

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312201

三芯电缆非侵入式多导体电流测量研究*

高干, 文玉梅, 李平

(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)

摘要:针对当前的三芯电缆电流测量直接使用传感信号进行多导体位置和电流的测量,传感器数量未确定,使用数量多不仅使多导体电流测量系统没有确定的传感器使用策略,而且导致测量误差大的问题,本文分析给出了非侵入测量三芯电缆电流所需的最少且最优的磁传感器数量,提出了非侵入式多导体电流测量原理。根据三芯电缆电流传导环电缆磁场分布关系,使用6个磁传感器环绕电缆分布,由每个传感信号获取2个特征值的最优估计,建立12个独立方程,实现电缆中导体位置的检测和导体电流的测量。搭建了三芯电缆电流测量平台,进行了测试验证。测试结果表明,该方法测量15~100 A的三相电流的振幅最大误差小于1.00%,相角误差小于2°,导体位置误差小于0.2 mm。提出的测量原理极大减小了多芯电缆电流的在线测量误差,且测量系统拥有更简单的结构和精准的位置及电流波形测量结果。

关键词:多导体电流测量;隧道磁阻传感器;传感器阵列;相关检测

中图分类号: TH89 TM933 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on non-invasive multi conductor current measurement of three-core cables

Gao Gan, Wen Yumei, Li Ping

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

Abstract: In response to the current situation where the current measurement of three core cables directly uses sensing signals to measure the position and current of multiple conductors, the number of sensors is uncertain and the number of sensors used is large. This not only makes the multi-conductor current measurement system lack a determined sensor usage strategy but also leads to large measurement errors. This article analyzes and provides the minimum and optimal number of magnetic sensors required for the non-invasive measurement of three-core cable current. The principle of non-invasive multi-conductor current measurement is proposed. Based on the magnetic field distribution relationship of the three-core cable current, 6 magnetic sensors are used to surround the cable distribution. The optimal estimation of 2 eigenvalues is obtained from each sensing signal, and 12 independent equations are established to achieve the detection of conductor position and measurement of conductor current in the cable. A three-core cable current measurement platform was built and tested for verification. The test results show that the maximum amplitude error of the method for measuring three-phase currents ranging from 15 to 100 A is less than 1.00%, the phase angle error is less than 2°, and the conductor position error is less than 0.2 mm. The proposed measurement principle greatly reduces the online measurement error of multi-core cable current, and the measurement system has a simpler structure and accurate position and current waveform measurement results.

Keywords: multi conductor current measurement; tunneling magnetoresistance sensor; sensor array; correlation detection

0 引言

数字化已成为电力系统的全球趋势^[1]。全面的状态

感知和高度智能化的操作需要对电力系统中大量的节点和线路进行测量^[2],因此必须建立广泛的传感网络,其中电流是最重要的传感量之一^[3-5]。多芯电缆是电力系统中用于传输和分配电能的重要工具,广泛应用于城市配

电网和输电线路中^[6-7]。针对电缆电流的在线测量可以帮助电网工作人员及时发现和排查故障,保障电力系统安全稳定运行^[8]。

非侵入式电流测量方法以其非接触、隔离度高、环境适应性强的优势,近年来作为主要的电流测量技术得到广泛的研究和应用^[9],按原理可分为基于法拉第电磁感应定律的电流互感器和罗氏线圈以及基于安培定律的磁场测量方法^[10-11]。三芯电缆作为多导体电缆的一种,仅靠单一传感器无法完成对电缆中多个相电流的测量,需要多个传感器组成阵列才能完成测量任务^[12]。而电流互感器和罗氏线圈体积大,不适合组成阵列,因此多芯电流的非侵入式测量多采用基于电磁原理的磁场测量方法^[13],即用磁传感器阵列获取待测电缆周围的磁场,再利用确定的磁场-电流关系从磁场信号中重构出电缆内的相电流信息,其中最大的挑战是如何在测量中确定电缆内相导体的位置以及通过每根导体的电流^[14]。

目前已应用于非侵入式多芯电缆电流测量领域的磁传感器有电感器、各向异性磁阻传感器和隧道磁阻传感器。2001年,Antona等^[15]从通流状态下多导体系统的电磁场方程出发,首次提出运用磁传感器阵列测量多导体系统电流的构想,但并未付诸实际。2018年,Zhu等^[16-17]使用由16个三轴各向异性磁阻(anisotropic magnetoresistance, AMR)传感器组成的圆形阵列进行三芯电缆的电流测量,同时使用电磁场计算软件对多导体系统进行有限元分析,以此反演电缆内部的相导体位置和电流信息,对变电站内载有50 A左右电流的三芯电缆进行测量,该方法的电流振幅最大测量误差达15%,平均测量误差为5.35%。该方法依赖于专业的电磁场计算软件,并不建立具体的测量方程,方法的复杂度对所需的计算能力和计算时间提出了较高的要求。三轴磁传感器使用了其中的两轴,16个传感器共计提供32个传感输出量,每个传感信号中夹杂着噪声,未经处理直接进入反演程序中,引入了较大的测量误差。同年,Geng等^[18]将24个单轴电感器置于一块圆形传感阵列PCB上,用于测量电缆周围的磁场,将导体位置和电流计算问题转化为最小二乘问题,并通过内点法反演电缆内部的相导体位置和电流信息,对于2~16 A内的三相平衡电流测量误差达4.67%,对于非平衡的三相电流测量误差增大至7.65%。该方法使用的内点法虽然计算速度较快,但其结果强烈依赖于初始点的选取,设置的初始点如果距真实点较远,会让优化过程陷入局部最优,导致测量结果误差增大,因此不适用于现实中导体位置和电流信息均是未知的三芯电缆系统。上述研究验证了非侵入式多芯电缆电流测量的可行性,但这些方法使用传感信号直接进行多导体

位置和电流的反演,传感信号的噪声直接影响反演结果,从而产生较大的测量误差。每个传感信号仅能提供一个独立方程,导致所需传感器数量太多,结构复杂,同时每个传感器信号中含有噪声,都会影响反演结果,进一步扩大测量误差。

针对上述问题,本文提出实现三芯电缆非侵入多导体电流精准测量的原理。通过分析环三芯电缆的磁场分布,得到三芯电缆电流非侵入测量所需的最少磁传感器数量和最优测量方程。仅需6个单轴隧道磁阻(tunneling magnetoresistance, TMR)传感器组成圆形磁传感器阵列,使用相关分析的方法得到每个传感器输出信号的振幅和相位的最优估计,建立用6个传感器获得的12个传感量和三芯电缆相电流及位置的独立方程,共计12个独立方程。将整个测量过程分为导体定位和电流测量两个环节,无需多次计算导体位置。定位环节中将非线性方程转化为优化问题,根据三芯电缆的特征使用粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法^[19]实现对三芯电缆位置信息的反演,可摆脱对于初始点的依赖。确定了相导体位置后,即可通过求解方程组实现对电流波形的实时精准测量。

1 测量原理

根据安培定律,电流通过导体时会产生磁场,磁场强度与电流大小成正比。通过测量磁场强度,就可以计算出导体电流的大小。如在测量范围内有多个载流导体,那么任一点的磁场是所有导体电流产生磁场的叠加。因此多导体电流的测量,必须采用多个磁场传感器组成阵列。三芯电缆电流产生的磁场及采用的传感器阵列分析如图1所示。

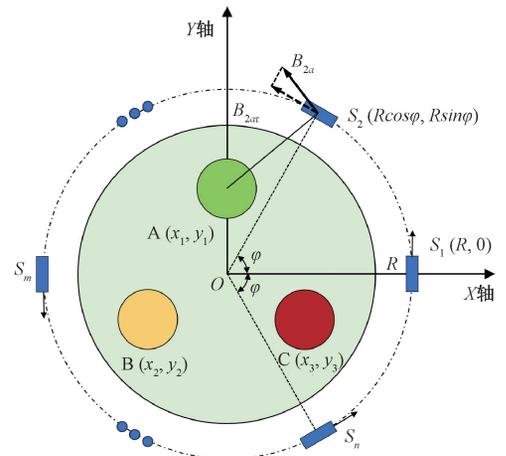


图1 磁传感阵列测量三芯电缆电流的原理

Fig. 1 Principle of measuring three-core cable current with magnetic sensor array

三芯电缆的外截面多为圆形,因此传感阵列多采用图1所示的圆形阵列结构。磁传感器分布在以电缆轴心为圆心的圆周上, R 为传感阵列半径, $S_1 \sim S_n$ 为传感阵列所需的 n 个TMR传感器,均匀分布在同一圆周上,敏感方向均沿着阵列圆的切向。以传感器阵列所在圆周的圆心为原点、传感器 S_1 和原点的连线作为 x 轴,建立直角坐标系。A、B、C为三芯电缆内部的3个相导体,坐标分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) ,导体上通过的电流分别为 $i_A(t)$ 、 $i_B(t)$ 、 $i_C(t)$, t 从开始测量的时刻计时。将相邻两传感器到阵列中心连线的夹角记为 φ ,则第 m 个传感器 S_m 的坐标为 $(R\cos(m-1)\varphi, R\sin(m-1)\varphi)$,其沿敏感方向的单位向量 $\mathbf{l}_m = (-\sin(m-1)\varphi, \cos(m-1)\varphi)$ 。

假定该电缆为无限长直导体,由毕奥-萨伐尔定律,可得传感器 S_m 处由电流 i_A 产生的磁场为:

$$\mathbf{B}_{ma}(t) = \frac{\mu_0 i_A(t) (y_1 - R\sin(m-1)\varphi, R\cos(m-1)\varphi - x_1)}{2\pi [(R\cos(m-1)\varphi - x_1)^2 + (R\sin(m-1)\varphi - y_1)^2]} \quad (1)$$

将 $\mathbf{B}_{ma}(t)$ 向传感器的敏感轴方向上投影,得到传感器 S_m 处由电流 i_A 产生的沿敏感方向的磁场 B_{mar} 为

$$B_{mar}(t) = \mathbf{B}_{ma}(t) \cdot \mathbf{l}_m = \frac{\mu_0 i_A(t) (R - x_1 \cos(m-1)\varphi - y_1 \sin(m-1)\varphi)}{2\pi [(R\cos(m-1)\varphi - x_1)^2 + (R\sin(m-1)\varphi - y_1)^2]} \quad (2)$$

式中: B_{mar} 下标中的 m 表示第 m 个传感器, a 表示由相电流 I_A 产生的磁场, τ 表示沿阵列圆的切向。同理,传感器 S_m 处由电流 i_B 、 i_C 产生的沿电缆切向的磁场可由 i_B 、 i_C 、 x_2 、 y_2 、 x_3 和 y_3 表示。3个相电流产生的磁场叠加在一起即为传感器 S_m 处的磁场输入 B_{mr} 。

$$B_{mr}(t) = k_{m1} i_A(t) + k_{m2} i_B(t) + k_{m3} i_C(t) = \frac{\mu_0 (R - x_1 \cos(m-1)\varphi - y_1 \sin(m-1)\varphi)}{2\pi [(R\cos(m-1)\varphi - x_1)^2 + (R\sin(m-1)\varphi - y_1)^2]} i_A(t) + \frac{\mu_0 (R - x_2 \cos(m-1)\varphi - y_2 \sin(m-1)\varphi)}{2\pi [(R\cos(m-1)\varphi - x_2)^2 + (R\sin(m-1)\varphi - y_2)^2]} i_B(t) + \frac{\mu_0 (R - x_3 \cos(m-1)\varphi - y_3 \sin(m-1)\varphi)}{2\pi [(R\cos(m-1)\varphi - x_3)^2 + (R\sin(m-1)\varphi - y_3)^2]} i_C(t) \quad (3)$$

则所有传感器处的磁场矩阵可表示为:

$$[\mathbf{B}_\tau(t)] = \begin{bmatrix} B_{1r}(t) \\ \vdots \\ B_{mr}(t) \\ \vdots \\ B_{nr}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{m1} & k_{m2} & k_{m3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} = [\mathbf{K}] \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)阐述了三芯电缆的电流-磁场关系,称 $[\mathbf{K}]$ 为系数矩阵。

从式(3)和(4)可以看出,三芯电缆系统的未知量可分为两部分:1),相导体的位置坐标 x_1 、 y_1 、 x_2 、 y_2 、 x_3 和 y_3 ;2),相电流 $i_A(t)$ 、 $i_B(t)$ 和 $i_C(t)$,可由振幅 I_{AM} 、 I_{BM} 、 I_{CM} 和初相角 θ_A 、 θ_B 、 θ_C 表示,如式(5)所示,其中 f 是相电流的频率。

$$\begin{aligned} i_A(t) &= I_{AM} \sin(2\pi ft + \theta_A) \\ i_B(t) &= I_{BM} \sin(2\pi ft + \theta_B) \\ i_C(t) &= I_{CM} \sin(2\pi ft + \theta_C) \end{aligned} \quad (5)$$

故三芯电缆系统的未知量共有12个:相导体的位置坐标 x_1 、 y_1 、 x_2 、 y_2 、 x_3 、 y_3 和相电流的振幅 I_{AM} 、 I_{BM} 、 I_{CM} 及相角 θ_A 、 θ_B 、 θ_C 。

在实际测量中,第 m 个传感器采集到的信号 $s_m(t)$ 是包含噪声的信号,如式(6)所示。为便于分析,假设 $n_m(t)$ 为白噪声。

$$s_m(t) = B_{mr}(t) + n_m(t) \quad (6)$$

利用相敏检波原理,对白噪声中的正弦信号进行检测,得到 $B_{mr}(t)$ 振幅和相位的最大似然估计: \widehat{A}_m 和 $\widehat{\beta}_m$ 。

$$\widehat{A}_m = \sqrt{s_{m_sin}^2 + s_{m_cos}^2} \quad (7)$$

$$\widehat{\beta}_m = \arctan \frac{s_{m_cos}}{s_{m_sin}} \quad (8)$$

其中,

$$s_{m_sin} = \frac{2}{T} \int_0^T s_m(t) \sin(2\pi ft) dt \quad (9)$$

$$s_{m_cos} = \frac{2}{T} \int_0^T s_m(t) \cos(2\pi ft) dt \quad (10)$$

振幅和初相估计完成后,可由 \widehat{A}_m 和 $\widehat{\beta}_m$ 确定。每个传感器的输出信号可提供两个独立的有用信息,因此仅需6个传感器即可求解三芯电缆系统中的12个未知量,即所需最少传感器数量为6。

2 导体定位与电流测量

当系数矩阵 $[\mathbf{K}]$ 确定时,式(4)是关于磁场和电流的线性方程,已知磁场即可求解电流。但 $[\mathbf{K}]$ 的元素是导体和传感器相对位置的函数,只有确定了导体的位置坐标,才能确定系数矩阵 $[\mathbf{K}]$ 。故而将整个测量过程分为两个环节:导体定位和电流测量。导体定位环节的作用是确定相导体的位置,使系数矩阵 $[\mathbf{K}]$ 成为已知。只要相导体的位置不发生变化,导体定位在测量过程中仅进行一次。

在进行导体定位前,式(4)是关于磁场和电流以及导体位置的多元非线性方程组。对于多元非线性方程,常转化为优化问题使用迭代方法来解决。通过猜测一个

初始解 \mathbf{X}_0 , 然后依据迭代准则不断迭代产生 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_i, \dots$, 直至达到迭代的终止条件。

该优化问题的目标函数设定为从各传感器实际测得信号中估计的振幅值、初相角与在估计解 \mathbf{X}_i 下通过式(4)计算而得的信号振幅、初相角的差值平方和最小, 如式(11)所示。

$$\min \sum_{m=1}^6 [(\widehat{A}_m - A_m(\mathbf{X}))^2 + (\widehat{\beta}_m - \beta_m(\mathbf{X}))^2] \quad (11)$$

传统优化算法计算速度快, 但求解的结果强烈依赖于初始点, 且仅能求出优化问题的局部最优解。智能优化算法所需计算时间长, 收敛速度慢, 但优化结果不依赖初始解, 更具有普适性。相较于其他智能优化算法, PSO 算法需要设定的参数少, 全局搜索能力更强, 收敛速度更快, 因此本文采用 PSO 算法求解该优化问题。

和众多智能算法相似, PSO 算法会随机生成指定数量的随机解, 这些解被视为“粒子”。每个粒子在指定的搜索空间中迭代, 其在搜索空间中的位置和迭代速度将根据自己找到的个体最优解与整个种群的全局最优解来调整。粒子 \mathbf{X}_i^k 的维度为 12 维, 如式(12)所示, 前六维为相导体的位置坐标 $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$, 后六维为相电流的振幅 I_{AM}, I_{BM}, I_{CM} 和初相角 $\theta_A, \theta_B, \theta_C$ 。其中下标 i 为该粒子的编号, 上标 k 表明该粒子正处于第 k 次迭代中。

$$\mathbf{X}_i^k = (x_{i1}, y_{i1}, x_{i2}, y_{i2}, x_{i3}, y_{i3}, I_{iAM}, I_{iBM}, I_{iCM}, \theta_{iA}, \theta_{iB}, \theta_{iC}) \quad (12)$$

通过 PSO 算法进行迭代, 直至达到预设的最大迭代次数。在 PSO 算法结束后, 相导体的位置坐标即可确定, 则系数矩阵 $[\mathbf{K}]$ 可确定。

完成导体的定位后, 式(4)是关于磁场和电流的线性方程组。在之后的电流测量环节中, 通过式(13)即可快速地求解出电流信息。

$$\begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} = [[\mathbf{K}]^T [\mathbf{K}]]^{-1} [\mathbf{K}]^T [\mathbf{B}_\tau(t)] \quad (13)$$

3 测量系统

3.1 测量系统组成

如图 2 所示, 三芯电缆电流测量系统包括传感阵列、数据采集卡和上位机。

根据测量原理, 敏感单元选用 TMR2003 型号单轴 TMR 传感器(3 mm×3 mm×1.45 mm, 多维科技, 中国), 线性测量区间为 ± 5 Oe, 灵敏度为 6 mV/V/Oe。TMR2003 采用惠斯通全桥结构, 包含 4 个高灵敏度 TMR 元件, 在特定范围内的外加磁场变化下, 将 4 个 TMR 桥臂阻值的

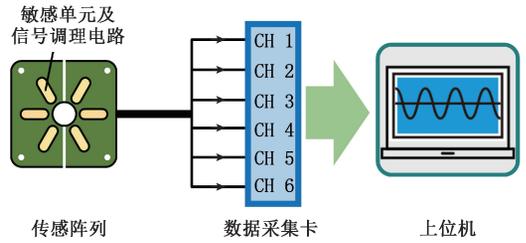


图 2 三芯电缆电流测量系统组成

Fig. 2 Composition of the three-core cable current measurement system

线性变化转换为差分输出电压的变化。在 1 V 供电下 TMR2003 的输出电压随输入磁场强度变化的特性曲线如图 3 所示。

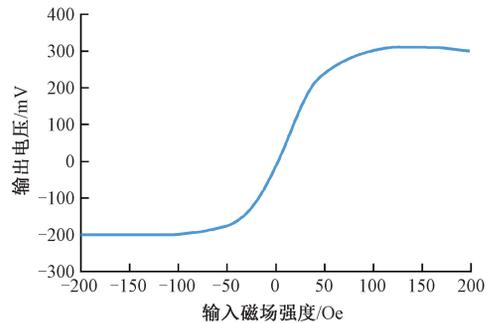


图 3 磁传感器 TMR2003 的输入输出曲线

Fig. 3 Input-output curve of the TMR2003 sensor

从图 3 中可以看出, TMR2003 在磁场线性测量区间内输出电压仅为数十 mV, 需要进行放大。使用仪表放大器 INA826(4.90 mm×3.91 mm×1.75 mm, 德州仪器, 美国)将 TMR2003 输出的差分信号转化为单端信号, 并选择精度 0.1% 的 5.1 kΩ 精密电阻将放大器的增益设置为 10.69 倍, 同时施加正向的电压偏置以抬升输出电压、降低供电难度。敏感单元及信号调理电路的原理图如图 4 所示。

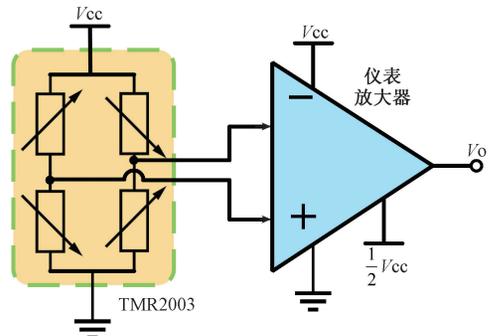


图 4 敏感单元及信号调理电路的原理图

Fig. 4 Schematic diagram of sensitive units and signal conditioning circuits

传感阵列电路由两块 PCB 组成。6 个 TMR 传感器焊装在两块 PCB 上,按敏感轴沿圆周切线方向均匀分布在同一圆周上,保证传感器具有较高的定位精度。每块 PCB 上有半圆形的开口,以便载流电缆通过。

3.2 数据采集和处理

数据采集卡采集经过调理后的传感阵列 1~6 通道的模拟电压信号,并将其量化编码,转换为数字信号后传输至上位机。

期望达到的电压测量误差低于 0.05%,这样 A/D 转换的位数应该大于 11 位。为了得到更高的采样精度和更小的量化误差,这里选取 16 位 A/D。检测目标是电网中的电流信号,由于电网扰动和负载多样性,实际信号中除了工频信号还可能含有高次谐波,综合考虑系统的数据容量和处理速度等能力,选取的采样率为 5 000 Hz。

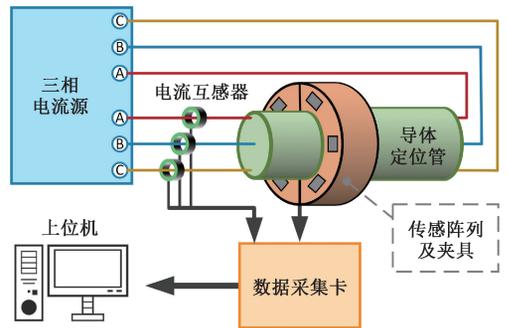
上位机集成了数据采集卡的控制指令和三芯电缆电流的测量算法,通过控制指令设置数据采集卡的采样通道、采样频率和采样时长,并通过算法程序对采集卡传输的数据进行处理、计算和结果显示。

4 测量结果

在实验室环境中搭建了三芯电缆电流测量试验平台,实物图与示意图如图 5 所示。为测试反演算法对不同位置分布的三芯电缆系统的测量效果,使用聚氯乙烯绝缘线缆 RV35 作为三芯电缆系统的载流导体。采用 3D 打印技术打印导体定位管和夹具,分别用于固定三芯线缆的位置分布及传感阵列与线缆的相对位置。使用开关型的三相电流源 HY-SCS-500(航裕电源科技,中国)产生有效值为 15~100 A 的三相电流。使用 3 个电流互感器对 3 个相导体上的电流波形进行测量,以互感器对电流的测量值作为参考值。通过 USB-61901(简仪科技,中国)数据采集卡采集传感阵列 1~6 通道的输出电压信号,并传入上位机进行计算和处理。采集卡各通道的采样频率设为 5 kHz,采样点数设置为 5 000 点。



(a) 实验平台实物图
(a) Physical image of experimental platform



(b) 实验平台示意图
(b) Diagram of experimental platform

图 5 三芯电缆电流测量实验平台

Fig. 5 Experimental platform of three-core cable current measurement

首先考虑三相电流幅值相同的情况,设定三相电流为 20 A 时,各通道传感器输出的原始信号(去直流偏置)如图 6 所示。对原始信号进行相敏检波得到基波幅值和初相后提取出的基波波形如图 7 所示。

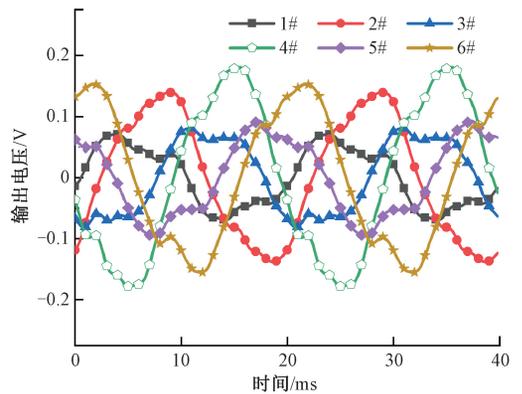


图 6 传感器输出的原始信号

Fig. 6 Raw signal output by sensor array

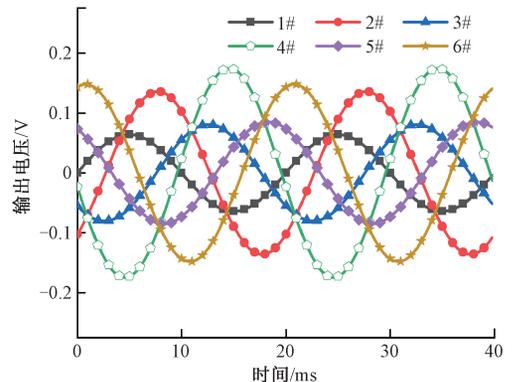


图 7 从原始信号中提取出的基波信号

Fig. 7 Fundamental signal extracted from the raw signal

因为使用的电流源为开关型电流源,所以图 6 中除了有基波电流,还可以观察到有谐波成分。依据传感阵列的输入-输出特性,将提取出的基波信号转换为磁场信号,转换后的磁场信号如图 8 所示。

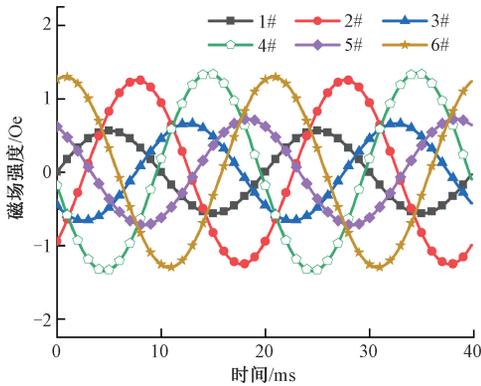
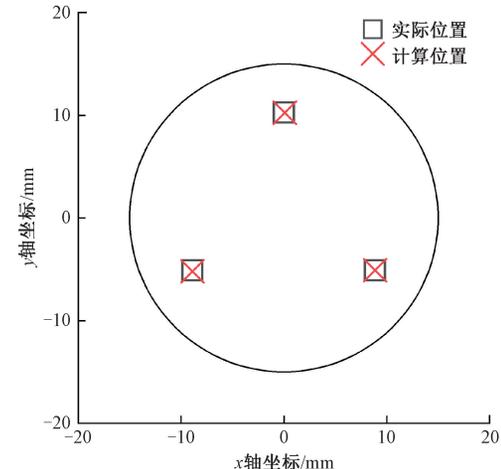
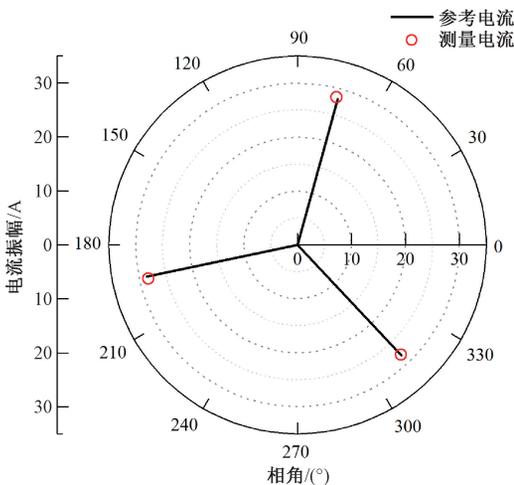


图8 磁场信号
Fig. 8 Magnetic field signal

将磁场信号输入位置反演算法中,计算得到导体的位置信息和此时的基波电流。计算所得导体位置、基波电流与实际导体位置、参考电流的对比如图9所示。



(a) 导体位置的计算结果
(a) Calculation results of conductor position

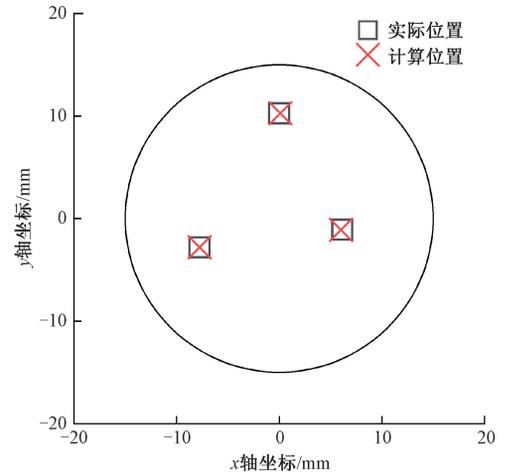


(b) 基波电流计算结果
(b) Calculation results of fundamental current

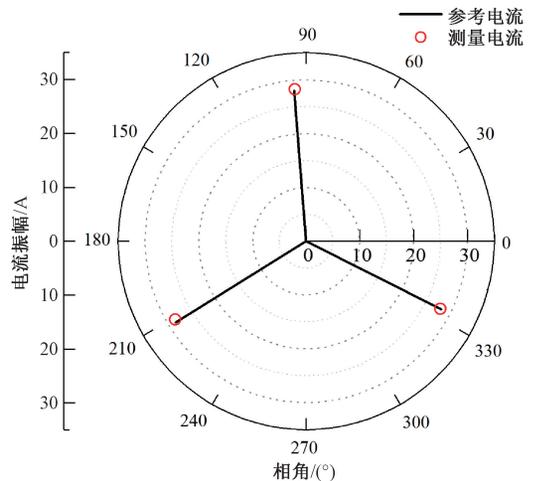
图9 测量结果与参考信息的对比

Fig. 9 Comparison of measurement results with reference information

从图9可以得到,计算所得的导体位置与实际位置基本重合,最大坐标误差为0.11 mm,三相电流基波的幅值最大误差为0.88%,最大相角误差为1.2°。保持设定电流不变,更换另一种导体定位管,改变相导体的位置分布,此时导体定位的结果如图10(a)所示,基波电流计算结果如图10(b)所示。



(a) 导体位置的计算结果
(a) Calculation results of conductor position



(b) 基波电流计算结果
(b) Calculation results of fundamental current

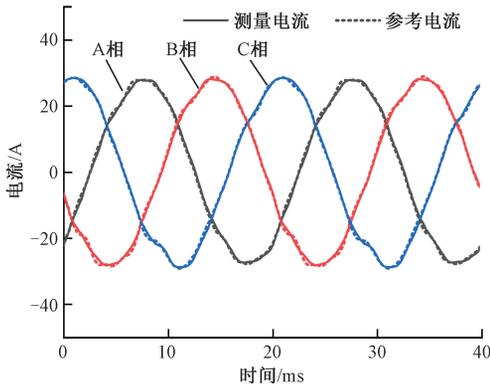
图10 测量结果与参考信息的对比

Fig. 10 Comparison of measurement results with reference information

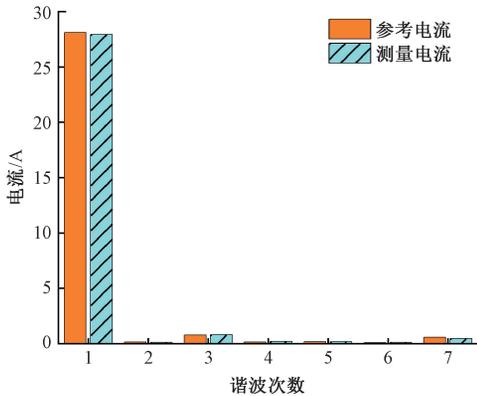
从图10可以得到,导体位置最大坐标误差为0.17 mm,三相基波电流的幅值最大误差为0.84%,最大相角误差为1.7°。综合图9和图10可以看出,即便导体分布不同,处于不同的位置,该方法对三芯电缆系统中相导体定位的准确度依然很高,导体位置的坐标误差小于0.2 mm。此时的基波电流幅值测量误差均小于1.00%,相角误差小于2°。

导体定位完成后,进入电流测量环节,通过磁场数据

和式(13)求解电流波形。测量所得的三相电流与参考电流波形如图 11(a)所示,测量所得的 A 相电流与对应的参考电流的谐波成分如图 11(b)所示。



(a) 电流波形的测量结果
(a) Measurement results of current waveform



(b) 电流谐波成分对比
(b) Comparison of current harmonic components

图 11 波形及谐波测量结果

Fig. 11 Waveform and harmonic measurement results

从图 11 可以看出,不论是电流波形还是谐波分量,测量结果都与参考电流基本一致。

保持导体的位置不变,同时改变三相电流的大小,三相电流幅值相同时各相基波电流的测量误差如图 12 所示。

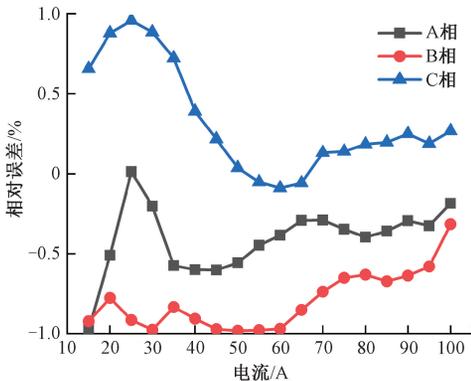


图 12 相电流幅值相同时的测量误差

Fig. 12 Measurement error with same phase current amplitudes

从图 12 中可以看出,随着电流的增大,此时的测量误差总体呈逐渐减小的趋势,即便是误差最大时也未超过 1.00%,优于文献[18]中使用 24 个单轴磁传感器所达到的 4.67%的测量误差。

在实际情况中,不仅三相导体的位置可能是不对称分布的,三相电流的幅值也可能相差较大,于是对三相电流幅值不同的情形进行导体定位和电流测量,对比测量结果和实际信息。导体定位结果与图 10(a)一致,位置坐标误差小于 0.2 mm。不同电流组合时,测量结果中三相基波电流的幅值最大相对误差如表 1 所示。

表 1 相电流幅值不同时的最大相对误差

Table 1 Maximum relative error with different phase current amplitudes

三相电流组合/A	幅值最大相对误差/%
(20, 22, 18)	0.91
(20, 25, 25)	0.83
(40, 50, 60)	-0.56

从表 1 中可以发现,即便对于幅值不同的三相电流,本文提出的测量方法也同样可以达到 1.00% 以内的误差。综合以上的测量结果,可以说明本方法能够实现各种情况的三芯电缆电流非侵入式精准测量。

三芯电缆内相导体的位置不会轻易改变,因此对于导体位置的计算在测量过程中只需进行一次,之后便可实现三芯电缆电流的实时波形测量。

5 结 论

本文提出实现三芯电缆非侵入多导体电流精准测量的原理。分析给出了非侵入测量三芯电缆电流所需的最少磁传感器数量,使用 PSO 算法实现从磁场传感器输出信号到电缆内部相导体位置和相电流信息的反演。研发了环形 TMR 阵列来实现电缆周围磁场信息的获取,并搭建了非侵入式三芯电缆电流测量平台,测量得到的导体位置与实际位置基本重合,坐标误差小于 0.2 mm,相电流基波幅值误差低于 1.00%,相角误差小于 2°,重构后的电流波形与谐波成分均与参考电流一致,验证了所提出的反演算法和测量系统对于相导体位置计算和相电流信息测量的准确性。相较于现有的非侵入式多芯电缆电流测量方法,本文方法使用传感信号特征值的最优估计建立独立方程,仅需 6 个传感器即可实现电缆中三个导体电流的测量,所需传感器数量为最少;使用 PSO 算法求解优化问题,摆脱对初始点的依赖,导体定位更准;同时对信号的最优估计抑制了噪声的影响,使得电流测量误差更小。该测量结构

和算法不仅适用于三芯电缆,更适用于各种各样的多导体系统,该测量方法可应用于电力系统中各种多芯电缆电流的非侵入式在线测量。

参考文献

- [1] 吴克河,王继业,李为,等. 面向能源互联网的新一代电力系统运行模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2019,39(4):966-979.
WU K H, WANG J Y, LI W, et al. Research on the operation mode of new generation electric power system for the future energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4):966-979.
- [2] APPASANI B, JHA A V, MISHRA S K, et al. Communication infrastructure for situational awareness enhancement in WAMS with optimal PMU placement[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-12.
- [3] 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.
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.
- [4] SHAO Z, WEN Y, XU Z, et al. Cable current detection with passive RF sensing tags[C]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021.
- [5] ZHANG J, WEN Y, LI P. Nonintrusive current sensor for the two-wire power cords[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11):1-4.
- [6] ZHU K, PONG P W T. Curved trapezoidal magnetic flux concentrator design for current measurement of multi-core power cable with magnetic sensing [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(4):1-9.
- [7] 袁燕岭,李世松,董杰,等. 电力电缆诊断检测技术综述[J]. 电测与仪表,2016,53(11):1-7.
YUAN Y L, LI SH S, D J, et al. A review on diagnostic testing technique of electrical power cables[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(11):1-7.
- [8] SUN X, POON C K, CHAN G, et al. Operation-state monitoring and energization-status identification for underground power cables by magnetic field sensing[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(11):4527-4533.
- [9] 胡军,马浩宇,李鹏,等. 基于磁场传感器阵列的电流测量方法研究进展[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1779-1794.
HU J, MA H Y, LI P, et al. Research progress of current measurement method based on magnetic sensor array[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1779-1794.
- [10] 杨庆,孙尚鹏,司马文霞,等. 面向智能电网的先进电压电流传感方法研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(2):349-367.
YANG Q, SUN SH P, SIMA W X, et al. Progress of advanced voltage/current sensing techniques for smart grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 349-367.
- [11] GUO C, ZHANG H, GUO H, et al. Crosstalk analysis and current measurement correction in circular 3D magnetic sensors arrays [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(3):3121-3133.
- [12] CHAN J Y C, TSE N C F, LAI L L. A coreless electric current sensor with circular conductor positioning calibration [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(11):2922-2928.
- [13] ZUO K, GENG G, JIANG Q. The application of non-invasive sensor in unbalanced three-phase current detecting [C]. 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), 2019:1221-1225.
- [14] MENG L, GAO P, HAJI M M, et al. Magnetic sensor array-based AC current measurement for multiconductor cables using evolutionary computation method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(10):2747-2758.
- [15] ANTONA G D, RIENZO L D, OTTOBONI R, et al. Processing magnetic sensor array data for AC current measurement in multiconductor systems [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(5):1289-1295.
- [16] ZHU K, HAN W, LEE W K, et al. On-site non-invasive current monitoring of multi-core underground power cables with a magnetic-field sensing platform at a substation[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(6): 1837-1848.
- [17] ZHU K, LIU X, PONG P W T. On-site real-time current monitoring of three-phase three-core power distribution cables with magnetic sensing [C]. 2018 IEEE Sensors,

2018;1-4.

- [18] GENG G, YANG X, GAO Y, et al. Noninvasive current sensor for multicore cables [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5):2335-2343.
- [19] LLERENA-PIZARRO O, PROENZA-PEREZ N, TUNAC E, et al. A PSO-BPSO technique for hybrid power generation system sizing [J]. IEEE Latin America Transactions, 2020, 18(8):1362-1370.

作者简介



高干,2019年于南京航空航天大学获得学士学位,现在为上海交通大学硕士研究生,主要研究方向为非侵入式电流测量。

E-mail: gaogan@sjtu.edu.cn

Gao Gan received his B. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2019. He is currently a master student at Shanghai Jiao Tong University. His main research interest is noninvasive current measurement.



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 from Beihang University in 1984, received her M. Sc. degree in 1987 from China Academy of Launch Vehicle Technology, and received her Ph. D. degree in 1997 from Chongqing University. She is currently a professor in the School of Electronic Information and Electrical Engineering at Shanghai Jiao Tong University. Her main research interest includes signal acquisition and processing, sensors and instrumentation, and energy-harvesting.