

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006189

基于单片 TMR 磁传感器的非侵入电流监测微系统

鲁文帅^{1,2}, 尤睿³, 周扬⁴, 袁宏永⁴, 尤政^{1,2}

(1. 清华大学精密仪器系 北京 100084; 2. 生物医学检测技术及仪器北京实验室 北京 100101;
3. 北京大学信息科学技术学院 北京 100871; 4. 清华大学工程物理系 北京 100084)

摘要:提出一种仅需单片单轴隧穿磁阻传感器且无需磁芯结构的低成本、非侵入式电流监测微系统。研究论证了磁阻传感器测量线缆电流的基本原理和关键点;设计了具备电缆限位功能的组合式结构,在确保磁场-电流传递关系可靠性的同时,避免了对传统聚磁结构及传感阵列的依赖,确保了测量的便捷和结构简单;设计了高集成度、低功耗的微系统硬件,并基于软件实现了精确测量和校准算法。基于工频市电的电气线路规范搭建了测试环境,开展了性能测试。结果表明,研制的电流监测微系统具有较高的线性度和重复性,在 0~8 A 测量范围内最大误差为 1.5%,可达到国标 0.5 级标准,具有较好的长期稳定性和抗邻线电流干扰能力,适用于多数居民用电监测场景。

关键词: 电流监测; 隧穿磁阻; 微系统; 非侵入检测; 无磁芯结构

中图分类号: TP277 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Non-invasive current monitoring microsystem based on a single TMR sensor

Lu Wenshuai^{1,2}, You Rui³, Zhou Yang⁴, Yuan Hongyong⁴, You Zheng^{1,2}

(1. Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Beijing Laboratory for Biomedical Detection Technology and Instrument, Beijing 100101, China;
3. School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China;
4. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A low-cost non-invasive coreless current monitoring microsystem is proposed for production and living power safety, which is based on a single monaxial tunneling magnetoresistance sensor. The principle and key points for measuring cable current with the magnetoresistance sensor are demonstrated. A detachable package with limit mechanism is designed to ensure the reliability of the measurement transfer relationship with the compact structure and convenient measurement. It does not need the traditional redundant magnetic core or multi sensors. The high integration and low power microsystem hardware are realized. The accurate measurement and calibration algorithms are achieved by software. A test environment is built according to the city power specification. Test results show good linearity and consistency of the developed current monitoring microsystem. A maximum error of 1.5% in the 0~8 A range is verified within the national standard of 0.5 level. It also has good long-time stability and anti-interference ability to adjacent line, which shows the developed microsystem suitable for most residential power monitoring scenarios.

Keywords: current monitoring; tunneling magnetoresistance; microsystem; non-invasive detection; coreless structure

0 引言

在常规的电力系统中,电流是与发电能力、负载需求、传输线路等密切相关的主要特征参数^[1-2]。在各类

用电场景中,如何准确、实时、便捷地实现电流监测,是确保安全、有效用电的关键^[3-4]。以我国居民用电为例,近年来,随着新投入使用的电气系统急剧增加,以及既有线路、设备的不断老化,各类电气火灾事故频发,这些事故往往是由过流、漏电、短路等线路电流状

态异常导致的^[5]。

为满足应用场景、安装方式、维护难度等方面日益增长的需求,电流检测装置一直在向小体积、低功耗、低成本、易安装、智能化的方向发展,逐渐形成了基于欧姆定律的串联电阻法、基于法拉第定律的电流互感器和罗氏线圈和基于安培定律的磁场测量方法^[1,4,6]。由于磁场测量具有非接触、隔离度高、环境适应性强的优势,因此近年来作为主要的非侵入电流检测技术得到越来越多的研究和应用,主要成果包括敏感器件、测量结构和配套算法等方面。其中,常用的敏感器件主要基于霍尔效应与各类磁阻效应,而常用的测量结构主要包括磁芯式和无磁芯式^[1,7]。

Chan等^[8]于2013年提出了一种基于3个双轴霍尔器件的无磁芯电流传感测量结构,在垂直于被测线缆的U字形电路板上圆周布局了3个霍尔器件,用于同时测量3点磁场的二维矢量,再由微控制器进行矢量计算得到线缆电流,实现对电流互感器的替代。Ouyang等^[9]于2015年提出了一种带有单个空气间隙的开环磁芯式隧穿磁阻(tunneling magnetoresistance, TMR)电流传感器设计,并通过实验证明磁芯对于测量精度的提升可达两个数量级。张俊等^[10]于2018年提出了带有4个对称气隙的开环磁芯式TMR电流传感器的检测结构,在每个气隙内安装1片单轴TMR器件,并利用限位圆筒确保线缆与磁芯垂直同轴,可在任意位置角度下实现0~20 A范围内1.8%的精度误差。Zhang等^[11]于2019年提出了一种基于4片TMR磁传感器的无磁芯电流传感器的测试系统,对比了敏感轴数量对测量精度的影响,结果表明当全部器件从单轴提升到3轴时,测量误差可降低1个数量级。

这些卓有成效的研究工作有力推动了基于磁场传感器的非侵入电流测量技术发展,但设备在面对大批量工程化部署时还有一定的不足。由于线缆电流产生的磁场是沿空间分布的,磁场传感器与线缆的相对位置对电流测量结果会有较大影响,因此在上述研究中为了提高测量精度普遍采用磁芯等聚磁结构以限制磁场的空间分布^[12-13],或采用多片多轴磁传感器组成阵列,配以复杂的算法^[11]。然而,磁芯结构会导致设备体积繁冗、重量增加^[14],且使用时往往需对电气线路进行改动;而传感器数量及轴向数量的增加又会显著增加设备的成本、功耗和体积^[15],环线的圆周布局也会增加系统的体积。因此,如何能够既避免聚磁结构的使用,又减少磁传感器数量及其轴向数量,是解决非侵入磁场式电流测量系统体积、功耗、成本问题的关键^[7,16]。

本文提出了一种基于单片、单轴TMR磁传感器的无磁芯结构电流监测微系统装置。本文首先阐述了基于磁阻器件测量线缆电流的基本原理,随后设计了一种便于

贴附安装在电缆上的、带有多点限位机构和外部屏蔽涂层的微系统结构,降低了装置对磁芯结构、磁传感器数量、轴向数量的依赖和环境磁场的干扰。在此基础上设计了高集成度的微系统硬件和测量校准算法软件,搭建了交流电气线路测试平台,开展了对应的测试分析。结果表明,借助于限位机构、微系统硬件和校准算法,所研制的装置可以在0~8 A范围内实现对工频市电电流最大精度误差不超过1.50%的精确测量,达到国标0.5级标准,具有微系统的小体积、低功耗、低成本优势和易安装部署的工程化实用前景。

1 原理分析

磁阻传感器是由4个阻值随外加磁场变化的磁敏电阻以电桥结构组成的磁场传感器^[17]。根据磁阻效应的不同,又进一步分为各向异性磁阻(anisotropic magnetoresistance, AMR)、巨磁阻(giant magnetoresistance, GMR)和隧穿磁阻,其中隧穿磁阻传感器在体积、功耗、灵敏度、线性度、滞回特性、温漂特性等方面更有优势^[18-19]。磁阻传感器测量电流的基本原理是在确定的磁场-电流关系下测量磁场大小并间接计算电流值^[7],原理如图1所示。

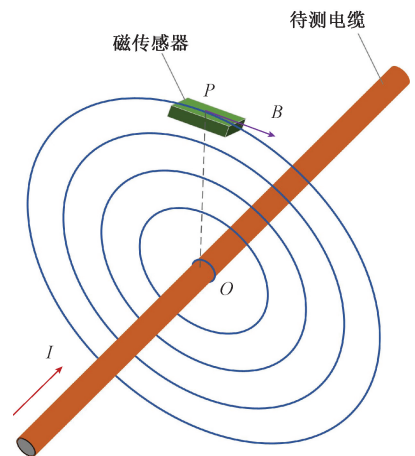


图1 磁阻传感器测量线缆电流的原理

Fig. 1 Cable current measurement principle based on the magnetoresistance sensor

在图1中,长度为 L 的长直线缆中流过电流 I ,根据安培定则,线缆周围会产生圆周分布的磁场。设 P 为线缆附近空间中任意一点,过 P 点且与线缆垂直的平面与线缆相交于线缆上一点 O , P 点与线缆间的垂直距离即 OP 之间的距离为 d , P 点的磁感应强度为 B 。将线缆在长度方向上划分为矢量微元 dl , P 点与线缆各微元之间的矢量距离为 r ,线缆微元 dl 在 P 点产生的磁感应强度

微元为 dB , 则依据毕奥-萨伐尔公式^[8], 有:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times r}{r^3} \quad (1)$$

对式(1)沿 L 积分, 则可以得到 P 点磁感应强度大小 B 与线缆中电流大小 I 的关系为:

$$B = \int_L \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times r}{r^3} \quad (2)$$

当 O 点位于线缆长度方向的中点附近, 且 P 点到线缆距离 d 远小于线缆长度 L 时, 可以认为线缆长度 L 无限长^[14], 则进一步得出电流 I 和磁感应强度大小 B 的关系为:

$$I = \frac{2\pi d \cdot B}{\mu_0} \quad (3)$$

式(3)反映了本文基于磁阻传感器测量电流的基本原理, 即利用磁阻传感器测量 P 点的磁感应强度大小 B , 再经式(3)计算间接得到线缆电流 I 。在实际使用中, 由于安装精度、外磁场干扰等原因, 图1中理想化的均匀圆周磁场分布几乎不存在, 而 B 的测量也会因传感器安装位置或角度的偏差而产生误差^[11, 13-14, 16], 这也是以往设计中采用聚磁结构或传感器阵列的原因。事实上, 由式(3)可知, 测量原理中的两个关键因素分别为 B 的测量准确性及 $B-I$ 传递函数的确定性, 而这两个关键因素可以通过可靠的测量结构、有效的测量电路和简便的校准算法得以确保, 也是本文电流监测微系统的设计依据与研究重点。

2 微系统设计和实现

2.1 结构设计

本文提出的电流监测微系统结构如图2所示, 包括带有限位机构和磁屏蔽涂层的外部封装体, 以及带有传感检测、数据处理、无线传输、供电管理功能的内部硬件。为了确保被测电流和所测磁场之间具有稳定可靠的传递关系, 便于算法中进一步实施校准, 需要利用外部封装体限定被测线缆与内部磁阻传感器间的相对位置, 设计要点为: 1) 确保被测线缆具有长直形态; 2) 与磁传感器所在的微系统底板平行; 3) 二者间距及垂直投影夹角在安装后保持稳定、不因常规的机械扰动而发生变化; 4) 接近式安装, 不侵入被测线缆。为此, 设计为可拆卸成上下两部分的组装式微系统封装体, 并有6对尺寸相同, 每对由2个半弧结构组成的卡扣, 这些卡扣与被测线缆垂直, 当线缆与封装体的上下两部分对位扣紧安装后, 这些卡扣即可共同实现对被测线缆的多点限位, 限位距离的设计方法在2.2节中具体阐述。可根据不同规格的被测线缆(本文以额定电流为16 A、截面积为 2.5 mm^2 的标准

单芯铜线为例) 按需配套相应的封装体。为免地磁场和空间电磁场对测量产生影响, 在微系统封装体的外部喷涂磁屏蔽涂层。

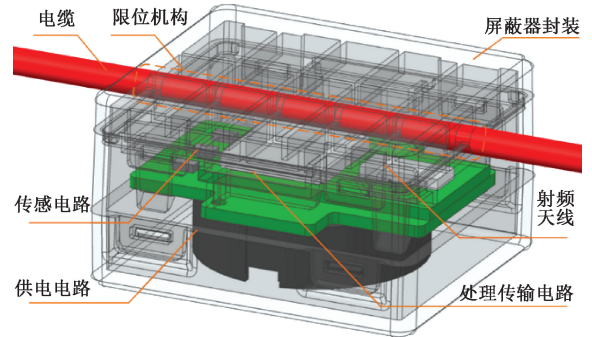


图2 微系统总体结构

Fig. 2 Microsystem overall structure

2.2 硬件电路设计

图3所示为电流监测微系统的硬件电路原理框图, 按功能可分为磁传感器及其检测电路、数据处理与系统控制电路、无线数据传输电路、供电管理电路等部分。

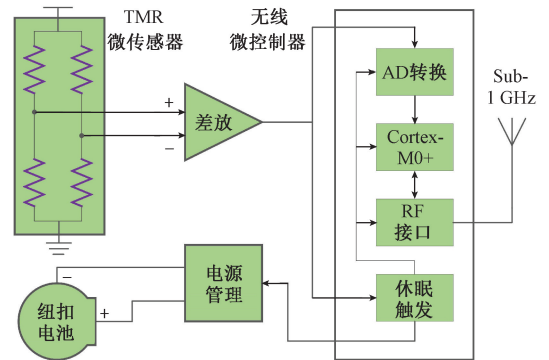


图3 微系统内部硬件电路

Fig. 3 Microsystem internal hardware circuit

在图3中, 磁传感器用于直接测量磁感应强度的大小; 信号检测电路用于将磁传感器输出的原始信号调理成适宜模数转换的模拟信号; 数据处理与系统控制电路用于采样控制、模数转换(analog to digital conversion, ADC)、测量算法的实现; 无线数据传输电路用于外发测量结果, 并监听上位机对微系统的配置指令; 供电管理电路负责微系统的自主供电和低功耗策略的实现。

1) 传感器与信号检测

2.1节中已通过微系统封装体上的多点限位机构固定了被测线缆与微系统的相对位置, 因此微系统内只需使用1个位置固定的单轴磁传感器即可精确测量图1中

的磁感应强度大小 B 。基于对 TMR 磁传感器输入-输出特性、温漂、体积、功耗和成本的综合考虑,选用 TMR2003 型号单轴 TMR 传感器(2.8 mm×2.8 mm×1.1 mm,多维科技,中国),其敏感轴平行于封装引脚方向,磁灵敏度为 6 mV/V/Oe,饱和磁场范围为-350e 至 +550e,线性对称测量范围为±50e,其输入磁场强度-输出电压的特性曲线如图 4 所示。

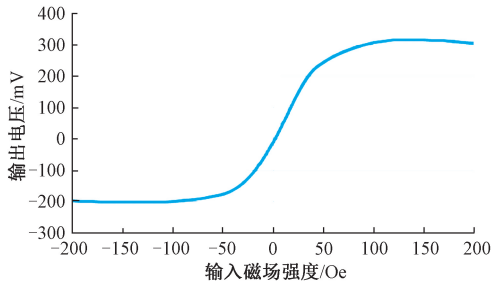


图4 磁传感器 TMR2003 的输入输出曲线

Fig. 4 Input-output curve of the TMR2003 sensor

用 V_o 表示传感器的输出电压信号,则有:

$$V_o = k \cdot B \cdot V_{DD} \quad (4)$$

式中: k 为灵敏度; V_{DD} 为供电电压; B 为磁感应强度大小。考虑到家庭用电插座电流上限通常不超过 10 A 有效值,即峰峰值为±14.14 A,为确保被测磁场信号不进入 TMR2003 传感器的饱和区间,并充分利用其±50e 的线性对称测量区间,将电流峰峰值±14.14 A、磁传感器线性范围±50e 带入式(3),得出线性测量区间的被测线缆到 TMR2003 传感器最优距离为 2.8 mm,此距离由前文限位机构限定。将±50e 磁场激励、3.3 V 电压供电和 6 mV/V/Oe 标称灵敏度条件代入式(4)中,得到 TMR2003 输出的原始信号范围为±99 mV。为充分利用后端模数转换器的有效量程(0~3.3 V),给 TMR2003 配置小尺寸低功耗差分仪表放大器 AD8235(圆片级封装,凌力尔特公司,美国),配置放大倍数 16 倍,并施加正向偏置 1.65 V 以降低供电难度。调理后的输出信号范围为 0.066~3.234 V,对应±50e 磁场激励输入,确保微系统工作在磁传感器输入输出特性曲线的线性低沉范围。通过微系统底板的紧凑式焊盘布局限定磁传感器在微系统底板上的集成焊接位置,并借助自动贴装焊接过程中丝印层光学对准和熔融焊锡表面张力确保与底板自动配合的位置精度。

2) 数据处理与传输

为提高微系统的集成度,采用 Sub-1 GHz 射频频段的系统级封装(system in package, SIP)单片无线微控制器 MKW01(8 mm×8 mm×0.9 mm,恩智浦公司,荷兰)集中实现图 3 中所需的模数转换、微控制器内核、射频通信接口和低功耗电源管理功能。其中,模数转

换位数设置为 12 bit、采样率设置为 10 kHz,微控制器内核为 32 bit 的 ARM Cortex-M0+增强型低功耗内核;射频接口配置为穿透性和抗干扰能力较强的 433 MHz 频段,用于装置外发测量结果,并通过信道监听模式接收上位机对装置的全部设置、配置指令;基于 MKW01 带有的多唤醒源休眠功能,实现微系统的超低功耗电源管理方案。在微系统底板上为 MKW01 配套 24 MHz 时钟源和 433 MHz 半双工射频基带通道。为避免差分仪表放大器、无线微控制器及其基带通道被线缆电磁场干扰,将它们一同封入微系统底板上的电磁屏蔽壳内部,形成处理传输模块。预留射频天线接口,用于外接小尺寸低温共烧陶瓷天线。

3) 电源与低功耗管理

为降低电流监测微系统对外界能源的依赖,兼顾装置的自主性、便捷性和续航能力,采用 CR2477 锂锰纽扣电池(直径 24 mm、厚度 7.7 mm)作为微系统的能源供给。考虑到 TMR2003、AD8235、MKW01 的工作电压范围和锂锰电池的有效电压范围,采用小尺寸轻负载升压开关源 TPS61099(圆片级封装,德州仪器公司,美国)为微系统统一提供 3.3 V 稳压供电,转换效率 95% 以上。为确保装置具有长续航周期,避免频繁维护电池,设计多级休眠唤醒低功耗机制:AD8235 的输出端在接入 MKW01 内模数转换器的同时也接入片上比较器,并为片上比较器设定唤醒阈值,当超过该阈值后,才会唤醒 ARM 内核启动模数转换采集和数据处理,其余时间除传感器和比较器外,其余电路均深度休眠;在此基础上,为射频通信设定超限报警机制和慢心跳机制,只有超出报警阈值才会通过无线接口外发测量结果,否则只每间隔一段较长时间(典型值为 1 h)输出一次无线数据包,以保持与外部的“心跳”连接,而在间隔中只监听上位机的无线指令。微系统的报警阈值及其他设置,可由无线指令灵活配置。

2.3 算法与软件实现

装置组装后所需的系统标定,以及装置在使用中的电流测量,都由运行在微系统中的软件实现。结合家庭用电中对交流电流的监测场景,本节阐述了微系统的测量、校准软件算法设计。

1) 测量算法设计

尽管工频市电有标准的交流周期,但对于电网末端的居民用电而言,由于电网扰动、环境干扰和负载多样性,交流采样信号波形往往出现畸变^[20],测量中不能简单基于单周期采样结果作有效值计算,而需要采用一定的测量算法提高测量精度。为此设计了如图 5 所示的实线框部分所示的测量算法。

流程描述如下:1)利用硬件定时器配合 ADC 和直接存储器访问,进行 N 个工频周期连续过采样,采样率设定

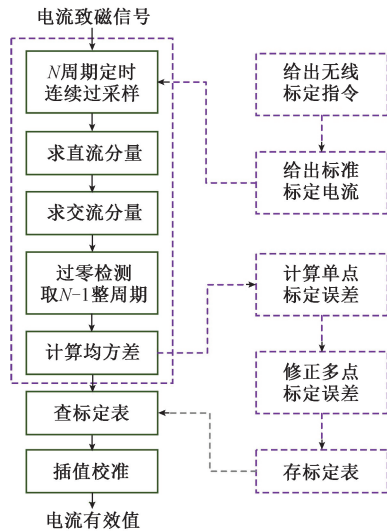


图5 测量与标定校准算法流程

Fig. 5 Algorithm flow for measurement and calibration

为 10 kHz,即每周期采样 200 个点;2)对 N 个周期窗口内全部采样点取平均值,得到多周期直流分量,通过均值滤波减小电网和环境扰动的影响;3)去除直流分量,得到仅含交流分量的 N 周期采样点;4)过零检测,精确得到 $N-1$ 个整周期,消除电网畸变及定时器漂移造成的周期判断误差,以 3 个绝对值最小的连续采样点作为过零检测判据;5)对获得的 $N-1$ 个整周期采样值做均方根计算,得到交流采样均方值;6)为补偿传感器及微系统电路中的系统误差,利用测得的采样均方值和预存于非易失存储器中的标定表(预先测定的一组典型样本)进行分段线性插值,实现由采样均方值到电流有效值的校准,完成电流测量。出于响应时间和测量精度的均衡考虑,本文中取 $N=5$ 。

2) 标定算法设计

在测量算法的软件实现过程中,存储于非易失存储器的标定表是从磁感应强度 B 到电流 I 的传递关系中的最后环节。如前文所述, $B-I$ 传递函数的准确性直接决定了装置的测量精度,而该传递关系可能会因结构组装和应用安装的位置误差而改变,仅使用先验的标定可能会降低测量精度,因而需要做实际标定,对测量结果予以校准。标定算法如图 5 中的虚线框所示:1)在装置组装或安装后,利用上位机发出无线指令启动标定流程,并给定一个标准的标定电流,或采用满足测量精度的手持设备现场给出实时电流的真实值;2)执行常规测量过程,得到测量的均方值;3)依据当前标定表计算测得的电流值,与标准电流值比较得到误差,即为单点标定误差;4)依据单点标定误差得到偏移关系,修正标定表内全部样本;5)在存储器中存入新的标定表,完成标定校准过程。

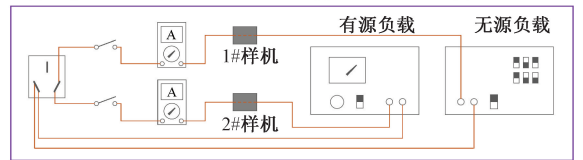
3 测试与结果分析

3.1 样机与测试平台

研制的无磁芯单片 TMR 电流监测微系统样机实物如图 6(a)~(d)所示。其中,图 6(a)为微系统内部硬件电路正面布局,图 6(b)为硬件电路背面及使用的 CR2477 锂电池尺寸对比图,图 6(c)为完成限位组装和屏蔽涂层后的装置实物,图 6(d)为微系统在被测线缆上安装后的形态。微系统内部硬件尺寸为 $30\text{ mm}\times 26\text{ mm}\times 12\text{ mm}$,组装后的外部尺寸为 $46\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 26\text{ mm}$ 。



(a) 微系统正面 (b) 微系统背面 (c) 组装实物 (d) 安装实测
(a) Top view (b) Bottom view (c) Assemble (d) Installation



(e) 测试平台原理
(e) Test bench schematic diagram

图6 微系统实物及测试平台

Fig. 6 Fabricated microsystem and test bench

在实验室环境中为电流监测样机搭建了家庭用电场景测试平台,如图 6(e)所示,包括总电源和 2 个支路上的用电器、电流表、电流监测样机装置。其中:总电源直接取自 220 V 工频交流市电,2 个支路的用电器分别是有源交流阻性负载箱(RXF-220 V 20 A,电流范围为 0.5~20 A)和无源可调滑线电阻箱(BX8-25,电阻范围为 0~12 k Ω)。每个支路上,配有 16 A 标准空气开关以控制支路通断,串联接入万用表(17B+,福禄克公司,美国)毫安档用于记录支路中的电流真实值,在支路上安装 2 台完全相同的微系统样机(记为 1#和 2#)用于对比测试。全部电缆采用截面积 2.5 mm^2 的国标 16 A 规格单芯铜线。采用示波器(MDO3012,泰克公司,美国)测量样机的传感器原始输出信号和已调理信号。此外使用带有 433 MHz 转 USB 转接口的 PC 机作为上位机,对研制样机进行无线配置指令发送和无线测试数据记录分析。

3.2 测试结果及分析

图 7 所示为在给定 20~1 500 mA 被测电流时,微系统内的差分仪表放大器输出的已调理模拟传感信号的波形。

由图 7 的结果可以直观看出,TMR 传感器的输出信号是与被测工频电流信号同频的交流信号,且幅度随被

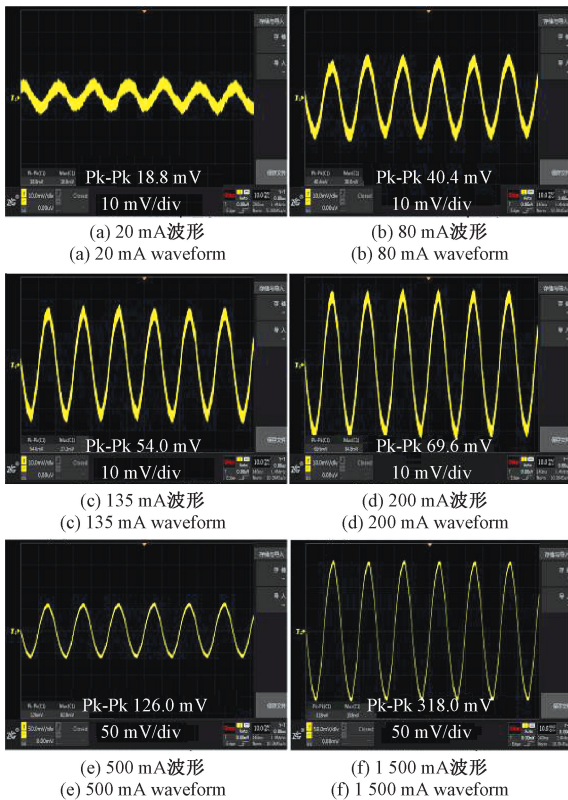


图7 不同被测电流下的已调传感信号的波形图

Fig. 7 Regulated sensing signal waveforms on different current

测电流有效值的增加而增加,验证了本文设计的基本原理。由示波器波形可以进一步发现,由于电网波动和环境扰动导致了被测电流畸变,测得磁信号的各周期波形之间存在细微的差别,特别是在小电流测量时更加明显,因此仅基于单周期采样结果判断周期和计算有效值会影响测试的精度,这证实了前文 2.3 节的分析以及多周期过零检测算法的必要性。

图 8 所示为在典型实验环境下采用研制的样机装置对 0~8 A 被测电流得到的一组输入-输出样本及最小均方 (least mean square, LMS) 拟合曲线,其中横轴为给定的电流真实值,纵轴为经微系统传感、模拟调理、模数转换、多周期有效值计算得到的采样点有效值,反映了微系统装置未经校准时的固有测量属性。

从图 8 的测试结果可以看到,未经标定校准的微系统存在轻微的非线性,皮尔森系数为 0.999 7,对线性拟合回归线的最大相对误差达到 8.9%,因此不能简单采用线性标定曲线。为提高测量精度,同时节省计算资源、避免使用高阶拟合,采用前文所述的分段线性插值是高性价比的校准方案。

1#和 2#样机在完成安装后,借助上位机无线指令完成标定,对 0~8 A 电流测量的结果,及全部测量点的最小均方差线性拟合分析如图 9 和表 1 所示。

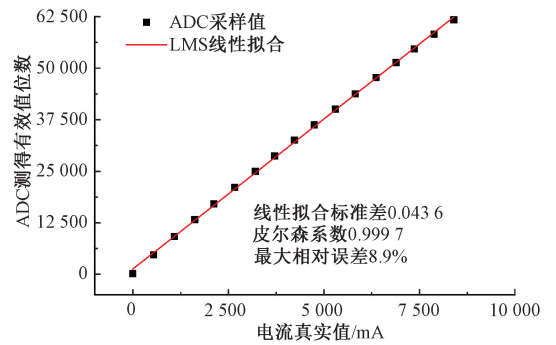


图8 典型测试环境下得到的输入-输出样本

Fig. 8 Input-output samples in typical test environment

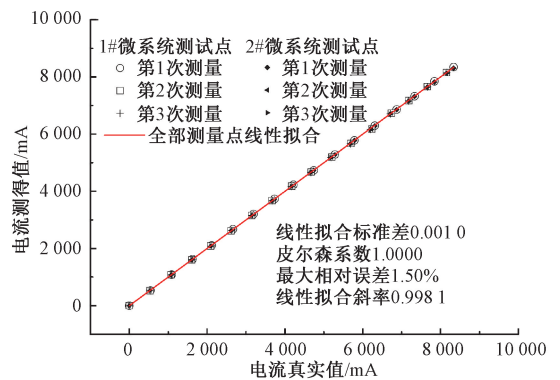


图9 标定后的电流测试结果

Fig. 9 Current test results with post-installation calibration

表1 标定后样机的电流测量数据及误差

Table 1 Prototypes test data with post-installation calibration

电流真实值/mA	1#微系统		2#微系统	
	测得值/mA	误差/%	测得值/mA	误差/%
0	1	-	0	-
533	528	0.94	526	1.50
1 078	1 081	0.28	1 079	0.09
2 097	2 085	0.57	2 088	0.43
3 156	3 162	0.19	3 158	0.06
4 163	4 167	0.10	4 162	0.02
5 186	5 185	0.02	5 177	0.17
6 201	6 166	0.56	6 156	0.73
7 181	7 163	0.25	7 153	0.39
8 166	8 158	0.10	8 131	0.43

由图 9 可以看出,2 台样机各 3 次测试得到的全部测试点的皮尔森系数高达 1.000 0,一方面证明样机本身具有很高的线性度,另一方面证明了样机之间具有很好的重复性。同时,全部测试点的线性拟合斜率达到

0.998 1,反映了测得电流值对电流真实值的逼近程度较高;而线性拟合标准差低至0.001 0,远低于标定前的一个数量级以上,反映了微系统精度的显著提升。经计算,在0~8 A测量范围内,微系统的最大相对误差为1.50%,相比于标定前降低了5倍以上,达到国标GB-14287.2-2014规定的0.5级精度标准^[21],该等级的装置可满足多数安全用电场景的报警、预警需求。

在实验过程中对微系统的功耗和无线通信质量进行了实测。数据表明,微系统样机的平均功耗低至720 μ W,在CR2477纽扣锂电池供电下的理论续航周期超过150 d。微系统的无线通信距离为50 m,可与区域无线网关实现测试数据及控制指令的有效收发。

在长期稳定性方面,给定被测电流约2 A,记录设备安装后第1、2、3 d和第46、47、48 d的测量值和真实值,如表2所示。从表2可以看出,在48 d时间范围内,设备相对误差在0.57%以内,远小于国标规定的1.50%,从而验证了研制的微系统具有较好的长期稳定性。

表2 样机的长期稳定性测试数据及误差

Table 2 Prototypes long-time stability test data and error

安装天数	电流真实值/mA	电流测得值/mA	相对误差/%
1	2 128	2 126	0.09
2	2 135	2 138	0.14
3	2 157	2 162	0.23
46	2 113	2 111	0.09
47	2 091	2 084	0.33
48	2 097	2 085	0.57

在抗环境干扰方面,主要考虑实际使用环境中地磁场及邻近电缆的大电流对微系统中TMR传感器的干扰。对于地磁场方面,实验表明在微系统处于不同姿态和角度时,输出无明显变化。对于临近电缆的电流干扰,引入干扰实验:在与样机TMR传感器轴线距离不同的位置引入500 mA和8 A两种干扰电流,并测量微系统的输出信号,结果如图10所示。实验表明,邻近的较大电流会对设备造成一定的干扰影响,干扰随线间距的拉大而减小,当线间距离超过7 cm后,此干扰即可以忽略。

4 结 论

本文提出一种仅使用单片、单轴TMR磁传感器实现无磁芯结构电流监测微系统的设计方法,阐述了测量的基本原理,指出了准确的磁场测量和可靠的传递函数是装置实现的关键点。通过设计带有多点限位结构和磁屏

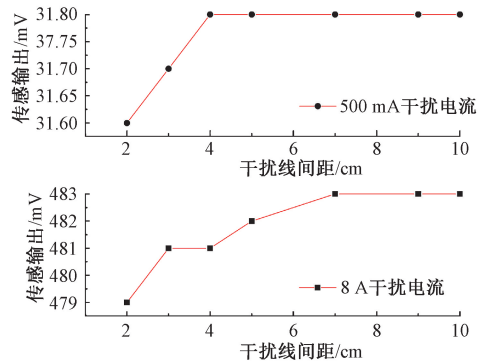


图10 邻近干扰电流对微系统输出信号的影响

Fig. 10 Adjacent disturbing current effect on the prototype

蔽涂层的可拆卸封装、高集成度的微系统硬件电路、简便有效的测量标定算法,实现了符合国标0.5级精度标准的工频市电电流非侵入测量,在0~8 A范围内的最大相对误差为1.5%,具有良好的线性度和设备间重复性,避免了繁冗的磁芯结构或多片、多轴磁传感器的使用,显著降低了装置成本,并具有结构紧凑、安装简易、标定方便、自主供电、长期续航的优势,具有较好的长期稳定性和抗邻近干扰能力,可与远端上位机无线交互,实现数据上传和指令下发,可便捷、批量地应用在城乡居民安全用电等场景,具有较好的实用前景和工程借鉴意义。

未来工作中将进一步降低微系统功耗和体积,并针对更多电缆规格和标准设计不同尺寸的限位机构以形成系列化微系统封装,便于在更多场景安装使用。

参考文献

- [1] 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. High Voltage Engineering. 2019, 45(2): 349-367.
- [2] ZHU K, PONG P W. Performance study on commercial magnetic sensors for measuring current of unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019(4): 2178-2180.
- [3] NIBIR S J, HURWITZ E, KARAM M, et al. A technique to enhance the frequency bandwidth of contactless agneto-resistive current sensors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(9): 5682-5686.
- [4] 郭凤仪,李川,王智勇,等. 三相串联故障电弧中故障相数的识别[J]. 电子测量与仪器学报, 2018,

- 32 (12): 185-190.
- GUO F Y, LI CH, WANG ZH Y, et al. Identification of number of fault phases in three-phase series fault arc. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32 (12): 185-190.
- [5] 鲍光海, 江润. 基于磁通不对称分布的串联电弧故障检测研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40 (3): 54-61.
- BAO G H, JIANG R. Research on series arc fault detection based on asymmetrical distribution of magnetic flux [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40 (3): 54-61.
- [6] 黄海宏, 颜碧琛, 赵常威, 等. 氧化锌避雷器泄漏电流检测的优化 FFT 分析 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33 (4): 87-93.
- HUANG H H, YAN B CH, ZHAO CH W, et al. Optimized FFT analysis for leakage current detection of zinc oxide arrester [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33 (4): 87-93.
- [7] 李鹏, 袁智勇, 田兵, 等. 基于隧道磁电阻的微型电流测量技术 [J]. *南方电网技术*, 2019, 13 (4): 2-17.
- LI P, YUAN ZH Y, TIAN B, et al. Micro current measurement technology based on tunnel magnetoresistance [J]. *Southern Power System Technology*, 2019, 13 (4): 2-17.
- [8] CHAN J Y, TSE N C, LAI L L. A coreless electric current sensor with circular conductor positioning calibration [J]. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 2013, 62 (11): 2922-2928.
- [9] OUYANG Y, HE J L, HU J, et al. Contactless current sensors based on magnetic tunnel junction for smart grid applications [J]. *IEEE Transactions on magnetics*, 2015, 51 (11): 4004904.
- [10] 张俊, 彭伟, 涂景怀, 等. 非侵入式双芯线电流传感器的研制 [J]. *中国测试*, 2018, 44 (5): 71-76.
- ZHANG J, PENG W, TU J H, et al. Development of nonintrusive current sensor for two-wire power cords [J]. *China Measurement and Test*, 2018, 44 (5): 71-76.
- [11] ZHANG H Q, LI F F, GUO H, et al. Current measurement with 3-D coreless TMR sensor array for inclined conductor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19 (16): 6684-6690.
- [12] 张蓬鹤, 李求洋, 张卫欣, 等. 隧道磁阻电流传感器的设计研究 [J]. *仪表技术与传感器*, 2019(12): 23-26, 86.
- ZHANG P H, LI Q Y, ZHANG W X, et al. Study on design of tunneling magnetoresistance current sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019 (12): 23-26, 86.
- [13] OUYANG Y, WANG ZH X, ZHAO G, et al. Current sensors based on GMR effect for smart grid applications [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019(294): 8-16.
- [14] TROESTER N, BEILHARZ D, ROTH J. A novel algorithm for position estimation in coreless current measurement applications [C]. *18th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2016: 1-9.
- [15] 宋宪, 张勇军, 宁贝飞, 等. 基于二步法的多芯电缆非侵入式电流测量校正方法 [J]. *工程科学学报*, 2017, 39 (12): 1898-1906.
- SONG X, ZHANG Y J, NING B F, et al. Calibration method for the noninvasive current measurement of multicore cables based on two-step estimation [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39 (12): 1898-1906.
- [16] 田兵, 李鹏, 袁智勇, 等. 基于磁电阻传感器的配电柜铜排电流测量方法 [J]. *南方电网技术*, 2019, 13 (7): 77-83.
- TIAN B, LI P, YUAN ZH Y, et al. Current measurement method of copper bar in distribution cabinet based on magnetoresistance sensor [J]. *Southern Power System Technology*, 2019, 13 (7): 77-83.
- [17] NIBIR S J, NIAKAN H, PARKHIDEH B. Characterization of magnetoresistors for contactless current sensing in power electronic applications [C]. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2017: 433-438.
- [18] XIANG Y K, CHEN K L, XU Q F, et al. A novel contactless current sensor for HVDC overhead transmission lines [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18 (11): 4725-4732.
- [19] 高俊, 王劲东, 仇福伟. 基于隧道磁阻传感器的车辆探测器研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 38 (8): 2039-2046.
- GAO J, WANG J D, QIU F W. Magnetic sensitive automobile detector based on TMR sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38 (8): 2039-2046.

- [20] HUANG J SH, JIANG ZH H. Power quality assessment of different load categories [J]. Energy Procedia, 2017 (141): 345-351.
- [21] 中国国家标准化管理委员会. GB 14287. 2-2014 电气火灾监控系统第2部分: 剩余电流式电气火灾监控探测器 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- China Standardization Administration. GB 14287. 2-2014 Electrical fire monitoring system-Part 2: Residual current electrical fire monitoring detectors [S]. Beijing: China Standard Press, 2014.

作者简介



鲁文帅, 分别在 2009 年和 2011 年于哈尔滨工业大学获学士和硕士学位, 2016 年于清华大学获得博士学位, 现为清华大学精密仪器系博士后, 主要研究方向为智能感知微系统, MEMS 传感器。

E-mail: luws@mail. tsinghua. edu. cn

Lu Wenshuai received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Harbin Institute of Technology in 2009 and 2011, and received his Ph. D. degree from Tsinghua University in 2016. He is currently a postdoctor at Tsinghua University. His main research interests include intelligent sensing microsystem and MEMS sensors.



尤睿, 2013 年于长春理工大学获学士学位, 2018 年于清华大学获博士学位, 现为北京大学微纳电子学系博士后、助理研究员, 主要研究方向为固态传感器、柔性传感器、微执行器、MEMS 加工。

E-mail: yourui19@pku. edu. cn

You Rui received his B. Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 2013, and received his Ph. D. degree from Tsinghua University in 2018. He is currently a postdoctor at Peking University. His research interests include solid sensors, flexible sensors, micro actuators, and MEMS processing.



周扬, 2011 年于北京科技大学获学士学位, 2015 年于清华大学获硕士学位。现于清华大学公共安全研究院攻读博士学位, 主要研究方向城市安全事故精准检测与定位。

E-mail: zhou-y15@mails. tsinghua. edu. cn

Zhou Yang received his B. Sc. degree from Beijing University of Science and Technology in 2011, and received his M. Sc. degree from Tsinghua University in 2015. He is currently pursuing his Ph. D. degree in the Institute for Public Safety Research at Tsinghua University. His research interests include the accurate detection and location of urban safety accidents.



袁宏永, 1986 年于中南工业大学获学士学位, 1991 年于合肥工业大学获硕士学位, 1994 年于武汉测绘科技大学获博士学位。现为中国科技大学火灾科学国家重点实验室任副主任、清华大学工程物理系教授, 主要研究方向为公共安全监测。

E-mail: hy-yuan@tsinghua. edu. cn

Yuan Hongyong received his B. Sc. degree from Central South University of Technology in 1986, received his M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1991, and received his Ph. D. degree from Wuhan University of Surveying and Mapping technology in 1994. He is currently a deputy director in the State Key Laboratory of Fire Science at University of Science and Technology of China. He is also a professor in the Engineering Physics Department at Tsinghua University. His main research interest is public safety monitoring.



尤政(通信作者), 分别在 1985 年、1987 年和 1990 年于华中科技大学获得学士、硕士和博士学位, 现为中国工程院院士, 清华大学精密仪器系教授、博士生导师, 主要研究方向为 MEMS 与传感器。

E-mail: yz-dpi@mail. tsinghua. edu. cn

You Zheng (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Huazhong University of Science and Technology University in 1985, 1987 and 1990, respectively. He is currently an academician of the China Engineering Academy, and also a professor at Tsinghua University. His main research interests include MEMS and sensors.