

文章编号: 1000-8055(2006) 03-0550-06

盘型磁流变流体阻尼器悬臂转子 系统响应时间测试

祝长生

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 在不同的磁流变流体、激励方式、转子转速以及磁场强度情况下系统地测量了盘型磁流变流体阻尼器悬臂转子系统的响应时间。结果发现转子系统的响应时间由初始响应时间、快速响应时间和慢变响应时间3部分组成。转子系统的初始响应时间一般小于100 ms, 快速响应时间一般在50~400 ms的范围内, 两者均不可能为几个毫秒。初始响应时间及快速响应时间不仅与磁场强度、磁流变流体的组分和转子转速有关, 而且还与激励方式有关。突加电流过程中的响应时间比去掉电流过程中的响应时间短。无论是在突加电流还是在去掉电流的过程中, 都存在着一个由磁化或去磁过程引起的初始滞后时间。

关键词: 航空、航天推进系统; 磁流变流体; 响应时间; 阻尼器; 转子; 振动

中图分类号: V321.96; TH133; O328

文献标识码: A

Response Time Measurement of a Cantilever Rotor with a Disk-Type Magnetorheological Fluid Damper

ZHU Chang-sheng

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The response time of a cantilever rotor with a disk-type magnetorheological (MR) fluid damper operating in a shear mode were measured at different excitation modes, rotational speeds and magnetic flux densities of different MR fluids. It was shown that the response time of the MR fluid damper rotor system consisted of the initial response time, rapid response time and last slow response time. The initial response time was less than 100 milliseconds; the rapid response time was about 50 ~ 400 milliseconds and both were impossible to be within a few milliseconds. The initial response time and the rapid response time were related not only to the magnetic flux density, magnetic particle weight ratio in the MR fluid and rotational speed, but also to the operating mode of the power supply. The response time of the rotor system during switching the step current off was longer than that during switching the step current on. There was an initial delay time at either switching the step current on or off, which was caused by the magnetizing or de-magnetizing process.

Key words: aerospace propulsion system; magnetorheological fluid; response time; damper; rotor; vibration

收稿日期: 2005- 06- 04; 修订日期: 2005- 11- 08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(10332030)

作者简介: 祝长生(1963-), 男, 陕西乾县人, 浙江大学电气工程学院教授, 博士生导师, 主要从事转子动力学的研究。

磁流变流体不仅具有比电流变流体更好的特性,而且由于磁流变流体执行器能够利用简单的低压磁路产生的磁场来控制其动力特性,所以基于磁流变流体的各种执行器很快在工程上得到了一系列成功的应用。为了恰当地选择控制策略以便利用这些磁流变流体执行器对机电系统的动力特性进行有效的控制,就必须对系统的动力响应时间予以充分地了解。

目前有关智能流体执行器响应时间的研究主要是针对电流变流体系统,响应时间从几毫秒到几秒均有报道^[1~5]。对磁流变流体执行器及其系统而言,仍缺乏对其响应时间开展系统地研究^[6],许多文献资料认为基于磁流变流体的各种执行器及系统的响应时间也在几个毫秒范围内,但缺乏必要的试验结果。作者在开发用于旋转机械转子系统振动主动控制的磁流变流体阻尼器的过程中^[7~9],对各类磁流变流体阻尼器转子系统的响应时间进行了大量的研究,本文主要报道在不同的磁流变流体、供电方式以及磁场强度情况下盘型磁流变流体阻尼器悬臂转子系统响应时间的测量结果。

1 实验设备简介

盘型磁流变流体阻尼器的结构如图 1 所示。它由固定在滚动轴承轴颈上的可动盘、周向线圈、

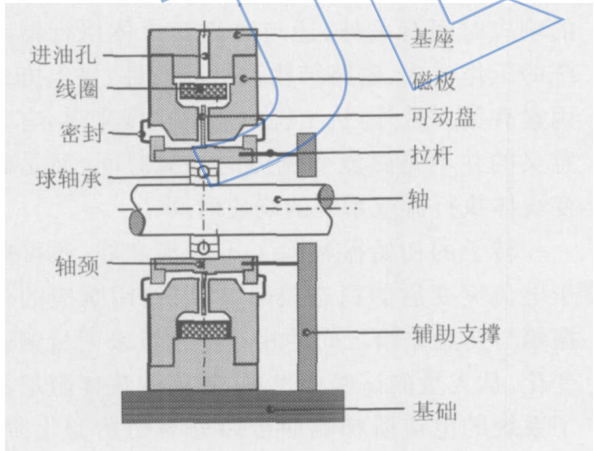


图1 盘型磁流变流体阻尼器基本结构

Fig. 1 Schematic of a disk-type MR fluid damper

磁极和基座等组成。可动盘、磁极和基座为导磁材料,其它为非导磁材料。在可动盘与磁极之间形成两个轴向工作间隙,在磁极内径与轴颈外径之间形成径向工作间隙。轴颈与磁极间采用了柔性周向密封。磁流变流体充在两个轴向及径向间隙中。为了减弱在径向间隙中产生的挤压效应,设计中

选择了较大的径向间隙。

轴颈通过拉杆式定心弹簧固定在辅助支撑上。当可动盘随轴颈发生涡动时,将对轴向间隙中的磁流变流体产生剪切作用,从而产生流体阻力来消耗转子的能量。通过周向线圈中的电流来改变轴向间隙中的磁场,进而改变磁流变流体的流变学特性,达到改变阻尼器动力特性之目的。实验中阻尼器的主要参数为:线圈匝数为1 000,线径为0.5 mm,电阻为43.6 Ω ,单边轴向间隙为2.5 mm,径向间隙为4.5 mm,磁极的内、外径分别为80 mm及124 mm。

实验转子的一端刚性地支承在滚动轴承上,另一端支承在盘型磁流变流体阻尼器上,悬臂端固定有一个刚性均质圆盘,如图2所示。转子两端均为刚性支承时系统的一阶临界转速为1 700 r/min;转子的一端为刚性支承,另一端支承在未充有磁流变流体阻尼器上时,系统的一阶临界转速为1 260 r/min。

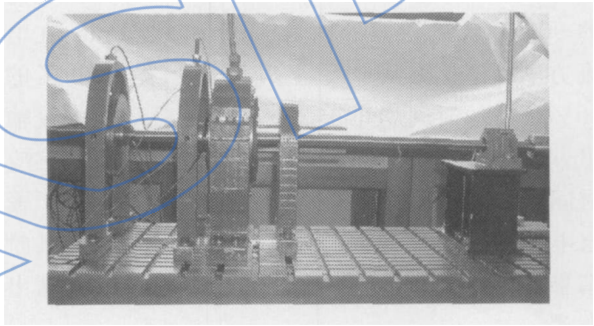


图2 单盘悬臂转子试验系统

Fig. 2 Rotor rig with an overhung disk

磁流变流体是由平均直径为5 μm 的磁性铁粉、基油和少量的稳定剂按照一定的比例组成。试验中采用的磁流变流体中磁性粒子的重量占流体总重量的百分比分别约为25%、50%及83%。基油在常温下的粘度为 $3.23 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。

线圈的激励电源为一个可控型直流电源。电源可以按照电压输出或电流输出方式工作。

2 实验结果及分析

2.1 激励系统的响应特性

为了研究盘型磁流变流体阻尼器转子系统的振动对控制信号的响应特性,首先必须了解激励电源对控制信号的动态响应。图3分别为由电源与线圈组成的回路中,电源在电流和电压工作方式下电压分别从0 V 突然升到10 V 及20 V 时系统的阶梯响应时间历程。图中时间的分辨率为0.4

ms。

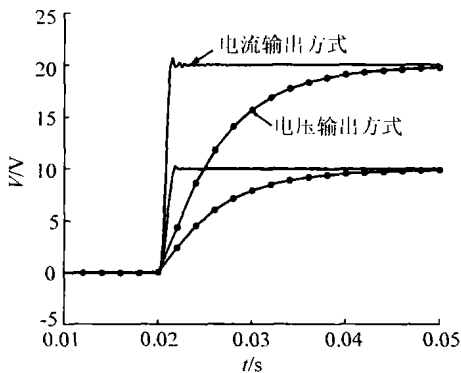


图3 电源在不同输出方式时的阶梯响应

性是可控的, 通过改变阻尼器线圈上的电流可以达到控制转子系统动力特性之目的。

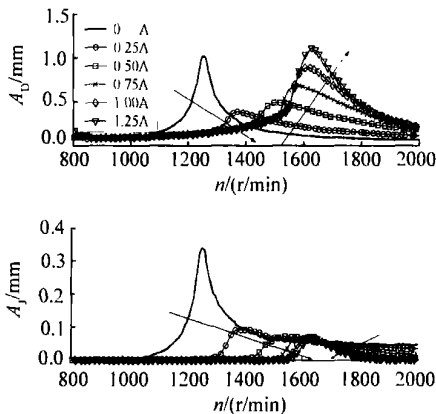


图4 电流对转子系统不平衡响应的影响

Fig. 4 Effect of the applied current on the

unbalance response of
the rotor system

结果表明该电源在电压方式下工作时为一个一阶系统, 在电流方式下工作时为一个二阶系统。在电压方式下, 电压从0 V 上升到10 V 及20 V 的90%所需的时间分别为14.5和14.9 ms。在电流方式下, 电压从0 V 上升到任何给定电压的90%所需的时间均小于2 ms。激励系统在电流输出方式下的响应时间远比电压输出方式下的响应时间小。另外, 激励系统的响应时间并不依赖于输出电压的大小。为了最大地减小激励系统对试验结果的影响, 试验中的激励电源采用了电流输出方式。

2.2 转子系统的稳态特性

图4 为不平衡量为143 g·mm 时, 线圈电流对充有重量比为50%的磁流变流体阻尼器转子系统不平衡响应的影响。图中 A_D 和 A_J 分别表示盘及轴颈处的振幅。箭头表示电流增大的方向。无电流时, 虽然轴颈的振动较大, 但阻尼器上产生的流体力还不足以抑制盘的振动, 所以转子系统在一阶柔支临界转速附近出现了明显的共振峰。随着电流的增大, 阻尼器上产生的流体力增大, 轴颈的振动逐渐减小, 盘的振动在系统的一阶柔支临界转速区明显减小, 但在系统的一阶刚支临界转速区迅速增大。对于盘的振动而言, 存在着一个能够使其振动达到最小的最佳电流。当电流超过了最佳电流后, 虽然盘的振动在系统的一阶柔支临界转速区变化不大, 但在接近系统的一阶刚支临界转速时迅速增大, 反而出现了明显的共振峰, 由最大振幅确定出的峰值转速趋于转子系统的一阶刚支临界转速。可见盘型磁流变流体阻尼器的特

2.3 转子系统响应时间的定义

首先区分一下磁流变流体的响应时间与基于磁流变流体执行器或系统的响应时间这两个经常容易混淆的基本概念。磁流变流体的响应时间可能会很短, 达到几个毫秒, 但这并不意味着基于磁流变流体的执行器或含有磁流变流体执行器系统的响应时间也在几个毫秒的范围内。因为磁流变流体执行器或系统的响应时间除了与磁流变流体的响应时间有关外, 还与磁流变流体执行器或系统的工作方式、磁路结构及材料特性、供电方式等因素有关。另外, 从工程应用的角度来讲, 有实际意义的并不是磁流变流体的响应时间, 而是磁流变流体执行器或系统的响应时间。

转子的初始振幅除了不为零之外, 还可能大于电流突变后的稳态振幅, 所以使用响应的最终振幅与初始振幅之间的相对变化量来衡量响应的变化。从大量的试验中发现, 磁流变流体阻尼器转子系统的电流阶梯响应可以分为初始变化阶段、快速变化阶段和缓慢变化阶段, 其动力特性不能用一个一阶动力系统, 至少需要用一个二阶动力系统来描述, 所以这里我们采用二阶动力系统中常用的系统前10%的响应时间和快速变化响应时间来衡量转子系统的动态特性。系统前10%的响应时间 t_0 是从阶梯电流开始作用到转子的振幅达到振幅相对变化量的10%时所需的时间; 快速响应时间 t 为转子的振幅从振幅相对变化量的10% (或90%) 到90% (或10%) 之间所

需的时间。

因为盘的振动突变较为明显, 所以本文响应时间的计算是以盘的振动响应为基础得到的。

2.4 转速、电流及磁流变流体的组分对系统响应时间的影响

图 5 为阻尼器中充有重量比为 25% 的磁流变流体的转子系统在 1 275 r/min 的稳态转速下运行时, 不同的电流突变过程中盘的运动轨迹及盘垂直方向振动的时间历程。图中 x 和 y 分别表示盘处的水平和垂直方向的振动, 图 5(a) 和 (b) 分别为突加电流过程中盘的运动轨迹和响应时间历程, 图 5(c) 和 (d) 分别为去掉电流过程中盘的运动轨迹和响应时间历程, 响应时间历程图中的竖线为电流突变的开始位置(以下同)。当电流突

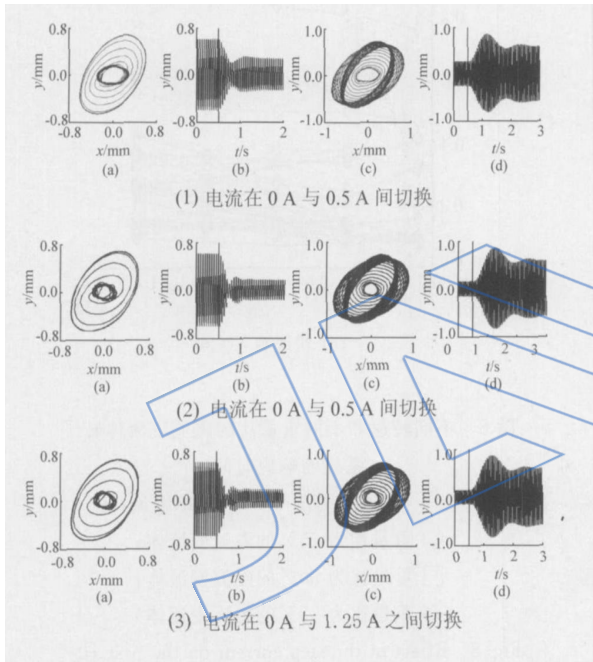


图 5 重量比为 25% 的磁流变流体阻尼器转子系统
电流突变对盘的运动轨迹及响应
时间历程的影响

(a) 和 (b) 分别为突加电流过程中盘的运动轨迹
和响应时间历程
(c) 和 (d) 分别为取消电流过程中盘的运动轨迹
和响应时间历程

Fig. 5 Effect of the current on rotor motion
orbits and transient response
(for 25 wt % MR fluid)

变后, 转子系统的振动迅速发生变化, 并在较短的时间内达到一个新的稳定状态, 在振幅接近最终振幅时可能会出现振荡超调现象, 但未出现任何

不稳定。一般情况下, 系统的快速响应时间随突变电流的增大而增大, 突加电流过程中系统的快速响应时间较去掉电流过程中系统的快速响应时间短。如电流为 0.5、0.75、1.0 和 1.25 A 时, 突加电流时系统的快速响应时间在 128~157 ms 范围内, 去掉电流时在 218~265 ms 的范围内。实际上, 从盘的运动轨迹图中同样也可以得到相同的结论, 如电流突加后, 盘要经过 3~4 圈才能趋于最后的稳态轨道, 期间需时约 150~200 ms, 而电流去掉时, 盘要经过较多圈后才趋于最后的稳态轨道, 所以需要的时间也较长。

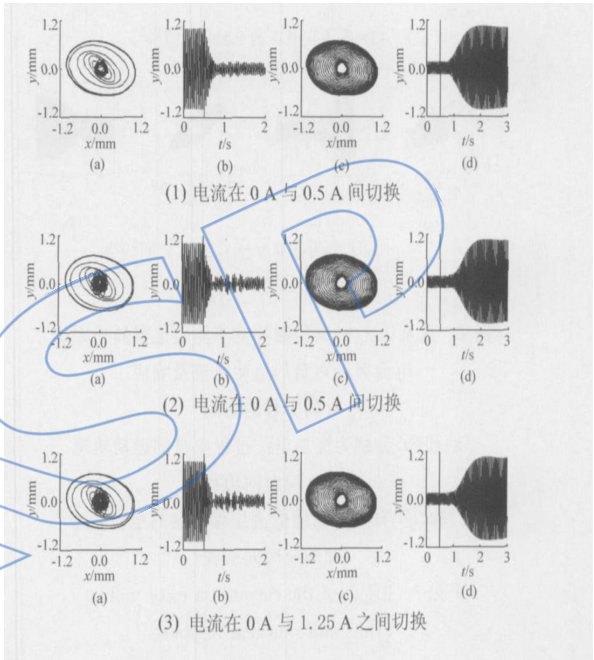


图 6 重量比为 50% 的磁流变流体阻尼器转子系统
电流突变对盘的运动轨迹及响应
时间历程的影响

(a) 和 (b) 分别为突加电流过程中盘的运动轨迹
和响应时间历程
(c) 和 (d) 分别为取消电流过程中盘的运动轨迹
和响应时间历程

Fig. 6 Effect of the current on rotor motion
orbits and transient response
(for 50 wt % MR fluid)

图 6 和图 7 分别为同一转速下阻尼器中充有重量比为 50% 和 83% 的磁流变流体的转子系统, 不同的电流突变过程中盘的运动轨迹及盘垂直方向振动的时间历程。一般情况下, 当磁流变流体中磁性粒子较多时, 前 10% 的响应时间在突加电流过程中缩小, 但在取消电流的过程中显著增大; 突加电流后的振荡现象越明显, 但去掉电流后振荡

现象反而减弱。磁流变流体中磁性粒子的增大, 系统的快速响应时间并没有发生明显变化。

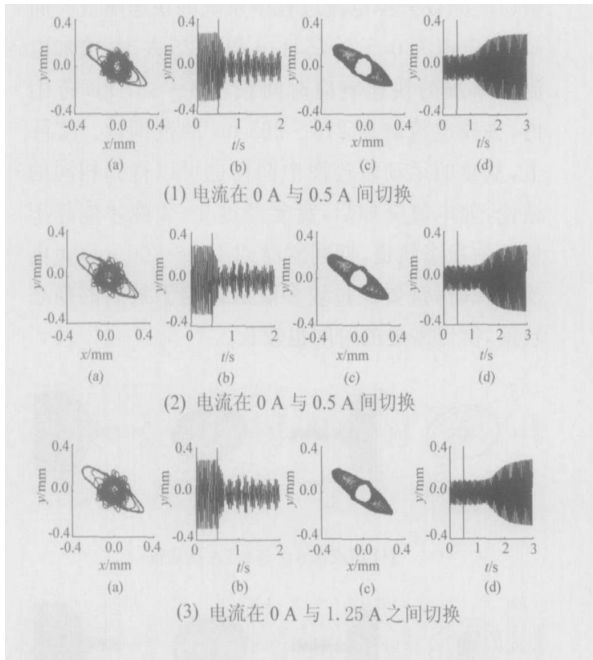


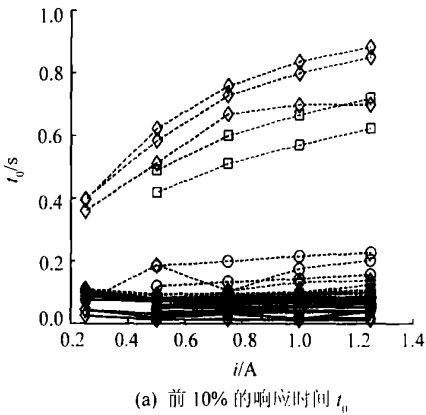
图7 重量比为83%的磁流变流体阻尼器转子系统
电流突变对盘的运动轨迹及响应
时间历程的影响

(a)和(b) 分别为突加电流过程中盘的运动轨迹
和响应时间历程
(c)和(d) 分别为取消电流过程中盘的运动轨迹
和响应时间历程

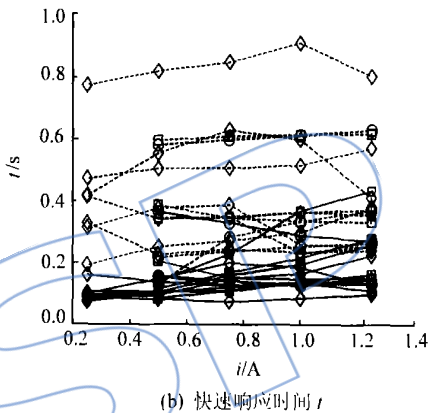
Fig.7 Effect of the current on rotor motion
orbits and transient response
(for 83 wt % MR fluid)

图8 为充有不同组分磁流变流体阻尼器的转子系统在不同的工作转速和突变电流条件下测量得到的系统前10% 的响应时间以及快速响应响应时间。结果清楚地表明了, 突加电流时系统前10% 的响应时间一般小于100 ms, 突变电流幅度及转速对其影响不大。去掉电流时系统前10% 的响应时间一般比突加电流时的响应时间大2~8 倍, 特别是在磁流体中磁性粒子较多时去掉电流时系统前10% 的响应时间更长, 且随突变电流幅度的增大而增大。电流突加过程中系统的快速响应时间一般大于50 ms 小于400 ms。去掉电流过程中系统的快速响应时间同样比突加电流时系统的快速响应时间高出1~3 倍。电流突加或去掉过程中系统的快速响应时间与突变电流的大小及转速之间存在着极为复杂的关系, 有时在增大, 有时反而减小。电流突加时系统响应较电流去掉时快的原因

在于磁性材料的磁化过程较去磁过程快之故。



(a) 前 10% 的响应时间 t_0



(b) 快速响应时间 t

图8 不同转速和不同重量比的磁流变流体转子
系统的响应时间

(—— 突加电流; - - - 去掉电流;
○ 重量比为 25% 的磁流变流体;
□ 重量比为 50% 的磁流变流体;
◇ 重量比为 83% 的磁流变流体)

Fig.8 Effect of the step current on the first 10%
response time and rapid response
time at different rotational
speeds and MR fluids

通过对系统响应过程的仔细分析还发现, 系统前10% 的响应时间又可以分为初始磁滞后时间和系统开始响应时间, 前者表示在电流开始变化到系统的振幅开始发生变化所需的时间, 后者表示系统的振幅开始发生变化到振幅相对变化量的10% 时所需的时间。去掉电流过程中初始磁滞后时间随阶梯电流以及磁流变流体中磁性粒子重量比的增大明显增大。初始磁滞后时间的存在是因为磁性材料的磁化或去磁需要一定的时间。

3 结 论

(1) 磁流变流体阻尼器激励电源的输出方式对系统的响应时间有重要的影响, 电流输出方式电源的响应时间远小于电压输出方式电源的响应时间。

(2) 盘型磁流变流体阻尼器支撑的转子系统是一个典型的二阶系统, 其响应时间由前 10% 的响应时间、快速响应时间和慢变响应时间 3 部分组成。一般情况下, 突加电流时系统前 10% 的响应时间小于 100 ms, 快速响应时间在 50~400 ms 范围内。去掉电流时系统前 10% 及快速响应时间比突加电流过程中相应的响应时间大好几倍, 特别是在磁流变流体中磁性粒子较多的情况下更为明显。系统前 10% 的响应时间实际上是由材料磁化或去磁过程引起的初始磁滞后时间和系统开始响应时间组成。

(3) 盘型磁流变流体阻尼器更适合对转子系统的振动进行半主动控制, 在需要对转子系统的振动进行连续控制的情况下, 应采用必要的措施来改善系统的动态特性, 否则无法满足高速转子系统振动主动控制的要求。

参考文献:

[1] Zamudio V, et al. Response Time in Electrorheological Fluids as a Function of Dielectric Constant and Viscosity

[J]. *Physica A*, 1996, 227: 55~65.

[2] Hill J C, Steenkiste H V. Response Times of Electrorheological Fluids[J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, 70(4): 1207~1211.

[3] Peel D J, et al. The Time Response Sequence of an Electro-Rheological Fluid [A]. Proc. Actuator 90 Congress, Bremen, Germany[C]. 1990, 144~149.

[4] Navay R. Response Time and Viscosity of Electrorheological Fluids[J]. *Smart Mater. Struct.*, 1997, 6(1): 67~75.

[5] Hosseini-Sianaki A, et al. 1991 Experimental Measurements of the Dynamic Torque Response of an Electrorheological Fluid in the Shear Mode[A]. Proc. of the 2-nd Int. Conference on Electrorheological Fluids [C]. *World Scientific*, 1991, 219~235.

[6] 关新春, 欧进萍. 磁流变减振驱动器的响应时间试验与分析[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(6): 96~102.

Guan Xinchun, Ou Jinping. Response Time Experiment and Analysis of Magnetorheological Fluid Actuator [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2002, 22(6): 96~102.

[7] Zhu C S, et al. Magnetorheological Fluid Dampers for Rotor Vibration Control [A]. Proc. of 2001 AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference[C]. AIAA, 2001, 3: 2121~2127.

[8] Zhu C S. Dynamics of a Rotor Supported on Magneto-Rheological Fluid Squeeze Film Damper [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2001, 14(1): 6~12.

[9] Zhu C S. A Disc-Type Magnetorheological Fluid Damper [J]. *Journal of Zhejiang University SCIENCE*, 2003, 4(5): 514~519.