

基于多层可级联PCB空心线圈的磁场测量单元设计

徐嘉龙¹, 祝邴伟², 王晓宇², 严华江², 杨帆³, 沈晓明²

(1. 国网浙江省电力公司, 杭州 310007; 2. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 杭州 310014;

3. 重庆大学电气工程学院输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为准确测量复杂电磁环境下特定频率的磁场信号,文中设计一种基于多层可级联PCB空心线圈的磁场信号测量单元。首先根据线圈的结构设计参数建立感应电压与磁场的线性函数关系式,接着构建带通滤波放大电路和锁相放大电路,滤除工频电磁干扰和增强测量单元的抗干扰能力。实验室单个、多个圆形载流回路磁场测量实验表明,磁场测量单元能够准确测量所需频率的微小磁场信号,误差在10%以内。实验结果表明,设计的磁场测量单元具有较好的性能,能够满足变电站接地网腐蚀检测时注入幅值1 A、频率1 kHz的交流激励电流所产生磁场的测量需求。

关键词: 线圈; 锁相放大; 磁场; 接地网

Design of Magnetic Field Measurement Unit Based on the Multi-layer and Cascade PCB Air-core Coil

XU Jialong¹, ZHU Liwei², WANG Xiaoyu², YAN Huajiang², YANG Fan³, SHEN Xiaoming²

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation Research Institute, Hangzhou 310014, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Under the complicated electromagnetic environment, this paper designs a measurement unit to measure the specific frequency signal of magnetic field accurately. Firstly, the linear function between the induction voltage and the magnetic field is built by the design parameters and structure of the measurement unit. Secondly, the band-pass filter amplifier circuit and the lock-in amplifier circuit are built to filter the power frequency electromagnetic interference and enhance the anti-interference ability of the measuring unit. The single and multiple circular current-carrying loop experiments in the lab show that the magnetic field measurement unit can detect the tiny magnetic field signal of required frequency, and the error is within 10%. The results show that the magnetic field measurement unit has a good performance, and meets the need of magnetic field measurement in the corrosion detection of grounding grid while the amplitude and frequency of AC excitation current are 1 A and 1 kHz.

Key words: coil; lock-in amplification circuit; magnetic field; grounding grid

0 引言

接地网性能良好是保证变电站安全稳定运行的重要条件,一般用扁钢铺设于地底0.6~2 m处,用以排泄大电流、降低地电位升。扁钢易腐蚀,为了预防因接地网的腐蚀断裂而引起电力系统故障,需要

在接地网运行一定年限后对接地网进行腐蚀故障诊断^[1-2],国内外许多学者在这一领域做出研究,取得了丰硕成果^[3-11]。其中,基于磁场法的接地网故障诊断是向接地网注入一个特定频率的交流激励电流,通过探测其在接地网地表上方产生的响应磁场分布来诊断接地网状态,磁场的准确测量是接地网故障诊断过程中的一个关键性环节。

目前比较成熟的磁场测量方法有:磁力法、电

收稿日期:2016-04-20; 修回日期:2016-06-05

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5211DS120348)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid(5211DS120348).

磁感应法、磁共振法、超导效应法和磁光效应法等^[12-15]。其中,电磁感应法以检测线圈为基础,通过测量交变磁场在线圈上的感应电压来实现对磁场信号的检测。文[16]介绍了一种利用 Rogowski 线圈的电磁效应实现对脉冲强磁场测量的方法,但局限于 Rogowski 线圈的特性,只适用于强磁场和脉冲磁场的测量;文[17]提出了一种 PCB 型 Rogowski 线圈的设计原则,用于提高雷电流测量用线圈的准确度;文[18-19]介绍了一种利用电磁感应原理测量变电站接地网特定激励电流的响应磁场大小来判断接地网腐蚀状态的方法,其中使用的磁场探测线圈采用人为绕制,线圈匝数固定,对磁场的测量具有一定的局限性和人为误差,不适合大量制作;文[20-22]介绍了 PCB 绕制线圈的特点和应用用于电流互感器设计领域所取得成果,采用印制电路板(printed circuit board, PCB)制作的空心线圈具有测量准确度高、稳定性和参数一致性好等优点,适合于工业化生产^[19]。然而目前基于 PCB 绕制线圈在磁场测量领域的相关应用设计鲜见文献论述,文中将 PCB 绕制线圈应用于磁场测量单元,结合变电站现场的电磁环境,设计一种基于矩形 PCB 空心线圈的磁场测量单元,实现对微弱磁感应强度信号(nT 级)的有效测量,测量系统具有很好的信号识别能力。

文中设计的磁场测量单元由多层矩形 PCB 空心绕制线圈、带通滤波放大电路和锁相放大电路组成。笔者首先介绍线圈的结构及测量原理,采用多层板结构,通过过孔连接不同板层导线的首尾端点,实现线圈的同向和均匀绕制;通过线圈间的级联,实现匝数的扩展。基于电磁感应方法,建立磁感应强度与感应电压的线性函数关系式,通过测量感应电压间接测量磁场大小。然后介绍磁场测量单元的带通滤波电路和锁相放大电路的设计与实现,滤除工频电磁干扰和增强测量单元的抗干扰能力,提高对被测目标信号的识别能力。最后通过实验室单个圆形载流回路和多个圆形载流回路的磁场测量实验,验证文中设计的磁场测量单元的准确性和在干扰信号存在的情况下能够较为准确地测量特性频率的磁场信号。表明文中设计的磁场测量单元具有可行性,能够应用于复杂电磁环境下的特定频率磁场测量。

1 PCB 空心线圈结构与原理

1.1 线圈结构设计

PCB 空心线圈采用矩形多层板结构,每一层与上下层的导线通过过孔首尾衔接,保证导线的走向

一致,同时线圈的表层和底层预留出信号的注入和流出端焊盘,使线圈与线圈之间能够叠加。以 4 层板为例,线圈每一层的结构见图 1。图 1 中:a、b、c 为过孔;p 为表层的信号注入端焊盘;q 为底层的信号流出端焊盘。各层的导线位置重合,避免不同层之间的涡流产生。线圈各个边上的通孔为线圈之间级联叠加的固定孔,也可用作外接导线的过孔。

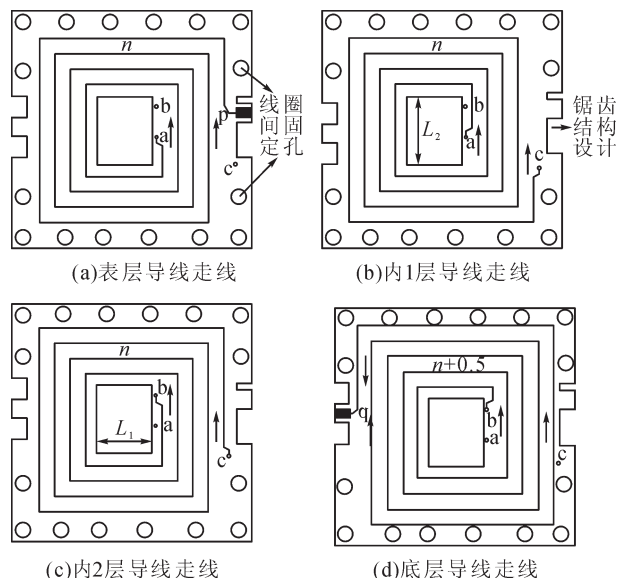


图 1 PCB 空心线圈结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the PCB air-core coil

设线圈的矩形空心边长分别为 L_1 和 L_2 , 单层线圈的匝数为 n , 则整个线圈的有效面积为 $S=L_1L_2$, 线圈的有效匝数 $N=4n+0.5$ 。

在磁场测量的应用过程中,可以根据被测磁场的大小,调整线圈的单层设计匝数 n 与线圈的有效面积 S 。同时,在单层线圈匝数 n 固定不变的情况下,可以通过线圈的级联叠加来增加整个探测线圈的匝数 N 。线圈的叠加方式采用锯齿交错向上叠加,锯齿设计如结构示意图 1 中左右两边所示。

1.2 磁场测量原理

如图 2 所示,向接地网注入一个频率为 f_c 的交流激励电流,在其上方空间会产生一个频率为 f_c 的感应磁场 B 。将设计的磁场测量单元置于其中,线圈其与磁场的方向夹角为 θ 。

接地网上方产生的感应磁场 B 为

$$B=B_m \sin(2\pi f_c t) \quad (1)$$

此时,穿过线圈的有效磁通量 Ψ 为

$$\Psi=NSB \cos \theta=NSB_m \sin(2\pi f_c t) \cos \theta \quad (2)$$

在线圈上产生的感应电动势 ε 为

$$\varepsilon=\frac{d\Psi}{dt}=2\pi f_c NSB_m \cos(2\pi f_c t) \cos \theta \quad (3)$$

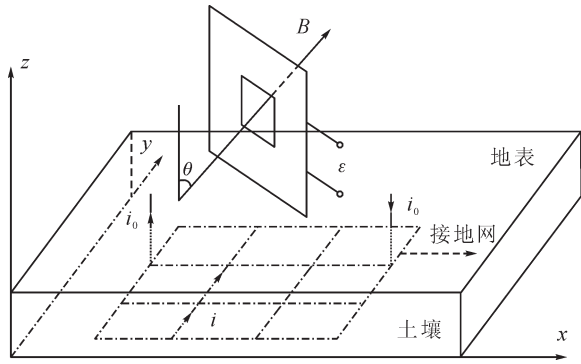


图2 磁场测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of magnetic field measurement

将该线圈的输出接入到一个通带增益为 A 的带通滤波器之后,其输出感应电压 U_0 为

$$U_0 = A \varepsilon = 2\pi f_c N S B_m A \cos(2\pi f_c t) \cos\theta. \quad (4)$$

令

$$k = 2\pi f_c N S A. \quad (5)$$

则有

$$U_{om} = k B_m \cos\theta. \quad (6)$$

也就是说

$$B_m = U_{om} / (k \cos\theta). \quad (7)$$

式(1)~(7)中: U_{om} 是输出感应电压的幅值; B_m 为接地网上方激励电流的感应磁场幅值; k 为常值比例系数; $\cos\theta$ 为线圈与磁场方向的夹角。

当已知磁场的方向时,可以令 $\theta=90^\circ$,此时有

$$B_m = U_{om} / k. \quad (8)$$

线圈经过带通滤波放大器后的输出感应电压幅值 U_{om} 与感应磁场的幅值 B_m 成线性关系,且两者都是正弦波形,频率相同。由于两者呈线性关系,具有很好的灵敏度。

因此,可以通过测量磁场在线圈上的感应电压输出来间接测量磁场信号的大小;同时也可以根据感应电压的频率特性反推磁场信号的频率特性。如果当磁场方向未知,可以通过旋转线圈的方式来观察输出感应电压的大小,根据感应电压最大时,线圈方向的垂直方向为磁场方向,由此确定磁场方向,并完成对磁场信号的测量。

2 信号处理

考虑到向现场变电站接地网注入的交流电流不能太大,其响应磁场信号很微弱,在离地面 $0.5\sim 1$ m 时一般只能达到 $10^{-9}\sim 10^{-8}$ T 级别,导致线圈的感应电压输出也很小,为 $10^{-7}\sim 10^{-5}$ V 级别;另外变电站现场的工频干扰及工频基次谐波干扰很强^[13],导致很难直接测量此感应电压值,需要对其进行放大和

滤波处理。将信号放大到 $10^{-4}\sim 10^{-3}$ V 级别后,就可以利用锁相放大电路对信号进行提取。

2.1 滤波放大

文中设计的磁场测量单元的信号处理部分采用由高通滤波器与带通滤波器串联成一个多级带通滤波放大电路对感应电压信号进行滤波放大,后送入锁相放大电路进行信号提取。

高通滤波器采用压控电压源型电路,其截至频率设计为 $10\sim 20$ Hz,单级二阶高通滤波器电路见图3,其具有放大倍数易调的特点。

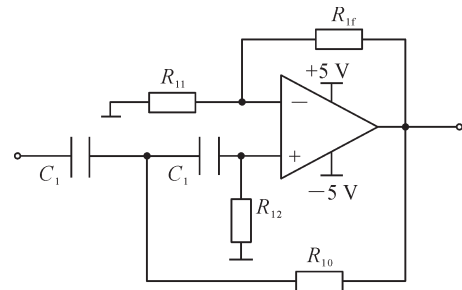


图3 有源高通滤波器电路

Fig. 3 Active high-pass filter circuit

通过调整 R_{1f} 与 R_{11} 的值,能够方便地调整通带的放大倍数且不影响通带范围。高通滤波器的功能有两点:

1)变电站的工频干扰很强,直接采用工频陷波或者带通滤波无法滤除完全,需采用截止频率很低的高通滤波电路首先对其进行一定倍数的衰减,然后通过带通滤波器将其滤除干净;

2)通过前端的高通滤波电路来对整体的带通滤波电路的通带放大倍数进行微调,来实现对放大倍数的精确设计。

带通滤波器也采用压控电压源型电路,其中心频率与交流激励电流源的频率相同。单级带通滤波器电路见图4,其具有通带容易确定的特点。

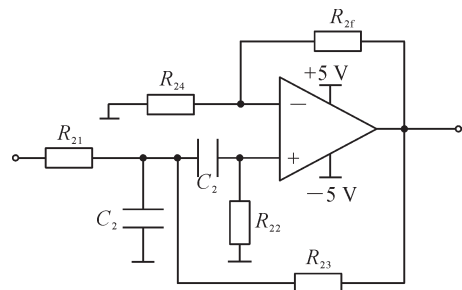


图4 有源带通滤波器电路

Fig. 4 Active band-pass filter circuit

通过后级的带通滤波器,确定整体带通滤波电路的通带范围。

在磁场测量单元的实际设计与实现过程中,采用四阶高通滤波电路串联八阶带通滤波电路串联组成最终的带通滤波电路,考虑到磁场测量范围,带通滤波电路的放大倍数可设计为 100~10 000 倍可调。

测量单元的带通滤波器设计思路见图 5。

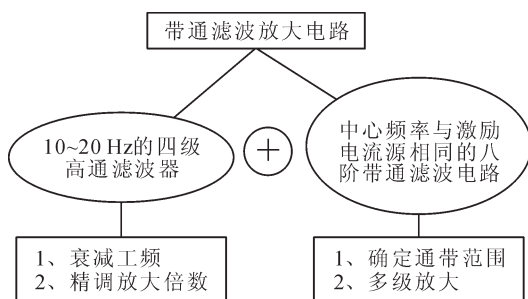


图 5 单元带通滤波电路设计思路

Fig. 5 The design of band-pass filter circuit

通过这种思路,能够得到放大倍数高、通带范围易调且性能优异的带通滤波电路。

在实际的设计与调试实现过程中,需要注意以下两点:①高通滤波器的电容 C_1 不能太大,否则微小的信号无法正常通过;②后级带通滤波器的电容 C_2 不能太小,否则整个电路会出现自激震荡,导致放大倍数无法达到设计要求。带通滤波电路的实测效果良好,能够完成对微小信号的万倍级放大。

2.2 锁相放大

感应电压信号经过滤波放大之后,使输出信号达到 0.1~1 mV 级别,但会夹杂着未滤除干净的工频基次谐波信号,之后采用锁相放大电路对信号做进一步的提取。锁定放大是一种从干扰噪声中分离小窄带信号的方法,充当检测器和窄带滤波器的作用,能够在复杂电磁环境下检测出非常小的被测目标信号^[2]。锁相放大电路的原理见图 6。

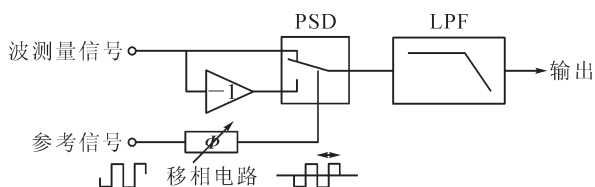


图 6 锁相放大电路原理

Fig. 6 The principle of lock-in amplification circuit

被测量信号经过相敏检波器 PSD(phase sensitive detector)进行同步检波,实现频率变换;同时通过移相电路对参考信号进行相位调节,使被测信号与参考信号的频率和相位达到一致,再通过低通滤波器(LPF)实现对被测信号的提取和测量。

锁相放大电路采用高精度平衡调制器 AD630

芯片实现,内部有两路信号处理通道。其信号处理包括:平衡调制和解调、同步检波、相位检测、正交检波、相敏检测、锁定放大以及方波乘法。芯片上应用电阻网络提供 ± 1 和 ± 2 的精密切环增益,精度为 0.05% (AD630B)。锁相放大电路见图 7。

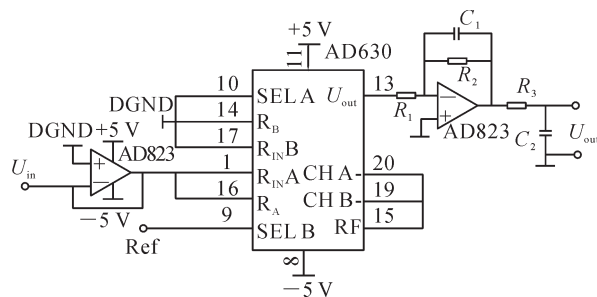


图 7 锁相放大电路

Fig. 7 Lock-in amplification circuit

在被测目标信号的频率和相位特性已知的前提下,采用单路信号处理通道,另一路短接。被测信号 U_{in} 经过一个电压跟随器缓冲电路通过 $R_{IN A}$ 输入 AD630 芯片,参考信号由 SELB 端输入 AD630,输出端外接一个有源低通滤波器,通过微控制器编程控制选择 AD630 实现锁定放大功能,完成复杂干扰环境下的微小被测信号的测量和提取。

在测量接地网的感应磁场时,将注入接地网的交流激励电流输出作为锁相放大芯片的参考信号输入。

3 测量单元性能测试

在磁场测量单元实现后,进行了数据测量的准确性和在干扰信号存在下的抗干扰能力与对被测信号的提取能力测试。

3.1 测量准确性

为了测试磁场测量单元数据测量的准确性,定制一组有微小开口和两个平行引出线的圆形导线,利用课题组的标准交流激励源 XJ-IIIB 将幅值为 1 A、频率为 1 kHz 的交流电流通过平行引线注入此圆形导线形成一个圆形载流回路;同时也将输出的交流电流作为锁相放大芯片 AD630 的参考信号输入,采用 4 块 4 层 PCB 矩形空心线圈串联叠加组成磁场测量系统的线圈部分,线圈的输出端接带通滤波电路、锁相放大电路和示波器进行测试。测试过程中,线圈平面与圆形载流回路平面平行且线圈的中心与圆形回路的轴线重合;即通过线圈测量圆形载流回路轴线上的磁感应强度。改变圆形载流回路的半径 a ,利用示波器记录测量得到的感应电压幅值大小,通过测量线圈单元输出的感应电压的大小

来反映圆形载流回路轴线上的磁场大小,并与理论值进行对比,进而验证磁场测量单元所测试数据的准确性。

磁场测量单元的准确性测试示意图见图 8。

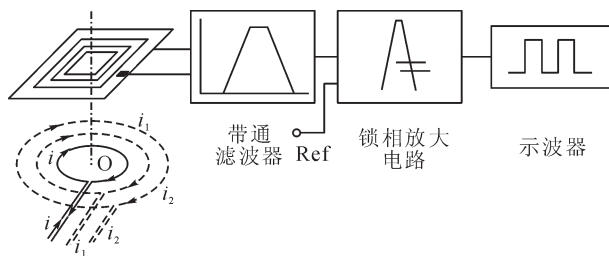


图 8 系统性能测试示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the system performance test

根据电磁场的相关理论,可以计算半径为 a 的圆形载流回路中心轴线上的磁感应强度 B 的幅值大小为

$$B_m = \frac{\mu_0 I}{2a} \quad (9)$$

当圆形载流回路的半径远大于线圈的尺寸时,可近似认为磁场测量单元测量的就是圆形载流回路轴线上的磁感应强度 B 的大小。

测试所采用的测量单元参数分别为:磁场测量线圈的面积 $S=10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,单个线圈的匝数为 $N=192.5$,带通滤波器的通带增益 $A=400$,中心频率为 $f_0=1 \text{ kHz}$,通带范围为 $500 \sim 1700 \text{ Hz}$ 。

根据式(5),带入磁场测量系统的各个参数,可得 $k=2\pi f_c \times 4NSA=1.94 \times 10^5$,此时有

$$U_{\text{om}} = k B_m = \frac{k \mu_0 I}{2a} = \frac{1.94 \times 10^5 \times 4\pi \times 10^{-7}}{2a} \quad (10)$$

测试过程中,分别改变圆形载流回路半径 a 的大小,使 $a_1=5 \text{ cm}$, $a_2=10 \text{ cm}$, $a_3=15 \text{ cm}$, $a_4=20 \text{ cm}$, $a_5=25 \text{ cm}$ 。利用示波器记录测量单元的感应电压输出数值,并与理论值相比较,得出测量单元的测量误差。测试的结果图见图 9,其中线 1 的正弦波形表示的是示波器所记录的测量单元输出的感应电压波形,线 2 的波形所表示的是作为参考信号的交流激励电流波形。

将示波器所记录的感应电压波形幅值读出来,可得到如表 1 所示的数据。

从表 1 中的数据可以看出,文中所设计的磁场测量系统磁场测量误差在 10%以内。当载流环的半径较小时,由于线圈与载流环的尺寸相当,导致其测量误差较高;当载流圆环 $a \geq 15 \text{ cm}$ 时,测量单元的测量误差迅速降低,达到 1.5%左右,具有较高的精度,当磁场信号很小时,也能够比较准确地测量出来。磁场测量单元的线性度见图 10。

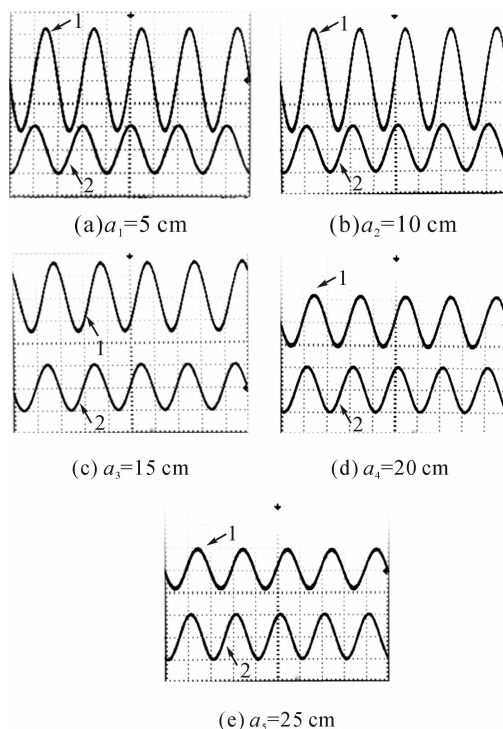


图 9 测试结果

Fig. 9 The test results

表 1 理论值与测量值及其误差

Table 1 The theoretical value and measured value and its error

项目	圆形载流回路半径 a/cm				
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
理论磁场大小 $B/\mu\text{T}$	12.600	6.280	4.190	3.150	2.510
感应电压理论值 U_{om}/V	2.440	1.220	0.813	0.609	0.488
感应电压测量值/V	2.240	1.120	0.800	0.600	0.480
测量误差/%	8.200	8.200	1.600	1.480	1.640

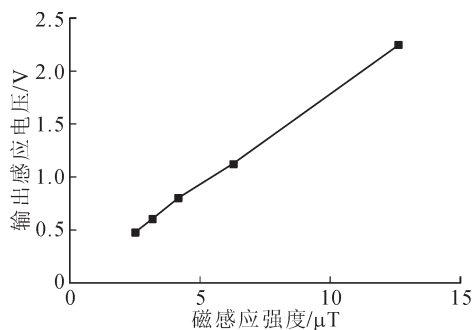


图 10 测量单元的线性度

Fig. 10 The linearity of measurement unit

3.2 抗干扰能力测试

为了测试磁场测量单元的抗干扰能力和在干扰信号存在下对微弱信号提取能力,将半径为 $a=25 \text{ cm}$ 的圆形导线通入幅值 0.1 A 、频率 1 kHz 的交流电流形成一个圆形载流回路,并将其轴线上的磁场作为

被测目标磁场信号,同时在其内部分别放置两组半径不同的圆形载流回路作为干扰信号源。所有圆形载流回路的中心轴线重合,干扰回路中分别通有不同于 0.1 A、1 kHz 的交流电流。测试示意图见图 11。

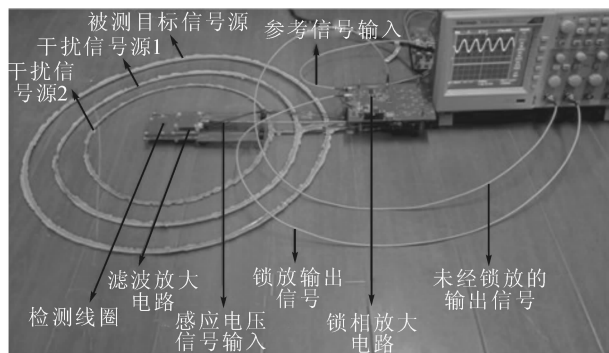


图 11 抗干扰能力测试

Fig. 11 Anti-interference ability test

半径 $a=25$ cm 的单个圆形载流回路的被测目标感应电压信号的准确测量值为 0.048 V。

多次改变作为干扰信号源的圆形载流回路中的电流幅值大小和频率大小,得到的测量结果见表 2。

表 2 实验方案及结果

Table 2 Experimental projects and results

信号类型		$B/\mu\text{T}$	频率/Hz	测量值/V	误差/%
被测信号		0.251	10 00	0.048	—
干扰信	干扰 1	20.000	50	0.044	8.33
号组 1	干扰 2	4.190	1 500		
干扰信	干扰 1	4.190	800	0.046	4.17
号组 2	干扰 2	6.280	1 500		
干扰信	干扰 1	6.280	800	0.045	6.25
号组 3	干扰 2	12.600	1 500		

从表 2 中的数据可以看出,当被测磁场周围存在干扰磁场时,文中设计的磁场测量单元能够有效地抑制干扰,比较准确的将被测目标磁场信号提取出来,误差不超过 10%,具有较高的精度。

根据上述磁场测量单元的性能测试实验,文中所设计的基于多层可级联的 PCB 空心线圈磁场测量单元,具有较高的测量精度,能够从复杂的电磁干扰环境中提取出微小的被测信号,具有较好的性能,能够满足变电站现场的注入幅值 1 A、频率 1 kHz 的交流激励电流所产生的响应磁场的测量需求,具有较高的实用价值。

4 结论

文中设计磁场测量单元基于多层矩形 PCB 空心绕制线圈,线圈导线绕制均匀,制作工艺简单,适于批量化生产;通过锯齿形结构实现线圈间的级联

叠加,扩展线圈匝数,实用性强,适合用作系统装置内部的磁场测量模块,也能独立使用。该磁场测量单元具有以下特点:

1)可以通过调节线圈匝数 N 、线圈面积 S 、叠加的线圈个数 M 与带通滤波器的放大倍数 A 的值来调节磁场测量单元对磁场信号的测量范围和测量灵敏度。

2)采用锁相放大电路能够实现对复杂干扰电磁环境下的被测目标信号的提取,且具有较高的精度。

3)测量单元存在一定的测量误差,主要来自于带通滤波器的实际参数与理论设计值存在误差,测量之前需要对其进行标定,得出准确的放大倍数和中心频率,对 k 值进行标定。

参考文献:

- [1] 许崇武,胡学文. 接地网防腐蚀金属材料性能试验研究[J]. 电网技术,2003,27(8):77-79.
XU Chongwu, HU Xuewen. Investigation of anti-corrosive metallic material for earthing grid[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 77-79.
- [2] SVERAK J G, DICK W K, DODDS T H, et al. Safe substation grounding part I[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(9): 4281-4290.
- [3] 刘渝根,田 资,钱国超,等. 基于遗传算法的接地网腐蚀故障诊断研究[J]. 高压电器,2013,49(7):18-24.
LIU Yugen, TIAN Zi, QIAN Guochao, et al. Research of fault diagnosis of grounding grid corrosion based on genetic algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(7): 18-24.
- [4] 朱凌峰,周力行,王 攀,等. 基于非均匀 FDTD 法的杆塔接地体腐蚀的暂态接地阻抗计算[J]. 电瓷避雷器,2015(5):82-85.
ZHU Lingfeng, ZHOU Lixing, WANG Pan, et al. Transient grounding impedance calculation for tower grounding body corrosion based on the non-uniform FDTD algorithm[J]. Insulators and Surge Arresters, 2015(5): 82-85.
- [5] 徐 松,冯 兵,何铁祥. 输电杆塔镀锌接地引下线腐蚀分析[J]. 电瓷避雷器,2014(4):121-1266.
XU Song, FENG Bing, HE Tiexiang. Investigation of the corrosion of the galvanized grounding lead of transmission tower[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(4): 121-126.
- [6] 张蓬鹤,何俊佳,尹小根. 采用模糊理论的接地网故障诊断方法[J]. 高压电器,2011,47(5):54-58.
ZHANG Penghe, HE Junjia, YIN Xiaogen. Method of grounding grid fault diagnosis based on fuzzy theory[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(5): 54-58.
- [7] 许 磊,李 琳. 基于电网络理论的变电站接地网腐蚀及断点诊断方法[J]. 电工技术学报,2012,27(10):270-276.

- XU Lei, LI Lin. Fault diagnosis for grounding grids based on electric network theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 270-276.
- [8] 张秀丽, 骆平, 莫逆, 等. 接地网腐蚀状态电化学检测系统的开发与应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 152-156.
- ZHANG Xiuli, LUO Ping, MO Ni, et al. Development and application of electrochemical detection system for grounding grid corrosion state[J]. Proceeding of the CSEE, 2008, 28(19): 152-156.
- [9] 付志红, 余慈拱, 侯兴哲, 等. 瞬变电磁法视电阻率成像的接地网断点诊断方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 253-259.
- FU Zhihong, YU Cigong, HOU Xingzhe, et al. Transient electromagnetic apparent resistivity imaging for break point diagnosis of grounding grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 253-259.
- [10] 王晓宇, 何为, 杨帆, 等. 基于微分法的接地网拓扑结构检测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 73-78.
- WANG Xiaoyu, HE Wei, YANG Fan, et al. Topology detection of grounding grids based on derivative method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 73-78.
- [11] 黄志都, 黄续荣, 李明贵. 基于超声导波的接地网腐蚀检测仿真试验[J]. 广西电力, 2015, 38(3): 6-9.
- HUANG Zhidou, HUANG Xurong, LI Minggui. Simulation experiment of grounding grid corrosion detection based on ultrasonic guided wave[J]. Guangxi Electric Power, 2015, 38(3): 6-9.
- [12] 潘启军, 马伟明, 赵治华, 等. 磁场测量方法的发展及应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 7-13.
- PAN Qijun, MA Weiming, ZHAO Zhihua, et al. Development and application of measurement method for magnetic field[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(3): 7-13.
- [13] 沈涛, 冯月, 代海龙, 等. 基于光纤倏逝波传感器的磁场检测[J]. 光学学报, 2015(A01): 83-88.
- SHEN Tao, FENG Yue, DAI Hailong, et al. Measurement of magnetic field based on optical fiber evanescent wave sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2015(A01): 83-88.
- [14] TAMOTSU I, YASUHIKO N, HIROSHI I. Measurement of magnetic field using ultrasonic vibration[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1997, 36(2): 930-934.
- [15] 马平, 杨涛, 谢飞翔, 等. 高温超导量子干涉磁强计的发展现状及其应用[J]. 现代仪器, 2001(5): 28-30.
- MA Ping, YANG Tao, XIE Feixiang, et al. The developments and applications of high T_c SQUID magnetometers[J]. Modern Instruments, 2001(5): 28-30.
- [16] 王锋, 米东, 徐章遂, 等. 基于法拉第电磁感应法的脉冲强磁场测量方法[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 674-677.
- WANG Feng, MI Dong, XU Zhangsui, et al. Measurement of high pulse magnetic field based on faraday electromagnetic induction[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 674-677.
- [17] 李璿, 张传计, 吴士普, 等. 雷电流测量用 PCB 型 Rogowski 线圈研究[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 158-162.
- LI Xuan, ZHANG Chuanji, WU Shipu, et al. Research on PCB Rogowski coil for lightning current measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 158-162.
- [18] 刘洋, 崔翔, 赵志斌, 等. 基于电磁感应原理的变电站接地网腐蚀诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 97-103.
- LIU Yang, CUI Xiang, ZHAO Zhibin, et al. Method of corrosion diagnosis of substations' grounding grids based on electromagnetic induction theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 97-103.
- [19] 刘洋, 崔翔, 赵志斌. 测量磁感应强度诊断变电站接地网断点[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1389-1394.
- LIU Yang, CUI Xiang, ZHAO Zhibin. Method for diagnosing the conductor broken point of grounding grids in substation based on measuring the magnetic induction intensity[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1389-1394.
- [20] 纪哲, 黄纯, 周有庆, 等. 基于 PCB 平面型 Rogowski 线圈的电流互感器误差分析及积分器设计[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 76-78.
- JI Zhe, HUANG Chun, ZHOU Youqing, et al. Error analysis and integrator design for planar rogowski coil current transformer based on PCB[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 76-78.
- [21] 曹志辉, 周有庆, 彭春燕, 等. PCB 空心线圈电流变换器研制[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11): 124-127.
- CAO Zhihui, ZHOU Youqing, PENG Chunyan, et al. Current-voltage converter based on PCB air-core coil[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11): 124-127.
- [22] 王程远, 陈幼平, 张冈, 等. PCB 空心线圈位置误差分析与控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(15): 103-108.
- WANG Chengyuan, CHEN Youping, ZHANG Gang, et al. Analysis and control on the position errors of PCB air-core coils[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(15): 103-108.
- [23] 康跃腾, 胡晓娅, 汪秉文. 基于锁相放大原理的微弱信号检测电路[J]. 电子设计工程, 2013, 21(6): 162-164.
- KANG Yueteng, HU Xiaoya, WANG Bingwen. Weak signal detection circuit based on lock-in amplifier[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(6): 162-164.

徐嘉龙(1970—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网生产和科技管理工作。

祝邴伟(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统设备腐蚀诊断与防护方面研究。