

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108246

高频磁致伸缩换能器谐振频率特性分析与控制^{*}

黄文美^{1,2}, 胡少鹏^{1,2}, 张伟帅^{1,2}, 翁玲^{1,2}, 周严³

(1. 河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300130; 2. 河北工业大学河北省电磁场与电器可靠性重点实验室 天津 300130; 3. 天津商业大学理学院 天津 300134)

摘要:本文研究了工作温度和负载变化对换能器谐振频率的影响规律并设计了反馈控制系统以实现谐振频率跟踪。首先基于磁致伸缩换能器机电等效电路,推导了以工作温度 T 和负载 F 为自变量的谐振频率计算模型,搭建了温度可控、负载可调的谐振频率测试系统;然后对实验测试数据进行分段线性拟合和曲面数值拟合,得到了满足线性相关度和曲面拟合优度要求的谐振频率关于温度和负载变化的二元函数模型,进而确定了谐振频率计算模型的相关参数;最后依据计算模型设计了反映温度和负载变化的频率跟踪反馈控制系统并测试了换能器输出特性,结果表明换能器的振动加速度幅值平均提高了31.11%,且谐振频率能跟随温度和负载的变化而自动调整,实现高效率稳定运行。

关键词: 高频磁致伸缩换能器; 谐振频率特性; 工作温度; 负载; 频率跟踪控制

中图分类号: TB552 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4021

Analysis and control of resonance frequency characteristics of high-frequency magnetostrictive transducers

Huang Wenmei^{1,2}, Hu Shaopeng^{1,2}, Zhang Weishuai^{1,2}, Weng Ling^{1,2}, Zhou Yan³

(1. State Key Laboratory of Reliability and Interlligence of Electrical, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;
2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 3. College of Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: This paper studies the influence rule of operating temperature and load changes on the resonant frequency of the transducer and a feedback control system is designed to realize the resonant frequency tracking. Firstly, the resonant frequency calculation model with operating temperature T and load F as independent variables is derived based on the electromechanical equivalent circuit of the magnetostrictive transducer, a temperature-controllable and load-adjustable resonant frequency test system is built; then, the methods of segmental linear fitting and surface numerical fitting are performed experiment on the tested data, and a binary function model of resonant frequency with respect to the temperature and load variables is obtained to meet the requirements of linear correlation and surface fitting goodness, and the relevant parameters of the resonant frequency calculation model are determined. Finally, based on the caculation model, a frequency tracking feedback control system reflecting temperature and load changes was designed and the output characteristics of the transducer were tested. The results show that the vibration acceleration amplitude of the transducer is increased by about 31.11% in average, and the resonant frequency could be automatically adjusted according to the temperature and load changes to achieve high efficiency and stable operation.

Keywords: high frequency magnetostrictive transducer; resonance frequency characteristics; working temperature; load; frequency tracking control

收稿日期: 2021-07-13 Received Date: 2021-07-13

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(51777053, 52077052)、天津市自然科学基金(18JCYBJC87100)项目资助

0 引言

磁致伸缩材料作为新型智能材料具有能量密度高、响应速度快、频率特性好等特点^[1-4],以磁致伸缩材料为核心驱动元件的磁致伸缩换能器可将高频电流转换成高频振动,并且以其优异的性能^[5]在空间探测器、智能制导炮弹、精密运动平台、精密加工^[6-7]、无损检测^[8-9]等领域有着广泛应用前景。对于一个换能器系统而言,当其工作在谐振频率处时,可以实现更大的输出加速度和更高的能量传递效率^[10]。但是,高频磁致伸缩换能器的输出特性容易受到工作条件的影响,例如:工作过程中产生的高温和负载变化会引起换能器谐振频率发生漂移^[11],导致换能器能量转换效率变低,严重时甚至会失谐甚至损坏器件。为了使高频磁致伸缩换能器能够实现高效率稳定工作,有必要研究外界负载和工作温度对换能器谐振频率的影响规律。

目前,国内外已有一些文献在磁致伸缩换能器谐振频率变化规律方面做了研究。文献[12-13]提出了磁致伸缩换能器最佳预应力模型,并基于机电等效电路类比原理,建立了超声振子的等效电路模型,研究了换能器预应力和变幅杆预紧扭矩对换能器输出振幅的影响规律。但是,只从换能器本体对所施加的预应力大小进行了优化分析,没有分析电磁激励和负载变化等因素对换能器的影响。Cai 等^[14]建立了磁致伸缩换能器的等效电路模型,并研究了温度对振动稳定性和谐振频率的影响,但是推导的模型只适用于换能器在空载状态下运行而忽略了负载变化因素,且工作温度范围较小。文献[15-16]基于机械品质因子、激励电流幅值和激励电流频率提出了振幅预测模型,并设计一种最大输出振幅的阻抗补偿方法,能够较为准确的预测出磁致伸缩换能器在不同励磁电流和不同机械质量因子下的输出幅值,并使其保持在最大值。但是高频下磁致伸缩材料有着敏感的温度特性^[10],没有考虑长时间工作时温度变化对输出模型的影响。Afzal 等^[17]为了实现磁致伸缩换能器对于载荷的自适应控制,分别研究了输入电流、摩擦系数及压应力对于换能器输出力的影响,得到了关于载荷的控制模型,但没考虑工作温度变化对输出特性的影响。文献[18]通过计算机仿真软件,分析了不同工作温度对换能器输出特性的影响,但只是在空载情形下进行的分析和研究。

为了深入细致研究工作温度和负载变化对换能器谐振频率的影响规律,本文依据磁致伸缩换能器机电等效电路,推导出一种关于工作温度和负载的谐振频率计算模型,通过搭建负载-温度-谐振频率测试系统,测量了换能器在不同工作温度和负载下的谐振频率;将测试数据

拟合成谐振频率关于工作温度和负载的二元函数模型,得到了计算模型的相关系数;并将计算模型应用于高频磁致伸缩换能器频率跟踪反馈控制系统设计和输出特性测试。

1 谐振频率计算模型

根据机-电类比等效法^[19],将磁致伸缩换能器的机械振动部分转化为电路参量,可建立如图 1 所示的磁致伸缩换能器机电等效电路。其中 R_0 和 L_0 为电学参量, R_0 为静态等效电阻,阻值很大,在等效电路中可以忽略不计; L_0 为静态等效电感,可以通过匹配电路进行补偿; C_m 、 L_m 、 R_m 构成的支路为机械支路,它们并不是真正的电学参量, C_m 为换能器经机电耦合等效形成的动态电容; L_m 是等效动态电感; R_m 为等效动态电阻。

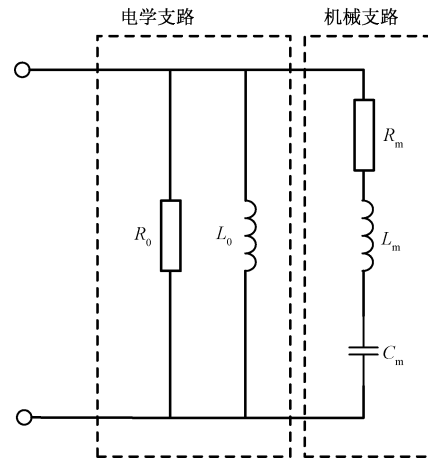


图 1 高频磁致伸缩换能器机电等效电路

Fig. 1 The electromechanical equivalent circuit of high-frequency magnetostrictive transducer

为了让换能器可以高效率稳定工作,必须使换能器工作在谐振频率 f_s 处,因此,机械支路须为纯阻性,即 L_m 和 C_m 发生串联谐振,如式(1)所示,

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m C_m}} \quad (1)$$

在不同温度 T 和不同负载 F 的情况下, L_m 和 C_m 会发生改变,进而谐振频率 f_s 也会发生相应变化,不妨设 L_m 和 C_m 分别是关于温度 T 和负载 F 的二元函数,如式(2)和(3)。

$$L_m(F, T) = g(F, T) \quad (2)$$

$$C_m(T, F) = h(F, T) \quad (3)$$

可用泰勒级数将式(2)、(3)展开成关于温度 T 和负载 F 的多项式,即:

$$L_m(T, F) = L_{m(0,0)} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(L_{mx}T + L_{my}F)^n}{n!} \quad (4)$$

$$C_{m(T,F)} = C_{m(0,0)} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(C_{mx}T + C_{my}F)^n}{n!} \quad (5)$$

式中: L_{mx} 表示当负载 F 为 0 时关于温度 T 的偏导数; L_{my} 表示当温度 T 为 0 时关于负载 F 的偏导数; C_{mx} 当负载 F 为 0 时关于温度 T 的偏导数; C_{my} 当负载 F 为 0 时关于温度 T 的偏导数; 分别仅保留关于温度 T 和负载 F 的线性部分, 可得:

$$L_{m(T,F)} = L_{11} + L_{12}T + L_{13}F \quad (6)$$

$$C_{m(T,F)} = C_{11} + C_{12}T + C_{13}F \quad (7)$$

将式(6)、(7)相乘整理得式(8):

$$L_{m(T,F)} C_{m(T,F)} = L_{11}C_{11} + (L_{11}C_{12} + C_{11}L_{12})T + (L_{11}C_{13} + L_{13}C_{11})F + L_{12}C_{12}T^2 + L_{13}C_{13}F^2 + (L_{12}C_{13} + L_{13}C_{12})FT \quad (8)$$

式中: $L_{11} \sim L_{13}$ 和 $C_{11} \sim C_{13}$ 为换能器谐振频率相关系数, 当给定边界和初始条件时, 只需通过 6 组不同温度 T 和不同负载 F 下的阻抗分析测试实验数据, 即可获得一组齐次线性方程, 求解该方程组便可得到 $L_{11} \sim L_{13}$ 和 $C_{11} \sim C_{13}$ 这 6 个系数。将式(8)代入式(1), 可得换能器谐振频率如式(9)所示。

$$f_{s(T,F)} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{m(T,F)}C_{m(T,F)}}} \quad (9)$$

将式(9)按二元泰勒公式展开可写出式(10)的多项式形式。

$$f_{s(T,F)} = z + aT + bF + cT^2 + dF^2 + eFT \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{其中, } z &= \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{11}L_{11}}}, a = -\frac{C_{11}L_{12} + C_{12}L_{11}}{4\pi C_{11}L_{11}\sqrt{C_{11}L_{11}}}, \\ b &= -\frac{C_{11}L_{13} + C_{13}L_{11}}{4\pi C_{11}L_{11}\sqrt{C_{11}L_{11}}}, c = -\frac{C_{12}L_{12}}{\sqrt{C_{11}L_{11}}}, d = -\frac{C_{13}L_{13}}{\sqrt{C_{11}L_{11}}}, \\ e &= -\frac{C_{12}L_{13} + C_{13}L_{12}}{\sqrt{C_{11}L_{11}}}. \end{aligned}$$

至此, 推导得出磁致伸缩换能器谐

振频率关于工作温度 T 和负载 F 双变量的计算模型, 模型中的 6 个系数 z, a, b, c, d, e 可由系数 $L_{11} \sim L_{13}$ 和 $C_{11} \sim C_{13}$ 计算得出。系数确定后, 便可通过计算模型式(10)预测算出磁致伸缩换能器在工作范围内任何温度和负载工况下的谐振频率。

2 温度-负载可控测试系统的工作原理及其构成

2.1 工作原理

磁致伸缩换能器温度和负载可控测试系统的基本工作原理如图 2 所示, 信号发生器输出频率可调的正弦交变电流, 通过功率放大器和匹配电路, 输入到磁致伸缩换能器的驱动线圈中。测试前调试好加载力装置和温控装置, 设置好加载力 F 和温度 T , 在换能器的顶端装有加速

度传感器, 并与高精度数据采集卡连接, 将采集到的实时加速度传输到计算机界面, 进行数据处理, 得到负载和工作温度对于谐振频率的影响规律。

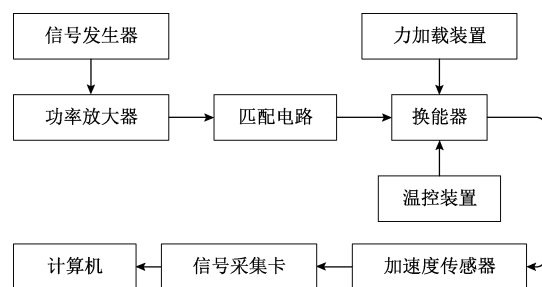


图 2 温度-负载可控测试系统原理

Fig. 2 Principle of temperature-load controllable test system

2.2 硬件构成

实验中高频磁致伸缩换能器的结构是窗式型换能器, 其结构如图 3 所示。它主要由外壳、底座、磁致伸缩材料叠片、激励线圈和变幅杆等部件构成。其工作原理为: 激励线圈中通入高频电流来产生交变磁场用以驱动磁致伸缩材料产生同频率的伸缩运动。然后将能量集中在变幅杆上进行振动输出, 实现电能—磁能—机械能的转换。

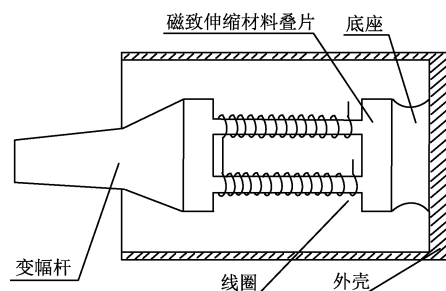


图 3 窗式换能器结构

Fig. 3 Window type transducer structure

基于高精度数据采集系统搭建的温度-负载可控的高频磁致伸缩换能器测试装置如图 4 所示。它主要由信号发生器、功率放大器、高频磁致伸缩换能器、信号采集卡、高精度温度控制仪、自动压力机和加速度传感器等器件组成。其中, 信号发生器采用的是 TFG-2006V 型; 信号采集卡采用的是 DH8303 型; 功率放大器采用 HT-1721 型直流稳压稳流电源; 高精度温度控制仪分为两部分, 分别是控制面板和保温部件。控制面板采用高精度 PID 控制算法, 其上下温差不超 5°C , 可控温度范围在 $20^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ 之间。保温部件采用硅胶材质, 具有加热快、保温效果好的优点。自动加压机施加力的范围在 $0 \sim 1\,000\text{ N}$, 精度在 $\pm 1\text{ N}$ 。高精度加速度传感器采用的是 IEPE 压电式加速度传感器, 型号为

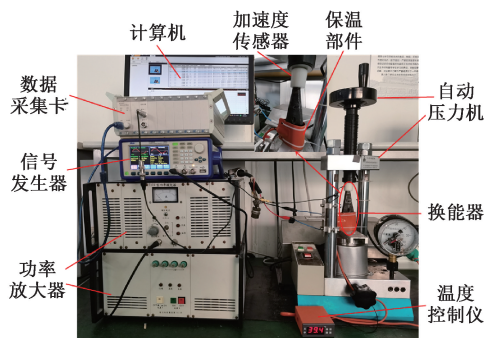


图 4 温度-负载可控的测试系统

Fig. 4 Temperature-load controllable test system

1A802E, 灵敏度为 $0.480\ 3\ \text{mv}/\text{m}/\text{s}^2$, 测量频率范围在 $2\sim 20\ 000\ \text{Hz}$ 之间。

3 测量结果分析与拟合模型

本文测量选用的是谐振频率为 $f=16.6\ \text{kHz}$ 的高频磁致伸缩换能器, 测试频率范围为 $16\sim 17\ \text{kHz}$, 负载范围为 $0\sim 100\ \text{N}$, 温度范围为 $20^\circ\text{C}\sim 100^\circ\text{C}$ 。

3.1 不同负载下换能器谐振频率的变化规律

当工作温度设定为 $T=20^\circ\text{C}$ 时, 换能器的加速度随不同负载 ($0, 10, 50, 70, 90\ \text{N}$) 的变化曲线如图 5 所示。当加速度达到最高时对应的频率, 即为谐振频率^[10]。结果表明: 当温度为定值时, 在同一负载下, 随着输入频率的增加, 加速度呈现先增加后减小的趋势。纵向来看, 谐振频率随负载变化呈现先减小后增大的趋势。

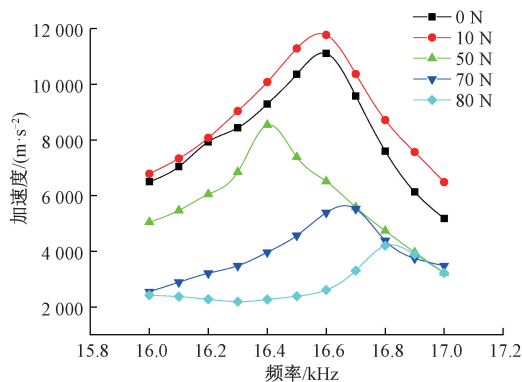


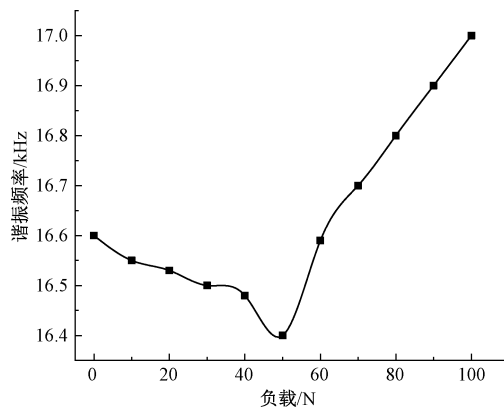
图 5 不同负载时加速度与频率的关系曲线

Fig. 5 The relationship curve of acceleration vs. frequency under different loads

图 6 分析了换能器在温度为 20°C 的谐振频率特性。从图中可以看出当负载从 $0\ \text{N}$ 增加到 $100\ \text{N}$ 的过程中, 换能器的谐振频率先减小后增大, 谐振频率变化了 $600\ \text{Hz}$ (由 $50\ \text{N}$ 时的 $16.4\ \text{kHz}$ 变化至 $100\ \text{N}$ 时 $17\ \text{kHz}$),

谐振频率变化的十分剧烈, 由此可见负载对于谐振频率的变化显著。从图 6 中可以得出, 负载在 $0\sim 50\ \text{N}$ 之间, 谐振频率呈现线性减小的趋势, 对其进行线性拟合计算, 得到了线性增长率为 $-3.5\ \text{Hz}/\text{N}$; 而在 $50\sim 100\ \text{N}$ 之间, 谐振频率呈现线性增大的趋势, 经拟合计算得出的线性增长率为 $+11.5\ \text{Hz}/\text{N}$ 。由以上分析可知, 在温度取定值时, 谐振频率随负载的增大, 呈现出先减小后增大变化规律。

图 6 中第 1 段 ($0\sim 50\ \text{N}$) 线性拟合得到的残差平方和是 $0.001\ 23$, 第 2 段 ($50\sim 100\ \text{N}$) 的残差平方和是 $0.004\ 07$, 都在合理的误差范围内。第 1 段线性相关度是 -0.97 , 第 2 段的线性相关度是 0.99 , 线性相关程度高。说明拟合曲线可较好地表征磁致伸缩换能器谐振频率随负载的变化规律。

图 6 谐振频率特性 ($T=20^\circ\text{C}$)Fig. 6 Resonant frequency characteristic ($T=20^\circ\text{C}$)

3.2 不同温度下换能器谐振频率的变化规律

当换能器所加负载设定为 $F=0\ \text{N}$ 时, 加速度随不同温度 ($20^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C}, 60^\circ\text{C}, 80^\circ\text{C}, 100^\circ\text{C}$) 的变化曲线如图 7 所示。结果表明: 当负载一定时, 同一温度下, 换能器的加速度随着频率的增大, 呈现先升高后下降的变化趋势; 纵向来看, 随着温度的增加, 换能器谐振频率呈现先增大后减小的变化规律。

当负载为 $0\ \text{N}$ 时, 换能器的谐振频率特性如图 8 所示。根据图中散点的分布, 能够得出当温度从 20°C 增加到 100°C 的过程中, 换能器的谐振频率呈现先增大后减小的变化趋势, 谐振频率变化了 $300\ \text{Hz}$ (由 40°C 时的 $16.7\ \text{kHz}$ 变化至 100°C 的 $16.4\ \text{kHz}$)。频率变化较为剧烈, 因此温度也是频率跟踪系统要考虑的一个参量。根据图 8 可以得到, 换能器的工作温度在 $20^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$ 之间时, 磁致伸缩换能器的谐振频率随温度的上升而增加, 近似线性变化, 经线性拟合计算得出的增长率为 $+5.88\ \text{Hz}/^\circ\text{C}$; 而工作温度在 $40^\circ\text{C}\sim 100^\circ\text{C}$ 之间时, 谐振频率随温度的上升逐步降低, 近似线性变化, 拟合计算得出增长率为 $-5\ \text{Hz}/^\circ\text{C}$ 。

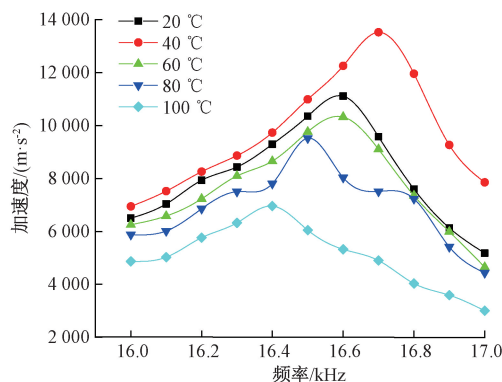
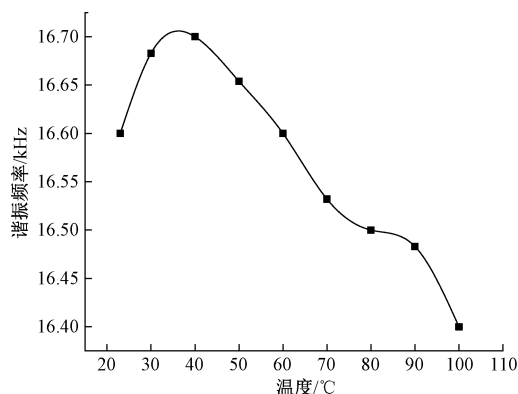


图7 不同温度时加速度与频率的关系曲线

Fig. 7 The relationship curve of acceleration vs. frequency at different temperatures

图8中第1段(20℃~40℃)残差平方和是0.001 15,第2段(40℃~100℃)的残差平方和是0.001 26,都在合理的误差范围内。第1段线性相关度是0.92,第2段的线性相关度是-0.97,线性相关程度高。说明拟合曲线可较好地表征磁致伸缩换能器谐振频率随温度的变化规律。

图8 谐振频率特性 ($F=0$ N)Fig. 8 Resonant frequency characteristic ($F=0$ N)

3.3 不同温度和负载下换能器谐振频率的变化规律

为了发现谐振频率随负载和温度变化的一般化规律,将实验数据整理成(T, F, f_s)三维数组,其中 T 表示温度,单位是℃; F 表示负载,单位是牛顿(N); f_s 表示谐振频率,单位是kHz。 T (℃)的取值分别为20、40、60、80、100; F (N)的取值分别为0、10、20、30、40、50、60、70、80、90、100。依据这些点,画出散点图,进行曲面拟合,如图9所示。

根据曲面拟合原理^[20],利用Origin软件中曲面拟合的算法,手动调节自变量 T, F 的形式,通过数值迭代,得到自变量前的系数,使生成的曲面达到拟合要求。得到了如图9的拟合曲面图,拟合曲面的残差平方和为0.003 5,拟合优度 $r^2=0.92$,对应的数学模型为:

$$f_s(T, F) = z + aT + bF + cT^2 + dF^2 + eFT \quad (11)$$

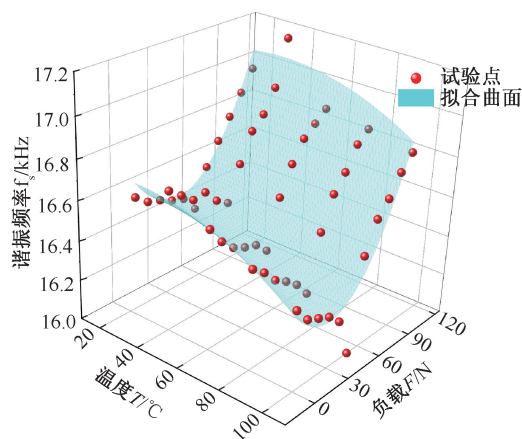


图9 谐振频率随负载和温度变化规律与拟合曲面

Fig. 9 Changing rule of resonance frequency vs. load and temperature and the fitting surface

式中; z, a, b, c, d, e 为曲面拟合得到的6个参数,对于本文所测试的换能器,6个参数的数值如表1所示。

表1 拟合参数值

Table 1 Fitting parameter values

参数	数值
z	16.64
a	2.45×10^{-3}
b	-9.95×10^{-3}
c	-5.23×10^{-5}
d	1.38×10^{-4}
e	1.51×10^{-5}

以上实验结果均是换能器的输入电流有效值 $I=1.0$ A时测量并拟合得出的。为了验证拟合公式(1)在其他激励条件的准确性,分别取 $I=0.5$ A、 $I=1.5$ A、 $I=2.0$ A、 $I=2.5$ A、 $I=3.0$ A这5种情况下,重复上述实验过程并进行数据拟合。最终发现,在得到的拟合公式 $f_s(T, F)$ 之中,6个拟合参数变化很小,变化量级在 10^{-8} 。由此可以得到,在相同负载和温度实验条件下,换能器输入电流有效值的变化对换能器谐振频率的影响很小。至此,通过实验测试和数据分析,得到了换能器谐振频率关于温度 T 和负载 F 的函数关系式 $f_s(T, F)$,该模型将用于频率跟踪反馈控制的DSP算法设计中。

4 频率跟踪控制系统的设计与实验测试

4.1 频率跟踪系统的设计

为了使换能器能量传递效率最大化,需要它始终工作于谐振状态下。谐振频率随负载和工作温度变化而

自动调节的控制系统原理框图如图 10 所示,由整流、滤波电路、高频逆变电路、高频变压器、匹配电路和信号采集系统(力传感器和温度传感器及其 AD 转换电路)、DSP 控制系统和驱动电路组成。其中 DSP 控制系统核心算法是通过计算模型所构建得到,算法的输入量为温度 T 和负载 F ,可通过力传感器和温度传感器进行测量获得,并由对应的 AD 电路转换为数字量,输入到 DSP 控制系统中。算法的输出量是谐振频率 f_s (即频率为 f_s 的脉冲波),经驱动电路,对高频逆变电路进行驱动,通过改变逆变桥的开关频率,来达到频率跟踪的目标。DSP 控制系统的原理是:当换能器的温度和负载发生变化时,通过传感器将当前温度值和负载值输入到 DSP 控制系统中,经频率跟踪算法控制,改变换能器的驱动频率,来适应当前工作温度和负载的变化,保证换能器一直处于谐振状态,使其高效率稳定运行。

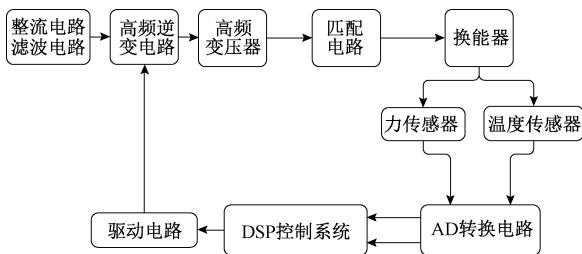


图 10 频率跟踪控制系统原理框图

Fig. 10 The principle block diagram of frequency tracking control system

4.2 实验测试

为验证所设计的闭环控制系统能否实现对换能器谐振频率的实时跟踪,对被试的窗式磁致伸缩换能器进行了不同负载和工作温度下输出加速度的测试。通过数据采集系统实时采集到的换能器的输出加速度的波形如图 11 所示。

从图 11 中可以看出,当温度为 20°C 、负载分别为 0 和 40 N 以及温度为 100°C 、负载分别为 0 和 40 N 时,换能器的谐振频率值和加速度幅值均随工作状况的改变而

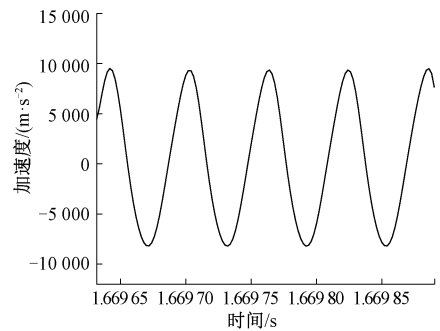
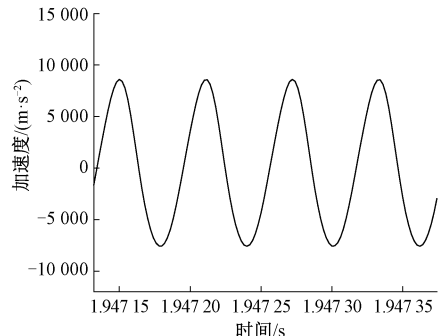
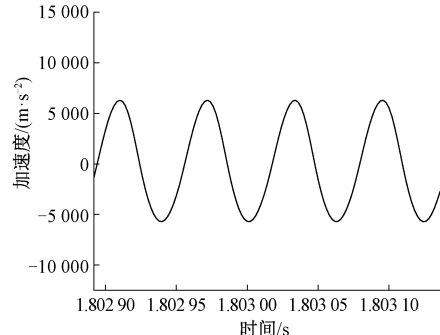
(b) $T=20^{\circ}\text{C}$, $F=40\text{ N}$ (c) $T=100^{\circ}\text{C}$, $F=0\text{ N}$ (d) $T=100^{\circ}\text{C}$, $F=40\text{ N}$

图 11 输出加速度波形

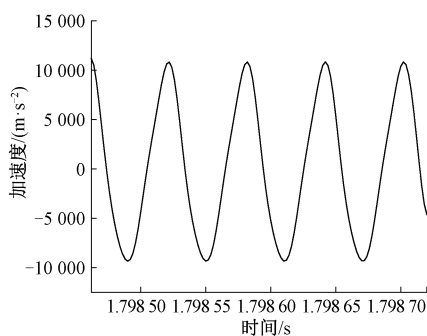
Fig. 11 Output acceleration waveform

发生了明显变化,经频率跟踪系统控制后的换能器输出加速度波形较好,图 11(a)~(d)4 个波形的具体数值如表 2 所示。

表 2 4 个工况下的输出加速度幅值和频率

Table 2 Output acceleration amplitude and frequency under four working conditions

工况	加速度幅值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	输出加速度频率/kHz
$T=20^{\circ}\text{C}$, $F=0\text{ N}$	11 210.320	16.60
$T=20^{\circ}\text{C}$, $F=40\text{ N}$	9 532.853	16.48
$T=100^{\circ}\text{C}$, $F=0\text{ N}$	8 700.502	16.40
$T=100^{\circ}\text{C}$, $F=40\text{ N}$	6 230.193	16.20

(a) $T=20^{\circ}\text{C}$, $F=0\text{ N}$

不同温度 and 不同负载情况下的采用频率跟踪控制前后换能器输出加速度对比情况如图 12 和表 3 所示。

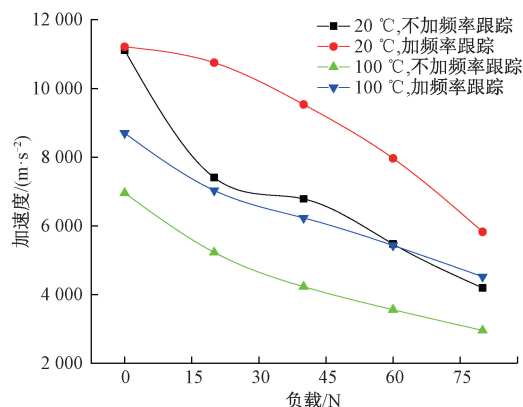


图 12 频率跟踪控制前后加速度幅值实验对比图

Fig. 12 Experiment comparison of acceleration amplitude before and after frequency tracking control

表 3 频率跟踪前后加速度幅值对照表

Table 3 Comparison table of acceleration amplitude before and after frequency tracking

负载/N	20℃	增长率/%	100℃	增长率/%
0	11 110. 200	0. 90	6 957. 214	25. 06
	11 210. 320		8 700. 502	
20	7 406. 147	45. 15	5 230. 426	34. 46
	10 750. 320		7 032. 598	
40	6 786. 745	40. 46	4 230. 456	47. 27
	9 532. 853		6 230. 193	
60	5 472. 265	45. 56	3 560. 341	52. 52
	7 965. 320		5 430. 140	
80	4 197. 365	38. 81	2 956. 201	52. 91
	5 826. 478		4 520. 369	

当温度为 20℃、负载分别为 0、20、40、60 和 80 N 以及温度为 100℃、负载分别为 0、20、40、60 和 80 N 时,采用频率跟踪控制前后的两组对比数据(表 3)可见:采用闭环反馈频率跟踪控制方法后,在 20℃时,输出加速度幅值增加了 0.90%~45.56% [百分数 = 100% × (频率跟踪后的加速度幅值 - 频率跟踪前的加速度幅值) / 频率跟踪前的加速度幅值], 平均提升了 23.23%; 在 100℃时,加速度幅值增加了 25.05%~52.91%, 平均提升了 38.98%。平均提升百分比用百分数的算数平均值表示,即(最大百分数+最小百分数)/2。结果表明,采用所设计的频率跟踪控制系统,换能器输出加速度幅值得到了明显的提升,使换能器能够适应不同工作温度和负载变化的工作状况而实时调整谐振频率的大小以保证换能器高效率稳定工作。

5 结 论

针对磁致伸缩材料固有的温度敏感特性和高频磁致伸缩换能器的谐振频率随负载和温度变化而发生漂移的问题,本文基于换能器机电等效模型,推导了一种计及工作温度和负载变化的谐振频率计算模型,搭建了温度-负载可控的实验平台,利用控制变量法分别研究了温度对谐振频率的影响规律以及负载对谐振频率的影响规律。实验结果表明:当温度一定时,随着负载的增大,谐振频率呈现先减小后增大变化趋势,并且减小的斜率小于增大的斜率;当负载一定时,随着温度的升高,谐振频率呈现先增大后减小的变化趋势,并且减小的斜率略小于增大的斜率。对实验测量数据采用分段线性和曲面数值拟合的方式,得出了换能器谐振频率 f_s 关于温度 T 和负载 F 的二元函数模型,继而得出了计算模型的相关参数;并利用此数学模型,设计一个自动频率跟踪反馈控制系统,进行了输出特性的测试,实验结果表明采用该频率跟踪控制系统使得换能器的输出加速度幅值平均提升了 31.11%,验证了基于计算模型的谐振频率跟踪控制方法的有效性。本研究可为大功率磁致伸缩超声换能器的高效和广泛应用提供理论和技术支持。

参考文献

- [1] 黄文美,王博文,曹淑瑛,等. 计及涡流效应和应力变化的超磁致伸缩换能器的动态模型[J]. 中国电机工程学报, 2005(16): 132-136.
HUANG W M, WANG B W, CAO SH Y, et al. Dynamic model of giant magnetostrictive transducer considering eddy current effect and stress change[J]. Proceedings of the CSEE, 2005(16): 132-136.
- [2] 王博文,王晓东,李云开,等. 用于纹理探测的磁致伸缩触觉传感器[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(12): 2991-2997.
WANG B W, WANG X D, LI Y K, et al. Magnetostrictive tactile sensor for texture detection[J]. Opt. Precision Eng., 2018, 26(12): 2991-2997.
- [3] 黄文美,吴晓晴,李亚芳,等. TbDyFe 合金的高频动态磁特性及损耗特性分析[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 215-222.
HUANG W M, WU X Q, LI Y F, et al. Analysis of high frequency dynamic magnetic characteristics and loss characteristics of TbDyFe alloy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1): 215-222.

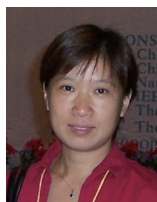
- [4] 李淑英,王博文,周严,等. 叠层复合磁致伸缩材料驱动器的输出位移特性[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(1):71-75.
LI SH Y, WANG B W, ZHOU Y, et al. Output displacement characteristics of laminated composite magnetostrictive material actuator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(1):71-75.
- [5] ZHAO T Y, YUAN H Q, PAN H G, et al. Study on the rare-earth giant magnetostrictive actuator based on experimental and theoretical analysis [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, 460:509-524.
- [6] 陈宁,郑杰基,焦西凯,等. 超声电机多参量高精度测控系统的研制[J]. 光学 精密工程, 2020, 28(4):759-770.
CHEN N, ZHENG J J, JIAO X K, et al. Development of a multi-parameter high-precision measurement and control system for ultrasonic motors[J]. Opt. Precision Eng., 2020, 28(4):759-770.
- [7] 鞠晓君,林明星,范文涛,等. 超磁致伸缩致动器结构分析及出力特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5):1198-1206.
JU X J, LIN M X, FANG W T, et al. Structure analysis and output force characteristics of giant magnetostrictive actuator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5):1198-1206.
- [8] 金亮,冯时,杨庆新,等. 基于改进 NSGA-III 的电磁超声换能器多目标优化[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1):49-59.
JIN L, FENG SH, YANG Q X, et al. Multi-objective optimization of electromagnetic ultrasonic transducer based on improved NSGA-III [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1):49-59.
- [9] 尹昱,陈振华,肖峰,等. 不锈钢疲劳微损伤的非线性超声检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1):68-73.
YIN Y, CHEN ZH H, XIAO F, et al. Nonlinear ultrasonic testing method for fatigue micro-damage of stainless steel[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(1):68-73.
- [10] LI Y, HUANG W M, WANG B W, et al. High-frequency output characteristics of giant magnetostrictive transducer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(6):1-5.
- [11] 杨强. 智能超声电源研制[D]. 天津:天津大学, 2018.
YANG Q. Development of intelligent ultrasonic power supply[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [12] 周辉林,张建富,冯平法,等. 超磁致伸缩超声振子预紧特性对输出振幅的影响规律[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(3):894-902.
ZHOU H L, ZHANG J F, FENG P F, et al. The influence of the preload characteristics of the giant magnetostrictive ultrasonic vibrator on the output amplitude[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(3):894-902.
- [13] 蔡万宠,冯平法,郁鼎文. 超磁致伸缩换能器预应力优化设计方法研究[J]. 振动. 测试与诊断, 2017, 37(1):48-52, 198.
CAI W CH, FENG P F, YU D W. Research on optimal design method of prestress of giant magnetostrictive transducer [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(1):48-52, 198.
- [14] CAI W C, FENG P F, ZHANG J F, al et. Effect of temperature on the performance of a giant magnetostrictive ultrasonic transducer [J]. Journal of Vibroengineering, 2016, 18(2):1307-1318.
- [15] ZHOU H L, ZHANG J F, FENG F P, et al. On the optimum resonance of giant magnetostrictive ultrasonic transducer with capacitance-based impedance compensation[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(10):105002.
- [16] ZHOU H L, ZHANG J F, FENG F P, et al. Investigations on a mathematical model for optimum impedance compensation of a giant magnetostrictive ultrasonic transducer and its resonance characteristics[J]. Ultrasonics, 2021, 110:106286.
- [17] AFZAL M, KARI L, LOPEZ ARTEAGA I. Adaptive control of normal load at the friction interface of bladed disks using giant magnetostrictive material[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2020, 31(8):1111-1125.
- [18] 王亚普,龙士国. 温度对磁致伸缩换能器动态输出特性的影响[J]. 压电与声光, 2014, 36(2):266-269.
WANG Y P, LONG SH G. The influence of temperature on the dynamic output characteristics of magnetostrictive transducer[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2014, 36(2):266-269.
- [19] 蔡万宠,张建富,郁鼎文,等. 基于非定常机电转换系数的超磁致伸缩换能器输出振幅模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(5):459-464.
CAI W CH, ZHANG J F, YU D W, et al. Output

amplitude model of giant magnetostrictive transducer based on unsteady electromechanical conversion coefficient[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57(5) :459-464.

- [20] 厉学亮. 数据拟合中的模型与误差[D]. 长春: 吉林大学, 2009.

LI X L. Model and error in data fitting[D]. Changchun: Jilin University, 2009.

作者简介



黄文美 (通信作者), 2005 于河北工业大学获得博士学位, 现为河北工业大学教授和博士生导师, 主要研究方向为新型磁性材料与器件, 电机电器及其控制。

E-mail: huzwm@hebut.edu.cn

Huang Wenmei (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Hebei University of Technology in 2005. She is currently a professor and Ph. D. supervisor at Hebei University of Technology. Her main research interest includes new magnetic materials and devices, electric motor and electric apparatus and their control.



胡少鹏, 2019 年于河北科技大学获得学士学位, 现为河北工业大学硕士研究生, 主要研究方向为新型磁性材料与器件的研究。

E-mail: 15511350550@163.com

Hu Shaopeng received his B. Sc. degree from Hebei University of Science and Technology in 2019. He is currently a master student at Hebei University of Technology. His research interest is new magnetic materials and devices.



周严, 2002 年于天津理工大学获得学士学位, 2005 年于天津师范大学获得硕士学位, 2009 年于河北工业大学获得博士学位, 现为天津商业大学教授, 主要研究方向为智能材料与器件。

E-mail: lxyzhy@tjcu.edu.cn

Zhou Yan received his B. Sc. degree from Tianjin University of Technology in 2002, received his M. Sc. degree from Tianjin Normal University in 2005, received his Ph. D. degree from Hebei University of Technology in 2009. Now he is a professor at Tianjin Commercial University. His main research interest is intelligent materials and devices.