

磁致伸缩导波激励传感器模型及输出特性*

龙盛蓉^{1,3}, 钟毓宁², 宋小春², 李志农³, 刘莹¹

(1. 南昌大学机电工程学院 南昌, 330068) (2. 湖北工业大学机械学院 武汉, 430068)

(3. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌, 330063)

摘要 基于 MsS 传感器存在较低的信噪比、在外加磁场作用下非线性力磁耦合特性造成输出特性变化等问题, 从铁磁性材料非线性磁弹性耦合理论及磁致伸缩导波激励传感器模型出发, 建立了磁致伸缩导波产生的动力学模型。分析了偏置磁场、激励频率及激励电流对介质质点振动幅度的影响, 通过有限元仿真计算方法验证了该模型分析的有效性。以该模型为基础讨论了非线性模型与线性模型对介质质点振动位移影响, 进一步说明了该模型的适用性。分析表明, 在考虑频散特性的情况下, 为提高磁力转换效率应选择频率较低而强度较大的激励电流, 且其偏置磁场应选择在质点振幅曲线中切线斜率最大的位置。

关键词 磁致伸缩; 超声传感器; 铁磁性材料; 导波; 动力学模型

中图分类号 TB51+2

引言

磁致伸缩式导波检测传感器(magnetostrictive sensor, 简称 MsS)作为一种新型的超声波检测装置, 可以在不拆除管道包覆层的情况下实现对管道结构的健康监测, 同时可以方便地产生诸如纵波、扭转波等多种类型的超声波。然而, MsS 传感器较低的信噪比以及工作性能依赖于被检测材料的特性在一定程度上降低了其实用性。因此, 建立针对特定检测材料的 MsS 传感器模型并分析其性能的主要影响参数有助于提高 MsS 传感器的检测效率。

MsS 产生超声波主要依靠磁致伸缩现象, 但由于磁致伸缩效应的非线性、磁滞效应以及实验条件困难, 目前对于其特性的理解还不深入。在过去的文献中对以磁致伸缩效应为主要机理的 MsS 传感器的研究一般将材料的非线性磁致伸缩关系假定为线性关系^[1-2], 即将非线性耦合的磁致伸缩本构关系在给定的偏置磁场附近泰勒展开后只保留其线性项, 因此该线性模型只适用于在偏置磁场附近狭小的线性范围, 并不能满足实际的工作条件。文献[3-6]定义了磁致伸缩的理论模型, 从弹塑性及电磁学角度考虑了两者之间的磁耦合效应, 并与压电方程

进行类比, 采用压磁方程对磁致伸缩材料力磁耦合特性进行描述。以上研究从线性角度展开, 未反映出其非线性的真实特性。Ogi^[7]从实验角度出发, 采用定性的方法对磁致伸缩参数进行研究, 该结果只适用于简单的几何结构, 而针对复杂结构需要采用数值分析方法建立相应的分析模型。文献[8-9]建立了类似于 Terfenol-D 等由超磁致伸缩材料构成的制动器的有限元模型。现有的有限元模型多数是讨论洛伦兹力, 忽略了磁致伸缩效应的讨论。Ribichini 等^[10]从磁致伸缩力及洛伦兹力的角度分析了各种材料对电磁超声性能的影响, 而线性方程的应用却未反映材料的本质特性。Ludwing 等^[11-12]建立了包括磁致伸缩效应的 EMAT 有限元模型, 然而该模型经过实验验证存在一定的偏差, 并不是十分理想。

针对磁致伸缩式导波检测传感器存在的问题, 笔者从铁磁性材料非线性磁弹性耦合理论及磁致伸缩导波激励传感器模型出发, 建立了磁致伸缩导波产生的动力学模型。采用有限元计算及数值仿真的方法分析了该模型中外加磁场强度、激励频率及激励电流对介质质点振动幅度的影响, 重点分析了非线性特性的影响, 并通过有限元仿真计算了该模型的有效性。

* 国家自然科学基金资助项目(51261024, 50875077); 教育部科学技术重点研究资助项目(211110); 湖北省优秀中青年科技创新团队计划资助项目(T201105)

收稿日期: 2013-07-26; 修回日期: 2013-11-10

1 MsS 激励传感器非线性动力学模型的建立

传统磁致伸缩式导波传感器模型一般只从线性角度^[1-2]讨论力磁耦合的相互作用,忽略了磁致伸缩材料磁性能的非线性影响,从而限定该模型的外加磁场只能在给定磁场范围内才具有有效性。本模型从铁磁性材料非线性本构关系出发,建立了非线性力磁耦合关系的磁致伸缩式导波激励传感器动力学模型。模型中非线性力磁耦合关系^[13-14]为

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_s} + \lambda_0(\sigma) + \frac{\lambda_s - \lambda_0(\sigma)}{M_{ws}^2} M^2 - \frac{\theta \lambda_s}{M_{ws}^4} (M^4 - M_0(\sigma)^4) \quad (1)$$

$$H = \frac{1}{k} f^{-1} \left(\frac{M}{M_s} \right) - \frac{2(\lambda_s \sigma - \lambda_0(\sigma))}{\mu_0 M_{ws}^2} M + \frac{4\theta \lambda_s \sigma}{\mu_0 M_{ws}^3} (M^3 - M_0(\sigma)^3) \quad (2)$$

其中: ϵ 为应变变量; σ 为应力; E_s 为弹性模量; k 及 θ 为松弛因子; λ_s 为饱和磁致伸缩系数; M, M_s 及 M_{ws} 分别为磁化强度、饱和磁化强度及饱和壁移磁化强度; $M_0(\sigma)$ 及 $\lambda_0(\sigma)$ 为随应力变化的饱和壁移磁化强度和磁致伸缩系数。

磁化强度 M 与磁场强度 H 之间可以表示为

$$M = M_s f(kH) = M_s \left[\coth(kH) - \frac{1}{kH} \right] \quad (3)$$

对于磁致伸缩式超声导波激励系统从结构力学角度可以认为是待检测工件受磁场磁化,产生轴向长度方向上的应变,称其为主动应变部分。整个动力学系统的运动过程是由外部磁场作为激励源,通过待检测工件的伸长缩短来引起整个系统的受迫振动。磁致伸缩力 F_{mag} 为存在于所有磁致伸缩式超声导波激励过程中的作用机制,铁磁性材料在磁致伸缩力的作用下产生质点振动。考虑材料的非线性耦合关系,在外加磁场 H 的作用下得到磁致伸缩力 F_{mag} ^[7]为

$$F_{mag} = \nabla(e \cdot H) = e_{k,ij} (\partial H_k / \partial x_j) \quad (4)$$

其中: $e_{k,ij}$ 为磁弹性常数,表示为

$$e_{k,ij} = \left(\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial H_k} \right) = \left(\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial \epsilon_{mn}} \right)_{H=0} \left(\frac{\partial \epsilon_{mn}}{\partial H_k} \right)_{\sigma=0} \quad (5)$$

根据式(1),(3)~(5)得到磁机转换等效力 F_{mag} ,与材料有关的参数如饱和磁致伸缩系数、磁畴壁移磁化强度等均可通过实验获得。提取待检测管道的一小单元做受力分析,如图1所示。

由牛顿定律分析微元可得

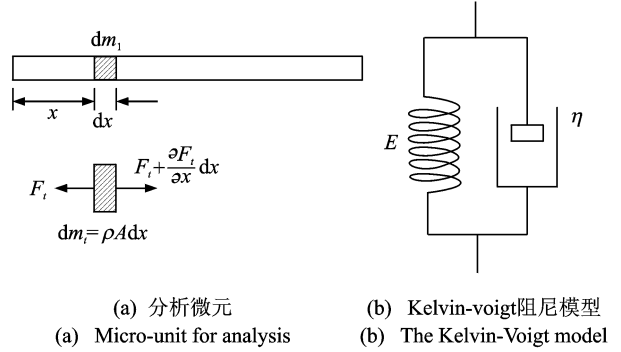


图1 动力学模型

Fig. 1 Dynamical model

$$F_t(t, x) = E_0 A \frac{\partial u}{\partial x} + C_D A \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} - F_{mag} \quad (6)$$

其中: E_0 为弹性模量; A 为材料截面积; C_D 为阻尼系数; u 为介质质点位移; F_{mag} 为磁致伸缩力; F_t 为动态力,在 F_t 当中包含了由于磁致伸缩效应而产生的磁-机械转换等效力 F_{mag} 。

从动力学角度讨论在钢管中传播的纵波,小段质量的动力学方程为

$$\frac{\partial F_t}{\partial x} = \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (7)$$

结合式(1)~(7),建立的 MsS 动力学模型为

$$\begin{cases} F_t = E_0 A \frac{\partial u}{\partial x} + C_D A \frac{\partial^2 u}{\partial t \partial x} - F_{mag} \\ \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial F_t}{\partial x} \\ F_{mag} = \nabla(e \cdot H) = e_{k,ij} (\partial H_k / \partial x_j) \\ u = 0, \dot{u} = 0 \quad (t = 0) \\ u = 0 \quad (x = 0) \end{cases} \quad (8)$$

2 MsS 模型验证

以 MsS 动力学模型为基础,采用 Matlab 数值计算方法对式(8)进行求解,其材料特性参数参照文献^[15]。电流激励信号为经汉宁窗调制的6个脉冲正弦信号,如图2所示。分析其在外加磁场作用下介质质点位移变化如图3所示。铁磁性构件在外磁场下产生的磁致伸缩形变与磁致伸缩力 F_{mag} 密切相关, F_{mag} 的大小是由偏置磁场和交变磁场的叠加磁化效果决定的。偏置磁场在磁化过程中为铁磁性材料提供静态工作点,交变磁场为其提供动态工作空间。磁致伸缩力随着叠加磁场强度的变化而变化,即材料的长度随着叠加磁场强度的周期性变化呈现出周期性的伸长或缩短,从而振动产生超声波^[16-17]。因此,分析外加磁场中静态偏置磁场、交流激励磁场

对铁磁材料中介质质点振动位移的影响是提高 MsS 模型磁机转换效率的重要途径。

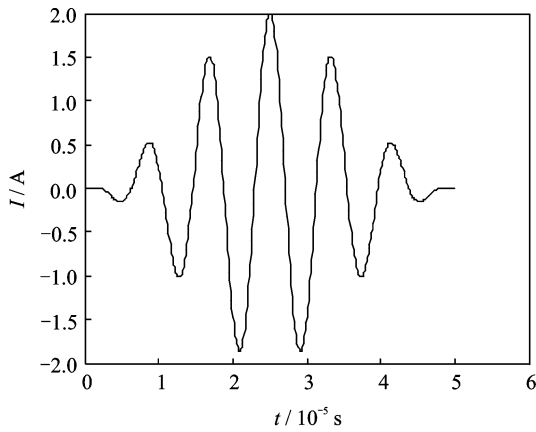
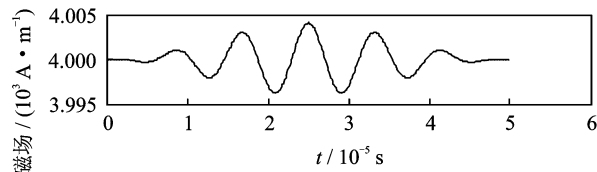


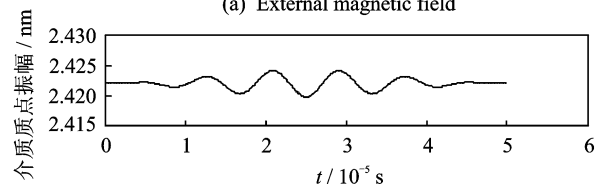
图 2 交流电流激励信号

Fig. 2 Exciting pulsed current waveform



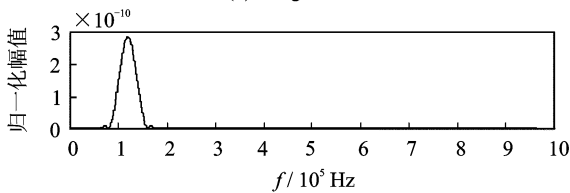
(a) 磁场强度

(a) External magnetic field



(b) 磁致伸缩应变

(b) Magnetostrictive



(c) 导波初始脉冲谱

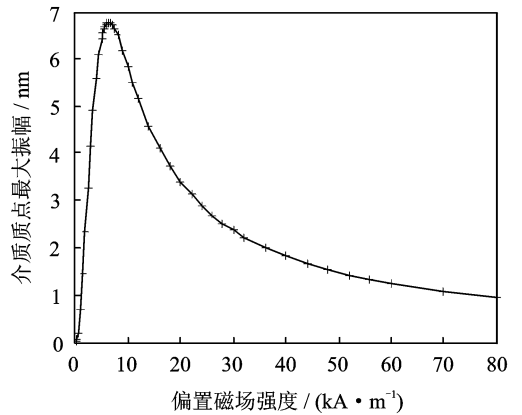
(c) Frequency spectrum of Initial impulse

图 3 动力学模型数值仿真信号

Fig. 3 Numerical simulation signal of dynamics model

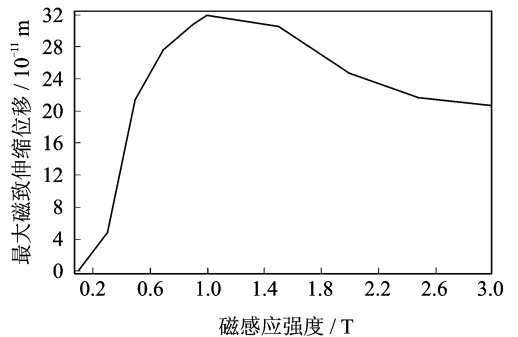
静态偏置磁场在 MsS 中一般由磁铁提供,其大小可以通过高斯计进行测量,主要是为待检工件提供静态工作点,同时避免倍频效应的出现。以此动力学模型为基础,分析了在输入电流为 1 A、频率为 120 kHz 时,改变偏置磁场的大小对介质质点位移产生的影响,如图 4(a)所示。从图 4 可以看出,介质质点振动的最大位移出现在偏置磁场大小处于磁畴壁移磁场强度时,在此之前其位移大小随着偏置磁场的增大而增大,当偏置磁场大小超过磁畴壁移

磁场强度后,质点振动位移反而随着磁场的增大而减小,最终趋于平稳。该变化规律与磁致伸缩应变曲线一致,进一步反映了磁致伸缩导波与铁磁性材料非线性力磁耦合特性密切相关。为了验证模型的有效性,笔者采用有限元仿真计算的方法对模型进行仿真分析,得到了与有数值计算相类似的变化趋势,如图 4(b)所示。



(a) 数值计算

(a) Numerical simulation



(b) 有限元仿真

(b) Finite Element Simulation

图 4 介质质点振幅与偏置磁场强度关系图

Fig. 4 The relation between amplitude of the particle and bias magnetic field

外加磁场中交变磁场一般由线圈通入交流电形成,由于线圈通入电流大小受线圈直径限制,因此动态交变磁场大小远小于静态偏置磁场。在本数值计算中,外加偏置磁场为 6 kA/m,电流强度为 2 A,频率从 20 kHz~150 kHz 时介质质点振动幅值的变化如图 5 所示。由图 5 可知,随着电流频率的增加,介质质点振动幅值将随之减小,原因主要是铁磁性材料在静态磁场作用下会产生静态变形,而动态磁场会使介质质点产生振动,当频率升高后介质质点振动还未到该磁场下最大幅值就产生收缩,造成介质质点振幅的减小。考虑电流强度的影响时得到的结果如图 6 所示。可以发现,电流强度对介质质点

振动幅值的影响基本可忽略不计,这与交流线圈产生的动态交变磁场大小远小于静态偏置磁场密切相关,介质质点的振动速度随着电流强度增加而线性加快,从而使质点振动能量增加。

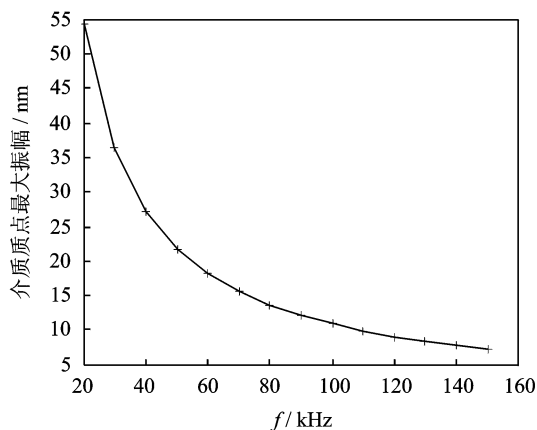


图5 质点振幅与电流频率关系图

Fig. 5 The relation between amplitude of the particle and current frequency

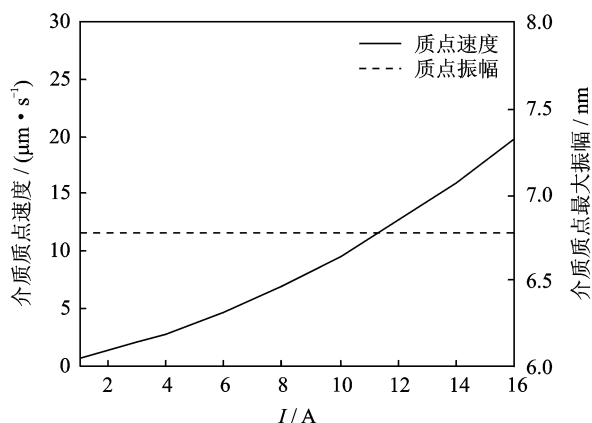


图6 质点速度与电流强度关系图

Fig. 6 The relation between amplitude of the particle and current

根据分析可知, MsS 传感器效率不仅要考虑偏置磁场的影响, 还要考虑电流强度及电流频率的影响。研究者通常只考虑偏置磁场对 MsS 传感器效率的影响, 忽略了电流强度及电流频率的影响。在 MsS 外加磁场的选择中为了提高磁力转换效率, 在考虑频散特性的情况下, 建议选择较低频率且其偏置磁场应选择在质点振幅曲线中切线斜率最大的位置, 电流强度应在线圈能承受电流允许的情况下考虑加大电流强度。

以往建立的 MsS 模型通常采用压磁方程描述材料特性, 此类模型只适用于外加磁场在选定静态工作点附近变化。鉴于此, 笔者建立的 MsS 模型考

虑了铁磁性材料非线性磁弹性耦合的磁致伸缩本构关系。为了反映该非线性模型的适用性, 通过设定电流强度为 1A、偏置磁场为 5 800 A/m 时线性压磁模型中的压磁系数, 分析了线性模型与非线性模型在随偏置磁场变化时介质质点的振动情况, 如图 7 所示。可见, 当偏置磁场大小在给定的偏置磁场附近时, 两模型所计算的质点位移量相差不大, 但随着偏置磁场偏离给定磁场 5 800 A/m 后, 随着偏置磁场的增大, 其介质质点最大振幅显现出线性递减的趋势。该现象与磁致伸缩材料应变随着外加磁场强度增加而趋于饱和的材料特性相悖, 然而非线性模型却反映了此现象。这表明压磁模型只适用于计算磁场在给定偏置磁场附近波动的情况, 而非线性模型由于考虑了材料的非线性本构关系从而满足各种情况下的偏置磁场。

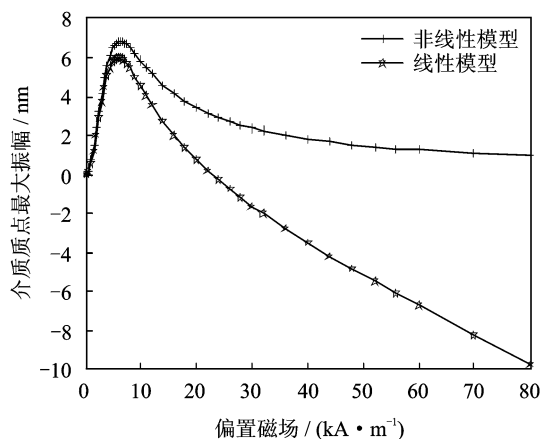


图7 线性与非线性模型质点位移图(电流频率为 150 kHz)
Fig. 7 The amplitude of the particle by linear and nonlinear model (current frequency at 150 kHz)

3 结束语

在建立导波的磁致伸缩式激励传感器非线性动力学模型的基础上, 分析了静态偏置磁场、交流磁场及激励频率对非线性力磁耦合转换效率的影响。分析表明: 介质质点振动幅值随着偏置磁场的增加而先增大后减小; 伴随着电流频率的增大, 质点振动会减小; 而电流大小却只对质点速度产生线性增加的影响。因此, 为提高磁力转换效率, 应在考虑频散特性的情况下选择频率较低而强度较大的激励电流, 且偏置磁场应选择在质点振幅曲线中切线斜率最大的位置。以此动力学模型为基础, 重点分析了非线性模型与压磁线性模型对于外加磁场的适应性, 表明该非线性模型改进了压磁线性模型只适用于在给定偏置磁场附近工作的不足, 为 MsS 传感器的优化

提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] 王悦民,孙丰瑞,康宜华,等. 基于磁致伸缩效应的管道检测纵向导波模型[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2006,34(12):65-67.
Wang Yuemin, Sun Fengrui, Kang Yihua, et al. A model of detection of longitudinal guided waves of pipes based on magnetostrictive effect[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science, 2006,34(12):65-67. (in Chinese)
- [2] Ribichini R, Cegla F, Nagy P B, et al. Quantitative modeling of the transduction of electromagnetic acoustic transducers operating on ferromagnetic media[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2010,57(12):2808-2817.
- [3] Kim Y G, Moon H S, Park K J, et al. Generating and detecting torsional guided waves using magnetostrictive sensors of crossed coils[J]. Independent Nondestructive Testing and Evaluation, 2011,44(2):145-151.
- [4] Kwun H, Kim S Y, Light G M. The magnetostrictive sensor technology for long range guided wave testing and monitoring of structures[J]. Materials Evaluation, 2003,61(1):80-84.
- [5] Sablik M J, Lu Y, Burkhardt G L. Modeling magnetostrictive generation of elastic waves in steel pipes II, comparison to experiment[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 1999,10(2):167-176.
- [6] Wilbrand A. Quantitative modeling and experimental analysis of the physical properties of electromagnetic ultrasonic transducers [C] // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 7A. New York: Plenum Publishing, 1988:671-680.
- [7] Ogi H. Field dependence of coupling efficiency between electro-magnetic field and ultrasonic bulk waves [J]. Journal of Applied Physics, 1997,82(8):3940-3949.
- [8] 贾振元,王晓煜,王福吉. 超磁致伸缩执行器动力学模型及数值模拟[J]. 大连理工大学学报,2008,43(3):368-372.
Jia Zhenyuan, Wang Xiaoyi, Wang Fuji. Dynamics model and numerical simulation of giant magnetostrictive actuator[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008,43(3):368-372. (in Chinese)
- [9] Kannsn K S, Dasgupt A. A nonlinear galerkin finite-element theory for modeling magnetostrictive smart structures[J]. Smart Materials and Structures, 1997,6(3):341-350.
- [10] Ribichini R, Cegla F, Nagy P B, et al. Experimental and numerical evaluation of electromagnetic acoustic transducer performance on steel materials[J]. Independent Nondestructive Testing and Evaluation, 2012,45:32-38.
- [11] Ludwing R, Dai X W. Numerical simulation of electromagnetic acoustic transducer in the time domain [J]. Journal of Applied Physics, 1991,69(1):89-98.
- [12] Kwun H, Kim S Y, Choi M S. Reflection of the fundamental torsional wave from a stepwise thickness change in a pipe[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2005,46(6):1352-1357.
- [13] Wan Yongping, Fang Daining, Hwang K C. Non-linear constitutive relations for magnetostrictive materials [J]. International Journal Non-linear Mechanics, 2003,38(7):1053-1065.
- [14] Zhou Haomiao, Zhou Youhe, Zheng Xiaojing, et al. A general 3-D nonlinear magnetostrictive constitutive model for soft ferromagnetic materials[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2009,321:281-290.
- [15] Jiles D. Introduction to magnetism and magnetic materials[M]. London, UK: Chapman and Hall, 1998:96-101.
- [16] 徐江,程丞,武新军,等. 磁致伸缩导波激励端偏置磁场的等效方法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2012,40(11):12-16.
Xu Jiang, Cheng Cheng, Wu Xinjun, et al. Equivalent method of bias magnetic field for generating guided waves based on magnetostrictive effect[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science, 2012,40(11):12-16. (in Chinese)
- [17] Kuma K S, Muthy V S N, Balasubramaniam K. Improvement in the signal strength of magnetostrictive ultrasonic guided wave transducers for pipe inspection using a soft magnetic ribbon-based flux concentrator [J]. Insight Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2012,54(4):217-220.



第一作者简介:龙盛蓉,女,1979年9月生,博士研究生。主要研究方向为电磁超声无损检测。曾发表《偏置磁场均匀性对磁致伸缩导波传感器输出特性的影响》《石油学报》2014年第35卷第2期》等论文。

E-mail: lornalong@126.com