

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.04.010

一种磁流变弹性体执行器的联合优化方法研究

韩超¹, 邵骁麟¹, 刘天彦¹, 林松¹, 张鲲¹, 罗磊²

(1. 中国核动力研究设计院, 成都 610200; 2. 重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

摘要: 磁流变弹性体 (magnetorheological elastomer, MRE) 执行器作为智能减振应用系统的核心元件, 其结构的优化是决定执行器性能上限及系统控制成效的关键。针对目前 MRE 执行器优化方法及理论研究欠缺的问题, 文中面向一款横向隔振的 MRE 执行器, 基于其机械结构和有效磁路, 以优越磁控性能、低功耗和快速响应时间为优化目标, 提出了一种新的 MRE 执行器联合参数优化方法。首先, 基于 MATLAB 和 COMSOL 的联合仿真, 将遗传优化算法和电磁有限元分析方法进行有效结合, 实现对 MRE 执行器的优化编程; 其次, 完成对器件的全局尺寸结构优化设计, 使得器件具备优越磁控性能 (526.21 mT)、低功耗 (44.05 W) 及快速响应 (5.43 ms); 最后, 通过搭建测试系统对优化后装配的 MRE 执行器进行测试和评估, 验证了文中优化方法的可行性和有效性。提出的联合优化方法不仅适用于 MRE 执行器结构, 还可为多领域减/隔振应用的共性 MRE 器件优化设计提供理论参考。

关键词: 磁流变弹性体; 执行器; 联合优化; 遗传算法; 电磁有限元法

中图分类号: U448.213

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)04-097-11

A joint optimization method for magnetorheological elastomer actuator

HAN Chao¹, SHAO Xiaolin¹, LIU Tianyan¹, LIN Song¹, ZHANG Kun¹, LUO Lei²

(1. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610200, P. R. China; 2. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Magnetorheological elastomer (MRE) actuator is the core component of smart vibration isolation application system, and its structure optimization is the key to determining the upper limit of actuator's performance and the effectiveness of system's control. However, there have been few optimization methods and theoretical research on MRE actuators. In this paper, a new joint parameter optimization method of an MRE actuator is proposed based on its mechanical structure and effective magnetic circuit, with the optimization goals of superior magnetic-control performance, low power consumption and fast response time. Firstly, with the effective combination of genetic optimization algorithm and electromagnetic finite element analysis method, the optimization programming of MRE actuator is completed based on the joint simulation of MATLAB and COMSOL. Secondly, the optimization design of global size structure of the actuator is realized with the

收稿日期: 2022-08-03

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (12004058); 重庆市博士后科学基金项目 (cstc2020jcyj-bshX0044)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (12004058), and Chongqing Postdoctoral Science Foundation (cstc2020jcyj-bshX0044).

作者简介: 韩超 (1991—), 男, 助理研究员, 主要从事振动与噪声控制技术研究, (E-mail) hanchaonpic@163.com。

通信作者: 罗磊, 男, 硕士生导师, (E-mail) llei@cqu.edu.cn。

advantages of superior magnetic-control performance (526.21 mT), low power consumption (44.05 W) and fast response (5.43 ms). Lastly, the MRE actuator assembled after optimization is tested by a test system, verifying the feasibility and effectiveness of the proposed optimization method. The proposed joint optimization method is not only suitable for the structure of MRE actuator in this paper, but also can provide theoretical reference for the optimization design of common MRE devices in multi-field vibration reduction/isolation applications.

Keywords: magnetorheological elastomer; actuator; joint optimization; genetic algorithm; electromagnetic finite element method

磁流变弹性体(magnetorheological elastomer, MRE)由微米级铁磁性颗粒分散于高分子聚合物中复合而成,其流变学性能可通过外加磁场快速、可逆调节^[1-3]。作为智能元件,MRE已在多个领域广泛应用。尤其是在半主动减/隔振应用领域,MRE执行器克服了传统被动器件结构参数(刚度、阻尼)固定、减/隔振频带窄的缺点,实现了实时追踪/远离外界激励频率的目的,具有减/隔振频带宽、效果突出的优点。若要最大化地发挥MRE的高性能,完成器件系统的可靠控制应用,实现MRE执行器的有效设计及优化是根本保障。目前,国内外已在不同形式的MRE执行器设计上进行了大量研究,主要包括:1)通过在目标振动对象上附加一个振子结构来实现将振动能量转移的MRE吸振/消振器^[4-10];2)通过在振源和目标振动对象之间增设隔振装置来实现振动隔离的MRE隔振/阻振器^[11-22]。这些研究在MRE执行器的设计开发上取得了重大进展,证明了MRE智能吸/隔振技术在工程应用领域的可行性价值。然而,纵观上述关于MRE执行器开发的研究,主要集中于器件结构形式设计与磁路分析,即结构设计主要依靠设计者经验进行,基本遵循“设计”到“加工”,或“初步设计”到“分析”,再到“校核”至“改进设计”,最终到“加工”的流程。在MRE执行器设计上着重于被动的人工试凑和分析比较,需进行多次重复计算、校验和改进,不仅大大增加了人力投入,还未能实现MRE执行器综合性能的精细化和最优化。此外,现有研究在MRE执行器设计时仅考虑了器件的磁控特性,甚至一味地追求高磁控可调范围,而忽视了其高功耗和长响应时间带来的负面影响。因此,为进一步满足MRE执行器在智能减振应用中的需求,研究一种新的、考虑多目标(如磁控范围、功耗、响应时间等)全局优化的联合参数优化方法尤为重要。

基于此,文中面向一款横向隔振的MRE执行器,提出一种基于遗传算法和有限元法联合的优化设计方法,以高磁控可调范围、低功耗及快速响应为目标,实现对MRE执行器的结构尺寸和性能全局优化设计。最后,对优化后MRE执行器的零件制造、整体装配和优化结果进行测试及验证。为磁流变执行器的设计和优化提供理论参考。

1 待优化的MRE执行器

1.1 整体结构

文中待优化的对象为一款面向横向振动抑制的MRE执行器,其结构如图1所示。该结构由上下连接板(用于连接基础和隔振对象)、上封板、外套筒、线圈骨架、电磁线圈、叠层MRE、叠层钢片、下盖板构成。器件中的闭合磁路由电磁线圈实现,其中,下盖板、外套筒、压缩间隙、叠层MRE-钢片及上封板构成闭合磁路,如图1(b)中红线虚线和箭头所示。由于MRE为执行器结构的弹性元件,其尺寸大小直接决定着器件的承载能力、水平刚度性能等,需根据目标对象进行针对性设计,待优化的MRE执行器中MRE大小已根据对象确定,直径为30 mm、厚度为1 mm、层数为10层。其中,钢片设计交替嵌于叠层MRE之间,层数为9层。由于文中目标是MRE执行器的优化设计,前期叠层MRE-钢片的基础设计和参数确定就不赘述。因此,目标是基于已确定的叠层MRE-钢片单元,对设计结构进行尺寸参数和综合性能的优化。

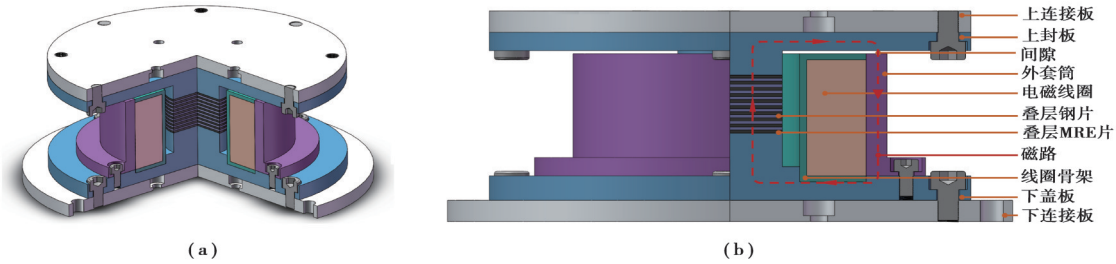


图 1 横向 MRE 执行器

Fig. 1 Horizontal MRE actuator

1.2 基本磁路分析

待优化的 MRE 执行器属于中心轴对称结构,其磁路可简化如图 2(a)所示的结构,采用等效磁路法,该磁路可等效为图 2(b)所示的串联结构。从图中看出,该结构为非均匀磁路,结构磁阻主要来自于下盖板 (R_{m-1})、叠层 MRE 区 (R_{m-2})、叠层钢片区 (R_{m-3})、上封板 (R_{m-4})、压缩间隙区 (R_{m-5}) 及外套筒 (R_{m-6}),则 MRE 执行器的总磁阻为

$$R_m = \sum_{i=1}^6 R_{m-i} = \sum_{i=1}^6 \frac{l_i}{\mu_0 \mu_i S_i}, \quad (1)$$

式中: R_{m-i} 为第 i 段磁路的磁阻; l_i 为第 i 段磁路中心线的长度; μ_0 为绝对磁导率,且 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m; μ_i 为第 i 段磁路材料的相对磁导率; S_i 为第 i 段磁路的横截面积。

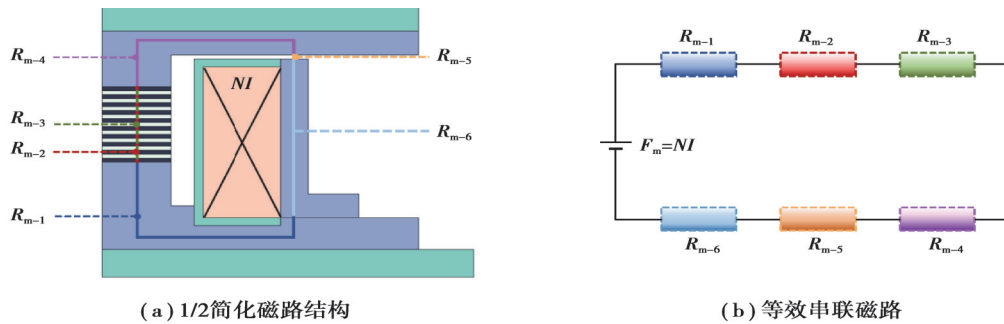


图 2 MRE 执行器的简化磁路图

Fig. 2 The simplified magnetic circuit of MRE actuator

由磁路的欧姆定律可知,MRE 执行器闭合磁路中的磁通等于作用在该磁路上的磁动势除以磁路的磁阻,表示为

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m} = \frac{NI}{R_m}, \quad (2)$$

式中: F_m 为磁路的磁动势; N 为 MRE 执行器中的电磁线圈匝数; I 为 MRE 执行器中的线圈电流。

此外,由磁路基尔霍夫第一定律可知,进入任一封闭面的磁通量恒等于穿出该封闭面的磁通量^[23],即 $\sum \Phi = 0$ 。对于图 2(b)中的串联磁路,穿过每段磁路的磁通是相等的,即:

$$\Phi = B_1 S_1 = \dots = B_i S_i = \dots = B_6 S_6, \quad (3)$$

式中, B_i 表示第 i 段磁路的磁感应强度。

由式(1)~式(3)可以推出 MRE 执行器中各段磁路的磁感应强度为

$$B_i = \frac{F_m}{R_m S_i} = \frac{NI}{R_m S_i} = \frac{NI}{S_i \sum_{i=1}^6 \frac{l_i}{\mu_0 \mu_i S_i}}. \quad (4)$$

需要特别说明的是,MRE 执行器磁路中的部分材料的磁导率是与磁通密度有关的非线性参数,即该材

料所在磁路段的磁导率为非常数,因此,磁阻也非常数。执行器的磁路计算公式(4)不能用于精确定量计算,只用作粗略计算或定性分析,文中仅将其用于后续优化目标的响应时间计算中,具体磁路计算和分析采用电磁有限元法在COMSOL中实现。

2 优化目标分析

2.1 优越磁控可调范围

MRE执行器的磁控性能,是指在振动激励作用下,执行器具有一定的性能可控区间。可控区间越宽,执行器的力学性能(刚度、阻尼等)可调范围越广,表明具有优越的磁控性能。要求MRE执行器具有优越的磁控性能,主要是为了针对不同的振动激励和工况环境,触发器件磁场自适应调节机制,改变器件的性能参数,可以实时调节器件的固有频率,使得减振对象远离振动激励频带。

MRE执行器的磁控性能与MRE的磁致效应密切相关。叠层MRE处的磁场变化范围越大,MRE的磁致效应越高,则MRE执行器的磁控性能越好。因此,MRE执行器的优越磁控性能是基于叠层MRE处的高磁感应强度变化区间上的结果。针对一个确定的磁路,如图2所示,由MRE执行器的磁路分析可知叠层MRE处的磁感应强度可以量化为

$$B_{\text{MRE}} = \frac{NI}{S_{\text{MRE}}R_{\text{m}}}, \quad (5)$$

式中: N 为线圈匝数; I 为线圈加载电流; R_{m} 为磁路总磁阻; S_{MRE} 为MRE的横截面积。

从式(5)可以看出,在确定的电流激励下,若要拓宽MRE处的磁感应强度可调范围,可通过优化执行器中的线圈和磁路结构来实现。此外,在1.2节中已经分析过磁路计算公式不能用于精确定量计算,只用作粗略计算或定性分析。基于此,为了弥补量化计算的不足,后续将采用有限元分析法对MRE执行器进行电磁仿真,获取器件中叠层MRE处的平均磁感应强度。因此,第一个优化目标是通过优化MRE执行器线圈和磁路结构实现叠层MRE处磁感应强度的最大化,优化子目标函数可表示为 $f_1(x) = \max(B_{\text{MRE}})$ 。

2.2 低功耗

施加激励电流后,由于MRE执行器中线圈电阻的存在,器件势必会产生发热现象,出现功耗问题。高功耗会改变MRE材料的性能,给MRE减振系统控制带来困难,甚至是不期望的实验结果^[24]。因此,在设计MRE执行器时,期望器件具有较低的功耗。

从式(5)可以看出,对于确定的磁路,通过增大线圈匝数 N 或者激励电流 I 可提高MRE区域的磁感应强度。然而,根据线圈电阻的定义,在线圈线径选定的情况及在限定激励电流作用下,提高线圈匝数 N 不仅会使器件体积和重量增大,还会使线圈长度增大,增大器件电阻。

$$R_{\text{c}} = \frac{\rho l}{A_{\text{c}}}, \quad (6)$$

式中: ρ 为线圈材料的电阻率; l 为线圈长度,由线圈骨架内径及外径决定; A_{c} 为线圈的横截面积,其中线圈线径选用0.8 mm。

线圈的功耗(发热功率)定义为 $P_{\text{c}} = I^2 R_{\text{c}}$,可以看出,无论增大线圈匝数 N ,或增大线圈电流 I ,皆会使器件线圈的功耗增大,造成线圈内部温度升高。线圈的电阻率也会随温度的升高而增大,造成线圈电阻的增大,导致线圈功耗进一步增大。考虑到后续控制中电流驱动器驱动电流的负载上限,文中MRE执行器设计的最大电流为3 A。第2个优化目标是通过优化MRE执行器线圈结构实现器件功耗的最小化,优化子目标函数可表示为 $f_2(x) = \min(P_{\text{c}})$ 。

2.3 快速响应

在器件响应时间的优化设计中,仅考虑电流响应时间的优化。较长的电流响应时间会增加控制系统的控制延时,降低控制精度或效果。因此,降低MRE执行器的电流响应时间有利于提升减振系统的控制效果。

MRE执行器的电路也可以简化为1个等效电感 L_{c} 与等效电阻 R_{c} 的串联结构。当对MRE执行器的线圈施加1个瞬态阶跃电流激励后,由于器件中线圈电感对电流变化具有抑制作用,器件的电流不能及时响应,会有一定延时。设器件响应遵循单指数函数,其电流响应时间常数为 $\tau_{\text{c}} = L_{\text{c}}/R_{\text{c}}$,即电流上升或下降至变化值

63.2%需要的时间。其中,等效电阻 R_c 可由式(6)计算得到,等效电感 L_c 为

$$L_c = \frac{N\Phi}{I}, \tag{7}$$

将式(2)带入上式,可得:

$$L_c = \frac{N\Phi}{I} = \frac{N^2}{R_m}。 \tag{8}$$

此外,由 1.2 节 MRE 执行器磁路分析可知器件的总磁阻 R_m 。由于 MRE 的相对磁导率远小于执行器磁回路中的其他导磁零件。从图 2 可知,叠层 MRE 处的磁阻(R_{m-2})将远大于下盖板(R_{m-1})、叠层钢片区(R_{m-3})、上封板(R_{m-4})及外套筒(R_{m-6})的磁阻,即相对于 R_{m-2} ,磁阻 R_{m-1} 、 R_{m-3} 、 R_{m-4} 及 R_{m-6} 可以忽略不计。但考虑磁回路中压缩空气间隙区的磁阻(R_{m-5})及实际加工后器件安装存在的安装间隙、漏磁等现象,为简化计算,MRE 执行器的总磁阻设定为叠层 MRE 处磁阻的 3 倍,即:

$$R_m = \sum_{i=1}^6 R_{m-i} \approx 3R_{m-2}, \tag{9}$$

则 MRE 执行器的等效电感为

$$L_c = \frac{N\Phi}{I} = \frac{N^2}{3R_{m-2}}, \tag{10}$$

因此,MRE 执行器的电流响应时间常数为

$$\tau_c = \frac{L_c}{R_c} = \frac{N^2}{3R_c R_{m-2}} = \frac{N^2}{3R_c R_{m-MRE}}。 \tag{11}$$

可以看出,MRE 执行器的电流响应时间也与执行器的线圈及磁路结构紧密相关。因此,器件第 3 个优化目标是通过优化 MRE 执行器线圈及磁路结构实现电流响应时间的最小化,优化子目标函数可表示为 $f_3(x) = \min(\tau_c)$ 。

3 联合优化方法

3.1 优化问题描述

MRE 执行器待优化的二维尺寸结构、优化工具及算法如图 3 所示,相关参数(确定变量和待优化变量)同样在图中已示出。文中以高磁控可调范围、低功耗及快速响应为优化目标,MRE 执行器优化问题描述如下。

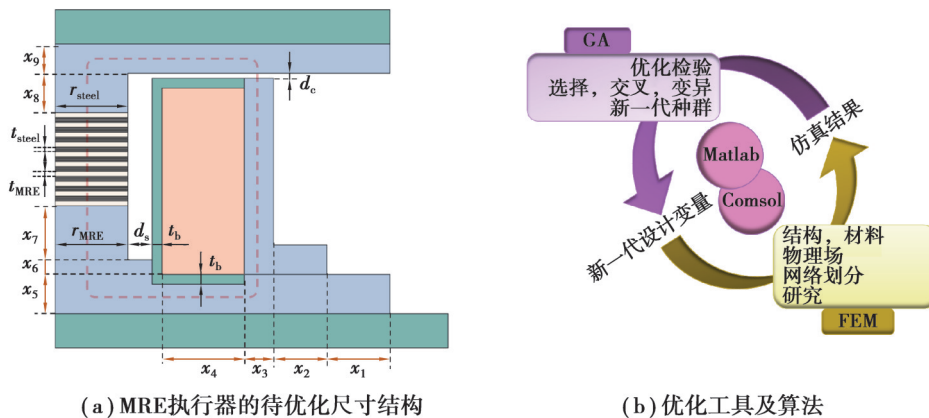


图 3 优化问题示意图

Fig. 3 Optimization problems

3.1.1 变量

MRE 执行器中待优化的尺寸参数为: $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9]$ 。

3.1.2 常量

叠层 MRE-钢片结构的厚度和直径为: $t_{\text{MRE}} = t_{\text{steel}} = 1 \text{ mm}$, $r_{\text{MRE}} = r_{\text{steel}} = 30 \text{ mm}$ 。

线圈骨架厚度为: $t_b = 2 \text{ mm}$ 。

剪切和压缩位移为: $d_s = 5 \text{ mm}$, $d_c = 1 \text{ mm}$ 。

3.1.3 约束条件

优化参数的上下限约束设定如下:

尺寸最小限定值: $x_{\text{lb}} = [12 \ 7 \ 3 \ 10 \ 3 \ 0.01 \ 3 \ 3 \ 3]$ 。

尺寸最大限定值: $x_{\text{ub}} = [15 \ 10 \ 10 \ 20 \ 12 \ 4 \ 15 \ 15 \ 12]$ 。

此外, MRE 执行器的最大电流激励限定为: $I_{\text{max}} \leq 3 \text{ A}$ 。

3.1.4 优化目标函数

文中优化目标为 MRE 执行器的高磁控可调范围、低功耗及快速响应, 优化问题为多目标优化问题, 可描述为

$$\begin{cases} F(x) = [f_1(x) \ f_2(x) \ f_3(x)], \\ f_1(x) = \max(B_{\text{MRE}}), \\ f_2(x) = \min(P_c), \\ f_3(x) = \min(\tau_c), \\ \text{Subject to } x \in R^m, \end{cases} \quad (12)$$

式中: R^m 是变量的约束集; $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 及 $f_3(x)$ 分别对应磁控可调范围 B_{MRE} 、功耗 P 及响应时间 τ_c 的目标函数。

理论上, 若有解使得所有子目标函数都达到最优, 则该解是最优理想解。但实际上, 一般子目标间是相互冲突的, 例如, 提升 MRE 执行器的磁控性能, 会导致功耗的增大及响应时间的延长, 实际应用中一般不存在最优理想解。为了突出优化目标中子目标函数的重要程度, 针对该多目标问题, 引入权重的概念, 给每个子目标函数 $f_i(x)$ ($i=1,2,3$) 赋予权重系数 ω_i ($i=1,2,3$), 且满足 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$, 权重系数 ω_i 反映了相应的子目标函数 $f_i(x)$ 在多目标优化问题中的重要程度。引入权重系数后, 上述优化目标函数表示为

$$\begin{cases} F(x) = \sum_{i=1}^3 \omega_i \cdot f_i(x), \\ \text{Subject to } x \in R^m. \end{cases} \quad (13)$$

由于磁控性能是 MRE 执行器的智能体现, 分配给优越磁控性能子目标函数最高权重。另外, 小的响应时间可以更有效地提高智能隔震系统的控制精度和效果, 分配给快速响应时间子目标函数次高权重。综合考虑, 分配给 3 个优化子目标函数: 优越磁控性能、低功耗和快速响应时间的权重系数分别为 $\omega_1 = 0.5$, $\omega_2 = 0.2$ 和 $\omega_3 = 0.3$ 。权重系数的引入不仅让 MRE 执行器的优化有了侧重点, 同时, 将 MRE 执行器的多目标优化问题转换成了单目标优化问题, 将优化子目标函数代入式(13), 总的优化目标函数具体表示为

$$\min F(x): \begin{cases} F(x) = -m_1 \omega_1 \frac{B_{\text{MRE}}(x) - B_0}{B_0} + m_2 \omega_2 \frac{P_c(x) - P_0}{P_0} + m_3 \omega_3 \frac{\tau_c(x) - \tau_0}{\tau_0} \\ \text{Subject to } x \in R^m \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\min F(x)$ 表示优化目标函数极小化。另外, B_0, P_0, τ_0 为一组优化目标的对比参照值, 分别设置为 $B_0 = 550 \text{ mT}$, $P_0 = 50 \text{ W}$, $\tau_0 = 10 \text{ ms}$ 。 m_1, m_2, m_3 为一组二值常数, 由式(15)计算获得:

$$m_1 = \begin{cases} 0, & B_{\text{MRE}}(x) > B_0 \\ 1, & B_{\text{MRE}}(x) \leq B_0 \end{cases} \quad m_2 = \begin{cases} 0, & P_c(x) < P_0 \\ 1, & P_c(x) \geq P_0 \end{cases} \quad m_3 = \begin{cases} 0, & \tau_c(x) < \tau_0 \\ 1, & \tau_c(x) \geq \tau_0 \end{cases} \quad (15)$$

3.2 基于遗传算法和有限元法的联合仿真及优化

3.2.1 优化工具及算法

遗传算法是目前广泛应用的智能优化算法, 具有强大的全局搜索能力, 可以高效、快速、精确地解决大多数的工程优化问题, 文中采用遗传算法作为 MRE 执行器结构的优化算法。采用有限元法能更精确地获取执

行器中MRE处的磁感应强度,提出采用遗传算法和有限元法的联合方法对MRE执行器进行优化,对应算法分别选用MATLAB和COMSOL软件实现。其中,由于COMSOL是从MATLAB的工具箱发展而来,与MATLAB有完整兼容的对接接口,通过LiveLink for MATLAB模块即可实现二者联合,联合后对MRE执行器的优化程序通过在MATLAB的脚本环境中编程实现。MRE执行器优化工具及算法如图3(b)所示。

3.2.2 优化流程

MRE执行器的优化流程如图4所示,其中,遗传算法的种群大小设置为20,遗传代数设置为50。首先,在MATLAB脚本环境中编写程序,由遗传算法产生1组在约束条件下的随机尺寸变量 $x=[x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8 x_9]$,为了方便后续器件加工,对产生的随机值进行四舍五入取整。其次,通过LiveLink for MATLAB模块由MATLAB调用COMSOL,并将尺寸变量值传递到COMSOL中,建立MRE执行器的二维轴对称磁路模型,再通过材料分配、激励和边界条件设定、网格划分和研究获取叠层MRE处的平均磁感应强度。最后,计算MRE执行器的功耗 $P_c(x)$ 、电流响应时间 $\tau_c(x)$,联合MRE处平均磁感应强度 $B_{MRE}(x)$ 一起追踪种群的最佳适应度值。期间,MATLAB会实时更新尺寸变量信息并再次调用COMSOL,直到迭代结束,优化程序停止,得到最优解。

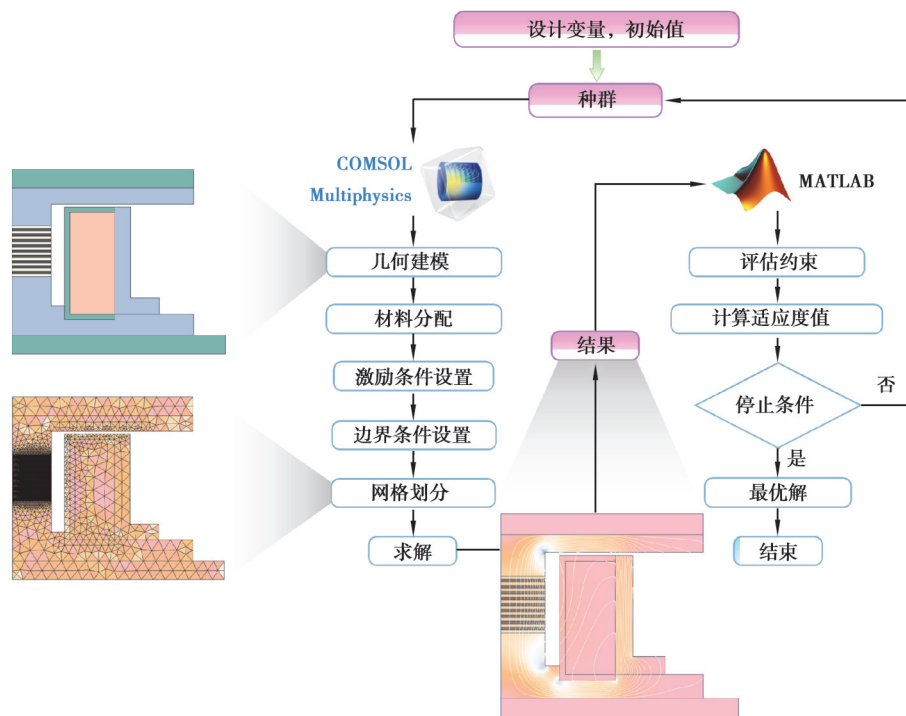


图4 优化流程图

Fig. 4 Optimization flow chart

3.2.3 优化结果及分析

MRE执行器结构的优化结果如图5所示。从图5(a)中可以看到,寻优进程中每一代群体的最佳个体适应度值很快达到最优收敛值,平均适应度值在31代后达到最佳收敛,即在31代后种群中所有个体均达到最优值。MRE执行器的尺寸优化结果如图5(b)所示,尺寸参数具体数值及优化后功耗、叠层MRE处平均磁感应强度及电流响应时间常数如表1所示。在3A激励电流下,优化后MRE执行器磁感应强度的二维分布如图5(c)所示。可以看到,磁力线和磁矢量(白色线条和红色箭头)沿着设计磁路路径穿越,均匀有效地穿过叠层MRE区域。图5(d)为MRE执行器磁感应强度的三维分布图,该结果进一步证明了优化设计后磁路的有效性。图5(e)为在0-3A扫描电流下,叠层MRE区域的平均磁感应强度随电流变化的曲线,可以看出,磁感应强度随电流增大而增大,呈近似线性关系,有利于实现MRE执行器的电磁转换,进一步实现MRE减振系统的宽频控制。

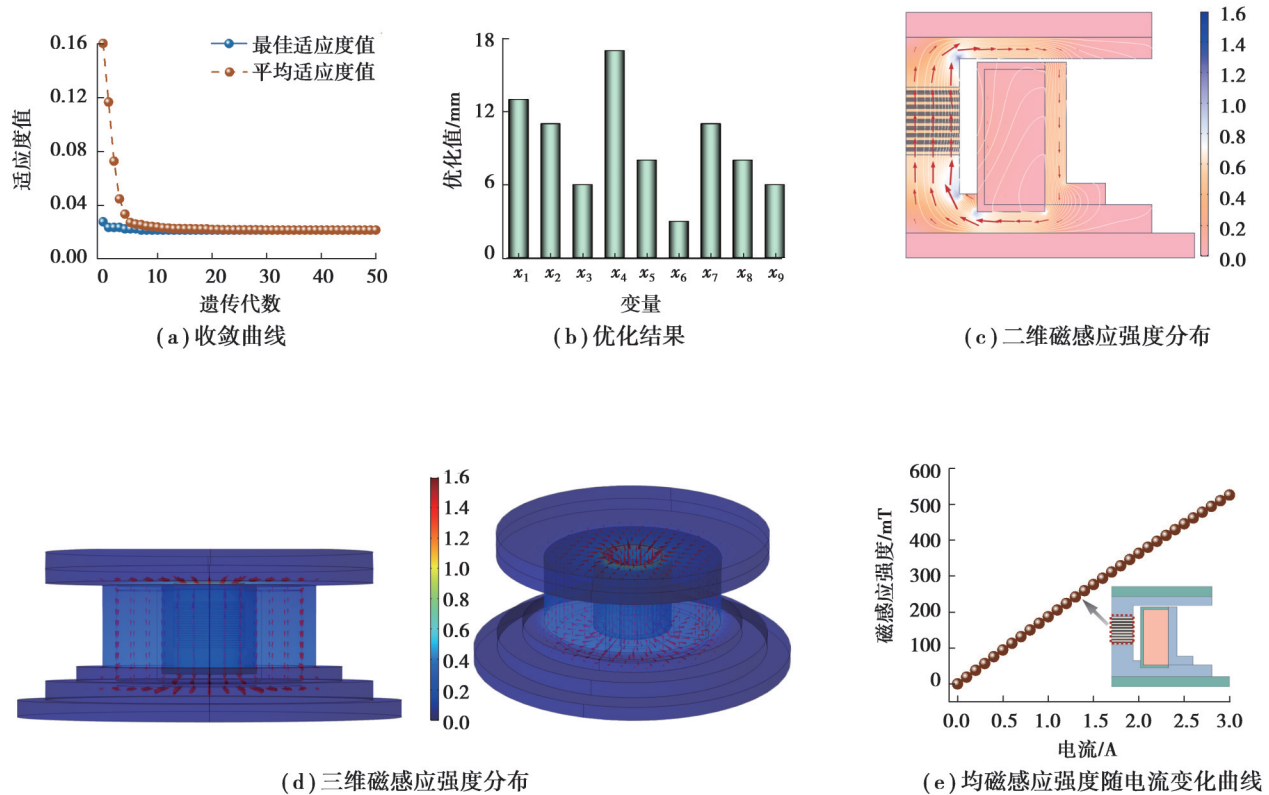


图5 优化结果

Fig. 5 Optimization results

表1 MRE执行器的结构参数

Table 1 The structure parameters of MRE actuator

参数	数值	参数	数值
x_1	13 mm	x_7	11 mm
x_2	11 mm	x_8	8 mm
x_3	6 mm	x_9	6 mm
x_4	17 mm	P_c	44.05 W
x_5	8 mm	B_{MRE}	526.21 mT
x_6	3 mm	τ_c	5.43 ms

3.3 实验测试及验证

对优化设计后的MRE执行器进行零件加工制造及装配,器件组装前后的实物如图6所示,其中,单层钢片是由多片硅钢片叠装而成,线圈绕制匝数为734匝。为了评估和验证MRE执行器的优化结果,进行了一系列测试。首先,采用万用表测得MRE执行器在常温下的电阻为 $4.72\ \Omega$,MRE执行器在3 A设计电流激励下的功耗为 $P_c = I^2 R_c = 42.48\ \text{W}$,优于优化设计的仿真结果44.05 W,相对误差为-3.56%。该误差主要源于计算和实验的差距,功耗中电阻是按式(6)进行计算的,电阻与电磁线圈单元的线圈长度及面积有关,理论数值计算已充分考虑实际情况,与最终实验结果相对误差较小,满足允许误差范围,且优于式(15)给定的参考功耗50 W。其次,采用LCR表测得MRE执行器的电感为21.45 mH,电流响应时间常数为 $\tau_c = L_c / R_c = 4.54\ \text{ms}$,优于优化设计的仿真结果5.43 ms,相对误差为-16.39%。该误差主要源于在仿真计算中,MRE执行器的电感采用的等效电感计算公式(7)、(8),其中的总磁阻 R_m 在考虑磁回路中压缩空气间隙区的磁阻及实际加工后器件安装存在的安装间隙、漏磁等现象后,进行了简化等效计算,再结合MRE执行器电阻存在的误差,导致电流响应时间常数计算公式(11)与最终实验测试结果有一定误差,但无论仿真计算还是测试结果都优于式(15)给定的参考响应时间10 ms。

为了获取执行器中 MRE 区域的磁感应强度,搭建了磁场测试系统。从图 7(a)可以看出,叠层 MRE 区域位于结构中心处,将磁场测试探头置于该区域必然会影响器件的原始磁路,获得非真实可靠的数据。此外,从 MRE 执行器结构示意图可以明显看出,磁场测试探头难以探进 MRE 处,即使能探进也将影响器件原有磁路。文中通过先测试获取磁路中压缩空气区域中的磁感应强度,再根据仿真和测试结果对比推导获取叠层 MRE 区域的磁感应强度。测试系统如图 7(a)所示,采用直流电源(KEYSIGHT U8002A)为 MRE 执行器提供电流激励,利用特斯拉计(Bell 5180)测量压缩空气区域处的磁感应强度,测量点在图中实物和结构示意图中均已示出,可以看出,测量点位于磁回路中的空气区域中心点。通过该压缩空气区域点的 COMSOL 仿真结果和实际测试结果对比,如图 7 (b)所示,建立了二者之间的关系式 $B_{\text{test}} = -8.033 84 + 0.864 11 B_{\text{sim}}$,呈近似线性关系。根据该近似关系及叠层 MRE 区域磁感应强度的仿真结果,可以进一步推导获得 MRE 区域的实际磁感应强度(推导结果不包含原点),如图 7(c)所示。可以看出,在 3 A 电流激励下,器件中叠层 MRE 区域的实际磁感应强度为 446.67 mT,低于优化设计的仿真结果 526.21 mT,相对误差为-15.12%。3 个优化目标的设计与测试结果对比如图 7(d)所示。其中,功耗 P_c 和电流响应时间 τ_c 的实际测试结果均优于仿真结果,满足设计要求。而叠层 MRE 区域的平均磁感应强度 B_{MRE} 低于设计仿真结果,其原因主要为 MRE 执行器安装时 MRE 与钢片存在粘接,二者间的粘接面增大了磁路中的非导磁区域,导致磁路中的磁损和漏磁增多,使得实际测试值低于设计值。建议在进行 MRE 执行器设计时,将磁感应强度优化仿真理想值设置为更高的数值,以弥补漏磁等缺陷,这也是为何文中优化设计时,在 400 mT 即满足 MRE 磁流变效应的情况下,将磁感应强度对比参照值设置为 550 mT 的原因。

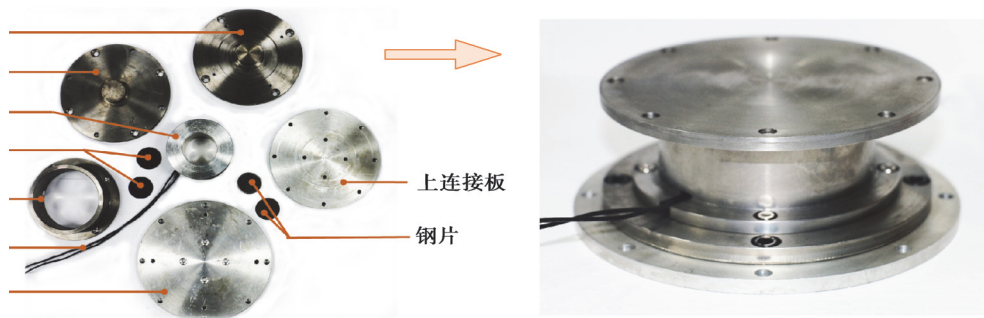


图 6 MRE 执行器的零件及装配图

Fig. 6 The components and assembly drawing of MRE actuator

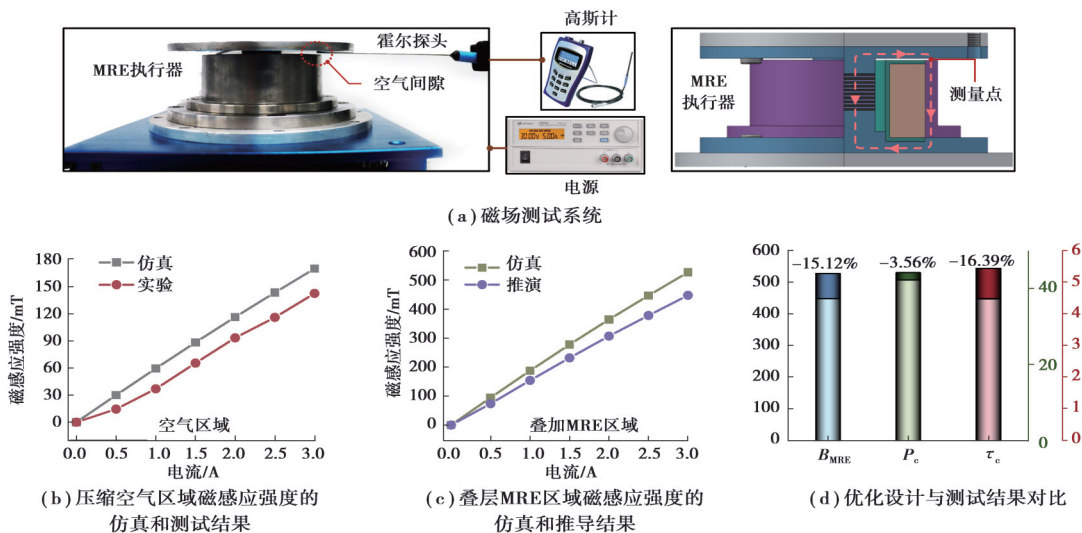


图 7 MRE 执行器的测试和验证

Fig. 7 Test and evaluation of MRE actuator

5 结 论

1)文中对待优化的MRE执行器结构和磁路进行了介绍和分析,并建立了执行器的3个优化目标:优越磁控可调范围、低功耗及快速响应。

2)采用遗传算法和有限元法的联合优化方法,基于MATLAB和COMSOL的联合编程,建立了MRE执行器的优化模型。通过引入权重因子,将多目标函数转为简单的单目标函数,实现了对MRE执行器的参数和性能联合优化求解。优化后的MRE执行器磁场调节范围达526.21 mT,电流响应时间为5.43 ms,功耗为44.05 W。

3)实现了对优化后的MRE执行器进行零件制造和整体装配,并搭建了测试系统对支座优化结果进行评估及验证,结果表明,优化设计的MRE执行器能满足优越磁控性能、低功耗及快速响应的需求。

4)文中提出的联合优化方法对于所有的智能电磁元件的优化设计都具有一定的适用性,例如,为MRE吸振器、MRE缓冲器的优化设计等提供了理论参考。对基于其他磁流变材料(磁流变液(MRF)、磁流变胶(MRG)、磁流变塑性体(MR plastomer)等)的智能结构优化设计具有重要参考价值。

参考文献

- [1] Jolly M R, Carlson J D, Muñoz B C, et al. The magnetoviscoelastic response of elastomer composites consisting of ferrous particles embedded in a polymer matrix[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1996, 7(6): 613-622.
- [2] Zhu M, Yu M, Qi S, et al. Investigations on response time of magnetorheological elastomer under compression mode[J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(5): 055017.
- [3] Qi S, Yu M, Fu J, et al. Stress relaxation behavior of magnetorheological elastomer: experimental and modeling study[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, 29(2): 205-213.
- [4] Ginder J M, Schlotter W F, Nichols M E. Magnetorheological elastomers in tunable vibration absorbers[C]// SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials. Proc SPIE 4331, Smart Structures and Materials 2001: Damping and Isolation, Newport Beach, CA, USA. 2001, 4331: 103-110.
- [5] Deng H X, Gong X L, Wang L H. Development of an adaptive tuned vibration absorber with magnetorheological elastomer[J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15(5): N111-N116.
- [6] Xu Z B, Gong X L, Liao G J, et al. An active-damping-compensated magnetorheological elastomer adaptive tuned vibration absorber[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, 21(10): 1039-1047.
- [7] Liao G J, Gong X L, Kang C J, et al. The design of an active - adaptive tuned vibration absorber based on magnetorheological elastomer and its vibration attenuation performance[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(7): 075015.
- [8] Sun S S, Chen Y, Yang J, et al. The development of an adaptive tuned magnetorheological elastomer absorber working in squeeze mode[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(7): 075009.
- [9] Sun S S, Deng H X, Yang J, et al. Performance evaluation and comparison of magnetorheological elastomer absorbers working in shear and squeeze modes[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2015, 26(14): 1757-1763.
- [10] Sun S S, Yang J, Li W H, et al. Development of an MRE adaptive tuned vibration absorber with self-sensing capability[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(9): 095012.
- [11] Liao G J, Gong X L, Xuan S H, et al. Development of a real-time tunable stiffness and damping vibration isolator based on magnetorheological elastomer[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2012, 23(1): 25-33.
- [12] 王宇飞, 楼伟锋, 吴东兴. 磁流变弹性体隔振器的磁路结构有限元分析[J]. *噪声与振动控制*, 2013, 33(3): 1-4, 11.
Wang Y F, Lou W F, Wu D X. Finite element analysis of magnetic circuit for magnetorheological elastomer vibration isolators [J]. *Noise and Vibration Control*, 2013, 33(3): 1-4, 11.(in Chinese)
- [13] Ju B X, Yu M, Fu J, et al. Study on the properties of porous magnetorheological elastomers under shock effect[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, 412: 012039.
- [14] 余森, 朱秘, 綦松, 等. 基于磁流变弹性体缓冲装置的控制仿真研究[C]//第十二届全国振动理论及应用学术会议论文集. 南宁, 2017: 1282-1289.

- Yu M, Zhu M, Qi S, et al. Experimental study on the control of magnetorheological elastomer-based buffer[C]// Proceedings of the 12th National Conference on Vibration Theory and Application. Nanning, 2017: 1282-1289. (in Chinese)
- [15] 朱秘, 余森, 浮洁, 等. 基于磁流变弹性体的缓冲装置设计及其冲击响应特性研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(4): 172-177.
- Zhu M, Yu M, Fu J, et al. An experimental study on shock response characteristics of magnetorheological elastomer-based buffer[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(4): 172-177.(in Chinese)
- [16] Yang C Y, Fu J, Yu M, et al. A new magnetorheological elastomer isolator in shear-compression mixed mode [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2015, 26(10): 1290-300.
- [17] Tao Y, Rui X T, Yang F F, et al. Design and experimental research of a magnetorheological elastomer isolator working in squeeze/elongation - shear mode[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2018, 29(7): 1418-1429.
- [18] Li J C, Li Y C, Li W H, et al. Development of adaptive seismic isolators for ultimate seismic protection of civil structures[C]// SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. Proc SPIE 8692, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2013, San Diego, California, USA. 2013, 8692: 122-133.
- [19] Li Y C, Li J C, Li W H, et al. Development and characterization of a magnetorheological elastomer based adaptive seismic isolator[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(3): 035005.
- [20] Li Y C, Li J C, Tian T F, et al. A highly adjustable magnetorheological elastomer base isolator for applications of real-time adaptive control[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(9): 095020.
- [21] Behrooz M, Wang X J, Gordaninejad F. Modeling of a new semi-active/passive magnetorheological elastomer isolator[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(4): 045013.
- [22] Zhao L J, Yu M, Fu J, et al. A miniature MRE isolator for lateral vibration suppression of bridge monitoring equipment: design and verification[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(4): 047001.
- [23] Li Y C, Li J C. Finite element design and analysis of adaptive base isolator utilizing laminated multiple magnetorheological elastomer layers[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2015, 26(14): 1861-1870.
- [24] Yu M, Zhao L J, Fu J, et al. Thermal effects on the laminated magnetorheological elastomer isolator[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(11): 115039.

(编辑 陈移峰)