

文章编号: 1006-4710(2014)04-0469-04

# 基于磁致伸缩致动器的车削振动控制系统研究

王茂方, 杨静

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 磁致伸缩致动器具有体积小、可靠性高、驱动力大、响应速度快等优点, 但其动态特性具有明显的滞回非线性特点, 同时考虑车削过程外干扰的不确定性, 本文研究设计了基于磁致伸缩致动器的车削振动主动控制系统, 采用了变步长自适应控制算法策略。在 Matlab/Simulink 中对控制系统进行了模拟仿真。在此基础上, 基于 dSPACE 快速原型控制系统搭建了车削振动控制模拟实验台, 以激振器作为外干扰进行振动抑制实验。实验结果表明, 所设计的振动控制系统对模拟刀架的振动有明显的抑制效果。

**关键词:** 磁致伸缩致动器; 车削振动; 自适应算法; 柔性铰链平台

中图分类号: TH113.1 文献标志码: A

## Study of cutting vibration control system based on the magnetostrictive actuator

WANG Maofang, YANG Jing

(Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Magnetostrictive actuator has the advantages of small volume, stable performance, high reliability, large driving force, fast response speed, etc, but its dynamic characteristics have obvious hysteresis nonlinear characteristic, taking uncertainty of outside interference in the turning process into account. The active vibration control system of turning tool based on the magnetic actuator are studied and designed, and the variable step size strategy of adaptive control algorithm is adopted in this paper. A control system simulation in Matlab/Simulink is conducted, on the basis of which, the turning vibration control simulation platform based on dSPACE in experimental verification under the exciter as outside interference has been set. The experimental results show that this design of active vibration control system based on magnetic actuator for simulation tool post vibration suppression effect is obvious.

**Key words:** magnetostrictive actuator; turning vibration; adaptive algorithm; flexible hinge platform

由于机床主轴的不平衡、工件材料不均匀等原因, 金属车削加工时, 车刀与工件之间会产生振动, 影响产品的加工质量, 甚至导致刀具磨损、崩刃。加工中的振动抑制一直是许多学者的研究热点<sup>[1]</sup>。Cagri Abis 采用压电陶瓷致动器贴于车刀刀杆的侧面, 对车刀的振动进行控制, 使零件的表面粗糙度改善了 27.7%<sup>[2]</sup>。Martinez 采用压电式致动器进行精密加工的振动控制, 在一定范围内缓解高频动态切削力对系统的冲击作用, 从而提高精密加工的性能<sup>[3]</sup>。谢金华等人则以压电驱动元件设计了切削颤

振抑制系统<sup>[4]</sup>。磁致伸缩致动器相对压电驱动具有响应速度快、应变大、输出力大、驱动电压小等优点<sup>[5-6]</sup>, 陈苏权等利用磁致伸缩致动器作为驱动器, 采用 PID 算法进行刀架振动抑制, 并进行了实验测试<sup>[7]</sup>。

算法是影响控制性能的重要因素, 考虑动态特性具有明显的滞回非线性特点, 同时考虑车削过程外干扰的不确定性, 本文设计的基于磁致伸缩致动器的车削振动控制系统, 采用了 NLMS 自适应算法控制策略, 通过仿真与实验对所设计的振动抑制系统效果进行了验证。

收稿日期: 2014-04-29

基金项目: 陕西省教育厅省级重点实验室科研计划基金资助项目(11JS0720)。

作者简介: 王茂方, 男, 硕士生, 主要研究方向为机床精密进给控制系统。E-mail: wynney89@163.com。

杨静, 女, 副教授, 博士, 研究方向为机电系统检测与控制。E-mail: yjzhd@163.com。

## 1 控制系统建模

车削振动控制系统的总体方案如图1所示,位移传感器检测刀架振动,通过反馈,控制磁致动器抑制刀架振动。

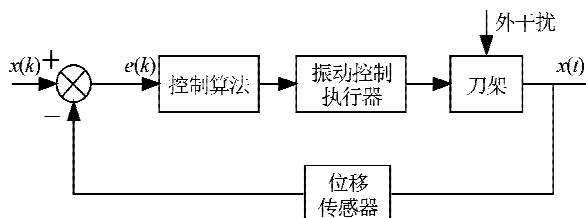


图1 车削振动主动控制系统方案图

Fig. 1 The active vibration control system solutions for turning

本文设计的柔性刀架实验台如图2所示,刀架平台通过8个直圆型铰链与固定的刀架底座连接,车刀安装在刀架平台上。在切削力作用下,柔性刀架在Z方向发生振动,但与底座不会发生摩擦,磁致动器输出作用力在刀架平台上,抑制平台Z向振动。

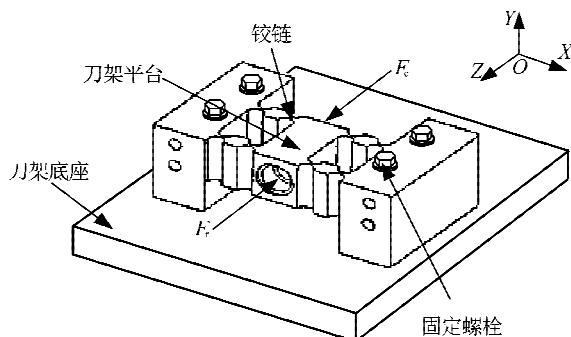


图2 柔性铰链刀架模拟结构图

Fig. 2 The simulation tool holder structure of flexible hinge

车削振动主动控制系统简化力学模型如图3所示。

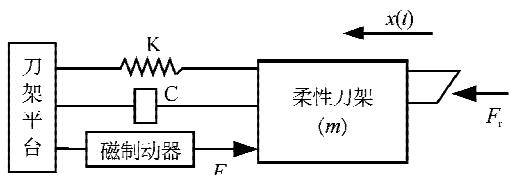


图3 车削振动控制系统简化力学模型

Fig. 3 The simplified mechanical model of turning vibration control system

柔性铰链刀架等效为弹簧质量系统:

$$\sum F = kx + 2\xi\sqrt{km}\dot{x} + m\ddot{x} \quad (1)$$

其中,  $\xi = c\sqrt{km}/(2km)$  为刀架阻尼比( $c$ 为铰链的等效阻尼);  $x$  为铰链平台在Z方向的振动位移;  $k$  为

铰链刀架等效刚度;  $m$  为柔性刀架质量。本文设计的柔性刀架质量为 0.583 kg。

由文献[8]可求得, 铰链等效刚度  $k$  及阻尼比  $\xi$  为:

$$k = 25.83 \text{ N}/\mu\text{m}$$

$$\xi = 0.00264$$

刀架合外力为:

$$\sum F = F_c + F_r \quad (2)$$

其中,  $F_c$  为磁致动器控制力,  $F_r$  是外干扰力。

本文选用的磁致动器为美国 Etrema 公司的产品, 型号为 ACP01, 致动器参数如表1所示。

表1 ACP01 磁致动器参数

Tab. 1 Parameters of actuator ACP01

参数名称	数值	参数名称	数值
频率范围	0~2500 Hz	最大 AC 电流	5 A
最大输出力	1110 N	直流电阻	1.0 Ω
最大输出位移	25 μm	电感	1.8 mH
最大负载力	2200 N	自重	5.9 kg
工作温度范围	-20°C~120°C		

根据磁致动器工作原理, ACP01 致动器输入与输出存在滞回性。根据手册得该非线性特性如图4所示。

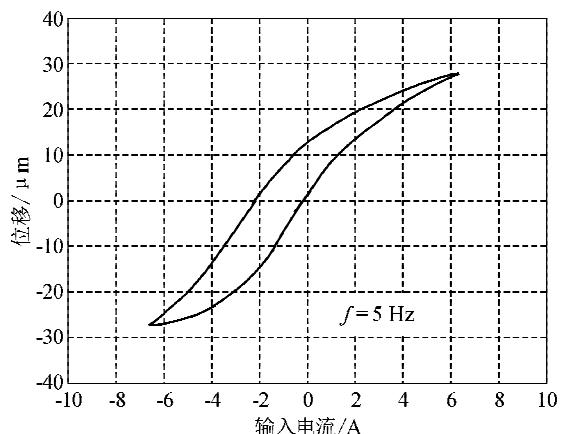


图4 磁致动器位移输出

Fig. 4 ACP01 Magnetic actuator output displacement

## 2 车削振动自适应控制系统仿真

自适应滤波器由滤波器和自适应算法组成, 滤波器根据所需功能设计, 自适应控制算法结构简单、算法鲁棒性、稳定性好, 适用于系统模型不确定的被控系统, 能根据不同的输入信号调整滤波器的权系数, 使自身的单位冲击响应达到最优输出。输出  $u(k)$  如式(3)所示, 它是由当前  $k$  时刻输入信号  $x(k)$  及之前  $N$  个时刻的输入信号的加权组合:

$$u(k) = \sum_{n=0}^N W_n(k) \cdot x(k-n) \quad (3)$$

其中  $W_n(k)$  表示第  $n$  时刻迭代的权系数,  $x(k-n)$  表示  $(k-n)$  时刻的输入信号,  $N$  为滤波器的阶数。

自适应算法是以系统输出误差最小为目的, 寻找最优的权系数矩阵  $W(k)$ 。

$$W(k) = [w_0(k), w_1(k), \dots, w_N(k)]^\top \quad (4)$$

为了加快收敛速度, 采用归一化的最小方差算法(NLMS)。优化算法如下。

$$W(k+1) = W(k) + \frac{\mu}{\gamma + \|x(k)\|^2} x(k) e(k) \quad (5)$$

式(5)中,  $x(k)$  为  $k$  时刻的参考信号,  $e(k)$  为  $k$  时刻的误差信号,  $\mu$  为控制算法步长,  $\gamma$  为修正因子。

根据式(2)~(5), 在 Matlab/Simulink 中建立的车削振动 NLMS 自适应控制仿真模型如图 5 所示。仿真模型中取自适应控制器阶数  $N=9$ , 收敛步长  $\mu=1.2$ , 修正因子  $\gamma=1.2$ 。设仿真模型中, 干扰力  $F_r = 50\sin(2\pi \cdot 100t)$ , 系统仿真结果如图 6 所示。

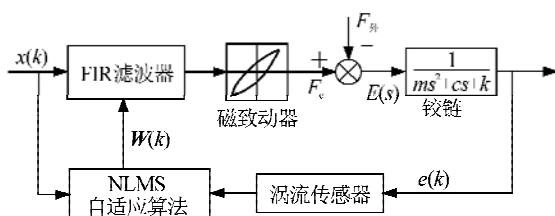


图 5 车削振动 NLMS 自适应控制仿真模型  
Fig. 5 Turning vibration NLMS adaptive control

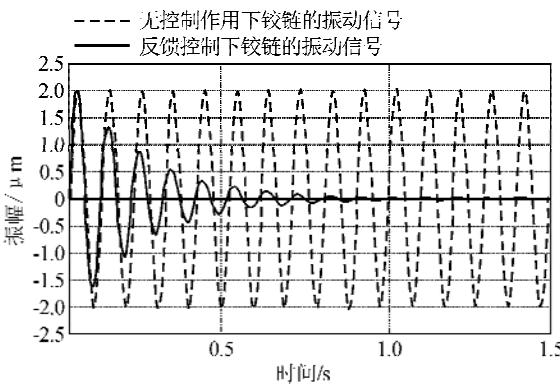


图 6 正弦干扰下车削振动控制系统仿真  
Fig. 6 Turning vibration control system under sinusoidal interference

由图 6 可看出:

1) 在 NLMS 反馈控制下, 铰链平台的振动收敛, 收敛时间为 0.12 s, 系统振动超调为  $0.2 \times 10^{-7}$  m;

2) 仿真模型中, 由于磁致伸缩器简化为线性环节, 在无磁致伸缩器反馈控制下, 平台振动幅值为 2

μm。在 NLMS 反馈控制下, 铰链平台稳定振幅几乎完全被抑制。

### 3 车削模拟平台振动控制实验与分析

基于磁致伸缩器的车削振动控制系统实验平台如图 7 所示。激振器模拟干扰, 用橡皮筋悬挂, 通过激振杆力作用于柔性铰链平台上; Matlab/Simulink 中设计的自适应控制算法, 由 dSPACE 快速原型控制器实现。涡流位移传感器检测平台的振动, 信号通过快速原型控制系统(dSPACE)的 A/D 口变换为数字信号进入控制器; 自适应算法的输出通过 D/A 端口控制磁致伸缩器, 进而抑制铰链振动。

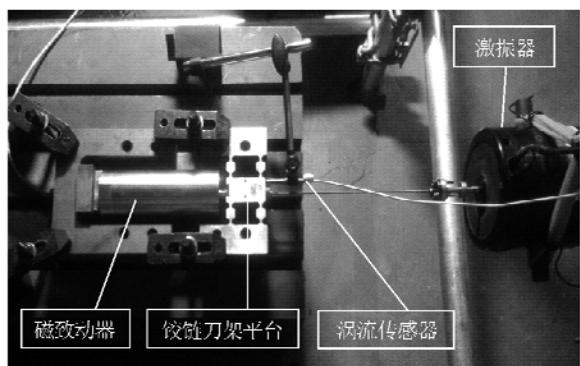


图 7 实验平台安装图  
Fig. 7 The installation diagram of experimental platform

实验中, 激振器模拟 70 Hz 的干扰力作用在柔性铰链上, 先观察激振器作用下铰链平台振动, 大约 7 s 后, 打开磁致伸缩器功放电源, 对铰链振动进行闭环控制。铰链振动信号通过 RA1200 多路数据采集仪采集, 如图 8 所示。

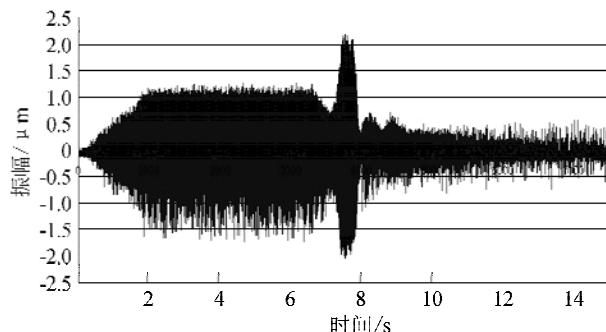


图 8 70Hz 铰链模拟平台振动实验结果  
Fig. 8 Hinge simulation platform vibration experimental results under the frequency of 70Hz

从图 8 可以看出:

- 1) 磁致伸缩器开始控制前, 铰链在激振器作用下振幅为 1.2 μm;
- 2) 磁致伸缩器反馈控制后, 刚开始, 由于瞬态响应

超调,铰链振幅值明显增大,超调量为  $1 \mu\text{m}$ ,然后振动幅值开始衰减,5 s以后达到稳定状态;

3)在磁致伸缩器控制下,铰链稳态振幅约为  $0.4 \mu\text{m}$ ,相比原始振幅,抑制了 66.7%;说明采用自适应算法的车削振动控制对柔性铰链刀架结构的振动抑制非常有效。

#### 4 结语

本文采用磁致伸缩致动器控制车削振动,设计了具有无摩擦、无振动冲击的柔性铰链模拟刀架,考虑到磁致伸缩器动特性的滞回非线性,设计了 NLMS 的自适应控制算法,在 Matlab/Simulink 中进行了控制系统仿真研究,并基于 dSPACE 原型控制器搭建了柔性铰链车削振动控制模拟实验平台,以激振器作为外干扰,对所设计的 NLMS 自适应控制算法进行了仿真验证。结果表明,本文所设计的基于磁致伸缩器的 NLMS 自适应控制系统,对模拟刀架的振动有明显抑制效果。

#### 参考文献:

- [1] 李国平,林君焕,韩同鹏,等.车削振动的免疫 PID 控制研究[J].兵工学报,2010,31(5):580-585.  
Li Guoping, Lin Junhuan, Han Tongpeng, et al. Research on turning vibration control based on immune PID controller[J]. Ordnance Journal, 2010, 31(5): 580-585.
- [2] Cagri Abis, Fatih Unal, Ata Mugan. Active vibration control with piezoelectric actuator on a lathe machine with a gain controller[J]. International Conference on Mechatronics, 2011, 13(15): 19-22.
- [3] Martinet D R, Hinnerichs T D. Vibration control for precision manufacturing using piezoelectric actuators[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1996, 7(2): 103-110.
- [4] 谢金华. 基于智能控制策略的切削颤振抑制研究[D]. 山东:山东大学, 2013.  
Xie Jinhua. Research of cutting chatter suppression based on intelligent control strategy [D]. Shandong: Shandong University, 2013.
- [5] 赵寅. 超磁致伸缩驱动器建模及驱动控制研究[D]. 上海:上海交通大学, 2013.  
Zhao Yin. Research on model and control of giant magnetostrictive actuator [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013.
- [6] 金鑫. 基于磁致伸缩材料精密进给平台模型研究[D]. 西安:西安理工大学, 2012.  
Jin Xin. Research on precision feed platform based on the magnetostrictive material[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2012.
- [7] 陈苏权. 超磁致伸缩致动器抑制车削加工颤振实验研究[J]. 机械研究与应用, 2008, 21(5): 41-44.  
Chen Suquan. Experimental investigations for suppressing turning chatter in giant magnetostrictive actuator [J]. Mechanical Research & Application, 2008, 21(5): 41-44.
- [8] 吴鹰飞,周兆英. 柔性铰链的设计计算[J]. 工程力学, 2002, 19(6): 136-140.  
Wu Yingfei, Zhou Zhaoying. Design of flexure hinges [J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(6): 136-140.

(责任编辑 王卫勋)