

磁巴克豪森噪声信号检测传感器的设计

李包青, 郑 宾, 郭华玲

(中北大学 电子测试技术国防科技重点实验室, 太原 030051)

摘要:针对铁磁性材料设计一种获取磁巴克豪森噪声信号的检测传感器。通过有限元电磁仿真软件 Ansoft 对励磁常用的 H 型和 U 型励磁模块进行仿真分析, 分析对特定试件的磁化效果, 并根据磁化效果及制作难度, 最终选定 H 型磁轭作为励磁模块。理论计算结合实验现象, 分析影响磁巴克豪森噪声信号检测传感器性能的因素, 得出结论: 磁场在垂直于材料表面传播会出现衰减, 并且与线圈激励信号频率成反比, 可通过调节信号的频率来实现磁化深度的调节, 信号的幅值会影响试件的磁化强度; 接收线圈的灵敏度与磁芯的长度、直径及缠绕线圈的匝数成正比, 但还需考虑缠绕线圈的分布电容、有效电阻及接收线圈的大小等因素。最终, 设计的检测传感器可获得具有较好信噪比的磁巴克豪森噪声信号。

关键词:铁磁性材料; 磁巴克豪森噪声; Ansoft; 励磁模块; 接收线圈

中图分类号: TG115.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2021)04-0278-06

铁磁性是指物质中相邻原子或离子的磁矩由于它们的相互作用而在某些区域中大致按同一方向排列, 当所施加的磁场强度增大时, 这些区域的合磁矩定向排列程度会随之增加到某一极限值的现象^[1]。铁磁性材料一般是指具有铁磁性的材料。材料按磁性分为铁磁性、亚铁磁性、抗磁性、顺磁性、反铁磁性。

由于铁磁性材料具有良好的机械特性, 故作为关键材料广泛应用于军事、工业、民生等众多领域。材料在加工及后续的使用过程中, 需要随时监测和掌握材料的硬度、渗碳深度、应力等关键参数。利用常规的检测仪对材料进行硬度、应力检测时, 会在表面产生一定损伤, 对于用于精密仪器的零件, 可能会对设备性能产生影响, 故无损检测对于此类零件来说, 至关重要。利用磁巴克豪森信号 (magnetic barkhausen noise, MBN) 可实现对材料性能快速灵活、准确无损的检测。而对此方法最为关键的是 MBN 信号检测传感器的设计。

1 磁巴克豪森噪声与铁磁性材料

磁巴克豪森噪声是一种微观磁现象, 在对铁磁性材料施加交变磁场进行磁化的过程中, 材料会在外加磁场方向发生磁畴的翻转及磁畴壁的移动, 从而对外释放阶跃的跳跃信号, 即巴克豪森跳变, 该

信号对材料微观结构变化很敏感。巴克豪森跳变导致局域磁场变化而诱发脉冲涡流, 向空间辐射磁场, 将磁敏元件置于材料表面检测, 将该辐射磁场转换成电压信号, 称作磁巴克豪森噪声^[2]。基于巴克豪森噪声检测原理, 可实现对铁磁性材料的渗碳层深度、表面薄膜厚度、硬度、所受应力等的快速无损检测。

2 传感器设计

2.1 检测原理与工作方式

如图 1 所示, 测试系统由激励产生模块、MBN 信号检测传感器、待测试件和信号处理模块组成。激励产生模块包括激励产生、激励参数调节和功率放大; MBN 信号检测传感器由励磁模块、信号接收模块及前置放大模块组成; 信号处理包括放大滤波、AD 转换及数据显示。

在待测试件的磁化过程中, 通过调节激励的幅值与频率, 使得励磁模块施加于试件的磁场强度不断增大, 从而使试件处于剧烈磁化阶段。在此阶段, 材料内部的磁畴向外磁场方向偏转, 使得磁畴壁发生相应的移动, 磁化率出现最大值, 此过程为不可逆磁化过程, 取消外磁场的施加后, 试件不会恢复到初始状态。在此过程中, 产生明显的巴克豪森噪声信号。通过放置在材料表面的接收模块, 将

收稿日期: 2020-11-23

作者简介:李包青(1995—), 男, 山西忻州人, 中北大学, 硕士研究生, 研究方向为电磁无损检测; 通信作者郑宾(1964—), 男, 山西太原人, 中北大学, 教授, 研究方向为电子测试技术; 郭华玲(1976—), 女, 山西太原人, 中北大学, 副教授, 研究方向为激光超声无损检测技术。

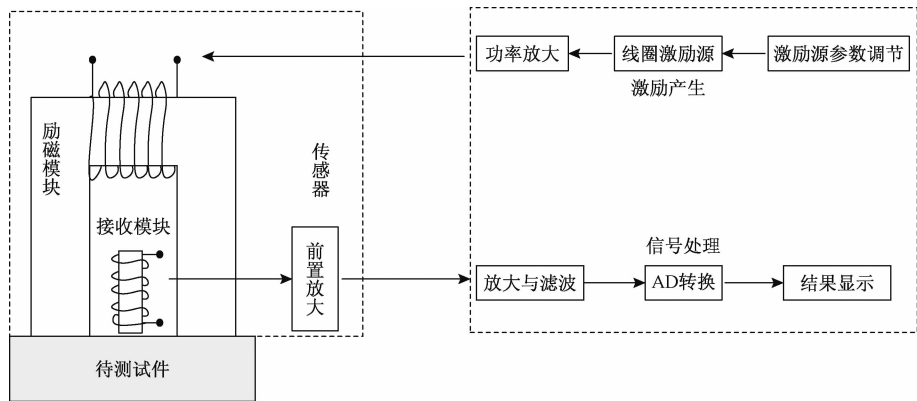


图1 测试系统组成框图

巴克豪森噪声转变为电压信号输出。磁场在对铁磁性材料的磁化过程中,随着磁化深度的增加,磁场强度会出现衰减。根据电磁学理论,磁场在垂直材料表面的衰减规律为

$$H(x) = H_0 e^{-\alpha x} \tag{1}$$

式中: $H(x)$ 为材料内部与表面垂直距离为 x 处的磁场强度; H_0 为试件表面磁场强度; α 为衰减系数, $1/\alpha$ 常被定义为穿透深度,指 $H(x)$ 衰减为 H_0 的 $1/e$ 时,距材料表面的距离^[3]。给传感器励磁线圈施加的激励为正弦信号,由涡流与集肤效应可知,材料在磁化过程中的感应电流会阻碍磁场在导体中的透入深度 δ , 公式表示^[4] 为

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_0 \mu_r}} \tag{2}$$

式中: ω 为激励源的角频率(等于 $2\pi f$, f 为激励信号的振荡频率); σ 为材料的电导率; μ_0 为真空中的磁导率; μ_r 为材料的相对磁导率。结合式(1)、式(2)可知,衰减系数为

$$\alpha = \sqrt{\pi f \sigma \mu_r \mu_0} \tag{3}$$

结合式(2)、式(3)可知,在其他条件不变的情况下,穿透深度与激励信号的频率成反比。测试系统,可以通过调节线圈激励信号的频率,来获取不同厚度铁磁性材料的巴克豪森噪声信号。

2.2 励磁模块方案对比分析

设计主要针对平面型的铁磁性材料进行巴克豪森噪声信号的检测。励磁模块的设计包括磁轭的材料和形状的选择以及磁轭线圈的设计。经查阅资料及相关实验发现,MBN 信号的频率范围大概为 10~500 kHz,本设计中用到的不锈钢的 MBN 信号集中在 100 kHz 左右。

求解通电螺线管在空间中的磁感应强度有矢量法和磁标势法。通过矢量势法简化计算后,通电螺

线管中心对称轴的磁场强度可表示为 $B = \mu_0 n I$, 其中 μ_0 为真空中的磁导率, n 为单位长度的匝数, I 为线圈通电电流^[5]。

结合材料的性能,硅钢片饱和磁通较高(约 12 000 GS),适用于低频,使用频率不超过 400 Hz,具有高导磁率、低频不易饱和、磁滞损耗低、易于退磁等优点并且可以通过硅钢片压制成需要厚度,适合二次加工。设计采用 B30G20 取向硅钢片作为磁轭材料。磁轭由 0.3 mm 厚的硅钢片切割成形后,70 片压制成厚度为 2.1 cm 的导磁磁轭,激励线圈由直径 $\Phi=0.29$ mm 的漆包线,绕制 1 000 匝制成。

适用于平面材料磁巴克豪森噪声信号检测的磁轭形状有 U 型和 H 型,外形和尺寸如图 2 所示。将励磁模块放于材料表面,传感器下部两端口与材料表面接触,绕在上部的激励线圈产生交变磁场,经磁轭耦合到材料表面,沿材料垂直方向进行磁化,检测线圈获取此方向的 MBN 信号。利用 U 型和 H 型磁轭都可以与材料进行有效贴合。为进行对比,H 型、U 型磁轭的高度均为 50 mm,底端截面均为 10 mm×10 mm,内外跨径分别为 20 mm 和 40 mm。利用有限元仿真软件来分析这两种磁轭对铁磁性材料的磁化效果,以此来确定磁轭的形状及工作方式,以便设计性能更加优异的适用于平面材料的磁巴克豪森噪声检测传感器。

依照图 2 标注的磁轭尺寸,在 Maxwell 16.0 仿真平台中分别建立 H 型和 U 型励磁模块有限元仿真模型,如图 3 所示。求解类型设置为涡流场;在三维涡流场中,非线性的导磁材料无法通过输入 $B-H$ 曲线来定义材料属性,可以通过定义常数相对磁导率的方法来定义材料^[6],故将磁轭材料设置为相对磁导率为 2 000 的硅钢;顶端缠绕的线圈设置为铜,匝数为 1 000,激励电流为 1 A,频率为 5 Hz,总的激

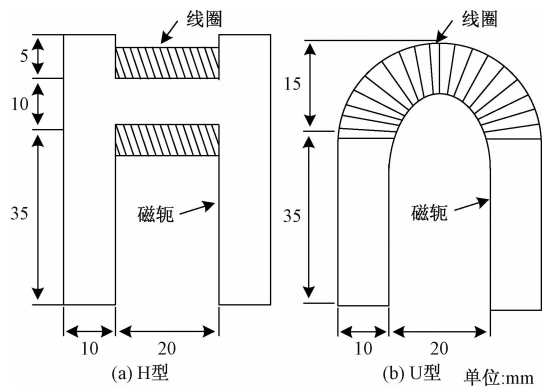


图 2 励磁模块形状

励安匝数应设置为 1 414;底端试件材料设置为不锈钢。

由图 4 的仿真结果可以看出,这两种磁轭在缠绕相同匝数线圈,施加相同的激励下,可与试件形成

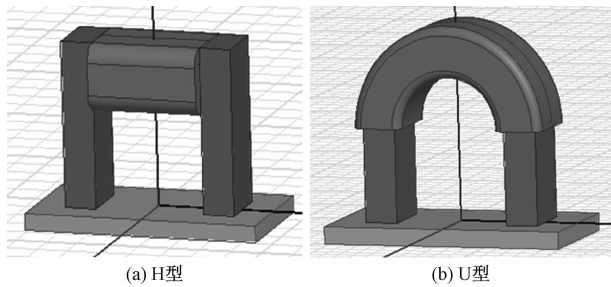


图 3 励磁模块有限元模型

闭合的磁路,试件基本上达到了被磁化的效果。磁感应强度的矢量分布基本保持一致,故从磁化角度来讲,磁轭使用这两种结构区别不大。从制作激励模块的难易角度来讲,H 型磁轭容易加工成型,绕制线圈的时候,方便控制匝数,易于排布,因此本次实物设计采用 H 型磁轭。

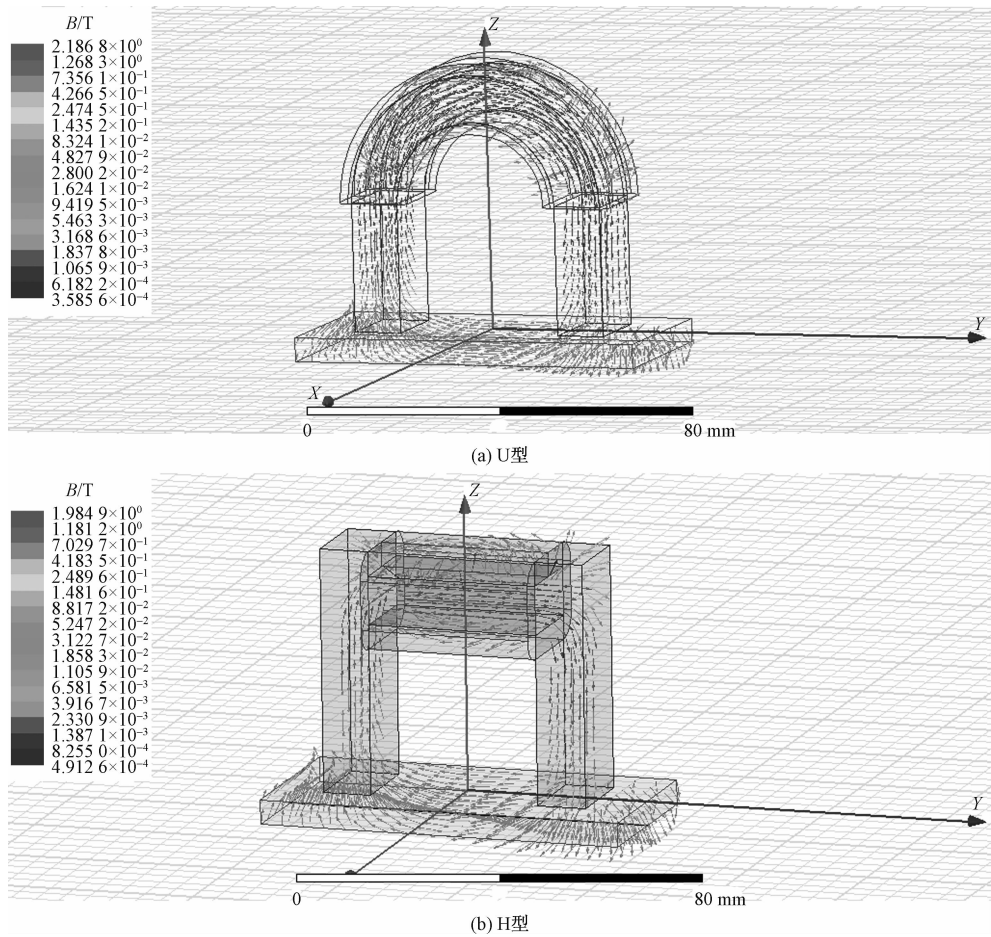


图 4 励磁模块磁感应强度矢量分布

2.3 信号拾取模块设计

设计中用到的不锈钢的 MBN 信号主要集中在 100 kHz 左右。常用的磁敏传感器有磁阻传感器、霍尔元件、感应线圈等,结合传感器的灵敏度、线性

范围及频率范围等参数,本次设计选用灵敏度高、线性度好、频率范围广的感应线圈。接收模块原理如图 5 所示。

试件在磁化的过程中,磁畴向外加磁场的方向

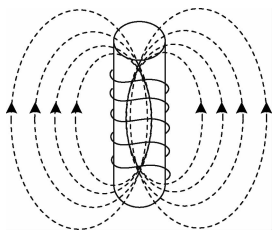


图5 接收线圈原理

发生转动以及磁畴壁不连续的、阶跃式的运动，引起巴克豪森噪声信号。通过放置在材料表面的接收线圈将巴克豪森噪声以感应电压的形式表现出来。假设铁芯材料的磁导率为 μ ， S 为磁芯截面积， H 为MBN信号在铁芯轴向的分量， ω 为MBN信号的角频率($\omega=2\pi f$)， N 为线圈单位长度内的绕制密度(匝/m)，则磁芯的感应电压为^[7]

$$V = \mu\omega NSH \tag{4}$$

接收模块可等效为一个由电阻和电感串联且与其分布电容并联形成的线圈，故其固有谐振频率为^[8]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \tag{5}$$

式中： L 为接收线圈的电感值； C 为线圈的电容值。

由于MBN信号的强度很微弱，因此接收模块需要有较高的灵敏度。线圈初始灵敏度可表示为

$$\epsilon = \frac{V}{H} = \mu\omega NS \tag{6}$$

设线圈的内径为 D_i ，外径为 D ，磁芯长度为 L ；令 $a = L/D$ 为线圈的延伸比， β 为磁芯上绕线部分与磁芯总长度的比值， $x = D_i/D$

对实际的磁芯相对磁导率 μ_c 低于其材料的相对磁导率 μ_r ，这与退磁因子 N_d 确定的退磁场效应有关，与磁芯的几何形状有关。磁芯的实际磁导率 $\mu = \mu_0 \mu_c$ 。

$$\mu_c = \frac{\mu_r}{1 + N_d(\mu_r - 1)} \tag{7}$$

$$N_d = \frac{\frac{m}{\sqrt{m^2 - 1}} \times \ln[(m + \sqrt{m^2 - 1}) \times 0.6] - 1}{m^2 - 1} \tag{8}$$

式中， $m = L/D_i$ ，即为磁芯长度与直径的比值。足够长的磁芯可以减小退磁因子从而提高材料的有效相对磁导率；另一方面，如果 m 足够大， μ_c 将取决于材料的磁导率 μ_r 。

磁芯的横截面积为

$$S = \frac{\pi}{4} D_i^2 \tag{9}$$

故线圈的灵敏度可表示为^[9]

$$\epsilon = 2\pi f \mu_0 \frac{\mu_r}{1 + N_d(\mu_r - 1)} n(1 - x) \frac{\pi \beta L^3 x^2}{8a^2} \tag{10}$$

单位为mV/nT。

常用于磁芯的材料有合金类和铁氧体，通过查阅资料，铁氧体适用于10~500 kHz，低功率的应用环境，与MBN信号的频率接近，故本次设计采用Mn-Zn铁氧体作为磁芯材料，相对磁导率 $\mu_r = 3\,000$ ，磁芯长度为1.5 cm，直径为1 cm。线圈采用 $\Phi=0.29$ mm的漆包铜线，匝数为2 000匝，绕制所占磁芯长度为1 cm，位于磁芯的中部。通过计算，该磁芯有效相对磁导率 $\mu_c = 46.05$ ，计算得到该线圈的理论灵敏度为 $\epsilon_{100\text{ kHz}} = 9.086$ mV/nT。

另外接收线圈在测试材料的放置位置会影响线圈的接收特性和工作性能。为确定接收线圈放置的位置，在试件材料深度为3 mm处，设置一条路径，用来查看此路径上的磁感应强度。在激励电流为1 A，频率为5 Hz，总的激励安匝数应设置为1 414下材料中此路径上的磁感应强度如图6所示。

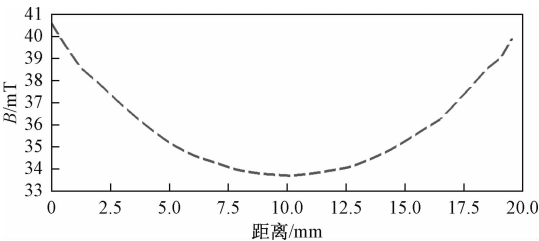


图6 材料表面磁感应强度变化趋势

图6中，由于材料两边靠近磁轭端口，磁感应强度受外加磁场影响大，难于获取MBN信号，故设计中将接收线圈放于磁轭下方正中间。

磁芯上的绕线线圈感应磁场信号的同时，在线上也会感应到较小的电场信号，感应的电场就会对磁场在天线上产生的感应信号造成干扰，因此需要采取必要、适当的措施对电场干扰抑制、抵消，可以采用使磁棒接地的方式来消除由于磁芯材料分布不均匀造成的影响。

3 实物设计与巴克豪森信号分析

测试系统工作过程为：信号发生器产生激励信号(正弦信号，幅值为1 V，频率为5 Hz)经功率放大器后，作用在传感器励磁线圈上，励磁线圈产生交变磁场，使试件处于剧烈磁化阶段，通过传感器的接收线圈，将磁场信号转换为电压信号，通过示波器显示与读取。测试系统如图7所示。

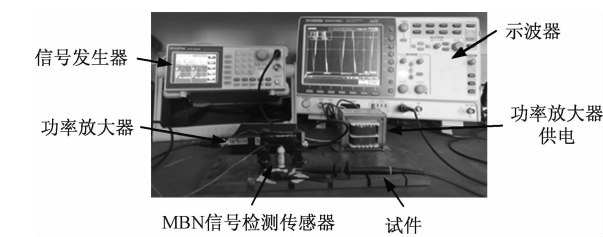


图 7 测试系统实物图

MBN 信号检测传感器在试件表面移动过程中,MBN 信号如图 8、图 9 所示,在不同的位置通过 MBN 信号可反映出材料内部的残余应力、晶体结构等微观情况^[10]。MBN 信号的频谱如图 10 所示,分析可知,所测材料的 MBN 信号频率集中在 100 kHz 左右。

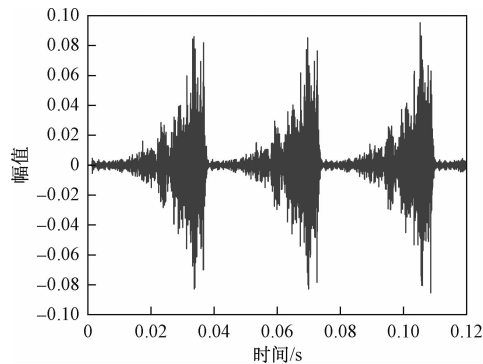


图 8 原始巴克豪森噪声信号

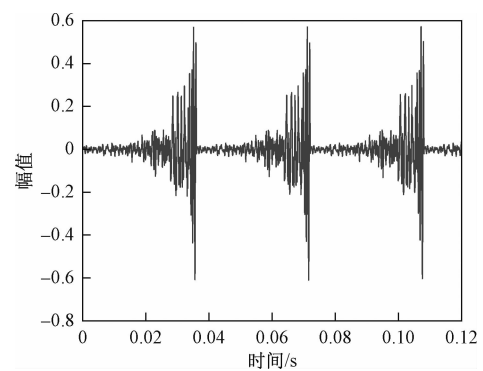


图 9 平滑处理后的巴克豪森噪声信号

4 结语

根据磁巴克豪森噪声产生原理,分析了巴克豪森噪声信号检测原理,针对铁磁性材料设计了一种磁巴克豪森噪声信号检测传感器,并搭建出检测平台。针对常用的 H 型和 U 型传感器导磁磁轭,进行有限元仿真,分析各自优缺点并结合理论计算得出如下结论:

1)通过对励磁模块磁感应强度的理论计算并

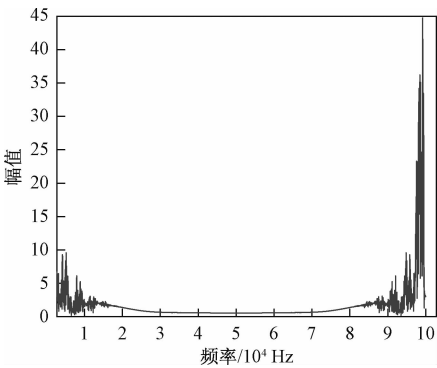


图 10 MBN 信号频谱图

对 U 型和 H 型励磁模块建模,分析磁力线及磁感应强度,发现两种形状的磁轭导磁效果和对试件的磁化效果是一样的。在实际设计中,H 型磁轭在缠绕线圈时,能使线圈缠绕整齐紧密。

2)通过理论计算分析及实际试验得出:磁场在垂直于材料表面传播会出现衰减,并且与线圈激励信号成反比。即可通过调节信号的频率来实现磁化深度的调节,信号的幅值会影响试件的磁化强度。

3)接收线圈的灵敏度、频率响应范围及摆放位置是能否检测到巴克豪森噪声信号的关键。接收线圈的灵敏度与磁芯的长度、直径及缠绕线圈的匝数成正比,但还需考虑缠绕线圈的分布电容、有效电阻及接收线圈的大小等因素。

参考文献

[1] 贾起民,郑永玲. 电磁学[M]. 北京:高等教育出版社,2001: 155—195.

[2] 孙俊杰,王文涛,邓重启. 巴克豪森励磁检测传感器设计与仿真[J]. 传感器与微系统,2018,37(1):105—107.

[3] 华斌,李平,文玉梅. 基于巴克豪森效应的钢板内部缺陷检测方法[J]. 传感器与微系统,2011,30(1):51—52.

[4] 任吉林,林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京:科学出版社,2008:520—530.

[5] 苏安,顾国锋. 对求解通电螺线管磁场两种方法的讨论[J]. 广西物理,2008,29(1):51—54.

[6] 赵博,张洪亮. Ansoft12 在工程电磁场的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001:314—350.

[7] 王锋,刘美全,徐章遂. 磁天线参数设计及实现方案[J]. 船舶电子工程,2014,8(3):112—114.

[8] MACIUSOWICZ M,PSUJ G. Use of time-frequency representation of magnetic barkhausen noise for evaluation of easy magnetization axis of grain-oriented Steel[J]. Materials,2020,13:3390.

[9] 刘凯凯,王永斌,刘桐. 水下磁性接收天线的设计与制作[J]. 船舶电子工程,2016,10(36):182—184.

[10] QIU F, KLUG M J, TIAN G Y, et al. Influence of magnetic domain wall orientation on Barkhausen noise and Magneto-mechanical Behavior in electrical steel[J]. Journal of Physics D, 2019, 52: 265001.

Design of Magnetic Barkhausen Noise Signal Detection Sensor

LI Bao-qing, ZHENG Bin, GUO Hua-ling

(Key Laboratory of National Defense Science and Technology of Electronic Testing Technology,
North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A kind of detection sensor is designed for ferromagnetic materials to obtain Barkhausen noise signal. Through the finite element electromagnetic simulation software Ansoft, the common H-type and U-type excitation modules are simulated and analyzed, and the magnetization effect of specific test pieces is analyzed. According to the magnetization effect and manufacturing difficulty, the H-type yoke is selected as the excitation module finally. Theoretical calculation and experimental phenomena are combined to analyze the factors that affect the performance of the Magnetic Barkhausen noise signal detection sensor. It is concluded that the magnetic field will attenuate when it propagates perpendicular to the surface of the material and is inversely proportional to the frequency of the coil excitation signal. The adjustment of the magnetization depth can be realized by adjusting the frequency of the signal, and the amplitude of the signal will affect the magnetization strength of the test piece; the flexibility of the receiving coil The sensitivity is directly proportional to the length and diameter of the core and the number of turns of the winding coil, but the distributed capacitance, effective resistance of the winding coil and the size of the receiving coil should also be considered. Finally, the designed sensor can obtain the Magnetic Barkhausen noise signal with better signal-to-noise ratio.

Key words: ferromagnetic material; magnetic Barkhausen noise; Ansoft; excitation module; receiving coil