

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2022.206

谐振法手持式智能磁化率仪设计

靳郑伟, 付志红, 张 静

(重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044)

摘要:文章基于谐振原理设计了一款手持式智能磁化率仪, 推导了谐振原理法测量岩石磁化率计算公式, 仿真探究谐振法测量岩石磁化率的影响因素, 结合仿真结果与实际探测需要对仪器进行整体设计。基于 LDC1614 搭建外围电路, 设计了 4 层螺旋线圈等距并联的电感传感器、信号提取程序和上位机操作界面, 完成了磁化率仪样机制作。该仪器轻便易携(重量仅 0.2 kg)、操作简单, 测量结果与国外同类仪器比较误差低于 5%, 仪器精度可达 10^{-7} 。仪器适合野外及实验室测量, 具有实际工程利用价值。

关键词:岩石磁化率; 谐振原理; LDC1614; 平面电感线圈

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)03-075-11

Design of handheld intelligent magnetic susceptibility meter based on resonance method

JIN Zhengwei, FU Zhihong, ZHANG Jin

(School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: In this paper, a handheld intelligent susceptibility meter was designed based on the resonance principle. A calculation formula for the resonance principle method was derived to measure the magnetic susceptibility of rock. Simulation of the influencing factors of the resonance method was conducted to explore the magnetic susceptibility of rock. The overall design of the instrument was informed by the simulation results and actual detection needs. The peripheral circuit was constructed based on LDC1614, and the inductance sensor, signal extraction program, and operation interface for the upper computer were designed. The prototype of the magnetic susceptibility instrument was completed. The instrument is portable (weighing only 0.2 kg) and is easy to operate. The measurement error is less than 5% compared with similar foreign instruments, and the accuracy of the instrument can reach 10^{-7} . It is suitable for both field and laboratory measurements and holds practical engineering value.

Keywords: rock magnetic susceptibility; resonance principle; LDC1614; planar inductance coil

收稿日期: 2022-01-11 网络出版日期: 2022-03-24

基金项目: 国家重点研发计划课题资助项目(2017YFC0601804)。

Supported by the National Key R & D Program Topics of China(2017YFC0601804).

作者简介: 靳郑伟(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩石物性参数测量仪器研制、岩石磁性测量研究, (E-mail) 2825773364@qq.com。

通信作者: 付志红, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) fuzhihong@cqu.edu.cn。

磁化率是表征物质被磁化难易程度的物理量^[1]。在磁法勘探中,岩石的磁性常用磁化率来表示^[2]。通过岩石磁化率值可推测出岩石磁化原理、地质与环境的演化过程和岩石的组成成分,因此,磁化率在物探领域具有极其重要的地位^[3]。

岩石磁化率测量方法主要有交流互感电桥法和自感法^[4]。交流互感电桥主要利用电桥平衡技术^[5],在电感电桥处于平衡状态时通入低频交流电,待测样品因被磁化而影响电感线圈的阻抗,导致电桥平衡被破坏,电桥通过不平衡电压计算样品的磁化率。实际工程应用中交流电桥测量法存在调节电桥平衡难、自动化程度低、信号提取困难等问题^[6]。詹文山^[7]、裴朝等^[8]优化了哈特森电桥的结构从而提高了测量精度,谷静等^[9]基于数字比例技术提升电桥测量精度。目前基于电桥原理制作的磁化率仪有捷克生产的KLY型卡帕桥、南京地质矿产研究所研制的HKB-1型电桥、哈特森电桥等^[10]。自感法主要利用样品在电感线圈中引起的线圈自感变化量来表征样品受磁化程度^[11]。电感测量仪仅能测量元件电感,无法准确得出待测物体磁化率参数。吉林大学查忆秋等^[12]揭示了SM-30磁化率仪工作原理,通过测量LC振荡回路的谐振频率变化量来表征岩石磁化率,给后续研究提供了思路。南京师范大学叶春等^[13]研制的SES-942磁化率仪采用负阻型桥式振荡电路,经过零检测电路将正弦波转换成方波,并通过计数的方法来测量振荡器的谐振频率,但此方法的测量精度受限于硬件电路性能和计数精度。中国地质大学周锡华等^[14]采用大小参数一致的探头上下对称置于磁化场中使输出电压为零,将岩石置于下探头使其感应电压变化,通过上下线圈电压差表征岩石磁化率,但此方法忽略了上方探头电压对测量造成的影响。

笔者基于LC谐振原理,设计了智能化手持式岩石磁化率仪。从测量原理出发分析了基于LC谐振原理的岩石磁化率计算方法,通过仿真探究影响岩石磁化率测量的因素,通过设计等距并联的4层螺旋电感线圈以减小仪器重量,基于LDC1614搭建硬件电路,设计了信号提取程序和上位机操作界面,保证了岩石磁化率测量的准确性和一致性,进一步实现了仪器智能化和小型化,为后续设计提供了新思路。

1 基于LC谐振的磁化率测量原理

在真空中磁感应强度 B 与磁场强度 H 的关系为

$$B = \mu_0 H, \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; I 为磁化电流;对于任意电感线圈,未放置磁介质时线圈电感 L_0 为

$$L_0 = \mu_0 \frac{d}{dl} \int H \cdot ds. \quad (2)$$

对于LC并联传感器,其谐振频率 f_0 ^[15]为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 C}}, \quad (3)$$

式中: C 为传感器电容。传感器电容将磁介质置于振荡状态的LC传感器内,磁介质会因为磁场的磁化作用而产生磁化强度 M ,对于各向同性的物质,磁化强度 M 与原磁场强度 H 之比即为介质的磁化率 κ ,在国际单位制中(SI)三者关系^[16]为:

$$M = \kappa H. \quad (4)$$

此时受磁介质的影响,磁感应强度 B 为:

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M, \quad (5)$$

$$B = \mu_0 (1 + \kappa) H. \quad (6)$$

放置磁介质时线圈电感 L 为

$$L = \mu_0 (1 + \kappa) \frac{d}{dl} \int H \cdot ds. \quad (7)$$

线圈电感会受到填充系数 χ 影响,填充系数取决于线圈磁场与磁介质磁场耦合程度,考虑填充系数放置磁介质时电感量为

$$L = (1 + \chi \kappa) L_0. \quad (8)$$

放置磁介质后电感传感器谐振频率 f 为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(1+\chi\kappa)L_0C}} \quad (9)$$

由于岩石磁化率值比较小,对公式(9)进行泰勒展开并取一阶项,电感传感器谐振频率为

$$f \approx f_0 \left(1 - \frac{1}{2}\chi\kappa\right) \quad (10)$$

岩石引起的线圈频率变化量 Δf 为

$$\Delta f \approx f - f_0 \approx -\frac{1}{2}\chi\kappa f_0 \quad (11)$$

磁介质磁化率 κ 为

$$\kappa = -2 \frac{\Delta f}{\chi f_0} \quad (12)$$

根据公式(12)可知,通过检测放置岩石后线圈的频率变化量及线圈初始谐振频率即可得到岩石的视磁化率值,视磁化率是一个与岩石大小、形状、磁化方向有关的物理参数,借助视磁化率可以推算出岩石的真实磁化率。

2 仿真分析与验证

2.1 岩石磁化模型建立

本研究的关键之处是岩石磁化率与线圈自感量的函数关系。利用 COMSOL Mutiphysics 仿真软件搭建电感磁化岩石模型,验证测量方法的可行性,并探究影响谐振法测量岩石磁化率的关键因素,根据仿真结果优化实验仪器设计。如图1所示,仿真模型由磁化线圈与待测岩样组成,选用环形电感线圈为磁化线圈,岩样为长方体模型,此模型可等效为在磁化线圈下方给线圈添加了导磁性材料。在磁场的作用下,导磁材料被磁化,磁化线圈的电感量会因导磁材料磁化而改变空间中的磁场分布^[17]。仿真模型基于麦克斯韦方程组,物理场选用时谐电磁场,线圈设置为均匀多匝;在国际单位制下磁化率为相对磁导率值减一,因此磁化模型选用相对磁导率磁化,设置软件求解器求解便可得到电感线圈的电感量。

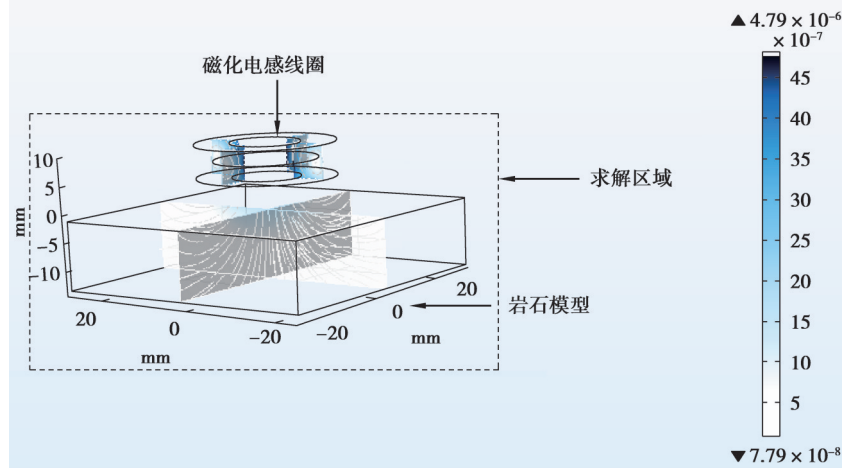


图1 岩石磁化模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rock magnetization model

2.2 提离距离对相对磁导率-线圈电感影响

提离距离是线圈表面与岩样的垂直距离,它主要影响磁化场与待测样品的耦合程度。自然界中绝大部分岩石的相对磁导率为1~2,因此,仿真探究了线圈提离距离为1~10 mm时,岩石模型相对磁导率(1~2)与电感线圈电感量的关系。岩石模型电导率设置为1 S/m,激励频率设置为1 kHz,线圈与岩石模型比例设置为1:1。仿真结果如图2所示。

从图2可知,不同提离距离时岩石相对磁导率-线圈电感曲线存在差异,线圈与岩石提离距离越小,相同

相对磁导率下线圈的电感变化量越大,这是因为提高距离越小,线圈与磁场耦合程度越好。因此,在实际测量时应考虑到提高距离对测量结果影响,保证岩石与线圈紧密结合可提升测量精度。

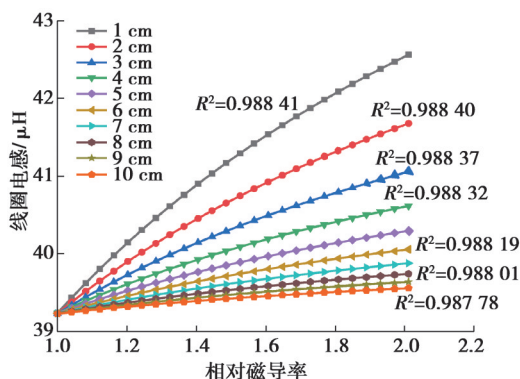


图2 提高距离1~10 mm时相对磁导率-线圈电感关系图

Fig. 2 Relationship between relative permeability and coil inductance at lifting distance of 1~10 mm

2.3 电导率对相对磁导率-线圈电感影响

在交流电的磁化作用下,导电物体内会产生涡流效应,涡流效应会产生反磁场从而抵消岩石磁化场的作用,导致测量到的电感变化量不能真实反映岩石的磁化率。仿真分析岩石电导率($10^3 \sim 10^9$ S/m)对相对磁导率与线圈电感量关系的影响,岩石模型提高距离设定为1 mm,激励频率设置为1 kHz,线圈与岩石模型比例设置为1:1。仿真结果如图3所示。

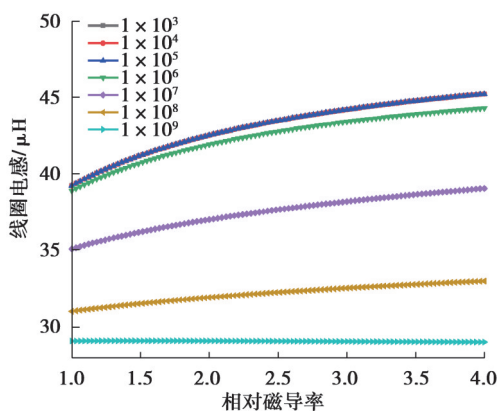


图3 不同电导率下相对磁导率-线圈电感关系图

Fig. 3 Relative permeability and coil inductance at different conductivities

由图3可知,在电导率低于 10^5 时,对应的仿真结果大致重合,这说明电导率较小时,电导率对岩石磁导率-线圈电感函数关系影响不大。随着电导率的增大,涡流效应增强,线圈的电感量会逐渐减小。大部分岩石的电导率很低,因此可以忽略岩石电导率对测量的影响。

2.4 小型岩石磁化率测量影响因素分析

在实际探测中,岩石的形状大小往往是不确定的。对于体积较小的岩石,要想准确评估岩石整体磁性,应将岩样完全置于磁场内。为便于分析,将岩石设置为正方体,探究边长为2~7 cm时相对磁导率与电感量的关系如图4(a)所示。由于岩样体积小于线圈体积,岩样的放置位置明显影响仿真结果,因此,本文进一步探究了岩石边长固定为2 cm时,岩样置于线圈内部不同位置时相对磁导率与电感量的关系如图4(b)所示。岩石模型电导率设置为1 S/m,激励频率设置为1 kHz。

由图4(a)可知,岩石体积越大,电感变化越明显,线性度拟合程度也越高;这是因为岩石越大,岩石在线

圈中的填充率也越高,线圈与磁场耦合越紧密。由图4(b)可以看出,将岩石放置在线圈内不同位置,磁导率与线圈电感的曲线稍有差异,这是线圈内磁场不均匀造成的。由此可得出结论:线圈电感变化量反映的是岩石整体的磁性,由岩样所含磁性成分种类和多少共同决定。相同形状、相同种类岩石,在体积不同时其电感量变化也不一样,在测量时应考虑到岩样的体积因素;提高线圈内部磁场的均匀度,可有效防止岩样放置位置不同而产生的误差。

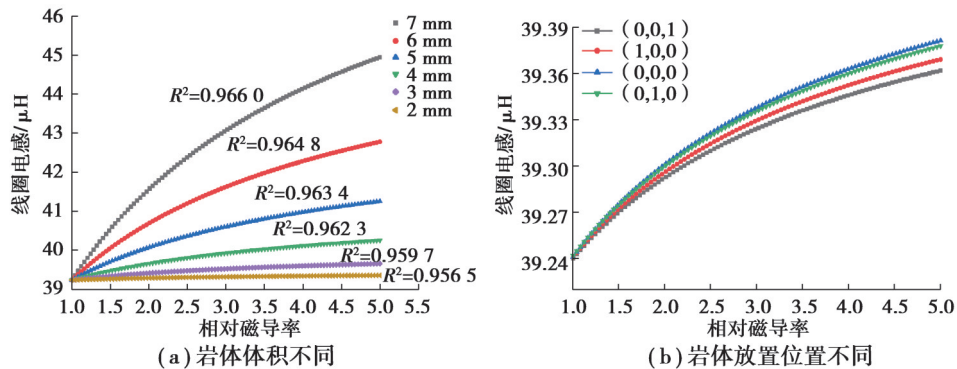


图4 相对磁导率-线圈电感关系

Fig. 4 Relative permeability and coil inductance

2.5 大型岩体磁化率测量影响因素分析

在测量形状较大的岩石或者巨型岩体某一截面的磁性时,由于岩体的面积远大于线圈的截面积,测量时只能将传感器贴近岩样。仿真研究时,岩石设置为正方体,将岩样放置在线圈外部,线圈半径设置为5 cm,探究岩样厚度为2 cm,边长分别为30、40、60、90 cm时(岩样面积远大于线圈面积)岩石磁导率与线圈电感的关系,岩石模型电导率设置为1 S/m,激励频率设置为1 kHz,提高距离设定为1 mm。仿真结果如图5所示。

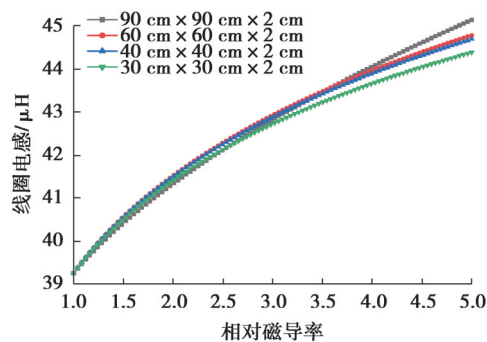


图5 岩体体积不同时相对磁导率-线圈电感关系图

Fig. 5 Coil inductance and relative permeability of rock mass of different sizes

由图5可知,将岩石放置在线圈外部,且电感线圈大小固定的情况下,岩石体积对线圈电感量影响不大,线圈的电感变化量只表征岩石与线圈耦合面的磁性。仿真结果支持运用手持式磁化率仪测量巨型岩体固定截面的岩石磁性。

3 仪器整体设计

3.1 系统设计

基于FPGA设计了手持式磁化率仪测量系统,如图6所示。用户可通过仪器面板上的按键操控仪器,传感器由电感线圈和谐振电容构成的并联回路组成。在FPGA的控制下,高精度数字电感芯片LDC1614通过扫频实时获取LC传感器的谐振频率,测量操作结束后,通过式(12)计算,上位机便可输出所测岩石的磁化率

值。LDC1614有4个通道^[18],可同时对4个岩样进行测量,为保证各通道测量不受影响,各通道之间采用了磁屏蔽手段。

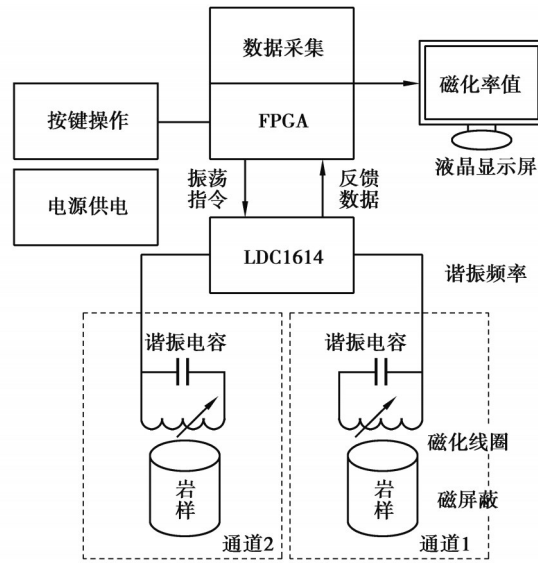


图6 仪器系统工作原理图

Fig. 6 Working principle of instrument system

3.2 仪器硬件设计

硬件电路基于数字电感传感器LDC1614进行设计,此传感器工作原理如图7所示。

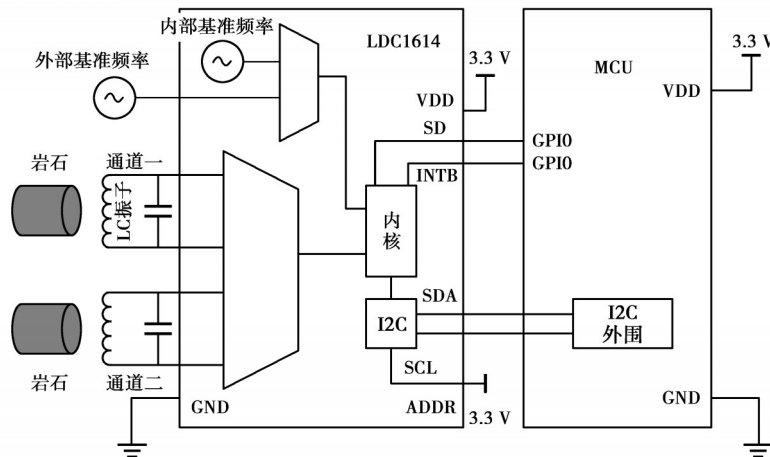


图7 LDC1614工作原理图

Fig. 7 Working principle of LDC1614

芯片外接由探测线圈与谐振电容并联而成的LC振子,在测量操作指令下实时获取LC电路的谐振频率并以28位数字量反馈至上位机,电路中线圈电感量转换为数字量。在实际测量中不同类型的岩石磁性有差异,LC传感器的振荡频率随岩样磁性不同而变化,LDC1614输出值也因此不同,测量不同磁性岩样时传感器的振荡频率如图8所示。

由图8可知,LC传感器振荡时为正弦振荡。顺磁性岩样被磁化后产生的附加磁场会使原磁场增强,从而导致线圈电感量增大,谐振频率减小;反之,逆磁性岩样被磁化后产生的附加磁场会使原磁场减弱,从而导致线圈电感量减少,谐振频率增大。

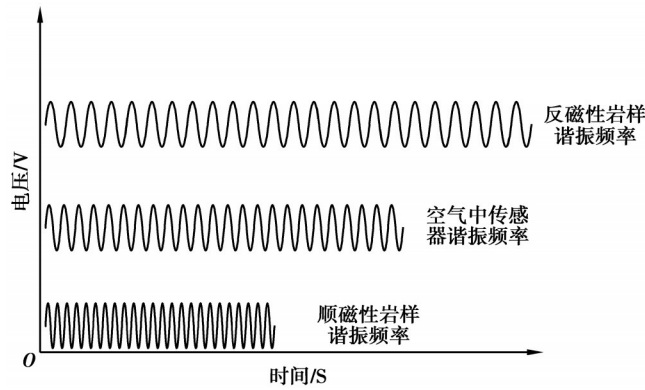


图 8 不同磁性岩样磁化时振荡波形图

Fig. 8 Oscillations of magnetized rock samples with different magnetic properties

3.3 电感线圈优化设计

通过仿真可知,线圈电感与相对磁导率近似呈线性关系,要通过电感变化量反映岩石磁化率大小,应保证磁化线圈满足以下特征:

- 1)线圈能提供一定范围内的均匀磁场,磁场均匀度越好,测量结果越精确;
- 2)根据磁化率的测量原理,对同一样品,电感变化量越大,仪器的分辨率就越高,故应保证线圈电感变化量尽可能大;
- 3)为方便野外探测,该测量仪器应方便易携,传感器体积和重量应尽可能小。

基于以上要求,文中以多层平面电感线圈作为磁化线圈,平面线圈拥有体积小、质量轻,且易携带等优点,与电容配合时拥有较高的品质因素,LDC1614使用手册中也推荐使用平面电感。平面电感线圈设计借助于Webench Inductor Design Tool。根据实际需要设计线圈的层数、匝数、直径、线径宽度厚度和谐振电容大小等信息,软件将自动生成线圈的PCB原理图,给出线圈的电感量、谐振频率和电阻等信息。

为使线圈与谐振电容良好地配合,平面线圈可通过调节线圈匝数、层数得到所需的电感值。适当增大线圈层数,可在不改变线圈体积的情况下增大线圈自身电感量、提升线圈磁场强度。综合考虑,电感传感器采用4层平面线圈等距并联的方式,电感线圈绕线模型如图9(a)所示,4层线圈绕线时应使每层线圈磁场方向相同,起到磁场叠加的效果。线圈实物图如图9(b)所示。

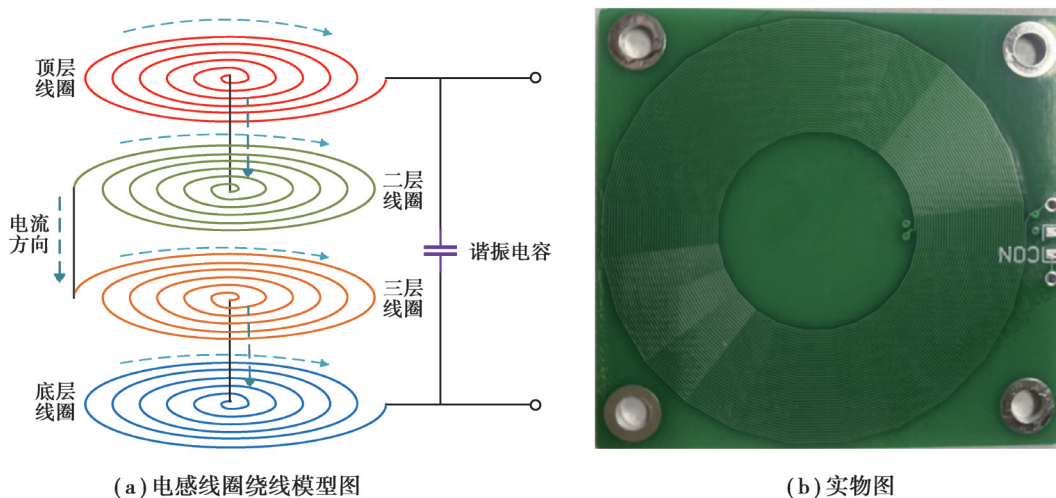


图 9 4层螺旋线圈等距并联的平面电感线圈图

Fig. 9 Planar inductor coil with 4 helical coils equidistant in parallel

为探究4层平面电感线圈磁场特性及磁导率-线圈电感关系,采用有限元仿真软件ANSYS Maxwell建立4层螺旋线圈模型,模拟出4层电感线圈的磁场分布特性如图10所示。

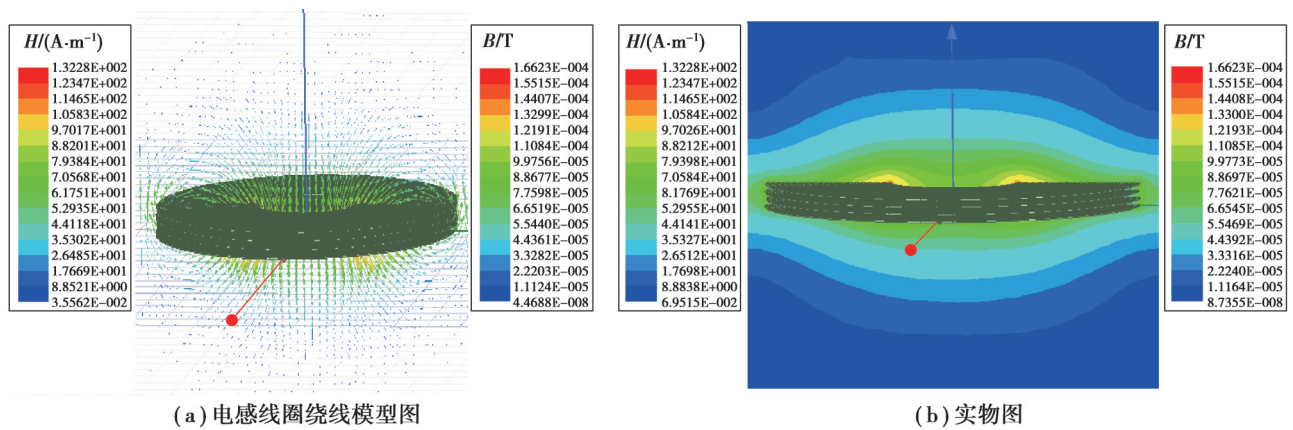


图10 4层平面电感线圈磁场特性图

Fig. 10 Load layout, section form and measuring points

由图10可知,4层平面电感线圈中心处磁场分布均匀,两端稍差。因此在设计时应结合待测岩样大小,尽量增大线圈内径,从而提高待测岩样表面磁场的均匀范围。为减小测量误差,不同大小的岩样应采用不同内径大小的线圈,保证岩样待测面与线圈内径1:1贴合。

3.4 控制系统设计

基于FPGA设计了控制系统,控制系统的主要作用是控制和协调整个仪器的工作。工作流程如图11所示。当启动岩样磁化率测量系统时,首先进行控制系统的参数设置,系统自动检测正常便开始工作。根据上位机提示,用户首先将传感器置于空气中,测量未放置岩石时传感器的谐振频率,测量数据保存并自动上传至上位机,然后将岩样置于传感器下方,保证岩样与传感器紧密贴合,测量放置岩样后传感器的谐振频率;测量完毕后移除岩样再次测量空气中的谐振频率。仪器每次采样时间为3 s,设置每次采集数据10个,剔除误差最大值,其余数据取平均值,在空气中测量的谐振频率采用前后2次的平均值,以补偿温度漂移所带来的测量误差。

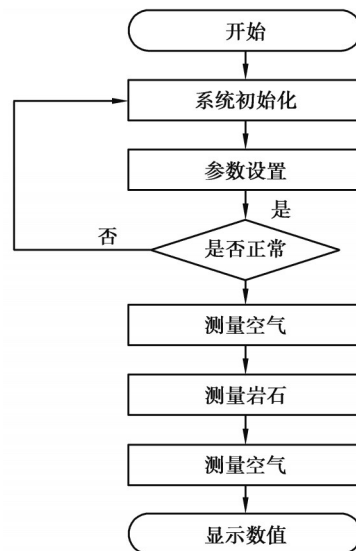


图11 磁率仪工作流程图

Fig. 11 Flowchart of the magnetic susceptibility meter

3.5 软件设计

LDC1614芯片外接由探测线圈与谐振电容并联而成的LC振荡器,实时获取LC电路的谐振频率信息并以数字的形式存放在寄存器中^[19]。根据LDC1614数据手册,通过名为DATA寄存器中的数值便可得到外接

传感器的谐振频率 $f^{[20]}$ 为:

$$f = \frac{y \times f_1 \times d}{2^{28}} \quad (13)$$

式中: d 为寄存器中的数值; y 为分频系数。通过配置相应的寄存器可将芯片内部基准频率 40 MHz 进行分频,分频后参考频率

$$f_1 = \frac{40M}{y} \quad (14)$$

传感器初始谐振频率应结合线圈电感、寄生电容和谐振电容来确定。利用高精度谐振频率测试仪测试得到其准确值。传感器初始谐振频率还应保证当测量量程内最大磁化率时寄存器中数据不会溢出。根据实验测试结果,设置芯片时钟分频寄存器的分频模式。

传感器数据转换所需要的时间 t_1 由名为 RCOUNT 的寄存器决定,令其中数值为 e ,则 t_1 为

$$t_1 = \frac{e \times 16}{f_1} \quad (15)$$

传感器测量过程激励所需要的时间 t_2 由名为 SETTLECOUNT 的寄存器决定,令其中数值为 g ,则 t_2 为

$$t_2 = \frac{g \times 16}{f_1} \quad (16)$$

为保证数据稳定,将寄存器 RCOUNT 中值设置为 0xFFFF,SETTLECOUNT 中的值设置为 0x0100。

寄存器 DRIVE_CURRENT 中数值决定线圈驱动电流大小,LDC1614 的激励电流范围为 16 μ A~1.6 mA,电流越大磁场越强,信号分辨率就越好,但电流过大易造成磁饱和。在设置驱动电流时应对仪器量程内的最大磁化率与最小磁化率样品进行实验,保证在最恶劣的情况下传感器仍能维持稳定的振荡。

3.6 仪器标定与校正

电感变化量表征的是岩样的整体磁性,为保证测量的准确性,针对不同形状、大小的岩石建议更换不同规格的线圈,保证线圈与岩样完全贴合。对于磁化线圈,选用相对磁导率已知的样品对仪器进行标定,绘制出岩样磁化率与谐振频率之间的关系曲线,并将关系曲线储存在测量程序中,下次使用时可根据之前储存的关系曲线,推测并显示未知样品的磁化率。

3.7 上位机操作界面

设计了磁化率仪上位机,操作程序可支持电脑和平板使用。如图 12 所示,点击开始测量按钮后界面会自主提示操作者进行后续操作步骤,界面会实时显示 3 步操作得到的谐振频率值,各测量步骤的数值也会自动保存在右侧表格中,测量完毕后上位机便会即时显示所测样品的磁化率值,并将测量数据自动保存。点击导出按钮便可导出所有的测量数据。



图 12 磁化率仪工作界面图

Fig. 12 Working interface of the susceptibility meter

4 实测分析

为验证磁化率仪的测量效果,选用不同类型的岩石标本,包含火成岩、变质岩、沉积岩共计 216 种,将测

量结果与实际工程中应用较为广泛的SM-30、KM-7磁化率仪进行比较,部分岩样测量结果如表1所示。从测量结果可以得出,本次设计的磁化率仪与SM-30测量结果接近,与SM-30磁化率仪相对误差不超过3%,与KM-7型磁化率仪相对误差不超过5%,仪器本身测量误差不超过2%,仪器精度可达 10^{-7} 。从测量结果可知本仪器测量结果与同类仪器相比测量误差小,仪器测量精度高、稳定性好,达到了预期设计目标。

表1 文中方法测量结果与SM-30、KM-7测量结果比较

Table 1 Comparison of the results measured by the proposed meter with those by SM-30 and KM-7

编号	岩石种类	SM-30磁化率仪结果		KM-7磁化率仪结果		文中方法测量结果	
		一次测量	二次测量	一次测量	二次测量	一次测量	二次测量
1	磁铁矿	801.000	794.000	794.000	799.000	803.800	805.600
2	钛铁矿	424.000	426.000	414.000	412.000	425.600	424.100
3	绿帘石	130.000	125.000	128.000	126.000	128.700	127.100
4	辉绿岩	47.200	45.800	46.800	45.500	45.200	46.800
5	辉岩	10.100	10.600	9.800	9.700	9.500	9.900
6	玄武岩	3.180	3.500	3.400	3.800	2.700	2.800
7	珍珠岩	0.780	0.850	0.590	0.650	0.860	0.890
8	明矾石	0.070	0.050	0.080	0.060	0.050	0.060
9	页岩	0.020	0.010	0.030	0.020	0.010	0.010
10	砾岩	0.001	0.002	0.003	0.004	0.002	0.003

注:表中数据需乘以 10^{-3} ,单位为国际单位SI。

5 结 论

1)根据岩石磁化率测量要求,提出了基于LC谐振原理的岩石磁化率测量方法,分析并推导了运用此方法计算岩石磁化率的表达式。

2)搭建仿真模型,验证了测量方法的正确性,并分析了提高距离、岩石电导率、岩样大小等因素对测量的影响,明确了仪器设计的优化条件和实际测量时的注意事项,为仪器具体设计提供了支持。

3)基于FPGA设计了仪器整体测量系统,选用高精度数字电感传感器LDC1614搭建了测量的硬件电路,提出4层电感线圈等距并联的传感器设计方案,极大地提高了测量精度(可达 10^{-7}),并减小了仪器体积和重量(0.2 kg)。

4)设计仪器整体工作流程,即空气-岩石-空气3次测量方式,极大地减小了温度等不确定因素造成的误差,完成了仪器控制系统、软件部分、上位机设计及样机制作。实测结果表明本仪器测量误差小、精度高、测量一致性好,且仪器操作简单,适合野外作业。

参考文献

- [1] Mitchell J. Monitoring lithology variations in drilled rock formations using NMR apparent magnetic susceptibility contrast[J]. Applied Magnetic Resonance, 2020, 51(3): 205-219.
- [2] Nyam G G, Adeeko T O, Umar M, et al. Assessment of magnetic susceptibility of some selected rock samples from Karu area, northcentral Nigeria[J]. Asian Journal of Advanced Research and Reports, 2019: 1-6.
- [3] Yan J Y, Lü Q T, Luo F, et al. A gravity and magnetic study of lithospheric architecture and structures of South China with implications for the distribution of plutons and mineral systems of the main metallogenic belts[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2021, 221: 104938.
- [4] Tan M J, Fan L J, Mao K Y, et al. Influential factors analysis and porosity correction method of nuclear magnetic resonance measurement in igneous rocks[J]. Journal of Applied Geophysics, 2019, 161: 153-166.
- [5] Roy S. A simple bridge to operate an AC susceptometer[J]. European Journal of Physics, 2020, 41(5): 055501.

- [6] Li T, Shang H P, Zhang Q Y, et al. Optimizing nonlinearity of piezoresistive pressure sensors by an asymmetric Wheatstone bridge[J]. *Microsystem Technologies*, 2021, 27(8): 2989-2994.
- [7] 詹文山. 交流磁化率的测量[J]. *物理*, 1982(12):732-736.
Zhan W S. The measurement of AC susceptibility[J]. *Physics*, 1982(12):732-736. (in Chinese)
- [8] 裴朝, 崔益民, 李华, 等. 提高锁相放大器测量交流磁化率精度的方法[J]. *物理实验*, 2010, 30(11): 38-40.
Pei Z, Cui Y M, Li H, et al. Improving accuracy of AC susceptibility measurement with lock-in amplifier[J]. *Physics Experimentation*, 2010, 30(11): 38-40. (in Chinese)
- [9] 谷静, 杨雁, 陆青, 等. 基于数字比例技术的高精度交流电桥研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(7): 29-37.
Gu J, Yang Y, Lu Q, et al. Research on high precision AC bridge based on digital ratio technique[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(7): 29-37. (in Chinese)
- [10] 王力波. HKB-1型磁化率仪研制及计算机联机的实现[J]. *火山地质与矿产*, 1991, 12(4): 40-52.
Wang L B. Model HKB-1 magnetic susceptibility meter and connected with computer[J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 1991, 12(4): 40-52. (in Chinese)
- [11] Talebi A, Hosseini S V, Parvaz H, et al. Design and fabrication of an online inductive sensor for identification of ferrous wear particles in engine oil[J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2021, 73(4): 666-675.
- [12] 查忆秋, 肖锋, 黄为俊, 等. SM-30磁化率仪的工作原理探讨[J]. *工程地球物理学报*, 2017, 14(1): 45-49.
Zha Y Q, Xiao F, Huang W J, et al. The operating principle of SM-30 magnetic susceptibility instrument[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2017, 14(1): 45-49. (in Chinese)
- [13] 叶春, 陈晔, 陈仕涛. 智能化磁化率仪原理及研制[J]. *南京师范大学学报(工程技术版)*, 2001, 1(1): 55-59, 63.
Ye C, Chen Y, Chen S T. Study of intelligent magnetic susceptibility instrument[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology)*, 2001, 1(1): 55-59, 63. (in Chinese)
- [14] 周锡华, 孟祥聪, 王金龙, 等. 智能磁化率仪的研制[J]. *物探与化探*, 2005, 29(5): 428-430.
Zhou X H, Meng X C, Wang J L, et al. The developing of intelligent magnetic susceptibility meter[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2005, 29(5): 428-430. (in Chinese)
- [15] 王振宇, 成立. 模拟电子技术基础[M]. 3版. 南京: 东南大学出版社, 2019.
Wang Z Y, Cheng L. *Fundamentals of analog electronic technology*[M]. 3rd ed. Nanjing: Southeast University Press, 2019. (in Chinese)
- [16] 刘秉裕. 矿石矿物磁选[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2020.
Liu B Y. *Ore mineral magnetic separation*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2020. (in Chinese)
- [17] Wang X, Lv D, Sun L, et al. Magnetic behaviors of a ferrimagnetic decorated kagome-like lattice under an external magnetic field[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, 538(5): 168259.
- [18] 胡瑞霞, 马卫华, 史天成, 等. 基于LDC1614的磁浮电涡流位移传感器设计[J]. *传感器与微系统*, 2019, 38(7): 67-69.
Hu R X, Ma W H, Shi T C, et al. Design of maglev eddy current displacement sensor based on LDC1614[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2019, 38(7): 67-69. (in Chinese)
- [19] Li C, Zhang W P, Zhang Q, et al. Research on the detection of curved ferromagnetic materials by flexible eddy current array sensor based on LDC1614[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1544(1): 012135.
- [20] 黄健, 吕林涛, 范晖. 基于LDC1614的循迹小车研制[J]. *传感器与微系统*, 2018, 37(8): 88-90, 93.
Huang J, Lü L T, Fan H, et al. Research and fabrication of tracking car based on LDC1614[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2018, 37(8): 88-90, 93. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)