DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.7.358 **中图分类号**：TM933.14 **文献标志码**：A

计及趋肤效应扰动的配电母线高频电流隧道磁阻传感策略研究

王晟玮[1]，姜雨枫[2](中国电源学会学生会员)，王逸兮[1]，叶宇轩[1]，
杜银锋[2](中国电源学会学生会员)
(1.国网湖北省电力有限公司信息通信公司，武汉 430048；2.武汉大学电气与自动化学院，
武汉 430072)

摘要：随着新型电力系统分布式资源的广泛随机接入，对复杂工况下母线电流的精准测量带来了新的挑战。隧道磁阻TMR(tunnel magnetoresistance)传感器作为最新一代的磁阻传感器，集传统磁传感器灵敏度高、功耗低、体积小等优势于一体，在磁场检测、电流检测、磁存储器等方面有着广泛的应用。由于母线电流在高频时存在趋肤效应，电流集中在导体的“皮肤”部分，周围磁场呈现非线性特征并影响传感器的测量。基于隧道磁阻传感器的物理特性及趋肤效应扰动规律，提出一种围绕配电母线布置隧道磁阻芯片位置与数量的优化方法，并设计了相应的传感器结构，降低了母线趋肤效应及杂散磁场对传感器测量精度的影响。

关键词：高频电流；频率特性；趋肤效应；隧道磁阻

Research on High-frequency Current Tunnel Magnetic Resistance Sensing Strategy for Distribution Line Conductors Considering Skin Effect Disturbance

WANG Shengwei[1], JIANG Yufeng[2], *Student Member*, *CPSS*, WANG Yixi[1], YE Yuxuan[1],
DU Yinfeng[2], *Student Member*, *CPSS*
(1. Hubei Electric Power Information and Communication Company, Wuhan 430048, China; 2. School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With the widespread random access of distributed resources in the new power system, precise measurement of bus current under complex operating conditions has brought new challenges. Tunnel magnetoresistance (TMR) sensors, as the latest generation of magnetoresistance sensors, integrate the advantages of high sensitivity, low power consumption, and small size of traditional magnetic sensors. They have a wide range of applications in magnetic fields detection, current detection, magnetic memory and other fields. Due to the skin effect of bus current at high frequencies, the current is concentrated in the “skin” part of the conductor, and the surrounding magnetic field exhibits nonlinear characteristics that affect the measurement of the sensor. An optimization method for arranging the position and quantity of tunnel magnetoresistance chips around the distribution bus is proposed, based on the physical characteristics of tunnel reluctance sensors and the disturbance law of skin effect. The corresponding sensor structure is designed to reduce the influence of bus skin effect and stray magnetic field on sensor measurement accuracy.

Keywords: High-frequency current; frequency characteristic; skin effect; tunneling magnetoresistance (TMR)

收稿日期：2024-08-05；**修回日期**：2024-09-03，2024-10-14；
录用日期：2024-11-01；**网络首发日期**：2024-12-05
基金项目：湖北省自然科学基金资助项目(2024AFB745)；国网湖北信通公司科技资助项目(SGHBXTO0SJJS2310071)
This work is supported by Hubei Provincial Natural Science Foundation under the grant 2024AFB745; Hubei Electric Power Information and Communication Company Technology Project under the grant SGHBXTO0SJJS2310071

母线广泛应用于电力电子变换器，如光伏逆变

器、电机驱动逆变器、不间断电源和电网的高压高功率变换器[1-2]。传统含磁心的母线电流传感器不仅体积庞大且价格昂贵，该缺点在大电流传感应用中尤为突出。文献[3-8]提出了多种用于交直流电流测量的无磁心母线电流传感器设计，但由于母线中存在趋肤效应，当交流电流频率较高时，传感器的应用受到诸多限制[9]。无磁心母线电流传感器在高频下电流测量精度的优化方法还未得到充分研究。文献[10]提出了一种用于高频电流传感器的特殊结构母线，但对加工精度要求高，增加了成本，实用性有限。

常用的基于磁场效应的电流传感器技术有霍尔效应、磁通门、隧道磁阻 TMR(tunnel magnetoresistance)等[11-13]。隧道磁阻传感器因其高精度而受到越来越多的关注[14]。为在测量母线高频电流时获得更好的测量精度，部分文献已提出了一些设计方案。文献[9]提出了传感器所在母线孔的新型圆形几何形状，可将母线工作频率为 1 kHz 时传感器的测量误差从 15%降低至 9%；文献[10]使用不对称形状的传感器实现了在母线工作频率 1 kHz 范围内测量误差低于 3%。上述 2 种优化方案均采用 DRV425 磁传感器，其正常工作时磁场强度范围相对较低(<20 Gs)。因此，母线的形状和尺寸必须精确设计以保证大电流流过母线时，传感器所处位置的磁场强度在工作范围内[15]。相比之下，隧道磁阻传感器工作范围要高得多(>200 Gs)，可以在一定范围内匹配不同尺寸母线附近的工作磁场，减小电力电子变换器的体积。

本文提出了一种优化隧道磁阻传感器数量与放置位置的具体方法，并给出相应传感器的结构。电流传感器由运算放大器和隧道磁阻芯片组成。隧道磁阻传感器的数量为 4 个，并按照圆形分布均匀布置在母线周围。将 4 个芯片按照一定的线路进行连接并形成差分结构，有效消除了外部干扰和安装尺寸误差。无磁心的设计大大减小了传感器的体积和质量，为电力电子变换器的设计节省了更多空间。提出的方法适用于不同形状与尺寸的母线下具有良好高频特性电流传感器的设计。

1　配电母线磁场分布及趋肤效应扰动特性

1.1　配电母线磁场分布与趋肤效应理论分析

为了研究趋肤效应对导体外部传感器测量的影响，首先要研究导体外部磁感应强度的分布规律。当母线通交流电时，母线的周围磁场[16-17]可表示为

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{1}$$

式中：$\nabla\times$为哈密顿旋度算子；H 为磁场强度；J 为电流密度；D 为电通量密度；t 为时间。

磁感应强度可表示为

$$B = \nabla \times \boldsymbol{A} \tag{2}$$

式中，$\boldsymbol{A}$ 为磁矢量势。

磁场强度可表示为

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu_{\mathrm{r}}} = \frac{1}{\mu_0 \mu_{\mathrm{r}}} \nabla \times \boldsymbol{A} \tag{3}$$

式中：μ_0为真空磁导率，$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H / m；μ_{r} 为相对渗透率，通常取在空气中 $\mu_{\mathrm{r}} = 1$。

根据安培环路定理，电流 I 在导体内流动，导线电流在导体外产生的磁感应强度 B 满足线性关系为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \tag{4}$$

式中：r 为测量位置与导线中心的距离。当电流频率较低时，电流与磁通密度呈线性关系。因此，可以通过检测导体周围的磁感应强度来测量电流。

由趋肤效应可知，当交流电通过导体时，电流分布随电流频率的变化而变化。趋肤深度表示在该深度的电流密度为表面电流密度的 1/e，其公式为

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \gamma \mu}} \tag{5}$$

式中：f为工作频率；γ 为导体的电导率；μ 为导体的磁导率。导体内部距离导体表面深度 d 处的电流

密度 J_d 与表面电流密度 J_s 的关系为

$$J_d = J_s \exp\left(-\frac{d}{\Delta}\right) \tag{6}$$

导体的横截面 S 可分为无穷个小横截面 δS。第 n 处的电流元可记为 $J_d^n \cdot \delta S_n$，J_d^n 为距导体表面深度 d 处第 n 个小横截面 δS_n 处的电流密度，则导体电流 I 为所有电流元素的总和，可表示为

$$I = \sum_{n=1}^{\infty} J_d^n \cdot \delta S_n \tag{7}$$

根据磁场叠加原理，对于母线外的给定点 P，导体电流 I 产生的磁感应强度 B 等于在点 P 处所有电流单元产生的磁感应强度的矢量和，由式(4)~式(7)可知，导体电流在导体外点 P 处产生的磁感应强度可以表示为所有电流元件产生的磁通密度的矢量和，即

$$\vec{\boldsymbol{B}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_0 J_d^n \cdot \delta S_n}{2\pi r_n} \vec{\boldsymbol{e}}_n \tag{8}$$

式中：r_n 为第 n 个电流元 $J_d^n \cdot \delta S_n$ 到点 P 的距离；$\vec{\boldsymbol{e}}_n$ 为每个电流元的方向矢量。由于趋肤效应的影响，导体内部的电流元大小及分布也会发生改变，通过式(8)可知，磁感应强度也会发生相应的变化。

根据安培环路定理(即式(4))可知，磁感应强度在导体内电流频率不高时与电流具有高度的线性关系。随着电流频率升高，电流变化率增大，电流分布变得不均匀。高频电流在导线中产生的磁场在导线中心区域感应出新电动势，感应电流方向指向原来电流减小的方向，迫使电流向导线外表面靠拢。由于趋肤效应的影响，导体周围的磁通密度呈现出非线性特性，磁感应强度的幅值大小会随着电流频率的变化发生改变，从而影响导线周围电流传感器的测量。导线外部区域磁通密度分布与传感器布置的位置有关，即在给定导体一定的输入电流下，导体外不同位置展示出的磁感应强度的幅频特性也不同。根据式(8)，当分析高频情况下导体周围的磁感应强度时，需要将导体进行区域划分，计算起来相对复杂，本文借助 ANSYS Maxwell 软件对高频情况下的配电母线磁场分布进行仿真分析。

1.2 配电母线磁场分布仿真分析

在 ANSYS Maxwell 软件中对母线中电流密度和磁通密度特性进行有限元仿真模拟。图 1 为母线在相同电流、不同电流频率下的电流密度分布，可以看出，由于母线在高频电流下存在趋肤效应，其内部电流密度的不均匀性随频率增加而增加，附近的磁场也随频率发生显著变化。

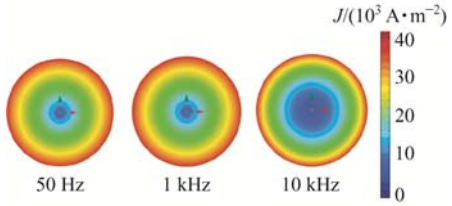


图 1 母线电流在不同频率下的电流密度分布

Fig. 1 Current density distribution of bus current at different frequencies

图 2 为磁感应强度 B 与芯片距离 r 和电流频率 f 的关系曲线。可以看出，随着 r 的增大，B 的幅值呈下降趋势。当 r=5 mm 时，f 越高 B 的幅值越低，即趋肤效应的存在会导致磁感应强度的幅值降低，进而影响传感器的测量效果；当 r≥8 mm 时，趋肤效应对测量的影响几乎忽略不计。当 r 继续增大，B 的幅值也更小，此时测量结果更容易受到其他因素的干扰。

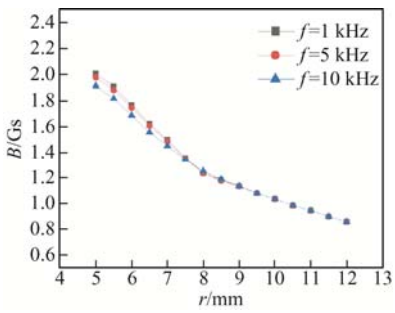


图 2 磁感应强度的幅频特性曲线

Fig. 2 Amplitude frequency characteristic curve of magnetic induction intensity

1.3 趋肤效应扰动特性仿真分析

通过 ANSYS Maxwell 仿真软件能够分析出磁感应强度的幅值会随着频率的升高而降低。给定母线电流 20 A，通过仿真软件测得 r 分别为

4.0、4.5、5.0 mm 时 B 的幅值，构成图 3 中不同位置下 B 的幅频特性。由图 3 可知，不同位置 B 的幅频特性不一样，即存在一个最优位置使得 B 的幅频特性曲线最为平缓，趋肤效应对传感器的影响最小。

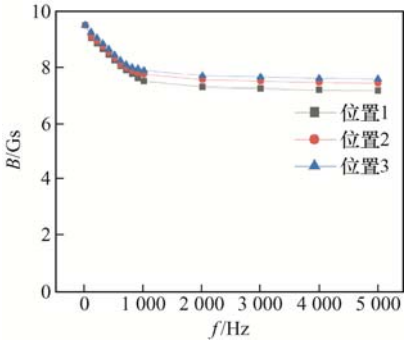


图 3　不同位置下磁感应强度的幅频特性

Fig. 3 Amplitude-frequency characteristics of magnetic induction intensity at different positions

由此可见，趋肤效应主要影响磁感应强度的幅值大小，由于 TMR 传感器主要通过测量磁感应强度来反推实际电流，当磁感应强度发生变化后，测量出的电流也会发生改变，从而造成测量误差。但分析得到磁感应强度幅值随频率变化的幅度会随着测量位置的改变而改变，下面将分析位置因素如何影响测量以及如何找到最优位置，使得频率变化对测量造成的误差影响最小。

2　计及趋肤效应扰动的隧道磁阻自适应传感策略

2.1　隧道磁阻传感器结构与特性

隧道磁阻传感器是一种薄膜元件，其屏障由夹在 2 个铁磁层(自由层/引脚层)之间的薄绝缘体组成。引脚层磁化方向固定，自由层磁化方向随外加磁场方向变化[18]。当引脚层和自由层的磁化方向平行时，电子隧穿的概率最大并使得传感器的电阻最小，反之亦然。隧道磁阻芯片通常由 4 个隧道磁阻元件组成，并采用桥式电路的形式组合，如图 4 所示。U^+和 U^-之间电压差与相邻的磁通密度成正比，也与被测电流成正比。

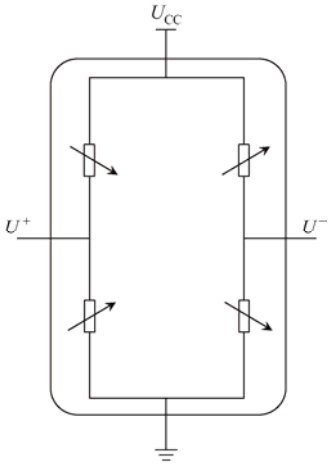


图 4　隧道磁阻芯片结构示意

Fig. 4 Schematic of TMR structure

图 5(a)为所提出的母线电流传感器的三维结构，图5(b)为隧道磁阻芯片装置的位置。选择尺寸为 3 mm×3 mm×80 mm 的母线进行分析，研究母线电流传感器分别在直流和交流 1~10 kHz 下的频率特性，提出的设计方法同样适用于其他尺寸的母线。

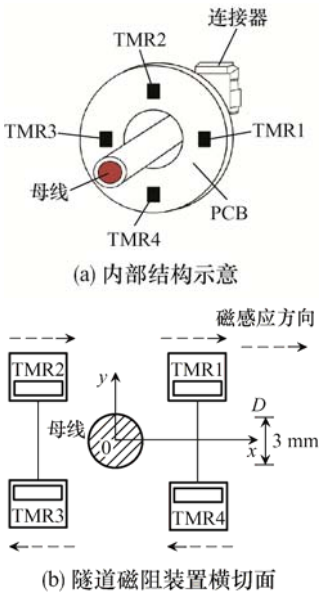


图 5　隧道磁阻传感器结构示意

Fig. 5 Schematic of TMR sensor structure

假设被测电流流过垂直于纸张表面的母线，方向向外。母线的几何中心被设置为坐标的原点，母线截面积为 3 mm×3 mm，4 个隧道磁阻芯片几何中心与母线的几何中心在一个共同平面上，即 x-y 坐标平面，如图 5(b)所示。隧道磁阻芯片和运算放大

器安装在印刷电路板 PCB(printed circuit board)上。该 PCB 平行于 *x*-*y* 坐标平面，并安装在电流传感器的外壳内，外壳用螺丝固定在母线上，每个传感器包含 1 组对磁场敏感的隧道磁阻芯片，图 5(b)给出了隧道磁阻芯片坐标变量的定义。由于被测母线为圆形母线，4 个隧道磁阻芯片的位置相对于 *x* 轴和 *y* 轴是对称的，即 4 个隧道磁阻芯片均匀分布在母线周围。

2.2 隧道磁阻芯片放置位置与数量优化

为保证检测直流和高频交流电流的准确性，传感器芯片在母线的位置需要进行优化设计，放置传感器芯片的位置主要有以下几个限制：①由于圆形母线导体中电流产生的磁场在各个方向上具有对称性，假设对于圆形母线，隧道磁阻芯片测量电流的结果只与隧道磁阻芯片与母线的距离 *r* 有关，与角度 θ 无关；②尺寸，传感器芯片不能离母线太远，需要根据传感器外壳尺寸大小设定在一定限制范围内；③趋肤效应，母线内的高频电流会在母线附近产生不均匀的磁场，传感器芯片需要放置在对频率相关磁场不敏感的位置；④相邻母线的影响，取决于相邻母线的位置等因素，芯片的最优安装区域可以定义为对相邻母线产生的磁场不太敏感的区域。

由于母线周边的磁感应强度在高频电流下呈现非线性特征，传感器放置在不同的测量点时磁感应强度的幅频特性也不相同，即对传感器测量的影响程度也不同。为了量化与评估交流电流频率对不同位置传感器测量精度的影响，传感器输出的测量误差可表示为

$$\delta(f)=\frac{U_{\mathrm{OUT}}(f)-U_{\mathrm{OUT}}(50\ \mathrm{Hz})}{U_{\mathrm{OUT}}(50\ \mathrm{Hz})}\times 100\% \tag{9}$$

式中：$\delta(f)$ 为测量误差；f 为电流频率，即工作频率；$U_{\mathrm{OUT}}(f)$ 为待测电流频率为 f 时传感器输出电压的幅值；$U_{\mathrm{OUT}}(50\ \mathrm{Hz})$ 为待测电流频率为工频 50 Hz 时传感器的输出电压的幅值。一般而言，在高频情况下，趋肤效应会使得母线周围的磁感应强度幅值降低，传感器测得的电流幅值也会因为趋肤效应带来磁通密度变化而变化，所以可以利用式(9)来量化趋肤效应对电流测量的影响程度。

同时考虑母线结构和上述限制条件，本文提出一种适用于隧道磁阻芯片放置位置的优化算法。定义函数 $\Phi(f,x,y)$ 为当隧道磁阻模具坐标为(x, y)、电流频率为 f 时传感器的测量误差。假设母线电流产生的磁场在 0~360°范围内是对称的，并且引入极坐标系，则测量误差函数具体为

$$\Phi(f,r)=\delta(f)|_r \tag{10}$$

为了满足隧道磁阻传感器的测量误差不超过 2.00%，由图 2 可知，当 5 mm≤r≤8 mm 时，磁感应强度的幅值随频率有明显的变化，即趋肤效应会影响传感器的测量精度，所以在选取隧道磁阻传感器距离 r 时应不小于 8 mm。但随着隧道磁阻芯片距离的进一步增加，磁感应强度的幅值会继续下降，此时设计传感器对运放电路以及抗干扰能力会提出更高的要求，且综合考虑母线厚度和传感器尺寸限制，将隧道磁阻芯片最优的放置位置限制在 8 mm≤r≤10 mm。当得到 r 具体数值后，将 n 个隧道磁阻芯片均匀分布在 PCB 上作为传感器的主体部分。图 6 为当 n 分别为 2、4、6 时的情形。

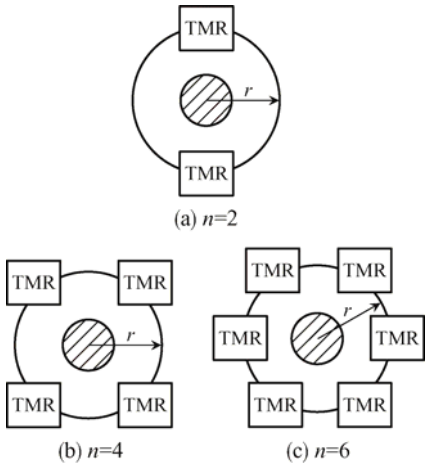


图 6 隧道磁阻芯片放置位置示意

Fig. 6 Schematic of the placement position of the TMR sensor

当确定隧道磁阻芯片与母线的距离后，需要综合考虑传感器芯片数量。一般而言，假设芯片采集到的电流数据服从统计学的正态分布，隧道磁阻芯片数量越多则可以同时获得更多的数据，通过对这些数据进行处理与取平均，即可得到更为精确的实

时电流，但与此同时传感器的价格也会上升。对于隧道磁阻传感器的应用，主要考虑其商业应用的价值，包含成本、性能等因素，所以构建价值函数以综合衡量成本和性能等多方面指标。本文提出 1 个价值函数 W，该函数包含测量误差与芯片成本 2 个组成部分，可表示为

$$W = k_1\delta'(f,r,n) + k_2 n P_1 \tag{11}$$

式中：k_1 与 k_2 为权重系数，满足 $k_1,k_2 \in (0,1)$；$\delta'(f,r,n)$ 为测量误差函数，包含频率 f、距离 r 与数量 n 这 3 个组成部分；P_1 为单个隧道磁阻芯片和配套运放电路的价格。式(11)中，价值函数包含的 2 个部分分别与芯片数量 n 成单增与单减的函数关系，即一定存在最优的 n 使得 W 最小，通过对 W 求导并令导数等于 0，即可得到最优的隧道磁阻芯片数量 n。

2.3 传感器最优布局方案及不同方案比较

根据图 2 可以查到不同频率 f 与不同距离 r 下磁感应强度 B 的具体数值，并将数值代入式(9)计算出测量误差，得到图 7。可以看出，在不同 r 处，测量误差随着频率的增大均会发生显著变化。当母线电流频率 f=10 kHz 时，随着 r 的增加，测量误差呈下降趋势，但距离过远时传感器会受到其他因素的干扰导致测量误差再次上升。可见在 $r\in(7, 10)$ mm 时，趋肤效应对传感器的影响最小，传感器测量精度在 2.00%以内，相较于 r=3 mm 时测量误差的 5.00%有较为明显的提升。

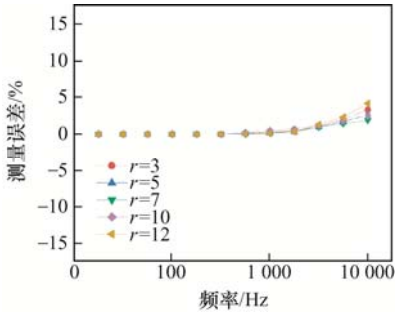


图 7　传感器测量误差与芯片距离和工作频率的变化关系

Fig. 7 Relationship between sensor measurement error and changes in chip distance and operating frequency

图 7 展示了测量误差与芯片距离 r 和工作频率 f 的关系，为了更为直观地找出最优布局方案，取 f=10 kHz，此时芯片测量误差与 r 的关系如图 8 所示。根据测量误差随 r 的变化曲线，可以得到当 r=8.77 mm 时测量误差最小，同时考虑到母线电流传感器尺寸限制，最终选定芯片最优的距离 r=8.77 mm。取 k_1=k_2=0.5，并根据以往工程项目经验取 P_1 为 140 元，测量误差函数近似取 0.5/n，代入式(11)后可得价值函数 W=0.25/n+70n，根据函数单调性，当 n=4 时价值函数 W 取极小值，即隧道磁阻芯片最优数量为 4 个。测量误差函数与芯片单价也可以根据项目经验与概率统计学的知识进行调整与更换。由于与母线中心对称坐标点具有相似的频率特性，可以定义 4 个隧道磁阻芯片的坐标分别为(6.2, 6.2) mm、(−6.2, 6.2) mm、(−6.2, −6.2) mm 和(6.2, −6.2) mm。

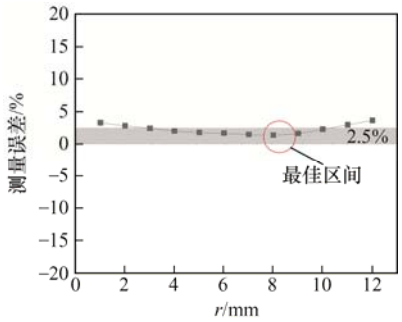


图 8　f=10 kHz 时测量误差随隧道磁阻芯片与母线距离变化曲线

Fig. 8 Curve of measurement error with the distance between TMR chip and the bus at f=10 kHz

图 9(a)~(c)为母线电流传感器的不同配置方案。配置 1 中隧道磁阻芯片坐标分别为(0, 8.77) mm 和(0, −8.77) mm。配置 2 对应坐标分别为(6.2, 6.2) mm、(−6.2, −6.2) mm、(−6.2, 6.2) mm 和(6.2, −6.2) mm。配置 3 对应坐标分别为(4.38, 7.59) mm、(−4.38, 7.59) mm、(8.77, 0) mm、(−8.77, 0) mm、(4.38, −7.59) mm 和(−4.38, −7.59) mm。图 9(d)为相邻且具有相同尺寸和形状的干扰母线，被测母线和干扰母线的电流相等且方向相同，干扰母线中心的坐标为(20, 0) mm。

给定系统一定工作频率的交流电，记录传感器在无安装位置误差或无外部干扰母线情况下

的测量误差，同时记录当传感器存在安装位置误差或存在外部干扰母线时传感器的测量误差，将两者进行对比，用以比较传感器安装误差和外部干扰带来的影响。设定在直角坐标系下设备沿 x 轴方向和 y 轴方向的安装误差分别为±1 mm，3 种不同配置方案下的测量误差见表 1。结合图 5~图 8 展示的母线传感器结构尺寸、频率特性、安装误差、成本及抗干扰能力等特点，采用图 9 中的配置 2 来设计幅频特性好、测量精度高的母线电流传感器。

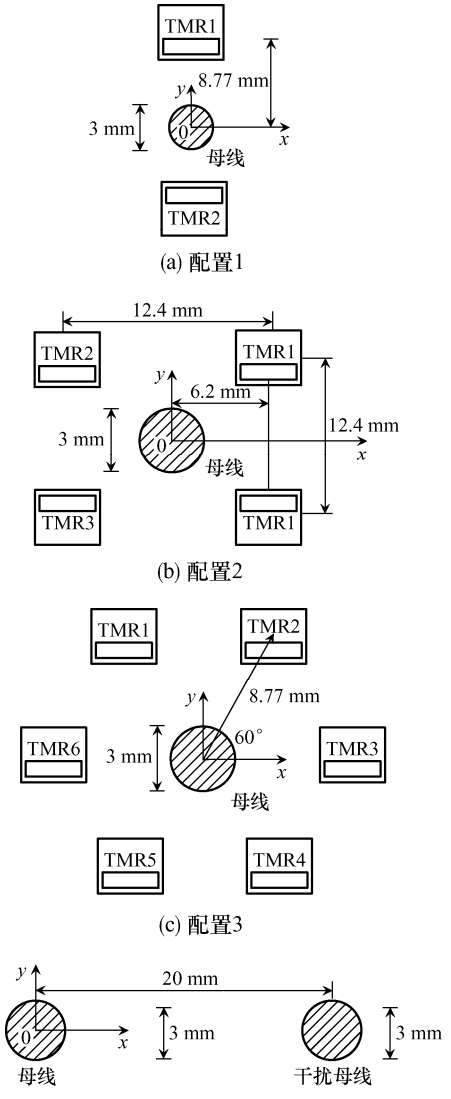


图 9 传感器不同配置方案与干扰母线示意

Fig. 9 Schematic of different sensor configuration schemes and interference busbar

表 1 不同配置的测量误差

Tab. 1 Measurement errors under different configurations

%

配置方案	没有安装误差与外部干扰	存在安装误差	存在外部磁场影响
配置 1	1.85	2.13	1.99
配置 2	1.53	1.63	1.53
配置 3	1.40	1.68	1.52

2.4 宽带电流传感器与滤波算法设计

隧道磁阻传感器在测量电流时，传感器本身以及配套的运放电路会产生一定的噪声并对测量效果产生影响，所以需要带宽效果好的运算放大器以保证测量精度。此外，对于采集的信号可以通过添加一定的滤波装置和滤波算法以滤除测量过程带来的噪声。

运算放大器对信号放大效果受到增益带宽积的限制，选择增益带宽积为 10 MHz 的高速低噪声宽带放大器模块，该模块可以将隧道磁阻传感器测得的 10 kHz 信号完整放大 1 000 倍而不失真。为了让运放模块得到更好的测量效果，利用卡尔曼滤波算法对隧道磁阻传感器采集的信号进行降噪处理[19]，通过建立线性系统的状态空间方程和观测系统的输入输出，实现对系统状态量的最优估计，通过迭代并去除观测数据中的噪声实现最优估计，其状态空间方程为

$$\begin{cases} x_{k+1} = \boldsymbol{A}x_k + \boldsymbol{B}u_k + v_k \\ y_{k+1} = \boldsymbol{C}x_k + \boldsymbol{D}u_k + w_k \end{cases} \tag{12}$$

式中：x_k 和 x_{k+1} 分别为系统 k 和 k+1 时刻的状态变量；u_k 为系统的输入变量；v_k 为系统的输出噪声；y_k 为系统的输出变量；w_k 为系统的观测噪声；$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{D}$ 为对应的状态矩阵。v_k 和 w_k 为互不相关且均值为 0 的高斯白噪声，它们的协方差分别为 Q_k 和 R_k。当系统工作频率为 10 kHz 时，通过卡尔曼滤波算法对采集的信号进行降噪，得到滤波后测量误差随隧道磁阻芯片与母线距离 r 变化曲线如图 10 所示。可以看出，添加卡尔曼滤波算法可以有效地对采集的信号进行降噪处

理，使得测量误差更小。

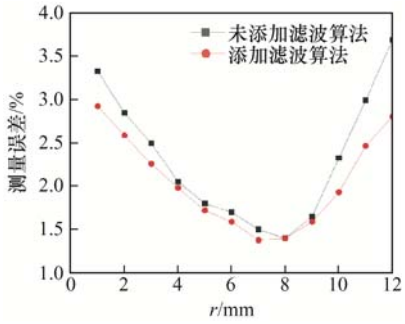


图 10　f=10 kHz 时添加滤波算法前后测量误差曲线

Fig. 10　Measurement error curve before and after adding filtering algorithm at f=10 kHz

3　仿真与实验验证

3.1　实验平台介绍与上电测试

图 11 为隧道磁阻传感器实验装置。由于隧道磁阻传感器对于负载电流感应出来的电压信号非常微弱，通常情况下只有几 mV，需要配合运算放大器将信号放大到可以测量的范围，再对信号进行采集，并将采集的信号传送至控制板转换为数字信号。本文设计了与隧道磁阻传感器相匹配的运算放大器，其放大倍数为 1 000，还配置有光耦等隔离模块，可以保证信号在传输过程中不会衰减。在实验装置系统中，直流电源电压为 5 V，驱动电源电压为 12 V，传感器电源电压为 5 V，负载为 1 Ω，系统工作频率为 10 kHz。给负载施加一定的直流电压，用电压探头与示波器测量在



图 11　隧道磁阻传感器实验装置

Fig. 11 Experimental device of TMR sensor

不同实验室环境、天气等情况下的负载电压并进行比较，结果表明在不同实验场景与天气时测量得到的负载电压几乎不变，即环境对测量结果的影响可以忽略。

图 12 为隧道磁阻传感器测量负载电流的电压波形。图 12(a)与(b)分别为逆变器工作频率 f 在 1 kHz 及 10 kHz 下测量得到的波形。可以看出当 f= 1 kHz 时，传感器能够精准地检测高频电流，但当 f 达 10 kHz 甚至更高时，导线内交流电流存在趋肤效应，导致对负载电流的采集精度开始下降，采集的波形也发生了畸变。

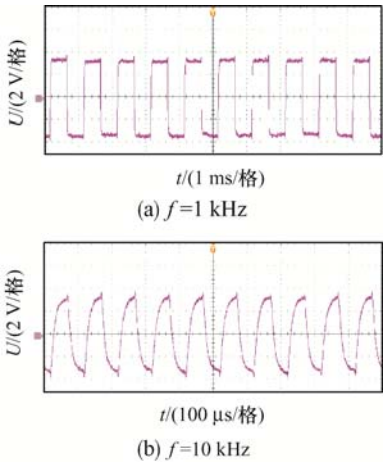


图 12　负载电压实验波形

Fig. 12 Waveforms of load voltage experiment

此外，为了排除传感器自身测量误差造成的影响，将实验平台所使用的传统导线更换为利兹线，并且更换了不同型号的电流钳分别进行测量，测量波形基本恢复为方波，说明图 12 中测量误差及波形畸变均由趋肤效应造成，而不是传感器自身测量误差导致。

3.2　隧道磁阻芯片性能测试

图 13 为本文所提母线电流传感器的电路，S 箭头表示隧道磁阻传感器灵敏度方向。4 个隧道磁阻传感器的位置和坐标如图 9(b)所示。

测试仪器具体细节见表 2，直流电流源与驱动电路电源分别给逆变器与驱动电路提供电能，并产生高频交流电给负载供电。母线电流传感器由外部电源供电，当电流通过母线时用示波器读出电流传

感器的输出。直流电流源 IT6726H 是高精度电流源，其不确定度为 0.05%，满足实验的测试要求。

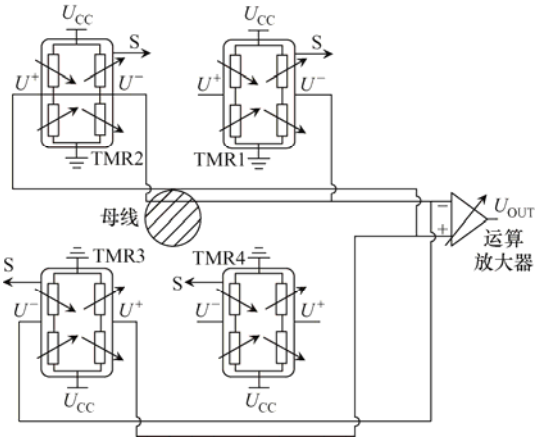


图 13 母线电流传感器电路

Fig. 13 Circuit of busbar current sensor

表 2 测试仪器

Tab. 2 Test instruments

设备	型号
直流电流源	IT6726H
驱动电路电源	IT6322A
万用表	FLUKE−124B/CN
逆变器功率器件	C3M0065090
示波器	DPO2024B
信号发射器	FY6900

4 个隧道磁阻芯片安装在 PCB 上并以差分方式连接，然后连接到运算放大器输入端口，输出端口连接示波器电压探头对波形进行测量。运算放大器与隧道磁阻传感器共用 5 V 直流电源，上电测试前对运算放大器的放大系数与零点漂移进行了调整。通过给定驱动电路与逆变器不同开关频率与电源电压，对隧道磁阻传感器进行上电测试。芯片测试条件为电源 5 V，磁感应强度−200~200 Gs，温度 25 ℃。通过测试隧道磁阻芯片的 *B*-*U* 输出曲线，测得在 25 ℃时芯片误差小于±1.20%，典型灵敏度为 0.5 mV/V/Gs，与产品规格书数据基本保持一致，满足测量精度要求。

设定隧道磁阻传感器的电源电压为 5 V，额定电流测量范围为±30 A，峰值电流测量范围为±60 A，对应±10 A 时的输出为 2.8±2 V。通过直流电流源对隧道磁阻传感器进行标定，并输入 60 A 直流电流，测试其 *I*-*U* 输出特性和相对误差。3 次独立测量结果表明，在 25 ℃时相对误差小于±1.00%，表明隧道磁阻传感器稳定性强且测量精度高，排除了因传感器自身测量误差带来测量精度的影响。

3.3 布局优化效果实验验证

第 3.2 节主要针对隧道磁阻芯片固有特性进行测试，本节介绍隧道磁阻传感器对不同频率电流的实测效果。使用型号为 DPO2024B 的示波器测得隧道磁阻传感器测量负载电流为±3 A 时输出信号噪声均方根为±2.1 mV，即噪声的幅值较小，不影响实验中对实测波形相关参数的测量。利用 DPO2024B 示波器自带功能测量图 12 中不同频率下波形的幅值，再将测量出来的值代入式(9)，即可得到不同频率下的测量误差，测量结果如图 14 与图 15 所示。经过 3 次独立测试，电流传感器的测量误差随着频率的增加逐渐增大，这与第 2 节分析得到的频率特性结果的趋势一致。在 10 kHz 时，3 次独立测试得到的传感器实测输出误差分别为 1.78%、1.58%与 1.60%，均小于 2.00%。

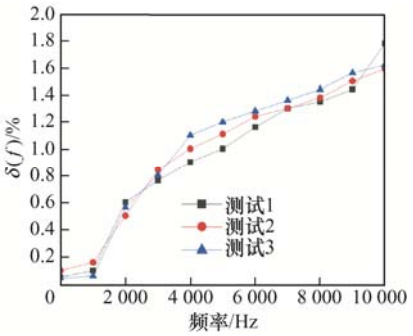


图 14 *r*=8.77 mm 时传感器测量误差

Fig. 14 Sensor measurement error when *r*=8.77 mm

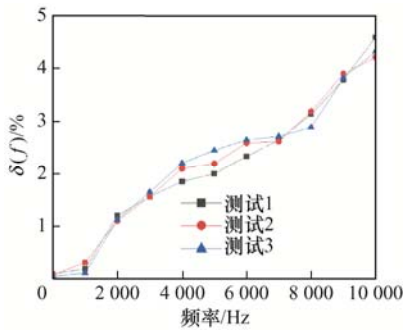


图 15 *r*=5.00 mm 时传感器测量误差

Fig. 15 Sensor measurement error when *r*=5.00 mm

为了得到布局优化提升测量精度的具体效果，将隧道磁阻芯片与母线的距离 r 换成 5.00 mm 并再次进行测量。经过 3 次独立测试，得到当隧道磁阻芯片放置的位置距离母线中心 r=5.00 mm 时，不同频率下传感器的测量误差如图 15 所示，此时由于趋肤效应的影响，传感器的测量误差接近于 5.00%。通过与 r=8.77 mm 传感器测量误差的对比可以看出，利用布局上的优化可以使得传感器的测量误差从 5.00%降低至 2.00%。

将本文提出的传感器实验结果与其他文献中实验结果进行比较，见表 3。通过数据对比可知，隧道磁阻传感器相比于 DRV425 传感器有更高的测量精度，通过对隧道磁阻芯片布局进行调整，测量误差能控制在 2.00%以内。

表 3　方案比较

Tab. 3 Scheme comparison

测量对象	传感器	传感器磁场范围/Gs	10 kHz 下电流误差/%
方形母线	DRV425	≤20	4.0
圆形母线	DRV425	≤20	3.5
圆形母线或方形母线	TMR	>200	<2.0

4　结论

由于母线电流在高频下存在趋肤效应，传统的传感器会受到趋肤效应及杂散磁场的影响使得测量精度下降。本文提出了一种考虑趋肤效应扰动的配电母线高频电流隧道磁阻传感器，该传感器由 4 个隧道磁阻芯片构成，采用差分形式电路，具有良好的线性度与抗干扰能力。文中详细阐述了隧道磁阻传感器布局方案，并进行了仿真设计和实验验证，所得结论如下。

(1)综合考虑测量精度及价格等因素，隧道磁阻传感器最优数量为 4 个。

(2)隧道磁阻传感器放置的位置距离母线中心 8.77 mm 处为最优，小于 8 mm 或大于 9 mm 均会增加测量误差。4 个隧道磁阻芯片的坐标依次为 (6.2, 6.2) mm、(−6.2, −6.2) mm、(−6.2, 6.2) mm 和 (6.2, −6.2) mm。

(3)布局优化后的隧道磁阻传感器在测量高频与低频母线电流时的测量误差均小于 2.00%。

这种布局优化后的隧道磁阻传感器实现了 2.00%的测量精度，且控制了成本，为复杂电气设备高频电流测量提供了新的思路。针对不同形状母线的隧道磁阻芯片的布置方法将是下一步研究内容。

参考文献：

[1] Yuan Zhao, Peng Hongwu, Deshpande A, et al. Design and evaluation of laminated busbar for three-level T-type NPC power electronics building block with enhanced dynamic current sharing [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(1): 395-406.

[2] Li Size, Han Yu, Liu Chengzhu. Coupled multiphysics field analysis of high-current irregular-shaped busbar [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2019, 9(9): 1805-1814.

[3] 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.

[4] Melexis. CSA-1V IMC-Hall® current sensor: Preliminary datasheet Rev. 005 [EB/OL]. (2013-06)[2024-06-05]. https://www.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/csa-1v.pdf.

[5] Blagojevic M, Jovanovic U, Jovanovic I, et al. Coreless open-loop current transducers based on Hall effect sensor CSA-1V [J]. Facta Universitatis - Series: Electronics and Energetics, 2016, 29(4): 489-507.

[6] 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): 1-5.

[7] 赖荣光, 邱泽鹏, 陆鹰. 配电网一体化高压电能测量装置的老化试验系统[J]. 广东电力, 2023, 36(2): 120-128.
Lai Rongguang, Qiu Zepeng, Lu Ying. Aging test system of an integrated high voltage electrical energy measurement device for distribution network [J]. Guangdong

Electric Power, 2023, 36(2): 120-128. (in Chinese)

[8] 谷相宏, 郭子晗, 张程, 等. 正弦波调制全光纤电流互感器光回路故障预警方法[J]. 广东电力, 2023, 36(7): 50-59.
Gu Xianghong, Guo Zihan, Zhang Cheng, et al. Fault early warning method for FOCT optical circuit of sine wave modulation [J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(7): 50-59. (in Chinese)

[9] Ripka P, Pribil M, Petrucha V, et al. A fluxgate current sensor with an amphitheater busbar [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7): 1-4.

[10] Ripka P, Grim V, Petrucha V. A busbar current sensor with frequency compensation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(4): 1-5.

[11] Xiao Chucheng, Zhao Lingyin, Asada T, et al. An overview of integratable current sensor technologies [C]// 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference. Salt Lake City, UT, USA, 2003: 1251-1258.

[12] Ziegler S, Woodward R C, Iu H H, et al. Current sensing techniques: A review [J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(4): 354-376.

[13] Weiss R, Itzke A, Reitenspie B J, et al. A novel closed loop current sensor based on a circular array of magnetic field sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(7): 2517-2524.

[14] Zhang Huaiqing, Li Feifan, Guo Huan, et al. Current measurement with 3-D coreless TMR sensor array for inclined conductor [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(16): 6684-6690.

[15] Texas Instruments. DRV425 fluxgate magnetic-field sensor [EB/OL]. (2016)[2024-06-05]. http://www.ti.com.

[16] 赵志斌, 余鹏, 田杰. 高压大功率开关器件电磁特性的解析模型[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 22-29.
Zhao Zhibin, Yu Peng, Tian Jie. Analytical model for electromagnetic characteristics of high-voltage and high-power switching devices [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 22-29. (in Chinese)

[17] 谢洪平, 何宏杰, 陈喆, 等. 基于多参数变量优化的户内空心电抗器电磁屏蔽方案研究[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 448-455.
Xie Hongping, He Hongjie, Chen Zhe, et al. Research on electromagnetic shielding scheme for indoor air-core reactor based on multi-parameter variable optimization [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 448-455. (in Chinese)

[18] 李荡, 王兰若, 焦飞, 等. 差分式 TMR 微弱电流传感器设计及其应用研究[J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(11): 91-98.
Li Dang, Wang Lanruo, Jiao Fei, et al. Design and application of differential TMR weak current sensor [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(11): 91-98. (in Chinese)

[19] 廖英祺, 荆江平, 叶婷. 基于约束卡尔曼滤波的区域多能源系统鲁棒状态估计[J]. 广东电力, 2023, 36(9): 80-88.
Liao Yingqi, Jing Jiangping, Ye Ting. Robust state estimation for regional multi-energy systems based on constrained Kalman filter [J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(9): 80-88. (in Chinese)



王晟玮

作者简介：

王晟玮(1990—)，男，博士，副高级工程师。研究方向：信息与通信工程。E-mail：kadinwang1010@icloud.com。

姜雨枫(1995—)，男，中国电源学会学生会员，通信作者，博士研究生。研究方向：无线电能传输。E-mail：372590412@qq.com。

王逸兮(1985—)，男，硕士，副高级工程师。研究方向：软件工程。E-mail：187355144@qq.com。

叶宇轩(1995—)，男，硕士，工程师。研究方向：电信技术。E-mail：524098754@qq.com。

杜银锋(2001—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：无线电能传输。E-mail：yinfengdu@whu.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)