

大跨空间结构减震控制装置设计与试验研究

赵 祥^{1,2,3}, 王社良^{1,3}, 赵西成^{2,3}, 代建波¹

(1. 西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学材料科学与工程博士后流动站, 陕西 西安 710055; 3. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

摘 要: 基于大跨空间结构振动主动控制方法, 以超磁致伸缩材料为核心元件, 充分利用其输出力大、响应速度快、可靠性高、驱动电压低等优良磁控特性设计出一种将电磁能转化为机械能的减震控制装置—超磁致伸缩作动器, 分析了其工作原理和设计方法, 然后对其进行力和位移输出性能测试。结果表明, 该作动器磁路结构良好, 磁机转换效率较高, 在驱动电流作用下可输出较大的力和位移, 其与驱动电流基本呈线性关系且对电流的变化非常敏感, 为这种作动器在大跨空间结构中的应用打下了良好的基础。

关键词: 大跨空间结构; 减震控制; 超磁致伸缩作动器; 性能测试

中图分类号: TU399

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)01-0033-08

随着建筑物跨度增大、高度增加以及结构形式日益复杂, 按传统设计方法设计的工程结构在强地震/强风等作用下, 很难完全避免损伤和破坏。结构振动控制可以有效地减轻结构在强地震/强风等动力作用下的反应和损伤积累, 有效地提高结构的抗震能力和抗灾性能, 是结构抗震减灾积极有效的方法和技术。目前, 利用智能材料制作减震控制装置进行结构振动的主动控制是土木工程领域研究的热点之一。研究开发的可用于制作控制装置的智能驱动材料主要有电/磁流变液体, 形状记忆材料、压电材料和磁致伸缩材料等^[1]。其中, 超磁致伸缩材料以其良好的物理性能引起了国内外学者的重视。

超磁致伸缩材料是一种在外磁场作用下, 其长度及体积均发生变化, 去掉外磁场后, 又恢复原来尺寸的智能材料, 能高效地实现电磁能与机械能的转换^[2]。自1974年美国的Clark博士发现二元稀土铁合金在常温下磁致伸缩系数能比传统材料(如Fe, Ni)大数十倍后, 人们把这种新型磁致伸缩材料称为超磁致伸缩材料(Giant Magnetostrictive Material, 简称为GMM), 其商品牌号为Terfenol-D^[3]。用GMM制作的作动器具有磁致伸缩应变量大、能量转换效率高、能量密度大、工作电压低、响应速度快、承载能力强等无可比拟的优良特性, 因而适宜用于结构振动的主动控制。

1 大跨空间结构振动主动控制的原理和方法

结构主动控制的流程如图1所示。由图可知, 主动控制系统主要包括计算机控制系统(控制器)、主动控制器系统(作动器)和信息拾取与传输系统(传感器)三大部分。由传感器测量结构干扰, 并通过A/D转换, 反馈至控制器, 控制器计算主动控制力, 并驱动作动器产生所需要的控制力, 实现结构的主动控制。土木工程结构及其干扰、反应、观测和控制构成一个包含原动态系统在内的新动态闭环系统。

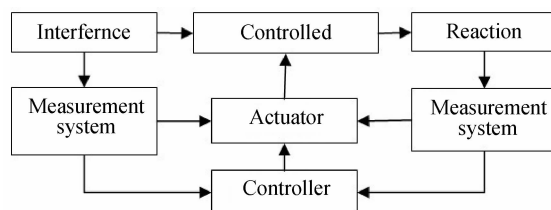


图1 结构主动控制流程

Fig. 1 Structural active control flow

收稿日期: 2011-05-24 修改稿日期: 2011-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178388, 10972168); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(200807030002、20096120120005); 陕西省自然科学基金基础研究基金青年人才项目(2009JQ7005); 西安建筑科技大学人才科技基金(RC0925、QN0913)

作者简介: 赵 祥(1975-), 男, 陕西西安人, 讲师, 博士, 主要从事智能材料及结构振动控制研究。

对于 n 节点的大跨空间结构,具有 $3 \times n$ 个自由度,将作动器集成于结构的部分杆件中形成作动杆.采用主动控制,在地震激励下,结构体系的运动方程为^[4]:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = E\ddot{x}_g(t) + Du(t) \quad (1)$$

式中 $M, C, K \in R^{3n \times 3n}$ 为受控结构的质量、阻尼和刚度矩阵; $\ddot{x}(t), \dot{x}(t), x(t) \in R^{3n}$ 为结构的加速度、速度和位移反应向量; $\ddot{x}_g(t) \in R^n$ 为地面地震加速度向量; $E \in R^{3n \times n}$ 为环境干扰位置矩阵; $D \in R^{3n \times r}$ 为控制器位置矩阵; $u(t) \in R^r$ 为具有 r 维的控制力向量; r 为作动器数目.

采用闭环控制系统,即控制力是位移向量以 $x(t)$,速度向量 $\dot{x}(t)$ 的线性函数^[4].则控制力表达式为:

$$u(t) = K_1 x(t) + C_1 \dot{x}(t) \quad (2)$$

式中 K_1, C_1 为位移向量、速度向量的控制增益矩阵,将式(2)代入式(1),得

$$M\ddot{x}(t) + (C - DC_1)\dot{x}(t) + (K - DK_1)x(t) = E\ddot{x}_g(t) \quad (3)$$

从式(3)可以看出,对于主动控制体系,主动控制力的施加,改变了结构体系的阻尼、刚度和激励荷载,选用合适的控制算法,确定最优的控制力,就可以达到衰减和控制结构的地震反应的目的.所以研究出力大、耗能小、反应迅速、满足最优控制力的主动减震控制装置是实现大跨空间结构减震主动控制的关键所在.

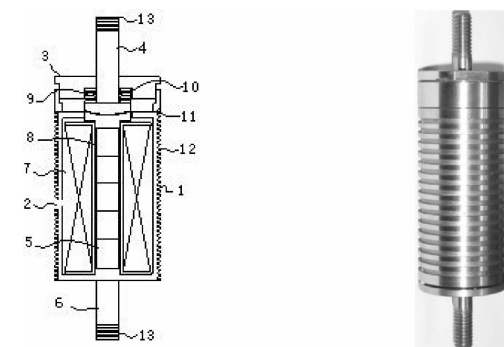
2 超磁致伸缩作动器总体结构设计

2.1 GMM 作动器设计原理

GMM 元件在磁场的作用下可以发生形变从而产生作动力与位移.磁场由励磁绕组来提供,磁场大小可通过调节励磁绕组的电流进行控制.外加磁场的方向应与 GMM 元件产生变形的方向一致,当 GMM 元件中的磁场达到一定值时,元件发生变形,产生作动力.磁场去掉以后,GMM 元件可以自动恢复变形.

2.2 GMM 作动器总体结构设计

图2为设计的GMM作动器内部总体结构示意及GMM作动器实物图.此GMM作动器包括外套、探测线圈、偏置线圈、激励线圈、线圈骨架、GMM元件、作动杆、连接杆、预压碟簧和调节螺母等,具体参数见表1.通电后偏置线圈、激励线圈提供叠加磁场,单层探测线圈用于测量磁场的大小.GMM是低磁导率材料,为了尽可能的提高其工作效率,设计了由GMM元件和高导磁外套筒构成的闭合磁路,因为外套筒的高导磁率,磁通几乎全部被限制于外套筒中,磁力线沿着外套筒的路径流通,均匀穿过GMM元件且与其伸长方向一致,从而降低了漏磁.GMM元件在非工作状态时就通过伸长方向上的碟簧加一足够大的反力,可起到预紧及增加位移输出量的作用.此外,GMM元件只能承受轴向压缩载荷,不能承受弯曲载荷,因此,在作动杆端部设计了“弧形铰”传力装置,隔离由于制造装配误差、外部作用的横向弯曲载荷等因素产生的弯矩,避免对输出性能(力、位移)的影响.当激励线圈通以电流信号时产生磁场,GMM元件产生伸长变化且伸长效应通过作动杆输出给作动对象,断掉电流信号后磁场消失,GMM元件恢复原来形状,完成此作动器的作动效应.



1. Sleeve; 2. Metallic channel; 3. Regulating nut;
4. Actuating rod; 5. GMM element; 6. Linking bar;
7. Coil; 8. Skeleton; 9. Pre-pressed spring;
10. Groove; 11. Arc-hinge; 12. Cooling shin;
13. Thread

图2 GMM作动器总体结构
示意及实物图

Fig. 2 Structure and physical map of GMM

3 GMM 作动器磁路结构设计及分析

3.1 磁场线圈设计

超磁致伸缩材料的磁致伸缩主要是由外加激励磁场引起的,而外加的激励磁场是由绕制的通电线圈产生的.线圈的几何尺寸不仅会影响外加激励磁场的强度和电磁转换的效率,也是 GMM 作动器体积的主要影响因素.另外,在实际应用中,通电线圈不可避免的有电阻损耗,在通电后温度会不断上升,而温度对 GMM 棒所产生得影响也不能忽视.因此线圈的设计应遵循以下步骤:

表 1 GMM 作动器主要参数表
Tab.1 Main parameter of GMM

No.	Components	Parameters	No.	Components	Parameters	No.	Components	Parameters
1	GMM rod diameter	10 mm	6	Bias coil resistance	10 Ω	11	Outer sleeve	
2	GMM rod length	60 mm	7	Detecting coil specifications	enamelled copper wire 0.3 mm	12	Upper end cover Lower end cover	A3 steel
3	Excitation coil number	1 300 n	8	Excitation coil specification	enamelled copper wire 0.5 mm	13	Connecting rod	
4	Excitation coil resistance	15 Ω	9	Bias coil specifications	enamelled copper wire 0.5 mm	14	Actuating rod	Stainless steel
5	Bias coil number	1 300 n	10	Coil skeleton	Aluminum	15	disc spring group (four pieces)	Inside diameter 10.2 mm Outside diameter 20 mm Height 1.6 mm

(1)确定线圈几何尺寸

在保证 GMM 棒能够在线圈骨架内自由伸缩的前提下,缠绕通电线圈的内径应尽量接近 GMM 棒的直径,因为二者之间的空隙越大,整个系统的电磁转换效率越低.而试验研究表明^[5],在整个螺线管中,中心处的磁场强度最大,两端的磁场强度明显偏低,整体磁场强度呈现不均匀形态,设计的通电线圈缠绕长度稍长于 GMM 棒长度(1.05 倍~1.1 倍),且两端密绕,可使 GMM 棒尽可能处在相对均匀的磁场中,GMM 元件才能获得最佳的性能.

(2)确定线圈缠绕匝数及导线直径

电磁线圈在通电后所产生的磁场强度与电流强度、线圈缠绕匝数和线圈形状尺寸有关.应该先根据 GMM 性能,确定需要产生的磁场强度,再考虑电源可靠性及输入电流的大小,按式(4)进行线圈缠绕匝数的计算^[6]:

$$H=\frac{Ni}{l}$$
(4)

式中, N 为线圈匝数, i 为电流强度, l 为线圈的缠绕长度.

根据通电电流最大值,选择通电导线,设导线为圆径导线,由式(5)确定导线直径^[7].

$$d_w\geqslant 1.13\sqrt{I_{\max}/J}$$
(5)

式中, I_{\max} 为通电电流最大有效值, J 为电流密度值.因一般地震持续时间较短,故作动器属于短时工作制, J 可取 10 A/mm²~30 A/mm².

(3)偏置磁场设计

GMM 磁致伸缩效应只与外加激励磁场大小有关,而与激励磁场方向无关.地震来临后,GMM 是在振动状态下工作,通电线圈中输入的是交变电流,GMM 处于交变激励磁场作用下,磁致伸缩形变输出变化频率是激励场频率的两倍,即发生倍频效应^[7].为了消除 GMM 倍频现象,精确对其实施控制,应该布置偏置磁场.

布置偏置磁场有以下几种方式:设置永磁体偏置磁场;设置独立偏置线圈,在驱动线圈外围单独设

计另一个通电线圈提供偏置磁场;使用同一激励线圈,在激励电流上叠加直流偏置电流。

本作动器设计通过设置偏置线圈来提供偏置磁场。虽然偏置线圈增加了 GMM 作动器的体积和质量,但可方便调节偏置磁场强度,能很好满足作动器精度控制要求。

3.2 GMM 作动器磁场有限元建模及分析

磁路设计基本目标是在 GMM 棒区域内,产生所需强度且均匀的磁场,使系统磁回路的磁位降落,尽可能多的发生在 GMM 棒所在支路上。GMM 作动器设计的闭合磁路是由高导磁率 A3 钢制作的外套筒、上下端盖和 GMM 棒组成的。这个完整的闭合磁路可把大多数由线圈产生的磁通约束在磁路内,漏磁较小。

GMM 作动器属于 3D 轴对称的几何结构,其纵向截面为 2D 轴对称结构,为简化有限元计算,可以建立 GMM 作动器的 2D 轴对称有限元模型。在 ANSYS 中,对轴对称结构的一半建立模型,选用 PLANE 53 单元并以四节点四边形或三节点三角形划分网格,有限元模型如图 3 所示。对线圈施加电流密度载荷,得到 GMM 作动器的 2D 平面轴对称静磁分析结果,图 4 为 GMM 作动器磁力线分布图,可看到由于作动器外套筒、上下端盖和 GMM 棒形成了闭合磁路,其漏磁几乎为零,且 GMM 棒所处磁场比较均匀。

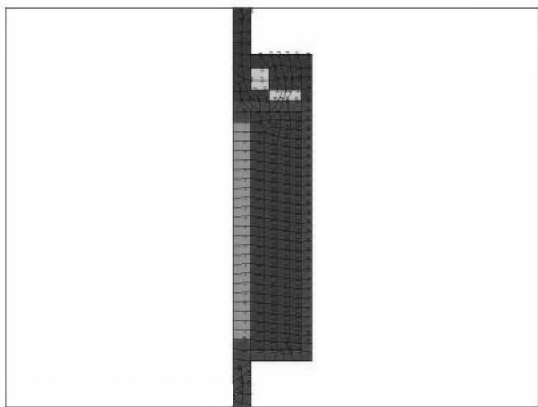


图3 GMM 作动器有限元模型图

Fig. 3 Finite element model of GMM

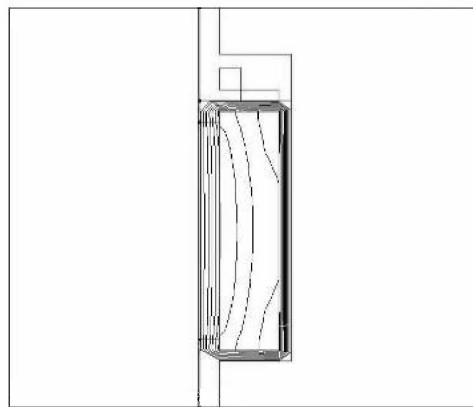


图4 GMM 作动器磁力线分布

Fig. 4 Distribution of magnetic line of GMM

3.3 磁路试验

为了检验磁路设计的正确性,对 GMM 作动器有无套筒时电流与输出力的关系进行了对比试验,如图 5 所示,对比结果见表 2。从中可看出在同样大小预压力和电流下有套筒时的输出力比没有套筒时

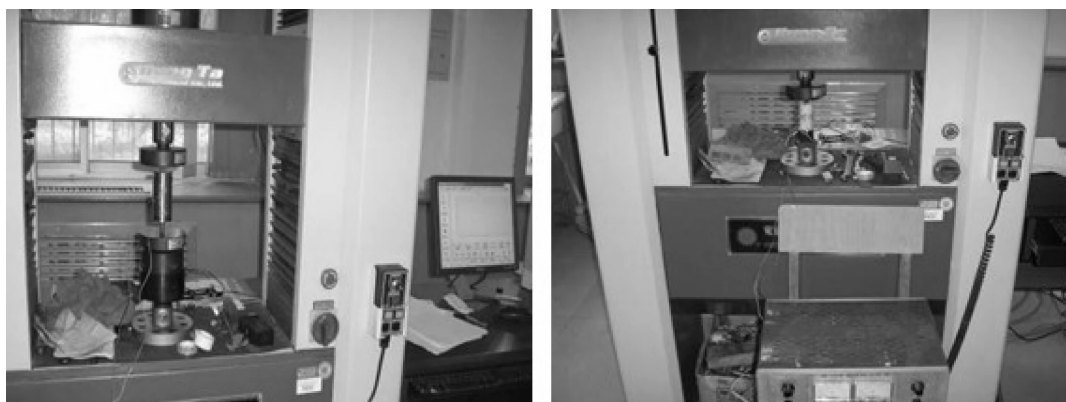


图5 有无套筒时 GMM 作动器输出力对比试验

Fig. 5 The output force comparative test of GMM with or without the sleeve

要大很多,从而证明了高导磁外套筒可很好地将磁通限制在套筒内,降低漏磁现象,与有限元分析的结果一致.

表 2 GMM 作动器有无套筒的情况下电流与输出力的关系(预压应力 6MPa)

Tab. 2 The relationship of current and output force when GMM with or without the sleeve(Pre-pressure of 6MPa)

Current/A	Output force with the sleeve/N	Output force without the sleeve/N	Current/A	Output force with the sleeve/N	Output force without the sleeve/N
0.2	112	5	1.8	1 235	212
0.6	453	68	2.2	1 497	245
1.0	784	137	2.6	1 857	272
1.4	1 050	173	3.0	2 033	301

4 GMM 作动器预压力装置设计

理论分析和工程经验表明,在一定预压力作用下,GMM 磁致伸缩特性将得到很大改善.对 GMM 施加一定大小的轴向预压力,能获得更大的位移输出.此外稀土 GMM 为脆性材料,其抗压强度约 700 MPa,但其抗拉强度仅能达到约 28 MPa,施加一定预加压应力可避免 GMM 工作时受到拉伸作用.故作动器设计时采用碟簧组和调节螺母构成预压机构给 GMM 棒两端预加一定的预压力,并使所加预压力与棒轴平行,均匀分布,避免产生弯矩,图 6 为碟簧组示意图.为了利用该碟簧组提供精确的预压力作用,对碟簧组进行受压试验,得到碟簧组荷载-变形本构关系,如图 7 所示.可看出碟簧组提供的预压力与变形基本呈线性关系.据此,可在调节螺母圆周上刻制刻度线,以控制预压力的大小.

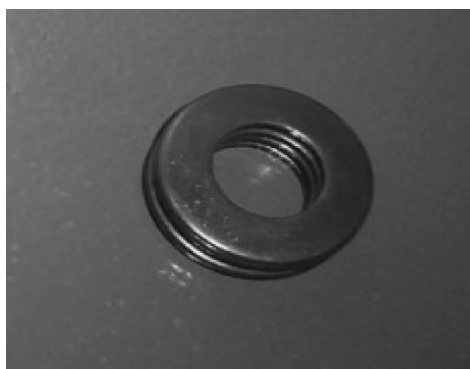


图 6 预压力装置中的碟簧组实物

Fig. 6 The Disc spring group in pre-pressure device

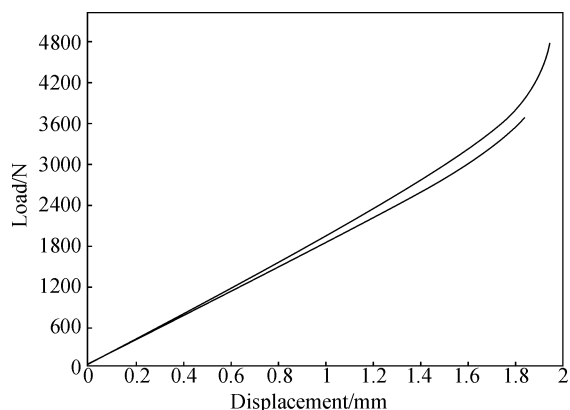


图 7 碟簧组本构关系

Fig. 7 The constitutive relation of disc spring group

5 GMM 作动器温控方法

GMM 工作性能受温度影响较大,GMM 作动器的热源主要来自三部分:线圈的电阻发热、涡流和动态工作中磁滞效应、机械滞回效应等引起的热量. GMM 作动器是电流激励器件,线圈电阻发热与电流平方成正比,这是热源主要部分,因此对 GMM 作动器应考虑其冷却问题,对其进行温度控制,使其工作在最优范围内.

常用的温控方法主要有水冷,风冷,添加相变材料以及电热制冷等措施,但水冷和风冷的方式都需要增加辅助设备,限制了 GMM 作动器使用,相变材料添加量也常受作动器内部空间结构限制^[9]. 本文设计 GMM 作动器时,考虑到地震作用时间一般较短、频率较低,故可认为作动器在短时间内温度不高,所以仅采用在作动器外壁增加环形肋片,增大散热面积来进行温度控制,具体构造见图 2.

6 GMM 作动器输出性能测试试验

6.1 GMM 作动器输出力性能测试

本次试验通过预压力装置对 GMM 元件施加 2~20 MPa 预压应力,分别输入电流后进行了 GMM 作动器的输出力测试如图 8 所示.图 9 是预压应力与 GMM 作动器输出力关系(稳压驱动电流为 0~3 A).由图可知,GMM 作动器在预压应力达到 6 MPa 时达到峰值,在最大驱动电流 3 A 输入下,输出力可达 2 033 N,比之同等驱动电流下预压应力为 2 MPa 时的 1 099 N,增幅达到 85%,输出力与输入电流之间基本呈线性关系,且对电流的变化非常敏感,表明预压应力的施加对提高作动器的输出力作用较大.在预压应力为 2~6 MPa 时,GMM 作动器的输出力也随预压应力增加而增大;而当预压应力超过 6 MPa 时,其输出力开始随预压应力增大而减小,当预压应力增大到 20 MPa 时,驱动电流为 3 A 时 GMM 作动器输出力仅为 1 598 N,表明预压应力不易过大.因此,取 GMM 作动器的工作预压应力为 6 MPa.



图 8 GMM 作动器输出力性能测试试验

Fig. 8 The force output performance test of GMM

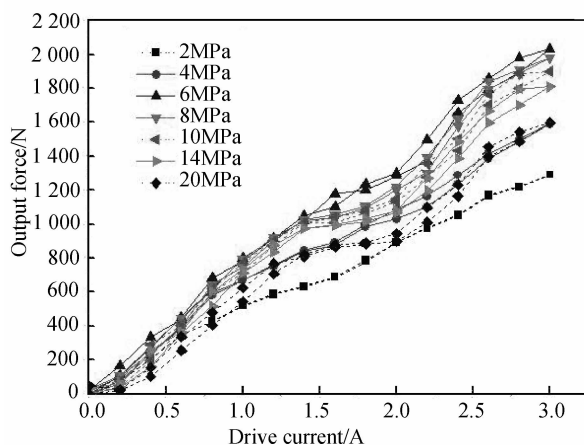


图 9 预压应力与 GMM 作动器输出力关系

Fig. 9 The Relationship of pre-Pressure and force output of GMM

在 6 MPa 预压应力下对 GMM 作动器进行加磁和退磁试验,研究 GMM 磁滞现象,结果如图 10 所示.可看出 GMM 作动器在退磁时有磁滞现象.磁滞现象主要是由不可逆畴壁移动引起,是 GMM 本身固有特性,无法完全消除,但可通过施加适当预压应力和偏置磁场使之降低,以提高器件可重复使用性.图 10 中曲线是在施加预压力和偏置磁场后的磁滞曲线,可看出磁滞现象并不明显,证明施加预压力和偏置磁场的有效性.

从图 10 还可看出,在 6 MPa 的预压应力下,输入电流为 0~3 A 时,输出力随着电流增大而增大.当电流达到 3 A 时,输出力可以达到 2 033 N,说明 GMM 作动器在较小能量输入下就可以产生很大控制力,为结构振动主动控制的实现提供了新途径.

6.2 GMM 作动器输出位移性能测试

本次试验通过预压力装置对 GMM 施加 2~10 MPa 预压应力,研究不同预压应力对 GMM 作动器输出位移的影响,如图 11 所示.图 12 为不同预压力作用下(2~10 MPa)作动器的输出位移随电流强度(0~3 A)变化的曲线图.

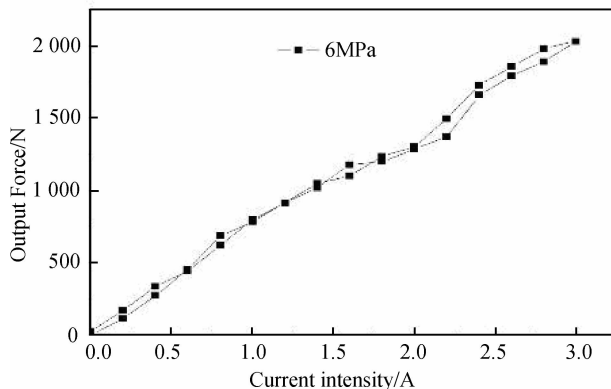


图 10 GMM 作动器的磁滞曲线

Fig. 10 Hysteresis curve of GMM



图 11 GMM 作动器输出位移性能测试试验

Fig. 11 The displacement output test of GMM

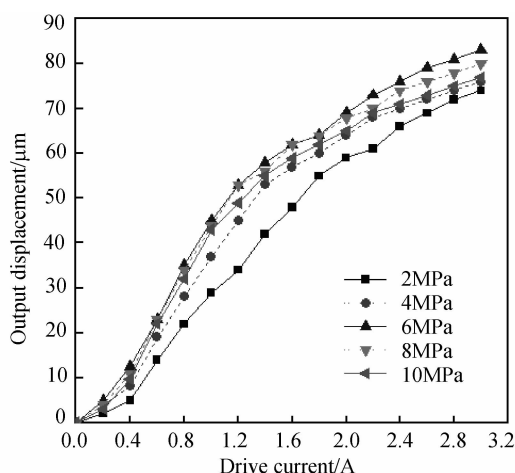


图 12 预压应力与 GMM 作动器输出位移性能的关系

Fig. 12 The relationship of pre-pressure and displacement output of GMM

由图 12 可知,预压应力在 2~6 MPa 时,随着预压力的增加,作动器输出位移逐渐增大,说明施加一定的预压力可使磁致伸缩率显著增长.但当预压应力超过 6 MPa 时,随着预压力增加作动器输出位移反而减小.因为预压应力过大,在相同磁场强度作用下,部分磁畴无法克服压应力发生偏转,从而导致了磁致伸缩率减小.

从图 12 中还可看出,作动器在 6 MPa 的预压应力下位移输出为最大.位移输出在输入电流为 0.2~1 A 时线性度较好,3 A 以后基本趋于平缓.

7 结 论

GMM 作为一种新型智能材料已被广泛应用于社会各个领域,但是在土木工程行业中的应用研究却比较少.本文利用 GMM 制作了一种新型作动器,并通过试验研究了其在结构振动控制中的可行性,得到结论如下:

(1) GMM 具有磁致伸缩应变量大、能量转换效率高、能量密度大、工作电压低、响应速度快、承载能力强等优良特性,因而能较好地适用于大跨空间结构的主动减震控制.

(2) 通过研究 GMM 变形机理及磁控特性,结合大跨空间结构减震控制特点设计了一种适合于土木工程结构的 GMM 作动器,并制作了作动器原型,为其在土木工程中应用打下了良好的基础.

(3) 由于磁场对 GMM 作动器性能影响较大,故对 GMM 作动器进行了磁路设计与分析,及有无套筒时 GMM 作动器出力对比试验,可看出在同样大小预压力和电流下有套筒时出力比没有套筒时要大很多,从而证明了所设计磁路的有效性.

(4) 对 GMM 作动器进行了预压力装置及温控装置设计,保证了 GMM 作动器良好的输出性能.

(5) 对 GMM 作动器进行了输出性能测试试验,分析了不同预压力下输出位移、输出力与驱动电流的关系,结果表明 GMM 作动器不仅可在较低电流下输出较大的力,磁机转化效率很高,而且输出力与输入电流之间基本呈线性关系,对电流变化也非常敏感,具有良好的驱动性能,可满足大跨空间结构减震控制要求.

参考文献 References

[1] 欧进萍. 结构振动控制-主动、半主动和智能控制[M]. 北京:科学出版社,2003.

OU Jin-ping. Structural vibration control: Active, semi-active and intelligent control[M]. Beijing: Science Press, 2003.

[2] 王博文. 超磁致伸缩材料制备与器件设计[M]. 北京:冶金工业出版社,2003.

WANG Bo-wen. Preparation of giant magnetostriuctive materials and devices design[M]. Beijing: metallurgical in-

- dustry press, 2003.
- [3] 何忠波,王新宇,赵海涛.超磁致伸缩材料及其工程应用综述[J].军械工程学院学报,2007,19(2):63-69.
HE Zhong-bo, WANG Xin-yu, ZHAO Hai-tao. Characteristics of giant magnetostrictive materials and their engineering application [J]. Journal of Ordnance Engineering, 2007, 19(2): 63-69.
- [4] 李东旭.大型挠性结构分散化振动控制一理论与方法[M].长沙:国防科技大学出版社,2002.
LI Dong-xu. Decentralized vibration control of large flexible structures-theory and method[M]. Changsha: National University of Defense Technology press, 2002.
- [5] 唐志峰,项占琴,吕福在.稀土超磁致伸缩执行器优化设计及控制建模[J].中国机械工程,2005,16(9):753-757.
TANG Zhi-feng, XIANG Zhan-qin, LV Fu-zai. Optimal design of magnetostrictive actuator and its control model[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(9): 753-757.
- [6] 陶孟伦.超磁致伸缩致动器结构设计与器件特性研究[D].武汉:武汉理工大学,2008.
TAO Meng-lun. Structure design and property research of giant magnetostrictive actuators[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [7] MERMELSTEIN M D, DANDRIDGE A. Low-frequency magnetic field detection with magnetostrictive amorphous metal ribbon [J]. Appl. Phys. Lett., 1987, 51(7): 545-547.
- [8] 田鹏刚,王社良,高宗祺,等.动力荷载作用下压电主元杆件的动力稳定控制性能研究[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2011,43(2):187-191.
TIAN Peng-gang, WANG She-liang, GAO Zong-qi, et al. Study on the dynamic stability of piezoelectric pivot element bar under dynamical load [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2011, 43(2): 187-191.

Design and experimental study of the vibration control device for large spatial structure

ZHAO Xiang^{1,2,3}, WANG She-liang^{1,3}, ZHAO Xi-cheng^{2,3}, DAI Jian-bo¹

(1. Key lab of Structure & Earthquake Engineering Ministry of Education, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China; 2. Material Science and Engineering Post-doctoral Mobile Stations, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China; 3. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT))

Abstract: According to active vibration control of the large spatial structure, a vibration control device called giant magnetostrictive material actuator (shorted as GMMA) was designed which could convert electromagnetic energy into mechanical energy. This device takes giant magnetostrictive material as the core component and makes full use of its magnetic properties like big force output, fast response, high reliability and low driving voltage. Then its principle and design method was analyzed, and output performance tests were done. The results show that this device has good magnetic circuit structure, high efficiency of energy conversion, and could produce larger force and displacement under the drive current with linear relationship sensitively, and lay a good foundation for its application in the large spatial structure.

Key words: large spatial structure; vibration control; giant magnetostrictive material actuator (GMMA); performance test