

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413168

# PCB 罗氏线圈电流传感器设计及抗干扰研究\*

李海青<sup>1</sup>, 张文斌<sup>1</sup>, 朱琳<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学机电工程学院 昆明 650504; 2. 云南电投绿能科技有限公司 昆明 650228)

**摘要:**针对罗氏线圈的带宽与其灵敏度和抗干扰能力之间存在权衡关系问题,提出了一种具有高带宽、高抗干扰、高灵敏度的有回线组合型 PCB 差分罗氏线圈。根据组合型 PCB 罗氏线圈的测量原理以及集总参数等效电路模型,分析了影响测量带宽的关键因素,在此基础上对组合型 PCB 罗氏线圈采用差分设计,并分析其抗干扰原理。利用有限元仿真软件模拟不同电磁环境下的干扰情况,验证了有回线组合型 PCB 差分罗氏线圈具有高抗干扰特性。最后进行实验验证,结果表明,在 1~100 A 工频电流测量时,所设计的有回线组合型 PCB 差分罗氏线圈电流传感器灵敏度为 3.46 mV/A,线性度为 0.56%。在 10~100A 工频电流测量时,最大相对误差为 1.73%。抗干扰能力测试中,该传感器显示出的最大相对误差变化为-0.39%,具有良好的抗干扰能力。通过对比实验可知该线圈能有效抵抗电场和磁场干扰,并扩展测量带宽而不降低其灵敏度。有更广泛的应用场景,提高罗氏线圈的通用性和灵活性。

**关键词:** PCB 罗氏线圈;线圈设计;带宽;抗干扰;电流测量

中图分类号: TM933.13 TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

## Design and anti-interference study of PCB Rogowski coil current sensor

Li Haiqing<sup>1</sup>, Zhang Wenbin<sup>1</sup>, Zhu Lin<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China;  
2. Yunnan Electric Power Investment Green Energy Technology Co., Ltd., Kunming 650228, China)

**Abstract:** To address the trade-off between bandwidth, sensitivity, and anti-interference performance of the Rogowski coil, a combined PCB differential Rogowski coil with high bandwidth, enhanced anti-interference capability, and improved sensitivity was proposed. The measurement principles and equivalent lumped parameter circuit model of the combined PCB Rogowski coil were analyzed to identify key factors influencing measurement bandwidth. A differential design was implemented to enhance anti-interference performance, which was further analyzed in detail. Finite element simulation software was used to evaluate interference in various electromagnetic environments, confirming the high anti-interference characteristics of the loop-combined PCB differential Rogowski coil. Experimental verification showed that the designed sensor achieved a sensitivity of 3.46 mV/A and a linearity of 0.56% when measuring power frequency currents ranging from 1 A to 100 A. The maximum relative error during 10 A to 100 A measurements was 1.73%. In anti-interference tests, the sensor exhibited a maximum relative error variation of -0.39%, demonstrating strong anti-interference capability. Comparative experiments revealed that the proposed coil effectively resists electric and magnetic field interference while expanding the measurement bandwidth without compromising sensitivity. This advancement broadens the application scenarios of Rogowski coils, enhancing their versatility and flexibility.

**Keywords:** PCB Rogowski coil; coil design; bandwidth; anti-interference; current measurement

## 0 引言

随着智能电网的快速转型,对电流测量的精度、灵敏度、动态范围、实时性和环境适应性提出更高要求<sup>[1-5]</sup>。在电网监测<sup>[6-7]</sup>、控制及故障检测<sup>[8-9]</sup>等领域,电流传感器的作用愈发关键。罗氏线圈电流传感器因其具有空心结构、良好的线性度、宽频带测量、低侵扰以及结构简单等优点<sup>[10-13]</sup>,成为电网中电流测量的有力工具。PCB 罗氏线圈作为现代技术的产物,不仅克服了传统罗氏线圈手工绕制线圈匝数不一致性等缺点,而且性能稳定性也要高于传统手工绕制的罗氏线圈<sup>[14-16]</sup>。尽管 PCB 罗氏线圈在理论上展现出卓越性能,但在实际应用中仍面临一些挑战<sup>[17-19]</sup>。罗氏线圈的带宽与其灵敏度和抗干扰能力之间存在权衡关系。通常情况下,罗氏线圈若具有较高的带宽,往往意味着线圈匝数较少,这不仅降低了其灵敏度,也削弱了其抗干扰能力。特别是在进行低频和小电流测量时,罗氏线圈产生的输出感应电压信噪比较低,进而限制了测量精度。相反,具有较高灵敏度或较强抗干扰能力的罗氏线圈,由于线圈匝数较多,其带宽相对较窄。这导致在高频电流测量中,输出感应电压可能产生较大的误差,影响测量结果的准确性。因此,设计具有高带宽、高抗干扰和高灵敏度的 PCB 罗氏线圈结构成为当前研究热点。

许震等<sup>[20]</sup>设计了一种带回线和屏蔽层的双绞线型 4 层 PCB 罗氏线圈,通过实验和仿真表明该线圈能够有效抑制磁场和电场干扰。然而,引入屏蔽层,会增加罗氏线圈寄生参数,使得罗氏线圈带宽降低。Fritz 等<sup>[21]</sup>和 Hain 等<sup>[22]</sup>分别研究了差分罗氏线圈和 PCB 差分罗氏线圈,在不减少灵敏度和带宽的情况下,解决耦合电容引起的电场干扰问题。受限于 PCB 设计,线圈截面积小、匝数少,导致互感系数小、灵敏度低<sup>[23]</sup>。魏新劳等<sup>[24]</sup>提出了一种可现场组装的组合适 PCB 罗氏线圈,具有更多线圈截面,增加互感系数,实现高准确度和灵敏度。该结构插板感应电压相位反转相互抵消,具有很强的抗干扰能力,由于没有设计回线,测量会受到邻近载流体产生垂直主板的磁场干扰,且未解决耦合电容引起的电场干扰问题。

针对以上问题,本文提出了有回线组合适 PCB 差分罗氏线圈结构。该结构通过引入差分设计,能够有效地消除由耦合电容引起的电场干扰对输出电压的影响,从而抑制共模噪声。由于线圈匝数没有减少,未降低灵敏度,扩展了测量带宽;通过设计回线和插板位置,并结合后端电路差分抵消,显著减少外部电磁场干扰的影响。

## 1 复合型 PCB 罗氏线圈简介

### 1.1 复合型 PCB 罗氏线圈测量原理

复合型 PCB 罗氏线圈结构如图 1(a)所示,主板的主要功能是为插板提供固定的安装平台,并串联形成电路回路,从而便于插板的安装和固定。

主板上回线沿插板串联反方向布置,用以抵消垂直于主板平面的磁场干扰。插板则实现测量功能,通过焊锡与主板连接。当被测导体垂直穿过线圈中心时,交变磁场会在各个插板中感应产生电压,主板将这些插板的感应电压串联叠加,以输出总的感应电压。插板绕线示意图如图 1(b)所示。

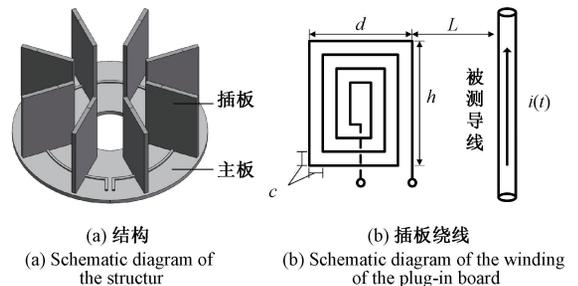


图 1 复合型 PCB 罗氏线圈结构

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the combined PCB Rogowski coil

单面线圈的互感系数  $M'$  关系如下<sup>[25]</sup>:

$$M' = \int_L^{d+L} \frac{\mu_0 h}{2\pi x} dx + \int_{L+c}^{d+L-c} \frac{\mu_0 (h-2c)}{2\pi x} dx + \dots + \int_{L+(n-1)c}^{d+L-(n-1)c} \frac{\mu_0 [h-2(n-1)c]}{2\pi x} dx \quad (1)$$

式中:  $\mu_0$  为真空磁导率;  $n$  为单面插板绕线圈数;  $c$  为绕线间距;  $d$  为线圈宽度;  $h$  为线圈高度;  $L$  为绕线与被测导线距离。

因此,双层板的总互感系数  $M$  如下:

$$M = 2NM' \quad (2)$$

式中:  $N$  为插板数量。

罗氏线圈是基于法拉第电磁感应原理<sup>[26]</sup>,通过测量原边电流  $i(t)$  变化所引起的磁通量变化,产生与电流变化率成正比的感应电压  $U$ ,从而实现对电流的间接测量。

$$U = -M \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

罗氏线圈的等效电路模型可以分为集总参数模型和分布参数模型<sup>[27]</sup>。本文采用的集总参数等效电路模型如图 2 所示。

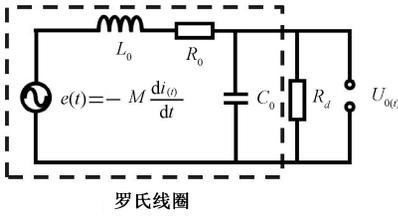


图 2 罗氏线圈集总参数等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of the Rogowski coil's lumped parameters

罗氏线圈等效 RLC 电路的传递函数可以表示为:

$$\frac{U_0(s)}{e(s)} = \frac{1}{L_0 C_0 \left( s^2 + \frac{1}{L_0 C_0} + \frac{L_0}{R_d} \right) s + \frac{1}{L_0 C_0} \left( \frac{R_0}{R_d} + 1 \right)} \quad (4)$$

式中:  $L_0$  为寄生电感;  $R_0$  为寄生电阻;  $C_0$  为寄生电容;  $R_d$  为采样电阻;  $U_{0(t)}$  为线圈输出电压。

根据式(4)可知,罗氏线圈截止频率  $f_H$  为:

$$f_H = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}} \sqrt{\frac{R_d + R_0}{R_d}} \quad (5)$$

根据式(5)可知,罗氏线圈的测量带宽受线圈寄生参数  $L_0$ 、 $C_0$ 、 $R_0$  所影响,为了扩展测量带宽,需要减少其寄生参数。罗氏线圈测量除了受带宽影响外,还容易受到临近电场和磁场的干扰,进而影响测量精度。下面分别进行组合型 PCB 罗氏线圈电流传感器的设计和分析其抗干扰原理。

## 2 组合型 PCB 罗氏线圈电流传感器设计及抗干扰分析

### 2.1 组合型 PCB 罗氏线圈设计

为了扩展测量带宽和有效抑制临近电场和磁场的干扰,本文设计了一种组合型 PCB 差分罗氏线圈结构,结构示意图如图 3 所示。

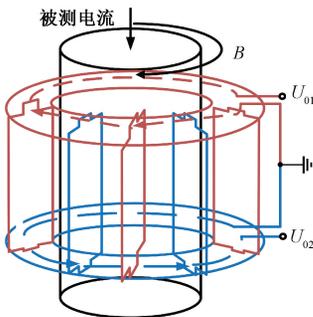


图 3 组合型 PCB 差分罗氏线圈结构

Fig. 3 Schematic diagram of the structure of the combined PCB differential Rogowski coil

通过差分设计,将偶数块插板分为两个部分,形成上下两个独立的组合型 PCB 罗氏线圈。将第 1 个线圈的一端与第 2 个线圈的另一端接地,确保一个线圈的主回路与磁场方向一致,而另一个线圈的主回路与磁场方向相反。因此,测量时分别产生大小相等但方向相反的感应电压  $U_{01}$  和  $U_{02}$ 。根据式(5),使用差分结构,不仅未减少线圈匝数,反而降低了线圈寄生参数,从而在不降低灵敏度的情况下扩展了罗氏线圈的测量带宽。

### 2.2 组合型 PCB 罗氏线圈电流传感器电路设计

在罗氏线圈电流传感器的设计中,除了对线圈进行设计外,还需在线圈后端增加积分电路。本文采用差分设计,需要在积分电路前加入差分放大电路,可以放大差分信号,并抑制共模噪声,如图 4 所示。

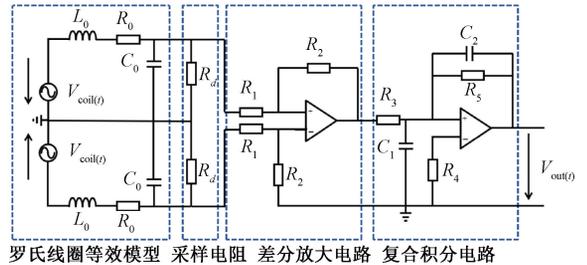


图 4 组合型 PCB 罗氏线圈电流传感器电路

Fig. 4 Circuit schematic of the combined PCB differential Rogowski coil current sensor

### 2.3 组合型 PCB 罗氏线圈抗干扰分析

罗氏线圈电流传感器在测量过程中会受到两类干扰,电场干扰和磁场干扰。电场干扰主要由邻近导线与电气设备的电压梯度变化通过电容耦合产生,而磁场干扰则源于邻近载流导体内交变电流的磁场耦合。为了有效抵抗干扰,设计了有回线组合型 PCB 差分罗氏线圈结构,其抗干扰性能如下。

#### 1) 电场干扰机理及抑制方案

组合型 PCB 罗氏线圈电容耦合等效电路如图 5 所示,在测量时,邻近导线与电气设备都会引入的耦合电容  $C_p$ ,当外部电压梯度变化时,会通过电容耦合产生干扰电流  $i_{couple(t)}$ ,干扰电流  $i_{couple(t)}$  在流经线圈的寄生电感、寄生

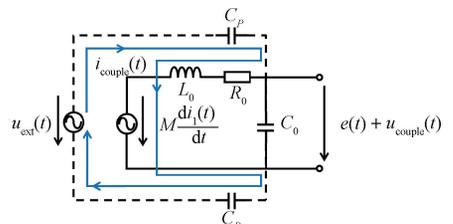


图 5 组合型 PCB 罗氏线圈电容耦合等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit model for capacitive coupling in the combined PCB Rogowski coil

电阻时会产生额外的耦合电压  $u_{\text{couple}(t)}$ , 耦合电压  $u_{\text{couple}(t)}$  会叠加在线圈的正常输出电压上, 导致输出电压波形出现波动, 进而降低了测量的精度和稳定性。

组合型 PCB 差分罗氏线圈电容耦合等效电路如图 6 所示, 为了消除耦合电容对测量的影响, 采用差分设计, 使得邻近导线和电气设备与线圈之间形成的两个耦合电容  $C_{PA}$ 、 $C_{PB}$  以及两个线圈的寄生参数相等。由于电容耦合不受线圈绕组绕线方向的影响, 因此在这两个线圈中产生的耦合电容电压  $u_{\text{couple}(t)}$  不仅大小相同, 而且极性也一致。这两个电压属于共模噪声, 进入后续的差分放大电路时, 两个电压相减抵消, 从而有效消除了耦合电容产生的电场干扰。

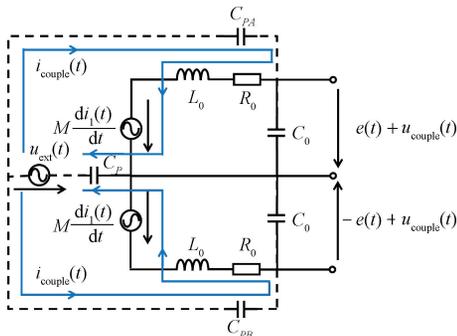


图 6 组合型 PCB 差分罗氏线圈电容耦合等效电路

Fig. 6 The combined PCB differential Rogowski coil capacitively coupled equivalent circuit

## 2) 磁场干扰机理及抑制方案

磁场干扰主要来自邻近的导线等, 按磁场方向和主板平面的方向关系, 分为垂直干扰和平行干扰<sup>[28]</sup>。组合型 PCB 罗氏线圈平行磁场干扰抑制结构如图 7 所示。

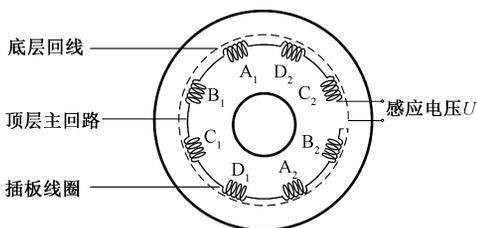


图 7 平行磁场干扰抑制结构

Fig. 7 Parallel magnetic field interference suppression structure schematic diagram

主板上底层设计有回线, 底层回线会感应产生和顶层主回路大小相等、方向相反的电压, 理论上可完全抵消垂直于主板平面的干扰磁场。

在测量被测电流时, 组合型 PCB 罗氏线圈各个插板线圈产生的感应电压会相互叠加。面对外部平行干扰磁场时, 由于线圈的特殊设计, 每个插板线圈感应的

电压在叠加过程中发生相位抵消, 减少了来自外部平行干扰磁场的感应电压  $U$ , 显著降低了外部平行干扰磁场对测量结果的影响, 从而实现了对外部平行干扰磁场的有效抑制。

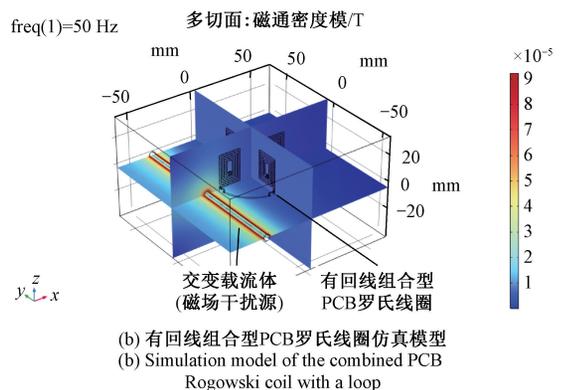
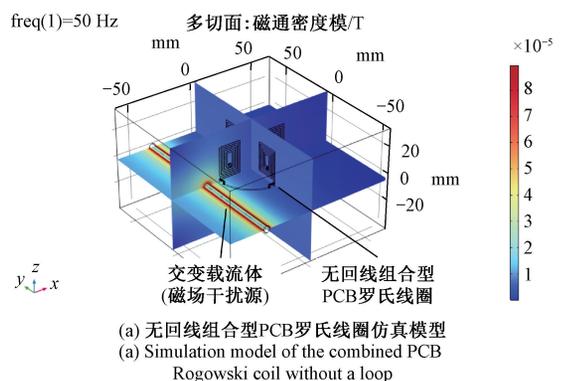
## 3 组合型 PCB 差分罗氏线圈抗干扰仿真分析

基于有限元软件的仿真中, 为了评估组合型 PCB 罗氏线圈在复杂电磁环境下的抗干扰能力, 本文采用简化的仿真模型, 分别分析了垂直干扰磁场、平行干扰磁场的抑制效果, 以及差分设计对电场干扰的抑制效果。在模型中, 仿真模型中的干扰源和线圈均选用铜作为材料, 且整个模型被放置在一个尺寸为  $125 \text{ mm} \times 125 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$  的空气域中, 该空气域作为仿真求解域。在对模型进行网格化处理之后, 进行频域研究。

### 3.1 磁场干扰仿真分析

#### 1) 垂直干扰磁场仿真分析

为了研究邻近载流体产生的垂直干扰磁场对线圈的影响, 在有限元软件中建立仿真模型。该模型包括一个交变载流体作为磁场干扰源, 以及两种不同设计的线圈, 分别为无回线组合型 PCB 罗氏线圈和有回线组合型 PCB 罗氏线圈。交变载流体与线圈主板平行放置, 距离线圈中心  $35 \text{ mm}$ , 通过施加幅值为  $1 \text{ A}$ 、频率为  $50 \text{ Hz}$  的正弦电流产生垂直干扰磁场。垂直干扰磁场下线圈抗扰性能仿真结果如图 8 所示。



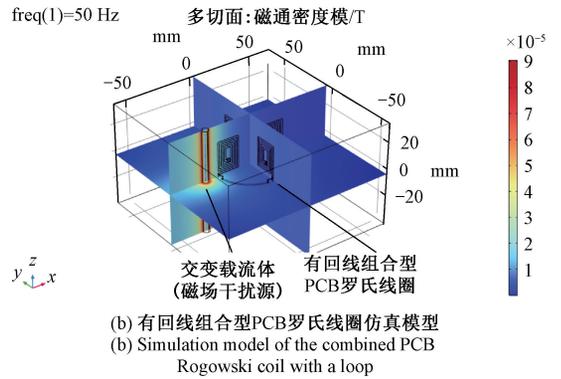
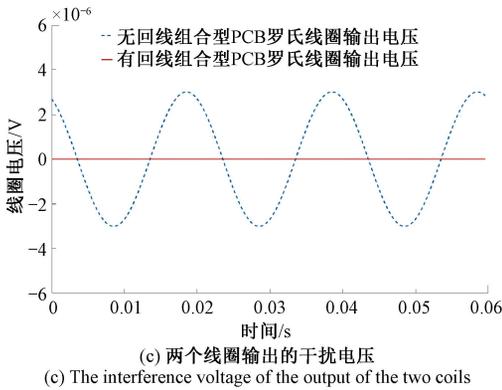


图 8 垂直干扰磁场下线圈抗扰性能仿真结果

Fig. 8 Simulation results of coil immunity performance under vertical interference magnetic field

图 8(a) 和(b) 为交变载流体产生垂直干扰磁场, 交变磁场穿过线圈时, 线圈会产生感应电压。仿真感应电压结果如图 8(c) 所示, 无回线组合型 PCB 罗氏线圈产生的感应电压的幅值为  $3.00 \times 10^{-6}$  V, 相比之下, 有回线组合型 PCB 罗氏线圈产生的感应电压幅值显著降低, 仅为  $2.01 \times 10^{-9}$  V。仿真结果表明, 有回线组合型 PCB 罗氏线圈结构几乎抵消邻近载流体产生的垂直干扰磁场。

### 2) 平行干扰磁场仿真分析

为了研究邻近载流体产生的平行干扰磁场对线圈的影响, 在有限元软件中建立仿真模型。该模型包括一个交变载流体作为磁场干扰源, 以及两种不同设计的线圈, 分别为单个插板线圈和有回线组合型 PCB 罗氏线圈。交变载流体与线圈主板垂直放置, 距离线圈中心 35 mm, 通过施加幅值为 1 A、频率为 50 Hz 的正弦电流产生平行干扰磁场。平行干扰磁场下线圈抗扰性能仿真结果如图 9 所示。图 9(a) 和(b) 为交变载流体产生平行干扰磁场, 交变磁场穿过线圈时, 线圈会产生感应电压。仿真感应电压结果如图 9(c) 所示, 单个插板线圈产生的感应电压的幅值为  $3.45 \times 10^{-6}$  V, 而有回线组合型 PCB 罗氏线圈产生的感应电压的幅值仅为  $1.32 \times 10^{-6}$  V。仿真结果

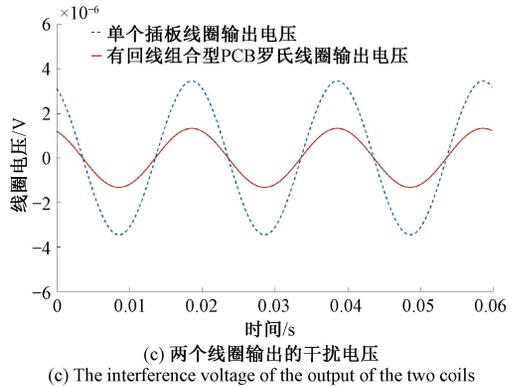


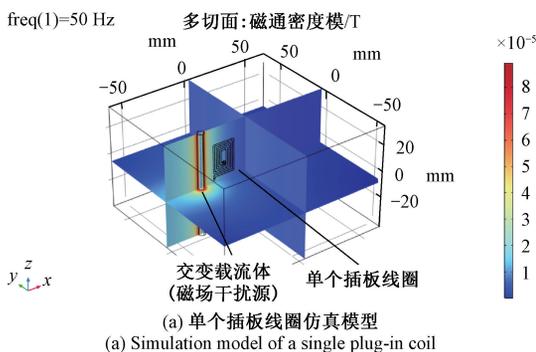
图 9 平行干扰磁场下线圈抗扰性能仿真结果

Fig. 9 Simulation results of coil immunity performance under parallel interference magnetic field

表明, 组合型 PCB 罗氏线圈结构能抵抗邻近载流体产生的平行干扰磁场。

### 3.2 电场干扰仿真分析

为了研究邻近导线与电气设备的电压梯度变化通过电容耦合对线圈产生的电场干扰影响, 在有限元软件中建立仿真模型。该模型包括一个交变电压导线作为电场干扰源, 以及两种罗氏线圈, 分别为有回线组合型 PCB 罗氏线圈和有回线组合型 PCB 差分罗氏线圈。交变载流体与线圈主板平行放置, 距离线圈中心 35 mm, 通过施加幅值为 1 V、频率为 50 Hz 的正弦电压产生干扰电场。电场干扰下线圈抗扰性能仿真结果如图 10 所示。图 10(a) 和(b) 为交变电压导线产生的干扰电场分布。两个线圈输出的干扰电压如图 10(c) 所示, 未采用差分结构的有回线组合型 PCB 罗氏线圈在电场干扰影响下, 其输出电压的幅值为 273.98 mV。采用差分结构后, 在相同电场干扰条件下, 线圈的输出电压幅值仅为 8.66 mV。仿真结果表明, 差分结构能有效抵抗邻近导线与电气设备的电压梯度变化通过电容耦合对线圈产生的电场干扰影响。



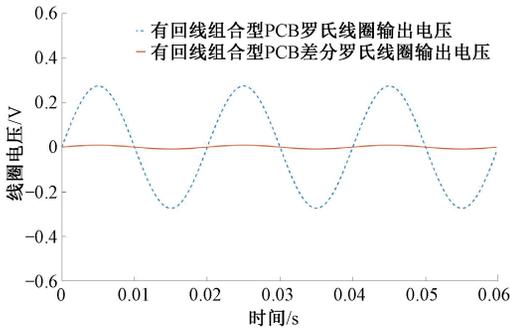
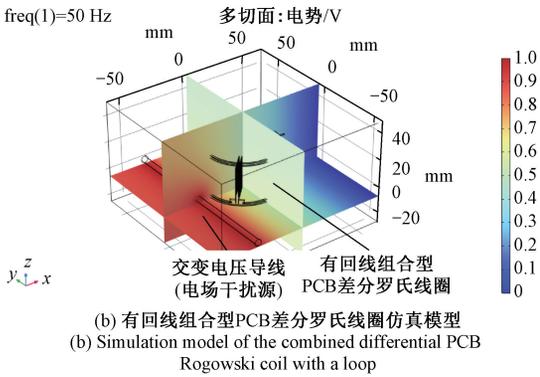
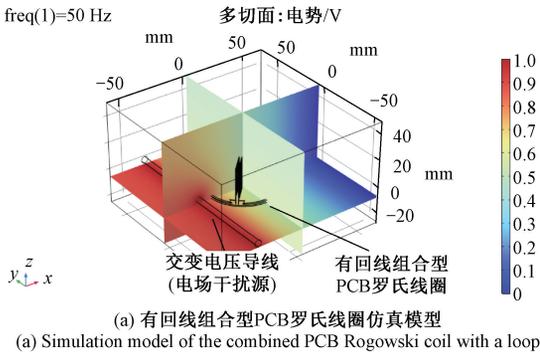


图10 电场干扰下线圈抗扰性能仿真结果

Fig. 10 Simulation results of coil immunity performance under electric field interference

## 4 实验验证

为了全面评估有回线组合型 PCB 差分罗氏线圈的性能,进行了工频性能测试实验,并对比验证了组合型 PCB 罗氏线圈的抗扰性能及扩展测量带宽的能力。实验过程中,选用 FR4 基板作为非磁性骨架,构建了 3 种不同结构的 PCB 罗氏线圈进行对比测试,具体包括无回线组合型 PCB 罗氏线圈、有回线组合型 PCB 罗氏线圈和有回线组合型 PCB 差分罗氏线圈,分别标记为线圈 A、B、C,其实物图如图 11 所示。为确保实验结果的准确性,3 种罗氏线圈的主板均配备了 8 块插板,且这些插板对称分

布。每个插板线圈的参数均保持一致,具体参数如表 1 所示。



图 11 PCB 罗氏线圈实物

Fig. 11 Physical diagram of PCB Rogowski coil

表 1 插板线圈参数

Table 1 Plug-in coil parameters

线圈参数	参数值
单面插板绕线圈数 $n$ /匝	9
绕线间距 $c$ /mm	1
线圈宽度 $d$ /mm	18
绕线与被测导线距离 $L$ /mm	9
导线宽度/mm	0.254
插板层数/层	2

### 4.1 幅值精度测试

传感器幅值精度测试原理如图 12 所示,采用电流发生器产生工频电流回路穿过有回线组合型 PCB 差分罗氏线圈电流传感器。测试时采用 Fluke 302+钳形电流表对测试回路的电流进行测量,同时采用有回线组合型 PCB 差分罗氏线圈电流传感器对电流回路进行测量,其输出信号直接接入示波器。测试工频电流范围为 1~100 A,记录 Fluke 302+钳形电流表电流值和示波器显示电压值,且均为有效值,测试得到数据如表 2 所示。

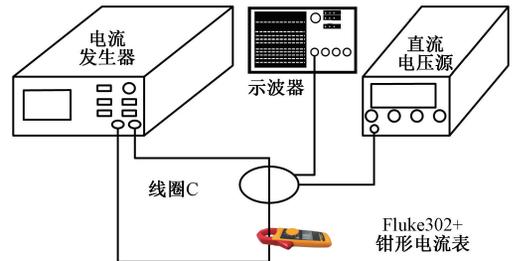


图 12 幅值精度测试原理

Fig. 12 Schematic diagram of amplitude accuracy testing

相对误差  $\varepsilon$  计算公式如下所示:

$$\varepsilon = \frac{V - V_{\text{out}}}{V_{\text{out}}} \quad (6)$$

式中:  $V$  为线性拟合方程计算值;  $V_{\text{out}}$  为传感器输出电压。

表 2 精度测试结果

Table 2 Accuracy test results

$I/A$	$V_{out}/mV$	$\varepsilon/\%$
1.3	3.992 7	36.95
5.3	18.182 6	6.19
10.3	35.986 3	1.73
20.1	70.891 0	-0.53
30.1	105.777 0	-0.62
40.1	141.157 0	-1.02
50.1	175.615	-0.74
60.1	210.063	-0.55
70.0	244.456	-0.53
80.2	278.437	0.01
90.1	311.482	0.40
100.1	345.342	0.57

表 3 抗干扰能力测试结果

Table 3 Anti interference test results

$I/A$	$V_{out}/mV$	$\varepsilon_1/\%$	$\Delta\varepsilon/\%$
10.3	36.0249	1.62	-0.11
20.1	71.075	-0.79	-0.26
30.1	106.19	-1.01	-0.39
40.1	141.489	-1.25	-0.23
50.1	176.153	-1.04	-0.30

由表 3 可知,在有干扰导线存在的情况下,传感器的输出电压略高于无干扰导线时的输出电压。此外,相对误差增幅为  $-0.11\%$ 、 $-0.26\%$ 、 $-0.39\%$ 、 $-0.23\%$ 、 $-0.3\%$ 。表明有回线组合型 PCB 差分罗氏线圈具有良好的抗干扰能力,这一结果证实了该传感器能够在复杂环境下进行精确的电流测量。

### 4.3 组合型 PCB 罗氏线圈抗扰性能对比验证

组合型 PCB 罗氏线圈抗干扰测试实验平台搭建如图 14 所示。实验利用信号发生器与  $10\ \Omega$  电阻产生幅值为  $1\ A$ ,频率为  $50\ kHz$  的干扰电流  $i_{noise}$ 。将 3 种 PCB 罗氏线圈与干扰电流  $i_{noise}$  平行放置,使得干扰电流产生的干扰磁场垂直穿过线圈主板平面,干扰电流载体与 3 种线圈主板外延接触,使得线圈也处于电场干扰中。

被测电流与传感器输出电压的拟合曲线和相对误差  $\varepsilon$  的分布情况如图 13 所示。

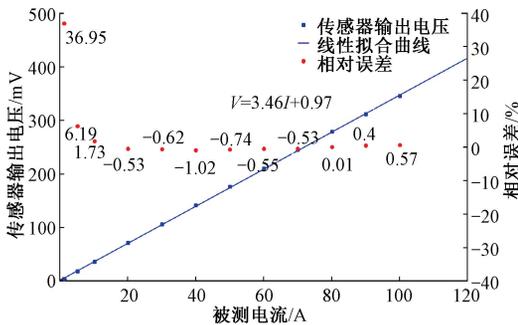
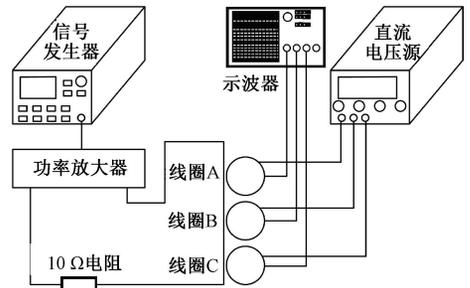


图 13 被测电流与传感器输出电压线性关系和误差特性  
Fig. 13 Diagram of the linear relationship and error characteristics between the measured current and the sensor's output voltage

由图 13 可以看出,在  $1\sim 100\ A$  工频电流范围内,线性拟合方程为  $V = 3.46I + 0.97$ ,其中, $V$  表示线性拟合方程计算值, $I$  表示被测电流。实验结果显示,有回线组合型 PCB 差分罗氏线圈电流传感器的灵敏度为  $3.46\ mV/A$ ,线性度为  $0.56\%$ ,曲线具有良好的线性关系,线性拟合优度接近 1。尽管在测量小电流时,该传感器存在较大误差,但随着电流的增加,相对误差逐渐降低。在  $10\sim 100\ A$  测量范围内,最大相对误差为  $1.73\%$ 。

### 4.2 抗干扰能力测试

为了验证有回线组合型 PCB 差分罗氏线圈抗干扰性能,设置了邻相导线干扰实验。在图 12 的实验平台上,在被测导线右侧  $5\ cm$  处平行放置了一根与被测导线规格相同的干扰导线。干扰电流由电流发生器输出,其幅值与被测电流相等,频率为  $50\ Hz$ 。抗干扰能力测试结果如表 3 所示。



(a) 实验示意  
(a) Schematic diagram of the experiment



(b) 实验测试  
(b) Experimental test diagrams

图 14 组合型 PCB 罗氏线圈抗干扰测试实验平台  
Fig. 14 The combined PCB Rogowski coil anti-interference test experimental platform

3种PCB罗氏线圈的后端均采用了AD8421作为差分放大电路,引入了 $G=31$ 的差分增益,通过示波器记录3种PCB罗氏线圈的线圈感应电压 $v_{\text{noise}}$ ,其结果如图15所示。

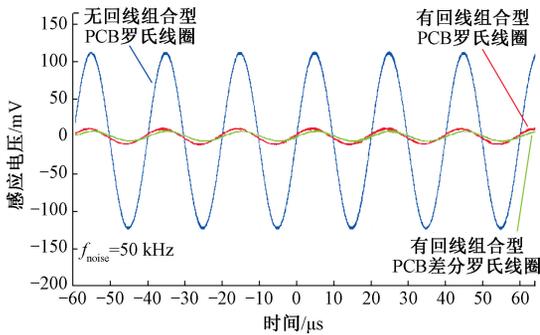


图15 组合型PCB罗氏线圈抗干扰测试结果

Fig. 15 The combined PCB Rogowski coil anti-interference test results

从图15可以看出,无回线组合型PCB罗氏线圈抗干扰能力较差,其感应电压 $v_{\text{noise}}$ 较大,峰峰值为239.6 mV。这是由于没有设计回线,也没有差分设计,同时受到电场干扰和磁场干扰的影响。有回线组合型PCB罗氏线圈相较于无回线组合型PCB罗氏线圈感应电压 $v_{\text{noise}}$ 峰峰值显著降低,为24.4 mV。回线的设计有效抑制了磁场干扰,但由于缺少差分设计,线圈仍然受到电场干扰的影响。采用组合型PCB差分罗氏线圈后,其感应电压 $v_{\text{noise}}$ 峰峰值进一步降低为14.4 mV。在对比了3种不同结构的PCB罗氏线圈后,有回线组合型PCB差分罗氏线圈在抑制电磁干扰方面更有效。

#### 4.4 组合型PCB差分罗氏线圈电流传感器扩展带宽性能对比验证

实验采用配备内置函数发生器的鼎阳SDS2502X Plus示波器,该设备能够扫描10 Hz~50 MHz频率范围内的正弦波,同时测量罗氏线圈的输入和输出,并绘制波特图。鼎阳SDS2502X Plus示波器的内置函数发生端口输出10 Hz~10 MHz频率的信号,该信号通过一个10 Ω电阻接地,从而产生待测电流 $i_{(t)}$ 。测量通道CH1通过10 Ω电阻间接得到待测电流 $i_{(t)}$ ,而线圈的输出端则连接到CH2以获取线圈感应电压,示波器通过计算CH2和CH1的比值绘制频率特性曲线。测试原理如图16所示。分别对有回线组合型PCB罗氏线圈电流传感器和有回线组合型PCB差分罗氏线圈电流传感器进行测试,记录两种线圈在不同频率下的测量数据,包括线圈感应电压 $u_{\text{coil}(t)}$ 、输入电压 $U_{\text{in}}$ 和频率 $f$ 。最后,利用MATLAB软件生成波特图,如图17所示。

从图17可以看出,有回线组合型PCB罗氏线圈电

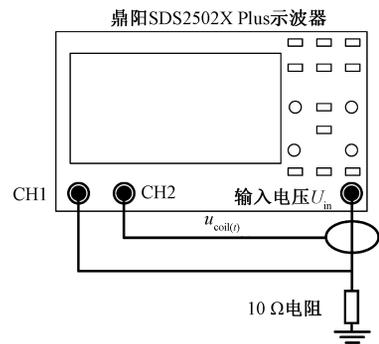


图16 测试原理

Fig. 16 Test schematic

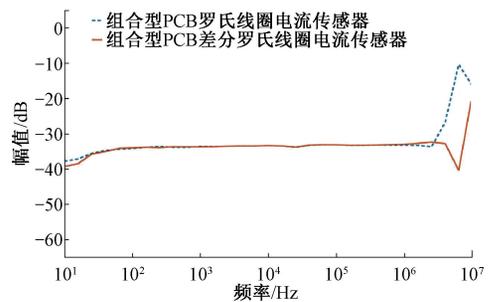


图17 有回线组合型PCB罗氏线圈电流传感器和有回线组合型PCB差分罗氏线圈电流传感器的测量带宽

Fig. 17 Measurement bandwidth of the loop-based combined PCB Rogowski coil current sensor and the loop-based combined PCB differential Rogowski coil current sensor

流传感器的测量带宽为19 Hz~2.5 MHz,采用差分设计后,有回线组合型PCB差分罗氏线圈电流传感器的测量带宽为22 Hz~5 MHz,测量带宽相比于有回线组合型PCB罗氏线圈电流传感器提升了两倍。这是因为差分设计可以在保持灵敏度不变的情况下,有效的降低罗氏线圈的寄生参数,进而降低了寄生参数对带宽的影响。

## 5 结论

本文针对罗氏线圈的带宽与其灵敏度和抗干扰能力之间存在权衡关系问题,提出了组合型PCB差分罗氏线圈结构。结合理论分析、有限元建模仿真和实验研究,得到如下结论。

1) 有回线组合型PCB差分罗氏线圈电流传感器在1~100 A电流范围内工频测量时,灵敏度为3.46 mV/A,线性度为0.56%,具有良好的线性关系。在10~100 A工频电流范围内,最大相对误差为1.73%。此外,通过抗干扰能力测试,验证了传感器具有良好的抗干扰性能。

2)有回线组合型PCB差分罗氏线圈由于设计了回线和差分结构,相比于其他两种结构能更有效抑制磁场和电场干扰。

3)有回线组合型PCB差分罗氏线圈电流传感器相比于有回线组合型PCB罗氏线圈电流传感器带宽提升了两倍,同时又不降低其灵敏度,符合智能电网转型对传感器的需求。

## 参考文献

[1] 李振华,崔九喜,卢和平,等. 电力系统宽频宽动态电流测量技术研究综述[J]. 高电压技术,2024,50(8):3421-3439.

LI ZH H, CUI J X, LU H P, et al. Review of wideband and wide-dynamic-range current measurement techniques in power systems[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3421-3439.

[2] 陈昌鑫,郭文超,冉召会,等. 罗氏线圈与隧道磁阻复合的电流测试方法[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(8):151-158.

CHEN CH X, GUO W CH, RAN ZH H, et al. Research on the current measurement technology of the combination of Rogowski coil and tunnel magnetoresistance sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 151-158.

[3] 陈佳旗,贾春荣,邸志刚,等. 电子式电流互感器应用现状及发展趋势[J]. 电子测量技术,2022,45(17):144-152.

CHEN J Q, JIA CH R, DI ZH G, et al. Development status and challenges of electronic current transformer[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(17): 144-152.

[4] SUN H Y, HUANG S L, PENG L SH. High-current sensing technology for transparent power grids: A review[J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2024, 5:326-358.

[5] 王航,黄炳,廖雁群,等. 基于表面磁场反演的三芯电缆相电流测量方法[J]. 中国电机工程学报,2025,45(3):1182-1194.

WANG H, HUANG B, LIAO Y Q, et al. Phase current measurement of three-core cables based on inverse analysis of surface magnetic field[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(3): 1182-1194.

[6] 林其伟,文玉梅,邵壮,等. 采用无源磁传感标签的交流电流无线监测:测量及标定[J]. 仪器仪表学报,2023,44(12):270-279.

LIN Q W, WEN Y M, SHAO ZH, et al. Wireless monitoring of AC current using passive magnetic sensor tags: Measurement and calibration[J]. Chinese Journal

of Scientific Instrument, 2023, 44(12): 270-279.

[7] 温从众,沈雅峰,丁迅. 智能电网监测传感器设计与研究[J]. 传感技术学报,2023,36(2):210-217.

WEN C ZH, SHENG Y F, DING X. Design and research of smart grid monitoring sensors[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(2): 210-217.

[8] 朱俊宇,曾春平,索春光,等. 基于遗传算法的三相四芯电缆相电流重构方法[J]. 仪器仪表学报,2024,45(4):307-316.

ZHU J Y, ZENG CH P, SUO CH G, et al. A phase current reconstruction method of three-phase four-core power cable based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(4): 307-316.

[9] XU SH Q, HUANG W ZH, WANG H, et al. A simultaneous diagnosis method for power switch and current sensor faults in grid-connected three-level NPC inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 38(1): 1104-1118.

[10] 杨杜兵,张家洪,陈福深,等. 铌酸锂集成MZI型光波导大电流传感器[J]. 仪器仪表学报,2021,42(11):87-95.

YANG D B, ZHANG J H, CHEN F SH, et al. Lithium niobate integrated MZI optical waveguide high current sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 87-95.

[11] XU Q M, FENG Y, GUO P, et al. Design of PCB Rogowski coil current sensor with low droop distortion[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(4): 5513-5523.

[12] SHI Y F, XIN ZH, LOH P C, et al. A review of traditional helical to recent miniaturized printed circuit board Rogowski coils for power-electronic applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 12207-12222.

[13] 杨晓光,金双双,朱波,等. 直流叠加脉冲电流波形宽频带电流传感器[J]. 仪器仪表学报,2017,38(12):3036-3043.

YANG X G, JIN SH SH, ZHU B, et al. Current sensor for DC superimposed with impulse current waveform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(12): 3036-3043.

[14] SHAFIQ M, STEWART B G, HUSSAIN G A, et al. Design and applications of Rogowski coil sensors for power system measurements: A review[J]. Measurement, 2022, 203: 112014.

[15] YUE X X, ZHU G R, WANG J V, et al. PCB Rogowski

- coils for capacitors current measurement in system stability enhancement [J]. *Electronics*, 2023, 12(5): 1099.
- [16] 谢潇磊,刘亚东,刘宗杰,等. 高频差分绕线 PCB 罗氏线圈设计[J]. *仪器仪表学报*, 2015,36(4):886-894. XIE X L, LIU Y D, LIU Z J, et al. Design of high frequency differential winding PCB Rogowski coil [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(4): 886-894.
- [17] LI H, XIN ZH, LI X, et al. Extended wide-bandwidth Rogowski current sensor with PCB coil and electronic characteristic shaper [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 36(1): 29-33.
- [18] LIU X Y, HE Y G, HUANG H, et al. A method for increasing the bandwidth of Rogowski coils without changing their size [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1501310.
- [19] 李赫. 基于 PCB 罗氏线圈的碳化硅功率器件运行电流高频感知技术研究[D]. 天津:河北工业大学, 2022. LI H. Research on high frequency sensing technology of SiC power device operating current based on PCB Rogowski coil [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2022.
- [20] 许震,明磊,石亚飞,等. 基于双绞线型四层 PCB 罗氏线圈的碳化硅器件开关电流测量[J]. *电机与控制学报*, 2021,25(12):46-57. XU ZH, MING L, SHI Y F, et al. Switch current measurement of SiC device based on twisted-pair four-layer PCB Rogowski coil [J]. *Electric Machines and Control*, 2021, 25(12): 46-57.
- [21] FRITZ N, NEEB C, DONCKER R W D. A PCB integrated differential Rogowski coil for non-intrusive current measurement featuring high bandwidth and  $dv/dt$  immunity [J]. *Power and Energy Student Summit (PESS)*, 2015.
- [22] HAIN S, BAKRAN M M. New Rogowski coil design with a high  $DV/DT$  immunity and high bandwidth [C]. 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). IEEE, 2013: 1-10.
- [23] WANG R X, PRABHAKARAN S, BURDICK W, et al. Rogowski current sensor design and analysis based on printed circuit boards (PCB) [C]. 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2014: 3206-3211.
- [24] 魏新劳,朱博,庞兵,等. 拆装式 PCB 型 Rogowski 线圈的研究[J]. *电机与控制学报*, 2015,19(4):7-13. WEI X L, ZHU B, PANG B, et al. Research on PCB Rogowski coils of field assemble [J]. *Electric Machines and Control*, 2015, 19(4):7-13.
- [25] 李秋惠. 基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器高精度传感技术研究[D]. 宜昌:三峡大学, 2019. LI Q H. Research on high precision sensing technology of electronic current transformer based on Rogowski coil [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019.
- [26] 高干,文玉梅,李平. 三芯电缆非侵入式多导体电流测量研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024,45(4):127-135. GAO G, WEN Y M, LI P. Research on non-invasive multi conductor current measurement of three-core cables [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(4): 127-135.
- [27] HU CH, LI H B, JIAO Y, et al. Comparative analysis of various models of Rogowski coil for very fast transient study [J]. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2018, 13(9): 1319-1327.
- [28] 王黎明,贺旭. 插板式 PCB Rogowski 线圈的计算与仿真[J]. *高压技术*, 2013,39(5):1025-1033. WANG L M, HE X. Calculation and simulation of combined PCB-based Rogowski coils [J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(5): 1025-1033.

## 作者简介



李海青, 2022 年于湖南理工学院获得学士学位, 现为昆明理工大学硕士研究生, 主要研究方向为非接触电流测量。

E-mail: 1581019711@qq.com

Li Haiqing received his B. Sc. degree from Hunan Institute of Science and Technology in 2022. He is currently a M. Sc. candidate at Kunming University of Technology. His main research interest is non-contact Current measurement.



张文斌(通信作者), 分别在 2004 年和 2009 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位和博士学位, 现为昆明理工大学教授, 硕士生导师, 主要研究方向为非接触电压电流测量, 电磁测量及电磁场传感器、智能传感器及信息处理等。

E-mail: zwbseg@126.com

Zhang Wenbin (Corresponding author) received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Harbin University of Technology in 2004 and 2009, respectively. He is currently an associate professor and a M. Sc. supervisor at Kunming University of Technology. His main research interests include non-contact voltage and current measurement, electromagnetic measurement and electromagnetic field sensor, intelligent sensor and information processing etc.