

嵌入式超磁致伸缩构件多场耦合优化*

张雷 邬义杰 刘孝亮 王彬

(浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027)

【摘要】 建立了嵌入式超磁致伸缩 GMM 构件的机、电、磁、热多场优化模型, 并采用多目标遗传算法实现了 GMM 构件的多场耦合模型优化。由 GMM 构件的一般设计准则和异形孔精密加工工艺要求, 确定模型优化目标包括: 合理的驱动刚度和较大的抗扭转刚度; 驱动线圈效率系数大; 空心线圈产生的高强度磁场; 减少导磁回路磁阻, 使 GMM 内部磁场强度高; 强制水冷腔的散热效率高。优化变量包括: GMM 的尺寸、导磁材料的磁导率以及磁回路、线圈、水冷腔体的结构。根据设计要求选取变量范围, 采用非支配排序遗传算法 (NSGA) 在整个参数空间内搜索, 得到了 GMM 构件主要结构参数, 并通过试验和磁场仿真验证了结构设计方法的正确性。

关键词: 超磁致伸缩 多场耦合模型 多目标遗传算法 优化设计

中图分类号: TH703.8; TP211+.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)05-0190-07

Multi-field Coupling Model of Embedded Giant Magnetostrictive Components Optimization

Zhang Lei Wu Yijie Liu Xiaoliang Wang Bin

(State Key Lab of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract

The optimization design model of embedded giant magnetostrictive components (EGMC) was presented with multi-field property of machinery, electric, magnetic and thermal. And the multi-object genetic algorithm was applied to the optimization design of the EGMC. All optimal objects of the model were confirmed by the general design rules and the requirements of non-cylindrical holes in precision processing. The optimal goals of the model were as follows: a suitable flexural rigid of the EGMC, the maximum torsional rigid of the EGMC, the maximum coil efficiency, the maximum magnetic field density inside the coil, the maximum cooling efficiency of the water-cooling cavity, and the maximum magnetic field density in giant magnetostrictive material (GMM) by reducing the magnetic reluctances. The variables needs optimization included the size of GMM, the magnetic permeability of all magnetic materials, the structure of magnetic flux path, coil, and water-cooling cavity. All optimal parameter ranges were determined by application demands. The finest parameters of giant magnetostrictive components were obtained by non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA) with space search method, which were proved by the experiments and magnetic field simulations.

Key words Giant magnetostrictive components, Multi-field coupling models, Multi-object genetic algorithm, Optimization design

引言

超磁致伸缩材料 (giant magnetostrictive

material, 简称 GMM) 作为一种新型智能材料, 具有驱动力大、伸缩系数大、功率密度高、频响快速、可控精度高等特点。以此为核心研制的超磁致伸缩驱动

收稿日期: 2011-06-02 修回日期: 2011-07-01

* 国家自然科学基金资助项目 (50975256)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20110101110014) 和浙江省自然科学基金重点资助项目 (Z1080537)

作者简介: 张雷, 博士生, 主要从事智能材料应用研究, E-mail: zhanglei200812@gmail.com

通讯作者: 邬义杰, 教授, 博士生导师, 主要从事高速高精数控技术和智能材料微驱动技术研究, E-mail: wyj1116@zju.edu.cn

器(GMA)广泛用于机器人、航空器、潜艇控制、微定位、减振、液体和阀门控制等场合。GMA作为一种电-磁-机的能量转化装置,按应用场合需求进行设计时,针对驱动器的磁场、电场、温度场及机械应力场的综合优化是GMA设计的关键。

按GMA的结构和磁路特点可分为直动型和嵌入型两种。直动型GMA位移输出沿GMM棒轴线方向,GMM在磁路分析中等效为串联元件;嵌入型GMA是将GMM嵌入弹性构件内,GMM推动弹性构件变形输出位移,位移输出与GMM棒轴线不平行,GMM在磁路分析中等效为并联元件。由于两者结构和磁路存在差异,优化设计方法也完全不同。

目前,针对直动型GMA优化设计,已有一些学者做了较多的研究工作,如邬义杰等^[1-5]根据GMM特性给出了直动型GMA的一般设计原则,但在优化设计上只给出了一个考虑磁路的优化模型,没有考虑其它耦合因素。而针对嵌入型GMA设计优化,赵章荣等^[1]给出了考虑嵌入型GMA部分耦合的弱解有限元优化模型,但没有给出一个涉及电、磁、机、热全耦合的优化模型。因此,本文以嵌入型GMA(精密加工异形孔的GMM构件)为研究对象,提出一个多场全耦合的优化模型。模型对如下7个目标进行优化:合理的驱动刚度;较大的抗扭刚度;驱动线圈效率系数大;空心线圈产生的高强度磁场;减少导磁回路磁阻,且保证GMM内磁场强度高;强制水冷腔对线圈的散热效率高。针对嵌入式GMA结构参数与以上优化目标存在的相互耦合、制约问题,采用非支配排序的多目标遗传算法(NSGA)解决。并根据最优Pareto图制作嵌入型GMA,通过试验和磁场仿真验证所设计结构的合理性。

1 GMM 构件优化设计模型

1.1 GMM 构件结构设计和 GMM 棒选择

以课题组研制的用于异形孔精密加工的GMM构件结构为优化对象,如图1所示。其中, L_1 、 L_2 为异形孔结构确定的尺寸; $X_1 \sim X_9$ 为需要优化的主要结构参数,分别为嵌入GMM结构尺寸、镗杆结构尺寸、线圈结构尺寸、磁回路结构尺寸。

GMM嵌入镗杆后,采用预压滑块施加预压力来提高GMM的伸缩应变变量,并增加嵌入的接触刚度。另外,采用偏置线圈消除GMM的倍频现象。GMM构件工作原理:由控制系统输出高频驱动电流至激励线圈产生磁场,而GMM在交变的磁场中输出位移,驱动镗杆本体发生弯曲变形实现高频径向微进给,达到异形孔精密加工的目的。根据GMM构件工作原理和整体结构,可从购买厂家提供的GMM

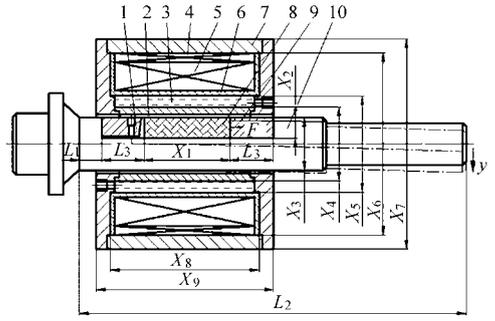


图1 嵌入型超磁致伸缩构件结构简图

Fig.1 Basic structure of embedded giant magnetostrictive components

1. 预压滑块(导磁)
2. 气隙
3. 强制水冷腔
4. 偏置线圈
5. 励磁线圈
6. 线圈骨架
7. 外壳体
8. GMM
9. 导磁纯铁
10. 镗杆本体

工作特性参考表中,选择其最佳工作点(如偏置磁场、预压力和工作温度),再结合GMM构件精密加工异形孔的基本要求(进给行程、抗扭转刚度等),确定嵌入的GMM最小长度和半径^[1-2]。

1.2 GMM 构件多个优化设计目标

1.2.1 GMM 构件的驱动刚度和抗扭转刚度

GMM驱动构件本体发生弯曲变形,如图1所示。可将构件本体弯曲变形等效为悬臂梁,用挠度表示弯曲变形程度。而根据挠曲线方程^[6],GMM构件端部的径向弯曲挠度为

$$y = -\frac{FX_2}{2} \frac{X_1(3X_1 - L_2 + L_1)}{3EI_z} = -F/K_w \quad (1)$$

其中
$$K_w = \frac{6EI_z}{X_1X_2(3X_1 - L_2 + L_1)}$$

式中 K_w ——构件弯曲刚度

E ——材料弹性模量

I_z ——构件嵌入段的截面对中性轴的惯性矩

F ——GMM的驱动力 L_1 ——镗杆长度

L_2 ——GMM嵌入部位的轴向长度

由式(1)可知,GMM输出力 F 一定时,要获得足够的径向微位移行程,必须设计合理的驱动刚度。取目标函数

$$f_1 = \frac{6EI}{X_1X_2(3X_1 - L_2 + L_1)} \quad (2)$$

由于异形孔的加工精度较高,必须考虑GMM构件的抗扭转刚度。由图1可知,GMM构件是非等截面圆轴,需分段计算扭转角度^[6],然后代数叠加得构件的扭转角度为

$$\varphi = M \left(\frac{L_1}{GI_{p1}} + \frac{X_1}{GI_{p2}} + \frac{L_2 - L_1 - X_1}{GI_{p3}} \right) \quad (3)$$

式中 M ——切削扭矩 G ——材料的切变模量

I_{p1} 、 I_{p2} 、 I_{p3} ——各段截面对中性轴的惯性矩

由式(3)可知,构件的抗扭转刚度为

$$K_n = \frac{L_1}{GI_{p1}} + \frac{X_1}{GI_{p2}} + \frac{L_2 - L_1 - X_1}{GI_{p3}} \quad (4)$$

取目标函数

$$f_2 = \frac{L_1}{GI_{p1}} + \frac{X_1}{GI_{p2}} + \frac{L_2 - L_1 - X_1}{GI_{p3}} \quad (5)$$

当切削扭矩一定时, f_2 越小则 GMM 构件抗扭转刚度越大。

1.2.2 空心线圈的磁场强度

GMM 构件的激磁线圈是厚壁线圈, 线圈中心处产生的磁场强度^[7]可表示为

$$H(0,0,0) = \lambda \frac{X_8 I}{d^2} \ln \frac{X_6 + \sqrt{X_6^2 + X_8^2}}{\sqrt{X_5^2 + X_8^2}} \quad (6)$$

式中 λ ——绕制线圈占空系数

d ——绕制线圈导线直径

I ——绕制线圈输入电流

取优化函数为

$$f_4 = \lambda \frac{X_8 I}{d^2} \ln \frac{X_6 + \sqrt{X_6^2 + X_8^2}}{\sqrt{X_5^2 + X_8^2}} \quad (7)$$

当电流一定时, f_4 越大则该结构的线圈产生磁场越大。

1.2.3 GMM 内部磁场强度

由线圈产生的磁通量闭合回路可简化为图 2。为减少优化计算量, 将图中线圈骨架厚度统一为 2 mm、端盖与外壳体厚度统一为 5 mm。在磁路分析时, 必须考虑 GMM 构件与激磁线圈之间存在较大的空气间隙产生的漏磁。整个磁路由 GMM、镗杆、多个空气间隙和外壳体串联组成, 并在局部形成并联磁回路, 则图 2 可表示成等效磁路(图 3)。图 2、3 中, N 、 I 分别表示线圈匝数和输入电流, R_y 、 R_{air} 、 R_G 、 R_{g1} 、 R_{g2} 分别为外壳体磁阻、气隙磁阻、GMM 磁阻、导磁纯铁磁阻、镗杆磁阻。磁阻计算式为

$$R_i = L_i / (\mu_i A_i) \quad (8)$$

式中 L_i ——各磁路的长度

μ_i ——各磁路的磁导率

A_i ——各磁路的截面积

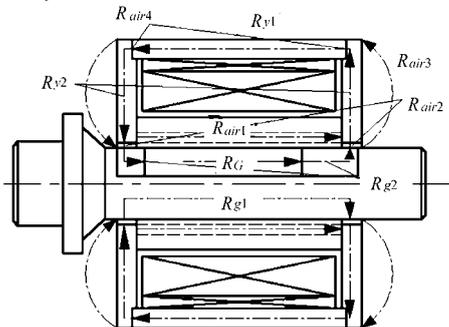


图 2 GMM 构件磁回路

Fig. 2 Magnetic circuit of giant magnetostrictive components

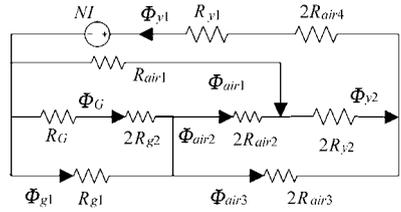


图 3 GMM 构件等效磁路图

Fig. 3 Equivalent magnetic circuits of giant magnetostrictive components

在假定没有其它漏磁的情况下, 由麦克斯韦方程 $NI = \oint H dx$ 和磁路基尔霍夫定律^[7]得

$$\begin{cases} NI = \Phi_{y1} (R_{y1} + R_{air4}) + 2\Phi_{y2} R_{y2} + \Phi_{air1} R_{air1} = \\ \Phi_{y1} (R_{y1} + R_{air4}) + 2\Phi_{air3} R_{air3} + \Phi_G (R_G + 2R_{g2}) = \\ \Phi_{y1} (R_{y1} + R_{air4}) + 2\Phi_{y2} R_{y2} + 2\Phi_{air2} R_{air2} + \Phi_G (R_G + 2R_{g2}) \\ \Phi_G (R_G + 2R_{g2}) = \Phi_{g1} R_{g1} \\ \Phi_{y1} = \Phi_{y2} + \Phi_{air3} \\ \Phi_{y2} = \Phi_{air1} + \Phi_{air2} \\ \Phi_{air2} + \Phi_{air3} = \Phi_{g1} + \Phi_G \end{cases} \quad (9)$$

经方程组(9)联立求解 Φ_G , 可得 GMM 磁通量。由磁通的定义, 可知 GMM 上磁场强度为

$$H_G = \frac{\Phi_G}{\mu_G A_G} \quad (10)$$

式中 μ_G ——GMM 的磁导率

A_G ——GMM 的截面积

当 N 、 I 一定时, 要提高 H_G , 必须减小串联磁路磁阻, 且增大与 GMM 并联的局部磁路磁阻。取目标优化函数为

$$f_3 = \frac{\Phi_G}{\mu_G A_G} \quad (11)$$

当电流、线圈匝数一定时, f_3 越大, 表示该结构的 GMM 内部磁场强度越大。

1.2.4 GMM 内磁场分布均匀性

为充分发挥磁致伸缩材料的特性, 增大 GMM 构件输出位移, 提高能量转换效率, 并减少位移输出中高次谐波分量^[8], 应设法提高 GMM 内部磁场分布均匀性。而由磁场仿真分析可知, GMM 两端增加导磁纯铁可显著提高 GMM 内部磁感应强度的均匀性^[3]。但增加导磁纯铁会增加线圈长度和构件缺口长度, 影响高抗扭刚度的要求。为此, 取优化函数为

$$f_5 = X_8 - X_1 + C \quad (12)$$

式中 C ——常数, 代表端盖厚度

f_5 ——GMM 两端导磁纯铁长度, 其值越大, GMM 内部磁场的均匀性越好

1.2.5 驱动线圈效率系数

通常为了获得大的驱动磁场需用较大激磁电流,使得线圈的电阻热损耗功率较大。对此,在设计时需充分考虑线圈的几何参数,使其产生足够大磁场强度同时电阻热损耗功率最小。由文献[1]可知,线圈的中心处磁场强度与电阻热损耗功率关系为

$$H(0,0,0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{\beta}{\alpha^2 - 1}} \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}} \sqrt{\frac{2\gamma P}{\rho X_5}} \quad (13)$$

其中 $\alpha = X_6/X_5$ $\beta = X_8/X_5$

式中 P ——线圈的热功率

ρ ——绕组材料的电阻率

γ ——磁致伸缩系数

取目标函数

$$f_6 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{\beta}{\alpha^2 - 1}} \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}} \quad (14)$$

由式(14)可得线圈功率的转化效率。 f_6 越大,转化效率越高。

1.2.6 强制水冷腔对线圈散热的效率系数

考虑到强驱动磁场的线圈电阻发热功率较大,为提高厚壁线圈散热效率,保证 GMM 构件长时间工作的稳定性,必须采取比空冷更有效的散热方式。因水的比热容、热交换系数较大,在线圈内部设计强制水冷腔可提高线圈散热的速度,并阻隔线圈向 GMM 传导热量,使 GMM 环境温度更加稳定。当水冷腔较大时,会使线圈结构、电感、磁漏等增大。因此,在水流压力等条件不变时,必须优化水腔结构达到高效散热的目的。

当水腔进水口、出水口压差 Δp 一定时,流过水腔截面的水流量^[9]为

$$q_v = \frac{\pi \Delta p (X_5^4 - X_4^4)}{128 \eta X_8} \quad (15)$$

则水流平均速度 v 可表示为

$$v = \frac{q_v}{A_s} = \frac{\Delta p (X_5^2 + X_4^2)}{32 \eta X_8} \quad (16)$$

式中 A_s ——水腔截面积

η ——水流的动力粘滞系数

当线圈电阻发热功率 P_c 一定时,线圈温度 T_c 为

$$T_c = \frac{P_c}{C_c V_c} + T_0 \quad (17)$$

式中 C_c ——线圈的比热容

T_0 ——环境温度

V_c ——线圈的体积

由牛顿冷却定律可知,单位时间内线圈热量通过水腔外壁面的热交换量为

$$Q = \pi \alpha_g (T_c - T_s) X_5 X_8 \quad (18)$$

式中 α_g ——水腔外壁金属的平均导热系数

T_s ——水腔平均温度

当冷却水流过壁面时,在与壁面接触处的边界层水温度瞬间上升为壁面温度。而随着水流过腔壁面距离的增加,水温升的范围增大。水腔平均温度为

$$T_s = \xi \frac{X_8 Q}{v \varepsilon q_v C_s} + T_0 \quad (19)$$

式中 ξ ——热交换效率 ε ——水的密度

C_s ——水的比热容

将式(15)~(18)代入(19),并简化得热交换效率

$$\xi = \frac{\Delta p (X_5^2 + X_4^2)}{32 \eta X_8^2} \cdot \frac{\varepsilon C_s C_c V_c \Delta p (X_5^4 - X_4^4) (T_s - T_0)}{128 \alpha_g \eta X_8^2 X_5 [P_c + C_c V_c (T_0 - T_s)]} \quad (20)$$

取目标函数

$$f_7 = \frac{\Delta p (X_5^2 + X_4^2)}{32 \eta X_8^2} \cdot \frac{\varepsilon C_s C_c V_c \Delta p (X_5^4 - X_4^4) (T_s - T_0)}{128 \alpha_g \eta X_8^2 X_5 [P_c + C_c V_c (T_0 - T_s)]} \quad (21)$$

由式(21)可得水腔结构的散热效率。 f_7 越大,散热效率越高。

1.3 GMM 构件的优化模型

由上述分析,将 GMM 的优化问题转化为带约束的多目标优化问题:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max (f_1, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7) \\ \min (f_2) \\ \text{s. t. } \quad g_1(\mathbf{x}) = X_3 - X_2 \\ \quad \quad g_2(\mathbf{x}) = X_4 - X_3 \\ \quad \quad g_3(\mathbf{x}) = X_5 - X_4 \\ \quad \quad g_4(\mathbf{x}) = X_6 - X_5 - 2d \\ \quad \quad g_5(\mathbf{x}) = L_2 - L_1 - X_1 \\ \quad \quad g_6(\mathbf{x}) = X_9 - X_8 \\ \quad \quad g_7(\mathbf{x}) = X_8 - X_1 \\ \quad \quad g_8(\mathbf{x}) = 6A_c/f_1 - 0.02 \\ \quad \quad g_9(\mathbf{x}) = f_3 - H_s \\ \quad \quad g_{10}(\mathbf{x}) = 20 - f_3 + H_s \end{array} \right. \quad (22)$$

式中,结构优化变量 $\mathbf{x} = (d, \mu_x, \mu_y, L_1, L_2, L_3, X_1, X_2, \dots, X_9)$,分别为导线直径、镗杆的磁导率、外壳磁导率以及 GMM 构件的主要几何尺寸。约束 1~7 从尺寸上将各部分组合在一起。当 GMM 输出 6 MPa 时,约束 8 表示 GMM 构件弯曲变形量达到异形孔加工的进给行程要求。约束 9、10 表示 GMM 内部

会产生足够的磁场强度。

2 多目标遗传算法及结果分析

2.1 多目标遗传算法

目前,多目标优化的方法有很多,其中非支配排序的遗传算法应用最为广泛^[10-11]。它通过模拟自然环境中生物的遗传和进化过程,形成一种自适应全局优化的概率搜索算法,可对多个优化目标进行协调和折衷处理,使各个子目标函数都趋于最

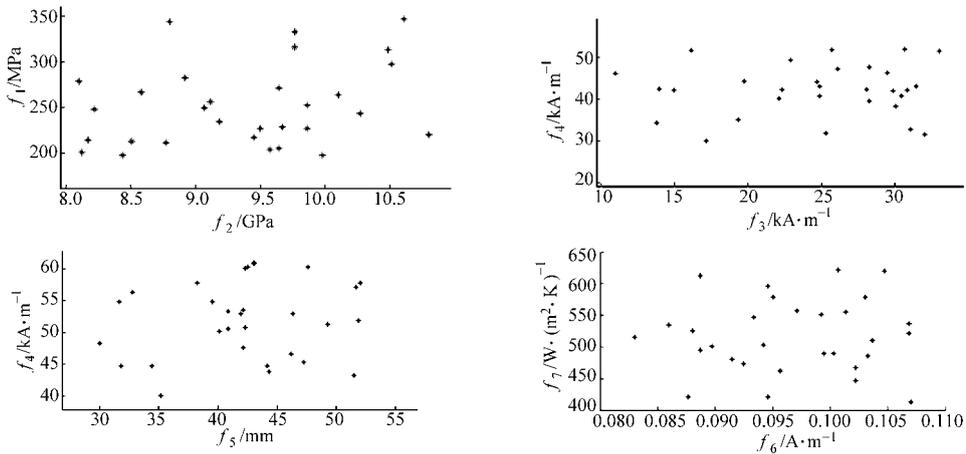


图4 Pareto 最优解

Fig.4 Pareto optimum solution

由图4可见,各优化目标相互耦合、制约,综合考虑 GMM 构件的机、电、磁、热 7 个方面因素,从非劣解集中选择优化的适应度分别为:249、10.3、29.7、43.6、50、537 和 0.086。

2.2 优化结果分析

根据异形孔精密加工的尺寸要求,取 $L_2 - X_9 = 120$ mm,各优化变量取值范围见表1,优化后变量结果如表2。优化变量中磁回路外壳体、端盖和镗杆的磁导率可以任意选择优化,但考虑到实际可用的导磁材料种类有限,只能选择一定导磁特性的材料。借鉴文献[3]中直动型 GMA 磁路优化,选用导磁性较好的电工纯铁作为磁回路外壳体和端盖,减小了

表1 设计变量取值

Tab.1 Constraint form of design variables

变量	数值	变量	数值
$\mu_g/H \cdot m^{-1}$	1.25×10^{-6}	X_3/mm	35 ~ 45
$\mu_y/H \cdot m^{-1}$	1.25×10^{-3}	X_4/mm	43 ~ 53
L_1/mm	10 ~ 40	X_5/mm	50 ~ 60
L_2/mm	60 ~ 250	X_6/mm	60 ~ 120
L_3/mm	10	X_7/mm	80 ~ 140
d/mm	0.7 ~ 1.3	X_8/mm	40 ~ 80
X_1/mm	30 ~ 60	X_9/mm	60 ~ 100
X_2/mm	7 ~ 17		

优^[12-13]。

本文设计的 GMM 构件主要用于异形孔精密加工,构件端部的工作行程为 0 ~ 20 μm ,在最大工作位移处(20 μm)的静态输出力为 50 N。采用二进制编码的参数选择如下:种群规模为 100,染色体数为 42,最大进化代数 200,采用单点交叉,交叉概率为 0.8,均匀变异,变异概率为 0.01,共享半径为 0.15。迭代到 600 代的 Pareto 图(取其中 30 个个体)如图 4 所示。

总磁路的磁阻;并选用不导磁的不锈钢作为镗杆材料,增大与 GMM 并联磁路的磁阻,使大部分磁力线通过 GMM,提高能量的转化效率。

表2 设计变量优化结果

Tab.2 Optimized results of design variables

变量	数值	变量	数值
$\mu_g/H \cdot m^{-1}$	1.25×10^{-6}	X_3/mm	43
$\mu_y/H \cdot m^{-1}$	1.25×10^{-3}	X_4/mm	49
L_1/mm	25	X_5/mm	55
L_2/mm	230	X_6/mm	87
L_3/mm	10	X_7/mm	107
d/mm	0.76	X_8/mm	40
X_1/mm	55	X_9/mm	60
X_2/mm	15		

按照表2优化的结果,对部分变量取整后,制作的 GMM 构件如图 5 所示。在 0 ~ 5 A、100 Hz 交变电流驱动下,GMM 构件的弯曲位移如图 6 所示。虽然位移输出的相位滞后严重,但进给量达到了 22.9 μm ,满足异形孔加工进给需要。当加载 0.8 N·m 的扭矩时,GMM 构件端部扭转位移为 0.3 μm ,符合异形孔加工高抗扭刚度要求。

应用 Maxwell 对 GMM 构件磁场进行分析,结果如图 7、8 所示(L_g 为 GMM 轴线方向长度)。采用常

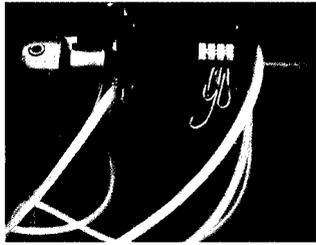


图 5 GMM 构件准静态参数测试装置

Fig. 5 Quasi-static parameters testing of giant magnetostrictive components

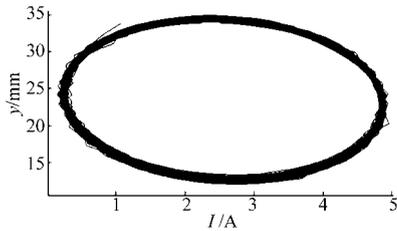


图 6 100 Hz 驱动电流下 GMM 构件的弯曲位移输出曲线

Fig. 6 Bending displacement output of giant magnetostrictive components in 100 Hz current driving

见 45 号钢(导磁)刀杆材料时,绝大部分磁力线绕过了 GMM,其内部磁感应强度 B 为 0.012 T,且漏磁严重。当选用不锈钢镗杆时,绝大部分磁力线都通过 GMM,其内部磁感应强度 B 为 0.4 T,大大提高了能量利用率。文献[6]指出一般钢材的弹性模量、切变模量等大致相同,并不是影响构件刚性的主要因素。由此可见选用不锈钢制作刀杆,并不会过分降低刀具的机械刚性。

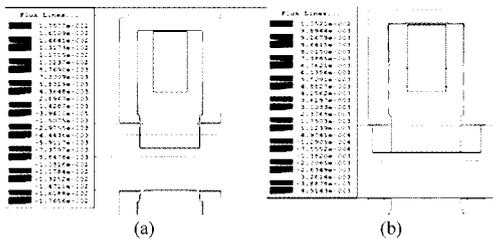


图 7 GMM 内部磁场分布

Fig. 7 Internal magnetic field distribution of GMM with different magnetic conductivity tool rods

(a) 45 号钢镗杆 (b) 不锈钢镗杆

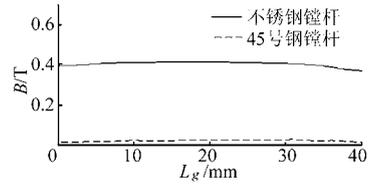


图 8 GMM 内部磁场强度

Fig. 8 Internal magnetic field intensity of GMM with different magnetic conductivity tool rods

图 9 为线圈加载 2.5 A 直流电时,线圈温度随时间变化曲线,可见水冷腔的设计极大地提高了线圈的散热效率。

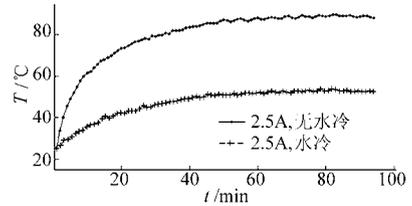


图 9 2.5 A 电流时线圈平均温度随时间变化曲线

Fig. 9 Different curves of coil average temperature changes with water-cooling or without water-cooling in 2.5 A driven current

从上述分析可知,本文优化的 GMM 构件综合考虑各个因素,具有足够异形孔加工的位移输出、GMM 内部磁场强度大且均匀、漏磁少、水冷腔高散热效率等特点。

3 结论

(1) 针对嵌入型 GMM 构件的特点和应用场合,提出了 GMM 构件电、磁、机、热多场耦合优化设计的模型,包括:驱动刚度、抗扭转刚度、线圈效率系数、GMM 磁场强度、磁场均匀度、磁路磁阻和强制水冷腔的散热效率。

(2) 采用多目标遗传算法实现了多场耦合模型的优化设计。

(3) 经弯曲试验、散热试验和磁场仿真验证,优化的 GMM 构件位移输出(100 Hz 时,22.9 μm)满足异形孔加工需要,并具备漏磁少、磁场均匀、线圈功率转化系数高、散热效率高等优点。

参 考 文 献

- 赵章荣, 郭义杰, 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 Zhangrong, Wu Yijie, Gu Xinjian, et al. Optimization for giant magnetostrictive actuator based on genetic algorithm [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2009, 43(1): 13~17. (in Chinese)
- 余佩琼, 梅德庆, 陈子辰, 等. 超磁致伸缩微致动器结构优化与静态特性试验[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 114~117. Yu Peiqiong, Mei Deqing, Chen Zichen, et al. Structure optimization and static characteristic experiment of giant magnetostrictive actuator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 114~117. (in Chinese)
- 李明范, 项占琴, 吕福在. 超磁致伸缩换能器磁路设计及优化[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 40(2): 192~196. Li Mingfan, Xiang Zhanqin, Lü Fuzai. Magnet circuit design and optimization of giant magnetostrictive transducer [J].

- Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 40(2): 192 ~ 196. (in Chinese)
- 4 王兴松, 王湘江, 毛燕. 基于超磁致伸缩材料的折弯型压曲放大机构设计、分析与控制[J]. 机械工程学报, 2007, 43(11): 27 ~ 33.
Wang Xingsong, Wang Xiangjiang, Mao Yan. Design, analysis and control of novel pressing and bending magnifying mechanism driven by giant magnetostrictive material [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(11): 27 ~ 33. (in Chinese)
- 5 Bi Jie. A study of magnetostrictive mini-actuators [D]. Maryland, USA: University of Maryland, 1997.
- 6 聂毓琴, 孟广伟. 材料力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 34 ~ 79.
- 7 王以真. 磁路设计原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 45 ~ 96.
- 8 徐峰, 张虎, 蒋成保, 等. 超磁致伸缩材料作动器的研制及特性分析[J]. 航空学报, 2002, 23(6): 552 ~ 555.
Xu Feng, Zhang Hu, Jiang Chengbao, et al. Designing and performance research of giant magnetostrictive actuator [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2002, 23(6): 552 ~ 555. (in Chinese)
- 9 于萍. 工程流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 65 ~ 87.
- 10 Sarkar D, Modak J M. Pareto-optimal solutions for multi-objective optimization of fed-batch bioreactors using nondominated sorting genetic algorithm [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(2): 481 ~ 492.
- 11 Michielssen E, Sajer J M, Ranjithan S, et al. Design of lightweight, broad band microwave absorbers using genetic algorithms [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1993, 41(6 ~ 7): 1 024 ~ 1 031.
- 12 Kishalay Mitra, Ravi Gopinathb. Multiobjective optimization of an industrial grinding operation using elitist nondominated sorting genetic algorithm [J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(2): 385 ~ 396.
- 13 Carlos A C, Alan D C, Arturo H. Using a new GA-based multiobjective optimization technique for the design of robot arms [J]. Robotica, 1998, 16(4): 401 ~ 414.
- 14 赵章荣, 隋晓梅, 邹义杰, 等. 超磁致伸缩执行器全耦合非线性动态有限元模型[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 123 ~ 126.
Zhao Zhangrong, Sui Xiaomei, Wu Yijie, et al. Coupling nonlinear dynamic finite element model of giant magnetostrictive actuator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 123 ~ 126. (in Chinese)
-

(上接第 178 页)

- 8 Lipton A, Fujiyoshi H, Patil R. Moving target classification and tracking from real-time video [C] // Proc. IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, Princeton, NJ, 1998: 8 ~ 14.
- 9 赵文哲, 秦世引. 视频运动目标检测方法的对比分析[J]. 科技导报, 2009, 27(10): 64 ~ 70.
Zhao Wenzhe, Qin Shiyin. Comparative study on detection methods for video motion targets [J]. Science & Technology Review, 2009, 27(10): 64 ~ 70. (in Chinese)
- 10 李刚, 邱尚斌, 林凌, 等. 基于背景差法和帧间差法的运动目标检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(8): 961 ~ 964.
Li Gang, Qiu Shangbin, Lin Ling, et al. New moving target detection method based on background differencing and cotermious frames differencing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(8): 961 ~ 964. (in Chinese)
- 11 周俊, 张高阳, 刘锐, 等. 基于粒子滤波的苹果采摘机器人目标姿态估算[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 161 ~ 165.
Zhou Jun, Zhang Gaoyang, Liu Rui, et al. Apple attitude estimation based on particle filter for harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 161 ~ 165. (in Chinese)