为线性移位寄存器的反馈系数, $r = 1, 2, \dots, n_m$, n_m 为 m 序列级数.

为全面反映电流幅值在波形域和游程域的典型特征, 本文选取 12 级 24 分频的二元 m 序列构建幅值调制函数 $v_i(n)$, 如图 11 所示.

采用二元 m 序列幅度调制函数, 参考 IEC62052-11 标准中规定的脉冲波设定电流测试信号的谐波参数^[27], 根据式 (21) 得到二元 m 序列动态电流测试信号, 如图 12 所示.

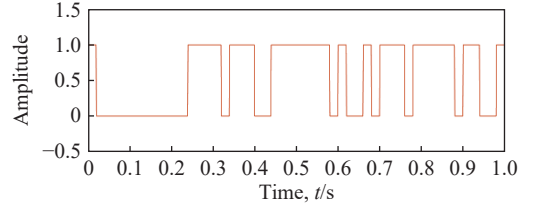


图 11 二元 m 序列幅值调制函数

Fig.11 Binary m-sequence amplitude modulation function

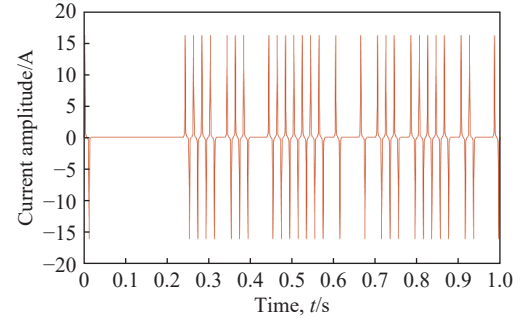


图 12 二元 m 序列动态电流测试信号波形

Fig.12 Waveform of the binary m-sequence dynamic current test signal

为验证所建立的二元 m 序列动态电流测试信号能够反映实际动态负荷波形域和游程域的典型特征, 首先分析二元 m 序列动态电流测试信号的分布特征和自相关特征如图 13 所示. 可看出, 二元 m 序列动态电流测试信号的分布特征是渐进高斯分布; 且随着移位间隔的增大, 二元 m 序列动态电流测试信号的自相关系数减小, 反映二元 m 序列动态电流具有快速随机动态波动的特征.

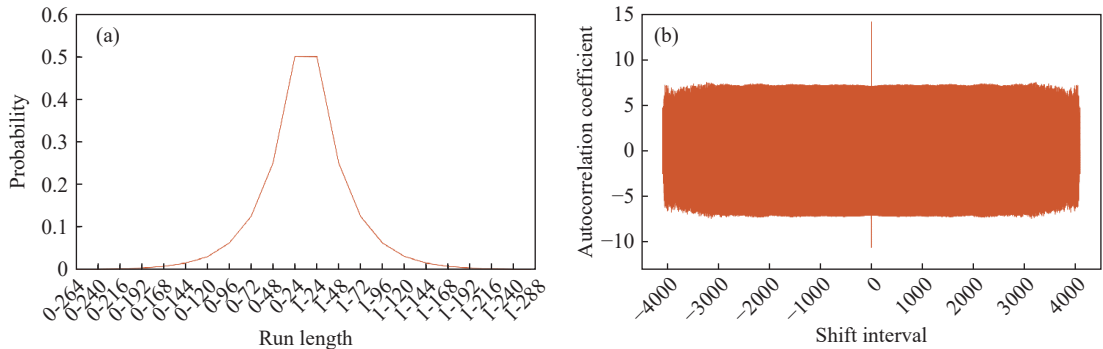


图 13 二元 m 序列动态电流测试信号的概率密度函数和自相关函数. (a) 概率密度函数; (b) 自相关函数

Fig.13 Instantaneous current impact strength characteristics of the electrified railway and electric arc furnace: (a) probability density function of the binary m-sequence dynamic current test signal; (b) autocorrelative function of the binary m-sequence dynamic current test signal

进而分析二元 m 序列动态电流测试信号的游程域特征:

(1) 游程模态变化特征: 暂态波动为 75.04%、短时波动为 24.57%、长时波动为 0.39%; 且游程长度变化范围 $24 \leq N_l^i \leq 288$;

(2) 游程调制深度特征: $0\% \leq H_l(i_k^i) \leq 100\%$;

(3) 游程冲击强弱特征: $Q_{\max} = 4.10$.

可以看出, 二元 m 序列动态电流测试信号的游程域特征参量涵盖电气化铁路和电弧炉负荷在游程域特征参量的最大变化范围, 能够表征实际

负荷的重要特征.

3.2 二元动态电能测试信号有效性验证

为证明二元动态电流测试信号对电能计量误差测试的有效性, 本文采取实验验证的手段, 通过现场搭建测试系统, 测试实际电能表的动态误差. 测试系统中使用的设备和型号如表 4 所示.

表 4 电能计量动态误差测试设备

Equipment	Equipment model
Three-phase steady-state power source/standard electricity meter	Fluke 6100
Dynamic error testing device for electric energy meter	HE5025
oscilloscope	Agilent DSO71048
Frequency meter	Kenwood FC-758A
Tested electricity meter	1.0 level three-phase four-wire cost control electricity meter

设定测试条件如下:

- 1) 三相稳态功率源输出的电压信号幅值为 $U_k=220\text{ V}$, 电流信号幅值为 $I_k=2\text{ A}$;
- 2) 功率因数 $\text{PF}=1.0$, 工频频率 $f_1=50\text{ Hz}$;
- 3) 被测电能表参数: 表常数 $400\text{ imp}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$ (即每消耗 1 千瓦时产生 400 次脉冲信号), 电压量程 $220/380\text{ V}$, 电流量程为 $5(60)\text{ A}$, 误差等级 0.5 S (即 $\pm 0.5\%$).

在二元动态电流测试信号条件下, 被测电能表的电能计量动态误差如表 5 所示.

表 5 二元动态电能测试信号条件电能表的动态误差

Table 5 Dynamic error of tested energy meter under binary dynamic current test signal conditions

Steady-state reference electrical energy/(W·h)	Dynamic reference electrical energy/(W·h)	Dynamic tested electrical energy/(W·h)	Error/%
760.1069	383.45648		-6.12
761.93748	384.29220		-6.32
762.40684	384.59270	360.00000	-6.40
762.29358	384.47380		-6.37
762.85386	384.87492		-6.46

如表 5 所示, 第一列为标准电能表在稳态功率下累计测量稳态参考电能量值, 第二列为在二元动态电能测试信号条件下被测电能表累计的动态参考电能量值, 第三列为被测电能表实际测试的动态电能量值, 可以看出, 多次电能计量的动态误差均超出其误差等级. 因此, 针对复杂电力动态负荷信号波形域和游程域典型特征对电能计量动态

误差影响的测试, 所建立的二元动态电能测试信号模型能够有效测试被测电能表的动态误差.

4 结论

本文针对复杂电力动态负荷信号的局部与全局特征分析和二元动态电能测试信号模型构建展开研究, 首先, 基于所构建的复杂动态负荷信号的离散数学模型, 在波形域分析并提取瞬时电压和电流幅值的重要特征, 体现为电压信号的近似稳定性、电流信号的快速随机动态波动特征, 且电流幅值具有近似高斯分布和自相关系数递减的主要特征; 其次, 基于游程序列映射, 构建负荷信号的二元游程序列, 在游程域分析并提取电流幅值的局部和全局游程模态变化、调制深度和冲击强弱的重要特征, 体现电流信号的快时变性、大波动性和强随机性; 最后, 基于负荷信号在波形域和游程域的典型特征, 采用特征建模方法, 构建二元动态电能测试信号模型, 使信号满足电气化铁路和电弧炉负荷信号的约束条件, 并通过搭建电能计量动态误差测试系统, 验证了测试信号能够测试电能表的动态误差, 具备有效性.

参 考 文 献

[1] Wang H X, Liu M Q, Dong H N, et al. Review on analysis and suppression of low-frequency oscillation in power system with high penetration of renewable energy sources. *Electr Power Autom Equip*, 2023, 43(9): 152
(王海鑫, 刘铭崎, 董鹤楠, 等. 含高比例新能源的电力系统低频振荡分析与抑制综述. *电力自动化设备*, 2023, 43(9): 152)

[2] Dong Y, Sun D Y, Xu D, et al. Challenge, response and prospect of power and electricity balance in new power system. *Proc CSEE*, 2025, 45(6): 2039
(董昱, 孙大雁, 许丹, 等. 新型电力系统电力电量平衡的挑战、应对与展望. *中国电机工程学报*, 2025, 45(6): 2039)

[3] Wang X W, Wu D, Yuan R M, et al. Dynamic test signal modelling and a compressed sensing based test for electric energy meter errors. *Measurement*, 2020, 164: 107915

[4] Huo C J. *Analysis and Research of Load Characteristic in Power System* [Dissertation]. Tianjin: Tianjin University, 2007
(霍成军. *电力系统负荷特性分析研究*[学位论文]. 天津: 天津大学, 2007)

[5] Nguyen D T. Modeling load uncertainty in distribution network monitoring. *IEEE Trans Power Syst*, 2015, 30(5): 2321

[6] Aktas A, Erhan K, Özdemir S, et al. Dynamic energy management for photovoltaic power system including hybrid energy storage in smart grid applications. *Energy*, 2018, 162: 72

[7] ten Have B, Hartman T, Moonen N, et al. Misreadings of static energy meters due to conducted EMI caused by fast changing

- current // 2019 Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sapporo and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Sapporo/APEMC) . Sapporo, 2019: 445
- [8] ten Have B, Hartman T, Moonen N, et al. Inclination of fast changing currents effect the readings of static energy meters // 2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE). Barcelona, 2019: 208
- [9] Li J, Liu Q J, Zhai Y T, et al. Analysis of harmonic resonance for locomotive and traction network interacted system considering the frequency-domain passivity properties of the digitally controlled converter. *Front Energy Res*, 2020, 8: 523333
- [10] Guo C L, Zhu K J, Chen C C, et al. Characteristics and effect laws of the large-scale electric Vehicle's charging load. *eTransportation*, 2020, 3: 100049
- [11] Marulanda-Durango J J, Zuluaga-Ríos C D. A meta-heuristic optimization-based method for parameter estimation of an electric arc furnace model. *Results Eng*, 2023, 17: 100850
- [12] Han X, Li H Q, Wang L, et al. Study on simulation of inter-harmonic characteristic based on operation parameters of AC arc furnace. *Power Capacitor React Power Compens*, 2023, 44(1): 41
(韩学, 李慧奇, 王琳, 等. 基于交流电弧炉运行参数的间谐波特性模拟研究. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(1): 41)
- [13] Lu Z L, Wang L, Li M. Discussion for evaluation of dynamic measurement function of electrical energy meter. *Electr Meas Instrum*, 2010, 47(4): 1
(陆祖良, 王磊, 李敏. 对电能表动态测量功能评价的讨论. 电测与仪表, 2010, 47(4): 1)
- [14] Li S S, Zhao W. A method for dynamic measurement capabilities evaluation of smart meter based on DDS signal generator. *Electr Meas Instrum*, 2010, 47(10): 1
(李世松, 赵伟. 基于 DDS 信号发生器的智能电表动态测量功能评估方法初探. 电测与仪表, 2010, 47(10): 1)
- [15] Zheng J Z, Lu Z L, Li M. Experimental research for dynamic characteristic of electrical energy meter. *Electr Meas Instrum*, 2011, 48(3): 1
(郑荐中, 陆祖良, 李敏. 电能表动态特性实验研究. 电测与仪表, 2011, 48(3): 1)
- [16] Wang X W, Wen L L, Jia X L, et al. OOK-driven dynamic error measurement of smart energy meter. *Electr Power Autom Equip*, 2014, 34(9): 143
(王学伟, 温丽丽, 贾晓璐, 等. 智能电能表动态误差的 OOK 激励测试方法. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 143)
- [17] Wang X W, Chen J X, Yuan R M, et al. OOK power model based dynamic error testing for smart electricity meter. *Meas Sci Technol*, 2017, 28(2): 025015
- [18] Chen J X, Wang X W, Zhu M. SDPA algorithm for dynamic active energy metering of a smart electricity meter. *Chin J Eng*, 2018, 40(12): 1533
(陈景霞, 王学伟, 朱孟. 智能电能表有功电能动态测量的 SDPA 算法. 工程科学学报, 2018, 40(12): 1533)
- [19] Wang X W, Lü P, Wang L, et al. TASK power model based dynamic error testing for electricity meter. *Proc CSEE*, 2016, 36(18): 4847
(王学伟, 吕磅, 王琳, 等. 基于 TASK 功率模型的电能表动态误差测试方法. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4847)
- [20] Wang X W, Yang J. Dynamic test signal model and the electric energy measurement method based on compressed sensing. *Chin J Sci Instrum*, 2019, 40(1): 92
(王学伟, 杨京. 动态测试信号模型及电能压缩感知测量方法. 仪器仪表学报, 2019, 40(1): 92)
- [21] Wang X W, Wang J, Wang L, et al. Non-overlapping moving compressive measurement algorithm for electrical energy estimation of distorted m-sequence dynamic test signal. *Appl Energy*, 2019, 251: 113234
- [22] Wang X W, Wang J. Pseudorandom dynamic test power signal modeling and electrical energy compressive measurement algorithm. *Meas Sci Rev*, 2018, 18(5): 207
- [23] Hosny E M, Abdel Mageed H M, Nada A S. Solar radiation effect on measurement of the electronic energy meter. *IEEE Instrum Meas Mag*, 2022, 25(3): 52
- [24] Yu C P, Duan Y X, Meng J, et al. Comparative study on domestic and international standards of DC energy meter// 2021 IEEE 4th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE). Beijing, 2021: 11
- [25] Che Y L, Wang X R, Lv X Q, et al. Study on probability distribution of electrified railway traction loads based on kernel density estimator via diffusion. *Int J Electr Power Energy Syst*, 2019, 106: 383
- [26] Amir D, Ofer Z. *Large Deviations Techniques and Applications*. 2nd Ed. Beijing: World Publishing Corporation, 2007
- [27] International Electrotechnical Commission. IEC 62052-11 *Electricity Metering Equipment (A. C.) General Requirements, Tests and Test Conditions—Part 11: Metering Equipment*. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2003