

文章编号: 1006-1355(2014)05-0203-07

# 微振动主动隔振平台的超磁致伸缩驱动器设计

赵 龙, 杨斌堂, 孙晓芬

(上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

**摘 要:** 对三自由度微振动主动隔振平台的基础器件——超磁致伸缩驱动器(GMA)和放大机构进行结构参数的优化设计。基于对GMA系统从能量输入到输出整个过程的电—磁—机械耦合特性分析,提出了结构的能量损耗率最小的优化方法。结构参数优化后的GMA能量损耗率仅为优化前的0.34倍。将优化结果带入驱动系统动力学模型,优化后的位移响应幅值增大为优化前的2.28倍,初始时刻的冲击加速度响应减小为优化前的0.11倍。仿真结果表明基于能量损耗率最小的超磁致伸缩驱动系统的优化设计方法有效,设计结果满足微振动隔振平台对GMA及放大机构的驱动稳定性、驱动效率、驱动幅值的设计要求。

**关键词:** 振动与波; 微振动; 主动隔振平台; 能量损耗; 超磁致伸缩驱动器; 结构参数优化

中图分类号: TB535\*1; TH113.1

文献标识码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2014.05.044

## Giant Magnetostrictive Actuator Design of an Active Micro-vibration Isolation Platform

ZHAO Long, YANG Bin-tang, SUN Xiao-fen

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract :** The structure optimization of a giant magnetostrictive actuator (GMA) and its displacement amplifier applied to a 3-DOF active micro-vibration isolation platform is presented. Though the analysis of the electro-magnetic-mechanical coupling features of the GMA system in the process from energy input to output, the optimization method based on the principle of minimum rate of energy loss with the structural parameters as the design variables is proposed. It is found that after the optimization, the energy loss rate is reduced to 0.34 of that before the optimization. Applying the optimization results to the dynamic model, the amplitude of the displacement response of the GMA system is raised to 2.28 times of that before the optimization. And the initial shock acceleration response is reduced to 0.11 of that before the optimization. The simulation results prove that the design method of the optimization based on the minimum rate of energy loss is efficient, and the design of the actuator can meet the requirements of high efficient, stability and accurate displacement amplitude of the driving performance for the target vibration isolation platform.

**Key words :** vibration and wave ; micro vibration ; active isolation platform ; energy loss ; giant magnetostrictive actuator (GMA) ; optimization of structural parameters

在精密工程、航空航天领域中,微振动的量级与精密器件工作量级相当,对精密器件正常工作造成不利影响,且大多外界干扰为多自由度振动,因而对外界微振动干扰的主动隔振十分必要。本文结合三

自由度微振动主动隔振平台对其基础器件——超磁致伸缩驱动器(GMA)性能的要求,设计高效、稳定、配有放大机构的GMA,且GMA经放大机构放大后的行程可达到0.5 mm以上。

GMA驱动效率与能量损耗率直接相关,当损耗能量与输入能量之比最小时,驱动效率达到最高。驱动器的结构参数决定GMA设计,从而影响系统驱动效率,即能量损耗率。本文通过分析能量转换环节的能量损耗以相关结构尺寸参数为自变量建立GMA能量损耗率函数 $\xi$ ,得到使 $\xi$ 最小的优化结果。将优化结果带入GMA系统动力学模型,得到优

收稿日期: 2014-01-27

项目基金: 国家自然科学基金项目(11172169); 上海航天基金项目(USCAST2012-02, USCAST2013-10)

作者简介: 赵龙(1989-),男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士生,主要研究方向:精密驱动机构设计及建模分析。

通信作者: 杨斌堂,男,博士生导师。

E-mail: btyang@sjtu.edu.cn

化后的系统动力学响应,并与优化前的动力学响应对比,判断优化前后系统动力学性能优劣,以确定GMA设计。

## 1 隔振平台和GMA的介绍

### 1.1 隔振平台结构及工作原理

隔振平台的设计目标是对隔振对象的沿 $z$ 轴平动、绕 $x$ 和 $y$ 轴转动的三个自由度振动进行隔振。利用四组水平十字摆放的GMA和放大机构推动上平台实现作动,结构如图1所示。实际应用中隔振对象固定于上平台。

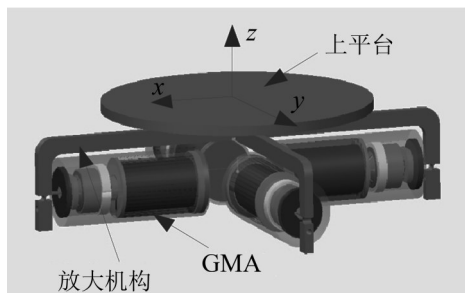


图1 隔振平台的结构示意图

图2为隔振平台的其中一个GMA和放大机构作动原理图。向GMA中通入电流后,输出杆在水平方向产生位移,弹性薄片在水平方向刚度较大,可将GMM棒产生的位移传递给放大机构,同时由于其转动刚度较小,可绕一垂直于纸面轴向产生一定的转动弯曲,从而保证放大机构绕如图2中转轴作相应转动,最终推动上平台运动。此方式,放大机构末端会有水平方向运动,可通过柔性铰链与上平台相连,同时产生竖直方向导向,以抵消水平方向运动分量,使有效位移只产生在竖直方向上。据此,如果四个GMA输出同值同向的位移,可实现平台沿 $z$ 轴的平移;相对的两个GMA输出同值反向的位移,另外两个相对的GMA不动,可实现平台绕 $x$ 、 $y$ 轴的转动。

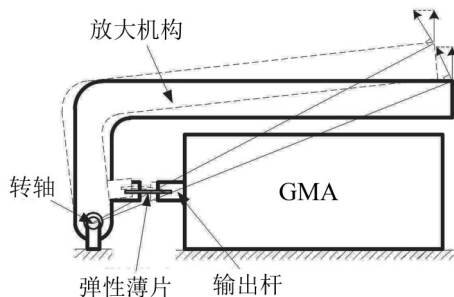


图2 GMA与放大机构的作动原理图

### 1.2. GMA结构及工作原理

本研究的GMA结构如图3所示,编号对应的零件分别为:

- (1) 超磁致伸缩材料(GMM)棒;
- (2) 电磁线圈;
- (3) 导磁内套筒;
- (4) 导磁外套筒;
- (5) 导磁后端盖;
- (6) 外套筒后端盖;
- (7) 外套筒;
- (8) 导磁圆柱;
- (9) 导磁前端盖;
- (10) 直线轴承;
- (11) 输出杆;
- (12) 占位圆筒;
- (13) 碟形弹簧;
- (14) 外套筒前端盖。

本文应用的GMA利用磁致伸缩材料的变形机理、磁控特性以及磁机耦合特性<sup>[4]</sup>作动。GMM棒由于磁致伸缩效应将通电线圈产生的磁能转换为机械能,通过输出杆输出机械能。碟形弹簧为GMM棒提供预应力,其大小通过旋拧外套筒前端盖调节。导磁套筒、导磁前端盖、导磁后端盖和导磁圆柱组成导磁回路。

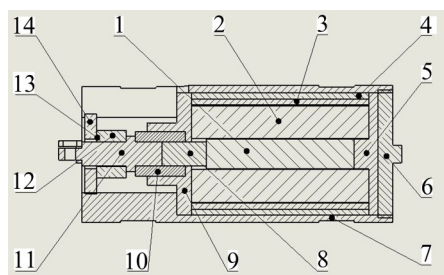


图3 GMA结构图

## 2 GMA的能量损耗

### 2.1 GMA系统能量损耗

给GMA输入电能( $W(I)$ ),经过电磁线圈转换为磁能,这一过程中既存在电阻产热损耗能量( $Q_R$ ),又存在漏磁损耗能量( $W_{leak}$ );通过磁致伸缩效应,GMM棒将作用在其内部的磁能即驱动磁能( $W_{rod}$ )转换为机械能,其磁机转换效率( $K_{33}$ )决定这一过程的损耗能量( $W_{K33}$ ),它是材料本身属性,一旦材料和尺寸确定以后就无法改变,所以这部分损耗是无法控制的;GMM棒的机械能经过放大机构输出( $W_{out}$ ),这一过程有放大机构变形后储存的弹性势能( $U_e$ ),它没有参与到能量输出,而是以势能的形式储存在放大机构中,本研究规定其亦为机械能损耗。图4给出从电流输入到位移放大机构输出整个过程的能量传递流程,其中 $W_{loss}$ 为总损耗能量。

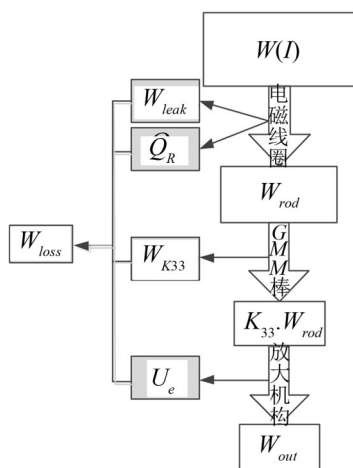


图4 GMA能量传递流程图

由图4可以得到输出能量、总损耗能量和能量损耗率分别为

$$W_{out} = W(I) - W_{loss} \quad (1)$$

$$W_{loss} = W_{leak} + Q_R + W_{K33} + U_e \quad (2)$$

$$\xi = \frac{W_{loss}}{W_{rod}} = \frac{W_{leak} + Q_R + W_{K33} + U_e}{W_{rod}} \quad (3)$$

## 2.2 电磁耦合损耗

电磁耦合损耗包括两部分，一部分是电磁线圈漏磁损耗的能量，另一部分是通电线圈电阻产热耗散的能量。

### (1) 电磁线圈漏磁的损耗能量

通入电磁线圈的电流产生变化的磁场，作用在GMM棒中的磁能决定了其磁化效果的优劣，从而影响GMA的工作性能。磁场在GMA磁路中传递情况可由图5表示。

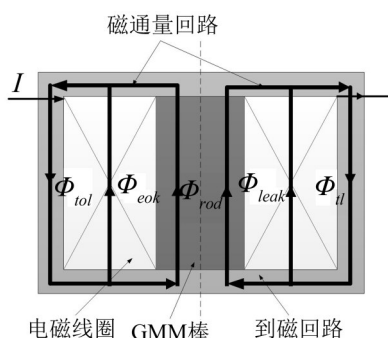


图5 GMA磁路结构简图

图中 $\Phi_{rod}$ 为通过GMM棒的磁通量， $\Phi_{ol}$ 为通电线圈产生的总磁通量， $\Phi_{leak}$ 为线圈的漏磁通量。在基于能量损耗率最小的GMA磁路参数设计中，应使输入电流一定的情况下，产生较大的 $\Phi_{rod}$ ，同时产生较小的 $\Phi_{leak}$ ， $\Phi_{rod}$ 对应驱动磁能 $W_{rod}$ ， $\Phi_{leak}$ 对应漏磁能量 $W_{leak}$ 。

基于对GMA的磁场分析得到其等效磁路和电

路模型，如图6所示，其中 $R_{path}$ 、 $R_{rod}$ 、 $R_{leak}$ 分别为GMA磁路磁阻抗、电磁线圈漏磁阻抗、GMM棒的磁阻抗， $R_{coil}$ 、 $L_{coil}$ 、 $L_{leak}$ 分别为电磁线圈电阻、电磁线圈电感、电磁线圈的漏磁电感<sup>[2]</sup>。由于电磁线圈的匝线之间有一定缝隙，缝隙之间形成小的电磁体，有自己的磁感应线，而且是闭合的，所以会产生 $L_{leak}$ 。

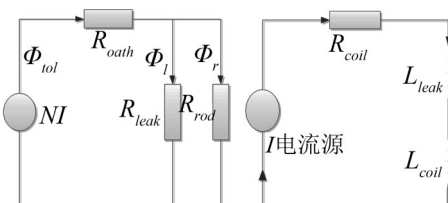


图6 GMA等效磁路和电路模型

电磁线圈的结构尺寸可以由以下形状参数描述： $\alpha = \frac{a_2}{a_1}$ ， $\beta = \frac{l}{2a_1}$ 和 $\gamma = \frac{a_1}{d}$ 。其中由于GMM棒尺寸已确定，则电磁线圈内径 $a_1$ 和电磁线圈长度 $l$ 随之确定； $a_2$ 为电磁线圈的外径； $d$ 为GMM棒的直径。

假设在磁路中分布着线性软磁材料，依据基于线圈横截面的比奥—萨法尔定理，可以推导出电磁线圈内部漏磁电感的估算公式<sup>[3]</sup>

$$L_{leak} = \mu_0 \pi^2 G^2 N^2 \left( r \frac{(\gamma^2 - 1)(\alpha + 1)}{\gamma(\alpha - 1)} + \frac{1}{6} a_1 (\alpha + 1)(\alpha + 3) \right) \quad (4)$$

$G$ 为电磁线圈的形状参数，是 $\alpha$ 和 $\beta$ 的函数

$$G = \frac{1}{5} \left( \frac{2\pi\beta}{\alpha^2 - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \ln \left( \frac{\alpha + (\alpha^2 + \beta^2)^{\frac{1}{2}}}{1 + (1 + \beta^2)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (5)$$

$N$ 为线圈匝数

$$N = \ln_1(a_2 - a_1) n_2 = \frac{l(a_2 - a_1)}{\eta_1 \eta_2 d_0^2} \quad (6)$$

其中 $d_0$ 为电磁线圈的漆包绕线直径， $\eta_1$ 为电磁线圈的轴向绕线系数， $\eta_2$ 为电磁线圈的径向绕线系数，其值随着漆包绕线直径的变化而变化，一般取 $\eta_1 = 1.05$ ， $\eta_2 = 1.15$ 。

根据磁能理论，可用输入电流 $I$ 和 $L_{leak}$ 表示磁路漏磁的能量损耗

$$W_{leak}(a_2) = \frac{1}{2} L_{leak} I^2 \quad (7)$$

### (2) 线圈产热的能量损耗

电磁线圈的电阻计算公式为<sup>[3]</sup>

$$R_{coil} = \frac{N^2 \rho \pi (\alpha + 1)}{\lambda l (\alpha - 1)} \quad (8)$$

其中 $\lambda$ 为电磁导线的形状因子，当导线截面为

圆形时取  $\frac{\pi}{4}$ ;  $\rho$  为导线材料的电阻率。

可求出电磁线圈电阻的产热

$$Q_R(a_2) = I^2 R_{\text{coil}} t \quad (9)$$

### 2.3 磁机耦合损耗

在磁场作用下 GMM 将磁能转换为机械能, 能量转换比例为磁机耦合系数  $K_{33}$ ,  $K_{33}$  越高说明能量转换效率越高, 它表示为机械能  $W_{\text{mech}}$  与磁能  $W_{\text{mag}}$  的比值

$$K_{33} = \frac{W_{\text{mech}}}{W_{\text{mag}}} \quad (10)$$

$K_{33}$  通常由实验测得, 常用的方法有三参数法和频率共振法<sup>[4]</sup>。实验结果一般为  $K_{33}=0.3\sim0.75$ , 本文中取  $K_{33}$  理想状态下的值 0.75。则磁机耦合损耗能量为

$$W_{K33} = (1 - 0.75)W_{\text{rod}} \quad (11)$$

### 2.4 放大机构的机械损耗

通过分析放大机构的变形情况来求得其弹性势能, 图7为放大机构的作动示意图, 对物理模型作以下假设:

(1) 将直角弯曲的放大杠杆分解为两段: 竖直段和水平段, 分别考虑其应变能情况;

(2) 负载作用力与放大机构处在相同的竖直平面内;

(3) 将放大机构的两段均看作细长悬臂梁, 认为杆的径向尺寸远小于轴向长度, 径向尺寸在计算应变能的过程中忽略不计, 从而剪力做功远小于弯矩做功, 忽略剪力做功;

(4) 竖直段的变形量和水平段的变形量之间的相互影响忽略不计。

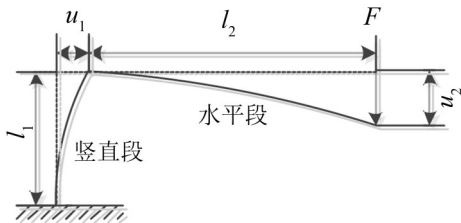


图7 放大机构的作动示意图

图7中, 假设放大机构下端固定, 某一时刻其末端受竖直方向幅值为  $F$  的负载力, 使放大机构竖直段产生水平方向的弯曲, 其挠度为  $u_1$ ; 同时使放大杠杆水平段产生竖直方向的弯曲, 其挠度为  $u_2$ 。

根据以上假设和材料力学简支梁应力应变理论分别求出竖直段和水平段的弹性势能

$$U_{e1} = \frac{F^2 l_2 l_1^2}{2EI} \quad (12)$$

$$U_{e2} = \frac{F^2 l_2^3}{6EI} \quad (13)$$

其中  $E$  为放大机构材料的弹性模量; 式(14)为放大机构截面惯性矩  $I$  的计算公式。放大机构结构参数包括放大机构竖直段长度  $L_1$ 、水平段长度  $L_2$ , 横截面的尺寸参数  $a$ 、 $b$ 、 $m$ 、 $n$ 。为提高强度, 放大机构横截面选为工字型, 如图8所示

$$I = \frac{ab^3 - (a-n)(b-2m)^3}{12} \quad (14)$$

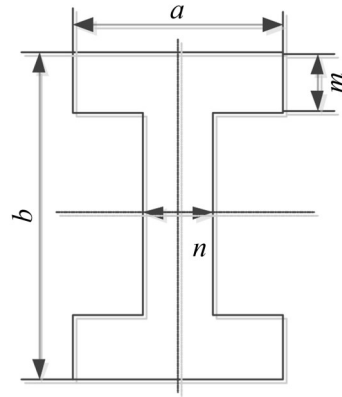


图8 放大机构工字型横截面尺寸参数

## 3 GMA 尺寸参数优化设计

### 3.1 驱动磁能计算

GMA 的磁路由上下导磁端盖、导磁套筒和 GMM 棒构成, 经简化后磁回路如图9, 相应磁路各部分的磁阻分别为  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ , 等效横截面积分别为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ , 等效长度分别为  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 。根据磁通连续性定律和安培环路定律<sup>[5]</sup>推导出通电线圈作用在 GMM 棒的磁通量  $\Phi_{\text{rod}}$  为

$$\Phi_{\text{rod}} = \frac{NI}{R} = \frac{NI}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (15)$$

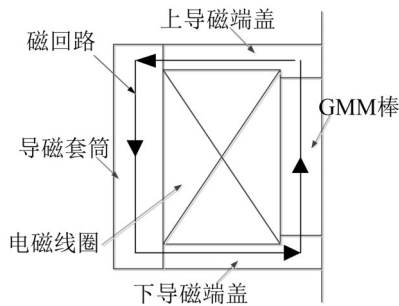
其中  $R_i = \frac{l_i}{\mu_i A_i}$ ,  $\mu_i$  为磁路材料的磁导率,  $i=1, 2, 3$ 。

则作用在 GMM 棒上的磁场强度  $H$  为

$$H = \frac{NI}{\mu_3 A_3 \left( \frac{l_1}{\mu_1 A_1} + \frac{l_2}{\mu_2 A_2} + \frac{l_3}{\mu_3 A_3} \right)} \quad (16)$$

前后导磁端盖形状尺寸相同, 盖厚为  $t_1$ ,  $r$  为 GMM 棒半径, 则端盖半径为  $a_2 + r$ ; 电磁线圈长度为  $l$ , 则导磁套筒长为  $l + 2t_1$ , 壁厚为  $t_2$ 。前后导磁端盖的等效磁路长度为  $l'_1 = a_2 + r + \frac{t_2}{2} + \frac{l - l_r}{2}$ , 等效面积为  $A_1 = t_1 l'_1 \sqrt{\pi}$ ; 导磁套筒磁路等效长度为  $l'_2 = l + t_1$ , 等效面积为  $A_2 = \pi \left( (a_2 + t_2)^2 - a_2^2 \right)$ 。



图9 GMA磁回路示意图<sup>[4]</sup>

根据磁能理论可求出  $W_{\text{rod}}$

$$W_{\text{rod}}(a_2, t_1, t_2) = \frac{1}{2} \mu_3 H^2 V \quad (17)$$

其中  $V$  为磁场分布空间的体积, 即磁路所包围的体积。

### 3.2 优化求解

由以上分析得GMA的能量损耗率

$$\xi(a_2, t_1, t_2, l_1, l_2, a, b, m, n) = \frac{\frac{1}{2} L_{\text{leak}} I^2 + I^2 R_{\text{coil}} t + \frac{F^2 l_2 l_1^2}{2EI} + \frac{F^2 l_2^3}{6EI}}{\frac{1}{2} \mu_3 H^2 V} + 0.25 \quad (18)$$

表2 设计变量初始值和优化结果

设计变量	$a_2$	$t_1$	$t_2$	$l_1$	$l_2$	$a$	$b$	$m$	$n$
优化前	12	2	2.5	25	110	5	8	0	5
优化后	16.492	3.972 1	2.285 1	22.095	152.67	8.124 9	19.995	3.584 5	6.343 3

表3 优化前后能量损耗率和损耗能量结果对比

能量损耗	优化前	优化后
$\xi$	24.207 %	8.201 8 %
$W_{\text{leak}}$	0.001 640 5 J	0.008 078 7 J
$Q_R$	3.417 2 J	7.140 0 J
$U_e$	0.166 8 J	0.017 110 J
$W_{\text{rod}}$	14.812 J	87.349 J

由表2和表3对比可知由于  $a_2$  增大, 线圈漏磁能  $W_{\text{leak}}$  随之增大, 但是其量级在  $10^{-2}$  J 以下, 较驱动磁能  $W_{\text{rod}}$  小得多, 影响可以忽略; 同样由于  $a_2$  增大, 使线圈的匝数增加, 电阻产热  $Q_R$  随之增大了 2.09 倍, 但是为了产生更大的驱动磁能  $W_{\text{rod}}$ ,  $Q_R$  的增加是不可避免的, 并且它的增大的倍数远小于  $W_{\text{rod}}$  的增大倍数, 影响可以忽略; 优化后的  $W_{\text{rod}}$  为优化前的 5.90 倍; 优化后的弹性势能  $U_e$  减小为优化前的 0.10 倍, 说明放大机构的刚度、传递机械能的性能明显变好; 基于能量损耗率最小方法优化后的  $\xi$  减小为优化前的 0.34 倍, GMA 驱动效率提高了 16 %。

$\xi$  为优化设计的目标函数, 其中电磁线圈尺寸  $a_2$ , GMA 磁路尺寸  $t_1, t_2$ , 放大机构尺寸  $l_1, l_2, a, b, m, n$ , 为优化设计的设计变量。同时设计变量应满足表1所示约束条件(单位为 mm)。

表1 设计变量约束条件

结构尺寸	上限	下限
$a_2$	20	5.15
$t_1, t_2$	5	0
$l_1$	50	12
$l_2$	225	150
$a$	15	2
$b$	25	5
$m$	12.5	1
$n$	15	2

在以上约束条件下, 根据式(18), 利用遗传算法进行优化计算<sup>[6]</sup>, 则可求出以目标函数  $\xi$  为最小值的唯一对应的各优化设计的设计变量。设计变量初始值和优化结果见表2(单位为 mm)。

目标函数和各部分能量损耗优化结果见表3。

### 3.3 优化后的GMA动力学响应分析

结合图2所示GMA与放大机构, 绘出动力学模型简图10, 其中  $x_1$  为GMM棒的输入位移;  $x_2$  为放大机构竖直段等效质量的位移;  $x_3$  为放大机构水平段等效质量的位移;  $k_1$  为碟形弹簧的刚度;  $k_2$  为GMM棒输出端薄片的扭转刚度;  $K_{e1}$  为放大机构竖直段等  $k_1$  为碟形弹簧阻尼,  $c_2$  为放大机构竖直段等效阻尼,  $c_3$  为放大机构水平段等效阻尼;  $m_1$  为GMM棒输出杆和碟形弹簧质量之和,  $m_2$  为放大机构竖直段等效质量,  $m_3$  为放大机构水平段和负载的总质量;  $F_{\text{GMM}}$  为GMM棒的输出力;  $r$  为输出杆推动放大机构转动的位置与放大机构转轴的距离。

根据图7和简支梁挠度积分法计算出放大机构竖直段和水平段的变形位移分别为

$$u_1 = \frac{Fl_2 l_1^2}{2EI} \quad (19)$$

$$u_2 = \frac{Fl_2^3}{3EI} \quad (20)$$

将式(19)和(20)分别带入式(12)和(13), 求出放大机构水平段和竖直段的等效刚度分别为

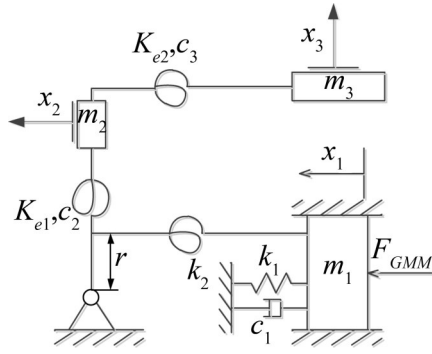


图 10 GMA 和放大机构动力学简图

$$K_{e1} = \frac{4EI}{l_1^2 l_2} \quad (21)$$

$$K_{e2} = \frac{3EI}{l_2^3} \quad (22)$$

GMA 的动力学方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(I) \quad \text{输入电流表征输入能量}$$

状态变量表征  
动力学响应

输入向量中的  $A_i$ 、 $l_i$   
为磁路尺寸参数，表  
征磁路漏磁能损耗

刚度矩阵中的  $K_{e1}$ 、 $K_{e2}$  含有  
放大机构的尺寸参数：

$$l_1, l_2, a, b, m, n,$$

表征放大机构的应变势能损耗

其中

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{J_2}{l_1^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{J_3}{l_2^2} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + \frac{l_1^2 c_2 + l_2^2 c_3}{r^2} & -\frac{l_1 c_2}{r} & -\frac{l_2 c_3}{r} \\ -\frac{l_1 c_2}{r} & c_2 & 0 \\ -\frac{l_2 c_3}{r} & 0 & c_3 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + \frac{k_2 + l_1^2 K_{e1} + l_2^2 K_{e2}}{r^2} & -\frac{l_1 K_{e1}}{r} & -\frac{l_2 K_{e2}}{r} \\ -\frac{l_1 K_{e1}}{r} & K_{e1} & 0 \\ -\frac{l_2 K_{e2}}{r} & 0 & K_{e2} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$F(I) = \begin{bmatrix} \frac{d_{33} N l_r k_r}{\mu_3 A_3 \left( \frac{l_1'}{\mu_1 A_1} + \frac{l_2'}{\mu_2 A_2} + \frac{l_3'}{\mu_3 A_3} \right)} I \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (27)$$

式(18)中,  $F(I)$  是 GMM 棒产生的输出力<sup>[7]</sup>, 它是由输入电流  $I$  控制的变量, 其中  $d_{33}$  为 GMM 的轴向压磁系数,  $l_r$  为 GMM 棒的长度,  $k_r$  为 GMM 棒的刚度。这样, GMA 的动力学模型就用输入电流  $I$ , 经过中间过程的能量损耗环节, 最终由状态变量  $x$  表示出来。

优化前后的负载均取 5 kg, 输入相同的电流, 将优化前后的尺寸参数分别带入动力学模型, 得出动力学响应对比曲线。

图 11 通入频率为 1 Hz, 幅值为 3 A 的正弦电流, 优化后的位移响应最大值为 0.73 mm, 达到了隔振平台对驱动器输出位移为 0.5 mm 的要求, 且曲线光滑平稳。图 12 和图 13 分别为通入 3 A 的直流电系统的位移和加速度响应。由图 12 可知优化后的平稳位移响应为 0.73 mm, 优化前的平稳位移响应为 0.32 mm, 优化后的位移响应幅值是优化前的 2.3 倍, 这主要有两个原因, 一是放大机构尺寸变大, 增大了放大比例, 二是 GMA 的驱动性能变强, 在相同电流输入的情况下产生更大的位移输出。

由图 12 和图 13 可知当载荷在 0s 突然施加时, 对系统产生冲击, 位移和加速度响应都有振荡, 优化后的初始时刻加速度响应为  $3.2 \times 10^3 \text{ mm/s}^2$ , 优化前为  $3 \times 10^4 \text{ mm/s}^2$ , 优化后的初始时刻加速度是优化前的 0.11 倍, 并且优化后的稳定时间为 0.12 s, 优化前为 0.25 s。

由以上仿真分析可知优化后系统的位移响应幅值增加, 对冲击载荷的位移响应幅值减小, 且稳定时间缩短。

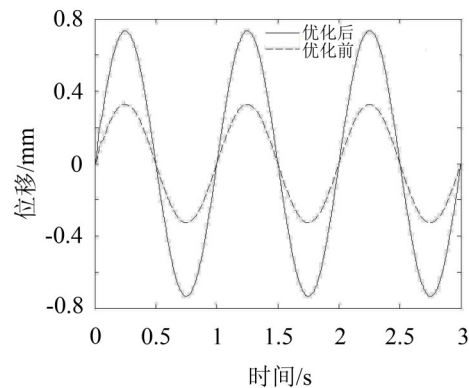


图 11 通正弦电流的驱动系统位移响应对比图

## 4 结 语

本文依据三自由度微振动主动隔振平台对其驱动部件的性能要求, 分析 GMA 和放大机构的电-磁

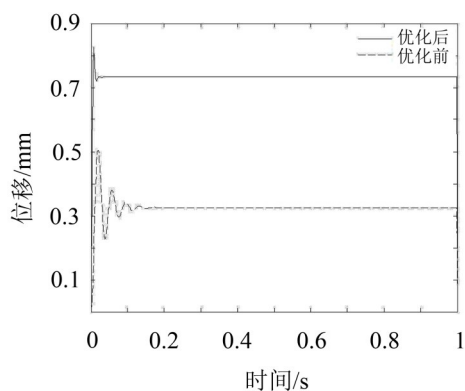


图12 通直流电的驱动系统位移响应对比图

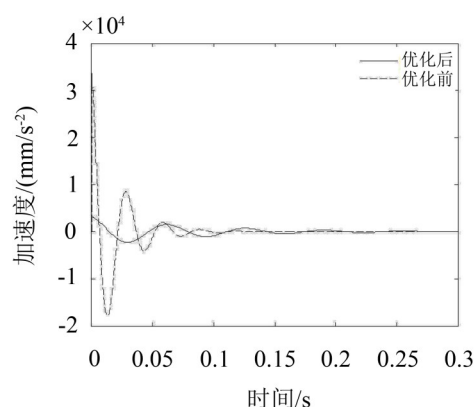


图13 通直流电的驱动系统加速度响应对比图

一机械能量耦合特性,建立能量损耗率最小的优化方法,对GMA和放大机构的结构参数进行优化。最后得到的优化结果在三方面均较好地满足隔振平台对驱动系统的性能要求:

**驱动效率:**优化后的能量损耗率为优化前的0.34倍,驱动效率提高;由于电磁线圈匝数增大,作

用在GMM棒上的驱动磁能增大为原来的5.90;放大机构在作动过程中的损耗能量损耗仅为优化前的0.10倍。

**驱动幅值:**在负载为5 kg,输入电流相同的情况下,通过对驱动系统的动力学模型仿真可知优化后的输出幅值增大为原来的2.28倍,满足隔振平台对驱动系统0.5 mm的位移输出要求,并且位移曲线光滑平稳。

**稳定性:**同样在负载为5 kg,输入电流相同的情况下,优化后的驱动系统对瞬时冲击的振动加速度幅值响应仅为原来的0.11倍,且稳定时间缩短50%,故优化后的驱动系统响应更快速、稳定性更强。

#### 参考文献:

- [1] 王社良,纪庆波,代建波,等.基于超磁致伸缩作动杆的结构振动主动控制研究[J].**噪声与振动控制**,2010,06:23-26;42.
- [2] Engdahl G. Design procedures for optimal use of giant magnetostrictive materials in magnetostrictive actuator applications[J].**Parameters**,2002,1:2.
- [3] G. Engdahl, Handbook of giant magnetostrictive materials [M]. Academic Press, San Diego, USA, (1999).
- [4] 赵海涛,何忠波,李中伟.超磁致伸缩材料的特性参数测量[J].**科学技术与工程**,2008,16:4642-4645.
- [5] 杨斌堂,陶华, Bonis M, 等.磁致伸缩微小驱动器磁路设计[J].**机械科学与技术**,2005,03:293-295;349.
- [6] 张翠翠,吴伟蔚,陈浩.基于多目标遗传算法的消声器优化设计[J].**噪声与振动控制**,2010,03:141-143;152.
- [7] 谭先涛.超磁致伸缩驱动器的优化设计研究[D].上海:交通大学,2010.

(上接第202页)

- [3] 李伟,朱德懋,黄协清.柔性约束颗粒阻尼于板结构的减振研究[J].**噪声与振动控制**,1998,04:2-5.
- [4] Araki Y, Yokomichi I, Inoue J. Impact dampers with granular materials [J].**JSME**,1985,28:1466-1472.
- [5] Saeki M. Impact damping with granular materials in a horizontally vibrating system [J].**Journal of Sound and Vibration**,2002,251(1):153-161.
- [6] 段勇,陈前,周宏伟.垂直简谐激励下颗粒阻尼耗能特性的仿真研究[J].**振动与冲击**,2009,02:28-31.
- [7] 毛宽民,陈天宁,黄协清.非阻塞性微颗粒阻尼机理的散

体元研究[J].**西安交通大学学报**,1999,09:80-84.

- [8] 王青梅,陈前.基于碰撞理论的颗粒阻尼计算模型及试验研究[J].**振动、测试与诊断**,2007,27(4):300-303.
- [9] 鲁正,吕西林,闫维明.颗粒阻尼器减震控制的试验研究[J].**土木工程学报**,2012,1(45):243-246.
- [10] 夏兆旺,单颖春,刘献栋.基于悬臂梁的颗粒阻尼实验[J].**航空动力学报**,2007,22(10):1737-1741.
- [11] 胡漂,黄其柏,马慰慈.颗粒阻尼减振性能的试验研究[J].**噪声与振动控制**,2008,05:52-55.
- [12] 朱位秋.随机振动[M].北京:科学出版社,1998.