

非晶丝 GMI 磁传感器信号的小波分析*

张雷, 潘仲明

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 当非晶丝巨磁阻抗效应(Giant Magneto-Impedance, GMI)磁探头输出数据的信噪比小于0时,常规的峰值检波方法难以检出真实信号。为此,提出了一种新的微弱信号检测方法,将非晶丝 GMI 磁探头的输出信号经放大、滤波和采样之后直接送入数字信号处理系统,利用小波变换方法提取微弱信号的特征,并利用相关分析法确定信号的大小。仿真结果表明,采用小波变换和相关分析相结合的方法,可检出信噪比达到-15dB时的弱磁信号。

关键词: GMI 磁传感器;微弱信号检测;小波分析;相关分析

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1011-2486(2012)04-143-05

Wavelet analysis of data from GMI magnetic sensors

ZHANG Lei, PAN Zhongming

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Traditional peak detecting method is impossible to detect actual signals when the signal-to-noise ratio (SNR) of the output of a giant magneto-impedance (GMI) probe is less than 0dB. A novel method, therefore, is presented to detect weak signals from the probe, which are directly sent to digital signal processing system after signal conditioning and sampling. In this method, the characteristics of the weak signals are extracted by wavelet transform and the amplitudes determined by the correlation method. The simulation results indicate that the probe's output signals with SNR = -15dB can even be detected by the hybrid method mentioned above.

Key words: GMI magnetic sensor; weak signal detection; wavelet analysis; correlation analysis

地磁场是地球的固有资源,利用地磁场匹配技术,可实现航天、航空、航海等运载器的地磁辅助导航。例如,测定地磁变异场的绝对值和磁场梯度变化,就可以探测和确定软磁或永磁物体的存在与位置,从而实现导弹、炸弹、鱼雷和水雷等武器的磁导引。因此,近二三十年来地磁辅助导航技术重新激起了国内外学者的极大兴趣^[1-3]。不言而喻,要实现地磁导航,首先必须精确测量地磁场的特征,但在一般情况下,地磁场的变化量是极其微弱的,因而如何检测微弱地磁信号就成为开发高性能地磁检测传感器和实现地磁辅助导航的关键技术之一。

与现有的基于巨磁电阻效应(Giant Magneto-Resistance, GMR)、霍尔效应、磁通门和超导量子干涉等磁传感器相比,非晶丝 GMI 磁传感器具有体积小、功耗低、灵敏度高、响应速度快等优点,自从1994年 Mohri 等学者^[4]发现了非晶丝的 GMI 效应以来,各国学者相继研发了各式各样的非晶丝(带)GMI 磁传感器^[5-9]。然而迄今为止,关于

在强噪声背景下弱磁信号检测问题的研究报道,尚不多见。因此,开展非晶丝 GMI 磁传感器的微弱信号检测技术专题研究,具有重要的理论意义与实用价值。

1 非晶丝的 GMI 效应

在图1所示的钴基非晶丝两端通入高频电流 I 时,非晶丝两端的阻抗将会随着其轴向磁场 H_{ex} 的变化而发生巨大的变化,这种现象称之为 GMI 效应。

非晶丝两端的阻抗 Z 可表示为^[5]

$$Z = (1/2)R_{dc}kaJ_0(ka)/J_1(ka)$$

其中, $k = (1+j)/\delta$, $\delta = (2\rho/\omega\mu)^{1/2}$ (趋肤深度), μ 为圆周磁导率, ρ 为非晶丝材料的电阻率, ω 为激励电流的角频率。非晶丝材料的半径为 a , 长度为 l , J_0 和 J_1 分别为零阶和一阶一类贝塞尔函数, 直流电阻 $R_{dc} = \rho l / \pi a^2$ 。

* 收稿日期: 2011-11-29

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目(CX2011B013); 国防科技大学优秀研究生创新资助项目(B110302)

作者简介: 张雷(1985—), 男, 安徽阜南人, 博士研究生, E-mail: zlsmart@qq.com;

潘仲明(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: ChungmingPan@163.com

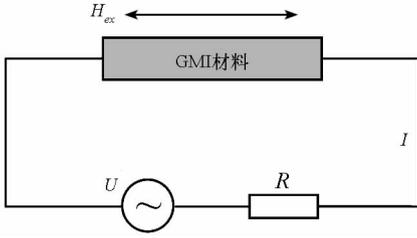


图 1 GMI 效应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of GMI effect

在强趋肤效应情况下,即 $\delta \ll a$ 时,非晶丝的阻抗可近似表示为

$$Z = (1 + j)R_{dc} a \sqrt{\omega\mu} / (2 \sqrt{2\rho})$$

式中, μ 不仅与信号的激励频率 ω 有关,还与外加磁场 H_{ex} 有关,亦即阻抗 Z 随着 ω 和 H_{ex} 的变化而变化。当选定非晶丝激励电流的频率与幅值,其阻抗 Z 便仅与外加磁场的强度 H_{ex} 有关。通过测量阻抗变化量 Z ,即可确定外加磁场 H_{ex} 的强度。

非晶丝的 GMI 比定义为

$$GMI(\%) = \frac{\Delta Z}{Z}(\%) = \frac{Z(H_{ex}) - Z(H_{max})}{Z(H_{max})} \times 100\%$$

其中, $Z(H_{max})$ 表示外加磁场强度为最大值时非晶丝两端的阻抗; $Z(H_{ex})$ 表示外加磁场等于 H_{ex} 时非晶丝两端的阻抗。

图 2 给出了激励信号频率为 300kHz 时非晶丝 GMI 与外加直流磁场的关系曲线。

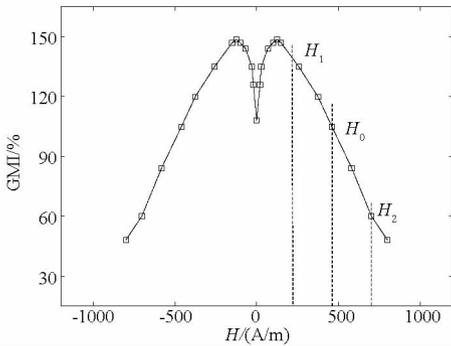


图 2 GMI 与外加直流磁场的关系曲线

Fig. 2 The applied field dependence of GMI

2 微弱信号检测电路

在理想情况下, GMI 磁探头输出的信号波形如图 3 所示,而实际上的数据则含有噪声,如图 4 所示。由此可见,若采用非晶丝 GMI 磁探头数据处理中常用的峰值检波电路^[10],则无法从噪声中检出弱磁信号。

因此,本文提出了一种新的微弱信号检测电路,将非晶丝 GMI 磁探头的输出信号经放大、滤波和采样之后直接送入数字信号处理系统,提取

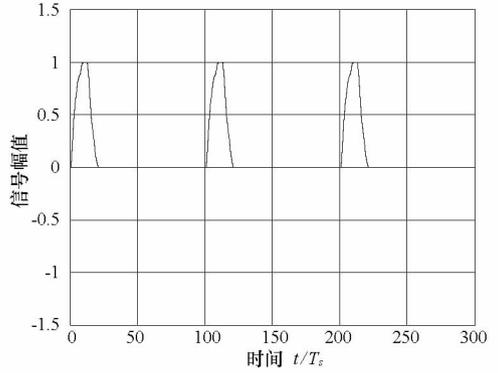


图 3 理想信号 s

Fig. 3 The ideal signal s

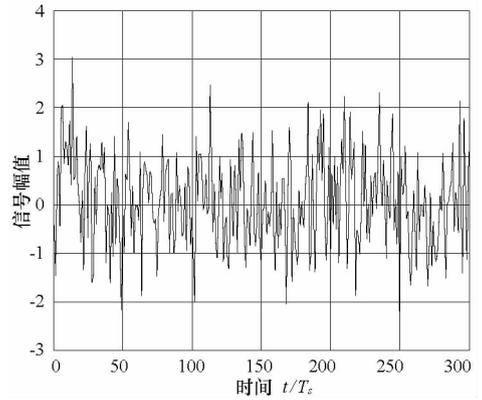


图 4 含噪信号 s_n

Fig. 4 The noisy signal s_n

微弱信号的特征。这种微弱磁信号检测电路如图 5 所示。

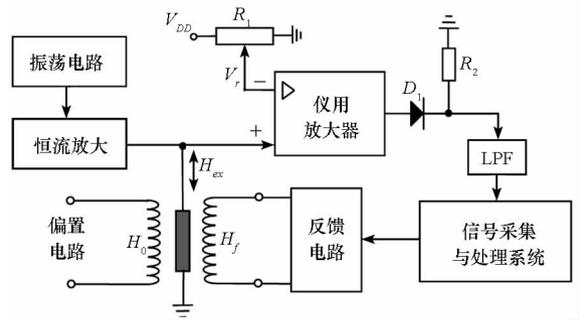


图 5 GMI 磁探头微弱信号检测电路

Fig. 5 Detection circuit of weak signals from the GMI magnetic probe

振荡电路产生频率和幅值可设定的周期脉冲信号,经恒流放大后接入非晶丝敏感组件和后续信号处理电路。由图 2 可见,非晶丝的近似线性工作区并不在零磁场附近,为使非晶丝工作在最佳区域($H_1 \sim H_2$),可通过外加偏置线圈产生偏置磁场 H_0 。其中, H_1 、 H_2 分别代表最小和最大外加磁场。外加磁场 H_{ex} 与偏置磁场 H_0 可能同向也可能反向,因此,本文提出的检测电路不仅可以检测外加磁场的大小,还可判断外加磁场的方向。在

未施加外部磁场时,非晶丝两端的阻抗近似为 $Z = R + j\omega L$;当存在外磁场时,其实部和虚部均发生了变化 $Z' = R + \Delta R + j\omega(L + \Delta L)$ 。由于外部磁场变化值远小于偏置磁场,因此应检测阻抗的变化值 $\Delta Z = Z' - Z$,而不是 Z' 。这可通过调节电位器 R_1 ,使得参考电压 V_r 近似等于外加磁场为 H_2 时非晶丝探头输出的电压值。这样,仪用放大器仅对阻抗值变化所引起的电压信号进行放大。图 5 中,二极管 D_1 的作用是阻止仪用放大器输出的负电压信号通过;LPF 是抗混叠滤波器,其输出经采样和模数转换之后送入数字信号处理系统。此外,反馈电路用于激励反馈线圈产生磁场 H_f 并作用于非晶丝的轴向,并与被测磁场 H_{ex} 的方向相反,以使非晶丝敏感组件始终工作在固定的线性区间($H_1 \sim H_2$)。

根据激励电流的频率,非晶丝 GMI 效应的理论模型可分为三类^[10],而非晶丝 GMI 磁传感器通常工作中频范围(100 kHz ~ 10MHz)。本试验拟采用频率为 300kHz 的脉冲激励信号,采样速率选用 30MHz。

对于具有周期特征的信号,采用傅立叶分析方法是方便的。但在本系统中,对信噪比小于 0 的含噪数据 s_n 作 256 点 FFT,其功率谱密度如图 6 所示。由此可见,对于较短长度的含噪数据,利用常规的傅立叶变换难以检出真实信号。而采用长数据进行 FFT 分析,则不仅占用计算机内存空间,而且增长了计算时间,这将影响传感器的响应速度。因此,下面拟采用小波变换方法提取含噪数据 s_n 的周期特征。

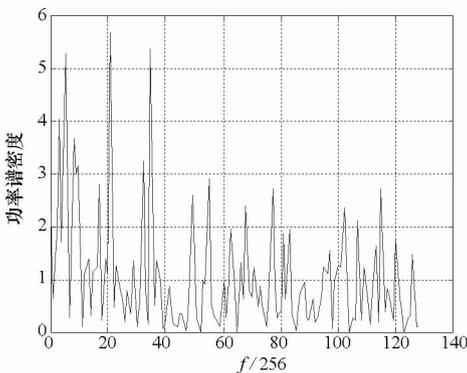


图 6 信号的功率谱密度图

Fig. 6 Power spectral density of s_n

3 GMI 磁探头信号的小波分析

小波变换方法能对信号进行多分辨率分析,也即对不同频率成分的信号进行多层分解而不改变分解滤波器的品质因素,故被誉为信号分析的

“数学显微镜”。

图 7 给出了小波多分辨率信号分解的示意图,其中, V_0 表示原始信号的空间,用正交滤波器组将其分解为低频 V_1 和 高频 W_1 两部分,然后按同样的方式对低频部分继续进行分解,而高频部分保持不变。这样,随着分解层次的增加,信号的细节将逐渐呈现出来。对于本例,信号的分解关系可表为:

$$V_0 = V_3 \oplus W_3 \oplus W_2 \oplus W_1$$

其中, \oplus 表示空间的直和算法。

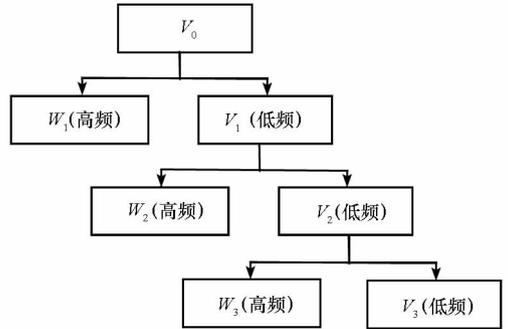


图 7 信号多分辨率分析的三层分解结构

Fig. 7 Three-stage decomposition scheme of signal multi-resolution analysis

为了能够编写计算机程序实现小波变换,或应用小波逆变换重构原始信号,必须对连续小波作离散化处理。本文利用双正交滤波器组实现 Mallat 算法,其优点为不仅分解滤波器和重构滤波器都具有线性相位,而且二者均可用不同长度的横向滤波器来近似,同时还可显著减少离散小波变换的计算量。表 1 给出了 Burt 双正交滤波器系数, $h_0(k)$ 与 $h_1(k)$ 分别为低通滤波器和高通滤波器的系数。另外,图 8 给出了 $h_0(k)$ 和 $h_1(k)$ 的频谱图。

表 1 接近正交的 Burt 双正交滤波器系数 ($\times \sqrt{2}$)

Tab. 1 Coefficients of burt biorthogonal filter banks

k	$h_0(k)$	k	$h_1(k)$
		0	0.574 682
-1	0.273 021	1	0.294 867
-2	-0.047 639	2	-0.054 085
-3	-0.029 320	3	-0.042 026
-4	0.011 587	4	0.016 744
-5	0	5	0.003 967
-6	0	6	-0.001 289
-7	0	7	-0.000 509

根据表 1 双正交滤波器组的参数,对信噪比为 6dB 的信号 s_n 进行三层小波分解,结果如图 9 所示,其中 d_1, d_2 和 d_3 为前三层小波系数, a_3 为第三层尺度系数。可以看出,小波变换可以将原始信号

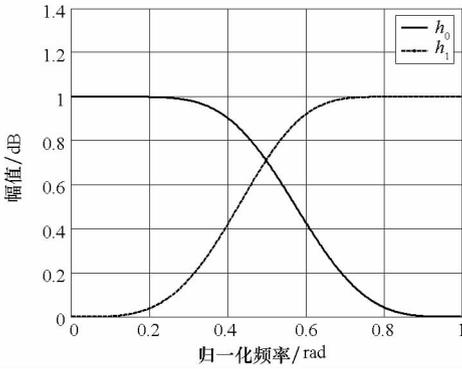


图 8 双正交滤波器组 h_0 和 h_1 的频率

Fig. 8 Spectra of biorthogonal filter banks h_0 and h_1

中不同频率的信号分量的细节显示出来,而且第三层尺度系数 a_3 基本展现了激励信号的特征。

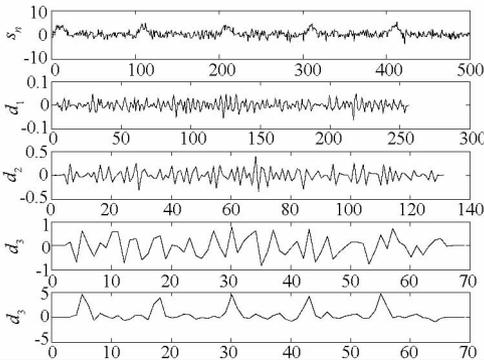


图 9 信号 s_n 在三层小波分解后的结果

Fig. 9 Three-stage wavelet decomposition result of s_n

由于外界施加的磁场信号为缓变信号,而非晶丝 GMI 磁传感器探头则可近似认为是一个惯性环节,因此数据采集与处理系统获得的含噪数据的特征与原始激励信号具有相似性。仿真结果表明,在激励信号特征未知的情况下,将信噪比为 6dB 的含噪数据进行三层小波分解并以其第三层的尺度系数代表激励信号的特征是可行的,以此作为基准信号,并与信噪比小于 0 的含噪数据的第三层小波分解尺度系数作相关分析。图 10 给出了信噪比为 -3dB 时的相关结果。

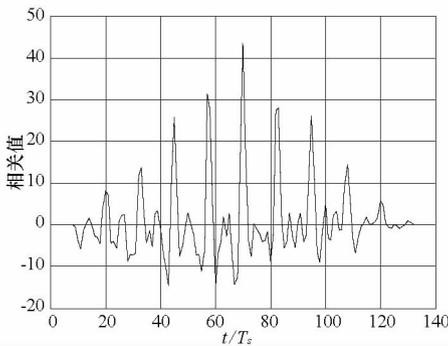


图 10 信噪比为 -3dB 时的相关分析结果

Fig. 10 Correlation result at SNR = -3dB

从图 10 可以看出,对于固定时间长度的含噪数据 s_n ,在每个信噪比下进行小波分解后与基准信号的相关分析结果,都存在一个最大值,它表示此时刻含噪信号与基准信号完全对准。这样,我们将不同信噪比下相关分析结果的最大值,绘成如图 11 所示的曲线。可以看出,当被分析信号的信噪比在大于 -15dB 时,最大相关值与被分析信号的信噪比成近似的线性关系,而当信噪比小于 -15dB 时则无法分辨出信号的有无。因此,本文提出的小波变换和相关分析相结合的方法,能够检测出信噪比大于 -15dB 的弱磁信号的存在,而且通过计量标定,可根据图 11 所示来确定被测信号的大小。

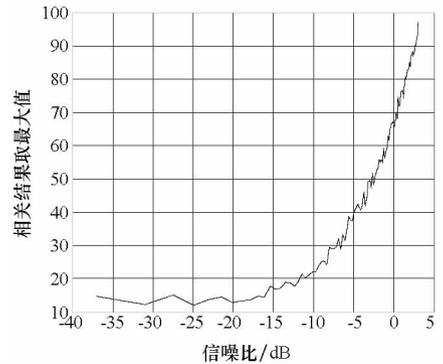


图 11 不同信噪比下的最大相关值

Fig. 11 The maximum of correlation at various SNRs

此外,由于噪声的随机性,上述最大相关值的每次计算结果并不完全一致,因此必须以多组计算结果的平均值作为最终结果。表 2 分别列出了 10 组和 20 组数据时最大相关值的均值和标准偏差。可以看出,平均次数越多,标准偏差越小,但相应的计算量也越大,GMI 磁传感器的响应速度也就越慢。因此,在工程上,应当折中考虑传感器精度和响应速度的矛盾问题。

表 2 不同信噪比下的均值与标准偏差

Tab. 2 Mean and standard deviation of correlation at various SNRs

信噪比 (dB)	均值 (10 组)	标准偏差 (10 组)	均值 (20 组)	标准偏差 (20 组)
3.010	96.123	10.012	97.084	5.350
0.035	72.333	6.463	65.616	7.346
-3.010	50.081	8.618	49.502	6.872
-9.030	23.509	6.786	25.048	6.556
-15.406	15.492	6.383	17.666	5.681
-27.447	12.396	3.036	15.078	4.285

在上述仿真中,噪声的功率是固定的,信号的幅值是改变的(取决于外加磁场的大小和方向),

从而改变被测信号的信噪比。然而,在工程应用中,我们不可能计算所有信噪比下的最大相关值,为此,还应当利用插值方法获得所需的最大相关值,从而确定被测信号的大小。

4 结 语

非晶丝 GMI 磁传感器中信号的获取与处理,国际上常用的是峰值检波电路,这种处理方法在信噪比较高的情况下效果较理想,但如果在强噪声背景下,该方法将会失效。本文针对这种情况,作了一次大胆的尝试,设计了一种新的电路,并运用小波分解和相关分析相结合的方法处理数据。这种电路和数据处理方法在 GMI 磁传感器中是首次提出,并在理论角度和仿真分析方面进行了研究。仿真结果表明,可以实现对信噪比为 -15dB 的微弱磁场信号的检测与估计,从而为非晶丝 GMI 磁传感器提供了新的微弱信号检测电路和检测算法。

参考文献 (References)

- [1] 周军,葛致磊,施桂国,等. 地磁导航发展与关键技术[J]. 宇航学报, 2008, 29(5): 1467-1472.
ZHOU Jun, GE Zhilei, SHI Guiguo, et al. Geomagnetic navigation development and key technologies[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(5): 1467-1472. (in Chinese)
- [2] Rice H, Kelmenson S, Mendelsohn L. Geophysical navigation technologies and applications[C]//IEEE PLA-NS, 2004: 618-624.
- [3] 郭才发,胡正东,张士锋,等. 地磁导航综述[J]. 宇航学报, 2009, 30(4): 1314-1319.
GUO Caifa, HU Zhengdong, ZHANG Shifeng, et al. Survey of geomagnetic navigation[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(4): 1314-1319. (in Chinese)
- [4] Panina L V, Mohri K. Magneto-impedance effect in amorphous wires[J]. Appl. Phys. Lett., 1994, 65(9):1189-1191.
- [5] Mohri K, Uchiyama T. Recent advances of micro magnetic sensors and sensing application[J]. Sens. Actuators A, 1997, 59: 1-8.
- [6] Mahdi A E, Panina L, et al. Some new horizons in magnetic sensing: high-Tc SQUIDS, GMR and GMI materials [J]. Sens. Actuators A, 2003, 105: 271-285
- [7] Wu Z M, Huang K, et al. Sensitivity enhancement of longitudinally given giant magneto-impedance magnetic sensor using magneto-elastic resonance[J]. Sens. Actuators A, 2010, 161: 62-65.
- [8] Olivera J, Cruz-Blas C A, Gomez-Polo C. Comprehensive analysis of a micro magnetic sensor performance using amorphous microwire MI element with pulsed excitation [J]. Sens. Actuators A, 2011:90-94.
- [9] Pirota K R, Kraus L, Chiriac H. Magnetic properties and giant magneto-impedance in a CoFeSiB glass-covered microwire[J]. J. Magn. Magn. Mat, 2000, 22:243-247.
- [10] Phan M H, Peng H X. Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications [J]. Progress in Materials Science, 2008, 53:323-420.