

文章编号: 1000-8055(2003)01-0134-06

磁致伸缩材料作动器用于主动振动控制的实验研究

李 超, 李 琳

(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘要: 对采用磁致伸缩材料作动器进行主动振动控制的问题进行了实时实验研究。首先简介了磁致伸缩材料作动器的设计和特性分析及自适应滤波算法(LMS)的基本原理; 然后论述了采用磁致伸缩材料作动器的单自由度主动振动控制实验的系统, 从不同的控制物理量、不同算法、偏置磁场和系统噪声等方面分析了影响控制效果的因素, 实验获得了 30 dB 的减振效果。

关键词: 航空、航天推进系统; 磁致伸缩材料作动器; 自适应控制; 振动控制; LMS 算法

中图分类号: TB535

文献标识码: A

Active Vibration Control Using Magnetostrictive Material

LI Chao, LI Lin

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A method for active vibration control has been investigated in the field of high precision vibration control in this paper. Firstly, the magnetostrictive material, Terfenol-D, and actuator made of it, were analyzed. Secondly, the application of adaptive filter algorithm (LMS) to active vibration control was discussed. Finally, section III will be devoted to an introduction to one-D. O. F active vibration control real-time experiments, in which Terfenol-D actuator and LMS algorithm were adopted. From the results of real-time experiments, it can be concluded that the magnetostrictive material and adaptive filter algorithm are reasonable choice for active vibration control.

Key words: aerospace propulsion; magnetostrictive material actuator; adaptive control; vibration control; LMS algorithm

1 引言

采用磁致伸缩材料作动器的主动振动控制系统, 其设计重点是高性能作动器设计、鲁棒性控制算法的设计和受控系统的结构设计, 以使平台具有高精度和理想动态特性的隔振性能。

磁致伸缩材料具有在外磁场作用下产生应变的性能。目前应用较广泛的磁致伸缩材料为 Terfenol-D, 由铽、镱和铁组成。Terfenol-D 是一种很有应用前途的智能材料, 它具有诸多优点, 如在磁场作用下的应变能力较其他材料大了一个数量级以上, 机电耦合系数大, 响应速度快, 不存在时效

收稿日期: 2001- 12- 28; 修订日期: 2002- 04- 20

基金项目: 国防科工委基础研究资助项目(J1600D001)

作者简介: 李超(1977-), 男, 内蒙古赤峰人, 北京航空航天大学动力系硕士生, 主要从事航空宇航推进理论与工程、结构减振隔振及智能控制研究

引起的性能老化衰减现象等。作为电磁阀控制的缓冲器,采用磁致伸缩作动器能够优化发动机燃烧室的性能,降低燃油损耗和燃烧室噪声的生成^[1]。能够承受大载荷的磁致伸缩作动器在舰船用发动机的隔振上有很大的应用前景^[2]。

Geng Z 采用 Terfenol-D 作动器进行了 6 自由度平台的主动振动控制实验研究,平台的振动减小了 20~30 dB^[3]。顾仲权等在 1998 年也发表了关于此类材料用于振动控制的研究成果^[4]。

本论文目的是研究影响振动控制效果的各种因素,验证并优化作动器、控制算法和实验系统的设计。本文在初步论述 Terfenol-D 作动元件和自适应控制算法的基础上,详细介绍了主动振动控制实验的结构细节,从不同控制算法、不同控制物理量等方面,对采用磁致伸缩材料作动器对主动振动控制产生影响的普遍因素进行了实验研究。

2 实验装置和控制算法

2.1 磁致伸缩作动器

图 1 为采用的磁致伸缩作动器结构示意图,其中的磁致伸缩棒直径 7 mm,长 75 mm,其磁致伸缩线性段的最大应变量为 1000×10^{-6} 。永久磁铁产生一个偏置磁场用于使材料处于初始伸长状态,并保证作动器的工作点在线性段上。电磁线圈用于产生主控磁场。图 2 为此作动器在取消永久磁铁偏置磁场的情况下,在两种不同预压力作用下(通过改变作动器中弹簧的伸缩量),随电磁线圈提供的主控磁场变化,测得的材料应变变化的曲线。预压力愈大,曲线愈陡,它反映了磁致伸缩材料的应变—磁场曲线与压力有关的特性。本次实验的作动器预压力设置为 17.6 MPa,永久磁铁产生的偏置磁场大小为 7.5 Am^{-1} 。

2.2 控制算法^[3]

控制算法对实时振动控制实验有至关重要的影响。有关的参考文献中一般是采用自适应算法。为了便于比较,本次实验同时采用了比例积分微分控制算法和自适应算法,对各自的特点进行了实验验证。LMS 算法是自适应滤波中比较简单的算法,易于实现和调试。采用 LMS 自适应滤波算法的系统结构如图 3 所示。图中 P_1 是被控系统传递函数, P_2 是控制通道的传递函数, W 和 V 分别是对这两者的在线识别。 $f(k)$ 为时刻 k 的控制信号, $u(k)$ 为输入信号, $e(k)$ 为输出误差信号。控制程序中用到的主要关系如下:

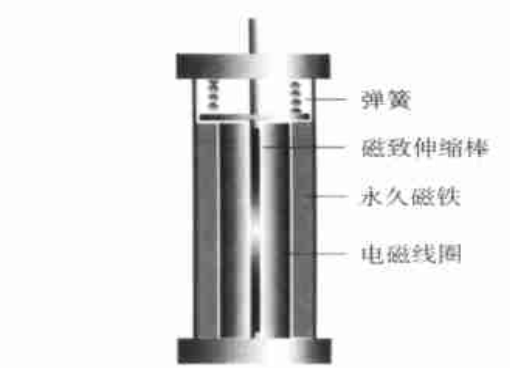


图 1 磁致伸缩作动器结构图
Fig 1 Magnetostrictive actuator structure

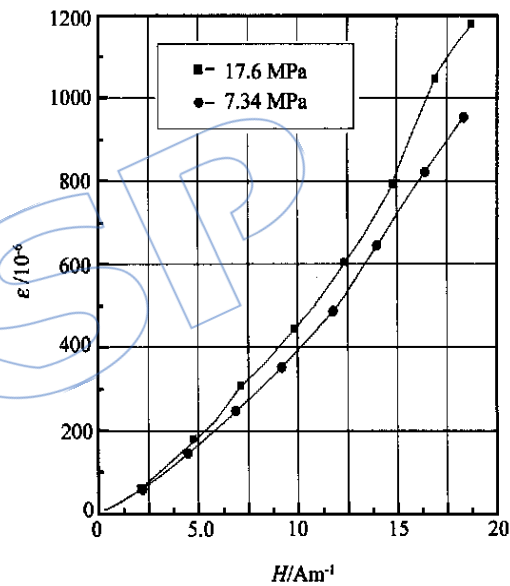


图 2 实测 $\epsilon-H$ 曲线
Fig 2 Experimental $\epsilon-H$ curve

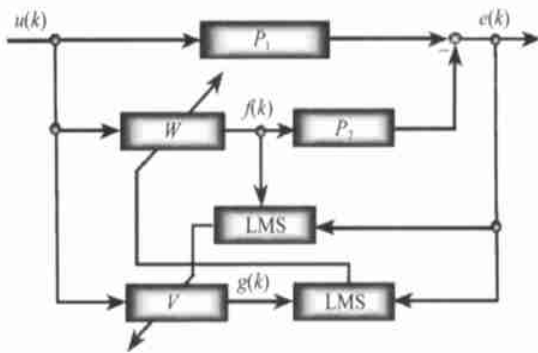


图 3 自适应滤波系统框图
Fig 3 Adaptive filter control system configuration

用 LMS 算法估计 $V(k)$ 的值,也就是控制通道 $P_2(z)$ 的值,有:

$$v_i(k+1) = v_i(k) - 2\mu e(k)f(k-i) \quad (1)$$

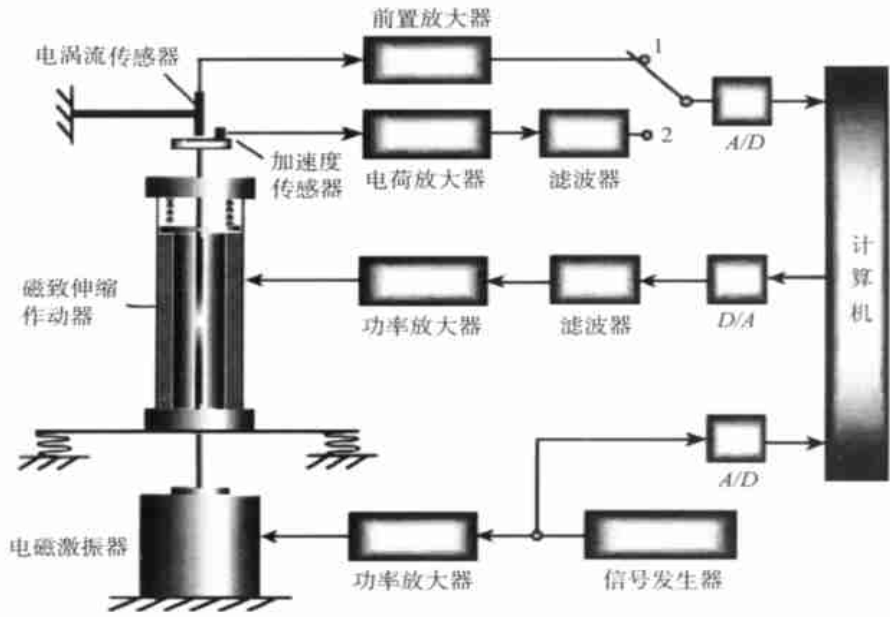


图 4 实验控制系统结构图

Fig 4 Experimental control system configuration

用 LM S 算法估计 $W(k)$ 的值, 也就是控制通道 $P_1(z)$ 的值, 有:

$$w_j(k+1) = w_j(k) - 2\mu e(k)g(k-j) \quad (2)$$

用矩阵形式重写公式(1)和(2):

$$V(k+1) = V(k) - 2\mu e(k)F(k)$$

$$W(k+1) = W(k) - 2\mu e(k)G(k) \quad (3)$$

式中:

$$V(k) = [v_0(k) \ v_1(k) \ \cdots \ v_m(k)]^T$$

$$W(k) = [w_0(k) \ w_1(k) \ \cdots \ w_n(k)]^T$$

$$F(k) = [f(k) \ f(k-1) \ \cdots \ f(k-m)]^T$$

$$G(k) = [g(k) \ g(k-1) \ \cdots \ g(k-n)]^T$$

本实验中, 系统需采集一路输入参考信号 $u(k)$ 和一路误差信号 $e(k)$, 输出一路控制信号 $f(k)$ 。

2 3 实验系统

实验所用的系统结构如图 4 所示。

实验中用螺栓将一块几何对称的金属薄板和电磁激振器连接起来, 作动器安装在金属薄板上, 金属薄板用高阻尼材料与稳定基础连接。当电磁激振器沿轴向正弦振动时, 将激励由薄板、磁致伸缩作动器、质量块及传感器组成的组件, 获得单自由度的微幅振动环境。

振动的检测考虑了两种形式, 采用高灵敏度加速度传感器和位移感应电涡流传感器。本实验采用的加速度传感器为 YD-12 型压电晶体加速

度传感器, 其关键参数如下: 灵敏度 $6.8376 \text{ mV/m s}^{-2}$; 频率范围 $1 \sim 10000 \text{ Hz}$; 极限加速度 5000 m s^{-2} 。而电荷放大器是必须的信号放大设备, 它自带的电路具有降噪调节作用。

当作动器的高频性能不好的时候, 往往需要在电荷放大器和控制系统的模数转换卡之间串连一个低通滤波器, 以滤去信号中的高频噪声。电涡流传感器采用 85745-01A 型, $\Phi 8 \text{ mm}$ 探头, 灵敏度 $8 \text{ mV}/\mu\text{m}$, 分辨率 $1 \mu\text{m}$, 频率范围 $1 \sim 4000 \text{ Hz}$ 。

实验的控制部件由一台主频 650 MHz 的工控机及 PCL-818H 型模数转换卡构成, 它共采集两路信号——相对于图 3 中的系统输出误差信号 $e(k)$ 和系统输入参考信号 $u(k)$, 然后输出一路控制信号 $f(k)$ 。PCL-818H 型模数转换卡的输入位数为 12 位, 输出 12 位, 采样频率最高可达 100 kHz 。实时实验中的采样频率设定为 1000 Hz 。在实验中参考信号可以使用信号发生器的信号, 即 $u(k)$, 也可以在作动器和振源连接处引出一路加速度信号作为参考信号。

3 实时实验过程和结果

3 1 关于不同控制物理量的实验研究

磁致伸缩作动器的一个显著特点是其驱动电流与其位移成正比, 利用这一特点, 通过改变驱动电流即可方便地实现对其位移的控制。

图 5 为采用位移感应电涡流传感器进行振动控制得到的控制效果, 其中, 激振频率为 59 Hz、参考信号为信号发生器信号 $u(k)$ 、控制通道低通滤波器设定频率为 100 Hz、采样频率为 1000 Hz。图中显示采用振动位移作为控制物理量可获得 95% 的减振效果。

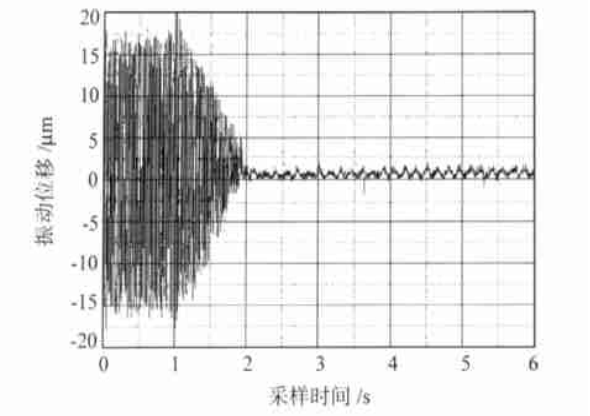


图 5 自适应控制
Fig 5 Adaptive control

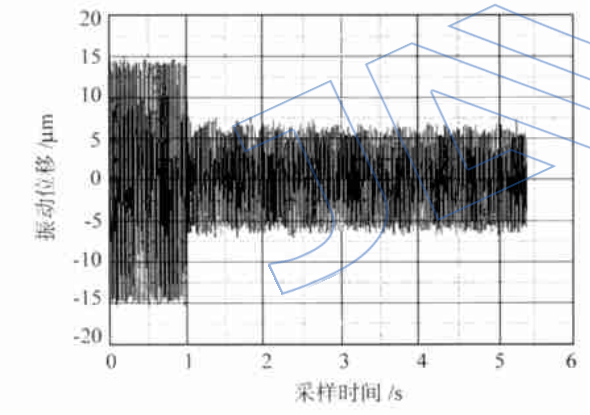


图 6 PD 控制
Fig 6 PD control

图 7 显示了以加速度传感器作为拾振信号源对加速度进行控制的结果, 也获得了 95% 的减振效果, 加速度计及配套电路如图 4 所示。激振频率、采样频率等实验参数均与对位移进行控制的实验参数相同, 算法皆为自适应控制算法。

实测结果表明在采用磁致伸缩材料作动器进行振动主动控制中, 既可用系统的位移作为控制信号也可用系统的加速度作为控制信号。

3.2 关于不同控制算法的实验研究

为了对比不同控制算法在采用磁致伸缩材料的主动振动控制实验中的效果, 实验中分别采用

经典的比例积分微分(即 PD 算法)和自适应滤波算法进行了控制。

图 6 是在激振频率为 59 Hz、参考信号为信号发生器信号 $u(k)$ 、误差信号 $e(k)$ 为电涡流传感器信号、采样频率为 1000 Hz 的情况下采用经典的比例积分微分(即 PD 算法)控制, 目前得到的最佳结果。图 7 和图 8 是同样情况下采用加速度计信号作为误差信号 $e(k)$ 进行自适应控制获得的实验数据, 其中电荷放大器放大 100 倍。3 个图中的纵坐标皆为质量块顶端的传感器输出数据, 前 1 s 为无控制输出的情况。

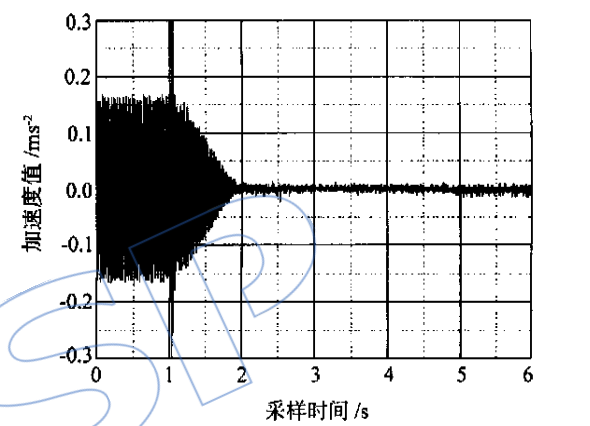


图 7 自适应控制
Fig 7 Adaptive control

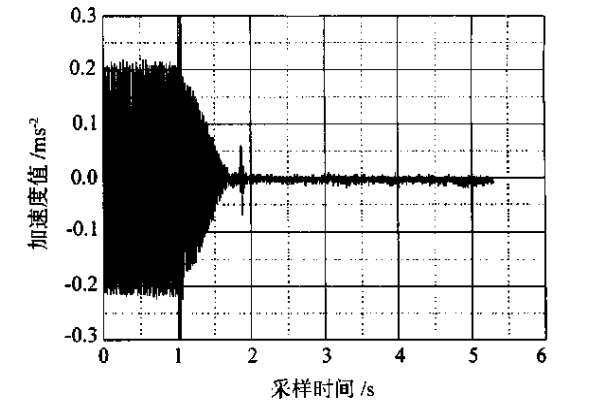


图 8 自适应控制
Fig 8 Adaptive control

在图 6 中的比例积分微分(PD)控制中, 加上了一个 $K_p = 40$ 的比例作用, 可获得大约 60% 的减振。相比较下, 图 7 中的自适应控制, 在收敛系数 μ 为 0.04 和滤波器阶数为 4 的情况下可获得 95% 的减振, 约 25.8 dB。图 8 是在同样实验条件下加大初始振幅而测得的实验数据。其减振达

到 97%, 即减振 30 dB, 而且可知在工作范围内不同大小的振动都可以衰减到一个相似大小的幅值。本文计算减振量的方法是分别计算未加控制时和加上控制稳定后各 500 个点的均方值, 然后计算减振量。

从减振效果看自适应算法能够获得更佳的减振量; 但从减振效率看 PD 算法明显优于自适应算法。这一结论是在上述实验条件下获得的。改变实验条件是否能使 PD 算法获得更好的减振效果, 还需做深入细致的研究。

3.3 关于磁致伸缩作动器偏置磁场对实验结果影响的实验研究

偏置磁场的设置是保证作动器在磁致伸缩材料的磁场—应变曲线线性段工作的关键。其选取的标准是在精确获得材料的磁场—应变曲线之后, 取曲线线性段中点对应的磁场强度为偏置磁场的大小。然而在实际的操作中, 由于制造的原因, 永久磁铁生成的偏置磁场其均匀和大小都将和设计方案有一定的偏差, 不同磁致伸缩材料之间也有性能的差异。这些差异最终反映在, 当需要隔离较大的振幅时, 即需要材料有较大的应变时, 材料可能进入到性能曲线两侧的非线性段。针对本实验设计的作动器, 由于在 17.6 MPa 下材料的线性区间为 $50 \sim 1050 \times 10^{-6}$, 对应的磁场为 $1.2 \sim 16.2 \text{ A m}^{-1}$, 偏置磁场的选择标准为 $7.5 \pm 0.6 \text{ A m}^{-1}$, 应变范围需在 $\pm 500 \times 10^{-6}$ ($\pm 30 \text{ } \mu\text{m}$) 之内。

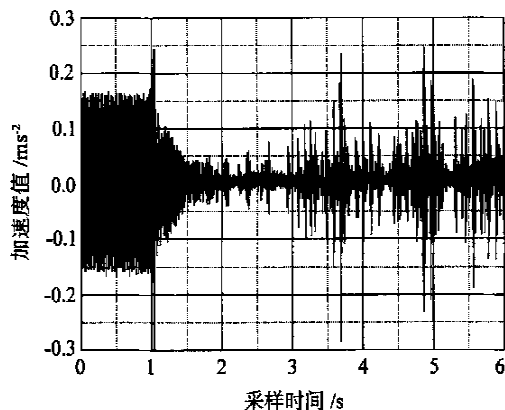


图 9 材料非线性导致的发散

Fig 9 Radiation by material nonlinear speciality

图 9 为当偏置磁场取为 2.5 A m^{-1} 时获得的控制效果, 图 10 是对应的控制量。可见当振动第一次收敛到极小值之后 (表明振动在作动器的工

作范围之内), 控制量并不能稳定下来, 一些细小的扰动被放大, 最终导致了发散。它表明此时作动器的工作点已移至材料的磁场—应变本构关系的非线性段。实验证明, 偏置磁场和材料曲线的不匹配会降低系统的稳定性, 实验所用作动器中设置的 7.5 A m^{-1} 的偏置磁场强度是恰当的。

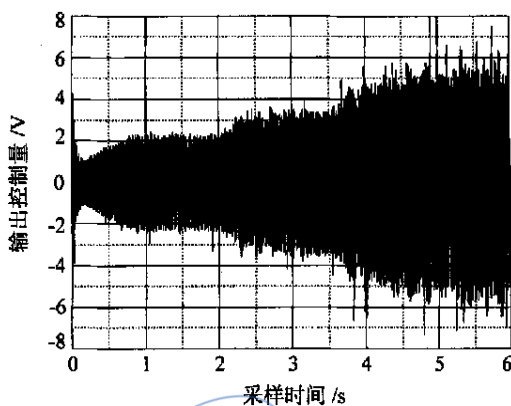


图 10 对应图 9 的控制量

Fig 10 Control output of Fig 9

3.4 其它因素的影响

实验发现, 除了材料的非线性之外, 可对实验结果产生影响的因素还有很多, 包括控制通道中低通滤波器的设置、功率放大器的输出噪声影响、算法中滤波器阶数和收敛系数的选择、参考信号的选择等。

前两者和实验系统在控制过程中生成的高频噪声有关, 其中低通滤波器的作用主要是去除模数转换卡输出的控制信号中的高频信号, 它的存在对控制系统是必须的, 但是它会造相位的变化。合理设置低通滤波器的值, 对减轻算法的负担, 提高系统性能有很大作用。功率放大器的输出噪声则会影响系统的稳态输出。后两者则与自适应滤波算法有密切的关系, 其中滤波器阶数和收敛系数主要由系统模型决定。至于参考信号, 其选择标准是应该能够包含和系统振动信号相关的尽可能多的频率成分^[4], 可以是信号发生器的信号, 也可以直接从误差传感器中提取信号, 但这会造成反馈。

合理处理这些因素之后, 在自适应算法下, 在作动器的适当工作范围内, 系统能够迅速收敛到一个 4 阶系统, 达到比较好的减振效果。图 8 显示了收敛的时间为 0.7s 左右, 大约 700 次自适应计算。

4 结 论

- (1) 通过单自由度主动振动控制实验, 验证了作动器的性能, 能够获得最高达 30 dB 的隔振效果。
- (2) 从物理量、算法、偏置磁场等三个方面分析了可能对振动控制产生影响的因素, 并得出了结论。
- (3) 实验系统本身也对振动控制问题有较大的影响, 这主要是指系统在控制过程中生成的高频噪声以及处理这些噪声的方法。

参考文献

[1] Dyberg J. Magnetostrictive Rods in Mechanical Applica-

tions[A] in: Proceedings of the 1st International Conference on Gaint Magnetostrictive A lloys and Their Impact on Actuator and Sensor Technology[C] Marbella, Spain, 1986: 7- 9

[2] 王博文, 葛景岩. 巨磁致伸缩材料及其应用[J]. 沈阳工业大学学报, 1998, 20(3): 64- 67.

[3] Z Jason Geng, Leonard S Haynes. Six Degree-of-Freedom Active V ibration ControlU sing the Stewart Platform s[J]. IEEE Transactions on Control system s Technology, M arch, 1994, 2(1): 45- 53

[4] 顾仲权, 朱金才, 彭福军, 等. 磁致伸缩材料作动器在振动主动控制中的应用研究[J]. 振动工程学报, 1998, 11(4): 381 - 388