

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311818

# 采用无源磁传感标签的交流电流无线监测:测量及标定\*

林其伟,文玉梅,邵 壮,李 平

(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)

**摘要:**本文所采用的传感标签利用无源无线传感技术传递数据和能量,再通过内置的传感模块检测电缆线周围的磁场强度,可实现免电池维护、无线连接的电缆电流测量。但受射频供电微瓦量级功率的限制,传感标签采样点数少、采样频率低和磁场敏感元件的非线性使得传感数据和电缆电流间映射关系复杂,导致传感标签标定、测量困难。针对该问题,本文提出先通过粒子群与内点法结合的优化算法对传感数据进行傅里叶级数拟合提取特征值(频率和有效值)再标定的方法。在测量时对传感数据分组进行傅里叶级数拟合获取特征值,再将特征值代入标定时建立的传感模型,实现频率为47~60 Hz、有效值为5~45 A内的等振幅电流测量,电流频率和有效值的相对误差分别低于0.4%和1.9%。实验结果表明,采用该方法搭载传感标签的测量系统不仅可实现电缆电流的无源无线测量,也能实现国内电力系统标准所允许的最大电流波动测量。

**关键词:**无源无线测量;粒子群;传感模型;傅里叶级数拟合

**中图分类号:** TN98 TH70 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Wireless monitoring of AC current using passive magnetic sensor tags: Measurement and calibration

Lin Qiwei, Wen Yumei, Shao Zhuang, Li Ping

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The sensor tag in this article uses passive wireless sensing technology to transmit data and energy. It uses the built-in sensing module to detect the magnetic field intensity around the cable, realizing cable current measurement without battery maintenance and cable connection. However, due to the limitation of microwatt power supplied by radio frequency waves, the number of sampling points of the sensor tag is restricted, the sampling frequency is low and the nonlinearity of the magnetic field sensitive element makes the mapping relationship between the sensor data and the cable current complicated. Hence, it is difficult to calibrate and measure the sensor tag. To solve this problem, this article proposes an optimization algorithm combining particle swarm optimization and interior point method to extract the characteristic values (frequency and effective value) from the sensing data by Fourier series fitting and calibration. During the measurement, the characteristic values are obtained by Fourier series fitting of sensor data groups. Then, the characteristic values are substituted into the sensor model established during calibration. The constant amplitude current measurement with the frequency of 47~60 Hz and an effective value of 5~45 A is realized, and the relative errors of current frequency and effective value are less than 0.4% and 1.9%, respectively. The experimental results show that the measurement system equipped with the sensor tag can not only realize passive wireless measurement of cable current, but also can realize the maximum current fluctuation measurement allowed by domestic power system standards.

**Keywords:** passive wireless measurement; particle swarm optimization; sensing model; Fourier series fitting

## 0 引 言

电流是电网监测的核心参数之一,它反应电网运行的稳定性和可靠性<sup>[1-2]</sup>。目前的电缆电流监测技术可根据传感器是否需要线缆传输数据分为有线测量和无线测量,无线测量无需连接线缆,操作更加安全方便。无线测量可根据传感器是否需要电池或者电缆线供电分为有源无线测量和无源无线测量,相较于搭载有源无线传感器,搭载无源无线传感器的测量系统具有维护成本低、有效避免电池造成的环境污染问题等优势更加适用于电网的测量<sup>[3]</sup>。无源无线传感器工作时仍需消耗能量,但使用太阳能<sup>[4]</sup>,振动能<sup>[5]</sup>等供电方案的对环境依赖性强。而射频识别技术(radio frequency identification, RFID),通过电磁波作能量载体,主动为无源无线传感器充电,不受环境能量的限制。2020年上海交通大学徐壮壮等<sup>[3]</sup>将无线射频识别技术与磁场敏感元件相结合制成无源无线传感器——传感标签,实现对磁场信息的采集。根据毕奥-萨伐尔定律(Biot-Savart Law),通电导体能在周围激发磁场<sup>[6]</sup>,通过测量电缆电流周围磁场可以实现对电缆电流的测量。传感标签采用射频电磁波传递数据和能量,工作频率一般处于900~930 MHz,与电网中的电磁频率相距甚远,相互之间基本无耦合干扰,适用于电缆电流的测量。为实现搭载传感标签的无源无线电缆电流测量系统(passive wireless cable current measurement system, PWCCMS)对电流的测量,必须先对传感标签进行标定,建立传感数据和待测电缆电流的传感模型。传感标签功耗处于微瓦量级<sup>[3]</sup>,传感标签的能量主要用于其内置的微控制单元(microcontroller unit, MCU)工作和存储数据,导致采样频率为500 Hz传感标签在一次测量的采样点仅有80个,外加标签内置传感模块的非线性导致传感标签的传感模型较难构建,难以实现传感标签的标定以及对电缆电流的测量。

在电缆电流测量中测量参数通常是频率和有效值<sup>[7-8]</sup>,二者相互独立需要分别标定。在标定时先提取传感数据的特征值(频率和有效值),再建立特征值与待测电流的关系。针对正弦信号频率的求取,李群等<sup>[9]</sup>和Wang等<sup>[10]</sup>通过多周期同步测频完成信号频率的测量,但是当参与运算的数据点较少时,该方法无法准确确定零点使闸门的上升沿和下降沿设定不精确导致求取的频率的误差大。Torzyk等<sup>[2]</sup>和Puche-panadero等<sup>[11]</sup>通过对信号进行FFT获取频率,但传感标签受能耗限制,单次测量任务的采样点较少,直接对传感数据进行快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, FFT)运算存在频率分辨率不够的问题。Huang等<sup>[12]</sup>和Morelli等<sup>[13]</sup>通过对信号插值再求取频率信息,但是插值会受噪声影响引入插值

误差而且时域插值并不会提高频率分辨率,因此现有的频率测量方法计算传感数据的频率不准确。针对正弦信号振幅的求取,文献[14-15]利用幅度相位估计(amplitude and phase estimation, APES)算法计算信号的振幅,但是该方法求取振幅需要利用对信号进行FFT的信息,无法避免频率分辨率不够的问题。Li等<sup>[16]</sup>利用互相关函数估计信号的振幅,但振幅的测量误差和频率的测量误差密切相关,而且利用有限长的采样信号计算出的振幅并不准确。上述方法难以准确获取PWCCMS中传感数据的振幅即无法准确获取传感数据的有效值。综上分析,已有方法难以解决传感数据点不足和传感模块非线性问题导致难以构建传感标签的传感模型进而无法准确获取电缆电流信息。

采用人工智能算法在构建传感模型中被广泛应用<sup>[17]</sup>。对于传输数据量较少的无源无线传感器而言,拟合是获得传感数据的数学模型有效手段。对周期信号进行傅里叶级数拟合,可以得到信号的周期性特征和频谱分布。傅里叶级数拟合中所采用的最优拟合模型可利用人工智能算法寻找构建<sup>[18]</sup>。采用粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)在构建拟合模型时具有运行时间短、效率高和精度高等优势<sup>[19]</sup>。但是因为初始粒子的位置、速度设置不当等原因,粒子群算法存有局部搜索能力差、早熟收敛等问题<sup>[20-21]</sup>。如何建立极其有限的传感数据和电缆电流之间的传感模型以完成电流标定是实现无源无线电缆电流测量亟需解决的问题。

本文通过粒子群与内点法(interior point method, IPM)结合的优化算法(下文简称优化算法)对传感数据进行预处理实现传感数据的傅里叶级数拟合以提取特征值。通过建立传感数据特征值与待测电流的传感模型完成标定,再将标定建立的传感模型用于电流测量。内点法作为一种数值优化方法,虽然不具备全局搜索的能力但具备很强的局部搜索能力<sup>[22]</sup>。通过兼顾全局与局部的分阶段优化方法解决了单独使用粒子群算法陷入局部最优问题和单独使用内点法因受初值的影响可能无法寻找到最优解而无法完成拟合的问题。此外对传感数据进行傅里叶级数拟合可以抑制噪声,获得信号的最优估计。

在电网工作时负荷变化、发电机输出功率变化、线路阻抗变化、短路等因素会导致电网中出现电压波动。根据电能质量标准,电网中的频率允许偏差的最大变化范围为 $\pm 0.5$  Hz,当电压小于1 kV时,电压的波动限值为4%,相应的电网中电流波动限值也为4%<sup>[23-24]</sup>。本文将一次采集的传感数据按时间顺序分组,假设每一组时间里电流无波动或者波动忽略不计,分别对每组传感数据进行傅里叶级数拟合,获取每组传感数据中基波信号的频率和有效值,再根据标定建立的传感模型实现对波动电流的测量。

## 1 搭载传感标签的PWCCMS

PWCCMS由传感标签、阅读器、中继服务器和测量管理单元组成,系统结构如图1所示,其中传感节点包含1个阅读器和其下布置的若干传感标签。



图1 无源无线电缆电流测量系统组成

Fig.1 Composition of the passive wireless cable current measurement system

传感标签由天线与阻抗匹配网络模块、供电模块、通信与控制模块、传感模块组成<sup>[3]</sup>。传感标签采用1.9 dBi增益的偶极子天线接收电磁波,电磁波经阻抗匹配网络进入供电模块。供电模块包含RF-DC整流器、带储能电容的电源管理芯片和低压差线性稳压器。RF-DC整流器将无线射频能量转换为直流能量,并通过电源管理芯片为储能电容器充电以供传感标签工作。通信与控制模块完成数据收发和控制磁场信息的采集。传感模块采用非晶薄膜磁阻抗型磁场敏感元件测量磁场,其输出信号强度的改变反应了外磁场的变化。

中继服务器用以搭载阅读器管理中间软件,阅读器管理中间软件是阅读器与测量管理单元软件通信的中转结点。阅读器管理中间软件负责解析测量指令并下发给阅读器和封装测量数据并上传给测量管理单元软件。测量管理单元供用户输入测量任务和查看传感数据。测量管理单元软件在整个系统中起核心作用,直接或间接完成对其他软件的控制。

### 1.1 电缆电流测量原理

根据毕奥-萨伐尔定律,电缆中通过电流时会在周围产生磁场,通过传感模块测量通电电缆周围的磁场可实现对电流的测量。图2展示了传感模块的输出特性曲线(曲线1),该元件输出曲线具有偶次非线性的特点导致其无法辨识磁场方向。通过施加偏置磁场改变传感模块的静态工作点,使其工作在单调区,进而能够识别磁场方

向,如图2中曲线2所示。传感模块输出信号在正负半周畸变程度不一样,为使系统测量相对误差处于 $\pm 2\%$ 内并获得最大电流测量范围,传感模块的工作区间确定为0~40 Oe,通过永磁体添加20 Oe的偏置磁场。在工作时通过夹具固定传感标签的传感模块与待测电缆的相对位置。

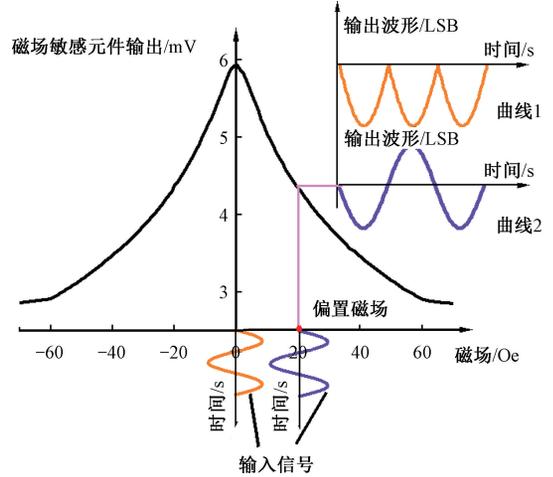


图2 传感模块输入输出关系

Fig.2 Input-output relationship of magnetic field sensitive element

电缆电流测量示意图如图3所示,待测电流在传感模块处产生的磁场 $\bar{H}_x$ 可由式(1)表示:

$$\bar{H}_x = \frac{I}{\pi l_m} \arctan \frac{l_m}{2g} \quad (1)$$

式中: $l_m$ 为磁场敏感元件的长度, $g$ 为磁场敏感元件到待测电缆中心位置, $I$ 为待测电流有效值<sup>[25]</sup>。根据式(1)进行理论计算与实验验证,PWCCMS对电缆电流有效值的测量范围为5~45 A。

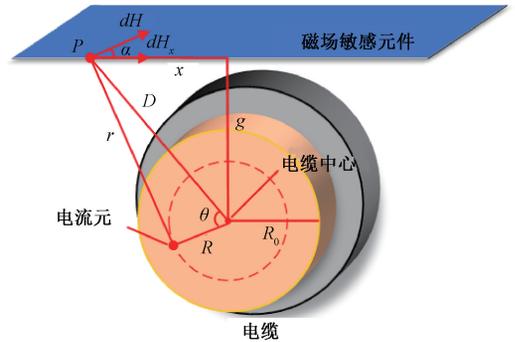


图3 电缆电流测量示意图<sup>[25]</sup>

Fig.3 Diagram of cable current measurement

### 1.2 搭载传感标签的PWCCMS的工作流程

PWCCMS各组成部分依次交替工作,以确保传感标签先充电再测量并成功返回传感数据。系统工作流程为用户启动测量管理单元软件并输入测量任务,该任务被

下发给阅读器管理中间软件。阅读器管理中间软件解析测量任务将转发给对应的阅读器,阅读器接收到测量任务,下发给下属传感标签。传感标签接收到指令后开始测量,到达预设测量时间后,阅读器向传感标签下发上传数据指令,传感标签将传感数据通过反向散射上传给阅读器。阅读器将传感数据和对应的测量时间传给阅读器管理中间软件,阅读器管理中间软件对其封装,再上传给测量管理单元软件并进行数据处理。

## 2 传感标签标定与测量原理

本文通过粒子群与内点法结合的优化算法对传感数据进行预处理获取傅里叶级数展开式以提取特征值,再建立特征值与待测电流频率和有效值的传感模型,进而实现电缆电流的测量。

### 2.1 传感模型建立

传感模块采用软磁薄膜/平面线圈/软磁薄膜三明治结构的非晶薄膜磁阻抗型磁场敏感元件。需要对每个传感标签进行标定,以降低因传感模块性能、信号调理电路等参数差异导致的测量误差。若通过理论计算出待测电流产生的磁场大小,再根据传感模块输出与待测磁场大小的关系完成标定会受到环境磁场等的干扰造成测量不准确,所以直接对待测电流与传感标签输出进行标定。在整个标定过程,标准电流源输出等振幅的正弦电流,因PWCCMS属于异步监测,待测电流的相位信息将不予考虑。

传感标签的输出信号存在谐波畸变,而传感标签的带宽窄,只用于监测工频电流的基波,求取传感数据的傅里叶级数表示时,仅需获取传感数据的基波信号,其他的高次谐波被认为是由于传感标签的非线性造成的失真,予以舍弃,对传感标签标定步骤如下。

- 1) 对传感数据进行预处理以获取其基波信号;
- 2) 从基波信号中确定频率和有效值;
- 3) 分别确定传感数据中基波信号的频率与待测电流频率的标定关系、传感数据中基波信号的有效值与待测电流有效值的标定关系,如式(2)和(3)所示。

$$f_s = G'(f) \quad (2)$$

$$I_s = G(A) \quad (3)$$

式中:  $f_s, I_s$  为待测电流频率和有效值,  $f, A$  为传感数据中基波信号的频率和有效值。

为获取传感数据中基波信号的频率  $f$  和有效值  $A$ , 本文通过优化算法对传感数据进行预处理获取傅里叶级数展开式,如式(4)所示。

$$y(t) = x_1 + x_2 \cos(x_4 t) + x_3 \sin(x_4 t) \quad (4)$$

式中:  $x_1, x_2, x_3, x_4$  皆为待求系数。当拟合完成后将  $x_2, x_3, x_4$  进行如式(5)和(6)所示的处理即可获取传感数据

中基波信号的频率  $f$  和有效值  $A$ 。

$$f = \frac{x_4}{2\pi} \quad (5)$$

$$A = \sqrt{x_2^2 + x_3^2} \quad (6)$$

优化算法对传感数据进行预处理获取其傅里叶级数展开式,以拟合的数据  $y(t)$  与真实数据  $f(t)$  的差值平方和的算术平方根为优化目标,如式(7)所示。

$$[x_1, x_2, x_3, x_4] = \arg \min_{x_k^{(l)} \leq x_k \leq x_k^{(u)}, k=1,2,3,4} \|y - f(t)\|_2 \quad (7)$$

式中:  $x_k^{(l)}$  为  $x_k$  的最小值,  $x_k^{(u)}$  为  $x_k$  的最大值。先通过粒子群算法生成指定数量的随机解,称为粒子,随机初始化每个粒子的位置和速度。对于各个粒子,根据其当前位置计算适应度函数的值确定最佳位置并更新全局最佳位置。再根据粒子当前位置、速度、最佳位置以及全局最佳位置,更新粒子的速度和位置。判断是否达到设定的终止条件,如果未满足终止条件,将当前的全局最佳位置作为内点法的初始解,应用内点法对优化问题进行求解并更新粒子群的位置和速度,如此循环迭代执行直到满足终止条件。

### 2.2 电流测量

在测量时,因待测电缆线尺寸和夹具等与标定时不一致,导致在实际测量过程中传感模块与待测电缆线之间距离与标定时不一致,为解决上述原因造成的测量不准确问题,根据传感标签工作原理引入位置修正系数  $k$ ,如式(8)所示。

$$k = \frac{x}{r} \quad (8)$$

式中:  $r, x$  分别为标定和测量时传感模块与待测电缆线之间距离。

为保证测量的准确性,对传感数据进行分组处理。对于正弦信号,1/2周期的传感数据就能恢复出原始信息。假设任一传感标签在单次测量过程中,待测电流的频率保持不变,处理测量传感数据步骤如下。

- 1) 先通过优化算法对传感数据进行傅里叶级数拟合得到基波信号,初步估计出传感数据的频率并计算出周期;
- 2) 将传感数据进行分组,每组对应的时间长度约为周期的一半,共分为  $n$  个组,除最后一组外,每组的最后一个点是下一组的起始点;
- 3) 对任一组传感数据通过优化算法获取对应的傅里叶级数展开式,如式(4)所示,再分别通过如式(5)和(6)所示的处理,获取该组传感数据中基波信号的频率  $f_i$  和有效值  $A_i$ ,  $i$  为该组数据的编号;
- 4) 将  $f_i, A_i$  分别代入标定建立的传感模型,获取该组传感数据对应待测电流的频率  $f_{si}$  和有效值  $I_{si}$ ,即可实现电流测量的目的。

### 3 仿真与实验

#### 3.1 传感数据特征值获取仿真分析

为验证该标定方法的可行性,先通过仿真验证对传感数据预处理时优化算法获取传感数据的傅里叶级数展开式以提取特征值的可行性。由于传感模块的非线性特性,传感标签输出信号中包含二次谐波等成分。图4是对频率为50 Hz、有效值为5 A 电流测量传感数据的幅频谱,从图4中可以看出传感数据除50 Hz成分外,还有二次谐波100 Hz成分,但是二次谐波的幅值不足基波的1/10。根据上述传感数据的频率组成生成式(9)所示的仿真信号用于分析:

$$y_1 = \alpha \sin(2\pi f_1 t + \varphi) + \beta \sin(4\pi f_1 t + \varphi') + n(t) \quad (9)$$

式中: $\alpha, \beta$ 分别为基波和二次谐波的振幅, $f_1$ 为信号频率, $\varphi, \varphi'$ 为基波和二次谐波的初相, $n(t)$ 为白噪声。

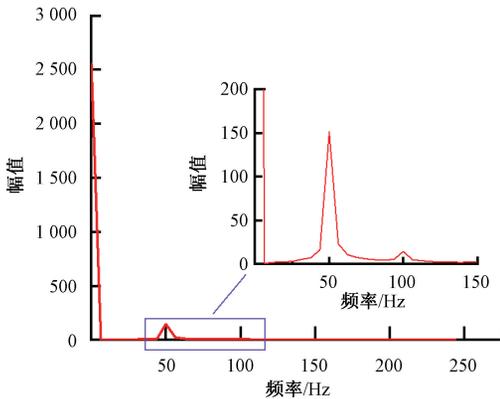


图4 传感数据的幅频谱

Fig. 4 Amplitude spectrum of sensing data

根据中外电力系统标准<sup>[23,26]</sup>,将仿真信号的频率分别设置为47、50和60 Hz, $\alpha$ 设为10, $\beta$ 设为1, $\varphi$ 设为 $\frac{\pi}{3}$ ,

$\varphi'$ 设为 $\frac{2\pi}{3}$ ,并通过施加白噪声以模拟真实的传感数据,将

仿真信号的信噪比设置为0~60 dB,步长为10 dB。计算通过优化算法在不同的信噪比的条件下对不同频率的传感数据进行傅里叶级数拟合再通过式(5)和(6)求取的频率和有效值与设定频率和有效值的相对误差。图5和6是在不同信噪比下通过优化算法对仿真信号进行傅里叶级数拟合获取仿真信号的频率和有效值的相对误差。其横坐标为仿真信号的信噪比,纵坐标为拟合获取频率和有效值的相对误差,从图可以看出,当信噪比大于10 dB时,频率和有效值的相对误差分别小于0.015%和0.100%。上述结果表明,通过该方法能够完成传感数据的预处理获取传感数据中基波信号的频率和有效值。

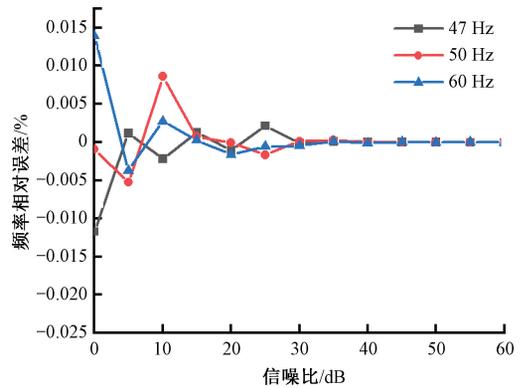


图5 在不同信噪比下的频率相对误差

Fig. 5 Relative error of frequency under different signal-to-noise ratios

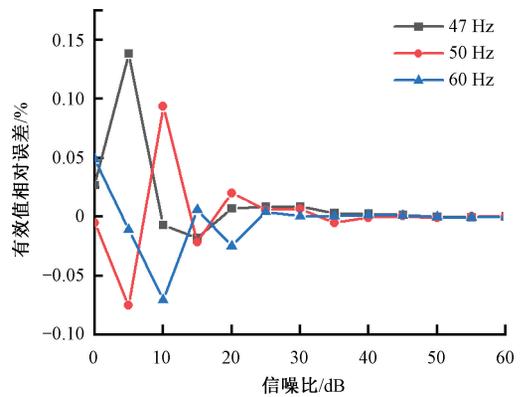


图6 在不同信噪比下的有效值相对误差

Fig. 6 Relative error of effective value under different signal-to-noise ratios

#### 3.2 电流波动测量仿真分析

当电网受到外部干扰时,电网中电压波动会导致电流波动,受实验室硬件条件的限制,无法开展实际实验测量电流波动,通过生成仿真信号用于验证本文所提方法能否用于处理PWCCMS的传感数据实现电流波动的测量。电流波动看成频率为0.5~30 Hz的调幅波对以工频电流为载波进行的幅度调制,如式(10)所示。

$$s(t) = \gamma [1 + m_n \sin(2\pi f_c t)] \cos(2\pi f t) \quad (10)$$

式中:将工频载波电流频率 $\tilde{f}$ 设为50 Hz,当电网出现电压闪变时调幅波频率可以达到最大值30 Hz,故将 $f_c$ 设为30 Hz,工频载波电流幅值 $\gamma$ 设为1,调幅波电流幅值 $m_n$ 设为0.014以模拟电力系统标准所允许最大的波动电流<sup>[23-24,27]</sup>。根据电流测量的分组原理将80个仿真信号分为19个组,再通过本文所提方法对每组分别进行傅里叶级数拟合,仿真信号与拟合信号如图7中所示。通过计算傅里叶级数拟合所得的信号与仿真信号的相对误差最大值低于1%,仿真结果表明,本文所提方法能够用于

处理 PWCCMS 的传感数据实现对电网中电流波动的测量,并获取对应的电流信息。

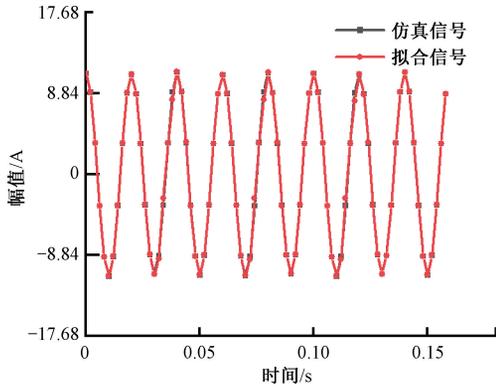


图 7 电流波动测量仿真图

Fig. 7 Simulation diagram of current fluctuation measurement

### 3.3 电缆电流标定和测量实验分析

为验证本文所提标定方法能否用于处理 PWCCMS 的传感数据实现电缆电流的标定和测量,搭建如图 8 所示的实验装置,实验选用上海航裕电源科技有限公司生产的标准电流源,型号为 HY-LCS5-100-L,标准电流源输出电流的频率范围为 47~60 Hz,有效值范围为 5~45 A。使用的阅读器型号为 Gosuncn ZXRIS6700,天线是水平线极化微带天线,其主瓣轴垂直于天线介质基板所在平面。为建立传感标签关于电流频率的传感模型,在实验中标准电流源输出有效值为 20 A,频率变化范围为 47~60 Hz 的等振幅电流,步长设为 3 Hz,对电流进行 20 次测量。先对传感数据进行预处理获取频率,20 次测量所得传感数据中基波信号的频率的算术平均值  $\Lambda$  与待测电流频率  $f_s$  如图 9 所示,传感数据中基波信号的频率的算术平均值  $\Lambda$  与待测电流频率  $f_s$  的关系如式(11)所示。

$$\begin{bmatrix} f_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.924 & 0 \\ 0 & 0.397 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda \\ (k\Gamma)^{0.829} \end{bmatrix} \quad (11)$$



图 8 实验装置图

Fig. 8 Experimental device diagram

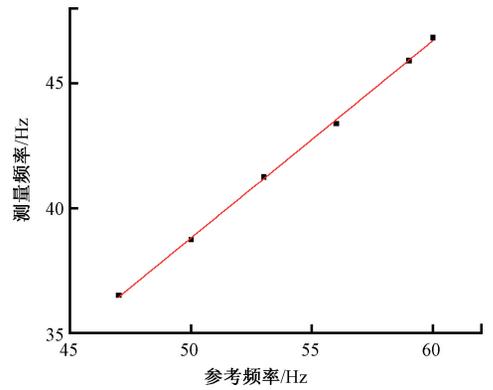


图 9 标定前的参考频率与测量频率

Fig. 9 Reference frequency and measurement frequency before calibration

为验证式(11)中传感标签关于电流频率传感模型的正确性和能否用于测量电流频率,在实验时,标准电流源输出有效值为 20 A,频率变化范围为 47~60 Hz 的等振幅电流,步长为 1 Hz,对电流进行 20 次测量。本文通过优化算法对传感数据进行傅里叶级数拟合完成对传感数据的预处理获取传感数据中基波信号的频率,再根据式(11)获取待测电流的频率,所测频率的误差带、对传感数据进行多周期同步测频求得频率的误差带、对传感数据直接进行 FFT 获得频率的误差带分别如图 10 中所示。因为传感模块的非线性,外加传感数据点数少、传感标签采样频率低导致无法通过线性插值或样条插值等插值方法对传感数据进行插值再求得频率。从图 10 可知,本文方法求取的待测电流频率接近标准电流源输出的参考频率,误差小;而直接对传感数据进行 FFT 求取传感数据频率会受频率分辨率的限制,导致所求频率不准确;因为传感标签采样频率低,通过多周期同步测频获取传感数据的频率误差大于 1%。图 11 为本文所提方法获取的电流频率平均值的相对误差,从图可知,该方法不受频率

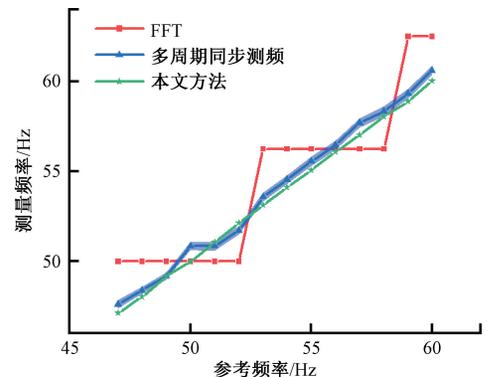


图 10 本文方法与其他方法所求电流频率

Fig. 10 The current frequency obtained by the method proposed in this article and other methods

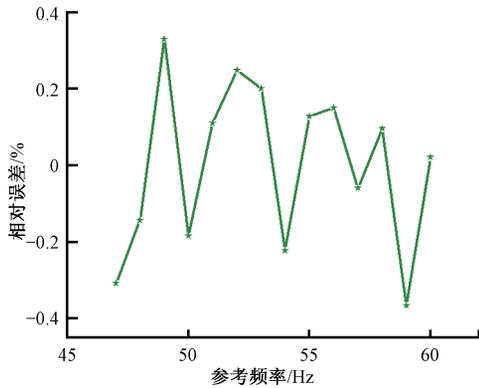


图 11 本文方法所求电流频率的相对误差

Fig. 11 The relative error of current frequency obtained by the method proposed in this article

分辨率的影响,对标准电流源输出频率为 47~60 Hz 范围的传感数据进行处理获取频率的相对误差低至 0.021%。

除了建立传感标签关于电流频率的传感模型,还需通过实验建立关于电流有效值的传感模型。通过标准电流源输出频率为 50 Hz,有效值范围为 5~45 A 的等振幅电流,步长为 3 A。对电流进行 20 次测量,获得 20 次测量所得传感数据中基波信号有效值的算术平均值  $\Gamma$  与待测电流有效值  $I_s$  如图 12 所示,传感数据中基波信号有效值的算术平均值  $\Gamma$  与待测电流有效值  $I_s$  的关系如式(11)所示。

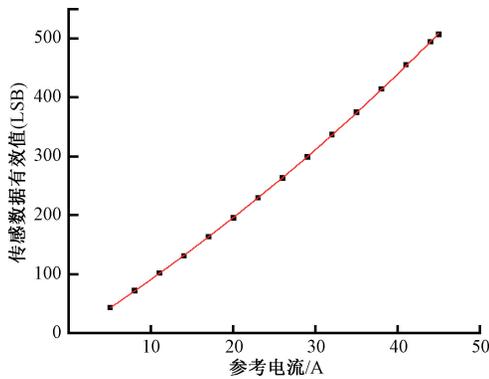


图 12 传感数据中基波信号的有效值的平均值与待测电流有效值

Fig. 12 Average value of effective value of sensing data and effective value of measured current

在标定和测量实验时使用相同夹具固定传感标签与电缆线,所以式(11)中  $k = 1$ 。传感标签的采样频率低、采样点数少和传感模块的非线性无法通过幅度相位估计对传感数据进行处理获取振幅信息,又因为难以获取传感数据准确的频率信息导致无法利用互相关方法等估计信号的准确振幅,计算峰峰值是获取正弦信号有效值常用的方法<sup>[25,28-29]</sup>,通过计算上述 20 次测量所得传感数据

的峰峰值,再建立传感数据有效值的算术平均值  $\Gamma$  与待测电流  $I_s$  的关系,如式(12)所示。

$$I_s = 9.927 \times 10^{-2} \Gamma^{-0.884} \quad (12)$$

为验证式(11)中传感标签关于电流有效值传感模型的正确性和能否用于测量电流有效值,在实验时通过标准电流源输出频率设为 50 Hz,有效值范围为 5~45 A 的等振幅电流,步长为 1 A,对电流进行 20 次测量。本文通过预处理获取传感数据中基波信号的有效值并根据式(11)得到待测电流的有效值的误差带、通过峰峰值求取电流有效值再完成标定的方法(以下简称峰峰值方法)求取的电流有效值的误差带分别如图 13 中所示,从图 13 可以看出本文所提方法比峰峰值方法求取的电流有效值更接近标准电流源输出电流的有效值。

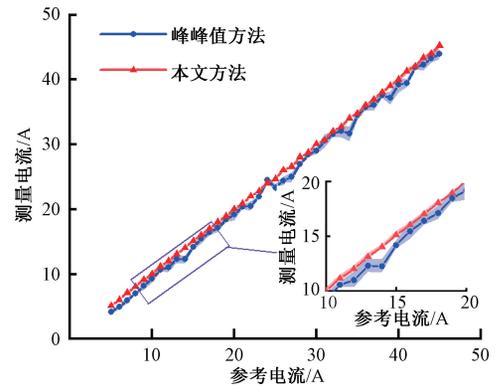


图 13 本文方法与峰峰值方法所求电流有效值

Fig. 13 The effective value of current obtained by the method proposed in this article and the peak-to-peak method

图 14 展示了本文方法和峰峰值方法获取 20 次测量数据对应的电流有效值的平均值的相对误差,从图 14 可以看出本文所提方法测量电流的有效值的相对误差处于  $\pm 1.9\%$  以内。仅当待测电流有效值为 5 A 时,测量的平

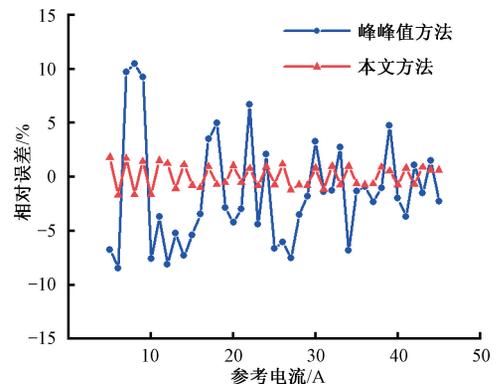


图 14 本文方法与峰峰值法所求电流有效值的相对误差

Fig. 14 The relative error of the effective value of current by the method proposed in this paper and the peak-to-peak method

均相对误差为1.820%,但是当待测电流逐渐增大即信噪比逐渐增大时平均相对误差将逐渐降低,本文所提的方法能够求得传感数据的振幅且远优于峰峰值方法的 $\pm 10\%$ 相对误差。上述实验结果表明,采用本文所提方法PWCCMS可以完成对频率范围为47~60 Hz、有效值为5~45 A的等振幅电流的标定和测量。

## 4 结 论

无源无线电缆电流测量系统(PWCCMS)中的传感标签因为无需采用电池供电或者线缆供电、传输数据,适合电缆电流的测量。但是传感标签的采样数据少、采样频率低、受环境磁场等干扰传感数据中存有噪声和传感标签的非线性,利用现有的数据处理方法难以建立传感数据和电缆电流之间传感模型导致未能实现标定和电流测量的目的。为解决上述问题,本文先通过施加偏置磁场,将传感标签输出的全波信号还原成谐波信号,降低数据处理难度。再通过粒子群与内点法结合的优化算法对传感数据进行预处理,获取传感数据的傅里叶级数展开式以确定传感数据中基波信号的频率和有效值,建立传感数据中基波信号的频率和有效值与待测电缆电流频率和有效值之间的传感模型,继而得以实现电缆电流标定。通过理论仿真验证了本文方法获取传感数据中基波信号频率和有效值的可行性。通过实际实验完成标定后,在测量时根据标定建立的传感模型,可以实现对频率范围为47~60 Hz,有效值为5~45 A的等振幅电流测量的目的,测量所得电流频率的相对误差低至0.021%,有效值的相对误差低至-0.521%。针对电流波动的测量,通过生成仿真信号并将其分组代入粒子群与内点法结合的优化算法获得电流波动时的傅里叶级数展开式,表明了PWCCMS能够完成对电网中电流波动的测量,该系统在电缆电流监测领域有着广泛的运用前景。本文所提的先通过粒子群算法与内点法结合的优化算法进行傅里叶级数拟合以提取特征值的方法也可在处理这类采样数据少、采样频率低的非线性传感器产生的传感数据中运用。

## 参考文献

- [ 1 ] CHEN K L. Intelligent contactless current measurement for overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4):3028-3037.
- [ 2 ] TORZYK B, WIĘCEK B. Second-harmonic contactless method for measurement of RMS current using a standard infrared camera[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70:1-8.
- [ 3 ] 徐壮壮,文玉梅,邵壮,等. 通用无源超高频射频传感标签[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12):158-165.
- [ 4 ] XU ZH ZH, WEN Y M, SHAO ZH, et al. Universal-passive UHF radio frequency sensing tags[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12):158-165.
- [ 4 ] 崔粟晋,王雪. 基于长短时记忆太阳能无线传感节点能量预测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11):147-154.
- [ 5 ] CUI S J, WANG X. Solar wireless sensor node energy prediction based on long-short term memory[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11):147-154.
- [ 5 ] WANG L, ZHAO L, LUO G, et al. System level design of wireless sensor node powered by piezoelectric vibration energy harvesting[J]. Sensors and Actuators, A. Physical, 2020, 310.
- [ 6 ] 鲁文帅,尤睿,周扬,等. 基于单片TMR磁传感器的非侵入电流监测微系统[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6):1-9.
- [ 6 ] LU W SH, YOU R, ZHOU Y, et al. Non-invasive current monitoring microsystem based on a single TMR sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6):1-9.
- [ 7 ] GEORGE N, RIPKA P. Rectangular busbar with circular sensing part for wideband current measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72:1-8.
- [ 8 ] LU C C, LIN Y C, TIAN Y Z, et al. Hybrid micro-fluxgate and current transformer sensor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(8):1-5.
- [ 9 ] 李群,熊杰锋,杨志超,等. 基于多周期同步采样宽带移相法的新型电网无功测量方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6):96-100.
- [ 9 ] LI Q, XIONG J F, YANG ZH CH, et al. Reactive power measuring based on multi-cycle synchronous sampling and wide-band phase-shifting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6):96-100.
- [ 10 ] WANG W, ZHANG M, YANG Y, et al. A fiber laser doppler vibrometer based on fringe counting and multi-period synchronous frequency measurement method[J]. Journal of Nanoelectronics & Optoelectronics, 2016, 11(6):777-782.
- [ 11 ] PUCHE-PANADERO R, MARTINEZ-ROMAN J, SAPENA-BANO A, et al. New method for spectral leakage reduction in the FFT of stator currents: Application to the diagnosis of bar breakages in cage motors working at very low slip[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70:1-11.

- [12] HUANG Y, CHEN F. Data interpolation of traffic flow algorithm using wavelet transform for traffic generative modeling [J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2022, 6:739-742.
- [13] MORELLI M, MORETTI M, D'AMICO A A, et al. Single-tone frequency estimation by weighted least-squares interpolation of Fourier coefficients [J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70 (1): 526-537.
- [14] LI C, ZHANG J, WEN H. Accurate and fast amplitude estimation of signal distorted by noise and harmonics for control of VSI [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12):12584-12594.
- [15] LI X, FAN Y, RAO Z, et al. Improving stereo matching generalization via Fourier-based amplitude transform[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2022, 29:1362-1366.
- [16] LI Y, ZHANG J, NIU J, et al. Computational implementation and asymptotic statistical performance analysis of range frequency autocorrelation function for radar high-speed target detection[J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2020, 6:1297-1308.
- [17] 付华, 赵俊程, 付昱, 等. 基于量子粒子群与深度学习的煤矿瓦斯涌出量软测量[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4):160-168.
- FU H, ZHAO J CH, FU Y, et al. Soft measurement of coal mine gas emission based on quantum-behaved particle swarm optimization and deep learning[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4):160-168.
- [18] ZHOU W, HAN B, WANG J, et al. Design of uniform magnetic field coil by quasi-elliptic function fitting method with multiple optimizations in miniature atomic sensors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(11):11755-11764.
- [19] 徐萌, 周玉祥, 徐海, 等. 基于改进粒子群算法的开关磁阻电机本体优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(4):131-141.
- XU M, ZHOU Y X, XU H, et al. Ontology optimization of switched reluctance motor based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (4): 131-141.
- [20] 黄海宏, 汪宇航, 王海欣. 基于粒子群优化粒子滤波算法的SOC估算研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2):245-253.
- HUANG H H, WANG Y H, WANG H X, et al. Research on SOC estimation based on particle swarm algorithm and particle filter algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2):245-253.
- [21] QIAN G, WANG Y, JIAN M. Estimation of doppler parameters based on PSO for BFSAR ship target imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2023, 20:1-5.
- [22] ZHANG Z, ZHAO Q, DAI F A. A warm-start strategy in interior point methods for shrinking horizon model predictive control with variable discretization step [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2023, 68(6): 3830-3837.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电能质量-电力系统频率偏差:GB/T 15945—2008[S]. 中国国家标准化管理委员会, 2008.
- Genera Administration of Quality Supervision. Power quality-Frequency deviation for power system; CB/T 15945—2008 [S]. Inspection and Quarantine of the People's Republic of China Standardization Administraton of the People's Republic of China, 2008.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电压波动和闪变:GB/T 12326—2008[S]. 中国国家标准化管理委员会, 2008.
- Genera Administration of Quality Supervision. Power quality—Voltage fluctuation and flicker; CB/T 12326—2008 [S]. Inspection and Quarantine of the People's Republic of China Standardization Administraton of the People's Republic of China, 2008.
- [25] SHAO Z, WEN Y, XU Z, et al. Cable current detection with passive RF sensing tags[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(1):930-939.
- [26] ANSI/NEMA. Electric power systems and equipment-voltage ratings (60 Hertz):C84.1-2020[S]. Inspection and Quarantine of the People's Republic of China Standardization Administraton of the People's Republic of China, 2020.
- [27] GIRGIS A A, STEPHENS J W, MAKRAM E B. Measurement and prediction of voltage flicker magnitude and frequency [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3):1600-1605.
- [28] WU Y, TIAN C, ZHANG Z, et al. A novel current transformer based on virtual air gap and its basic measuring characteristics [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(1):13-25.

- [29] KHAWAJA A H, HUANG Q, CHEN Y. A novel method for wide range electric current measurement in gas-insulated switchgears with shielded magnetic measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(12):4712-4722.

## 作者简介



**林其伟**, 2018 年于南昌大学获得学士学位, 现在为上海交通大学硕士研究生, 主要研究方向为无线传感技术与仪器。

E-mail: qwzero18234@sjtu.edu.cn

**Lin Qiwei** received his B. Sc. degree from Nanchang University in 2018. He is currently

a master student at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include wireless sensing technology and instrumentation.



**文玉梅** (通信作者), 1984 年于北京航空航天大学电子工程系获得学士学位, 1987 年于中国运载火箭技术研究院获得硕士学位, 1997 年于重庆大学获得博士学位。现为上海交通大学电子信息与电气工程学院教授, 博士生导师。主要研究方向为信息获取

与处理、传感器与仪器、能量采集。

E-mail: yumei.wen@sjtu.edu.cn

**Wen Yumei** (Corresponding author) received her B. Sc. degree in Department of Electrical Engineering, Beihang University in 1984, received her M. Sc. degree from China Academy of Launch Vehicle Technology in 1987, and received her Ph. D. degree from Chongqing University in 1997. She is currently a professor in the School of Electronic Information and Electrical Engineering at Shanghai Jiao Tong University. Her main research interests include signal acquisition and processing, sensors and instrumentation, and energy-harvesting.



**邵壮**, 2016 年于电子科技大学获得学士学位, 2019 年于中国空间技术研究院获得硕士学位。现为上海交通大学电子信息与电气工程学院博士研究生, 主要研究方向为无线传感技术与仪器。

E-mail: shaozhuang@sjtu.edu.cn

**Shao Zhuang** received his B. Sc. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2016, and received his M. Sc. degree from the China Academy of Space Technology in 2019. He is currently a Ph. D. candidate at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include wireless sensing technology and instrumentation.