

磁致伸缩式纵向超声导波传感器的阻抗匹配设计

张喆斯^{1,3}, 马延鳌¹, 宋振华¹, 马宏伟^{1,2}

(1. 暨南大学 理工学院, 广州 510632; 2. 重大工程灾害与控制教育部实验室(暨南大学), 广州 510632;

3. 广州中国科学院工业技术研究院, 广州 511458)

摘要: 针对基于磁致伸缩式纵向超声导波传感器的管道无损检测问题,介绍了磁致伸缩式纵向超声导波传感器的检测原理及其结构。在此基础上,对接收传感器与接收源之间的阻抗匹配问题进行了讨论,阐述了实现阻抗匹配的条件与方法,并且通过理论计算得到最佳匹配条件与匹配电路的最佳电容。最后,设计了验证试验,验证了阻抗匹配问题的存在,讨论了阻抗匹配角、匹配电容值与导波信号幅值之间的关系,并且利用试验方法得到了真实条件下匹配电路的最佳电容值。

关键词: 磁致伸缩; 超声导波传感器; 阻抗匹配

中图分类号: TP212; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2015)08-0043-05

Impedance Matching Optimization of Guided Wave Magnetostrictive Sensor for Large-Diameter Pipes

ZHANG Zhe-si^{1,3}, MA Yan-jun¹, SONG Zhen-hua¹, MA Hong-wei^{1, 2}

(1. College of Science & Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China;

2. Key Laboratory of Disaster Forecast and Control in Engineering, Ministry of Education of People's Republic of China
(Jinan University), Guangzhou 510632, China;

3. Institute of Industry Technology, Guangzhou & Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 511458, China)

Abstract: Aiming at the problems of nondestructive testing of pipelines based on longitudinal guided wave magnetostrictive sensor, in this article, the testing principle and structure of the longitudinal guided wave magnetostrictive sensor was introduced. Based on it, the problem of the impedance matching between the receiving transducer and the receiving source was discussed deeply. The conditions of implementation and methods of impedance matching are elaborated. Optimal matching condition and the optimal capacitor of the matching circuit is obtained from theoretical calculations. Finally, experiment was designed to verify the existence of the problems of impedance matching, and the relationships among the impedance matching angle, the matching capacitance and the guided wave signal amplitude was discussed, and the best capacitance value of matching circuit under real conditions was obtained by experimental method.

Keywords: Magnetostrictive effect; Ultrasonic guided wave sensor; Impedance matching

相对于传统的超声波检测技术,超声导波具有传播距离远、检测速度快的特点,因此在大型构件(如在役管道)和复合材料的无损检测中具有良好的

应用前景。基于磁致伸缩效应的导波无损检测技术是近年来兴起的一种新技术,其通过测量导波的反射情况,可对铁磁体构件中的腐蚀、裂纹和破损等缺陷进行检测^[1]。该方法具有一定的优势:①属于非接触式传感器,可以任意改变激励与接收传感器的位置,具有较强的灵活性。②可实现对任意截面结构的检测。③能量转化效率高。④适应各种高

收稿日期: 2014-04-13

作者简介: 张喆斯(1988—),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为结构损伤检测。

温检测环境。

近年来,国内研究的侧重点主要体现在对磁致伸缩式超声导波检测的理论阐述、在检测中建立纵向导波激励和接收的模型以及寻找适用于检测的最佳频率等方面。华中科技大学武新军等^[2-3]详细论述了管道用磁致伸缩超声导波检测系统的组成,研制了信号检测的相关试验装置,其现场试验结果表明了磁致伸缩传感器用于管道导波检测的可行性、有效性和实用性。上海交通大学金建华、申阳春等^[4]利用磁致伸缩式超声导波传感器激励了周向导波信号对大直径管道进行损伤检测,但其激励的为周向导波,能量利用率不高。华中科技大学柯岩等^[5]进行了基于磁致伸缩技术的钢管无损检测试验,但没有提及传感器的阻抗匹配问题。湖北工业大学程涛等^[6]开展了管道超声导波磁致伸缩传感器的研发工作,对直径 51 mm 的管道进行了裂纹检测,提到了传感器的阻抗匹配问题,但并没有对该问题进行细致地讨论与阻抗匹配的验证试验。上述研究在磁致伸缩式传感器的设计问题上涉及不多,在实际的检测过程中常常难以实现能量利用的最大化。

因此,笔者基于上述研究,对磁致伸缩式传感器的阻抗匹配及其优化问题进行了探讨,重点分析了磁致伸缩纵向导波传感器在接收传感器与接收源之间,由于阻抗失配而导致接收信号幅值较小的问题。

1 磁致伸缩式纵向超声导波传感器检测原理

1.1 磁致伸缩效应在导波管道无损检测中的应用

基于磁致伸缩式纵向导波传感器的超声导波无损检测技术,笔者利用了磁性材料的磁致伸缩效应及其逆效应,在磁性材料管道中激励与接收导波,通过对接收信号的分析以实现磁性材料管道的无损检测。磁性材料的磁致伸缩效应指的是,当磁性材料处于外加磁场中被磁化时,其形状及体积都会发生改变而产生应变;反之,当磁性材料受到应力作用发生变形时,会引起其磁化状态的改变,这种现象又称为磁致伸缩逆效应^[6]。

如图 1 所示,管道激励与接收部分分别处于静态偏置磁场下并位于裂纹的同侧,当交变电流通过激励传感器线圈时,管道的激励端会产生出同频率变化的交变磁场而产生相应的纵向应变,激励纵向超声导波。激励的导波沿管道轴向传播,第一次经过接收传感器时,由磁致伸缩逆效应引起接收线圈的电压变化而被示波器接收到。导波继续向前传

播,在裂纹处发生反射产生反射波,反射波经过接收传感器时,同样引起接收线圈的电压变化而又被示波器接收到。通过分析所接收的电压信号就可对裂纹进行定位与程度评估。利用上述方法检测裂纹时存在两个检测盲区,即裂纹恰好位于传感器所在区域或裂纹位于激励与接收传感器两者之间。因此,实际检测时,应利用磁致伸缩纵向超声导波传感器非接触式的优势,改变激励与接收传感器的相对位置,重复利用上述方法进行多次检测。

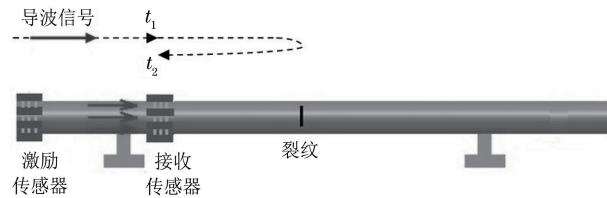


图 1 磁致伸缩效应在管道检测中的应用原理示意

1.2 磁致伸缩式纵向导波传感器的组成

磁致伸缩纵向超声导波传感器分为激励传感器和接收传感器,主要由内层的激励/接收线圈与外层的静态偏置磁场两部分组成,如图 2 所示。

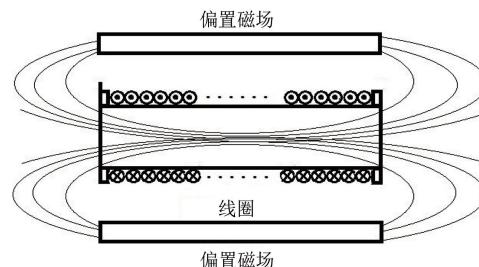


图 2 传感器的组成示意

1.2.1 激励/接收线圈

激励/接收线圈位于磁致伸缩式纵向导波传感器的内层,一般由漆包线密绕而成。其作用为产生交变磁场而作用于管道(激励线圈)或接收相应的交变磁场变化产生的感生电动势(接收线圈)。由于内层激励/接收线圈在工作时会载以交流电,因此属于具有一定电容与电感的电子器件。

为了增强磁致伸缩效应,考虑导波的叠加原理,采用三段式密绕线圈^[7]。其中,两侧段线圈的绕制方向与中段相反,并且每段轴向长度 l 均为半波长:

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{v_p}{2f} \quad (1)$$

式中: λ 为导波波长; f 为导波中心频率; v_p 为中央频率所对应的导波相速度。

对于文中试验所用到的外径 25 mm,壁厚 3 mm 的空心铁管而言,其纵向模态频散曲线如图 3 所示。

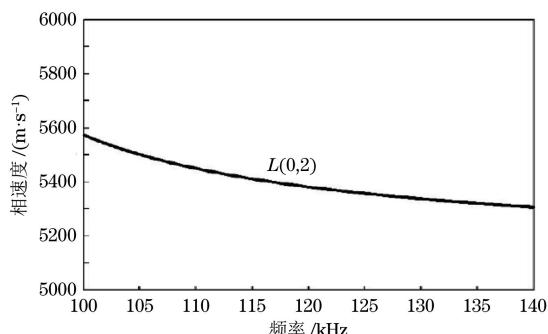


图 3 纵向模态相速度频散曲线

根据图 3 所示的曲线,选择中心频率为 120 kHz 的导波作为激励信号。其中心频率对应的相速度可由相速度频散曲线得到,即 $v_p = 5380 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,由式(1)求得传感器每段线圈的长度应为 $L = 22 \text{ mm}$,总长 69 mm($3L + 3 = 69 \text{ mm}$,其中 3 mm 为挡板厚度)。

导线的选取需考虑其承载电流的范围。由于导线要紧密缠绕在一起,所以选用市场上常见的漆包线。综合导线电流、发热、能量转化等因素,激励线圈选择 0.3 mm 直径的漆包线,接收线圈选择 0.1 mm 直径的漆包线。

1.2.2 外层偏置磁场

偏置磁场的主要作用是适当提高铁磁体的磁化强度,增强传感器的灵敏度,避免磁性材料的倍频效应^[8]。一般,有两种方式可以获得所需要的偏置磁场,分别为直流线圈偏置磁场与永磁体偏置磁场,两者根据应用不同而各有优缺点。试验采用永磁体作为偏置磁场激励源,其磁源纯净噪声小,磁路简单,永磁体一旦被磁化,便能提供长期稳定的磁场。

偏置磁场需满足两个条件:① 磁感应强度值需在磁性材料磁致伸缩效应的线性区域($B > 0.1 \text{ T}$)。② 磁场在管道横截面上的分布尽量均匀,以使得导波在管道中能够被均匀激励与接收。通过对永磁体偏置磁场分布的计算可知,对于所用到的外径 25 mm,壁厚 3 mm 的空心铁管,当采用三磁路偏置磁场设计(图 4)时,传感器覆盖部分管道中心截面上

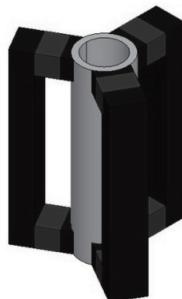


图 4 三磁路偏置磁场设计示意

的平均磁感应强度大小为 $2.1534 \text{ T} > 0.1 \text{ T}$,并且磁场的均匀程度较好。因此选用三磁路的偏置磁场设计。

2 传感器阻抗匹配的理论与试验

2.1 阻抗匹配概念

阻抗匹配反映的是输入电路与输出电路之间的能量传输关系。当输入与输出电路实现阻抗匹配时,将获得最大的能量传输功率。反之,当输入与输出电路阻抗失配时,不但得不到最大的能量传输,还可能损害电路^[9]。对于文中所用的磁致伸缩纵向导波传感器,阻抗匹配问题主要体现在接收传感器与接收源之间的匹配,阻抗失配的话将导致接收信号幅值较小。因此,必须对接收传感器与接收源进行阻抗匹配,以达到能量的最大接收。

2.2 阻抗匹配条件与方法

磁致伸缩纵向导波传感器的激励/接收线圈均具有一定的电阻、电容与电感,属于电抗电路。应采用共轭匹配的方法来进行阻抗匹配,即使得接收线圈与接收源的电阻分量相等,电抗分量互为相反数:

$$\begin{cases} R_r = R_o \\ X_r + X_o = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_r 、 X_r 分别为接收线圈的电阻与电抗; R_o 与 X_o 分别为接收源的电阻与电抗。

在一般情况下,接收源的电阻较难测量,因此不考虑 $R_r = R_o$ 这一条件,而一般认为接收源的电抗 $X_o = 0$,因此式(2)化简为:

$$X_r = 0 \quad (3)$$

而对于接收线圈,其电抗由感抗和容抗组成:

$$X_r = X_L - X_C = 2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC} \quad (4)$$

式中: L 为接收线圈的电感值; C 为接收线圈的电容值; f 为交流电频率。

将式(4)代入式(3),得到磁致伸缩纵向导波传感器接收线圈的阻抗匹配条件为:

$$2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC} = 0 \quad (5)$$

该条件等价于接收线圈的阻抗相位角 $\theta = 0$,即

$$\theta = \arctan \left[\frac{2\pi fL - 1/(2\pi fC)}{R} \right] = 0 \quad (6)$$

式中: R 为接收线圈的电阻值。

可见,当接收线圈的阻抗相位角 θ 越小,则阻抗匹配程度越好; θ 越大,匹配程度越差; $\theta = 0$ 时为最佳的匹配条件。

实现接收线圈阻抗匹配的方法有两种:① 在设

计线圈时即考虑式(6)的匹配条件。② 在接收线圈中串联一定电容值的电容元件组成匹配网络, 改变匹配电路的总电容大小, 使得这个匹配网络满足式(6)的匹配条件。显然, 方法②实现起来要容易得多。

假设要串联的电容元件的电容值为 C_m , 则满足式(6)条件的匹配电路总电容值为:

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L_r} = \frac{C_r C_m}{C_r + C_m} \quad (7)$$

式中: L_r 、 C_r 分别为原先接收线圈的电感与电容值。

因此, 由式(7)得到满足匹配条件 $\theta=0$ 时, 所需要串联的电容元件的最佳电容值可表示为:

$$C_m = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L_r - 1/C_r} \quad (8)$$

现推导阻抗相位角 θ 与所串联的电容元件电容值 C_m 的关系。设串联一定电容值的电容元件后, 匹配电路的阻抗相位角为:

$$\theta = \arctan \left[\frac{2\pi f L_r - 1/(2\pi f C)}{R} \right] \quad (9)$$

又由于

$$C = \frac{C_m \cdot C_r}{C_m + C_r} \quad (10)$$

式中: C_m 为所串联的电容元件的电容值; C_r 为接收线圈的电容值。

将式(10)代入式(9), 得到 θ 与 C_m 的关系:

$$C_m = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L_r - 2\pi f R \tan \theta - 1/C_r} \quad (11)$$

当满足匹配条件 $\theta=0$ 时, 即得到式(8)的结果。

对于前文所述的接收线圈而言, 利用 LCR 表测量接收线圈得到 $L_r=1.197$ mH, $C_r=1.469$ pF, $R=117.73$ Ω。取 $\theta=-\pi/2 \sim \pi/2$, 得到 C_m 与 θ 的函数曲线如图 5 所示。当 $\theta=0$ 时, $C_m=0.7$ nF, 即说明对于该接收线圈, 最佳匹配电容值的理论计算值为 0.7 nF。

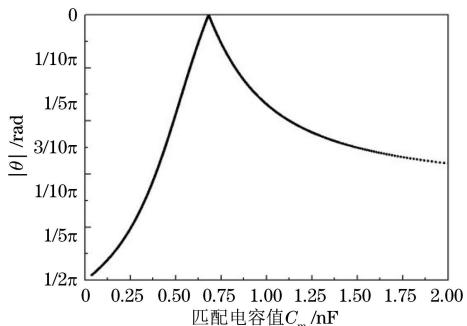


图 5 匹配电容值 C_m 与阻抗相位角 θ 的函数曲线

2.3 阻抗匹配试验

为讨论阻抗相位角 θ 、匹配电容值与导波信号

幅值的关系, 设计具体试验进行验证。试验所用管道为长 3 m, 外径 25 mm, 壁厚 3 mm 的铁磁性空心圆管。永磁体偏置磁场与内层线圈的设计前文已详细阐述。所使用的激励源为 Tektronix AFG3252 型任意波形发生器与功率放大器, 接收源为 Tektronix DPO 4050B 型数字示波器, 试验装置外观如图 6 所示。激励传感器放置于管道的一端, 接收传感器放置于管道的正中间距离激励传感器 1.50 m 处。激励 10 周期中心频率 120 kHz 的 $L(0,2)$ 模态导波进行试验。

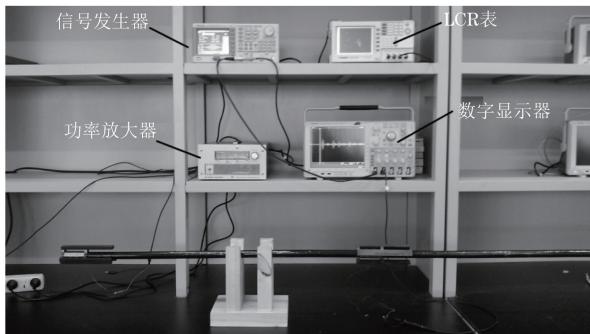


图 6 试验装置外观图片

试验中, 在接收线圈电路中依次串联电容值 C_m 为 $0.1 \sim 2.0$ nF 的电容元件, 每次电容值增量为 0.1 nF, 共 20 组工况。传感器优化完毕后, 在管道内激励出 10 周期中心频率 120 kHz 的 $L(0,2)$ 模态导波, 每次利用数字示波器收集被接收传感器接收到的导波信号。匹配电容值为 $0.1 \sim 1.0$ nF 时, 导波信号的时程曲线如图 7 所示 (C_m 为 $1.1 \sim 2.0$ nF 时的导波信号图略)。

统计各工况下, 接收传感器第一次接收到的导波信号的幅值, 得到电压幅值与匹配值的拟合曲线如图 8 所示。由图 8 可知, 当串联电容值 C_m 从 0.1 nF 增大到 2.0 nF 的过程中, 接收到的导波信号幅值首先随着电容值 C_m 的增大而增大, 当 $C_m=1.0$ nF 时导波信号幅值达到最大值, 此后信号幅值随着电容值 C_m 的增大而减小。因此, $C_m=1.0$ nF 为该接收传感器的最佳匹配值。当传感器处于最佳匹配状态时, 导波信号的幅值增大了一倍, 能量得到了充分利用, 有利于实际的检测试验。

对比图 5 与图 8 可知, 两者曲线的变化趋势基本相同, 导波信号幅值与阻抗相位角 θ 随着匹配电容的增加有相同的趋势, θ 越接近于 0 值导波的信号幅值越大。但是, 试验值与理论计算值存在一定的偏差。这主要是因为: ① 使用 LCR 表测量接收线圈时, 由于其本身测量原理及测量电路的关系, 检

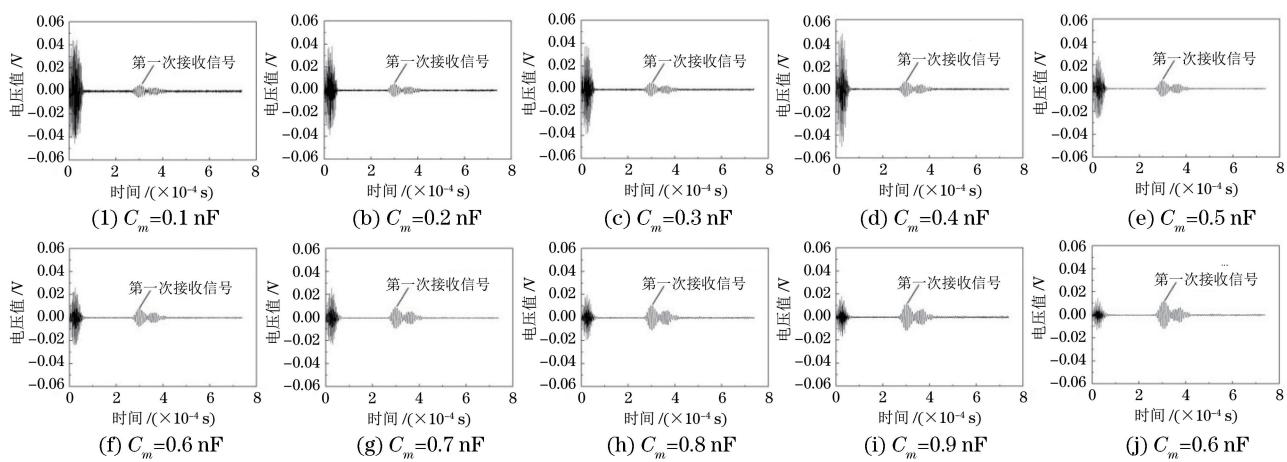


图 7 匹配电容值 0.1~1.0 nF 时, 导波信号的时程曲线

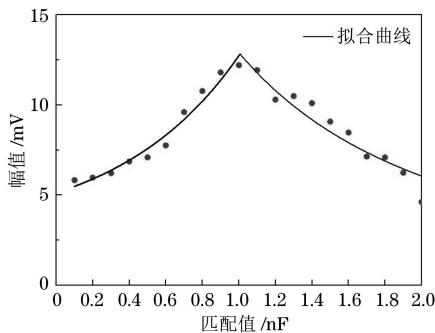


图 8 导波信号电压幅值与匹配电容值的关系曲线

测的电感与电容值会存在一定的误差。②由于接收线圈在测量与工作时处于不同的状态,造成测量值与真实值存在误差。③由于所串联的电容元件的电容值十分微小,导致其本身存在制造误差。综上可知,由于误差存在的关系,由式(8)计算得到的理论匹配值并不一定能使得导波信号幅值达到最大,而应在其附近多取几组电容值进行试验才可得到最佳的匹配效果。

3 结论

(1) 磁致伸缩纵向导波传感器的接收传感器与接收源之间存在阻抗匹配的问题,当两者匹配不佳时,导波信号幅值较小;两者匹配一致时,导波信号的幅值增加了一倍,这意味着一次检测距离可以增加一倍。

(2) 导波信号的幅值与接收传感器的阻抗匹配角 θ 有关, θ 越接近于0值导波的信号幅值越大。

(3) 通过在接收传感器电路中串联一定电容值的电容元件,可改变接收传感器的阻抗匹配角 θ ,使得其接近于0值。最佳的理论串联电容值由式(8)得到。但试验表明,理论计算值与实际最佳匹配电

容值存在一定的偏移,需要在其附近多取几组电容值进行试验以得到最佳的匹配效果。

(4) 考虑传感器的阻抗匹配问题,对于进一步优化设计磁致伸缩式超声导波传感器有一定的指导作用;对于提高导波信号幅值,提高能量利用率,提高检测距离都有重要的意义。

参考文献:

- [1] 王悦民,谢俊丽,刘东. 基于磁致伸缩效应的导波无损检测技术研究进展[J]. 无损检测, 2007, 29(5): 280-284.
- [2] 柯岩,武新军,康宜华,等. 基于磁致伸缩效应的钢管导波检测可行性[J]. 无损检测, 2007, 29(3): 113-116.
- [3] 武新军,徐江,沈功田. 非接触式磁致伸缩导波管道无损检测系统的研制[J]. 无损检测, 2010, 23(3): 166-170.
- [4] 金建华,申阳春. 一种用于管道检测的磁致伸缩式周向超声导波传感器[J]. 传感技术学报, 2004(4): 576-579.
- [5] 柯岩. 基于磁致伸缩导波的钢管无损检测实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006: 37-42.
- [6] 程涛. 管道裂纹磁致伸缩导波检测传感器研制与开发[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2012: 37-51.
- [7] 王博文,黄淑瑛,黄文美. 磁致伸缩材料与器件[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 1-6.
- [8] 吴斌,刘秀成,何存富. 兆赫兹纵向模态磁致伸缩传感器的设计及其在钢绞线中的试验研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(22): 148-153.
- [9] 龙毅,张正义,李守卫. 新型功能磁性材料及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 58-60.
- [10] 郭继红. 关于阻抗匹配问题的分析[J]. 辽宁大学学报: 自然科学版, 2001, 28(3): 257-258.