

文章编号 1004-924X(2001)06-0506-05

# 微制造平台的精密隔振系统研究

梅德庆, 陈子辰

(浙江大学 生产工程研究所, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 提出了微制造平台的精密隔振系统的设计思路和系统结构, 通过对具有良好隔振性能的啄木鸟头部独特生物构造和隔振机理的研究, 利用仿生学原理建立了微制造平台的精密隔振系统的整体结构模型, 采用主动隔振和被动隔振相结合技术。为了消除线圈发热引起的热变形因素的影响, 专门设计了超磁致伸缩致动器的恒温冷却系统。针对微制造平台所处激励环境的复杂性和系统内部存在的非线性, 采用了带有两个修正因子二维模糊振动主动控制系统。最终, 建立一套可实现微制造的精密隔振系统。

**关键词:** 微制造平台; 仿生学; 主动振动控制

**中图分类号:** TH113.1; TH161.6 **文献标识码:** A

## 1 引言

上世纪80年代末, 在世界范围内兴起了对微机电系统(MEMS)的研究热潮, 它标志着人类对微观领域的探索又迈出了新的一步。它的发展将引起一场新的工业革命。关于MEMS目前国际上尚无公认的定义, 但一般是指整个构件大小从几mm到几 $\mu\text{m}$ 量级的微系统, 有人也把1mm~10mm的小型机械和nm量级的分子机械也称为MEMS<sup>[2]</sup>。微机电系统必要技术大致可分为三类: 基础技术、机能装置技术和系统化技术, 而其中最基本且最重要的是基础技术, 主要包括加工、材料、设计、检测、评价、装配等技术<sup>[1]</sup>。由于MEMS的微型性和精密性方面的要求, 基础技术中加工、检测和装配等工作必须在一个具有良好隔振性能的平台进行。

微制造平台的精密隔振系统设计需要考虑的环境微振动干扰是复杂的, 不仅有地面传来的振动, 还有台面试验仪器的运动干扰以及太阳和月球引潮力的干扰等。大地脉动型地面振动频率主要在0Hz~1Hz, 实验室工作人员走动所引起的振动频率在1Hz~3Hz, 通风管道、变压器和马达所引起的振动在6Hz~65Hz之间, 建筑物本身一

般在10Hz~100Hz频率之间摆动<sup>[3]</sup>。因此, 微制造平台隔振系统设计需要考虑的振动频率范围为0Hz~100Hz, 这就要求设计的隔振系统不仅对中高频扰力具有良好的隔振效果, 而且对低频和超低频扰力也能进行有效的隔离。文献[4]中采用多级被动隔振方法设计出了纳米级微动试验台的隔振系统, 虽然仿真结果表明, 该系统具有良好的隔振性能, 但是, 由于该系统采用被动隔振形式, 对低频或超低频扰力成分不能进行有效隔振。文献[3]中提出了采用主动控制的高精度隔振平台的设计方案, 并考虑了包括太阳和月球引潮力在内的各种扰力的影响, 但由于其致动器采用普通电磁控制器, 控制精度不高。文献[9]中采用压电材料作为致动器建立了6自由度微动控制系统, 由于压电材料本身的局限性, 使致动器的致动行程短并且致动力小, 实用价值不高。

为了克服以上问题, 作者对微制造平台的隔振系统进行研究, 设计了一种新型的隔振系统模型, 该系统主要具有以下特点: (1) 采用仿生学原理对隔振系统结构模型进行设计; (2) 采用主动隔振和被动隔振相结合技术; (3) 采用超磁致伸缩致动器, 并设计了致动器的恒温控制系统, 消除了线圈升温引起的附加热变形。

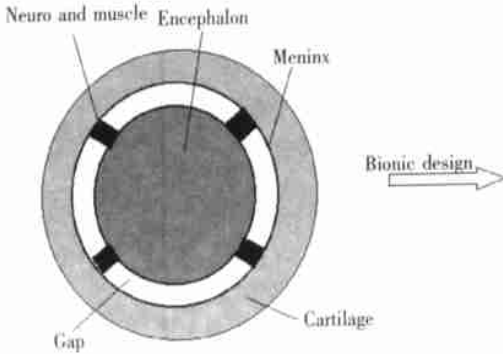
收稿日期: 2001-08-20; 修订日期: 2001-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助(No. 50075078)

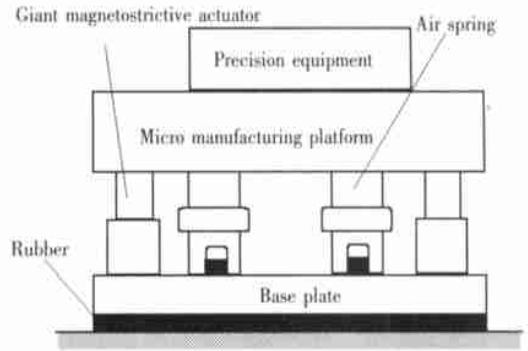
## 2 微制造平台隔振系统的整体结构设计

许多鸟类的头部均具备良好的隔振性能, 如啄木鸟、鸡等, 尤其是啄木鸟, 当它以约为音速 1.6 倍的速度敲啄树木时, 啄木鸟头部所要承受的冲击力是其本身重量的 1500 倍, 但它的大脑似乎不受丝毫损伤, 经生物学家研究发现啄木鸟的头部构造相当奇特, 除了强大的肌肉群、细密松软的骨骼之外, 在其坚韧的外脑膜与脑髓之间还存在一条狭窄的空隙, 把经肌肉、骨骼吸收后的强烈震波减弱到安全限值内, 这就是为什么啄木鸟频频啄击坚硬的树干而大脑却不受任何伤害的主要原因<sup>[5]</sup>, 如图 1(a) 所示。通过对具有良好隔振性能的鸟类头部构造和隔振机理的分析, 利用仿生

学原理建立了微制造平台隔振系统结构模型, 见图 1(b)。对微制造平台底座与地面之间采用被动隔振技术, 在两者之间放置橡胶垫层(对应于鸟类头部的软骨和肌肉群), 从而使地面传来的各种中高频扰力得到有效的隔离。在微制造平台和平台底座之间采用主动隔振技术, 以空气弹簧作为弹性元件(对应于鸟类头部外脑膜和脑髓之间的空隙), 以超磁致伸缩材料作为致动器(对应于鸟类头部外脑膜和脑髓之间连接的神经和肌肉), 通过与动力检测系统一起构成闭环主动振动控制系统, 可以有效地消除由平台底座传递过来的各种频率范围的振动扰力, 即使对于被动隔振系统难以消除的低频或超低频扰力, 也能进行有效地隔离。



(a) Structure of a bird brain.



(b) Structure of the isolation system.

Fig. 1 Schematic diagram of the bionic design of the isolation system.

## 3 微制造平台隔振系统的致动器设计

同压电材料致动器、空气致动器、电磁致动器等相比, 超磁致伸缩致动器具有性能稳定、漂移小、行程大、致动力大等特点, 更适用于用作主动微振动控制系统的位移致动器<sup>[9]</sup>, 因为超磁致伸缩致动器采用超磁致伸缩材料(giant magnetostrictive material, 简称为 GMM)作为核心部件, 该类材料具有大的磁致伸缩应变、快的响应速度、很强的带载能力及低的磁致伸缩各向异性等优点。因此, 在微制造平台隔振系统的设计中, 作者选用了超磁致伸缩致动器作为致动元件。

### 3.1 超磁致伸缩致动器的结构设计

在超磁致伸缩致动器<sup>[6,7,10]</sup>的设计过程中, 主要采取了以下几种关键技术: (1) 给 GMM 棒加载一定大小的预压力, 因为轴向预压力可使

GMM 内部磁畴在零磁场时尽可能地沿着与轴向应力垂直的方向排列, 在外加激励磁场作用下, 可获得较大的轴向磁致伸缩应变, 从而增大位移输出, 另外, 适当大小的预压力可提高驱动器中电磁能向机械能的转换效率<sup>[6]</sup>, 预压力由压盖、预压弹簧、预紧螺栓和输出杆组成的预压力组件产生。(2) 采用偏置线圈和激励线圈联合驱动的形式, 因为 GMM 棒磁致伸缩应变仅与激励磁场的大小有关, 与激励磁场的方向无关, 因此, 在电流大小方向变化一次的情况下, GMM 棒将发生两次变形, 即发生倍频现象, 而施加一定强度偏置磁场可使得 GMM 于极化状态, 可避免倍频现象的发生, 并可减小响应的不灵敏区, 从而改善输出线性。偏置磁场可通过永久磁铁或偏置线圈产生, 但是, 前者偏置磁场强度固定, 而后者则可根据不同的工况方便地调节, 因此, 在超磁致伸缩致动器的设计过程中, 作者采用偏置线圈来产生偏置磁场。(3)

设计了超磁致伸缩致动器的恒温控制系统, 因为由驱动线圈电流引起的发热现象是直接影响驱动精度的一个重要因素, 由于发热升温, 将使 GMM 棒产生附加热变形, 从而影响超磁致伸缩致动器的位移输出, 因此, 必须设法消除该影响因素, 为此, 作者设计了超磁致伸缩致动器恒温控制系统, 见 3.2 节。最后, 形成的微制造平台隔振系统的超磁致伸缩致动器的结构原理图如图 2 所示。

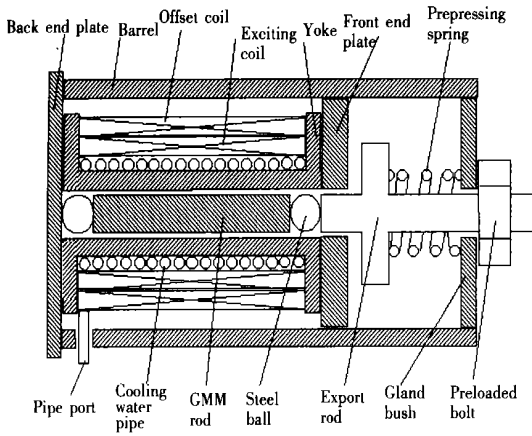


Fig. 2 Structure of the giant magnetostrictive actuator.

### 3.2 磁致伸缩致动器的恒温系统设计

为了避免 GMM 棒附加热变形的产生, 作者设计了超磁致伸缩致动器的恒温冷却系统, 其结构原理图如图 3 所示, 主要包括冷却水的循环回路、水温反馈电路、电热丝控制电路等部分。搅拌器的转动使水箱内的水温均匀; 电热丝主要对水起加热作用; 泵可以驱动恒温冷却水在水箱和超磁致伸缩致动器之间循环流动; 由 AT 89C51 单片机系统、电热丝、温度传感器、电热丝控制电路、测

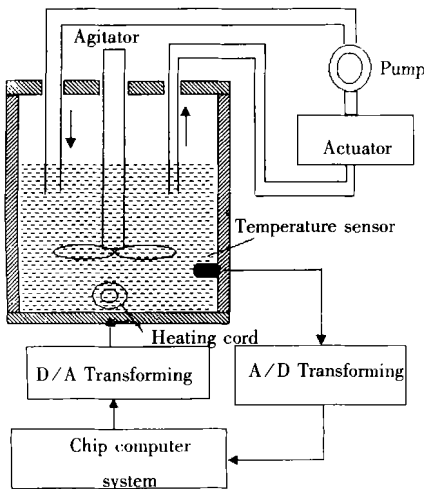


Fig. 3 Diagram of the cooling system of the giant magnetostrictive actuator.

温电路等部分构成的水温闭环控制系统可以使冷却水精确地保持在某一特定的温度。设计该系统的目的是使冷却水保持恒温, 使超磁致伸缩致动器内的 GMM 棒工作在恒温环境, 从而消除附加热变形对致动精度的影响<sup>[7]</sup>。

## 4 微制造平台的振动模糊主动控制系统设计

对于微制造平台的振动控制, 采用 PID 方法虽然简单, 但要求根据控制情况匹配合适的比例、积分、微分系数, 而由于微制造平台所处激励环境的复杂性和微制造平台系统内部存在的非线性、时滞、耦合等现象, 导致最佳参数匹配的困难, 而模糊控制则恰好适应了这种非线性系统的控制, 并具有鲁棒性强的特点。

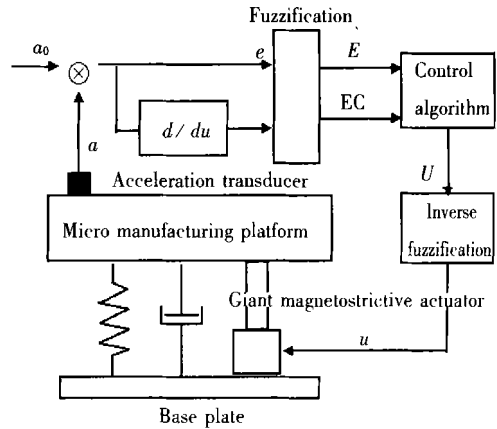


Fig. 4 Diagram of the active vibration control system of a micro manufacturing platform.

实行模糊控制要进行三个方面的工作: (1) 精确量的模糊化, 把语言变量的语言值化为适当论域上的模糊子集; (2) 模糊控制算法和设计, 通过一组模糊条件语句构成模糊控制规则, 并计算模糊控制规则决定的模糊关系; (3) 输出信息的模糊判决, 并完成有模糊量到精确量的转化。图 4 为微制造平台的振动模糊主动控制系统结构框图。定义系统的误差为  $e = a - a_0$ , 而保持微制造平台静止不动, 即  $a_0 = 0$ , 是最佳的期望控制值, 则系统的误差为  $e = a$ , 而误差的变化为加加速度  $\dot{e}$ , 经模糊化处理后分别为  $E$ 、 $EC$ 。以  $E$ 、 $EC$  作为系统的输入量, 超磁致伸缩致动器的控制电压作为输出量  $U$ 。在以加速度和加加速度分别为误差和误差变化的二维模糊振动主动控制中, 当误差

较大时, 控制系统的主要任务是消除误差, 这时误差在控制规则中的加权应大些; 相反, 当误差较小时, 控制的目标是减少超调, 即对误差变化在控制规则中的加权应大些, 因此, 以两个修正因子  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ , 即当误差较小时, 控制规则由  $\alpha_1$  来调整, 当误差较大时, 控制规则由  $\alpha_2$  来调整, 此时的控制规则可表示为<sup>[8]</sup>

$$U = \begin{cases} \alpha_1 E + (1 - \alpha_1) EC & \text{当 } E \text{ 较大时} \\ \alpha_2 E + (1 - \alpha_2) EC & \text{当 } E \text{ 较小时} \end{cases}$$

式中,  $\alpha_1, \alpha_2 \in (0, 1)$ ,  $\alpha_1 < \alpha_2$ 。

计思路 and 系统结构模型, 通过对具有良好隔振性能的啄木鸟头部独特生物构造和隔振机理的研究, 利用仿生学原理建立了微制造平台的精密隔振系统的整体结构模型, 采用主动隔振和被动隔振相结合技术; 提出了微制造平台精密隔振系统超磁致伸缩制动器的结构模型, 为了消除热变形因素的影响, 专门设计了超磁致伸缩驱动器的恒温冷却系统; 对微制造平台的精密隔振系统的控制系统进行研究, 提出了微制造平台的双修正因子二维模糊振动主动控制系统模型。

## 5 结 束 语

本文提出了微制造平台的精密隔振系统的设

### 参考文献:

- [1] 一衡高. 微机电系统的科学研究与技术开发[J]. 清华大学学报, 1997, 37(9): 1- 5.
- [2] 李栓庆. 下世纪微电子机械系统的发展[J]. 半导体情报, 1997, 34(2): 11- 22.
- [3] 胡强, 程耀东, 齐津. 主动控制的高精度隔振平台的仿真[J]. 浙江大学学报, 1999, 33(2): 209- 213.
- [4] 刘平成, 杨晓红, 吴晓琳, 等. 纳米级微动试验台的隔振设计研究[J]. 机械设计, 2000, 9: 19- 21.
- [5] 庄表中, 李小平. 仿生学与振动[J]. 振动与冲击, 1997, 16(1): 84- 85.
- [6] 夏春林, 一凡, 路甬祥. 超磁致伸缩材料驱动驱动器实验研究[J]. 电工技术学报, 1999, 14(4): 14- 16.
- [7] 贾宇辉, 谭久彬. 超磁致伸缩微位移驱动系统的研究[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(1): 38- 41.
- [8] 盖玉先, 董申, 李旦. 亚微米超精密车床的振动模糊主动控制[J]. 振动工程学报, 2000, 13(1): 156- 160.
- [9] Yoshiy a Nakamura, Masanao Nakayama, Keiji Masuda, et al. Development of active 6- DOF microvibration control system using giant magnetostrictive actuator[J]. SPIE, 1999, 3671: 229- 240.
- [10] 贾宇辉, 谭久彬. 超磁致伸缩驱动器及有限元分析方法的研究[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(2): 161- 164.

## Research on Precision Isolation System of Micro Manufacturing Platform

MEI De qing, CHEN Zi chen

(Institute of Production Engineering of Zhejiang University,  
Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** In this paper, a structure model of the precision isolation system of micro manufacturing platform is presented. The isolation mechanics and organic texture of a woodpecker brain which has good isolation characteristics are studied, and then the structure model of the isolation system of the micro manufacturing platform is established based on bionics mechanics. In order to reduce thermal distortion caused by temperature rise of coil, a constant temperature cooling system is designed for giant magnetostrictive actuator. Considering complex vibration environment and self- nonlinearity of the micro manufacturing platform, the authors have designed a two dimensional fuzzy control system with two regulation factors. Finally, a set of precision isolation system is established which can be used effectively in micro manufacturing.

**Key words:** micro manufacturing platform; bionics mechanics; active vibration control

作者简介:梅德庆(1973-),男,浙江省台州市人,浙江大学生产工程研究所,讲师,博士,从事精密振动控制和机电系统动力学方面的研究工作。E-mail: medqmei@zjuem.zju.edu.cn

陈子辰(1950-),男,福建省福州市人,浙江大学微系统研究与开发中心主任,浙江大学生产工程研究所所长,教授,博士生导师,研究领域为:微系统、精密工程、机电一体化、新型数控系统等。

## 会议简报

东北微机电系统(MEMS)研发联合体于2001年11月16日在大连理工大学成立。该联合体主要由东北地区热心支持和从事MEMS研发的高校、研究所和企业自愿组成的,是密切联系MEMS研发单位之间的桥梁和纽带。其宗旨是为成员单位提供一个MEMS研发与协作的组织,增进成员单位间的交流与合作,推动东北地区MEMS技术和产业的发展,为我国的MEMS事业作出积极的贡献。

在联合体成立会议上,与会代表讨论通过了联合体的章程,选举产生了联合体执行委员会成员、执委会主任、副主任和正、副秘书长及各省分会主任。选举名单如下:

王立鼎	中科院院士	大连理工大学
范茂军	研究员	信息产业部电子第49研究所
陈信琦	研究员	沈阳仪器仪表工艺研究所
吴一辉	研究员	中科院长春光学精密机械与物理研究所
温殿忠	教授	黑龙江大学
刘晓为	教授	哈尔滨工业大学
王相森	高工	信息产业部电子第47研究所
朱利宏	研究员	信息产业部电子第18研究所
孙承松	教授	沈阳工业大学
张洪泉	高工	信息产业部电子第49研究所
刘冲	教授	大连理工大学
唐祯安	教授	大连理工大学
孙立宁	教授	哈尔滨工业大学

执委会主任:王立鼎

副主任:范茂军,陈信琦,吴一辉

秘书长:唐祯安

副秘书长:刘晓为

各省分会主任:

黑龙江省:温殿忠(兼)

吉林省:吴一辉(兼)

辽宁省:陈信琦(兼)

天津市:朱利宏

与会各单位还介绍了各自的研发工作并交流了相互协作的意向。会议决定2002年8月在哈尔滨召开第一届年会。