

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108557

基于多目标遗传算法的高频磁致伸缩换能器优化设计*

黄文美^{1,2}, 郭万里^{1,2}, 郭萍萍^{1,2}, 夏志玉^{1,2}

(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)

摘 要:磁致伸缩换能器在高频激励下存在铁心涡流损耗大、磁场分布不均匀、电磁转化效率低等问题,需要从换能器本体优化设计方面寻求解决。首先对换能器的线圈高度和磁轭回路结构进行仿真分析以初步确定磁路结构;然后基于非支配排序遗传算法对换能器提出了一个整体的多目标优化设计模型,该模型以增大磁致伸缩棒内磁场强度、提高棒内的磁场分布均匀度和减少换能器高频损耗为优化目标,引入规范化排序和熵权法对该优化方法得到的 Pareto 前沿解进行决策支持,筛选一组最优设计方案;最后对该最优解进行仿真分析,磁场分布和数值计算结果验证了该优化方法的有效性,根据优化结果制作了一台换能器样机,样机输出特性的测试结果表明了优化设计方法的可行性。

关键词: 高频磁致伸缩换能器;结构优化设计;多目标遗传算法;有限元仿真;样机测试

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4021

Optimization design of high frequency magnetostrictive transducer based on the multi-objective genetic algorithm

Huang Wenmei^{1,2}, Guo Wanli^{1,2}, Guo Pingping^{1,2}, Xia Zhiyu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Equipment, 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)

Abstract: Magnetostrictive transducers have high core eddy current loss, uneven magnetic field distribution and low electromagnetic conversion efficiency under high frequency excitation. These issues need to be addressed by the optimal design of the transducer body. The coil height and yoke loop structure of the transducer are firstly simulated to initially determine the magnetic circuit structure. Then, an overall multi-objective optimization design model for the transducer is proposed, which is based on the non-dominated ranking genetic algorithm. The optimization objectives are to increase the magnetic field strength in the magnetostrictive bar, improve the uniformity of the magnetic field distribution in the bar, and reduce the high frequency loss of the transducer. The normalized ranking and entropy weighting methods are introduced for decision support of the Pareto front solutions obtained by this optimization method to screen a set of optimal design solutions. Finally, the optimal solution is simulated and analyzed. Results of magnetic field distribution and numerical calculation verify the effectiveness of the optimization method.

Keywords: high frequency magnetostrictive transducer; structural optimization design; multi-objective genetic algorithm; finite element simulation; prototype testing

0 引 言

随着我国制造能力的不断提升,以磁致伸缩材料作为新型智能驱动和传感材料制造的器件正在受到人们广

泛关注^[1]。与传统的压电智能材料相比,磁致伸缩材料具有应变系数大、能量密度高、响应速度快和可靠性高等特点^[2]。磁致伸缩换能器是以磁致伸缩材料为核心驱动元件来实现电、磁、机械或声能量转换的器件,在精密仪器、超声加工、海底探测和医疗器件等领域有广泛的应用

收稿日期:2021-09-12 Received Date: 2021-09-12

* 基金项目:国家自然科学基金(51777053,52077052)项目资助

前景^[3-5]。高频激励下磁致伸缩材料受涡流效应和集肤效应影响显著,导致内部磁场强度较低且磁场分布不均匀。材料磁场径向分布不均匀,在棒内会产生剪切应力,进而影响器件输出性能和使用寿命^[6-7]。此外,磁致伸缩材料的电阻率较小,在高频激励下会产生严重的磁滞损耗和涡流损耗,这些损耗以热量的形式表现出来,导致材料温度升高,并且材料具有温度敏感特性,温度的变化会同时影响材料的磁特性,从而影响器件的输出,降低其工作效率和工作稳定性^[8]。

磁致伸缩换能器在满足设计要求的条件下,要考虑内部磁场环境,合理设计磁路结构以优化磁致伸缩棒内部的磁场分布、减少漏磁。高频激励条件下,还要充分考虑激励线圈的结构和绕制方式来提高线圈的激磁效率。目前国内外已有一些文献在降低高频损耗、改善磁路中磁场分布和增大输出功率方面对换能器的本体结构进行了优化设计。文献[9]研究了叠堆结构对磁致伸缩棒状材料的涡流抑制作用,并分析了切片厚度、粘贴厚度等叠堆结构参数对棒中涡流损耗的影响,为减小高频损耗指导器件设计提供了思路。文献[10]分别对单棒和双棒型磁致伸缩换能器的内部磁场和输出特性进行了分析研究,结果表明双棒驱动结构下的换能器内部磁场分布均匀、漏磁少、输出力大且稳定性好,但作者只讨论了磁致伸缩棒的优化设计,优化变量单一。文献[11]设计了一台超声磁致伸缩换能器,基于磁心结构尺寸和线圈的激磁效率对磁致伸缩换能器的自由优化变量进行了参数化扫描,选取了最佳设计方案,但当优化变量和优化目标较多时,参数化扫描方法计算量大且难以兼顾多目标同时达到相对最优。由高频变压器优化设计可知,多个电磁参数在减小磁心结构、降低高频损耗和提高转化效率等方面是相互影响的,故需要一个整体优化设计方法,在多个目标之间进行折衷处理,使各个子目标尽可能达到相对最优。文献[12]采用遗传算法对超磁致伸缩执行器提出了一个整体多目标优化设计模型,该模型可以综合考虑多目标之间的限制和约束,对低频 GMA 的设计具有重要指导意义,但此优化方法更适用于低维多目标优化问题。文献[13]采用非支配遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithms)以高频变压器损耗和漏感为优化目标得到一组满足多目标优化的 Pareto 前沿解,该优化方法复杂性低、解集的收敛性好、运行速度快。

本文首先根据电磁学理论设计了双棒驱动的磁致伸缩换能器磁路结构,分析了磁路结构尺寸对棒内部磁场环境的影响。然后基于非支配遗传算法提出了一个整体的多目标优化设计方案,该模型以提高磁致伸缩棒的磁场强度、改善棒的磁场分布和降低换能器的高频损耗为优化目标,以几何结构尺寸为优化变量,得到一组满足约束条件的 Pareto 前沿解。最后得到给定设计要求下磁致

伸缩换能器的优化设计结果,并通过仿真分析和样机输出特性测试验证该方法的可行性。

1 双棒磁致伸缩换能器结构原理

磁致伸缩换能器结构如图 1 所示,它的主要结构包括变幅杆、碟形弹簧、磁轭、磁致伸缩棒、线圈、预紧螺栓、外壳和底座等部件。与当前常见单棒驱动的磁致伸缩换能器相比,图 1 是由两根磁致伸缩棒为驱动元件而设计的换能器,它具有输出效率高、输出力大、漏磁少的优点,适用于大功率磁致伸缩器件的设计应用^[10]。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棒进行伸缩运动,进行电磁能与机械能的转化。在直流线圈通入直流来产生偏置磁场,保证棒工作在形变性能较好的线性段和避免“倍频”现象的发生。通过预紧螺栓和碟形弹簧给棒提供预应力,使其在合适预应力下产生更大的形变量^[14]。变幅杆的作用是放大磁致伸缩棒的输出位移。

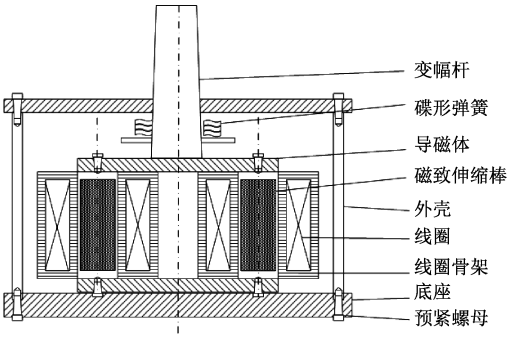


图 1 双棒型磁致伸缩换能器结构

Fig. 1 Structure of the double rod type magnetostrictive transducer

磁致伸缩换能器的最大输出位移 $x_{\max}$ 和力 $F_{\max}$ 主要是由磁致伸缩棒的长度和截面积决定,其最大输出位移 $x_{\max}$ 和力 $F_{\max}$ 的表达式如式(1)~(2)所示^[15]。本次所设计的磁致伸缩换能器用于精密位移控制,实现最优工作频率在 7~9 kHz,工作位移为 0~20 μm 的优化指标。采用具有低饱和磁通密度和较高抗拉强度的铁镓合金为核心驱动材料,根据换能器的设计指标初步确定磁致伸缩棒的长度 $l \geq 70$ mm,半径 $r_0 \geq 10$ mm。

$$x_{\max} = c\lambda_s l \tag{1}$$

$$F_{\max} = \frac{\pi(E\lambda_s - \sigma)d^2}{2} \tag{2}$$

式中: c 为变幅杆的放大倍数, λ_s 为饱和磁致伸缩系数, E 为磁致伸缩材料的杨氏模量, σ 为预应力, d 为磁致伸缩棒的直径。

磁致伸缩棒受涡流、集肤效应和动态磁滞的影响严重,文献[16]研究了高频激励下磁致伸缩材料涡流损耗的变化规律,结果显示对材料进行切片加绝缘处理的堆叠方式可有效减小涡流损耗,当磁通密度幅值一定时,切片厚度越薄,所需激励的磁场强度越小,损耗也随之减小。磁致伸缩棒切片厚度的选取可以通过涡流截止频率公式和工作频率来初步确定,如式(3)所示,当器件工作频率在 7~9 kHz 时,Galfenol 叠片厚度要在 2 mm 以内。

$$h_c = \sqrt{\frac{2\rho}{f\pi\mu_r\mu_0}}$$

(3)

式中: h_c 为磁致伸缩棒的切片厚度; ρ 为材料的电阻率; f 为器件的工作频率; μ_r 为材料的相对磁导率; μ_0 为真空磁导率。

2 双棒磁致伸缩换能器的结构优化设计

2.1 磁路结构选取

将图 1 中双棒型磁致伸缩换能器结构简化为图 2 所示的由线圈产生的磁通量回路简化示意图,图中 r_1 、 r_2 、 L 、 c 分别表示线圈架内半径、外半径、线圈高度和磁轭厚度,主磁路由磁致伸缩棒和磁轭形成回路, l_0 、 l_1 分别表示磁致伸缩棒和磁轭的磁路长度。磁路的设计直接影响棒内的磁场分布和换能器的输出特性,良好的磁回路在减小器件体积的同时可有效增大输出位移、输出力和输出功率。本节换能器的优化指标为提升棒的内部磁场环境:磁致伸缩棒内的磁场强度和磁场分布。

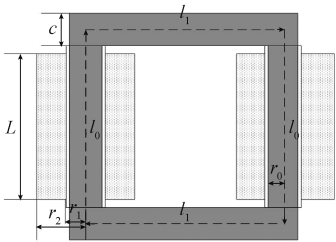


图 2 双棒型磁致伸缩换能器导磁回路示意图
Fig. 2 Magnetic circuit of the double rod type magnetostrictive transducer

为了提高磁致伸缩棒内的磁场分布,分析线圈高度对双棒磁通密度分布的影响。保持线圈匝数和电流固定不变,利用 COMSOL Multiphysic 有限元仿真软件对不同线圈高度下的磁回路进行仿真分析。当线圈的高度不高于棒时,磁轭的结构设计为方形。当线圈的高度高于棒时,空心线圈内棒的两端添加磁轭,使其与方形磁轭构成 U 型结构,形成闭合磁路。导线选择的是多股漆包线,线圈的内半径和外半径分别为

16 和 32 mm;磁致伸缩棒选择铁镓合金材料,棒的半径和高分别为 15 和 80 mm;磁轭选择的材料是镍铁合金,其长、宽、高分别为 128、30 和 25 mm;其他模型参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型相关参数
Table 1 Simulation model related parameters

参数	数值
磁致伸缩相对磁导率	98
磁致伸缩电导率/ $\Omega\cdot\text{m}$	6×10^5
磁轭(镍铁合金)相对磁导率	2 000
磁轭(镍铁合金)电导率/ $\Omega\cdot\text{m}$	1×10^5
环氧树脂相对磁导率	1
环氧树脂电导率/ $\Omega\cdot\text{m}$	0.1
切缝厚度/mm	0.2
切片厚度/mm	2
线圈匝数	500×2
导线线径/mm	0.1×70

图 3 所示为激励电流有效值为 1 A 时,不同线圈高度下磁致伸缩棒轴线处磁感应强度分布情况。从图 3 中可以看出,当线圈不高于磁致伸缩棒时,棒两端的磁感应强度较大,磁感应强度分布不均匀。当线圈高于磁致伸缩棒时,棒的磁通密度分布较为均匀,且线圈高度越高,磁通密度分布越均匀,但棒的磁感应强度随着线圈高度增加而减小,这是因为线圈高于磁致伸缩棒时,棒上下两端添加的磁轭使磁路中的磁阻增大。

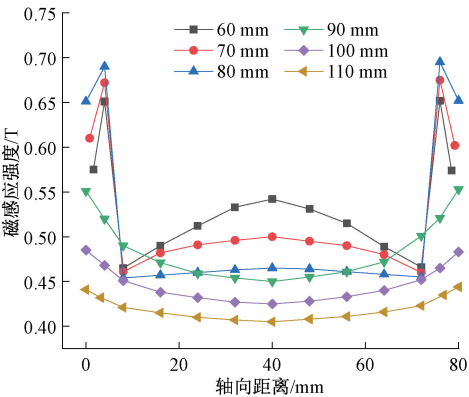


图 3 不同线圈高度下磁致伸缩棒轴线处磁感应强度
Fig. 3 Magnetic induction intensity distribution of magnetostrictive rod axis position with different coil heights

图 4 所示为激励频率 9 kHz,线圈高度为 70 mm 的方形磁轭和线圈高度为 90 mm 的 U 型磁轭结构下的磁路磁感应强度分布仿真云图。

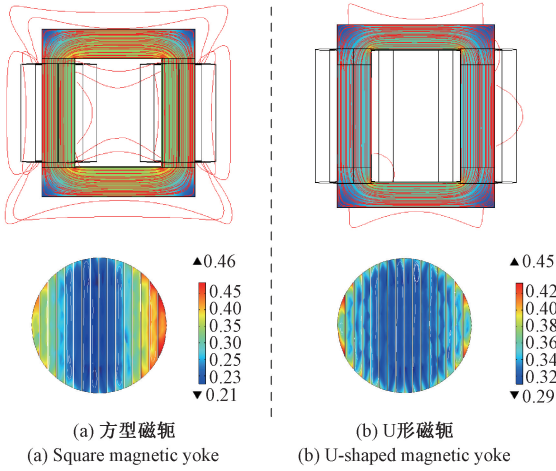


图 4 不同磁轭下磁路磁感应强度分布图

Fig. 4 Distribution diagram of the magnetic flux density of magnetic circuit under different yokes

图 4 中流线代表磁力线,从图中可以看出 U 型磁轭结构的换能器内部磁路闭合更好,漏磁较少。由图中可知方形磁轭下磁致伸缩棒横截面磁感应强度分布范围为 0.21~0.46 T,径向磁通密度分布不均,变化较大。U 型磁轭结构下磁致伸缩棒横截面磁感应强度分布范围为 0.29~0.45 T,径向磁通密度相差较小。两种结构下棒内的磁感应强度分布均匀度分别为 45.6% 和 66.7%,可见 U 型磁轭下磁致伸缩棒内的磁通密度分布更为均匀,漏磁少,选择线圈高度略高于磁致伸缩棒的 U 型磁轭结构效果更佳。

研究 U 型磁轭厚度对磁致伸缩棒磁场的影响,利用有限元仿真软件对不同磁轭厚度下磁致伸缩棒的磁场分布进行详细计算分析,以磁致伸缩棒轴线上的磁感应强度为目标变量,磁轭厚度为因变量。图 5 为磁轭厚度在 18~30 mm 下磁致伸缩棒轴线位置的磁感应强度分布,从图中可以看出在棒轴向距离的 10~70 mm 范围内,磁感应强度分布相对均匀,随着磁轭厚度的增加,棒的磁感应强度逐渐增大,当磁轭厚度达到 24 mm 时,增速变慢,此时磁轭的截面积近似等于磁致伸缩棒的截面积。基于减小磁轭损耗和器件体积的考虑,应尽量减小磁轭的厚度,所以选择磁轭和磁致伸缩棒的截面积相差较小时的磁轭厚度为较优。

2.2 优化设计目标

在经过磁场计算初步确定了磁路结构和数值范围基础上,对换能器进行优化设计时需要综合考虑以下 3 个因素并确定优化目标。

1) 磁致伸缩棒上磁场强度

将图 2 中各部分磁路用磁阻表示,可得到双棒磁致伸缩换能器的等效磁路如图 6 所示。 NI 表示驱动磁场

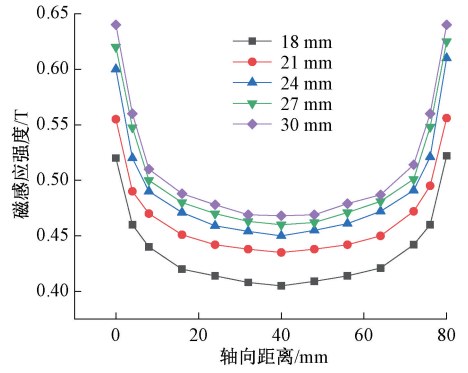


图 5 不同磁轭厚度下磁致伸缩棒轴线处磁感应强度

Fig. 5 Magnetic induction intensity distribution of magnetostrictive rod axis position with different yoke thickness

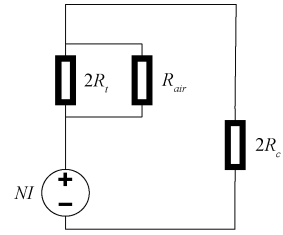


图 6 双棒磁致伸缩换能器等效磁路

Fig. 6 Equivalent magnetic circuit of the double rod magnetostrictive transducer

的激励源, R_l 表示磁致伸缩棒的磁阻, R_c 表示磁轭的磁阻, R_{air} 表示气隙磁阻。

由安培定律和麦克斯韦方程可得:

$$\frac{1}{k_f}NI = \oint \mathbf{H}dx = (2R_l/R_{air} + 2R_c)\mu_t A_t H_t \quad (4)$$

$$R_l = \frac{l_0}{\mu_r \mu_0 A_0} \quad (5)$$

$$R_c = \frac{l_1}{\mu_r \mu_0 A_1} \quad (6)$$

式中: $1/k_f$ 表示驱动线圈漏磁系数; l_0 、 A_0 表示磁致伸缩棒的长度和截面积; l_1 、 A_1 表示磁轭的长度和截面积。图 4 磁路仿真分析可知双棒型结构主磁路无气隙,闭合良好,漏磁也极少,可以近似忽略漏磁和气隙磁阻的影响,由式(4)可得磁致伸缩棒上的磁场强度为:

$$H_t = \frac{NI}{\mu_t A_t (2R_l + 2R_c)} \quad (7)$$

由式(7)可知,在 NI 一定时,可通过减小导磁回路的磁阻来增大磁致伸缩棒的磁场强度。

空心线圈在轴线处产生的磁场强度为^[17]:

$$H = \frac{NI}{2(r_2 - r_1)} \ln \left(\frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}} \right) \quad (8)$$

式中: $\alpha = r_2/r_1$, $\beta = L/2r_1$ 。 r_1 、 r_2 、 L 分别表示线圈内半径、外半径和线圈高度。由式(8)可知,在 NI 一定时,线圈在轴线处产生的磁场强度受线圈几何尺寸的影响,可通过对线圈的内径、外径和高度进行优化产生更大的磁场以增大磁致伸缩棒内的磁场强度。

由上述分析可知,在 NI 一定时,可以通过减小导磁回路的磁阻和优化线圈结构参数来提高磁致伸缩棒内的磁场强度,取目标优化函数 f_1 如式(9)所示,式(9)的值越小,磁致伸缩棒内的磁场强度越大。

$$f_1(x) = \min \left\{ \left(-\frac{1}{\mu_r A_l (2R_l + 2R_c)} \right) + \left(-\frac{1}{2(r_2 - r_1)} \ln \left(\frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}} \right) \right) \right\} \quad (9)$$

2) 磁致伸缩棒内磁场分布均匀度

磁致伸缩换能器的核心驱动元件是磁致伸缩棒,材料内部磁场分布直接影响器件的输出。高频激励条件下,磁致伸缩棒的涡流效应显著,内部磁场沿径向分布不均匀程度明显,这会导致器件输出不稳定,使器件的设计分析复杂化^[18]。根据 2.1 节磁路分析可知:当线圈高度略高于磁致伸缩棒,磁轭截面积与磁致伸缩棒的截面积相近时,磁致伸缩棒内的磁感应强度较高且磁通密度分布较均匀。此外尽量减少线圈与磁致伸缩棒之间的气隙,有助于减少漏磁,改善磁致伸缩棒的磁场环境。通过上述分析可得目标优化函数 f_2 如式(10)所示,其值越小,磁致伸缩棒的磁通密度均匀度越高。

$$f_2(x) = \min \{ |L - l_0| + |r_1 - r_0| + |A_1 - A_0| \} \quad (10)$$

3) 高频磁致伸缩换能器损耗

高频下换能器的损耗主要包括铁心损耗和线圈铜耗。根据文献[16]对磁致伸缩材料高频损耗分析,材料铁心损耗主要包括涡流损耗、磁滞损耗和异常损耗,频率一定时,损耗随着体积和截面积的增大而增加。减小截面积可通过涡流截止频率计算确定材料的叠片厚度,进而以堆叠处理的方式来降低铁心损耗。高频损耗还可以通过减小材料体积的方式进行降低,与减小磁阻提高磁场强度有相同的约束公式,在这里不再进行重复约束。线圈的铜耗如式(11)~(12)所示^[16],铜耗与线圈的几何尺寸有关,可以通过合理规划线圈几何尺寸来降低铜耗。并且高频线圈受趋肤效应影响严重,电流主要集中在导线表面,导致线圈电阻增大。多股漆包线通过减小导线线径,可有效减小集肤效应,从而降低线圈损耗。

$$p = \frac{\pi \rho_w r_1 H^2}{4\gamma^2} \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{1}{5} \sqrt{\frac{2\pi\beta}{\alpha^2 - 1}} \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}} \quad (12)$$

式中: ρ_w 为线圈的电导率; γ 为线圈的几何因子。由上述分析可知,可以采用多股漆包线和优化线圈结构来降低线圈铜耗,取目标优化函数 f_3 如式(13)所示,其值越小,线圈的铜耗越小。

$$f_3(x) = \min \left\{ r_1 \left/ \left(\sqrt{\frac{2\pi\beta}{\alpha^2 - 1}} \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}} \right)^2 \right. \right\} \quad (13)$$

3 优化算法及结果分析

高频磁致伸缩换能器设计需综合考虑磁致伸缩棒的磁场环境、器件体积、高频损耗等众多因素,来实现高输出效率和大输出力的设计目标。由式(7)可知,增加磁轭截面积可以降低磁阻以及提高磁致伸缩棒的磁场强度。但当增加磁轭体积时,高频下的磁心损耗也随之增加,可见提高磁致伸缩棒的磁场强度和减小磁致伸缩换能器的磁心损耗相互矛盾。由式(8)可知,当形状因子 α 和 β 越大,空心线圈产生的磁场强度越大,但由式(11)可知,随着 α 和 β 的增大,线圈损耗先增大后减小,所以线圈缠绕方式影响磁致伸缩棒的磁场强度和绕组损耗,且这两个优化目标存在矛盾。通过仿真分析可知,U型双棒磁致伸缩换能器结构下增加线圈高度和在棒的两端添加磁轭可以改善棒内的磁场分布,但会增大磁路中的磁阻,从而降低棒上的磁场强度,可见同时改善棒内的磁场分布和增大磁场强度也存在优化冲突。

针对以上问题,可将磁致伸缩换能器的优化设计转化为带约束条件的多目标优化问题,借助优化智能算法进行求解,在各个优化目标之间进行协调权衡和折衷处理,使各子目标均尽可能达到相对最优,并在众多的解集中筛选得到一组最优解。

3.1 NSGA-II 算法

NSGA-II 算法是当前应用较为广泛的多目标优化算法之一,相比较一般遗传算法,NSGA-II 算法复杂性低、解集的收敛性好、运行速度快。它采取了快速非支配遗传算法,降低了运算的复杂度。引进精英策略,在进化过程中防止优秀种群丢失,采用拥挤度比较算子来保证种群的多样性。

本文基于 NSGA-II 算法,进行了优化算法程序,得到一组多目标优化问题的最终 pareto 前沿解。并根据不同优化目标的偏好程度对 Pareto 最优解集进行了规范化排序。

3.2 磁致伸缩换能器优化模型

通过分析,磁致伸缩换能器的优化问题可转化为带约束的优化模型为:

$$\begin{cases} \min(f_1, f_2, f_3) \\ y_1(x) = x_4 - x_3 \\ y_2(x) = x_5 - x_1 \\ y_3(x) = x_3 - x_2 \\ y_4(x) = x_6 - 2x_4 \end{cases} \quad (14)$$

式中:优化变量 $[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8]$ 分别代表磁致伸缩棒的长度 l_0 、棒的半径 r_0 、线圈内半径 r_1 、线圈外半径 r_2 、线圈高度 L 、磁轭长 l_1 、磁轭宽 b 、磁轭高 c 。约束 $[y_1, y_2, y_3, y_4]$ 代表器件的几何尺寸约束。高频磁致伸缩换能器目标函数的约束条件还要考虑线圈绕组间距离要满足绝缘要求、线圈产生的磁场要保证磁致伸缩工作在线性区以及铁心材料饱和和磁通密度的限制。基于高频磁致伸缩换能器的优化目标和约束条件,对前文粗选确定的 U 型磁轭结构换能器进行多目标优化设计,通过合理设置变量参数范围,筛选一组最优设计方案,各变量约束情况如表 2 所示。

表 2 磁致伸缩换能器变量约束表格

Table 2 Constraint table for variable of the magnetostrictive transducer

参数	数值	mm
磁致伸缩棒长度 l_0	70~100	
线圈长度 L	1~180	
磁轭长度 l_1	0~200	
磁致伸缩棒半径 r_0	10~15	
线圈内半径 r_1	1~60	
线圈外半径 r_2	1~60	
磁轭宽度 b	20~40	
磁轭高度 c	10~40	

3.3 基于 NSGA-II 算法的优化结果

基于 NSGA-II 算法,采用二进制编码参数设置为:迭代次数为 300,交叉概率为 0.6,种群大小为 200,变异概率为 0.02,最优前端个数为 0.3。

基于 NSGA-II 算法,实现程序优化,得到一组多目标优化问题的最终 pareto 前沿解(pareto front)分布示意图,如图 7 所示, f_1 、 f_2 和 f_3 目标值均为越小越优。Pareto 前沿解为非支配解,是根据多参数和优化目标的相互约束筛选出一个相对较优的解的集合。从图 7 中可以看出 3 个优化目标中互相之间存在冲突和制约。根据不同优化目标的偏好程度对 Pareto 最优解集进行规范化排序,在解集中进行筛选从而得到最优结果,规范化方法如式(15)所示。

$$g_j = \sum_{n=1}^{n_{obj}} \frac{f_j(n) - f_{\min}(n)}{f_{\max}(n) - f_{\min}(n)} \cdot \alpha_j \quad (15)$$

式中: g_j 代表第 j 个规范数值; $f_j(n)$ 代表第 j 个解在第 n 个优化目标的解值; $f_{\max}(n)$ 、 $f_{\min}(n)$ 为第 n 个优化目标的最大值和最小值, α_j 代表第 n 个优化目标的权重。

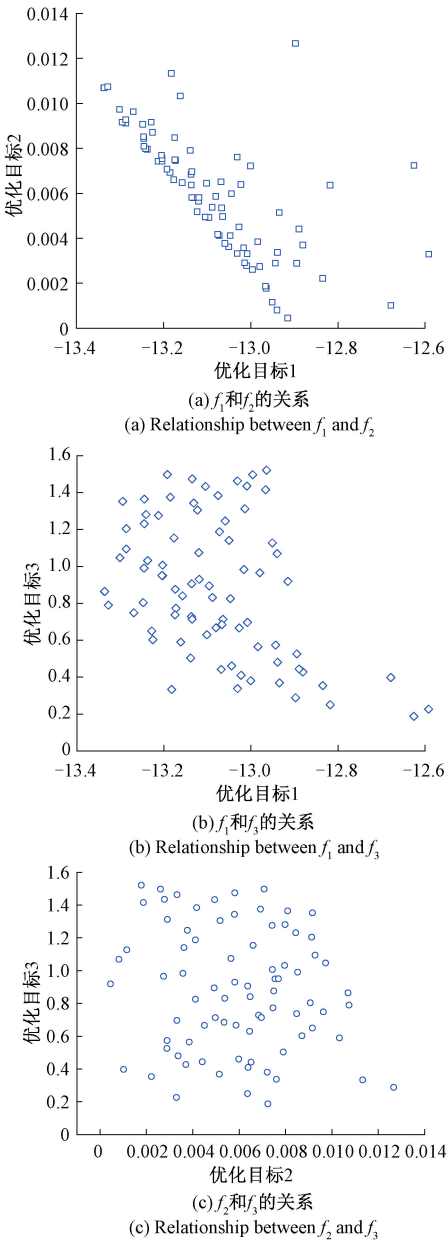


图 7 多目标函数的 Pareto 最优解集

Fig. 7 Pareto optimal solution set of multi-objective function

通过熵权法求得各目标函数的权值,熵权法的基本思路是通过指标变异性的值从而确定各个目标函数的客观权重,根据 3 个优化目标的 Pareto 前沿解集求得一组权重为 0.267 6、0.307 5、0.424 9,以此得到一组满足约束要求的磁致伸缩换能器优化变量结果如表 3 所示。

表 3 磁致伸缩换能器变量优化结果

Table 3 Optimization results of magnetostrictive

transducer variables		mm
参数	数值	
磁致伸缩棒长度 l_0	80.154	
线圈长度 L	105.915	
磁轭长度 l_1	112.514	
磁致伸缩棒半径 r_0	12.156	
线圈内半径 r_1	15.012	
线圈外半径 r_2	37.596	
磁轭宽度 b	25.562	
磁轭高度 c	18.343	

4 优化结果分析与验证

4.1 有限元仿真验证

基于磁致伸缩换能器的优化变量结果,在忽略外壳、尾座和输出杆等对磁场影响较小部件的基础上,建立仿真模型,利用有限元仿真软件对磁致伸缩换能器的优化变量结果进行内部磁场分析,其他模型参数如表 1 所示。图 8 为激励频率 9 kHz 时的磁致伸缩换能器优化的磁场分析图,图 8(a)为换能器中磁路的磁感应强度分布图,流线为磁力线,从图 8(a)中可以看出优化后的磁感应强度分布更加均匀,绝大部分磁力线都流入磁路元件内部,漏磁较少。图 8(b)为磁致伸缩棒内部径向磁感应强度分布图,由图 8(b)可见磁致伸缩棒中的磁通密度较为均匀,径向磁感应强度分布范围为 0.40~0.49 T,两者相差较小,均匀度达到 81.6%,有效降低了高频下磁心中的涡流损耗。与图 4 中未优化前的 U 型结构相比,优化后磁致伸缩棒内磁通密度分布均匀度提高了 14.9% 左右,磁感应强度均值提高了 0.10 T 左右。根据仿真计算结果可见多目标遗传算法得到的优化结构可以有效考虑多个参数间的矛盾与折衷关系,具有磁场分布均匀、棒内磁场强度大、磁路漏磁少、线圈激磁效率高、磁损耗小的优点。

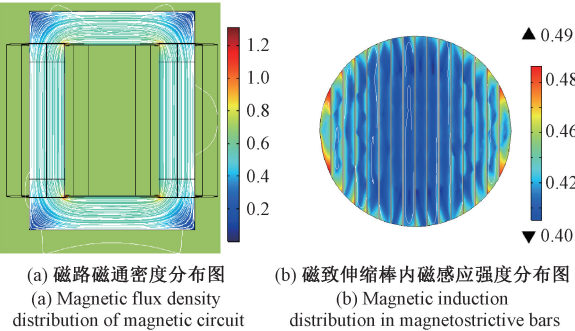


图 8 优化结果的仿真分析

Fig. 8 Simulation analysis of optimization results

4.2 实验验证

根据以上优化结果研制了一台高频双棒磁致伸缩换能器样机进行测试。样机及输出测试系统如图 9 所示,实验平台主要包括换能器、电源箱、温控系统以及输出采集装置。换能器在高频工作条件下,发热量大,温升高,需要配置温控系统实现循环冷却。冷却液选用二甲硅油,它的优点有耐热性强、电绝缘性高、黏温系数低和冷却效果优越。当对换能器进行测试时,先启动循环油冷却系统,硅油通过冷却入口流入器件腔体内,使得线圈和铁心材料浸没在其中,通过硅油的循环流动,在换能器腔体内强制对流传热,从而带走热量实现冷却循环。换能器的输出位移通过激光传感器(LK-h008,基恩士)和信号采集装置得到。

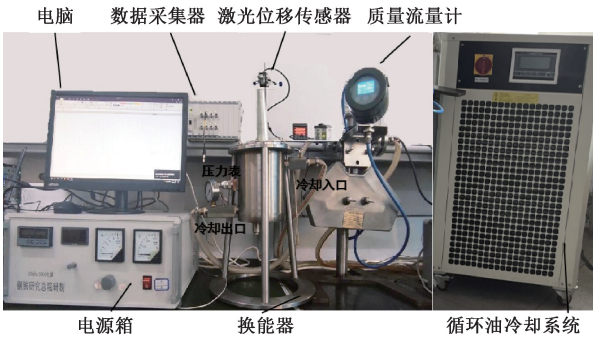


图 9 换能器输出测试系统

Fig. 9 Transducer output test system

偏置电流有效值设置为 8 A,初始冷却系统温度和流速设置为 15℃ 和 0.5 m/s,本节分析输出位移与激励电流大小和频率的关系。换能器工作在谐振频率时,具有最大的输出位移,在 1 Hz~20 kHz 范围内测得换能器输出位移响应最好的频率段为 6.8~9.4 kHz,图 10 所示为该频段下不同激励电流下换能器的输出位移幅值。通过实验数据可得在 1 和 2 A 的激励电流条件下换能器输出振幅变化趋势一致,在频率为 8.2 kHz 时达到谐振峰,不同激励电流下,谐振频率基本不变。激励电流为 1 A 时,输出位移幅值达到 10 μm,激励电流为 2 A 时,输出位移幅值达到 21 μm。

图 11 是换能器在激励电流有效值为 2 A 和激励电流频率为 8.2 kHz 下的实时位移输出曲线。从图 11 中可以看出换能器的位移输出波形基本呈正弦变化,畸变较小,波形较好,输出位移峰值为 21 μm。实现了基于材料应变特性设计优化指标的最优值(0~20 μm),充分挖掘了 Galfenol 合金的应变输出特性及磁致伸缩性能的高利用率。通过实验验证了经多目标优化后的双棒结构换能器在高频下实现较大的输出位移,且输出特性稳定。

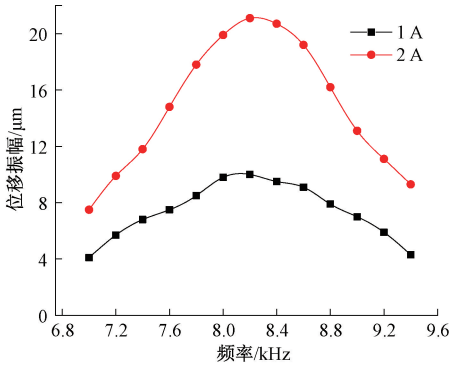


图 10 不同激励电流与频率条件下的换能器位移幅值
Fig. 10 Displacement amplitude of the transducer under different excitation current and frequency conditions

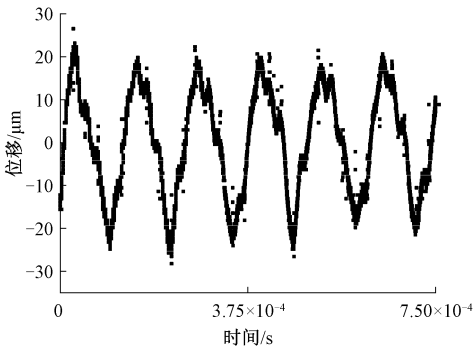


图 11 8.2 kHz 频率时换能器的位移
Fig. 11 Transducer displacement at 8.2 kHz frequency

5 结 论

本文基于非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 对高频激励下双棒驱动的磁致伸缩换能器提出了一个整体结构的优化设计方法。该方法首先根据设计指标通过粗算确定磁路结构和主要结构参数的变化范围。然后以提高磁致伸缩棒内的磁场强度、改善棒内磁场分布均匀度和减少换能器高频损耗为具体优化目标,得到满足约束条件的 Pareto 前沿解,并引入规范化排序和熵权法对该优化方法前沿解进行决策支持。COMSOL Multiphysic 有限元数值计算结果和实验样机测试结果分别验证了该优化方法的可行性。该优化设计模型解决了磁致伸缩换能器单参数变量优化或单目标优化设计方法无法兼顾多目标优化问题,并且具体优化目标数量和可变参数的数量均可以增加以将该优化方法进行推广,本研究对高频磁致伸缩换能器的输出性能提高和广泛应用具有指导意义。

参考文献

[1] 陈静雯,张洪,张森华,等. 基于逆磁致伸缩的无励磁钢绞线应力量测研究 [J]. 仪器仪表学报, 2019,

40(10):10-18.
CHEN J W, ZHANG H, ZHANG S H, et al. Research on inverse magnetostrictive based unexcited steel strand stress measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(10): 10-18.
[2] CARMINE S C, STEFANO C C, DAVINO D, et al. Magnetostrictive materials and energy harvesting for structural health monitoring applications [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 949(1): 012012.
[3] APICELLA V, CLEMENTE C S, DAVINO D, et al. Review of modeling and control of magnetostrictive actuators [J]. Materials Science and Materials Engineering, 2019, 8(2): 45.
[4] 薛丰,王博文,赵智忠,等. 磁致伸缩触觉传感器的传感模型与特性 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 103-110.
XUE F, WANG B W, ZHAO ZH ZH, et al. Sensing model and characteristics of magnetostrictive tactile sensors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 103-110.
[5] 黄子军,卞雷祥,李辉,等. 高 Q 值超低功耗谐振式磁传感器的设计与实现 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(5): 1-7.
HUANG Z J, BIAN L X, LI H, et al. Design and implementation of a high-Q ultra-low-power resonant magnetic sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(5): 1-7.
[6] 赵能桐,杨鑫,陈钰凯,等. 考虑超磁致伸缩材料非均匀性的大功率电声换能器阻抗特性 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(10): 1999-2006.
ZHAO N T, YANG X, CHEN Y K, et al. Impedance characteristics of high-power electroacoustic transducers considering non-uniformity of super magnetostrictive materials [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(10): 1999-2006.
[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, FAN W T, et al. Structural analysis and output force characteristics of super magnetostrictive actuators [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1198-1206.
[8] 翁玲,常振,孙英,等. 不同磁致伸缩材料的高频磁能损耗分析与实验研究 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(10): 2079-2087.
WENG L, CHANG ZH, SUN Y, et al. Analysis and experimental study of high frequency magnetic energy loss

- of different magnetostrictive materials[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (10): 2079-2087.
- [9] LI P Y, LIU Q, ZHOU X, et al. Effect of terfenol-D rod structure on vibration performance of giant magnetostrictive ultrasonic transducer [J]. Journal of Vibration & Control, 2021, 27(2):573-581.
- [10] LI Y F, HUANG W M, WANG B W, et al. High-frequency output characteristics of giant magnetostrictive transducer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(6): 8202305.
- [11] 王安明,孟建军,胥如迅,等. 超磁致伸缩激振器的结构优化及动态性能研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(17):184-190.
WANG AN M, MENG J J, XU R X, et al. Structural optimization and dynamic performance study of a super magnetostrictive exciter[J]. Vibration and Shock, 2019, 38(17): 184-190.
- [12] 赵章荣,邬义杰,顾新建,等. 基于遗传算法的超磁致伸缩执行器优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(1):13-17.
ZHAO ZH R, WU Y J, GU X J, et al. Optimization of super magnetostrictive actuators based on genetic algorithm [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2009, 43(1):13-17.
- [13] 曹小鹏,陈武,宁光富,等. 基于多目标遗传算法的大功率高频变压器优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1348-1355.
CAO X P, CHEN W, NING G F, et al. Optimal design of high-power high-frequency transformers based on multi-objective genetic algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1348-1355.
- [14] 翁玲,梁淑智,王博文,等. 考虑预应力的双励磁线圈铁镓换能器输出特性[J]. 电工技术学报, 2019, 34(23): 4859-4869.
WENG L, LIANG SH ZH, WANG B W, et al. Output characteristics of double-excitation coil ferrogallium transducer considering prestress [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34 (23): 4859-4869.
- [15] 李琳,陈亮良,杨勇. 超磁致伸缩作动器的结构分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39 (9): 1269-1274.
LI L, CHEN L L, YANG Y. Structural analysis of super magnetostrictive actuators [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(9): 1269-1274.
- [16] 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 properties and loss characteristics of TbDyFe alloy [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1): 215-222.
- [17] ANGARA R. High frequency high amplitude magnetic field driving system for magnetostrictive actuators [D]. Baltimore: University of Maryland, Baltimore County, 2009.
- [18] FANG S, ZHANG Q, ZHAO H, et al. The design of rare-earth giant magnetostrictive ultrasonic transducer and experimental study on its application of ultrasonic surface strengthening [J]. Micromachines, 2018, 9 (3): 98-113.

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 a Ph. D. advisor at Hebei University of Technology. Her main research interests include intelligent materials and devices, electric motor and electric apparatus and their control.



郭万里,2018 年于河北工业大学城市学院获得学士学位,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: 956041501@qq.com

Guo Wanli received his B. Sc. degree from

Hebei University of Technology City College in 2018. He is currently a master student at Hebei University of Technology. His research interests include intelligent materials and devices.