引用格式:申洪涛,李翀,王浩,等.一种复杂电磁信号对单相电能表计量误差影响的分析方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(6):204-212.
Citation: SHEN Hongtao, LI Chong, WANG Hao, et al. Analysis method of impact of complex electromagnetic signals on measurement errors in single-phase electric energy meters[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(6):204-212.

一种复杂电磁信号对单相电能表计量误差影响的分析方法

申洪涛[1],李　翀[1],王　浩[1],郭聚川[1],张蓬鹤[2],王　聪[2]
(1.国网河北省电力有限公司营销服务中心,河北 石家庄 050000;2.中国电力科学研究院有限公司,北京 100085)

摘　要:在复杂电磁环境下,种类繁多、调制方式各异的电磁干扰信号会引起单相电能表性能下降。针对复杂电磁信号随机性和动态性的特点,先建立m序列动态测试信号的参数模型;再建立单相电能表结构化测量模型与电磁信号对单相电能表计量误差影响的数学模型;然后,模拟并分析电磁信号对电能表随机干扰的影响;最后,通过仿真与试验测试,分析电磁信号对单相电能表计量误差的影响。研究结果表明,所提方法能较好地度量复杂电磁信号对单相电能表计量误差的影响。

关　键　词:射频电磁信号;电能表;计量误差;m序列;测试信号模型
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.06.020　　**中图分类号**:TM933.4　　**文章编号**:1673-9140(2025)06-0204-09

Analysis method of impact of complex electromagnetic signals on measurement errors in single-phase electric energy meters

SHEN Hongtao[1], LI Chong[1], WANG Hao[1], GUO Juchuan[1], ZHANG Penghe[2], WANG Cong[2]
(1. Marketing Service Center, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: In complex electromagnetic environments, the diverse array of electromagnetic interference signals with varying modulation schemes leads to degraded performance in single-phase electric energy meters. With the random and dynamic characteristics of complex electromagnetic signals, a parametric model is established for m-sequence dynamic test signals. Subsequently, a structured measurement model for single-phase electric energy meters and a mathematical model for the impact of electromagnetic signals on single-phase electric energy meter errors are developed. The impact of electromagnetic signals on random interference in electric energy meters is then simulated. Finally, through simulation and experimental tests, the impacts of electromagnetic signals on measurement errors in single-phase electricity meters are analyzed. The research findings demonstrate that the proposed methodology effectively quantifies the impact of complex electromagnetic signals on measurement errors in single-phase electric energy meters.

Key words: radio-frequency electromagnetic signal; electric energy meter; measurement error; m sequence; test signal model

随着智能电网和用户信息采集系统的进一步发展,电网系统深度融合了智能传感技术、通信遥感技术和控制技术。但智能电能表数量的急剧增加,也给电能表的可靠性评估带来了挑战[1-2]。目前,温度、湿度等环境因素对电能表计量影响方面的研究已取得了很多成果[3-4],单相电能表亦属于电子式电能表,其内部含有大量电子元件,极易受到周围复杂电磁场的干扰。

收稿日期:2024-07-31;**修回日期**:2025-03-12
基金项目:河北省电力公司(kj2003-083)
通信作者:李翀(1980—),高级工程师,主要从事电力计量方面的研究;E-mail:775082527@qq.com

当前，国内外学者对电能表在电磁环境下的影响做出了大量研究。文献[5]提出了基于聚类优化的三相电能表计量误差自动检定办法，提高了检定的准确度。文献[6]分析了电能表在射频电磁场出现频繁自动重启的案例，针对空间射频电磁场在环路中受干扰电压影响所引发的电能表自动重启复位问题，采用在参考引脚与地之间并接旁路电容的方法，有效滤除了此类噪声。文献[7-9]主要研究了工频电磁场抗扰度试验的设计与改进。文献[10]结合多种算法，建立了台区线损率预测模型，对电能表误差进行估计。文献[11]为解决电能表检定装置易受频带内信号干扰的问题，建立了电压去耦网络，有效增强了装置的抗电磁干扰能力。文献[12]建立了开-关键控动态电流模型与动态负载能量模型，提高了动态信号测试准确度。但这些研究均忽略了电磁信号随机性的特点。

在研究电磁信号对电能表计量误差影响方面，电磁信号的随机干扰仍是一个有挑战性的难题。本文先分析电磁干扰的耦合机理[13-14]和电磁信号对电能表的影响机理；再从电磁信号传播过程中的随机性与不确定性着手，建立基于m序列调制的动态测试信号模型与电磁信号对电能表计量影响的数学模型；最后，进行仿真与试验，分析复杂电磁信号对电能表计量误差的影响。

1　电磁干扰耦合机理及对电能表的影响机制

电磁干扰的3个要素分别是干扰源（骚扰源）、耦合路径和敏感体[15]。为减少电磁干扰带来的影响，应从干扰源出发，切断其传播途径。

电磁干扰的耦合途径主要有辐射与传导2种类型。在远场区域，电磁干扰的耦合途径是电磁波；在近场区域，辐射耦合可以表现为磁场主导，也可能以电场耦合主导，且电场与磁场的比值是固定的[16]。

根据频谱特征，电磁干扰可分为3类：音频噪声（0～20 kHz）多由电容器和高频变压器引发，其会对电能表的计量和相序造成干扰；射频干扰（20 kHz～50 MHz）与辐射干扰（超过50 MHz）均会不同程度地影响电能表精度。目前，频率超过20 kHz的射频与辐射信号对常见单相电能表的辐射干扰无法被有效滤除，单相电能表的计量精度将不同程度地下降。

射频信号对单相电能表的影响主要体现在两个方面：一方面，射频信号能穿透电能表的外壳，直接进入其内部结构；另一方面，射频信号也通过电能表的各个接线端口进入其内部，造成干扰。射频信号对电能表计量的干扰途径如图1所示。

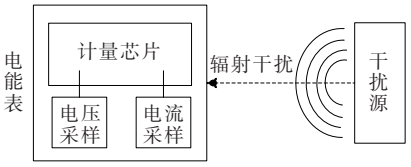


图1　射频信号对电能表计量的干扰路径

Figure 1　Interference path of radio-frequency signal to measurement of electric energy meter

电能表通过电压、电流采样得到电压、电流模拟信号，并将这些信号转变为数字信号进行处理。在电能表内部，高精度计量芯片的外部模拟量接口直接与外部的印刷电路板（printed circuit board，PCB）电路板布线相连。当其参考电压信号线和模拟量信号线中的信号耦合了电磁干扰信号时，后续数字电路中的低通滤波器可能无法进行有效的滤波处理。如果干扰信号的强度超过了电能表内部电路的噪声阈值，就可能对电能表的计量精度造成显著影响。

2　m序列动态测试信号的调制与建模

在实际中，电能表附近区域电磁信号在时间、频域、能量等方面发生异常变化时，周围的电磁信号具有随机性与时变性等特点[17-19]。因此，为更准确地表征射频电磁信号，本文采用将稳态信号转换为动态信号的方法，建立m序列动态测试信号模型。

2.1　m序列生成原理

m序列又称线性反馈移位寄存器序列。m序列的一般结构如图2所示。在图2中，$c_i, i=0,1,\cdots,n$，为反馈系数；$a_{n-i}^{i}, i=1,2,\cdots,n$为移位寄存器各级的状态。该序列是由带线性反馈的移位寄存器产生的周期最长的序列。

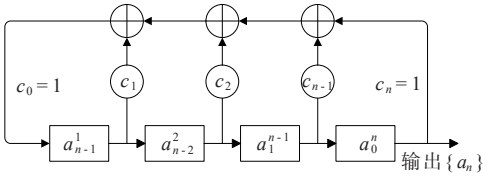


图2　m序列的一般结构

Figure 2　General structure of m sequence

设m序列的初始状态为$(a_0, a_1, \cdots, a_{n-1})$，经过一次线性移位后，移位寄存器第一级的输入$a_n$为

$$a_n = c_1 a_{n-1} + c_2 a_{n-2} + \cdots + c_n a_0 = \sum_{i=1}^{n} c_i a_{n-i} \quad (1)$$

经过k次移位后，第一级的输入a_i为

$$a_i = \sum_{i=1}^{n} c_i a_{l-i}, l = n + k - 1 \quad (2)$$

由式(1)、(2)可知，移位寄存器的原状态和反馈逻辑将会决定移位寄存器第一级的输入。以4级线性反馈移位寄存器为例，其反馈移位寄存器原理如图3所示。在图3中，其周期$p = 2^4 - 1 = 15$，特征多项式为能整除$(x^{15}+1)$的4次本原多项式。先对$x^{15}+1$分解因式，使各因式为既约多项式(在定义域内不能被分解为2个非常数多项式乘积的多项式)，再寻找$f(x)$，即

$$x^{15}+1 = (x+1)(x^5+x+1)(x^4+x+1)(x^4+x^3+1)(x^4+x^3+x^2+x+1) \quad (3)$$

其中，4次既约多项式有3个，但是在这3个既约多项式中，只有2个可以产生m序列，用$f(x) = x^4 + x + 1$构成的m序列如图4所示。

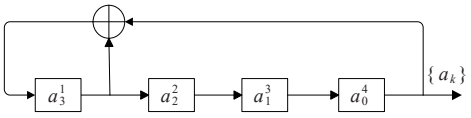


图3 4级反馈移位寄存器原理

Figure 3 Principle of 4-stage feedback shift register

a_3	a_2	a_1	a_0	
1	0	0	0	
1	1	0	0	
1	1	1	0	
1	1	1	1	
0	1	1	1	
1	0	1	1	
0	1	0	1	
1	0	1	0	→15个
1	1	0	1	
0	1	1	0	
0	0	1	1	
1	0	0	1	
0	1	0	0	
0	0	1	0	
0	0	0	1	

图4 4级m序列

Figure 4 4-stage m sequence

从图4中可以看出，该4级m序列的初始状态为$(a_3, a_2, a_1, a_0) = (1, 0, 0, 0)$。第一次移位时，先将$a_3$和$a_0$模2相加，产生的新输入放至寄存器$a_3$；再将寄存器$a_2$更新为$a_3$原有值；然后，将$a_1$更新为$a_2$原有值；最后，将$a_0$更新为$a_1$原有值。因此，此时的状态变为(1, 1, 0, 0)。按照这种方式移位15次后，序列的状态将回到其初始状态。从这种移位方法可以看出，若初始状态为(0, 0, 0, 0)，则15次移位后仍为全零状态，但反馈移位寄存器应避免全零状态。

从这些对m序列原理的分析中不难看出，在一个周期内，m序列能有效反映动态信号的随机变化，且有着很强的自相关性，但m序列长度超过该周期长度后，又会进入下一个周期循环。因此，利用m序列伪随机性的特点，可模拟复杂电磁环境下射频电磁信号。

2.2 m序列调制的动态测试电流信号模型

基于文2.1中所叙述的m序列调制原理，将稳态信号转化为动态信号，构建的m序列测试电流信号模型如图5所示。在图5中，$m(t)$为m序列二元波形信号，其是由线性反馈移位寄存器产生的伪随机序列，通常表现为方波形式，将稳态电流信号转化为动态信号。

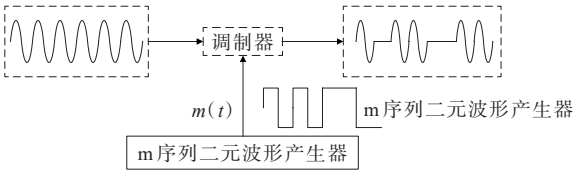


图5 m序列测试电流信号模型

Figure 5 m sequence test current signal model

本文基于m序列对正弦稳态电流信号$i_0(t)$行调制，得到具有随机动态特性的电流信号$i_1(t)$。其中，正弦稳态电压信号$u_0(t)$和正弦稳态电流信号$i_0(t)$分别为

$$\begin{cases} u_0(t) = U\sin(\omega t + \varphi_u) \\ i_0(t) = I\sin(\omega t + \varphi_i) \end{cases} \quad (4)$$

式中，t为时间；U, I分别为电压和电流的幅值；φ_u, φ_i分别为电压、电流的相位；ω为角频率。

二元波形函数$m(t)$采用矩阵窗函数与m序列相乘的形式，即

$$m(t) = \sum_{k=1}^{N} m(k) g(t - kT) \quad (5)$$

$$g(t - kT) = \begin{cases} 1, & t \in [kT, (k+1)T] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中，N为m序列的周期长度，其值为$2^l - 1$；l为m序列的级数；$g(t)$为矩阵窗函数；T为正弦稳态电流的周期；$k = 1, 2, \cdots, n$。

将$m(t)$函数与正弦稳态电流$i_0(t)$相乘，进行幅度调制，可得随时间t变化的动态电流信号$i_1(t)$：

$$i_1(t)=m(t)i_0(t)=I_m\left[\sum_{k=1}^{N}m(k)g(t-kT)\right]\sin(\omega t+\varphi_i) \quad (7)$$

式中,I_m为调制后电流$i_d(t)$的最大幅值,$|m(t)|\leqslant 1$。

依据文2.1中m序列生成原理,序列$m(k)$为

$$m(k)=\sum_{i=1}^{l}c_i m(k-i)(\mathrm{mod}\,2),k=1,2,\cdots,n \quad (8)$$

式中,c_i为反馈系数(若参与反馈,则其为1;若不参与反馈,则其为0)。

将式(8)代入式(7)中,可得

$$i_1(t)=I_m\sum_{k=1}^{N}\left\{\left[\sum_{i=1}^{l}c_i\,m(k-i)\,(\mathrm{mod}\,2)\right]\cdot g(t-kT)\right\}\cdot \sin(\omega t+\varphi_i) \quad (9)$$

3　射频电磁信号对单相电能表影响的建模

射频干扰是一种近似均匀分布噪声,这种噪声和电能表输入的电流、电压均是相互独立的。因此,其可叠加到输入电流和电压中,影响电能表计量精度[20-21]。在本文中,先建立单相电能表结构化测量模型;再基于m序列调制,建立射频电磁信号对单相电能表计量误差影响的数学模型。

3.1　单相电能表结构化模型

为进一步分析射频电磁场对单相电能表的误差影响,建立如图6所示的单相电能表结构化测量模型。

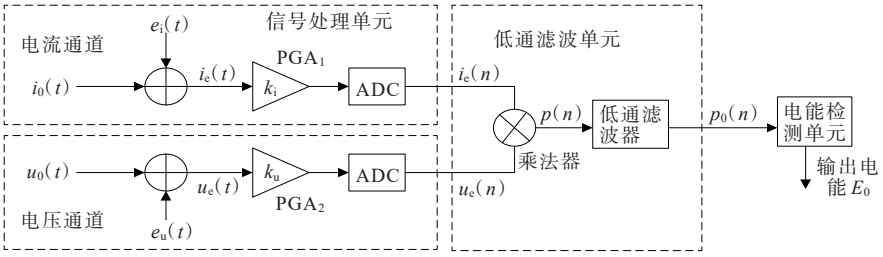


图6　单相电能表结构化测量模型

Figure 6　Structured measurement model of single-phase electric energy meter

从图6中可以看出,单相电能表测量系统由3个子系统串联组成:信号处理单元、低通滤波单元和电能检测单元。其中,低通滤波部分主要由低通滤波器和乘法器组成;信号处理单元包括电流通道和电压通道,其由程控放大器(programmable gain amplifier, PGA)、模数控制器(analog-to-digital converter,ADC)组成;电能检测单元主要用于求解并输出累计的电能。

图6中,信号处理单元包含了PGA与ADC。由于射频信号属于加性噪声,故该电能表输入的正弦稳态电流$i_0(t)$和射频干扰信号$e_i(t)$二者叠加形成$i_e(t)$,$i_e(t)$输入至PGA$_1$进行增益放大,PGA$_1$的放大系数为k_i,其将放大后的电流信号经过模数转化得到$i_e(n)$;同理,正弦稳态电压信号$u_0(t)$叠加射频电压信号后得到$u_e(t)$,经PGA$_2$放大k_u倍进行模数转换得到$u_e(n)$;$i_e(n)$和$u_e(n)$相乘,得到离散化的瞬时功率信号$p(n)$;最后,通过低通滤波器进行滤波,除掉高次谐波,得到有功功率$p_0(n)$,有功功率$p_0(n)$经过电能检测单元输出电能E_0。

3.2　射频电磁信号对单相电能表影响的数学模型

输入的正弦信号电压与电流$u_0(t)$,$i_0(t)$与式(4)中的电压与电流相同,建立未调制射频电流信号$e_i(t)$与射频电压信号$e_u(t)$数学模型,即

$$e_i(t)=I_e\cos(\omega_1 t+\psi_i)-I_e\sin(\omega_1 t+\psi_i)+\sigma_i \quad (10)$$

$$e_u(t)=U_e\cos(\omega_1 t+\psi_u)-U_e\sin(\omega_1 t+\psi_u)+\sigma_u \quad (11)$$

式中,U_e、I_e分别为射频信号的电压幅值和电流幅值;ω_1为射频信号的角频率,$\omega_1=2\pi f_1$,f_1为射频信号的角频率,其值为1.84 GHz;ψ_i和ψ_u分别为射频电流信号和射频电压信号的相位;σ_i和σ_u分别为射频信号的电流噪声误差和电压噪声误差(ψ_i、ψ_u、σ_i和σ_u均服从均值为0,方差为1的高斯分布)。

为模拟复杂电磁环境下的射频信号的随机性,对射频电流信号进行m序列调制,可得随时间t变化的动态射频电流信号$e_{id}(t)$,即

$$e_{id}(t)=e_i(t)m(t)=\sqrt{2}\,I_e\left[\sum_{k=1}^{N}m(k)g(t-kT)\right]\cdot\cos\left(\omega_1 t+\psi_i+\frac{\pi}{4}\right)+\sigma_i\sum_{k=1}^{N}m(k)g(t-kT) \quad (12)$$

将调制后输入电流与射频电流相加，可得到$i_e(t)$，即

$$i_e(t)=i_0(t)+e_{id}(t) \tag{13}$$

将输入电压与射频电压相加，可得$u_e(t)$，即

$$u_e(t)=u_0(t)+e_u(t) \tag{14}$$

将$i_e(t)$乘以增益系数k_i，再进行模数转换，离散化可得到$i_e(n)$。类似地，将$u_e(t)$乘以增益系数k_u后，进行离散化，得到$u_e(n)$，即

$$i_e(n)=k_iI_0\sin\left(n\omega_0t_s+\varphi_i\right)+k_i\sigma_i+\sqrt{2}\,k_iI_e\left[\sum_{k=1}^{N}m(k)g(t_n-kT)\right]\cos\left(n\omega_1t_s+\beta_1\right) \tag{15}$$

$$u_e(n)=k_uU_0\sin\left(n\omega_0t_s+\varphi_u\right)+k_u\sigma_u+\sqrt{2}\,k_uU_e\cos\left(n\omega_1t_s+\beta_2\right) \tag{16}$$

$$\beta_1=\beta+\psi_i+\frac{\pi}{4} \tag{17}$$

$$\beta_2=\beta+\psi_u+\frac{\pi}{4} \tag{18}$$

式中，I_0为负载电流的基波幅值；n为采样点序号；ω_0为工频角频率；ω_1为射频干扰信号的角频率；U_0为电网电压的基波幅值；t_n为m序列的码元宽度；t_s为采样点的时间间隔；β为第一个采样点的过零弧度。

将离散信号$i_e(n)$、$u_e(n)$相乘，可得到含射频干扰的瞬时功率信号$p_i(n)$，即

$$p_i(n)=u_e(n)i_e(n) \tag{19}$$

瞬时功率信号经过低通滤波器后，其中的高次滤波可被有效滤除。设有功功率低通滤波器的有效抽样响应为$\{r(k)=1/L,0\leqslant k\leqslant L-1\}$（$L$为滤芯波器窗口长度），经过离散化的瞬时有功功率信号可以分解为输入信号的有功功率$p_0(k)$和含射频电磁干扰的信号的有功功率$p(k)$，即

$$p(k)=\sum_{k=0}^{L-1}\left(u_e(k)i_e(k)\right)*r(k) \tag{20}$$

$$p_0(k)=\sum_{k=0}^{L-1}\left(u_0(k)i_0(k)\right)*r(k) \tag{21}$$

式中，*为卷积运算符。

对有功功率进行累计求和，得到累计电能。因此，若设输入信号的电能为E_0，则含射频电磁信号的电能E为，即

$$E_0=\sum_{k=0}^{R-1}p_0(k) \tag{22}$$

$$E=\sum_{k=0}^{R-1}p(k) \tag{23}$$

式中，R为采样点个数。

根据式(20)、(21)，计算含射频电磁信号的计量误差e，即

$$e=\frac{E-E_0}{E}\times100\% \tag{24}$$

4 误差影响的试验与仿真分析

为更好地分析电磁信号对电能表计量误差的影响，先基于文3.2的射频电磁信号对单相电能表电能影响的数学模型，利用数值软件MATLAB，编写程序，分析误差大小；再通过搭建电能表动态误差测试系统，分别对3种不同品牌的电能表进行动态误差试验；最后，分析所得的试验数据，确定误差影响。

4.1 误差仿真分析

基于文3.1～3.2建立的数学模型，设输入电压为220 V，输入电流为5 A，分别从3个方面研究射频电磁信号对电能表计量产生的影响：

1）当相位噪声和幅度噪声同时存在时，比较经过m序列调制得到的射频信号对电能表的计量误差影响和未经过m序列调制得到的射频信号对电能表的计量误差影响，其仿真结果如图7所示。

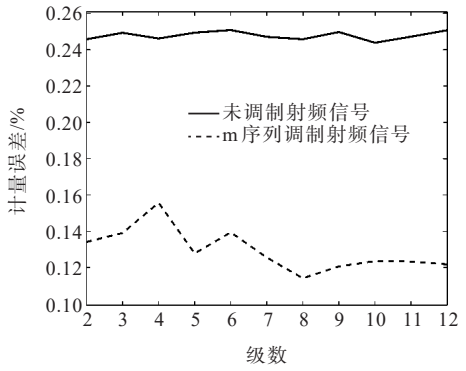


图7 m序列调制对电能表计量误差的影响

Figure 7 Impact of m sequence modulation on measurement errors of electric energy meters

从图7中可以看出，在相位噪声和幅值噪声都存在的情况下，经过m序列调制后所得到的数学模型的计量误差约为未调制情况下的50%。

2）当保证相位噪声和幅度噪声同时存在时，将m序列的级数由1增加至12，每一级均进行20次仿真，分析比较不同级数下电能表计量误差情况。m序列级数对电能表计量误差的影响如图8所示。

从图8中可以看出，随着m序列级数的增加，计量误差的变化幅度不明显。一般情况下，计量误差小于0.30%；在最糟糕的情况下，计量误差为0.97%，

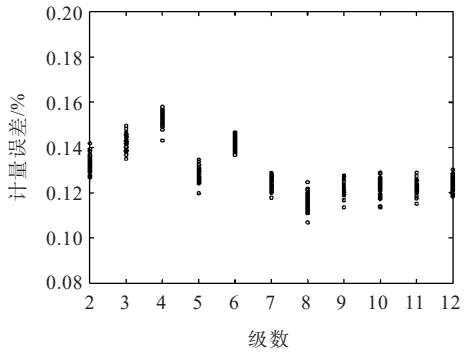


图 8　m 序列级数对电能表计量误差的影响

Figure 8　Impact of m sequence stages on measurement errors of electric energy meters

均符合电能表计量标准。

3）当功率因数分别为 0.5、0.8、1.0 时，经过 m 序列调制，分析比较输入电流幅值对单相电能表计量误差的影响。输入电流幅值对计量误差的影响如图 9 所示。

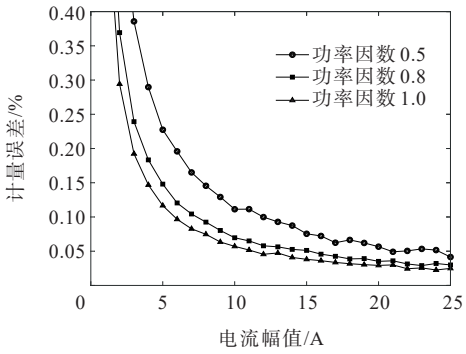


图 9　输入电流幅值对计量误差的影响

Figure 9　Impact of input current amplitude on measurement errors

从图 9 中可以看出，随着输入电流幅值的增加，电能表计量误差逐渐减小，当输入电流大于 5 A 时，计量误差均低于 0.30%，当输入电流大于 15 A 后，计量误差低于 0.15%，且不同功率因数下均存在此规律。

4.2　试验测试方案

为进一步分析研究射频信号对电能表计量误差的影响，本文搭建误差测试平台，该平台由单相电能表、电能表误差校验仪、工频磁场发生器、高频电场发生器和射频电磁场发生器组成。试验设备及参数见表 1。

试验仪器如图 10 所示。智能电表的干挠区域划分为 12 个干扰区域。在 400～1 000 MHz 的电磁场频率范围中，分别使用频率为 400、450、500、600、700、800、900、1 000 MHz 的 8 个频点的调谐偶极子天线，在 1.0～2.5 GHz 的高频段中，使用频率分别为 1.1、1.5、2、2.5 GHz 的 4 个频点的喇叭天线。每个频点在每个位置、每个极化方向测试 20 min，干扰 60 s，在暂停 20 s 后，继续干扰，每一频段均进行 100 次测试。

表 1　试验设备及参数

Table 1　Experimental equipment and parameters

序号	名称	参数	数量
1	单相电能表	220 V，5(60)A，2.0 级	1
2	电能表误差校验仪	0.1	1
3	工频磁场发生器	0.5～2.0 mT	1
4	高频电场发生器	0～100 V/m，0～6 GHz	1
5	射频电磁场发生器	0～300 V/m，80 MHz～6 GHz	1

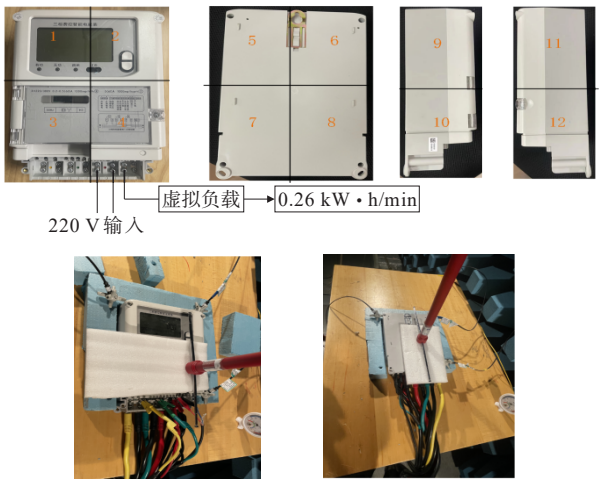


图 10　试验仪器

Figure 10　Experimental instruments

4.3　试验数据误差分析

根据文 4.2 的分析，分别对 3 款不同厂商的电能表进行动态误差测试。

为减少测试误差对于试验结论的影响，本文采用 3σ 准则，对采集的各干扰组的功率数据进行清洗，确保后续数据分析的可靠性和准确性，其均值及标准差计算式分别为

$$\begin{cases}\mu=\dfrac{1}{n'}\displaystyle\sum_{i=1}^{n'}p_i\\ \sigma=\sqrt{\dfrac{1}{n'}\displaystyle\sum_{i=1}^{n'}\left(p_i-\mu\right)^2}\end{cases}\tag{25}$$

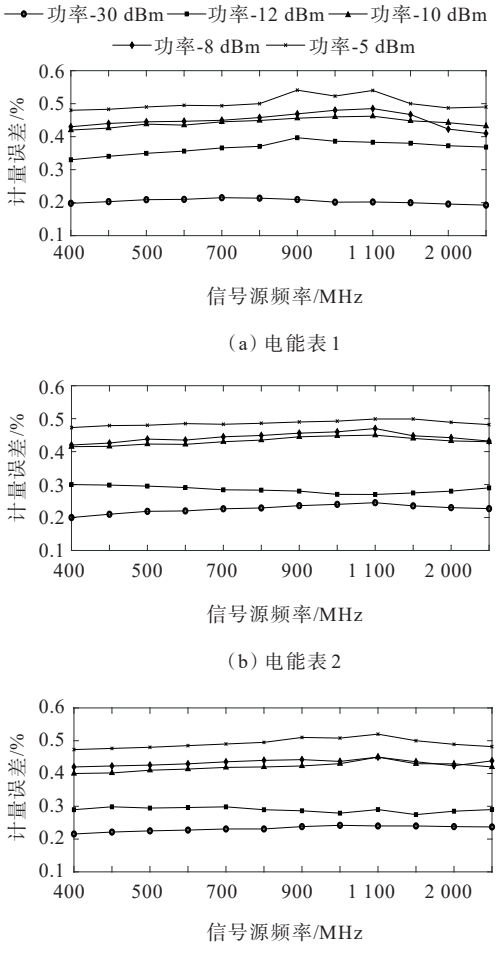
式中，μ 为干扰组计量误差的均值；σ 为干扰组计量误差的标准差；p_i 为每个采样点的功率值；n' 为总的采样点数量。

对干扰组误差进行异常值剔除，即

$$u_e(n)=\begin{cases}\text{保留}, & \mu-3\sigma\leqslant e_i\leqslant\mu+3\sigma\\ \text{剔除}, & \text{其他}\end{cases} \tag{26}$$

经过处理后,分布在$[-3\sigma,3\sigma]$的数据的概率为99.73%。在此范围外的数据均可视为异常值,予以剔除。以此种方式有效降低误差对数据分析的影响。

利用数值软件MATLAB,分别对3款不同电表进行计量误差分析,研究其信号源频率依次为400,450,500,600,700,800,900,1 000,1 500,2 000,2 500 MHz;发射源功率依次为−30,−12,−10,−8,−5 dBm时的信号源功率和动态误差的关系,这3款电能表误差分析如图11所示。



(a) 电能表1

(b) 电能表2

(c) 电能表3

图11 3款电能表误差分析

Figure 11 Error analysis of three electric energy meters

从图11中可以看出,这3款电表的数据分析结果相似。当信号源频率一定时,电能计量误差随着信号源功率的增大而增大;当信号源功率增大到一定程度时,该误差变化范围会缩窄。信号源功率的大小主要取决于射频信号的幅值,故当信号源频率一定时,电能计量误差随着信号源幅值的增大而增大。

当信号源功率一定时,电能计量误差会随着信号源频率的增大而缓慢增大;当信号源频率增大到一定程度时,电能计量误差又呈减小的趋势,且在不同发射功率的情况下,其转折频率相近。

为进一步分析干扰位置对电能表计量误差的影响,本文在每一个测量区域采用相同频点的电磁信号进行干扰,并对数据进行均值处理,干扰位置对电能表计量误差的影响如图12所示。

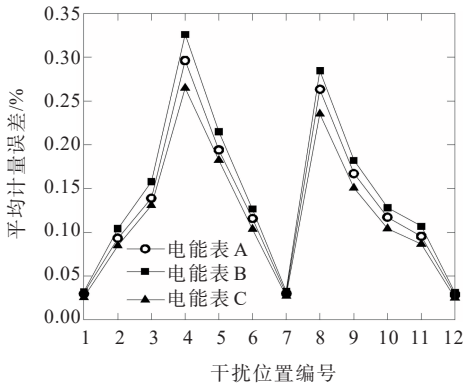


图12 干扰位置对电能表计量误差的影响

Figure 12 Impact of interference position on measurement errors of electric energy meters

从图12中可以看出,位置4、8处均靠近电流互感器的位置,其对射频干扰信号更敏感,故该两个位置的射频干扰信号的幅值相对较高,导致其平均计量误差高于其他位置的。位置4处的电能表平均计量误差最高为0.50%,而在位置1、7、12处,其平均计量误差较小,最小值仅为0.15%。

5 结语

本文首先依据复杂电磁环境下电磁干扰信号具有随机传播的特性,建立了m序列电流测试信号参数模型;其次,基于m序列电流测试信号参数模型的特征,建立射频电磁信号对电能表计量误差的数学模型,得出计算电能表计量误差的方法;最后,通过仿真分析和实验测试,得到如下结论:

1) 当信号源频率不变时,计量误差会随着信号源幅值的增加而增大;当信号源功率不变时,随着信号源频率的增加,电能表计量误差呈现先增大后减小的趋势;

2）当功率因数不变时,射频电磁场引起的电能计量误差随着被测电流幅值增大而减小;采用m序列调制所建立的数学模型的计量精确度更高;m序列的级数变化对电能表计量误差的影响不明显。

未来将进一步研究脉冲信号与谐波干扰等特殊情况对电能表计量影响。

参考文献:

[1] 张伟, 李宁, 陈敏, 等 . 高干热环境下计及竞争失效的电能表可靠性评估方法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2024, 29(3): 71-81.
ZHANG Wei, LI Ning, CHEN Min, et al. Reliability evaluation method for electricity meters with competitive failures under arid high temperature[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2024, 29(3): 71-81.

[2] 马永超, 赵伟, 黄松岭 . 提高智能电能表可靠性技术研究综述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(4): 1-7.
MA Yongchao, ZHAO Wei, HUANG Songling. Review on techniques for improving the reliability of smart meters[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 1-7.

[3] 郑振华, 刘宁, 张晨 . 单相电能表计量误差源及优化措施研究[J]. 农村电工, 2025, 33(10): 52-53.
ZHENG Zhenhua, LIU Ning, ZHANG Chen. Research on measurement error source and optimization measures of single-phase watt-hour meter[J]. Rural Electician, 2025, 33(10): 52-53.

[4] 徐励 . 温湿度与谐波对智能电能表影响的机理分析[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
XU Li. Mechanism analysis of the influence of temperature humidity and harmonics on smart electricity meters[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.

[5] 张祺, 董永乐, 张理放, 等 . 三相电能表计量误差自动检定方法设计[J]. 自动化仪表, 2024, 45(7): 65-69.
ZHANG Qi, DONG Yongle, ZHANG Lifang, et al. Design of three- phase energy meter measurement error atuomatic calibration method[J]. Process Automation Instrumentation, 2024, 45(7): 65-69.

[6] 周碧红, 石雷兵, 韩志强 . 电能表射频电磁场辐射抗扰度试验案例分析[J]. 电测与仪表, 2021, 58(8): 190-193.
ZHOU Bihong, SHI Leibing, HAN Zhiqiang. Case analysis of immunity to radiated RF electromagnetic fields of electricity meter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(8): 190-193.

[7] 张悦, 王鹤宇, 孙宏宇, 等 . 单相智能电能表电磁兼容试验探讨[J]. 吉林电力, 2011, 39(5): 5-7.
ZHANG Yue, WANG Heyu, SUN Hongyu, et al. Discussion on EMC test for smart single-phase electric energy meter[J]. Jilin Electric Power, 2011, 39(5): 5-7.

[8] 贺家慧, 张丹丹, 张露, 等 . 变电站工频电磁场对避雷器在线监测装置测量稳定性影响试验研究[J]. 高压电器, 2022, 58(12): 117-122.
HE Jiahui, ZHANG Dandan, ZHANG Lu, et al. Experimental study on measurement stability of online monitoring device for surge arrester under power frequency interference of electric field and magnetic field in the substations[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12): 117-122.

[9] 张佳琪 . 考虑谐波影响的线路型避雷器泄漏电流在线监测方法研究[J]. 高压电器,2023,59(11):129-134, 144.
ZHANG Jiaqi. Research on leakage current online monitoring method of line type lightning arrester considering influence of harmonics[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 129-134, 144.

[10] 王浩, 杨鹏, 李翀, 等 . 联合改进SVR和渐消记忆递推最小二乘算法的电能表误差评估模型研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(5): 206-215.
WANG Hao, YANG Peng, LI Chong, et al. Research on error evaluation model of electricity meter combining improved SVR and fading memory recursive least squares algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 206-215.

[11] 刘建波, 杨梅, 李文强, 等 . 电能表EMS在线测试系统的综合去耦网络研究[J]. 计量学报, 2019, 40(S1): 136-139.
LIU Jianbo, YANG Mei, LI Wenqiang, et al. Research on integrated decoupling network of EMS online testing system for electric energy meter[J]. Acta Metrologica Sinica, 2019, 40(S1): 136-139.

[12] WANG X W, CHEN J X, YUAN R M, et al. OOK power model based dynamic error testing for smart electricity meter[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(2): 025015.

[13] 王学伟, 王艳君 . m序列调制的正弦离散伪随机动态测试信号的完备性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3529-3537+12.
WANG Xuewei, WANG Yanjun. Completeness analysis of m sequence modulating sine discrete pseudo-random dynamic test signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3529-3537+12.

[14] 祝毛宁, 张蓬鹤, 王璧成, 等 . 磁场影响电能表计量的分析与研究[J]. 中国质量与标准导报, 2022(3): 95-97+102.
ZHU Maoning, ZHANG Penghe, WANG Bicheng, et al. Research and analysis of magnetic field test in electric energy meter standard[J]. China Quality and Standards Review, 2022(3): 95-97+102.

[15] 黄令忠, 李炳要, 王琪, 等. 强磁干扰环境下的电能表计量失准研究[J]. 电气开关, 2017, 55(2): 53-56+60.
HUANG Lingzhong, LI Bingyao, WANG Qi, et al. Research on electric energy meter calculation inaccuracy under strong magnetic environment[J]. Electric Switchgear, 2017, 55(2): 53-56+60.

[16] 郑军奇. EMC电磁兼容设计与测试案例分析[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2018.
ZHENG Junqi. EMC electromagnetic compatibility design and testing case studies[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018.

[17] 王守相, 张卫涛, 葛磊蛟. 智能配电网统一模型云与应用服务技术系统[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 49-54.
WANG Shouxiang, ZHANG Weitao, GE Leijiao. Unified model cloud and application service system for smart distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 49-54.

[18] 郝玲, 陈磊, 徐飞, 等. 基于智能融合终端的新型配电网协同自治调控运营模式及关键技术[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(5): 459-472.
HAO Ling, CHEN Lei, XU Fei, et al. New collaborative autonomy regulation operation mode and key technology for distribution network based on intelligent terminal[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(5): 459-472.

[19] 郭淑霞, 张磊, 董文华, 等. 区域电磁环境的动态特性表征[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(4): 703-707.
GUO Shuxia, ZHANG Lei, DONG Wenhua, et al. Manifestion of electromagnetic environment based on mathematical morphology and fractal theory[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34(4): 703-707.

[20] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理[M]. 7版. 北京: 国防工业出版社, 2012.
FAN Changxin, CAO Lina. Communication principle [M]. 7th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.

[21] 方正武. 射频信号及工频磁场对电能表电能影响的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
FANG Zhengwu. Research on the influence of radio frequency signal and power frequency magnetic field on the energy of electric energy meter[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.