

文章编号:1006-1355(2015)04-0207-05

电流变技术在抑制深孔切削颤振中的应用

邱泉水^{1,2}, 苗鸿宾^{1,2}, 沈兴全^{1,2}

(1. 中北大学 机械与动力工程学院, 太原 030051;
2. 山西省深孔加工工程技术研究中心, 太原 030051)

摘要:针对深孔加工中出现的切削颤振问题,利用电流变液的电流变效应,设计一套基于流动和剪切混合工作模式的电流变减振器。通过对深孔切削系统的动力学模型的建立和分析,得到系统的运动微分方程。利用MATLAB/Simulink对动力学模型进行仿真分析并进行实验验证,结果表明电流变减振器能够减小颤振的振幅,且在不同电场强度下具有不同的减振效果。因此通过控制电流变减振器的电场强度可以有效地抑制深孔机床中切削颤振的发生。

关键词:振动与波;电流变减振器;时域分析;切削颤振;深孔机床

中图分类号:TH113.1

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2015.04.045

Application of Electro-rheological Technology to Chatter Suppression in Deep Hole Cutting

QIU Quan-shui^{1,2}, MIAO Hong-bin^{1,2}, SHEN Xing-quan^{1,2}

(1. School of Mechanical and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Shanxi Province Deep Hole Machining Center, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to suppress the deep hole machine cutting vibration, a set of electro-rheological fluid (ERF) dampers based on flow and shear mixed principle was designed by using the electro-rheological effect of ER fluids. The dynamic model of deep hole cutting system was established and analyzed, and the kinematic differential equations of the system was obtained. MATLAB/Simulink was used for simulation and the corresponding experiments were carried out. The results show that the electro-rheological fluid damper can reduce the flutter amplitude, and it has different damping effect for different electric field intensities. Therefore, controlling the electric field intensity of the electro-rheological fluid damper can effectively suppress the cutting chatter of deep hole machines.

Key words: vibration and wave; electro-rheological fluid damper; time domain analysis; cutting chatter; deep hole machine

深孔加工是在封闭条件下进行的高难加工工序,其中切削颤振问题就是一个难题。在深孔加工中,切削颤振会加剧钻头的磨损,影响孔的表面加工质量,颤振严重时还会导致钻杆弯曲、折断甚至会损坏机床。颤振时产生的噪声也会危害工人的身体健康。因此,如何抑制深孔加工中的切削颤振对于深孔加工意义重大。

为了解决上述问题,国内外的学者探索了许多控制颤振的方法,其中,采用施加阻尼的方法取得了较好的减振效果,但是传统的被动式减振器阻尼值不能够实时调整,其应用受到了很大的限制。为了获得更好的减振效果,就必须寻找一种响应快、具有可控性的智能材料,将其应用到阻尼减振技术中,使阻尼实现连续调节。而电流变液就是这样的智能材料,在外电场的作用下,其流变性能由易流动、低粘度的牛顿流体突变为难流动、高粘度的塑性类固体,并且粘度、剪切强度等随外加电场强度的增大而增大,响应迅速,在毫秒级,而当撤去外加电场后,它又可在瞬间内恢复到液态,即“电流变效应”^[1]。

国内外的学者对电流变技术做了大量的研究。在国外,Petek N.等设计了带有充气室的双筒式电流变减振器^[2]。S. B. Choi等人设计了可将电极施加在

收稿日期:2014-12-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51175482);

国家级国合专项(0102013DFA70770);

山西省国际合作项目(2012081030)

作者简介:邱泉水(1990-),男,山东德州人,硕士研究生,主要研究方向:深孔加工技术。

E-mail: 378631968@qq.com

通讯作者:苗鸿宾(1970-),男,博士,教授。

内筒与外筒之间的电流变减振器^[3]。在国内,高晶敏等研制了三筒式结构的电流变减振器^[4]。在机床振动控制方面,费仁元、王民等将电流变技术应用于镗削颤振控制中^[5]。周晓勤、于骏一等设计了剪切模式电流变减振器用于车削颤振控制中^[6]。

目前,深孔机床上的减振器一般为传统被动式,而电流变技术在深孔机床切削颤振方面的应用比较少见。故本文在前人研究的基础上,结合深孔加工的特点,设计了一套混合模式的电流变减振器,利用电流变效应,通过改变输入的电压值来主动调节电流变减振器的等效阻尼与等效刚度^[7],可以实现连续控制,且控制精度高,响应时间快。

1 电流变减振器的工作原理和力学特性

电流变减振器的工作原理主要有流动模式、剪切模式、混合模式等。流动模式的特点是提供的阻尼力比较大,控制范围广,但是对电流变液的流动性要求比较高,容易受杂质的影响。剪切模式的特点是结构简单,控制精准,但是提供的阻尼力相对较小。混合模式则是综合了流动模式和剪切模式的特点,即产生的阻尼力是由两部分构成:一部分是工作间隙对电流变液的节流作用,即流动模式下产生的阻尼力;另一部分是由电流变液流经工作间隙时活塞对电流变液的剪切力,即剪切模式下产生的阻尼力^[8]。

电流变液在无电场作用时为牛顿流体,其剪切应力正比于剪切应变。当受到电场作用后,其力学特性变化显著,具有较强的抗剪切能力,可用宾汉模型来描述,剪切应力^[9]表示为

$$\tau = \eta_0 \dot{\gamma} + \tau_R(E) \quad (1)$$

式中 η_0 为基础液的黏度; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; $\tau_R(E)$ 为电致屈服应力,是电流变液在电场作用下固化所引起的剪切应力。

电致屈服应力与电场强度有如下关系

$$\tau_R(E) = \alpha E^\beta \quad (2)$$

式中 α 和 β 是与电流变液材料特性有关的常数。

从图1可以看出,电流变液的剪切应力 τ 会随着剪切速率 $\dot{\gamma}$ 和电场强度 E 的增大而增大。

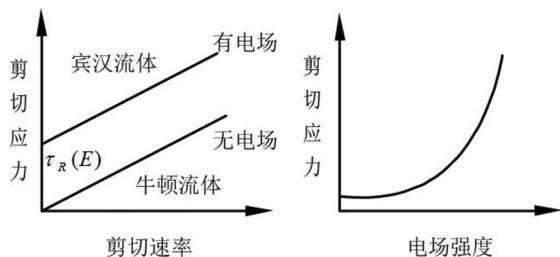
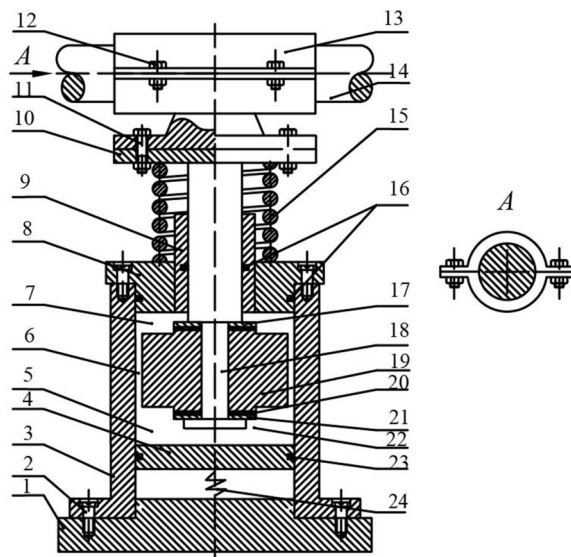


图1 电流变液的力学性能

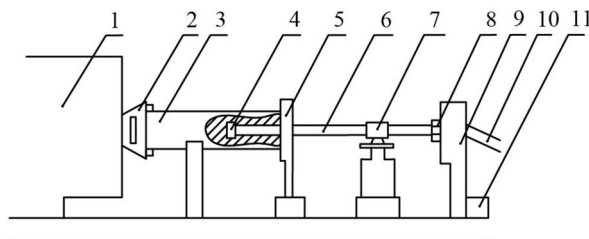
2 电流变减振器的设计及其在深孔机床上的安装位置

基于流动与剪切的混合工作模式设计了用于抑制深孔切削颤振的电流变减振器,其结构设计如图2所示。将电流变减振器的连接套与深孔机床钻杆相连,底座安装于机床床身上,其安装示意图如图3所示。



1底座 2紧固螺钉 3工作缸 4浮动活塞 5下腔 6环形间隙 7上腔 8端盖 9导向套 10连接板 11紧固螺栓 12紧固螺栓 13连接套 14钻杆 15弹簧 I 16密封圈 17上隔板 18活塞杆 19活塞 20绝缘层 21下隔板 22电流变液 23密封圈 24弹簧 II

图2 电流变减振器的结构图



1 主轴箱、2 工件夹具、3 工件、4 钻头、5 输油器、6 钻杆、7 电流变减振器、8 钻杆夹头、9 钻杆主轴箱、10 排屑口、11 排屑箱

图3 电流变减振器的安装示意图

图2中,活塞接入正电压,工作缸接地。因此在活塞与工作缸的环形间隙之间就形成了一个电场,场强的大小可由输入的电压进行控制。当电流变液流过环形间隙时,在电场的作用下就会发生电流变效应,从而产生阻尼力,进而改变上腔和下腔之间的压力差,使活塞运动受阻,达到减振目的。压力差的大小则由电流变液的流变特性决定,因此可以实现电压大小对减振器阻尼力大小的控制。其具体工作步骤:当钻杆传来的振动带动活塞向下运动的时候,

电流变液会通过环形间隙由下腔流入上腔,由于电流变效应使得下腔的压力大于上腔,因此活塞向下运动会受阻。同理,当活塞向上复原时,上腔的电流变液流入下腔,使得上腔的压力大于下腔,活塞向上运动受阻。在活塞上下的运动过程中,始终消耗钻杆振动产生的能量,最终可以达到减振的目的。为了降低密封性要求,此处采用弹簧Ⅱ来控制浮动活塞,以补偿活塞杆运动带来的体积变化,电流变液的密封则主要通过图2中的3个密封圈来实现。减振器的恢复力则主要由弹簧Ⅰ提供^[10]。

3 深孔加工系统的动力学分析

研究表明,深孔加工中的颤振主要是由切削厚度变化所引起的再生型颤振,故将深孔机床的加工系统简化成如图4所示的动力学模型。为了方便分析,电流变减振器可以看作一个由电压控制的阻尼与刚度可调的装置,故电流变减振器可由等效阻尼 C_E 和等效刚度 K_E 来表示,且 C_E 和 K_E 随电场强度的增大而增大。

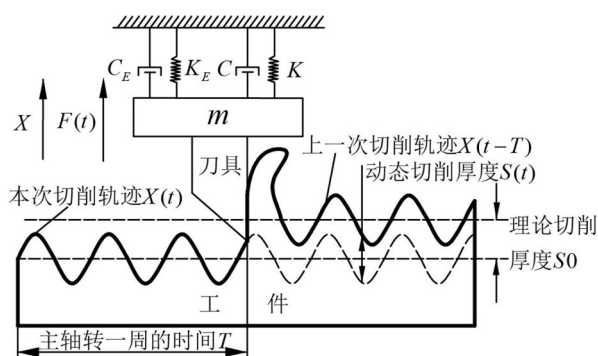


图4 机床切削系统的动力学模型

根据图4所示的动力学模型,可得其运动微分方程为

$$m\ddot{x}(t) + (C + C_E)\dot{x}(t) + (K + K_E)x(t) = F(t) \quad (3)$$

式中 m 为振动系统的等效质量; C 为机床自身的等效阻尼; C_E 为电流变减振器的等效阻尼; K 为机床自身的等效刚度; K_E 为电流变减振器的等效刚度。

当系统的激励为简谐波激励时,即 $F(t) = F_0 \cos(\omega t)$,可以求出系统的频率响应函数^[11]

$$H(\omega) = \frac{1}{1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2 + 2\xi(\frac{\omega}{\omega_n})i} \quad (4)$$

由此可以得到 $x(t)$ 的幅频特性

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2]^2 + (2\xi\frac{\omega}{\omega_n})^2}} \quad (5)$$

式中 $\omega_n = \sqrt{\frac{K + K_E}{m}}$; $\xi = \frac{C + C_E}{2m\omega_n}$ 。

随着电场强度的增大,电流变减振器的等效阻尼 C_E 和等效刚度 K_E 会增大,故系统的固有频率 ω_n

和阻尼比 ξ 也随之相应增大。为了观察二者的变化,我们利用MATLAB软件对系统的频率响应函数进行数值仿真,结果如图5所示。

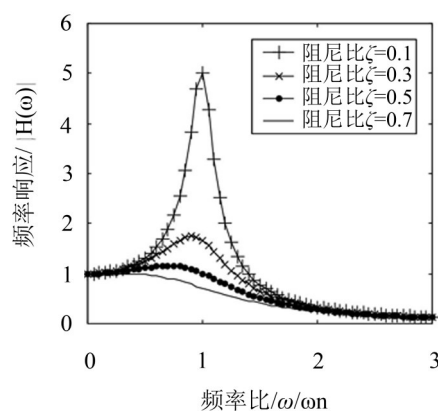


图5 系统的幅频响应曲线

从图5中可以看出,随着系统的阻尼比增大,颤振的振幅得到衰减,当阻尼比为1时,即在共振区域,系统振幅的衰减尤为明显。因此我们可以通过控制电流变液的阻尼大小来改变系统的阻尼比,从而达到控制颤振的目的。

事实上,如前所述,机床颤振是由于切削厚度变化所引起的再生型颤振问题。故由图4可知,机床切削系统的动态切削厚度 $s(t)$ 可以表示为

$$s(t) = s_0 - [x(t) - x(t - T)] \quad (6)$$

式中 s_0 为理论切削厚度; $x(t)$ 为本次切削轨迹; $x(t - T)$ 为上一次切削轨迹; T 为主轴转过一周所需要的时间。

如果只考虑切削厚度变化对切削力的影响,则动态切削力 $F(t)$ 可以表示为

$$F(t) = bk_s s(t) \quad (7)$$

式中 b 为切削宽度(mm); k_s 为切削力的切削厚度系数(N/mm^2); $s(t)$ 为动态切削厚度(mm)。

将式(6)、式(7)代入式(3)中,整理得

$$m\ddot{x}(t) + (C + C_E)\dot{x}(t) + (K + K_E)x(t) = bk_s \{s_0 - [x(t) - x(t - T)]\} \quad (8)$$

4 仿真分析与实验验证

首先在MATLAB/Simulink中创建一个深孔机床的切削颤振系统,通过求解系统的动力学方程,可得系统的振动时域图。通过观察安装电流变减振器前后系统的振动时域图,以及对比不同电场强度下系统的振动时域图,来分析电流变减振器的减振效果。

选取仿真的模拟条件为: $m = 400 \text{ kg}$, $K = 2.8 \times 10^7$

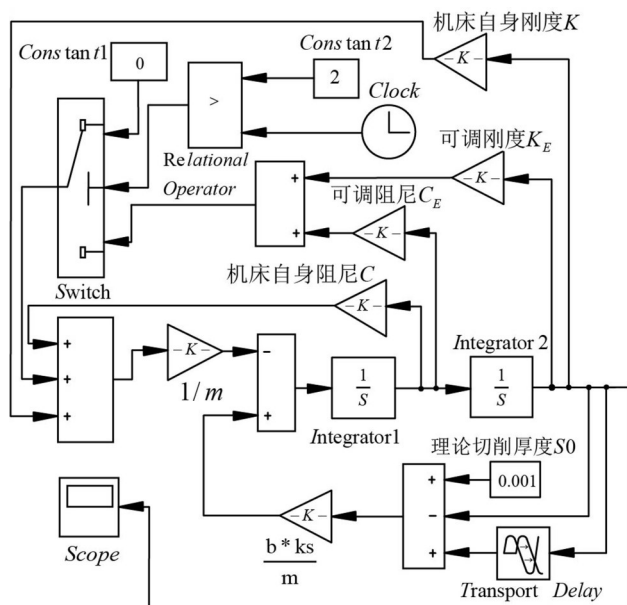


图6 深孔加工系统的仿真模块图

N/m , $C=5\ 321\text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$, $k_s=3\times 10^8\text{ N}/\text{m}^2$, $N=688\text{ r}/\text{min}$, $s_0=0.001\text{ m}$, $b=6\text{ mm}$ 。

根据主轴转速 N 可以计算出工件前后两转的时间差 $T=0.087\text{ s}$,依据动力学方程(8)在MATLAB/Simulink中搭建图6所示的仿真模块图,创建一个深孔机床切削颤振系统。如图6所示,利用Clock模块来控制仿真时间,当仿真时间小于 2 s 时,系统输出的是未安装电流变减振器时的波形图,用来模拟系统的切削颤振状态。当仿真时间大于 2 s 时,时间比较器Relational Operator开始作用,控制开关Switch让系统输入电流变减振器的等效阻尼 C_E 与等效刚度 K_E ,从而模拟系统安装电流变减振器后的状态。通过改变等效阻尼 C_E 和等效刚度 K_E 的取值,来模拟不同电场强度下电流变减振器的减振状态。

根据参考文献[12],当选用聚苯胺体系电流变液时,其在电场的作用下产生的等效阻尼 C_E 和等效刚度 K_E 可根据流变学理论得

$$\begin{cases} C_E = p\eta \\ K_E = pC' \end{cases} \quad (9)$$

式中 p 为与电流变液的工作状态有关的结构参数;

η 为动态粘度; G' 为储能模量。其中动态粘度 η 和储能模量 G' 可由动态振荡试验方法得到其拟合方程,如表1所示[12]。

由仿真参数知道 $f=\sqrt{K/m}=265\text{ Hz}$,取 $p=1/3\ 000$,根据公式(9)和表1,可以求出电流变减振器在不同电场强度下的等效阻尼 C_E 和等效刚度 K_E ,将其代入图6的仿真模块图中,并分别对未安装电流变减振器的系统和安装了电流变减振器且在不同电场强度下的系统进行封装,并在同一个示波器中进行显示,如图7所示。

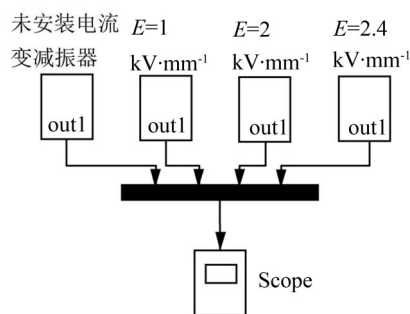


图7 不同条件下系统的封装图

通过仿真,在图7的示波器中得到系统在不同情况下的振动时域图,如图8所示。

由图8可以直观的看出, 2 s 之前,4种振动波形完全重合,说明此时电流变减振器还没有接入系统。 2 s 之后,当电场强度为 $1\text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ 、 $2\text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ 、 $2.4\text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ 时颤振系统的振幅对比未安装电流变减振器时,均有一定程度的下降,说明电流变减振器

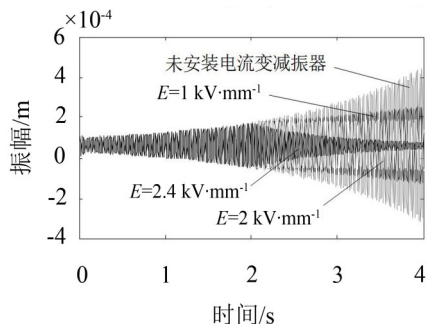


图8 不同条件下系统的振动时域图

表1 储能模量 G' 和动态粘度 η 的拟合方程

电场强度 $E/(\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1})$	G' 和 η 的拟合方程
1	$G' = 0.000\ 1f^5 - 0.013\ f^4 + 0.517\ 2f^3 - 9.067\ 4f^2 + 78.159\ 9f + 223.872\ 4$ $\eta = 0.000\ 4f^4 - 0.038\ 5f^3 + 1.359\ 1f^2 + 78.159\ 9f + 223.872\ 4 - 21.652\ 2f + 153.561$
2	$G' = -0.000\ 9f^5 + 0.036\ 1f^4 - 0.603\ 7f^3 + 4.048\ 4f^2 + 6.756\ 2f + 1\ 523.6$ $\eta = 0.000\ 7f^4 - 0.067\ 5f^3 + 2.392\ 5f^2 - 38.322\ 3f + 272.665\ 9$
2.4	$G' = 2.583\ 5 \times 10^{-5} f^6 - 0.003\ f^5 + 0.136\ 5 f^4 - 2.990\ 8f^3 + 33.1714f^2 - 160.868\ 7f + 2\ 520.9$ $\eta = 0.000\ 9f^4 - 0.082\ 8f^3 + 2.933\ f^2 - 47.039f + 335.196\ 5$

能够起到减振作用。

对比不同电场强度下颤振系统的振幅可以发现,电流变减振器在不同电场强度下具有不同的减振效果。当电场强度为 $1\text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ 和 $2\text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ 时,减振器并没有完全抑制颤振的发生,只是延长了颤振孕育的时间,随着时间的积累,最终还是会导致颤振的发生。但是当电场强度为 $2.4\text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ 时,可以看到,在2 s时,系统出现颤振,这时减振器开始发挥作用,在3 s时振幅已经下降了50%,响应时间仅为1 s,在4 s时系统已经恢复平衡状态,颤振得到完全抑制,说明此时的电场强度为电流变减振器工作的最佳值。

为了验证上述分析的有效性,在BTA深孔机床上建立了颤振控制实验系统,其原理如图9所示。将电流变减振器安装于BTA钻杆上,加速度传感器采集钻杆的振动信号,经过电荷放大器放大后,传递给通道盒,计算机根据程序设定读取固定通道,经过A/D转换卡转化为数据,并在计算机上进行数据处理和显示。

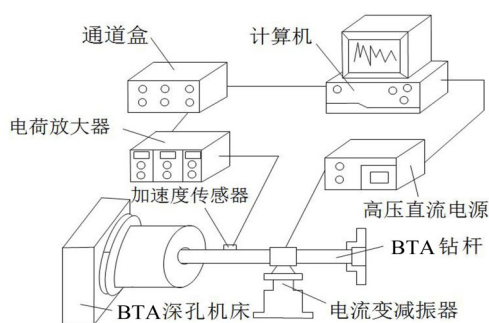


图9 颤振控制实验系统原理图

实验条件如下:

刀具:BTA深孔钻,钻削直径50 mm;钻杆:长度5 m,外径46 mm,内径30 mm;试件:45钢,直径100 mm,加工长度:80 mm;主轴转速:600 r/min;进给量:0.2 mm/r;切削液流量:240 L/min;供油压力:2 Mpa;输入电压:2 kV;进给方式:机床自动进给。

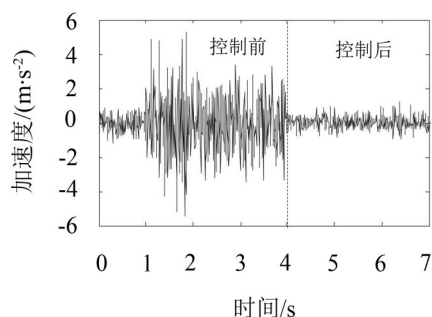


图10 控制前后的加速度信号时域图

仿真和实验结果表明,通过调节电流变减振器的工作电压来改变电场强度能够有效地解决深孔加工中出现的切削颤振问题,而且响应迅速,减振效果显著。

5 结 语

(1) 根据电流变减振器的工作原理,设计了一套基于流动与剪切混合工作模式的电流变减振器,其等效阻尼 C_e 和等效刚度 K_e 会随电场强度的增大而增大,将其用于深孔切削颤振控制中具有响应速度快,控制精度高的优点;

(2) 对安装了电流变减振器的深孔机床系统进行动力学建模,利用Matlab对其进行仿真分析并进行实验验证,结果表明:电流变减振器能够通过增加系统的阻尼比来使振幅衰减,可以有效地抑制深孔加工中出现的切削颤振,且响应迅速。通过调节电压的大小可以使电流变减振器在最佳的电压下达到最佳的减振效果。

参考文献:

- [1] 周文晋,鲁宏权,孟光. 电流变液夹层壳体振动隔离的实验研究[J]. *噪声与振动控制*, 2005, 25(1): 14-17.
- [2] Nicholas, Petek. Adjustable dampers using ER fluid [P]. Patent number: US 5259487.
- [3] S B Choi, Y T Choi. Control characteristics of a continuously variable ER damper[J]. *Mechatronics*, 1998 (8): 143-161.
- [4] 高晶敏. 电流变液体减振器及其控制系统研究[D]. 北京:北京理工大学, 1999.
- [5] 费仁元,王民. 基于电流变材料的智能结构[J]. *北京工业大学学报*, 2001, 27(4): 394-398.
- [6] 于骏一,刘述芳. 电流变效应在抑制车削振动中的应用[J]. *制造技术与机床*, 2000(6): 8-10.
- [7] 吕海波,张春良. 电流变技术应用于切削颤振控制的理论研究[J]. *噪声与振动控制*, 2006, 26(2): 28-30.
- [8] 沈楚敬. 电流变液在车辆减振器中的应用[J]. *农业装备与车辆工程*, 2008(2): 26-28.
- [9] 张永发,沈楚敬,赵霞. 基于电流变减振器的汽车半主动悬架的开关控制[J]. *北京理工大学学报*, 2006, 26(10): 863-866.
- [10] 邹屹. 基于电流变材料的减振器设计及控制策略的研究[D]. 扬州:扬州大学, 2009.
- [11] 徐平,王洋,于英华. 电流变技术在机床切削颤振控制中的应用[J]. *机械设计与制造*, 2008(3): 131-133.
- [12] 张永亮,于骏一,侯东霞,等. 基于电流变效应的车削颤振预报控制技术研究[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(4): 206-210.