

多分量地震监测系统AETA的感应式磁传感器磁棒研制

雍珊珊 王新安[†] 庞瑞涛 金秀如 曾敬武 韩朝相 徐伯星

北京大学深圳研究生院集成微系统科学与工程与应用重点实验室, 深圳 518055; [†] 通信作者, E-mail: anxinwang@pku.edu.cn

摘要 根据多分量地震监测系统AETA的技术需求, 完成一种感应式磁传感器的研制和工业化实现。通过分析电磁扰动的监测需求, 确定感应式磁传感器磁棒的各项设计参数, 并提出较优材料选取以及结构设计方案。磁棒的设计指标为0.1 Hz~10 kHz, 工作温度范围为-40~130℃, 监测的磁场强度范围为1~1000 nT, 灵敏度大于20 mV/nT@(0.1 Hz~10 kHz)。测试结果表明, 研制的磁传感器满足AETA的性能要求。该传感器已成功地投入应用, 正在大区域规模化布设。

关键词 地震监测; 电磁扰动; 感应式磁传感器; 磁负反馈

中图分类号 P315

Development of Inductive Magnetic Sensor for Multi-component Seismic Monitoring System AETA

YONG Shanshan, WANG Xin'an[†], PANG Ruitao, JIN Xiuru, ZENG Jingwu, HAN Chaoxiang, XU Boxing
The Key Laboratory of Integrated Micro-systems Science and Engineering Applications, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055; [†] Corresponding author, E-mail: anxinwang@pku.edu.cn

Abstract According to the multi-component seismic monitoring system's technology requirements, an inductive magnetic sensor is presented and the design analysis and industrial implement are discussed. According to the requirements of electromagnetic disturbance monitoring, the authors define the design parameters and propose a well-considered plan on materials choosing and architecture designing. The covered frequency range is 0.1 Hz – 10 kHz, the temperature range is -40 – 130℃, the monitoring range of magnetic field strength is 1 – 1000 nT, and the sensitivity requirement is larger than 20 mV/nT@(0.1 Hz – 10 kHz). The final test shows that the performance is achieved. This sensor is applied in multi-component seismic monitoring system which is being installed widely.

Key words earthquake monitoring; electro-magnetic disturbance; inductive magnetic sensor; magnetic negative feedback

大地震临震前兆监测指根据地震孕育、成长和发生过程中伴随的地壳形变、地应力、地电、地磁、地温和地声等现象或变化, 进行观察和监测, 对监测结果进行分析和判断, 并对特定范围、特定时间可能发生的破坏性地震做出预报^[1]。地震来临时给出预警, 可以为人们争取更多的时间来逃离, 可以极大地降低生命和财产损失。

电磁场变化作为一种前兆异常现象, 虽然得到一定程度的观测和研究, 尚未达到对地震短期和临震进行预测的目的^[2-6]。目前已经取得很多震例数据(如1984年5月21日南黄海M6.2级地震, 1999年9月14日和1999年11月30日四川绵竹两次5.0级地震), 都存在电磁辐射异常, 特别是大地震数据^[7](如2008年5月12日汶川8.0级大地震, 2008年

3月21日新疆于田 7.3 级大地震, 2010年4月14 日青海玉树 7.1 级大地震)。但是, 现有的观测资料和实验研究尚不足以证明, 能够从震前电磁波辐射信号中提取短临前兆信息。

多分量地震监测系统 AETA 希望通过高密度、广覆盖的观测试验, 获取地震前、地震中、地震后的电磁信号, 研究分析电磁信号的地震前兆异常, 进行地震监测和预测。

本文针对电磁扰动监测中主要的传感单元——感应式磁传感器磁棒的研制进行分析和讨论, 从磁棒参数设计、结构设计和工艺实现等方面进行研制, 在满足性能参数要求的前提下, 尽可能地降低体积、成本和安装要求, 同时从生产工艺的角度保证磁传感器的一致性和可靠性。

1 感应式磁传感器

用于大地电磁场的磁传感器包括感应式磁传感器、磁饱和式磁传感器和超导磁传感器^[8]。感应式磁传感器基于法拉第电磁感应原理测量磁场变化, 广泛用于地震监测和矿产勘探等领域, 具有制作工艺简单、性能稳定和灵敏度高等优点, 测量范围为 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ T。磁饱和式磁传感器又称磁通门磁力仪, 利用被测磁场中软磁材料在交变磁场的饱和机理下感应强度与磁场的非线性关系进行检测, 适用于高速度运动的、弱磁场的测量, 测量范围为 $10^{-11} \sim 10^{-3}$ T。超导磁传感器又称超导量子干涉仪, 基于约瑟夫逊效应, 具有 10^{-15} T 超高分辨率、超宽频带等特点, 但量子跃迁导致稳定性差, 同时需要消耗液氮, 制造工艺复杂, 价格昂贵, 导致应用受到限制。

感应式磁传感器是目前应用最广泛的磁传感器之一, 具有较宽的应用频带和较高的灵敏度, 成本低、体积小, 非常适用于密集布点的地震监测系统。近年来, 国内一些研究机构已经针对磁传感器推出一些样机, 如 MC-01, CGY-1A, CGC-A, SB-250 K, 但市场上还没有成熟的产品。西方国家研发的磁传感器性能优良, 但价格昂贵, 长期垄断市场。为此, 自主研制适用于地震临震监测的磁传感器具有重要的现实意义。

感应式磁传感器的测磁原理如图 1 所示: 变化的磁场通过固定大小的线圈, 在线圈上产生感应电动势; 当线圈闭合时, 线圈上会产生电流。地震临震监测设备是固定放置的, 也就是说, 磁传感器中感应线圈的大小和位置是固定不变的, 所以感应电

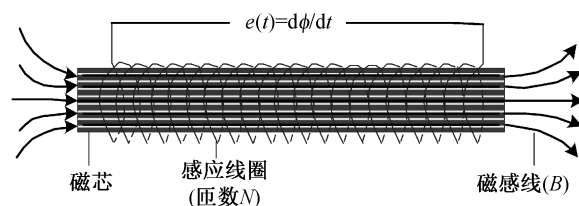


图 1 感应式磁传感器测量原理示意图

Fig. 1 Principle of measurement of inductive magnetic sensor

动势的变化是由于地震发生前产生的电磁扰动异常导致的。

感应电动势的表达式如下:

$$e(t) = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d(BS)}{dt} = NS_0 \frac{dB}{dt} = NS_0 \mu_a \frac{dB_0}{dt}, \quad (1)$$

其中, $e(t)$ 为感应电动势, t 为时间, φ 为通过回路的磁通量, B_0 为空气中的磁感应强度在磁芯方向上的分量, N 为感应线圈的匝数, S_0 为单匝线圈的有效面积, μ_a 代表有效磁导率的平均值。为了提高传感器的灵敏度, 需提高 N , S_0 和 μ_a 。

本文提出的感应式磁传感器的设计目标如下: 频率范围为 0.1 Hz~10 kHz, 工作温度范围为 $-40 \sim 130^\circ\text{C}$, 监测的磁场强度范围为 1~1000 nT, 灵敏度大于 20 mV/nT@ (0.1 Hz~10 kHz)。

2 感应式磁传感器磁棒参数设计

2.1 磁芯设计

μ_a 的增加通过选择高导磁材料作为磁芯来实现, 通常选择坡莫合金、铁氧体和非晶态金属等。根据设计指标, 要求磁芯的饱和磁感应强度在 T 量级, 相对磁导率大于 10^4 ; 磁导率对温度和频率的稳定性高; 居里温度在 250°C 以上; 适用的频带范围为中低频; 同时, 为了减小磁滞损耗和涡流损耗, 矫顽力和电阻率要低。由于铁氧体的磁导率对温度的稳定性较差, 所以坡莫合金、非晶态合金和纳米晶合金均适合做传感器的磁芯。坡莫合金与非晶态合金、纳米晶合金的电阻率并无大的区别, 可以采用叠片磁芯来控制涡流损耗, 并且, 坡莫合金薄带较软, 比非晶态合金和纳米晶合金更容易做成叠片磁芯, 同时价格便宜。本文选择成本相对低、易加工的坡莫合金 1J85 作为磁芯材料。

在选择磁芯的磁性材料和设计几何外形时, 损耗是必须考虑的一个因素, 磁芯的损耗包括磁滞损耗 W_h 、涡流损耗 W_e 以及剩余损耗 W_r ^[9]:

$$W = W_h + W_e + W_c. \quad (2)$$

图 2 为涡流损耗的示意图。磁滞损耗的降低通过选择磁损耗低的磁芯材料实现。涡流损耗是由于迅速变化的磁场中导体内部会产生感应电流而发热导致的能量损耗,可用式(3)表示:

$$P_e = \frac{\pi^2 a^2}{8\rho} f^2 B_m^2 W_e = \frac{\pi^2 a^2}{8\rho} f^2 B_m^2, \quad (3)$$

其中, ρ 为磁芯的电阻率, a 为磁芯总厚度, f 为外磁场的变化频率, B_m 为软磁材料的饱和磁场强度。 B_m 和 f 与磁芯几何外形没关系, W_e 与 ρ 成反比, 与 a^2 成正比。可以通过减小薄片厚度来降低涡流损耗。在磁芯厚度相同的条件下, 采用 n 片薄片堆叠而成的磁芯产生的涡流损耗会降低至实心磁芯的 $1/n$ 。

磁芯材料在外磁场中被磁化时, 存在退磁场, 使得感应磁场强度 $B < \mu H_{\text{ext}}$, 磁性材料的有效磁导率 μ_{app} 如下式所示:

$$\mu_{\text{app}} = \frac{1}{\mu_0 / \mu + N_d}, \quad (4)$$

其中, N_d 为退磁因子, 对于圆柱、椭球以及棱柱的

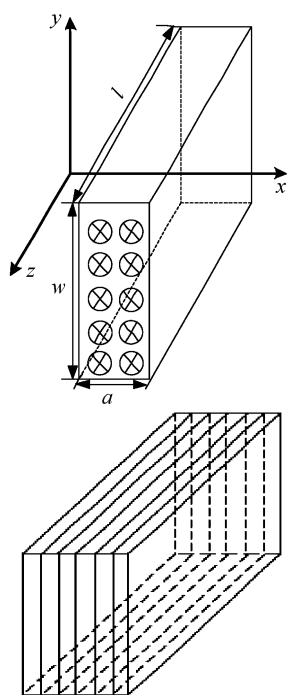


图 2 涡流损耗示意图和薄片堆叠磁芯结构
Fig. 2 Schematic diagram of eddy current loss and the magnetic core architecture

磁芯而言, N_d 可表示为

$$N_d = \frac{1}{r^2 - 1} \left[\frac{r}{\sqrt{r^2 - 1}} \ln(r + \sqrt{r^2 - 1}) - 1 \right], \quad (5)$$

其中 $r = l/d$, 即长径比。由式(4)和(5)可知, 当材料相对磁导率远远大于 1 时, 材料有效磁导率只与长径比有关, 如图 3 所示。

权衡传感器体积、重量以及磁芯工艺、应力强度等因素, 磁芯长度一般在 40~120 cm 之间适宜, 直径在 3 cm 左右适宜, r 在 15~40 之间适宜。本文选择的磁芯材料的相对磁导率 $\mu_r = \mu / \mu_0$ 在 2500 以上, μ_{app} 由 r 值决定。

为了减小传感器的体积和重量, 本文确定磁芯长度 l 为 40 cm, 磁芯截面积为 $S = 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$, 根据式(4)对应的 μ_{app} 为 148。假设 N 为 10^4 量级, 根据式(1)可知, 0.1 Hz 的信号的输出电压在 $10^{-8} \sim 10^{-4} \text{ V}$ 之间, 10 kHz 对应的输出电压在 $10^{-3} \sim 10 \text{ V}$ 之间。根据叠片趋肤深度以及传感器测量频段要求, 计算得到趋肤深度为 $0.53 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 。根据趋肤深度远小于叠片宽度 (2 cm), 同时满足 2 倍的趋肤深度小于叠片厚度的要求, 取叠片厚度为 0.1 mm。

2.2 感应线圈参数设计

感应线圈是感应式磁传感器的磁敏感部分, 其性能直接决定传感器性能指标。感应线圈的第 2 个峰值点频率即为传感器的上限频率, 感应线圈的直流电阻决定放大电路的输入噪声以及测量精度, 感应线圈的初始灵敏度也在较大程度上决定传感器的

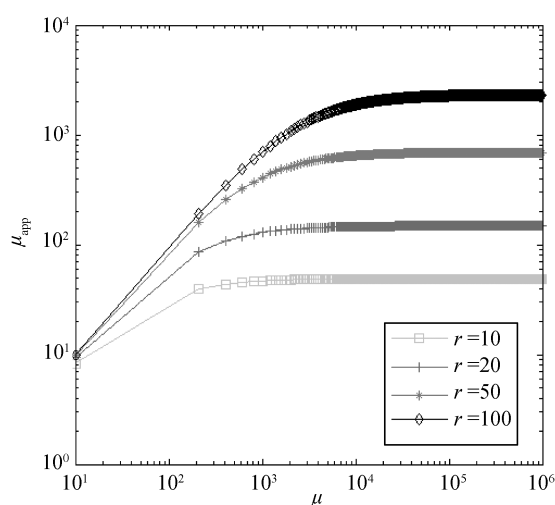


图 3 有效磁导率与初始磁导率、长径比关系
Fig. 3 Relationship of Effective permeability, initial permeability and length to diameter ratio

灵敏度。一般的感应线圈是将漆包线绕制在磁芯上,需要上万匝。考虑到感应线圈的匝数比较大,铜漆包线与矩形磁芯接触易磨损掉漆而导致漏电等,感应线圈不能直接绕制在磁芯上。因此,将感应线圈绕制在骨架上,骨架选用稳定性高、膨胀系数小、耐腐蚀、介电常数低的非铁磁性材料,酚醛树脂是比较好的选择。骨架内腔放置磁芯,骨架外径上绕制漆包线,如图 4 所示。 h_1 为每段线圈的宽度, h_2 为骨架上每段线圈隔板厚度, d_1 为放置磁芯的内径, d_0 为骨架放置绕线的内径, d_2 为骨架绕完线后的外径, d_w 为漆包线的直径, d_{cu} 为漆包线的铜导线直径,一般 $d_w = 1.13d_{cu}$ 。

根据磁感线圈的基本模型,感应线圈的等效电路包括直流电阻、电感和分布式电容,构成一个二阶网络。直流电阻 R 是 10^3 量级,分布电容 C 是 10^{-11} 量级,电感 L 为 10^2 量级。直流电阻、感应线圈电感、分布式电容的计算公式^[9]如下:

$$R_{cu} = \frac{4\rho_{cu}N}{d_{cu}} \left(d_0 + \text{ceil} \left(\frac{Nd_w}{h_{cu}} \right) d_w \right), \quad (6)$$

$$L_p = \frac{\mu_{app}\mu_0 N^2 S}{l} \left(2.11 - 1.1 \frac{h_{cu}}{l} \right), \quad (7)$$

$$C = 20 + 6.83 \frac{4(N_g - 1)}{N_g^2} + 260.7 \frac{(N_g - 1)(N_g - 2)}{12N_g^2} + 307.4 \frac{(N_g + 1)(N_g + 2)}{12N_g^2} + 7.8 \frac{(N_g + 1)(2N_g + 2)}{6N_g}. \quad (8)$$

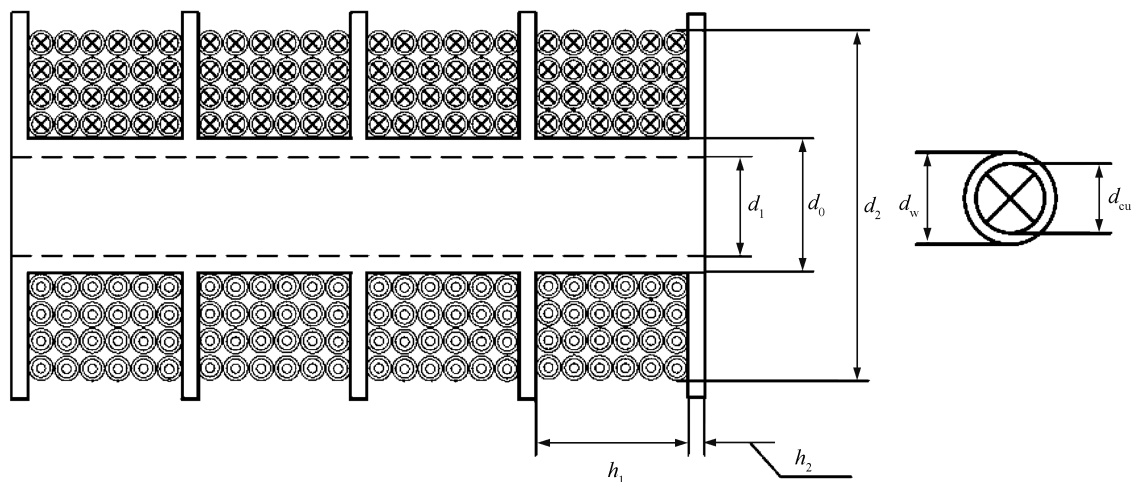


图 4 感应线圈骨架示意图

Fig. 4 Structure illustration of inductive magnetic sensor

本文选择绕线匝数 $N=20000$, 线圈在磁芯方向的宽度 (h_1 的 x 倍, 其中 x 为线圈分段的段数) h_{cu} 为 30 cm, 漆包线选择 $d_{cu}=0.3$ mm, $d_w=0.339$ mm。根据式(6), 可计算得到直流电阻为 5.006 k Ω 。根据式(7), 可计算得到理论电感为 9.55 H。根据式(8), 计算得到骨架段数为 5 段时对应的分布电容最小, 为 88.7552 pF。根据长径比得到 $h_1=6$ cm, $h_2=2$ mm。根据匝数和段数 $d_2=45$ mm, 得到骨架内径厚度为 1 mm。

2.3 反馈线圈参数设计

根据磁感应线圈的幅频和相频特性, 在线圈谐振点处有相位突变现象。本文采用磁反馈的方法, 可以解决相位突变问题, 并使得传感器有较大的平坦区域。我们的方法是根据传感器的实际输出电压, 通过绕制在感应线圈外面的反向的反馈线圈, 将电流值转换成与感应磁场相反的磁场, 从而形成负反馈。

如图 5 所示, L_s 为反馈线圈的电感值, L_p 为感应线圈的电感值, R_L 为感应线圈的直流电阻, C 为感应线圈的分布电容, R_f 为反馈电阻, G 表示放大器的放大倍数, I_f 为反馈电流, 反馈线圈和反应线圈的互感为 M 。根据磁负反馈的等效电路可以得知, 在频带内幅频特性的幅度由反馈电阻 R_f 、磁芯长度 l 和反馈线圈匝数 N_s 共同决定。本文根据设计指标磁传感器的频带范围, 确认反馈线圈的匝数为 100 匝, 均匀绕制在感应线圈外圈的隔离筒上, 方向与感应线圈相反。为了减小感应线圈与反馈线圈之间的分布电容, 同时对电信号(工频信号)进行屏蔽, 我们

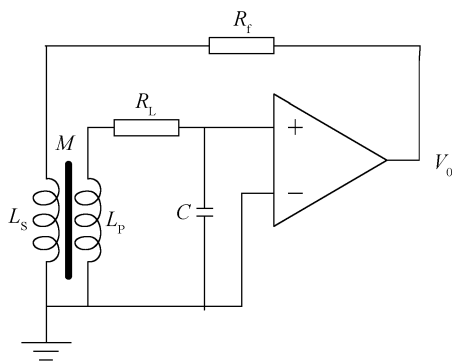


图 5 磁负反馈原理示意图

Fig. 5 Principle of magnetic negative feedback

在感应线圈与反馈线圈之间加入屏蔽层工艺。

3 感应式磁传感器磁棒结构与工艺实现

根据以上的参数分析，我们对感应式磁传感器进行设计，主体结构为磁芯骨架、反馈屏蔽筒、外壳以及用于衔接主体结构的固定件和盖子，如图6所示。

磁芯骨架结构与图4一致，内部为方形空心，用于放置磁芯，磁芯的叠片数为200片，在生产时采用层间绝缘工艺，保证每片坡莫合金之间绝缘。感应线圈绕制在磁芯骨架上，骨架上可看见5段用于绕线的凹槽，每段均匀绕制4000匝，共20000匝。

反馈屏蔽筒首先绕制屏蔽层，屏蔽层采用带状铜箔，螺旋式的绕制方法，每圈之间保持一定的间隙，保证不接触导通。完成屏蔽层的绕制后，将屏蔽层用高温胶带做好保护和隔离。在屏蔽层上均匀绕制100匝的反馈线圈，反馈线圈与感应线圈绕制的方向相反。然后将感应线圈的两个引出端（即信号和地）通过双芯屏蔽线引出，反馈线圈的两个引出端（即反馈信号和地）通过双芯屏蔽线引出，同时在结构内将感应线圈的地、反馈线圈的地以及屏蔽层



图 6 感应线圈骨架结构

Fig. 6 Structure design of inductive magnetic sensor

引出端（即地）连在一起。最后将电磁传感器组装好，并做好测试，确保内部接线无误后，用填充胶灌满整个壳体，保证传感器内部各个部件不受振动影响。填充胶选择具有较好的温度特性的固化胶。

本文设计的感应式磁传感器磁棒如图7所示，传感器采用PVC材料制作骨架和壳体，尺寸为直径6 cm，长度为48 cm，重量为3 kg。

4 感应式磁传感器磁棒及其应用的测试

4.1 感应式磁传感器磁棒测试

本文设计的感应式磁传感器用于弱磁环境下信号的检测和接收，对交变的磁信号比较敏感，但是，由于没有严格的无磁空间，加之试验环境中存在50 Hz工频干扰及各种磁噪声，传感器很容易达到饱和，因此在实验中采用放大的弱磁信号进行测试，采用均匀绕制的螺线管提供激励信号。激励线圈采用直径为0.5 mm的铜漆包线，均匀地绕制在直径为16 cm的PVC管上，成为螺线管。为了防止电流过大，需在线圈上串联一个阻值为1 kΩ的限流电阻。螺线管接通激励电压后，管内产生的电流在桶内形成激励磁场。若螺旋线圈为无限长，那么筒内形成的激励磁场是一个与激励电流和激励线圈的匝密度 n 有关的均匀磁场。激励线圈管加载信号为1 V电压信号，输出设置为偏移为0，且高阻输出。从测试结果可知，加载在激励线圈的电流为14.9 mA，激励线圈管内磁场分布计算结果如图8(a)所示。

将感应线圈部分放在激励线管中央近似均匀磁场的范围内，改变信号的频率值，得到感应线圈的幅频特性曲线，如图8(b)所示。根据图8(b)可知，传感器的谐振频率有4个，见表1，其中主谐振点在1.5 kHz左右。通过对5个传感器的测试，发现谐



图 7 感应式磁传感器磁棒

Fig. 7 Inductive magnetic sensor

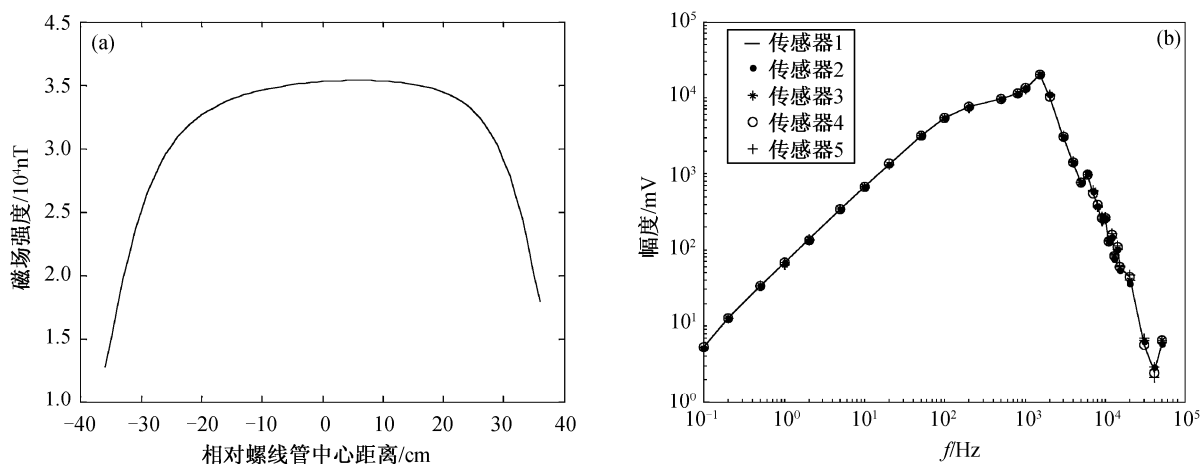


图 8 激励线圈内磁场分布(a)和感应线圈幅频特性曲线(b)

Fig. 8 Magnetic-field distribution of excitation coil (a) and the amplitude frequency characteristics of induction coil (b)

表 1 感应线圈谐振频率分布

Table 1 Resonance frequency of induction coil

谐振点	频率/kHz
主谐振点	1.5
第 2 谐振点	6.0
第 3 谐振点	10.0
第 4 谐振点	10.2

振频率基本上一致。传感器在 0.1 Hz~1.5 kHz 之间的幅频曲线为线性上升, 在谐振频率后, 线性下降。

4.2 感应式磁传感器应用实例及测试结果

本文设计的感应式磁传感器应用于多分量地震监测系统 AETA 的电磁传感探头中, 如图 9 所示, 在中国地震局组织下, 我们在中国科学院电子学研究所对该电磁传感探头进行灵敏度测试和噪声水平测试。

在灵敏度测试中, 使用任意波形函数发生器 (AFG3252) 产生正弦信号。信号加载至标定线圈中, 磁棒放置于标定线圈中, 使用 AETA 系统数据收录存储被标定磁棒输出的数字化信号。手动进行变换频率, 实现点频信号发射与接收, 最终实现设计工作带宽内的扫频标定。通过对 AETA 系统数据收录仪存储的数字化信号进行数字化处理分析, 获得被标定磁传感器的灵敏度曲线。

噪声水平测试时, 将磁传感器平稳放置在磁屏蔽室内, 在屏蔽室外使用 AETA 系统数据收录软件进行数字信号的收录与存储。由于 AETA 系统数据收录软件每次只能存储约 1 分钟的数据长度, 所以分段采集多次数据段, 最后通过数据分析来获取传感器噪声水平。

如图 10 所示, 测试结果显示电磁传感探头的带宽为 10 Hz~10 kHz, 灵敏度为 $66.5 \text{ mV/nT}@2 \text{ kHz}$,

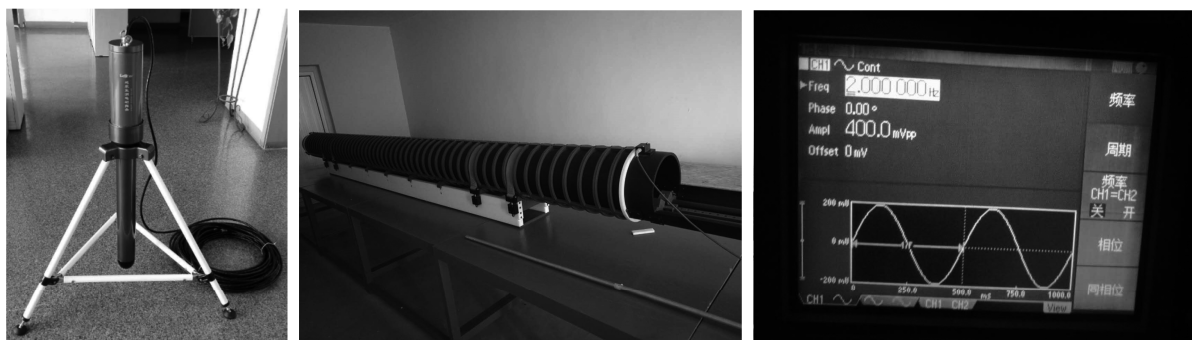


图 9 电磁探头实物图以及灵敏度、噪声水平的测试环境

Fig. 9 Electronic-magnetic probe, the test environment of sensitivity and noise level

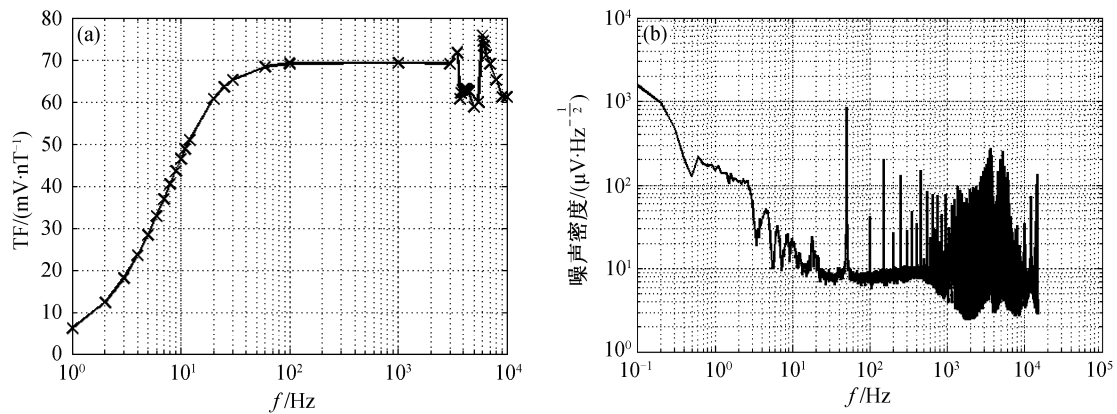


图 10 电磁探头灵敏度曲线(a)和电磁探头输出电压噪声曲线(b)

Fig. 10 Sensitivity of electronic-magnetic probe (a) and the noise character of electronic-magnetic probe's output (b)

噪声水平为 $0.1 \sim 0.2 \text{ pT/Hz}^{1/2} @ (10 \text{ Hz} \sim 1 \text{ kHz})$, 基本上符合设计要求。

5 结束语

基于历史震例数据, 本文提出适用于地震监测的感应式磁传感器的设计与实现, 在满足基本观测性能的同时, 还从降低成本、减小体积以及集成、易于安装等方面进行设计。本文从磁感原理出发, 分析感应式传感器的参数, 并结合设计要求, 给出具体的设计参数, 在结构和工艺设计上考虑了实现的成本和难度。针对感应式磁传感器的磁棒进行了性能测试, 结果表明, 谐振频率在 1.5 kHz 左右时, 磁棒一致性较好。同时, 在多分量地震监测系统 AETA 的应用中, 测试结果在低频段(小于 1 kHz)具有较好的频率特性和噪声水平。本文提出的感应式磁传感器已经应用于多分量地震监测系统 AETA 中, 并在云南、四川、西藏和河北等地区布设, 开展观测工作。

参考文献

[1] 陈运泰. 地震预测: 回顾与展望. 中国科学: 地球

科学, 2009, 39(12): 1633–1658

- [2] 钱书清, 仁克新, 吕智. 随岩石破裂的 VLF, MF, HF 和 VHF 电磁辐射特性的实验依据. 地震学报, 1996, 18(3): 346–351
- [3] 钱书清, 吕智, 仁克新. 地震电磁辐射前兆不同步现象物理机制的实验依据. 地震学报, 1998, 20(5): 535–539
- [4] 陈化然, 杨冬梅, 李琪, 等. 1980 年以来我国电磁辐射地震前兆信息的观测与研究. 中国地震, 2008, 24(2): 180–186
- [5] 希玉久. 地震电磁辐射观测是短临预测重要手段之一. 国际地震动态, 2009(7): 39–46
- [6] 刘君, 安张辉, 范莹莹, 等. 芦山 $M_s 7.0$ 与岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震前电磁扰动异常变. 地震, 2015, 35(4): 43–52
- [7] 刘君, 杜学彬, Zlotnicki J, 等. 几次大震前的地面和空间电磁场变化. 地球物理学报, 2011, 54(11): 2885–2897
- [8] 曾孝箴. 国内外大地电磁测深仪器研究的新方向. 世界地质, 1986(2): 6–12
- [9] 邵英秋. 宽频带感应式磁传感器的研制[D]. 长春: 吉林大学, 2012