第 49 卷 第 5 期：1779-1794 高电压技术 Vol.49, No.5: 1779-1794
2023 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221532

基于磁场传感器阵列的电流测量方法研究进展

胡 军[1,2]，马浩宇[1,2]，李 鹏[2,3]，田 兵[2,3]，刘 仲[2,3]，吕前程[2,3]
（1. 清华大学电机系及新型电力系统运行与控制全国重点实验室，北京 100084;
2. 清华大学(电机系)–南方电网数字电网研究院智能传感与透明电网联合研究中心，北京 100084;
3. 南方电网数字电网研究院，广州 510663）

摘 要：在电力系统的电流测量领域，磁传感器阵列具有非接触性、体积小、线性度高、抗干扰能力强、温漂小、频带宽以及成本低等优势。该文对磁传感器阵列技术在电力系统电流测量领域的研究进行了综述，介绍了不同被测对象所对应的磁传感器阵列方案，总结归纳了圆形阵列、矩形阵列等常见的磁场传感器阵列方案的研究进展，分析了偏心、串扰与倾斜等磁传感器阵列方案常见的误差来源。已有研究表明，磁场传感器阵列技术在电力系统的电流测量领域具有成本低、精度高、宽范围、宽频带、采用非接触式设计等优势，未来将在智能电网中获得更广泛的应用。

关键词：电流测量；磁场传感器；传感器阵列；圆形阵列；偏心；串扰；智能电网

Research Progress of Current Measurement Method Based on Magnetic Sensor Array

HU Jun[1,2], MA Haoyu[1,2], LI Peng[2,3], TIAN Bing[2,3], LIU Zhong[2,3], LÜ Qiancheng[2,3]
(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University & State Key Lab of Operation and Control of New-generation Power System, Beijing 100084, China; 2. Tsinghua University (Department of Electrical Engineering) - China Southern Power Grid Digital Grid Research Institute Co., Ltd Joint Research Center for Smart Sensor and Transparent Grid, Beijing 100084, China;
3. China Southern Power Grid Digital Grid Research Institute, Guangzhou 510663, China)

Abstract: In the field of current measurement in power systems, magnetic sensor arrays have the advantages of non-contact, small size, high linearity, strong anti-interference ability, small temperature drift, wide frequency band, and low cost. In this paper, the research of magnetic sensor array technology in the field of current measurement in power systems is reviewed. Moreover, the magnetic sensor array schemes corresponding to different measured objects are introduced, the research progress of common magnetic sensor array schemes such as circular array and rectangular array is summarized, and the common error sources of magnetic sensor array schemes such as eccentricity, crosstalk, and tilt are analyzed. Existing studies have shown that magnetic sensor array technology has advantages in low cost, high accuracy, wide range, wide bandwidth, and non-contact design, and it will have a wider range of applications in smart grids in the future.

Key words: current measurement; magnetic field sensor; sensor array; circular array; eccentricity; crosstalk; smart grid

0 引言

能源互联网与智能电网的快速发展，对电力系统及其装备各状态量的监测提出了更高要求[1]。作为新型电力系统研究的重要课题，智能电网的基本理念是构建完善的数据采集、传输与监控网络，对电网及其装备的全景信息进行实时分析与存储，实现对电网系统及装备的智能化控制。为了完成智能电网对全景信息的采集要求，需要先进的传感与测量技术提供支撑[2]。如果能构建起覆盖整个新型电力系统的传感器网络，一方面可以实现电网的全局优化调度，另一方面能使得电网及装备状态监测更便捷准确，从而快速发现故障并找出故障原因[3]。

电流是电力系统中关键节点、负荷、电气装备等最为重要的状态参量之一。随着以高比例新能源和电力电子装备接入为主要特征的新型电力系统的发展，需要监测的各种电流信号呈现频带宽、量值范围广、数据量大、实时性要求高等特点[4]。电磁感应式电流互感器(TA)作为电力系统中最常用的交

基金资助项目：国家自然科学基金 (52125703)；南方电网数字电网研究院科技项目 (2100002020030103SJ01718)；四川省科技计划项目 (2021YFG0348)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52125703), Science and Technology Project of China Southern Power Grid Digital Grid Research Institute (2100002020030103SJ01718), Science and Technology Plan Project of Sichuan Province (2021YFG0348).

流电流测量仪器设备，难以测量直流和高频电流，且体积和重量大、需要和一次系统接线，已经无法满足新型电力系统诸多应用场景中电流监测的需求，尤其是一、二次深度融合的智能装备内部电流监测需求[5]。

基于欧姆定律的分流器可以有效地满足交直流电流的测量需求，目前仍被广泛应用于电力系统电流测量的多种场合[6-7]。然而，由于分流器要直接串联在电路中，导致其测量损耗大，电气绝缘成本高。另外，侵入式的电流测量手段也使其无法满足智能电网对电流监测装置的更高要求。

Rogowski 线圈能够较好地测量交流稳态电流和快速暂态电流，但在用于测量直流电流过程中，其模拟积分器的输出会不断漂移，从而出现误差[8]。另外，Rogowski 线圈的闭环结构使得其安装和拆卸都不方便，且为了实现高准确度而采用的高灵敏度 Rogowski 线圈的制作成本也较高，因此使其实际应用场景较为有限。

光纤电流传感器在电流测量领域有着显著的优点[9]：具有良好的绝缘性能；结构中不含聚磁铁芯，不会出现饱和、直流偏磁等问题；光纤传输的抗干扰能力强；使用过程中二次侧不会出现高电压，安全性好；体积与质量较小，适用于多种测量电流的场合。但是，光纤电流传感器目前造价高昂，动辄数十万乃至数百万，难以广泛应用[10]。

磁场传感器应用于电流测量的传统方法，是利用集磁环完成磁场汇聚，将磁场传感器放置于集磁环气隙处完成磁场的测量，然后进行电流反演[11-13]。基于集磁环的电流传感器虽然能够测得较准确的电流值，但存在体积大、安装和绝缘设计不易等困难。此外，若直接用于测量直流或者冲击大电流，还存在铁芯易饱和、直流偏磁等问题。为克服上述缺陷，有学者提出放弃集磁环，将多个磁场传感器沿着被测通电导体的闭合回路加以布置[14]，以模拟通电导体所产生磁场在闭合回路上的积分，进而依据安培环路定理求得被测电流。这种布置多个磁场传感器以测量电流的方式统称为磁场传感器阵列，一经提出就受到学术界的广泛关注。

已有研究表明磁场传感器阵列具有多项显著的优点：1）磁场传感器阵列放弃使用铁芯，规避了磁饱和与直流偏磁。2）每个磁场传感器的体积小，重量轻，可以灵活适用于多种传统电流互感器难以适用的应用场合。3）磁场传感器成本低，适用于构建智能电网中广域分布式的传感器网络。4）磁场传感器采用非接触式设计，带来了绝缘设计和安装运维的便利。然而，由于组成磁场传感器阵列的各个磁场传感器只能测量单个节点(位置)处的磁感应强度，故磁场传感器阵列只能对闭合回路积分进行估算，不可避免地会带来测量误差。此外，磁场传感器阵列因安装不当所造成的位置偏差，以及外电流引起的磁场干扰等，也会对磁场传感器测量电流的准确度造成影响。因此，不少学者就磁场传感器阵列的电流反演算法和磁场传感器阵列结构进行了一系列研究与优化，使得磁场传感器阵列测量电流的准确度和抗干扰能力均有明显提高，从而更好地适用于多种复杂场景的电流测量。

本文以磁场传感器阵列的结构优化与算法改进为重点，对磁场传感器阵列用于电流测量的研究现状进行归纳和总结，进而展望其发展与应用前景。

1 磁传感器阵列方案概述

1.1 磁传感器件概述

磁场传感器是一种能够将磁场大小与变化转换为电信号的装置。通过感应空间中的磁场强度，可以获取电流的各项参数。对于应用于电流测量领域的磁传感器阵列而言，考虑到传感器成本、频响、精度与体积等因素，主要使用的磁传感器可分为以下 4 种(见表 1)：霍尔(Hall)效应传感器、各向异性磁阻(anisotropic magnetoresistance，AMR)传感器、巨磁阻(giant magnetoresistance，GMR)传感器和隧穿磁阻(tunneling magnetoresistance，TMR)传感器。

基于霍尔效应的霍尔传感器是电流测量领域中最常见的磁场传感器之一，被广泛应用于自动控制、信号处理等低压电气和电子领域，具有成本低、线性范围大等优点[16]。但霍尔传感器也存在温度特性差、灵敏度低等显著缺点，使其在电力系统电流测量领域的应用受到限制[17]。

AMR、GMR 与 TMR 传感器统称为磁阻效应(magnetoresistance，MR)传感器，4 种磁传感器的对

表 1 不同类型的磁传感器对比[15]

Table 1 Comparison of different types of magnetic sensors[15]

名称	尺寸	典型灵敏度 $(mV/(V\cdot Oe)^{-1})$	线性范围/Oe
霍尔传感器	1 mm×1 mm	0.05	1~1000
AMR 传感器	1 mm×1 mm	1	0.001~10
GMR 传感器	2 mm×2 mm	3	0.1~30
TMR 传感器	0.5 mm×0.5 mm	20	0.001~200

比如表 1 所示。AMR 传感器具有体积小、线性度高与灵敏度高等优点，但由于其自身原理，需对其设计复杂的复位与补偿电路以确保其长时间稳定运行[18-19]。GMR 传感器的灵敏度更高，线性范围更大，但其工作模式为单极输出模式，且对环境温度较敏感，需要设计复杂的后端电路进行处理[20-21]。在 GMR 磁传感器的研究基础上，基于惠斯通电桥结构设计的 TMR 传感器展示出高灵敏度、高线性度、宽频带等优异性能[22-23]。

由于 MR 传感器具有成本低、体积小、重量轻与功耗低等优点，成为国内外学者与厂家的重点关注对象。目前的磁阻传感器件生产厂家包括美国 NVE 公司(GMR)和中国多维科技公司(TMR)等[24]。

1.2　磁传感器阵列方案概述

磁场传感器阵列技术在电流测量方面的应用最早可追溯到 20 世纪 90 年代，有学者将多个磁场传感器以圆形阵列形式安装在被测通电导体周围，形成了一种新的测量导线电流的技术方案[25]。

一种典型的磁传感器阵列的电流测量原理如图 1 所示，8 个单轴磁场传感器以带有电流 I_1 的被测导体为圆心，均匀分布在半径为 r 的圆上，传感器分别记作 S_1—S_8，其灵敏轴方向与其所处位置处圆的切线方向平行。根据毕奥萨伐尔定律，载流导体内流过的电流会在其周围空间产生磁场，磁传感器件将空间磁场的大小与变化转换为电信号并输出，结合磁场与电流的关系，从而得到被测导体的电流参数。

从使用的磁传感器种类来看，磁传感器阵列可分为 Hall 磁传感器阵列、AMR 磁传感器阵列、GMR 磁传感器阵列和 TMR 磁传感器阵列等。Hall 磁传感器阵列方案是早期本领域研究中的主流方案，近年来，随着 TMR 传感器性能的不断提高，TMR 磁传感器阵列方案逐渐成为主流。

从磁传感器阵列的结构来看，磁传感器阵列可分为圆形阵列、矩形阵列、直线阵列与差分阵列等。圆形阵列是最传统的磁场传感器阵列排列形式，由于圆形截面的导体电流在其周围圆形积分环路上产生的磁场变化梯度较小，因此圆形阵列能够获得优秀的测量精度与抗干扰能力。矩形阵列主要用于矩形截面载流母排的电流测量；差分阵列使用的磁传感器数量较少，适用于多导体电流的联合测量；直线阵列主要用于多导体电流参数的反演。

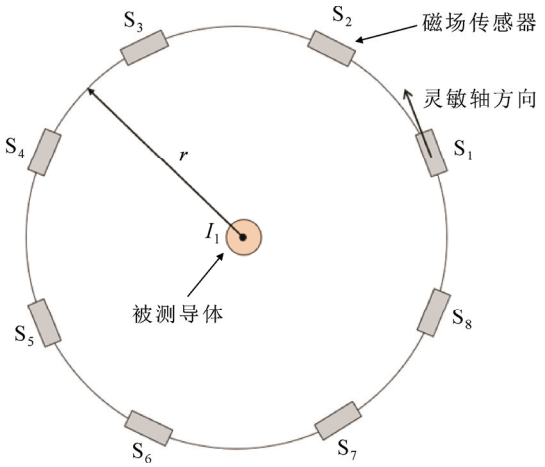


图 1　一种典型的磁传感器阵列：圆形阵列

Fig.1　A typical magnetic field sensor array: circular array

从测量电流的种类来看，磁传感器阵列可分为直流阵列、交流阵列与暂态阵列。目前的研究方向主要集中在对 10 kHz 以下交流电流与直流电流的测量领域，暂态电流测量的相关研究较少。

从被测对象的特点来看，磁传感器阵列多应用于单根导体、三相交流母排、多芯电缆等场合的电流测量与参数反演。其中针对单根导线电流测量的相关理论研究相当充分，也有学者在此基础上针对三相母排、多芯电缆等电力系统中常见的多导体电流测量对象进行了阵列结构的优化与电流反演算法的改进。

2　单根长直导线的电流测量

2.1　圆形 1 维磁传感器阵列的原理与误差

2.1.1　测量原理

在电力系统中，长直通电导线电流产生的磁场均可被视为准静态场，即满足安培环路定理。

$$\oint H \cdot \mathrm{d}l = \sum I \tag{1}$$

式中：H 为磁场强度；$\mathrm{d}l$ 为积分环路。

使用如图 1 所示圆形磁场传感器阵列测量长直通电导线产生的磁场，从式(1)出发，被测导线的电流通常使用式(2)进行计算。

$$I_1 = \frac{2\pi r}{N}\sum_{i=1}^{N} H_i \tag{2}$$

式中：I_1 为被测电流；H_i 为第 i 个磁场传感器测得的环路切向磁场强度；r 为圆形磁场传感器阵列的半径；N 为圆形阵列中磁场传感器的数量；以上各物理量均使用国际单位制。式(2)所对应的电流反演算法也被称为圆形磁场传感器阵列的平均值算法，

由于其具有算法简洁、实时性好、准确度较高、硬件易实现等诸多优点，受到广泛的关注与研究。

2.1.2 误差来源

对于基于平均值算法的的圆形 1 维磁传感器阵列，其电流反演误差的主要来源可分为以下几类：

1）被测载流导线偏离圆形阵列的中心，此时圆形阵列上各传感器处的磁场分布出现变化，由于圆形阵列使用的传感器数量有限，其不能模拟 1 个完整的积分环路，故此时的电流反演结果会出现误差。这种情况所引起的阵列电流反演误差简称为偏心误差，偏心误差的大小主要受到被测导体偏移圆心的距离和其偏移方向的影响。

2）被测载流导线不仅可能偏移圆形阵列的中心，其还可能发生倾斜，导致被测载流导线与圆形阵列所在平面不再保持垂直。这种情况所引起的圆形阵列电流反演误差简称为倾斜误差。倾斜误差的大小主要受到被测导线的倾斜角度、倾斜方向以及偏心情况的影响。

3）由于电力系统的实际情况较为复杂，圆形磁传感器阵列在测量电流时，往往会受到外界电流所产生的空间磁场干扰。最主要的外界干扰磁场通常由阵列周围的平行导线所产生，学术界将其称之为串扰，串扰导线中通过的电流记作串扰电流，串扰电流所引起的阵列电流反演误差记作串扰误差。串扰误差大小主要受串扰电流大小、串扰导线与阵列之间的位置关系影响。

2.2 圆形阵列偏心误差的分析与改善

2.2.1 偏心误差分析

A. Itzke 和 R. Weiss 等人以傅里叶级数分解方法给出偏心情况下圆形阵列电流测量的误差公式。如图 2 所示由 m 个磁传感器构成的阵列，假设被测导体沿 x 轴方向发生位置偏移，偏心距离记作 D_1，任一磁传感器 S_i 与圆心连线和 x 轴之间的夹角记作 α_i，S_i 与偏移后的被测导体中心连线和 x 轴之间的夹角记作 θ_i。当偏心距离 D_1 小于阵列半径 r 时，角 θ_i 可通过式(3)[26]进行计算。

$$\theta_i = \alpha_i + \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{1}{m}\left(\frac{D_1}{r}\right)^m \cos(m\alpha_i) \tag{3}$$

对于任一磁传感器 S_i，其所处位置的空间磁势 Ψ_i 如式(4)所示。

$$\Psi_i = -\frac{I_1\theta(\alpha_i)}{2\pi} \tag{4}$$

因此该位置处的切向磁场 H_i 可通过式(5)进行计算。

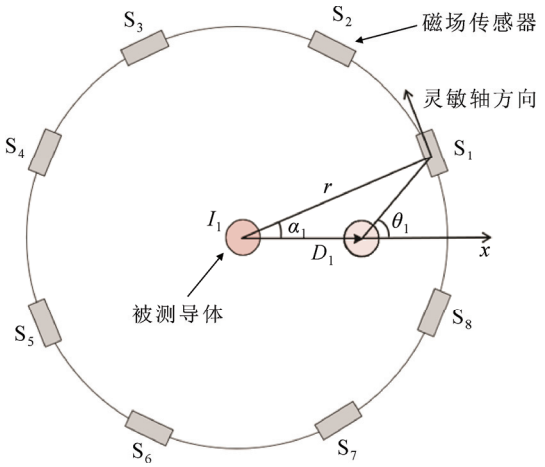


图 2 偏心情况下的圆形磁传感器阵列[26]

Fig.2 Circular magnetic sensor array with eccentricity[26]

$$H_i = -\frac{1}{r}\cdot\frac{\Psi_i}{\mathrm{d}\alpha} = \frac{I_1}{2\pi r}\left(1+\sum_{m=1}^{+\infty}\frac{1}{m}\left(\frac{D_1}{r}\right)^m \cos(m\alpha_1)\right) \tag{5}$$

基于式(2)，将各传感器的磁场测量值相加，得到电流的反演值如式(6)所示。

$$I_{1\mathrm{cal}} = \frac{2\pi r}{N}\cdot\sum_{i=1}^{N} H_i = I_1 + I_1\cdot\sum_{k=1}^{+\infty}\left(\frac{D_1}{r}\right)^{kN}\cos(kN\alpha_1) \tag{6}$$

由此可得，偏心情况所引起的圆形阵列的电流测量相对误差 ε 如式(7)所示。

$$\varepsilon = \frac{I_{1\mathrm{cal}} - I_1}{I_1} = \sum_{k=1}^{+\infty}\left(\frac{D_1}{r}\right)^{kN}\cos(kN\alpha_1) \tag{7}$$

式中：$I_{1\mathrm{cal}}$ 为被测电流的计算值；ε 为被测电流计算值与真实值之间的相对误差；α_1 为磁传感器 S_1 与 x 轴关于磁场传感器阵列中心的夹角，记作偏心角；其他参数定义与前文相同。

为了验证式(7)，通过 Matlab 对不同传感器数量下，偏心距离与偏心角对圆形阵列的电流反演误差进行计算，得到结果如图 3 所示。为了更直观地观察偏心距离对电流反演误差的影响，定义偏心距离 D_1 与阵列半径 r 之比为偏心度，其在 0~1 范围内变化，表征被测导体偏心的程度。当偏心度为 0 时，被测导体位于阵列中央，不存在偏心情况。

令阵列偏心角 α_1 为 0，在不同的传感器数量 N 取值下，得到偏心度与电流反演误差之间的关系如图 3(a)所示。可以发现，随着偏心度的增加，圆形

阵列的电流反演误差急剧增加。且传感器数量 N 越大，同样偏心度下圆形阵列的反演误差越小。当偏心度达到 0.5 时，8 传感器阵列的电流反演误差为 0.4%，而 4 传感器阵列的电流反演误差可达 6.6%。因此，传感器数量 N 的取值对于偏心情况下圆形阵列的电流反演误差大小至关重要。

观察式(7)可得，当圆形阵列的偏心角 α_1 满足式(8)时，偏心引起的阵列电流反演误差为 0。分别取传感器数量 N 为 3、4、8，在不同偏心度下计算偏心角对阵列反演误差的影响，结果如图 3(b)所示。可以发现，得到的误差曲线与式(7)保持一致，偏心度会影响误差的幅值，而传感器数量 N 则会同时影响误差的周期与幅值，即偏心角 α_1 的最优取值与传感器数量 N 有关。

$$\alpha_1 \in M, M=\{(2i+1)\pi/2N \mid i \in \mathbf{Z}, 1 \le i \le N\} \quad (8)$$

2.2.2　基于圆形 2 维磁传感器阵列的偏心识别算法

当被测导线发生偏心时，磁传感器处的法向磁场不再为 0。因此，利用 2 维磁传感器可以实现对偏心情况下被测导线的定位与电流测量[27-28]。将 3 个 2 维磁场传感器做等边三角形放置，如图 4 所示。在不存在其他干扰磁场情况下，可以得出 S_1、S_2、S_3 处测得的磁场之比仅与其到被测电流导体的距离 R_1、R_2、R_3 有关。借助余弦定理与磁场强度之比，即可联立方程组求出 R_1、R_2、R_3 和角 θ_0 的量值，从而便可确定出被测电流导体的位置。

该方法可以很好地解决被测导线的偏心问题，但当存在其他误差来源对磁传感器的测量值产生干扰时，会大幅影响算法的定位与测量精度。

2.3　圆形阵列串扰误差的分析与改善

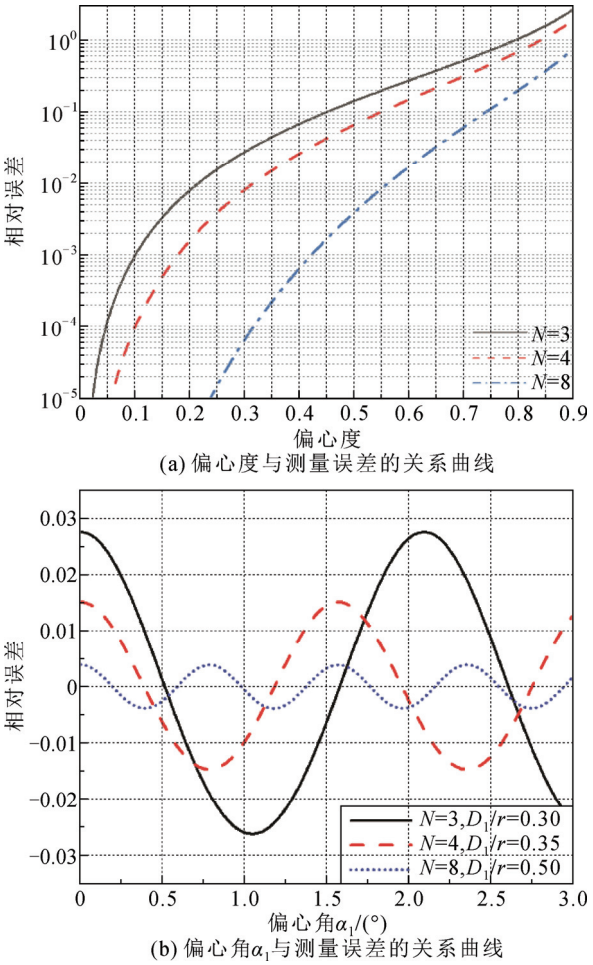
2.3.1　串扰误差分析

A. Itzke 和 R. Weiss 等人以傅里叶级数分解方法给出串扰情况下圆形阵列电流测量的误差公式。如图 5 所示，令载有串扰电流 I_2 的串扰导线位于 x 轴上，串扰距离记作 D_2，任一磁传感器 S_i 与串扰导线关于圆心连线的夹角记作 η_i，S_i 与干扰导体中心连线和 x 轴之间的夹角记作 γ_i，角 γ_i 可通过式(9)[29-30]进行计算。

$$\gamma_i = \arctan\left(\frac{r\sin\eta_i}{r\cos\eta_i - D_2}\right) \quad (9)$$

当串扰距离 D_2 大于阵列半径 r 时，γ_i 可以表示为

$$\gamma_i = \pi - \sum_{m=1}^{+\infty}\frac{1}{m}\left(\frac{r}{D_2}\right)^m \cos(m\eta_i)) \quad (10)$$



(a) 偏心度与测量误差的关系曲线

(b) 偏心角α_1与测量误差的关系曲线

图 3　偏心情况下的电流反演相对误差

Fig.3　Relative error of current inversion with eccentricity

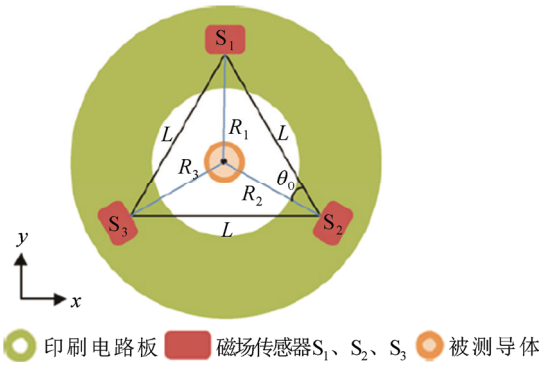


图 4　等边三角排列的 2 维磁传感器阵列[27]

Fig.4　Two-dimensional magnetic field sensor array arranged in an equilateral triangle[27]

因此，S_i 处的磁势 Ψ_i 可表示为

$$\Psi_i = \frac{I_1\eta_i}{2\pi} + \frac{I_2\gamma_i}{2\pi} \quad (11)$$

因此该位置处的切向磁场 H_i 可通过式(12)进行计算。

$$H_i=\frac{I_1}{2\pi r}-\frac{I_2}{2\pi r}\cdot\sum_{m=1}^{+\infty}\frac{1}{m}\left(\frac{r}{D_2}\right)^m\cos(m\eta_i)) \tag{12}$$

基于式(2)，将各传感器的磁场测量值相加，最终得到电流计算值与真实值之间的相对误差如式(13)所示。

$$\varepsilon=\frac{I_{1\mathrm{cal}}-I_1}{I_1}=-\frac{I_2}{I_1}\cdot\sum_{k=1}^{+\infty}\left(\frac{r}{D_2}\right)^{kN}\cos(kN\eta_1) \tag{13}$$

式中：η_1为磁传感器 S_1与串扰导线的夹角，记作串扰角度；其他各项定义与前文相同。

为了验证式(13)，通过 Matlab 对不同传感器数量下，串扰电流大小、串扰距离与串扰角度对圆形阵列电流反演误差的影响进行计算，得到结果如图 6 所示。

取串扰角度 η_1为 0，阵列半径 r 为 100 mm，被测电流 I_1为 100 A，得到串扰电流距离对阵列的电流反演误差的影响如图 7(a)所示。可以发现，随着串扰距离的增加，圆形阵列的电流反演误差急剧降低。传感器数量 N 越大，同样串扰距离下圆形阵列的电流反演误差越小。当串扰距离为 200 mm，即为阵列半径的 2 倍时，假设串扰电流与被测电流大小相同，则有 8 传感器阵列的电流反演误差为 0.4%，而 4 传感器阵列的电流反演误差可达 6.6%，2 传感器阵列的电流反演误差更是高达 33%。因此，传感器数量 N 的取值对于串扰情况下圆形阵列的电流反演误差大小至关重要。

串扰电流的大小同样对阵列的电流反演误差有巨大影响。如图 6(a)所示，令传感器数量 N 为 8，在被测电流 I_1保持为 100 A 的情况下，分别取串扰电流大小为 50、100 与 200 A，可以看出串扰电流大小与阵列的反演误差呈线性关系，符合式(13)。

令阵列半径 r 与被测电流 I_1保持不变，得到串扰电流角度 η_1对阵列电流反演误差的影响如图 6(b)所示。可以发现，得到的误差曲线与式(13)保持一致，偏心距离与串扰电流大小只会影响曲线的幅值，而传感器数量 N 则会影响误差曲线的周期与幅值，其规律与偏心情况下的偏心角 α_1 的规律相同。同理可得，当串扰角度 η_1 满足式(14)时，串扰电流引起的阵列电流反演误差为 0。

$$\eta_1\in M, M=\{(2i+1)\pi/2N\,|\,i\in\mathbf{Z}, 1\le i\le N\} \tag{14}$$

2.3.2 基于静磁屏蔽的抗串扰方法

静磁屏蔽，是指采用高导磁材料如坡莫合金等制作屏蔽层去屏蔽干扰磁场，即防止静磁场或低频磁场(低于 100 kHz)进入被屏蔽范围[31-32]。对磁场传感器阵列施加静磁屏蔽，可以确保磁场传感器阵列的测量准确度不受外界干扰磁场的影响[33-34]。

经实验验证，屏蔽层能够有效地减少外界干扰磁场的影响，但对磁场传感器阵列采用静磁屏蔽防护措施存在如下几个问题：

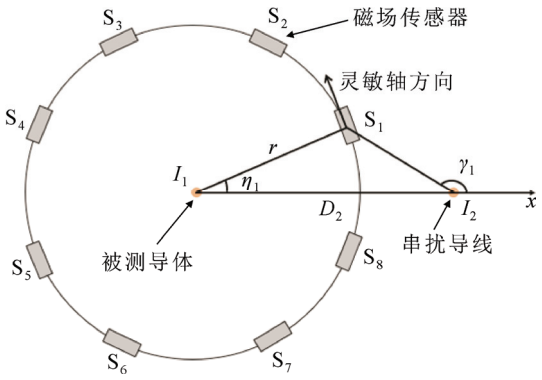


图 5 串扰情况下的圆形磁传感器阵列[29]

Fig.5 Error of current measurement in the case of crosstalk[29]

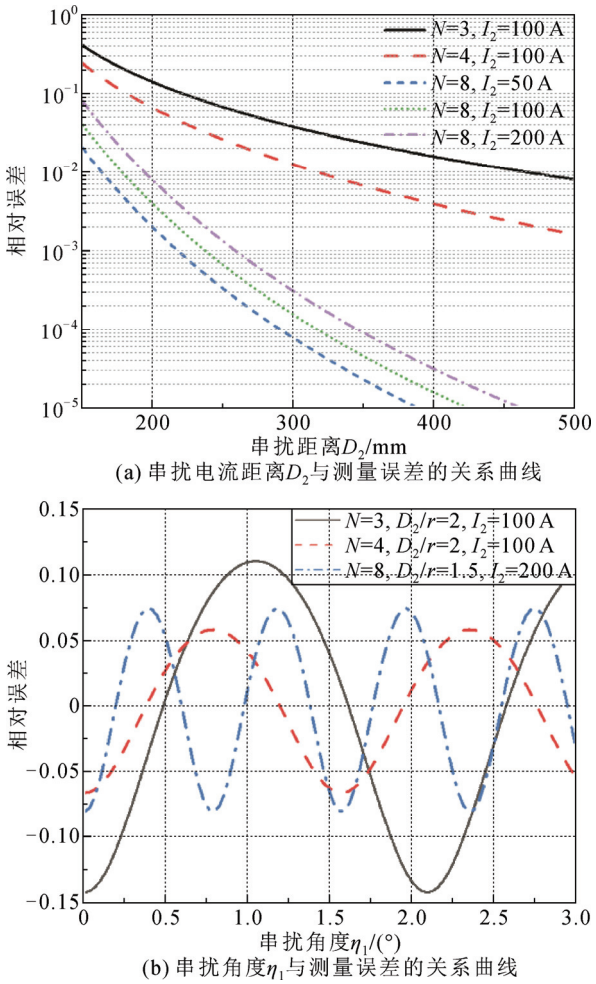


图 6 串扰情况下的电流反演误差

Fig.6 Current inversion error with crosstalk

1）屏蔽层安装不便，会大幅提高磁场传感器阵列的制造成本。

2）屏蔽层的屏蔽效果会随着应用场合的变化而改变，因此针对每一种测量情况，都需要重新优化屏蔽层的结构和参数，因此肯定会耗时耗力。

3）屏蔽层本身也会对内部磁场构成一定影响，无法确保内部磁力线与无屏蔽时相同。因此，也需要对屏蔽层的结构进行优化，但是该影响很难被彻底消除。

综上所述，静磁屏蔽虽然看似是一种一劳永逸解决串扰问题的方法，但其在实际应用过程中存在诸多问题，对于可以适用于各种场合的高效静磁屏蔽方案，仍需要进一步研究。

2.4　圆形阵列倾斜误差的分析与改善

2.4.1　倾斜误差分析

Hao Yu 和 Zheng Qian 等人对圆形磁场传感器阵列存在倾斜状况下的电流测量误差进行了理论分析与实验验证[35]。

图 7 中，设 e_1 为被测导体在 3 维坐标系中的单位矢量。则有 e_1 与 z 轴的夹角记作 θ，视为被测导体的倾斜角；e_1 在 xy 平面上的投影与 x 轴的夹角记作 β，视为被测导体的倾斜偏转角，阵列的半径为 R，其他参量定义与前文相同。当被测导体同时存在偏心与倾斜时，2 者引起的电流反演误差互相耦合，因此需要进行综合分析[36]。而串扰电流引起的阵列反演误差在平均值算法下与被测导体的偏心与倾斜情况无关，因此无需纳入考量。

为简化计算，令倾斜偏转角 β 与偏心角 α_1 保持一致，得到圆形磁场传感器阵列在受到被测导体倾斜与偏心的影响时的电流反演误差 ε 如式(15)所示。该误差会受到倾斜角、倾斜偏转角、偏心度、阵列传感器数量 N 等一系列参数影响。

$$\varepsilon=\frac{r}{N}\cdot\sum_{n=0}^{N-1}\left(\frac{\cos\theta(r-D_1\cos\alpha^{(n)})}{\cos^2\theta(r\cos\alpha^{(n)}-D_1)^2+r^2\sin^2\alpha^{(n)}}\right)-1 \tag{15}$$

其中　$\alpha^{(n)}=\dfrac{2\pi n}{N}-\beta$

首先对无偏心但存在倾斜情况下的圆形阵列电流反演误差进行研究。当偏心距离 D_1 为 0 时，圆形阵列只受到倾斜影响，ε 的计算式为

$$\varepsilon=\frac{1}{N}\cdot\sum_{n=0}^{N-1}\left(\frac{\cos\theta}{1-\cos^2(2\pi n/N-\beta)\sin^2\theta}\right)-1 \tag{16}$$

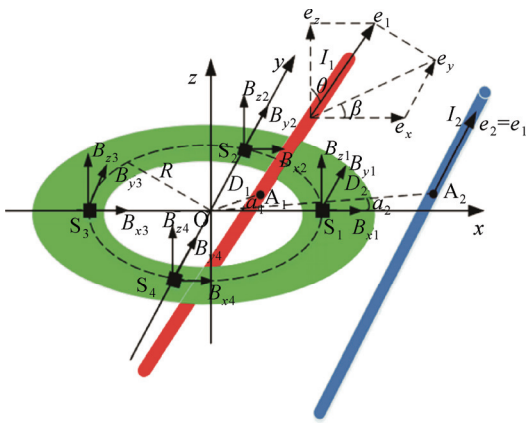


图 7　倾斜状态下的圆形磁场传感器阵列示意图[36]

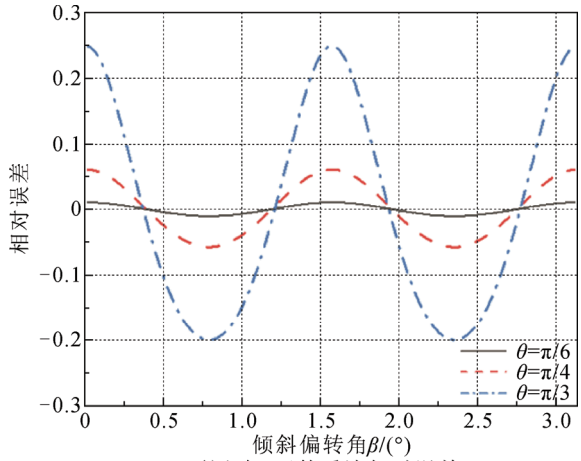
Fig.7　Schematic of circular magnetic sensor array in tilted case[36]

为验证式(16)，通过 Matlab 对不同传感器数量下，倾斜角 θ、倾斜偏转角 β 对电流反演误差的影响进行计算，结果如图 8 所示。倾斜角 θ 的增大会导致电流反演误差 ε 的显著提升，而倾斜偏转角 β 的变化则会令 ε 呈现出接近周期性的波动，波动周期受到传感器数量 N 的影响，与偏心情况下的偏心角 α_1 的规律类似。将阵列传感器数量 N 从 4 增加到 8，可以发现阵列的电流反演误差呈现出显著降低。

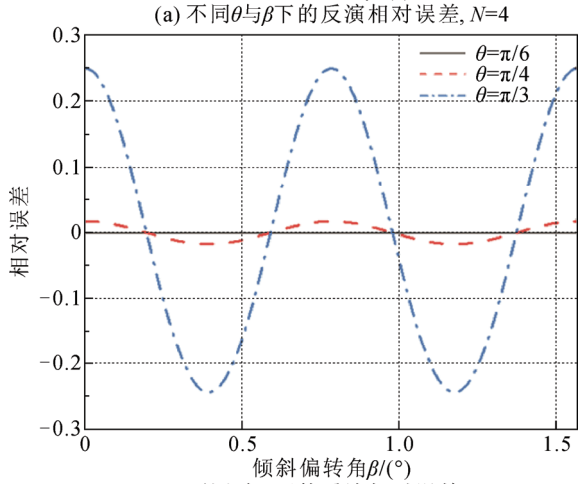
由此可得，通过采取手段控制倾斜角 θ 的增加，或增加圆形阵列的传感器数量 N，都可以有效降低被测导体倾斜所引起的电流反演误差。合适的倾斜偏转角取值同样可以带来电流反演误差的显著降低，但这在实际应用中不存在可操作性。

当阵列存在偏心时，取 N=8，阵列半径 r 为 50 mm，并令倾斜偏转角 β 与偏心角 α_1 均为 0，计算得到圆形磁场传感器阵列存在倾斜及偏心情况下的电流测量误差如图 9 所示。当 $-30°<\theta<30°$、$-15\ \text{mm}<D_1<15\ \text{mm}$，即偏心度不超过 0.3 时，电流测量误差不超过 0.23%。电流测量误差随倾斜角 θ 与阵列偏心度的增加会迅速增加，当圆形磁场传感器阵列未出现偏心时，因圆形磁场传感器阵列存在倾斜引起的电流测量误差与磁场传感器阵列半径 r 无关，且增长缓慢。当阵列的倾斜角与偏心度均为一个较大的数值时，阵列的电流反演误差则会快速增加。由此可得，应当尽量避免圆形阵列同时出现严重的倾斜与偏心情况。

值得注意的是：上述研究成果是在特殊情况下得出的，即偏心角 α_1 与倾斜偏转角 β 相同。如果分别对偏心角 α_1 与倾斜偏转角 β 取值，此时式(15)不



(a) 不同θ与β下的反演相对误差, N=4



(b) 不同θ与β下的反演相对误差, N=8

图 8 倾斜情况下的圆形阵列电流反演误差，无偏心

Fig.8 Circular array current inversion error in tilted case, no eccentricity

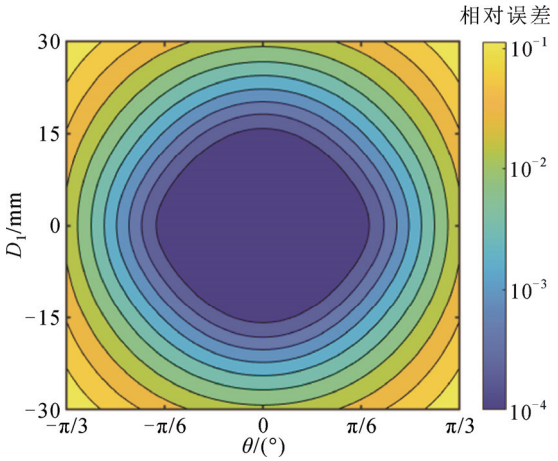


图 9 基于 D_1 及θ的阵列电流反演误差(N=8，r=50 mm)

Fig.9 The theoretical relative error depending on D_1 and θ, (N=8, r=50 mm)

成立。可以发现，无论是偏心角 α_1 还是倾斜偏转角 β，在其单独起作用时往往会引起电流反演误差的周期性波动。该波动的最大值通常出现在 α_1 与 β 取值为 0 的情况下。因此，图 9 所反映的阵列电流反演误差应为一种极端情况，当倾斜角 θ 与偏心度保持不变，而 α_1 与 β 发生变化时，阵列的电流反演误差会出现波动，但不会超出在 α_1 与 β 均为 0 情况下所得到的电流反演误差。

对于使用平均值算法的圆形 1 维磁场传感器阵列，偏心、串扰与倾斜是其面临的主要误差来源。根据已有研究成果，可以将偏心、串扰情况引起的电流测量误差以式(3)、式(5)的方式分离出来，令学者了解其内在规律。截止目前，还没有研究可以证明圆形磁场传感器阵列倾斜所引起的电流测量误差是独立的。但由图 8 可得，当不存在偏心时，倾斜下的圆形磁场传感器阵列的电流反演误差表现出了与倾斜及串扰情况类似的特性。也可通过与文献[26]类似的方法，或者离散傅里叶变换等手段得到更加简化的电流反演误差表达式。

2.4.2 基于圆形 3 维磁传感器阵列的导体定位算法

理想情况下，圆形磁场传感器阵列中各传感器处在法向与垂直阵列平面方向的磁场为 0，而偏心与倾斜所引起的阵列位置变化会导致这 2 个方向的磁场变化。Huaiqing Zhang 和 Feifan Li 等人指出，利用 4 个可测量 3 维空间磁场的 TMR 传感器组成的圆形磁传感器阵列，即可识别被测导线的偏心与倾斜情况[37]。通过求解各磁场传感器处 z 轴磁场与 x、y 轴磁场的比值，即可得到被测电流导体的倾斜角度和倾斜方向。

当存在串扰等情况引起的外界干扰磁场时，该阵列的电流测量精度会大幅度降低。且三轴磁传感器的各轴间往往存在测量位置的偏差，从而降低阵列的电流测量精度。

3 矩形载流母排的电流测量

3.1 基于圆形阵列的直流矩形载流母排电流测量

在圆形磁传感器阵列的常见应用场合中，由于被测导体截面通常为圆形，或者阵列半径远大于被测导体的截面宽度，因此往往默认理想情况下阵列上的各传感器所测得的切向磁场大小相同。

直流矩形载流母排通常具有较大的截面积，且其截面宽度通常远远大于母排厚度，因此圆形阵列在测量过程中需要考虑被测导体形状变化所引起的空间磁场分布变化。

圆形阵列测量矩形载流母排的示意图如图 10 所示。设矩形截面的宽度为 b，通常情况下，矩形

母排厚度远小于其截面宽度，因此为简化计算，将矩形母排截面厚度记为 0。在矩形母排截面中取任意一点，假设通过该处的电流为 I_0，该点与阵列中心的距离为 D，与 2.2.1 节类似，圆形阵列测量该点电流的绝对误差如式(17)[38]所示。

$$\varepsilon = I_{0\mathrm{cal}} - I_0 = I_0 \cdot \sum_{k=1}^{+\infty} \left(\frac{D}{r}\right)^{kN} \cos(kN\alpha_1) \tag{17}$$

设 I_1 为通过整个矩形母排截面的电流，则有任意一点的电流密度为 I_1/b，根据式(18)所示，在整个矩形母排宽度上对式(17)中的误差 ε_d 进行积分。

$$\varepsilon_{\mathrm{d}} = I_{1\mathrm{cal}} - I_1 = \frac{I_0}{b} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \sum_{k=1}^{+\infty} \left(\frac{x}{r}\right)^{kN} \cos(kN\alpha_1)\mathrm{d}x \tag{18}$$

对积分结果进行简化，最终得到圆形阵列对宽度为 b，厚度忽略不计的直流矩形母排电流的相对反演误差如式(19)所示。

$$\varepsilon_{\mathrm{r}} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{\cos(kN\alpha_1)}{(kN+1)} \left(\frac{b}{2r}\right)^{kN} \left(1 + (-1)^{kN}\right) \tag{19}$$

不难看出，圆形阵列的传感器数量是影响电流反演误差的主要因素之一，当阵列传感器数量 N 为奇数时，其电流反演误差与传感器数量为 $2N$ 的圆形阵列几乎一致。这意味着奇数个传感器构成的圆形阵列更适合矩形载流母排的电流测量。除此之外，与偏心情况类似，误差 ε_r 同样受到传感器角度的影响，当其满足式(8)时，误差 ε_r 为 0。

圆形阵列具有结构简单，算法快速等优点。但在实际场合中，其并不适用于大截面的矩形载流母排测量，原因包括[39]：

1）支撑件尺寸较大，成本、体积与重量难以接受。

2）不同位置的传感器所测得的磁场差距较大，远端的磁场传感器测量信号的信噪比低，因为受到附近串扰电流的影响。

3）为了提高阵列的电流测量精度，需要使用大量的磁场传感器，提高了电路的复杂程度与成本。

4）缺少圆形阵列应用于交流矩形载流母排的理论研究，阵列的测量精度受到趋肤效应的影响。

3.2　基于矩形阵列的直流矩形载流母排电流测量

为了避免 3.1 节提出的圆形阵列在测量矩形载流母排时所面临的困难，文献[39]提出一种用于直流大电流测量的矩形排布的磁传感器阵列，可以有效缩小阵列尺寸，提高阵列的抗干扰性。如图 11 所示，磁场传感器均匀的布置在母排表面，其灵敏轴方向与所对应的母排截面的边平行。在阵列的 A、B、C、D 这 4 个顶点位置，布置灵敏轴垂直的 2 个磁场传感器，以提高阵列的测量精度。

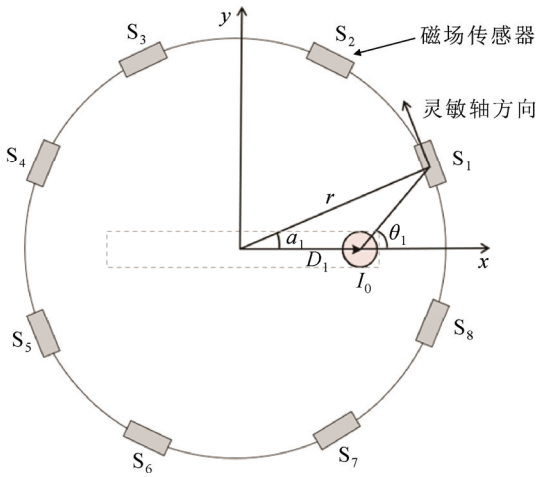


图 10　圆形阵列测量矩形母排示意图[38]

Fig.10　Schematic diagram of circular array measuring rectangular busbar[38]

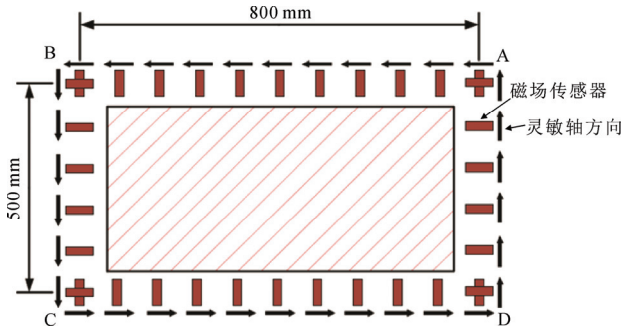


图 11　矩形磁传感器阵列示意图[39]

Fig.11　Schematic of rectangular magnetic sensor array[39]

矩形阵列在测量电流过程中面临新的问题：受到矩形母排截面形状的影响，沿着安培环路磁场变化剧烈，特别是在矩形环路的对角处，磁场数值变化不连续且不可导，这会引入很大的计算误差。因此文献[39]采取多段积分方法，将整个积分路径分为 4 段。

相比传统的圆形磁传感器阵列，矩形磁场传感器阵列所使用的传感器数量更多，但其所使用的积分电路大幅度减少了电流反演算法的计算量，并在实际测量中能够保持 0.5 级的测量准确度。

3.3　磁传感器阵列的频率补偿

矩形阵列可以较好地解决直流矩形载流母排的电流测量问题，但其在应用于交流矩形载流母排时表现出了较差的频率响应。由于趋肤效应的存在，交流电流频率越高，矩形母排中的电流越向表面集中，空间磁场分布变化越剧烈，从而使得矩形阵列

的测量结果出现偏差[40]。

为确保矩形阵列在交流矩形载流母排的电流测量场合中能保持较好的频率响应，Wenfan Li 等人对磁传感器处的磁场幅频曲线进行了仿真[41]，并设计了任意幅度滤波器以对阵列的平均频率响应曲线进行补偿，从而实现了宽带电流的测量。

除此之外，考虑到矩形阵列所使用的磁传感器数量较多，表贴式磁传感器方案受到学者们的关注。将 2 个磁传感器分别贴在母排上、下方表面，并使其在水平方向上位于母排中央[42-44]，如图 12(a)所示。当矩形母排载有直流电流时，母排中央处的空间磁场变化梯度较小，因此能够获得较精确的电流测量值。当测量交流电流时，为确保传感器的频率响应不受到影响，文献[44]提出 3 种新的解决方案：

1）改变磁传感器的放置位置，寻找磁传感器频率响应的最佳位置。

2）使用 2 个导电非铁磁板组成磁性滤波器，放置于 2 个磁传感器的上方，不改变直流母排的空间磁场分布，但是当母排通有交流电流时，则产生涡流改善空间磁场分布，如图 12 所示。

3）改进磁传感器的信号放大电路，实现对传感器频率响应的硬件补偿。

通过以上 3 种解决方案的组合，该测量方案在 10 kHz 内的电流测量灵敏度下降不到 1 dB，达到了商用流行电流传感器的水平。而传感器数量的大幅度减少，也使得该磁传感器阵列方案相比于圆形阵列及矩形阵列呈现显著的优越性。但是，该方案高度依赖于磁传感器位置的精确放置，且当受到外界串扰磁场等因素干扰时，该方案的电流测量精度会显著下降。

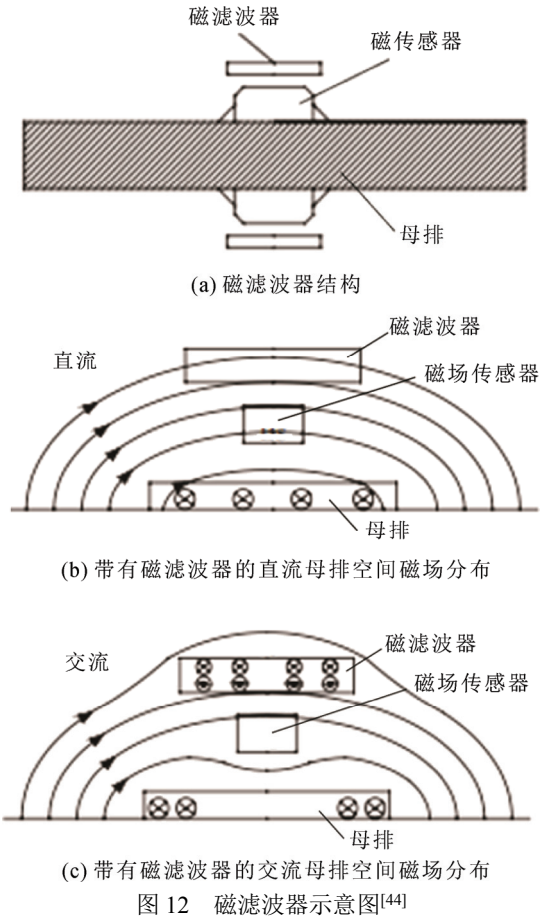


图 12 磁滤波器示意图[44]

Fig.12 Schematic diagram of a magnetic filter[44]

4 电力系统中的多导体电流测量

4.1 基于圆形阵列的三相母排电流测量

三相交流母排的电流测量是电流传感器的常见应用场景。如果使用圆形阵列对单相母排电流进行测量，其会收到其他两相母排电流的磁场干扰，即串扰。2.3 节详细分析了圆形阵列受到串扰时的电流反演误差，不难得出，若使用圆形阵列分别对三相母排电流进行测量，则需要对如下因素进行考量：①三相母排的排列方式；②三相母排间的距离；③三相母排的尺寸；④三相母排的不平衡电流与故障电流；⑤圆形阵列的半径与传感器数量；⑥圆形阵列的位置偏差与角度。

受到趋肤效应影响，三相交流母排的截面通常为圆形或者圆环形，圆形截面意味着圆形阵列在测量时无需考虑趋肤效应所引起的空间磁场不对称分布。常见的三相母排排列方式分为直线形排布与三角形排布。

Kun-Long Chen 等人对两种排布下的三相母排的电流测量进行了研究，测试了不同母排间距下，圆形阵列测量三相不平衡电流及故障电流的表现。每个圆形阵列由 4 个 1 维磁场传感器组成，阵列半径保持一致[45]。测试结果表明：基于圆形阵列的电流传感器的测量精度可达 1.0 级，测量量程高达 11 kA。由于不存在铁芯引起的饱和问题，其在故障电流测试中展现出比传统 TA 更加优越的性能，并满足了保护性 TA 的 5P30 测量精度等级要求。

4.2 基于差分结构的三相母排电流测量

圆形磁传感器阵列虽然在三相母排的电流测量中表现出较好的性能，但其使用的传感器数量较多，显著提高了装置成本。且传感器需要环绕被测母排放置，装置体积较大，安装不方便，需要考虑绝缘问题。为解决以上问题，Bernieri 等提出一种

由 3 个差分磁传感器对组成的磁传感器阵列[46-48]。如图 13 所示，直线形排布的三相母排分别载有电流 I_a、I_b、I_c，母排之间的距离为 d，差分磁传感器对与其对应的母排之间的距离分别为 r_1、r_2、I_a 对应的差分传感器对所测的磁场记作 H_{a1}、H_{a2}、I_b 对应的差分传感器对所测的磁场记作 H_{b1}、H_{b2}、I_c 对应的差分传感器对所测的磁场记作 H_{c1}、H_{c2}。由于磁传感器无需环绕或者紧挨着母排放置，其安装方式简单，绝缘成本更低。

差分磁传感器对由一对间距较小、测量方向相反的磁传感器组成。为最大程度获取母排电流产生的磁场，磁传感器的测量方向设置为与母排产生磁场平行。由安培环路定理可得，在差分磁传感器对间距保持不变的情况下，导体与传感器对的距离越远，其电流在差分磁传感器对处所产生的磁场强度之差会大幅度降低。因此，只要差分磁传感器对与被测导体之间的距离相比于其他载有串扰电流的导体足够近，串扰电流产生的干扰磁场就会受到有效抑制。以 I_a 为例，其电流反演式如式(20)所示。

$$I_a = \frac{2\pi r_1 r_2}{r_2 - r_1}(H_{a1} + H_{a2}) \tag{20}$$

除此之外，差分磁传感器对在直流电流的测量中拥有显著优势，对于地磁场等空间中存在的匀强磁场干扰，方向相反的 2 个磁传感器的测量值会将其相互抵消，从而避免了地磁场等空间中匀强磁场对直流电流测量的干扰。

由差分磁传感器对组成的阵列结构的测量精度主要受以下因素影响：①磁传感器测量角度的偏差；②磁传感器位置的不确定性；③r_1 与 r_2 的取值；④三相母排的间距及电流不平衡程度。

文献[46]仿真结果表明：由于所用到的磁传感器数量较少，磁传感器角度与位置的变化会引起较大的电流测量误差，需要通过外部手段来固定磁传感器的位置与角度。对于 r_1 的取值，r_1 越小，磁传感器所测得的被测电流的磁场值越大，磁传感器的抗干扰能力越强。但 r_1 的减小会显著降低阵列的量程，因此 r_1 的取值需综合考量。而 r_2–r_1 值越小，磁传感器对的抗串扰能力越强，但考虑到磁传感器的噪声与分辨率问题，r_2–r_1 的取值不宜太低。

当母排间距离较近，三相电流出现不平衡时，差分磁传感器阵列的测量精度会显著降低。为解决该问题，可在 I_b 所对应的差分磁传感器对的上方增加了 1 个圆弧状的磁屏蔽壳[49]，从而有效改善空间中的磁场分布，提高差分磁传感器对的电流测量精度。

三相架空线路的电流测量也是电力系统中常见的电流测量场景。由于架空线路尺寸较大，且间距较远，与三相载流母排较为相似，因此同样可采用上述方法实现电流测量。

4.3　基于圆形差分阵列的多芯电缆电流反演

Itzke 等人研究了差分圆形阵列对多芯电缆系统的测量效果，并使用了基于最小二乘方法的电流反演算法[50]。如图 14 所示，三角形排布的三相母排位于阵列中心，分别载有电流 I_a、I_b、I_c。半径分别为 R_i、R_m、R_o 的 3 组圆形阵列通过组合，即可得到多组具有不同半径与差分间距的差分圆形阵列。

半径 R_i 的磁传感器阵列的磁场测量值所组成的向量 $\boldsymbol{H}_i$ 与三相电流 I_a、I_b、I_c 组成的向量 $\boldsymbol{I}$ 之间的关系可用一个固定的系数矩阵 $\boldsymbol{A}_i$ 表示，如式(21)所示。

$$\boldsymbol{H}_i = \boldsymbol{A}_i \cdot \boldsymbol{I} \tag{21}$$

同理，将半径 R_m 的磁传感器阵列的磁场测量值组成的向量记作 $\boldsymbol{H}_m$，其对应的系数矩阵记作 $\boldsymbol{A}_m$。

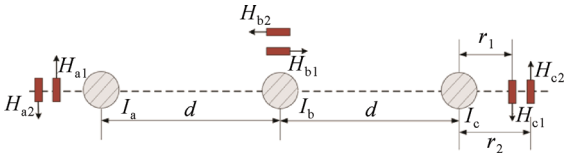


图 13　用于三相母排电流测量的差分磁场传感器结构[46]

Fig.13　Differential magnetic field sensor structure for three-phase busbar current measurement[46]

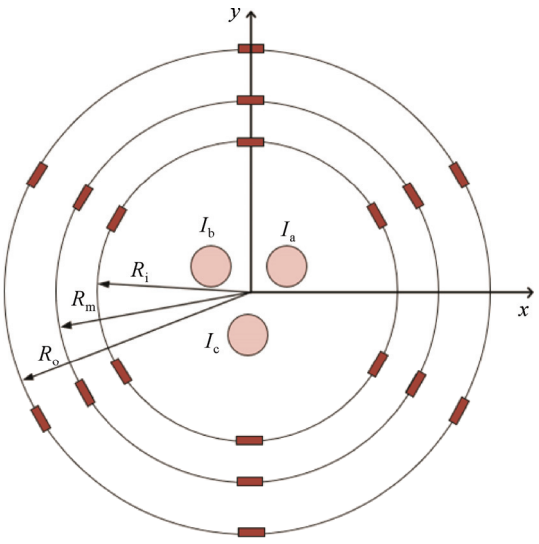


图 14　圆形差分磁传感器阵列[50]

Fig.14　Circular Differential Magnetic Sensor Array[50]

对于由半径为 R_i 与 R_m 的圆形阵列所组成的差分阵列，将同一角度的磁场传感器的测量值相减，则可得到式(11)。

$$\boldsymbol{H}_i - \boldsymbol{H}_m = (\boldsymbol{A}_i - \boldsymbol{A}_m) \times \boldsymbol{I} \tag{22}$$

通过求解式(22)的 Moore–Penrose 广义逆，即可得到阵列内部各导体电流值的最小二乘表示，如式(23)。当存在外部磁场干扰时，该算法表现出足够好的抗干扰能力。

$$\begin{aligned}\boldsymbol{I} = (((\boldsymbol{A}_i - \boldsymbol{A}_m)^{\mathrm{T}} \times (\boldsymbol{A}_i - \boldsymbol{A}_m))^{-1} \times \\ (\boldsymbol{A}_i - \boldsymbol{A}_m)^{\mathrm{T}}) \times (\boldsymbol{H}_i - \boldsymbol{H}_m)\end{aligned} \tag{23}$$

根据实验测量结果：存在串扰的情况下，差分圆形阵列的电流反演误差显著优于与其最小半径相同的圆形阵列；而当差分阵列的最小半径相同时，不同的差分间距并没有带来显著的反演误差变化。由此可得，差分结构可以有效减小磁传感器阵列在串扰情况下的测量误差。

圆形差分阵列可以在被测导体位置参数已知的情况下通过计算得到传感器数量的相应系数，从而通过式(23)反演出导体电流。但是，多芯电缆的内部情况通常无法得知，其内部各导体的位置参数往往会和理论位置发生偏差，这使得系数矩阵难以获得，限制了广义逆算法的应用场合。

4.4 基于圆形阵列的多芯电缆电流参数的非线性优化

求解单芯电缆内部的导体位置以及该导体的电流，需要使用 3 个单轴传感器。为了避免二次方程固有特性导致的多解情况，往往需要使用更多的磁场传感器。

以图 15 所示的三芯电缆为例，由于被测工频交流电流具有幅值和相位，因此可以将其分别用复数表示，并得到每根载流导线对应 3 个待求解量，即导线坐标和电流大小。因此，对于典型的三芯电缆，磁传感器阵列的传感器数量应不少于 9 个，以实现对三相电流大小和位置参数的求解。Lichan Meng 和 Pengfei Gao 等对利用电缆表面的磁场传感器阵列进行多芯电缆电流测量方法进行了研究[51]。他们采用了由 10 个磁场传感器组成的阵列计算 9 个待求解量，并设定目标函数，采用启发式算法寻找最优解，使得目标函数取到最小值。

Xu Sun 等人使用有限元方法研究了电缆在不同状态下的磁场分布，确认了磁场传感器阵列的有效性[52]。通过人工免疫系统算法，使得目标函数的全局最优值更易被找到。在实验中，反演算法的计算结果与电缆的实际源参数高度匹配。

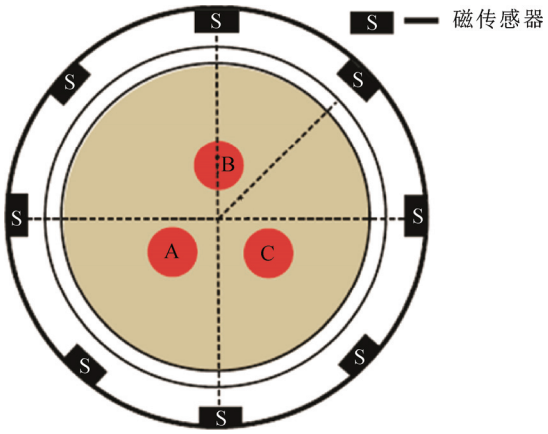


图 15 三相电缆电流测量模型[52]

Fig.15 Three-phase cable current measurement model[52]

Lichan Meng 等人使用差分进化算(differential evolution algorithm，DE)等一系列启发式算法进行迭代，以寻找最优解。仿真计算发现，DE 算法表现出优异性能，其在大部分情况下的电流反演误差不超过 2%。

Ke Zhu 等人同样就三芯电缆电流测量问题进行了研究[53]，采用思路类似的优化算法进行计算。并在变电站进行的实验中，通过在磁场传感器阵列外加装静磁屏蔽等一系列措施，使电流测量的平均误差不超过 2.6%，达到了较好的电流测量准确度。

在多芯电缆的电流测量领域，还有诸多学者通过各种非线性优化算法进行电流参数的反演，在此不再一一说明[54-56]。

上述研究成果表明了圆形磁传感器阵列在三芯电缆电流测量方面的应用潜力，但其面临的主要问题在于上述方法无一例外使用了以启发式算法为主的各种非线性优化方法对电缆参数进行反演。这种优化方法计算量大、耗时长，难以满足三芯电缆实时电流监测需求，限制了其实际应用价值。针对三芯电缆电流参数的反演问题，尚需寻求一种更为简洁高效，且易于实现的优化反演算法。

4.5 基于直线形阵列的多导体电流参数的非线性优化

由于空间有限且安装不便，圆形磁场传感器阵列在某些场合无法得到应用，且对于多根通电导线的电流参数反演，圆形磁场传感器阵列往往无法满足要求。文献[57]提出一种基于直线形磁场传感器阵列的参数线电流重构方法，适用于所有源参数未知情况下的多导线电流参数反演，如图 16 所示。

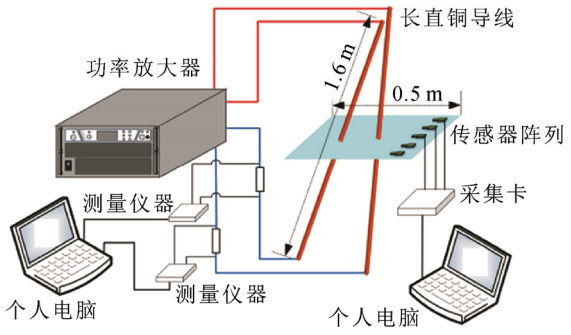


图 16　基于直线形阵列的多导线电流参数测量平台[57]

Fig.16　Experimental platform for multi-conductor current parameter measurement based on linear array[57]

在各导线电流参数均未知的情况下，Gen Zhao 等人设计了相应的目标函数用于参数的非线性单目标优化[57-58]。通过结合多元元启发式算法与内点法的综合算法，可以较好地满足非线性优化的需求。其中，元启发式算法成功地避免了解决方案陷入局部最优状态的问题；而内点法则提高了解决方案在局部域内的准确性。

该方案适用于任意情况下的电流参数反演，但其电流反演准确度会受到磁场传感器数量、传感器间距等因素的影响。通过计算，用于单个电流重构的最佳磁场传感器数量为 7~10 个，而用于 2 个电流重构的磁场传感器数量的最佳范围为 10~15。由此可得，直线型磁场传感器阵列虽然在各种情况下都表现出较好的测量准确度，但这需要足够多的磁场传感器；且直线型磁场传感器阵列所使用的电流参数反演算法过于复杂，同样存在电流反演算法实时性较差的缺点。

5　磁传感器阵列方案总结

从基于平均值算法的圆形磁场传感器阵列出发，众多学者就磁场传感器阵列在导线电流测量领域中的应用，提出多种优化算法和磁场传感器阵列结构。

圆形 1 维磁传感器阵列适用于单根长直导线的电流测量。但是对于偏心、倾斜与串扰情况所引起的电流测量误差，需要增加磁传感器数量以提高阵列的抗干扰性。

圆形 2 维磁传感器阵列可以有效解决导线的偏心问题，所需的最低传感器数量仅为 3。圆形 3 维磁传感器阵列可有效解决导线倾斜问题，所需的最低传感器数量仅为 4。但当存在串扰等情况引起的外界干扰磁场时，上述阵列的电流测量精度会大幅度降低。且多轴磁传感器的各轴间往往存在测量位置的偏差，从而降低阵列的电流测量精度。

静磁屏蔽手段可有效降低串扰等外界干扰磁场对阵列的影响，但磁屏蔽壳不仅会增加阵列的安装成本与体积，也会对屏蔽壳内部的磁场分布产生影响。在不同应用场合下，必须进行专门的仿真设计，以确保良好的磁屏蔽效果及电流测量精度。

矩形阵列在直流矩形载流母排的电流测量中表现出优秀的测量精度。但其所使用的磁传感器数量较多，且为了解决阵列拐角处磁场变化梯度不连续的问题，需要进行分段积分处理，增加了阵列的安装成本。在交流矩形载流母排的电流测量中，必须考虑对阵列的输出进行补偿以确保其频率响应。

差分磁传感器对在矩形载流母排的电流测量中表现了显著的优势。其所需的传感器数量仅为 2，远远少于矩形阵列。但该结构的抗干扰能力较差，且同样需要各种频率补偿措施以保证其在交流电流测量过程中的频响。除此之外，由于传感器阵列结构为分布式，在实际场合中，如何确保每个传感器能够准确的布置到相应位置也是一个难题。

3 对差分磁传感器组成的磁传感器阵列结构适用于三相电流平衡情况下的三相交流母排电流测量，其所需传感器数量少，传感器的布置位置自由度高。但是，该结构易受三相不平衡电流与故障电流情况下的不平衡磁场影响，需要加装静磁屏蔽壳以提高抗干扰能力。

由 2 个圆形阵列组成的差分磁传感器阵列适用于多芯电缆的电流反演。其电流测量精度高，抗干扰能力强，但需要提前已知被测导体的位置参数，因此应用场合受限。

基于启发式算法的圆形阵列也可用于多芯电缆的电流参数反演，相比于直线型阵列，其可使用更少传感器获得相同的电流测量精度。但该阵列同样具有启发式电流反演算法复杂度高、实时性差的问题。且圆形阵列结构要求将传感器布置在被测电缆四周，安装成本高，在实际应用中更难实现。

直线形传感器阵列适用于多种场合下的多导体电流参数反演，如分裂导线、三相母排、多芯电缆等。其无需已知被测导线的位置参数，安装方便，抗干扰能力强。但该结构所需的磁传感器数量较多，且其使用的基于元启发式算法的电流反演算法过于复杂，实时性差，计算成本高。

6 结论

本文对磁场传感器阵列在电力系统电流测量领域的研究进行了综述，总结归纳了圆形阵列、矩形阵列、差分阵列与直线形阵列等磁传感器阵列在电力系统的常见电流测量场合的研究与应用进展，并对各种阵列结构与电流反演算法的优缺点进行了总结。综上所述，磁传感器阵列在电力系统电流测量的各个领域均表现出了巨大的应用潜力。综合已有的研究成果，磁传感器阵列的商用化仍需解决以下几个关键问题：

1）磁场传感器阵列所用磁场传感器件自身尺寸较小，但是后端处理模块仍然体积较大，亟需融合传感、采集、处理、控制、通信等功能，研制出具有更高集成度的芯片化磁场传感器件。

2）磁场传感器阵列在很多应用场景中需要采用启发式优化算法，算法实时性较差，难以满足实际监测应用要求，需要进一步借鉴各种新兴的技术手段，例如传感数据驱动的机器学习模型等人工智能方法，来提升电流反演算法性能。

3）磁场传感器阵列应用于一、二次深度融合的智能电气装备等场景中，布置阵列的空间位置更为受限、外部各种干扰更为复杂。传感器阵列结构及电流反演算法仍需进行更具针对性的优化研究，从而提高测量准确度，以及对各种不确定因素的鲁棒性。

总体而言，磁场传感器阵列技术在电流测量领域具有独特优势，多年来众多学者通过开展多视角、多层面的研究已经取得了显著的基础理论和关键技术进展，未来将在智能电气装备等各种智能电网应用场景中获得更为广泛的应用，为新型电力系统及装备安全可靠运行亟需的全景实时监测信息提供关键技术支撑。

参考文献 References

[1] 李栋华，耿世奇，郑 建. 能源互联网形势下的电力大数据发展趋势[J]. 现代电力，2015，32(5)：10-14.
LI Donghua, GENG Shiqi, ZHENG Jian. Development tendency of power big data in energy internet circumstances[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(5): 10-14.

[2] 张东霞，苗 新，刘丽平，等. 智能电网大数据技术发展研究[J]. 中国电机工程学报，2015，35(1)：2-12.
ZHANG Dongxia, MIAO Xin, LIU Liping, et al. Research on development strategy for smart grid big data[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 2-12.

[3] 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 Qing, SUN Shangpeng, SIMA Wenxia, et al. Progress of advanced voltage/current sensing techniques for smart grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 349-367.

[4] 周 峰，李 鹤，李文婷，等. 大电流测量传感技术综述[J]. 高电压技术，2021，47(6)：1905-1920.
ZHOU Feng, LI He, LI Wenting, et al. Review of high current measurement and sensing technology[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1905-1920.

[5] 金世鑫，李 华，戴晓宇. 电子式互感器的分类和原理综述[J]. 东北电力技术，2016，37(3)：29-31.
JIN Shixin, LI Hua, DAI Xiaoyu. Electronic transformers overview[J]. Northeast Electric Power Technology, 2016, 37(3): 29-31.

[6] KAWAMURA T, HAGINOMORI E, GODA Y, et al. Recent developments on high current measurement using current shunt[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2007, 2(5): 516-522.

[7] 李海峰，华永东，姜 燕，等. 基于多频点插值和三维曲面建模的MOA阻性电流测量方法[J]. 高电压技术，2019，45(11)：3512-3520.
LI Haifeng, HUA Yongdong, JIANG Yan, et al. New measurement method for moa resistive current based on multi-frequency points interpolation and three-dimensional surface modeling[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3512-3520.

[8] HEMMATI E, SHAHRTASH S M. Digital compensation of Rogowski coil's output voltage[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(1): 71-82.

[9] SAMIMI M H, AKMAL A A S, MOHSENI H. Optical current transducers and error sources in them: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(9): 4721-4728.

[10] CRUDEN A, RICHARDSON Z J, MCDONALD J R, et al. Compact 132 kV combined optical voltage and current measurement system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(1): 219-223.

[11] 胡 军，赵 帅，欧阳勇，等. 基于巨磁阻效应的高性能电流传感器及其在智能电网的量测应用[J]. 高电压技术，2017，43(7)：2278-2286.
HU Jun, ZHAO Shuai, OUYANG Yong, et al. High performance current sensors based on giant magnetoresistance effect and practical applications in smart grids[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2278-2286.

[12] 吴煜文，田翠华，吴 凡，等. 磁阀式电磁型电流互感器[J]. 高电压技术，2020，46(9)：3154-3163.
WU Yuwen, TIAN Cuihua, WU Fan, et al. Magnetic-valve-type electromagnetic current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3154-3163.

[13] OUYANG Y, HE J L, HU J, et al. A current sensor based on the giant magnetoresistance effect: design and potential smart grid applications[J]. Sensors, 2012, 12(11): 15520-15541.

[14] SCOVILLE J T, PETERSEN P I. A low-cost multiple Hall probe current transducer[J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 62(3): 755-760.

[15] GOODWIN G C, SIN K S. Adaptive filtering prediction and control[M]. Chelmsford, UK: Courier Corporation, 2014.

[16] 莫荣军. 磁感式电流传感器研究与设计[D]. 桂林：桂林电子科技大学，2012.
MO Rongjun. Study and design of the current transduser based on magnetic induction[D]. Guilin, China: Guilin University of Electronic Technology, 2012.

[17] 李富安. 闭环霍尔电流传感器的设计与测试[D]. 武汉：华中科技大学，2013.

LI Fu'an. Design and experiment of closed loop hall effect current sensor[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2013.

[18] WANG X H, HUANG Q, LU Y L, et al. Development and application of a portable 3-axis transient magnetic field measuring system based on AMR sensor[C]// IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA). Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2013: 1-9.

[19] MLEJNEK P, VOPÁLENSKÝ M, RIPKA P. AMR current measurement device[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 141(2): 649-653.

[20] BAIBICH M N, BROTO J M, FERT A, et al. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices[J]. Physical Review Letters, 1988, 61(21): 2472-2475.

[21] BINASCH G, GRÜNBERG P, SAURENBACH F, et al. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange[J]. Physical Review B, 1989, 39(7): 4828-4830.

[22] 胡　军，王　博，盛新富，等. 基于隧穿磁阻效应的宽频微小量程电流传感器设计及噪声分析[J]. 高电压技术，2020，46(7)：2545-2553.
HU Jun, WANG Bo, SHENG Xinfu, et al. Design and noise analysis of weak current sensor with broadband based on tunneling magnetoresistance effect[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2545-2553.

[23] 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.

[24] LENZ J, EDELSTEIN S. Magnetic sensors and their applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(3): 631-649.

[25] RIPKA P, KEJIK P, KASPAR P, et al. Precise DC current sensors[C]// Quality Measurement: The Indispensable Bridge between Theory and Reality (No Measurements? No Science! Joint Conference-1996: IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference and IMEKO Technical Committee. Brussels, Belgium: IEEE, 1996: 1479-1483.

[26] ITZKE A, WEISS R, WEIGEL R. Influence of the conductor position on a circular array of hall sensors for current measurement[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(1): 580-585.

[27] 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.

[28] LI X S, YOU J, SHU X Y, et al. Electric current measurement using AMR sensor array[C]//International Conference on Mechatronics and Automation. Changchun, China: IEEE, 2009: 4085-4089.

[29] WEISS R, MAKUCH R, ITZKE A, et al. Crosstalk in circular arrays of magnetic sensors for current measurement[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4903-4909.

[30] BAZZOCCHI R, DI RIENZO L. Interference rejection algorithm for current measurement using magnetic sensor arrays[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2000, 85(1/3): 38-41.

[31] REN S Y, GUO S W, LIU X J, et al. Shielding effectiveness of double-layer magnetic shield of current comparator under radial disturbing magnetic field[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(10): 9401907.

[32] WASSEF K, VARADAN V V, VARADAN V K. Magnetic field shielding concepts for power transmission lines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 34(3): 649-654.

[33] 陈亚锋. 基于 TMR 传感器的大电流测量技术研究[D]. 成都：电子科技大学，2019.
CHEN Yafeng. Research on TMR sensor based large current measurement technology[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology, 2019.

[34] KHAWAJA A H, HUANG Q, CHEN Y F. 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.

[35] YU H, QIAN Z, LIU H Y, et al. Circular array of magnetic sensors for current measurement: analysis for error caused by position of conductor[J]. Sensors, 2018, 18(2): 578-578.

[36] GUO C X, ZHANG H Q, GUO H, et al. Crosstalk analysis and current measurement correction in circular 3D magnetic sensors arrays[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(3): 3121-3133.

[37] 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.

[38] WEISS R, ITZKE A, WEIGEL R Current measurement of flat conductors with a circular array of magnetic sensors[C]// 2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM). Nuremburg, Germany: IEEE, 2017: 166-170.

[39] 国　旗. 基于磁传感器阵列的新型大电流传感器关键技术研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2017.
GUO Qi. Research of technology on high current transducer based on magnetic sensor array[D]. Hefei, China: University of Science and Technology of China, 2017.

[40] RIPKA P, CHIRTSOV A. Busbar current transducer with suppression of external fields and gradients[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 4002504.

[41] LI W F, ZHANG G G, ZHONG H J, et al. A wideband current transducer based on an array of magnetic field sensors for rectangular busbar current measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 9004511.

[42] XU X P, LIU T Z, ZHU M, et al. New small-volume high-precision TMR busbar DC current sensor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, 56(2): 4000105.

[43] XU X P, LIU T Z, ZHU M, et al. Nonintrusive installation of the TMR busbar DC current sensor[J]. Journal of Sensors, 2021: 8827131.

[44] BLAGOJEVIĆ M, JOVANOVIĆ U, JOVANOVIĆ I, et al. Realization and optimization of bus bar current transducers based on Hall effect sensors[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(6): 065102.

[45] CHEN K L, CHEN N M. A new method for power current measurement using a coreless hall effect current transformer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(1): 158-169

[46] BERNIERI A, FERRIGNO L, LARACCA M, et al. An AMR-based three-phase current sensor for smart grid applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(23): 7704-7712.

[47] FAN H Y, ZHANG Z Y, HUANG Q, et al. Adaptive positioning current measurement method for multi-conductor system based on linear magnetic sensor array[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 145: 108692.

[48] RIPKA P, GRIM V, CHIRTSOV A. A 3-phase current transducer based on microfluxgate sensors[J]. Measurement, 2019, 146: 133-138.

[49] CHEN Y F, HUANG Q, KHAWAJA A H. An interference-rejection strategy for measurement of small current under strong interference with magnetic sensor array[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(2): 692-700.

[50] ITZKE A, WEISS R, DILEO T, et al. The influence of interference sources on a magnetic field-based current sensor for multiconductor

measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(16): 6782-6787.
[51] MENG L C, GAO P F, 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.
[52] 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.
[53] 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.
[54] GENG G C, WANG J C, CHEN K L, et al. Contactless current measurement for enclosed multiconductor systems based on sensor array[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(10): 2627-2637.
[55] LIU X H, HE W, GUO P, et al. A coreless current probe for multicore cables[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(20): 19282-19292.
[56] LIU X H, HE W, GUO P, et al. Semi-contactless power measurement method for single-phase enclosed two-wire residential entrance lines[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 9508216.
[57] 赵 根. 复杂电磁环境中磁场源的参数反演理论及应用[D]. 北京：清华大学，2018.
ZHAO Gen. Parameter inversion theory and application of magnetic field sources in complex electromagnetic environment[D]. Beijing, China: Tsinghua University, 2018.
[58] ZHAO G, HU J, ZHAO S, et al. Current reconstruction of bundle conductors based on tunneling magnetoresistive sensors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11): 4004005.



胡 军(通信作者)
1976—，男，博士，教授，博导
主要从事智能传感器、电力系统过电压与绝缘配合、电介质材料等方面的研究工作
E-mail: hjun@tsinghua.edu.cn

HU Jun
Ph.D., Professor
Corresponding author



马浩宇
1999—，男，博士生
主要从事磁传感器阵列方面的研究工作
E-mail: mahy19@mails.tsinghua.edu.cn

MA Haoyu
Ph.D. candidate



李 鹏
1973—，男，博士，教授级高工
主要从事智能传感、透明电网、新能源与微电网等研发与管理工作
E-mail: lipeng@csg.cn

LI Peng
Ph.D., Professor



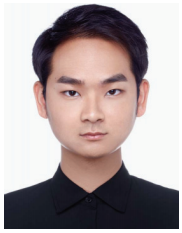
田 兵
1987—，男，博士，高工
主要从事智能传感、透明电网、新能源与微电网等研发工作
E-mail: tianbing@csg.cn

TIAN Bing
Ph.D.
Senior engineer



刘 仲
1991—，男，硕士
主要从事智能传感方面的研究工作
E-mail: liuzhong@csg.cn

LIU Zhong



吕前程
1996—，男，硕士
主要从事电流传感器方面的研究工作
E-mail: lvqc@csg.cn

LÜ Qiancheng

收稿日期 2022-09-15 修回日期 2022-12-09 编辑 卫李静