

◇ 研究报告 ◇

铁镓 Janus-Helmholtz 换能器非线性驱动

赵佳恒^{1,2,3} 莫喜平^{1†} 柴勇^{1,3} 刘永平^{1,3}

(1 中国科学院声学研究所 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

(3 北京海洋声学装备工程技术研究中心 北京 100190)

摘要: 利用磁路法理论分析了磁阻对铁镓驱动磁场的影响,结果表明磁路中无永磁体时铁镓驱动磁场是有永磁体时的 5 倍以上,结合铁镓材料近似线性区小的特点,提出了一种无偏场非线性驱动方式。首先利用帕德逼近方法近似铁镓材料的磁化过程,得到磁场强度与磁致伸缩应变的关系,进而得到驱动电信号表达式,在此基础上提出了铁镓换能器的非线性驱动模型。设计研制了无偏场铁镓 Janus-Helmholtz 换能器样机,通过振动特性实验分析验证非线性驱动模型的可行性,最后在水中测试了换能器的发射性能。测试结果表明,采用无偏场非线性驱动的换能器在驱动电流为 9.4 A 时,声源级可达到 198.2 dB,相对于永磁偏置磁场的换能器,声源级高了 4 dB,发射性能得到了明显的提升。

关键词: 铁镓材料;非线性驱动;磁路分析;帕德逼近

中图分类号: O427

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2023)01-0084-09

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2023.01.011

The nonlinear driving manner of iron-gallium Janus-Helmholtz transducer

ZHAO Jiaheng^{1,2,3} MO Xiping¹ CHAI Yong^{1,3} LIU Yongping^{1,3}

(1 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Beijing Engineering Technology Research Center of Ocean Acoustic Equipment, Beijing 100190, China)

Abstract: Combining the characteristics of the iron-gallium material with a small approximate linear region, an unbiased field nonlinear driving method is developed. Because the magnetic circuit method is used to analyze the influence of magnetoresistance on the iron-gallium driving magnetic field, it is calculated the iron-gallium driving magnetic field without permanent magnets in the magnetic circuit and it is more than five times the that of permanent magnets. First, the Pader approximation method is used to approximate the magnetization process of the iron gallium material, and the relationship between the magnetic field strength and the magnetostrictive strain is obtained, and then the driving electric signal expression is obtained. On this basis, a nonlinear driving model of the iron gallium transducer is proposed. An unbiased field Fe-Ga Janus-Helmholtz transducer prototype was designed and developed. The feasibility of the nonlinear driving model was verified through the experimental analysis of vibration characteristics. Finally, the transducer was tested in water. The results show that the source level of the transducer with unbiased field nonlinear drive can reach 198.2 dB when the driving current is 9.4 A, which is 4 dB higher than the transducer with permanent magnet bias magnetic field. The launch performance has been significantly improved.

Keywords: Fe-Ga material; Nonlinear driving; Magnetic circuit analysis; Pade's Approximant

2021-11-02 收稿; 2022-01-14 定稿

作者简介: 赵佳恒 (1995-), 男, 河南商丘人, 博士研究生, 研究方向: 声学换能器。

† 通信作者 E-mail: moxp@mail.ioa.ac.cn

0 引言

低频水声换能器因其独特的需求而得到快速发展和不断的技术突破^[1]。水声换能器的发展与技术进步主要体现在应用新型驱动材料、设计换能器新结构和改善换能器制造工艺等方面,其中驱动材料的革新给水声换能器发展带来进步尤为重要^[2]。稀土材料铽镓铁合金因大应变、低杨氏模量、高能量密度等优势,被广泛应用于水声换能器的制作^[3-4]。近些年,铁镓合金作为一种新型磁致伸缩材料引起了研究工作者的注意^[5],尽管磁致伸缩应变比铽镓铁小,但具有低磁场下应变高、滞后小、磁导率高、居里温度高等特点,同时也由于抗拉-抗剪切强度高、耐高静压力等良好力学特性^[6-7],展示其特殊场景下的应用潜力。目前,国内外对铁镓材料的应用研究工作在传感器和能量收集器等方面偏多^[8-9],水声换能器方面的研究工作相对较少。

磁致伸缩曲线的非线性特征引起了人们思考非线性驱动的兴趣, Piquette 等^[10] 研究有滞后效应的饱和材料的非线性输出控制,与原来的结果相比失真减少了一个量级。Pan 等^[11] 设计了铁镓合金 Janus 换能器,并研究了无偏置磁场下铁镓材料“倍频”工作特性。李英明等^[12] 设计了中低磁场时换能器的半频驱动信号,并通过实验加以验证。这些工作显示了非线性驱动的特殊应用价值,同时铁镓材料在高磁场下非线性驱动的应用潜力未被有效利用。本文针对磁致伸缩材料的复杂磁化过程开展深入研究,利用磁路法分析磁阻对铁镓驱动磁场的影响,从非线性磁致伸缩方程出发,把握磁致伸缩换能器非线性驱动机理,设计驱动信号,并以 Janus-Helmholtz 换能器为实例,进行实验验证。

1 铁镓换能器磁路分析与非线性驱动理论研究

1.1 换能器磁路理论分析

类比电路中的欧姆定律,可以利用磁路定理分析和计算磁场分布。类似电阻,将“磁阻”引入磁路中,磁阻 R_i 的表达式为

$$R_i = \frac{l_i}{\mu_i \mu_0 S_i}, \quad (1)$$

其中, μ_i 、 l_i 、 S_i 分别是第 i 段均匀磁路中的磁导率、长度和截面积。为了分析除铁镓以外的导磁元件磁导率对磁路特性的影响,设计一种常用的闭合磁路

形式,如图1所示,磁路包括导磁板、铁镓棒与磁导率可变的导磁元件(简称导磁件),最后使用线圈提供驱动磁场。

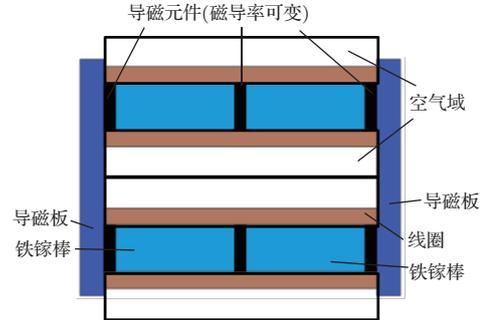


图1 换能器磁路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transducer magnetic circuit

磁路与电路不同,电路中元件电导率与空气相差 10^{18} 倍以上,基本不会出现漏电的现象,但是磁路中元件的磁导率仅是空气的 $10^0 \sim 10^3$ 倍,在磁路周围存在漏磁的现象。因此,在分析磁路的时候需要考虑漏磁阻。根据磁感线界面折射规律,磁感线向高磁导率物质内密集,所以漏出的磁场大部分都集中在如图1所示的空气域内,为了方便研究,认为漏磁仅存在于图1中所示空气域内。那么该磁路结构的静态磁路图如图2所示,导磁板一般使用电工纯铁,磁导率较高,磁阻远小于其他导磁元件,可以看作磁路中的“导磁线”。磁路中仅包括铁镓棒的磁阻 R_1 、导磁件的磁阻 R_2 以及对应的漏磁磁阻 R_{1w} 、 R_{2w} 。

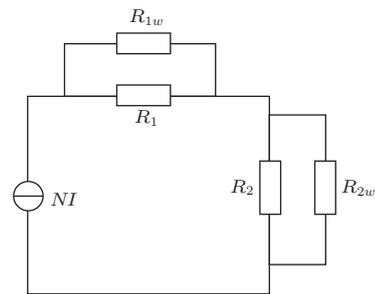


图2 静态等效磁路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of static equivalent magnetic circuit

该磁路的“欧姆定律”可以写为

$$\begin{aligned} NI &= \sum_i H_i l_i = \Phi_B \sum_i R_i \\ &= \Phi_B \left(\frac{R_1 R_{1w}}{R_1 + R_{1w}} + \frac{R_2 R_{2w}}{R_2 + R_{2w}} \right), \quad (2) \end{aligned}$$

式(2)中, NI 代表线圈提供的激励安匝数, H_i 、 l_i 分别是第*i*段均匀磁路中的磁场强度和长度, Φ_B 代表磁路中的磁通量。由式(2)可以得出铁镓棒上的磁场强度 H_1 为

$$H_1 = \frac{\Phi_B R_1}{l_1} = \frac{NI(R_1 + R_{1w})(R_2 + R_{2w})R_1}{[R_1 R_{1w}(R_2 + R_{2w}) + R_2 R_{2w}(R_1 + R_{1w})]l_1}. \quad (3)$$

线圈匝数取640, 电流取12 A, 空气的相对磁导率为1, 铁镓的相对磁导率取100, 铁镓棒的总长度取200 mm, 导磁件的总长度取30 mm, 两种元件半径相同取15 mm, 空气域厚度取10 mm。计算铁镓内部磁场强度随导磁件相对磁导率变化曲线, 如图3所示。

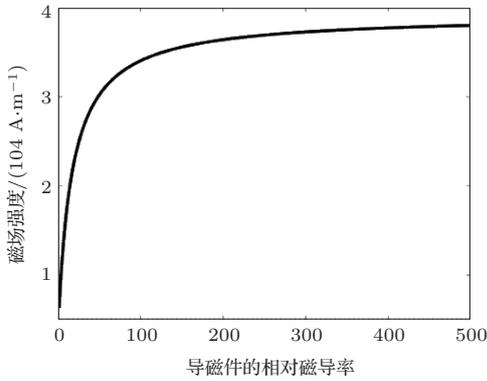


图3 铁镓内部磁场随导磁件相对磁导率变化曲线
Fig. 3 Variation curve of the internal magnetic field of iron gallium with the relative permeability of the magnetic conductive parts

从图3中可以看出, 当导磁件的相对磁导率小于铁镓的相对磁导率(100)时, 随着相对磁导率的降低, 铁镓内部磁场强度急剧降低, 且速度越来越快; 当相对磁导率降到10时, 磁场强度是相对磁导率为100时的一半; 当降到与永磁体相对磁导率(1.2)相同时, 磁场强度为导磁件是铁镓时或电工纯铁时的20%以下, 具体如表1所示。由此可知, 使用永磁体提供偏置磁场时, 因永磁体比铁镓的磁导率小得多, 使得线圈提供的磁场绝大部分都耗散在永磁体内部, 严重影响了驱动效率。

为了解决这个问题, 考虑铁镓具有低场高磁致伸缩、近似线性区小的特点, 提出一种无偏场非线性驱动。当无偏场驱动时, 磁路中不存在永磁体, 相同驱动电流提供的磁场是有偏置时的5倍以上, 极大地提高了驱动效率。

表1 导磁件不同磁导率对应的铁镓磁场强度
Table 1 The magnetic field strength of iron gallium corresponding to different magnetic permeability of magnetic conductive parts

导磁件磁导率	铁镓材料内部磁场强度/(A·m ⁻¹)
1.2	6666
5	17163
20	28686
100	34039
10000	39085

1.2 铁镓换能器非线性驱动理论研究

理论和实践都已经验证了磁致伸缩材料本构行为的非线性特征, 因而磁致伸缩换能器的振动特性非常复杂, 目前工程应用中通常使用线性耦合的压磁模型, 但当无偏场非线性驱动时, 压磁模型不再适用, 需从非线性磁致伸缩方程出发, 如图4所示, 借鉴铽镓铁材料得出的磁致伸缩本构方程^[13], 仍采用其基本数学表达式为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_s} + \lambda_0(\sigma) + \frac{\lambda_s - \lambda_0(\sigma)}{M_s^2} M^2, \quad (4)$$

$$M = M_s L\left(\frac{3\chi_m}{M_s} H_{\text{eff}}\right), \quad (5)$$

$$H_{\text{eff}} = H + \frac{2[\lambda_s \sigma - \Lambda_0(\sigma)]}{\mu_0 M_s^2} M, \quad (6)$$

其中:

$$\lambda_0(\sigma) = \lambda_s \frac{\tanh\left[\frac{2\sigma}{\sigma_s}\right]}{2}, \quad \sigma < 0. \quad (7)$$

$$\Lambda_0(\sigma) = \lambda_s \sigma_s \frac{\ln\left(\cosh\frac{2\sigma}{\sigma_s}\right)}{4}, \quad \sigma < 0, \quad (8)$$

其中, ε 表示应变; M 为磁化强度; M_s 为饱和磁化强度; λ_s 为饱和磁致伸缩应变系数; χ_m 为初始磁化率; σ_s 为饱和预应力; μ_0 为真空磁导率; σ 为材料预应力; E_s 为饱和杨氏模量; L 为磁致伸缩材料磁化模型, 目前模型函数有线性函数、双曲正切函数、朗之万函数等, 这里选择符合波尔兹曼统计的朗之万函数, 表达式为

$$L(x) = \coth(x) - \frac{1}{x}. \quad (9)$$

从表达式可以看出, 磁致伸缩方程分为两部分组成: 材料的磁化导致的磁致伸缩应变与磁致伸缩材料

的磁化方式, 它们都和预应力有一定的关系。但在实际应用中, 预应力是预先设定好的, 是一个固定的值 σ_0 。从方程可知磁致伸缩的非线性主要体现在磁化方式上, 为了更方便得到磁场强度与磁致伸缩应变之间的关系, 将式(5)、式(6)联立, 可得

$$H = \frac{M_s}{3\chi_m} L^{-1} \left[\frac{M}{M_s} \right] - \frac{2[\lambda_s \sigma - \Lambda_0(\sigma)]}{\mu_0 M_s^2} M. \quad (10)$$

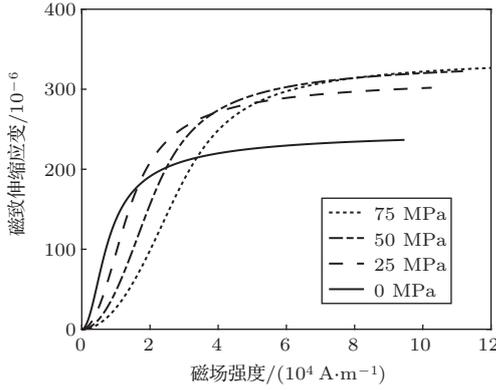


图4 铁镓材料磁致伸缩应变与磁场强度关系
Fig. 4 The relationship between magnetostrictive strain and magnetic field strength of Fe-Ga materials

从式(4)、式(10)可知, 反朗之万函数没有具体的表达式, 无法直接建立材料磁场强度与磁致伸缩应变之间的关系, 这个时候采用的方法是利用帕德逼近^[14] (Pade's approximant) 近似反朗之万函数。

给定两个正整数 m, n , 函数 $f(x)$ 在 $[m, n]$ 阶的帕德逼近为

$$R(x) = \frac{\sum_{j=0}^m a_j x^j}{1 + \sum_{k=1}^n b_k x^k} \quad (11)$$

且

$$\begin{cases} f'(0) = R'(0), \\ f''(0) = R''(0), \\ \vdots \\ f^{m+n}(0) = R^{m+n}(0). \end{cases} \quad (12)$$

对于给定的 m, n , 函数 $f(x)$ 的 $[m, n]$ 阶帕德逼近是唯一的。

将 L^{-1} 的泰勒展开可以写为

$$\begin{aligned} L^{-1} \left[\frac{M}{M_s} \right] &= L^{-1}(x) \\ &= 3x + \frac{9}{5}x^3 + \frac{297}{175}x^5 + \frac{1539}{875}x^7 + \dots \end{aligned} \quad (13)$$

反朗之万函数 [3, 2] 阶的帕德逼近可以写为

$$\begin{aligned} L^{-1}(x) &= x \left(3 + \frac{9}{5}x^2 + \frac{297}{175}x^4 \right) + O(x^6) \\ &= \frac{x(a_0 + a_2 x^2)}{1 + b_2 x^2} + O(x^6). \end{aligned} \quad (14)$$

根据式(12), 经过运算得到帕德近似的参数 a_0, a_2, b_2 :

$$L^{-1}(x) = \frac{x \left(3 - \frac{36}{35}x^2 \right)}{1 - \frac{33}{35}x^2} + O(x^6). \quad (15)$$

为了得到更简捷的结果, 考虑参数与各自取整误差都在 6% 以下, 对式(15)四舍五入取整:

$$L^{-1}(x) = \frac{x(3 - x^2)}{1 - x^2} + O(x^6). \quad (16)$$

代表材料磁化过程的方程(10)可以写为

$$H = \frac{3MM_s^2 - M^3}{3(\chi_m M_s^2 - M^2)} - \frac{2[\lambda_s \sigma - \Lambda_0(\sigma)]}{\mu_0 M_s^2} M. \quad (17)$$

将帕德逼近得到的近似方程和原磁化方程对比, 如图5所示。帕德逼近所得表达式与原方程吻合较好, 因此利用帕德逼近近似磁化方程是一种有效的方法。

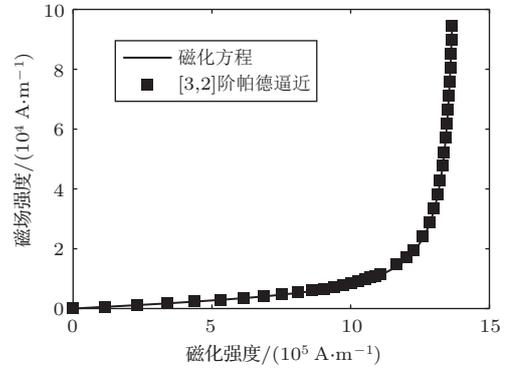


图5 原磁化方程与 [3, 2] 阶帕德逼近对比
Fig. 5 Comparison of the original magnetization equation and [3, 2] Pade's approximant

假设铁镓棒的长度为 l , 铁镓棒初始应变为 $\varepsilon_0 = \varepsilon(M = 0)$, 铁镓棒产生的位移为

$$\xi = (\varepsilon - \varepsilon_0) l = \frac{\lambda_s - \lambda_0(\sigma)}{M_s^2} l M^2. \quad (18)$$

当采用无偏场驱动时, 图1结构的导磁件使用电工纯铁代替, 导磁件的磁阻可以忽略, 令 $R_2 = 0$, 根据式(3)得到驱动磁场和电流的关系为

$$H(t) = \frac{N(R_1 + R_{1w})}{R_{1w}} I(t). \quad (19)$$

为了符合实际,假设铁镓材料输出的位移是简谐函数平方关系 $\xi = \xi_0 \sin^2(\omega t)$, 预应力为 $\sigma = \sigma_0$, 联立式(17)~(19), 需要输入的驱动电流信号 $I(t)$ 为

$$I(t) = \frac{3\sqrt{\varphi}R_{1w}}{N(R_1 + R_{1w})} \left\{ \frac{3 - \varphi \sin^2(\omega t)}{\chi_m - \varphi \sin^2(\omega t)} - \frac{2[\lambda_s \sigma - \Lambda_0(\sigma)]}{\mu_0 M_s} \right\} \sin(\omega t), \quad (20)$$

其中:

$$\varphi = \frac{\xi_0}{l(\lambda_s - \lambda_0(\sigma))}. \quad (21)$$

考虑简单结构的换能器, 换能器的结构不会给换能器的输出带来非线性, 那么铁镓材料的磁致伸缩应变与换能器的输出相互之间是线性的。因此, 在中高磁场下, 如果输入的驱动电流是式(20)所示的形式, 那换能器可以输出线性简谐函数平方关系振动位移(简谐倍频信号)。即当输出的简谐信号频率为 2000 Hz 时, 计算所得的输入的电信号及其频谱分别如图 6 和图 7 所示, 输入信号是多个频率(1000 Hz、3000 Hz、5000 Hz 等), 基频是输出信号的半频(1000 Hz)。该方法物理意义明确、模型简单、参数易得, 对各类磁致伸缩换能器的非线性驱动有一定的指导作用。

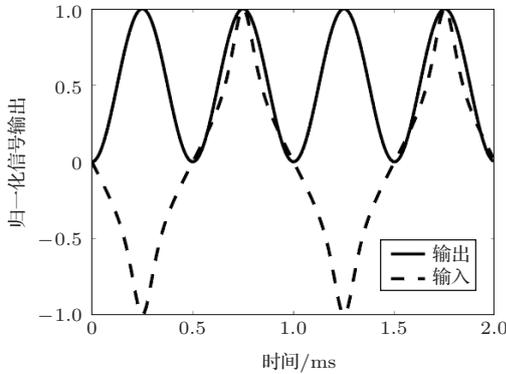


图 6 输入与输出信号波形

Fig. 6 Input and output signal

当磁场比较小时, 磁化强度也比较小, 即 $M \ll M_s$, $x = M/M_s \rightarrow 0$, 由式(16)和图 5 可知, 反朗之万函数帕德逼近可以近似表示为线性比例函数:

$$L^{-1}(x) = \frac{x(3-x^2)}{1-x^2} \approx 3x. \quad (22)$$

式(10)可以线性简化成

$$H = \frac{M}{\chi_m} - \frac{2[\lambda_s \sigma - \Lambda_0(\sigma)]}{\mu_0 M_s^2} M. \quad (23)$$

与式(18)联立, 磁致伸缩方程可以写为

$$\xi = \frac{\lambda_s - \lambda_0(\sigma)}{\gamma(\sigma)^2} l H^2, \quad (24)$$

其中:

$$\gamma(\sigma) = \frac{1}{\chi_m} - \frac{2[\lambda_s \sigma - \Lambda_0(\sigma)]}{\mu_0 M_s}. \quad (25)$$

假设驱动电流信号为简谐电流 $I(t) = I_0 e^{-j\omega t}$, 该换能器工作时的预应力 $\sigma = \sigma_0$, 联立式(23)、式(24)可得铁镓材料位移与驱动电流信号的关系:

$$\xi = \frac{(\lambda_s - \lambda_0(\sigma_0))(R_1 + R_{1w})^2}{\gamma(\sigma_0)^2 R_{1w}^2} N^2 l I_0 e^{-j2\omega t}. \quad (26)$$

从式(26)可知, 当磁场较小时, 换能器可以输出简谐信号, 且输出的频率为输入电信号频率的 2 倍; 因此当驱动磁场不大的时候, 换能器输入简谐的电信号就能实现简谐波输出, 不过输入的电信号是换能器正常工作频率的半频, 可以称之为半频驱动。半频驱动有以下优势: 输出 f 频率的声波仅需要 $f/2$ 频率的电信号, 而电信号频率越低, 换能器的电阻抗越小, 同时抑制涡流的难度也会降低。

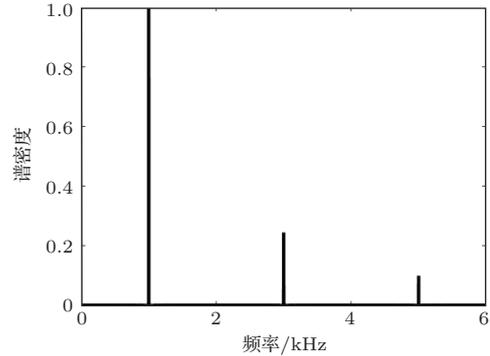


图 7 输入信号频谱

Fig. 7 Input signal spectrum

2 铁镓换能器的制作与测试

2.1 铁镓换能器的制作

本文制作的换能器为 Janus 纵向振动换能器, 以 1.1 节设计的磁路作为换能器的驱动磁路, 其中导磁件的材料是电工软铁, 制作的换能器样机如图 8 所示。换能器的主要结构包括辐射头、导磁板、铁镓棒、预应力螺杆、中质量块等, 其中导磁板、铁镓棒、预应力螺杆用聚氨酯橡胶密封。选择 Janus 型换能器有两个目的: 一是换能器仅有纵向振动且结构简单, 二是减少换能器本身对输出信号的非线性影响; 水中测试时, 配合 Helmholtz 液腔可实现低频、宽带发射^[15]。



图8 换能器照片
Fig. 8 Transducer photo

由磁致伸缩方程可知,磁致伸缩过程包括磁致伸缩材料的磁化方式以及磁化导致磁致伸缩应变,它们都与预应力有关,预应力越大,饱和磁致伸缩应变就越大,但同时预应力使得材料的磁畴偏转困难,磁化需要更多的磁场,预应力越大达到相同的磁致伸缩就需要加载越大的磁场,对于铁镓换能器来说,越大的预应力,对应需要的磁场强度越大,需要更多的电流驱动。因此,预应力不是越大越好,而是根据实际的驱动电流确定的,本文选择采用文献[16]中的模型,当驱动电流有效值最大为10 A时,最合适的预应力为40 MPa。实际制作中通过千斤顶对换能器施加预应力。

2.2 换能器空气中振动测试

换能器振动的加速度与位移在频率不变时是线性的,可以利用加速度传感器记录换能器空气中的振动波形,这种方法操作简单,可以直接测得换能器的振动,以减少不必要的误差。在低磁场时,输入信号采用频率为1000 Hz的正弦脉冲,记录换能器的输入信号与加速度计信号,波形如图9所示,对输出信号进行傅里叶变换,频谱如图10所示。

从图9中可知换能器输出的振动频率为输入信号的2倍,且波形良好。换能器在低磁场下可以通过半频驱动输出线性信号。

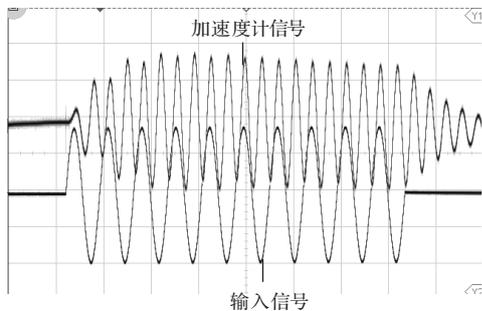


图9 低磁场下加速度计信号与输入信号波形
Fig. 9 Accelerometer signal and input signal under low magnetic field

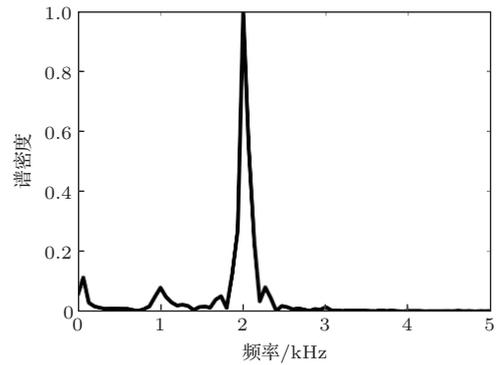


图10 低磁场下输出信号频谱
Fig. 10 Output signal spectrum under low magnetic field

在中高磁场时,首先使用正弦信号激励,输出信号如图11所示,从图上看,当使用正弦线性信号激励时,输出信号具有非常明显的非线性。接着设置输出频率为2000 Hz正弦信号,输入电流采用式(20)的形式,其中预应力 $\sigma = \sigma_0 = 40$ MPa,记录了换能器的加速度传感器的信号,并做频谱分析,结果分别如图12和图13所示。将图6波形作为输入信号时,输出了正弦倍频信号,且波形良好,与直接输入线性信号相比,抑制较为明显。

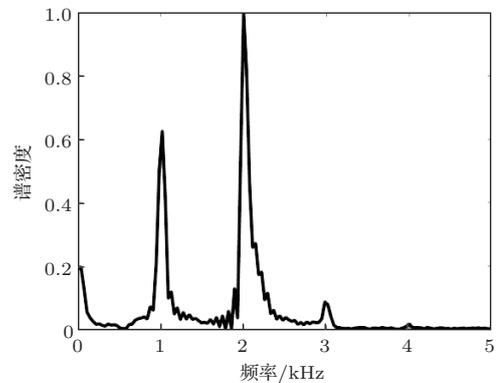


图11 正弦激励时输出信号谱密度
Fig. 11 Output signal spectral density under sinusoidal excitation

换能器空气中振动测试验证了理论推导的准确性,实现了换能器在大功率下的无偏场非线性驱动。这种驱动方式可以在铁镓无偏驱动时,有效减少换能器工作非线性区对输出波形产生的影响,在有偏置磁场时,也可以减少因铁镓近似线性区小导致的非线性。

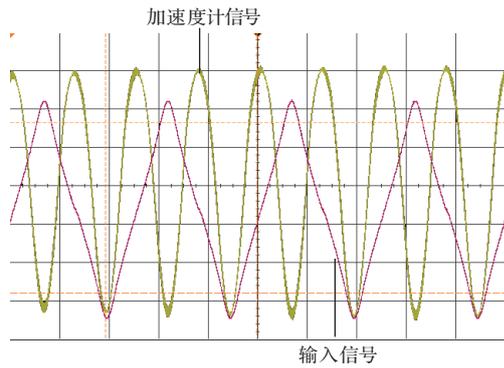


图12 中高磁场下输出信号波形

Fig. 12 Output signal waveform under medium and high magnetic field

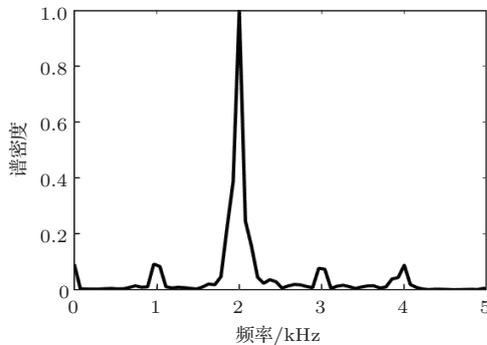


图13 中高磁场下输出信号频谱

Fig. 13 Output signal spectrum under medium and high magnetic field

2.3 换能器水中测试

为了实现低频宽带工作,将制作的Janus换能器与Helmholtz液腔组成Janus-Helmholtz换能器,如图14所示。在湖上对换能器电声性能进行测试,测试时电流有效值为2.3 A,换能器发送响应测试如图15所示,换能器的谐振频率在1000 Hz。在谐振频率处,逐渐增加驱动电流,测得声源级与发送电流响应随电流有效值的变化曲线,并与同类型、同尺寸、同频率、带有偏置磁场的换能器进行比较,如图16所示。

从图16中可知,声源级与电流的关系与磁致伸缩应变与磁场强度的关系(如图4所示)相对应,声源级随电流而增加,对应的磁致伸缩应变随磁场增大而增大,发送电流响应先增加后减小,对应了磁致伸缩应变变化率随磁场增加先增大后减小。这与有偏置磁场的换能器不同,有偏场的换能器在近似线性区工作,磁致伸缩应变变化率基本不变,因此发送响应也基本保持不变。



图14 Janus-Helmholtz换能器实物图

Fig. 14 Picture of Janus-Helmholtz transducer

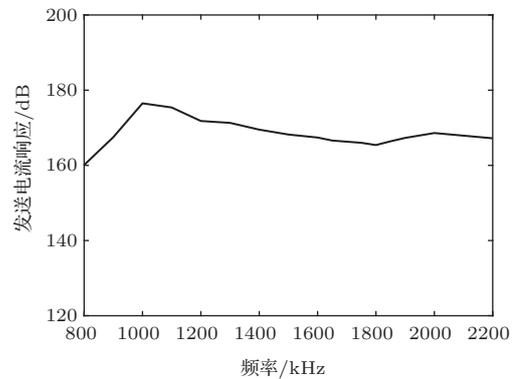


图15 换能器的发送电流响应曲线

Fig. 15 Transmission current response curve of the transducer

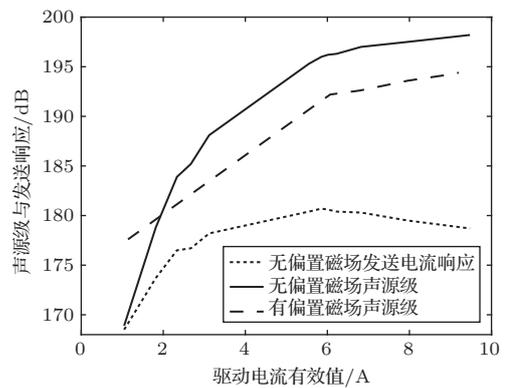


图16 声源级与发送电流响应随电流变化曲线

Fig. 16 Source level and transmission current response curve

换能器在驱动电流有效值为9.4 A时,换能器的声源级可达到198.2 dB,与有永磁偏置的换能器相比,提高了近4 dB,因此采用无永磁偏置的低磁阻磁路可以明显提升换能器的发射性能,相对于传统的有偏置的换能器,无偏置的磁路结构明显更加适合铁镓材料。

图 17 是该换能器的阻抗随驱动电流的变化曲线,因为选择的是非线性驱动,该换能器的阻抗也是非线性的,换能器阻抗随驱动磁场变化而变化,换能器在每个频率下阻抗都如图 17 一样随着电流变化而变换。随着驱动电流的增加,换能器的阻抗在减少,换能器的效率在增加。

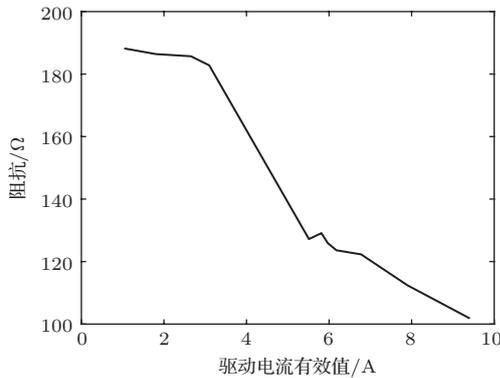


图 17 换能器的阻抗随电流变化曲线

Fig. 17 The change curve of the impedance of the transducer with the current

无偏驱动也带来了磁致伸缩非线性和“无效”磁化的问题,其中磁致伸缩非线性则可以通过推导出的非线性驱动模型改善;“无效”磁化是指无偏置磁场时,驱动磁场需要从零开始磁化铁镓材料,这时材料的磁畴大多无序,材料无法提供有效的位移输出。“无效”磁化会导致电流小时响应较低,如图 16 中的 0 A 到 3 A 时的发送响应与声源级曲线所反映的规律,也影响换能器的效率,如图 17 所示的无效阻抗减少。

3 结论

利用磁路分析方法研究了磁路中的磁阻元件对铁镓棒内部磁场的影响。分析结果表明,采用永磁体提供偏置磁场时,由于磁路中引入了高磁阻元件,铁镓棒内部磁场不到低磁阻磁路时的 20%,严重影响了励磁电流的驱动效率。基于上述分析结论设计研制了铁镓 Janus-Helmholtz 换能器,采用了无偏场低阻磁路。进一步从非线性磁致伸缩方程出发,研究了无偏场条件下非线性驱动机理,建立了非线性驱动模型指导驱动电信号设计,并对铁镓 Janus-Helmholtz 换能器进行系列实验研究,其中包括与采用永磁元件提供偏置磁场换能器的对比实验。结果表明:无偏场铁镓 Janus-Helmholtz 换能器的谐振频率为 1000 Hz,在非线性驱动下的声源级可

达 198.2 dB,对应的发送电流响应为 178.7 dB,采用无偏置磁场非线性驱动方式比永磁偏置磁场换能器声源级提高了近 4 dB。

总结全文有以下结论:

(1) 铁镓属于高导磁材料,设计磁路时需要避免磁路中出现高磁阻元件,无偏场低阻磁路是铁镓换能器提高发射性能的一种优选技术途径。

(2) 由铽镓铁材料得出的磁致伸缩本构方程可以借鉴推广应用于铁镓材料及其换能器,利用帕德逼近可以简捷有效表达铁镓磁致伸缩材料的磁化过程,据此设计的非线性驱动模型,经仿真和实验得到了验证。

(3) 无偏场 Janus-Helmholtz 换能器的设计研制与驱动实现,验证了低阻磁路方案及非线性驱动模型设计的正确性,该工作对其他结构形式换能器的设计应用具有指导意义。

后续工作中将继续对铁镓非线性驱动展开深入研究,并推广到铁镓弯张换能器、弯曲梁等结构的换能器中。

参 考 文 献

- [1] 莫喜平. 水声换能器发展中的技术创新[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 1-12.
Mo Xiping. Technical innovations with progress of underwater transducers[J]. Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition), 2018, 46(3): 1-12.
- [2] 莫喜平. 我国水声换能器技术研究进展与发展机遇[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 272-282.
- [3] 莫喜平. Terfenol-D 鱼唇式弯张换能器[J]. 声学学报, 2001, 26(1): 25-28.
Mo Xiping. A Terfenol-D “Fish-Mouth” flextensional transducer[J]. Acta Acustica, 2001, 26(1): 25-28.
- [4] 刘永平, 莫喜平, 柴勇, 等. 双壳嵌套鱼唇式弯张换能器[J]. 声学学报, 2019, 44(6): 1060-1067.
Liu Yongping, Mo Xiping, Chai Yong, et al. Fish-Mouth flextensional transducer with nested double shells[J]. Acta Acustica, 2019, 44(6): 1060-1067.
- [5] Cullen J R, Clark A E, Wun-Fogle M, et al. Magnetoelasticity of Fe-Ga and Fe-Al alloys[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2001, 226-230: 948-949.
- [6] Chen Y, Wang J, Jiang C. Tailoring ferroic domains by introducing internal stress: $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ magnetostrictive alloy as an example[J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(11): 112405.
- [7] Liu J, Wang Z, Jiang C, et al. Magnetostriction under high prestress in $\text{Fe}_{81}\text{Ga}_{19}$ crystal[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(3): 033913.
- [8] 李云开, 王博文, 张冰. 铁镓合金的压磁效应与力传感器的研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(17): 3615-3621.

- Li Yunkai, Wang Bowen, Zhang Bing. Study on piezo-magnetic effect of galfenol alloy and force sensor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(17): 3615–3621.
- [9] Yoo J H, Flatau A B. A bending-mode Galfenol electric power harvester[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2012, 23(6): 647–654.
- [10] Piquette J C, McLaughlin E A, Yang G, et al. Nonlinear output control in hysteretic, saturating materials[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2001, 110(2): 865–876.
- [11] Pan Y Z, Mo X P, Li Y M, et al. A magnetostrictive underwater transducer directly driven by Iron-Gallium alloy(Galfenol) without bias magnetic field[C]. Proc. OCEANS MTS/IEEE Washington, F, 2015.
- [12] 李英明, 莫喜平, 柴勇, 等. 铁镓复合棒换能器设计及非线性驱动研究[J]. 声学学报, 2016, 41(3): 428–434.
- Li Yingming, Mo Xiping, Chai Yong, et al. Research on nonlinear driving manner of Galfenol transducer[J]. Acta Acustica, 2016, 41(3): 428–434.
- [13] Zheng X J, Liu X E. A nonlinear constitutive model for Terfenol-D rods[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(5): 61.
- [14] Cohen A. A Padé approximant to the inverse Langevin function[J]. Rheologica Acta, 1991, 30(3): 270–273.
- [15] Le Gall Y, Boucher D, Lunon X, et al. A 300 Hz Janus-Helmholtz transducer for ocean acoustic tomography[C]//Proceedings of OCEANS'93. IEEE, 1993: I278–I281.
- [16] Zhao J, Mo X, Chai Y, et al. Research on nonlinear driving manner of Fe-Ga alloy transducer[C]//2021 OES China Ocean Acoustics (COA). IEEE, 2021: 41–45.