

文章编号: 1000-8055(2005) 03-0424-05

挤压式磁流变液阻尼器—转子系统的 振动控制试验

汪建晓^{1,2}, 孟 光², 陈运西³

(1. 佛山大学 机电工程系, 广东 佛山 528000;

2. 上海交通大学 振动、冲击、噪声国家重点实验室, 上海 200030;

3. 中国航空动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘要: 以小型航空发动机的转子和支承结构为设计参考, 设计和制造了一种支承在挤压式磁流变液阻尼器上的单盘转子系统, 并试验研究了在不同控制电流条件下系统的不平衡响应特性。试验发现, 磁拉力对一阶临界转速和临界振幅的影响可以忽略; 油膜反力可降低转子系统在无阻尼临界转速处的振幅, 并使临界转速增加。根据这一特性, 提出用开关控制能使阻尼器具有最佳的减振效果。研究表明, 挤压式磁流变液阻尼器具有结构简单、控振效果明显、反馈迅速等特点, 在高速柔性转子系统的振动控制中极具应用前景。

关键词: 航空、航天推进系统; 磁流变液; 阻尼器; 转子; 振动控制

中图分类号: O 328

文献标识码: A

Experimental Study on Rotor System Vibration Control of a Squeeze MR Fluid Damper

WANG Jian-xiao^{1,2}, MENG Guang², CHEN Yun-xi³

(1. Mechatronics Department, Foshan University, Foshan 528000, China;

2. State Key Laboratory of Vibration, Shock and Noise,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

3. China Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: Refer to the rotor and supporting structure of small aero-engines, a single-disk rotor system supported on a squeeze MR fluid damper was designed and manufactured. The unbalance response of the system at different control currents was experimentally studied. It was found that the effects of the magnetic pulling force on the first critical speed and the amplitude can be omitted. The oil film reaction force can diminish the amplitude at the critical speeds without damper, and increase the critical speeds. The damper will have the best effect in minimizing the vibration within the specified range at all working speed by using on-off control method. The research shows that the squeeze MR fluid damper has the advantages such as structure simplicity, high effectiveness, quick response, etc., and this kind of damper has a promising potential future in vibration control of high-speed flexible rotor systems.

Key words: aerospace propulsion system; magneto-rheological fluids; damper; rotor; vibration control

收稿日期: 2004- 07- 10; 修订日期: 2004- 10- 10

基金项目: 国防科技预研资助项目(402020203); 广东省自然科学基金资助项目(04300692)

作者简介: 汪建晓(1964-), 男, 河北蠡县人, 佛山大学机电工程系副教授, 博士, 主要从事智能结构与振动控制研究。//www.cnki.net

近年来,磁流变液作为一种智能材料得到学者和企业界的广泛研究和关注。磁流变液在外加磁场作用下其流变特性可发生连续、可逆和迅速的变化,并且易于控制。磁流变液阻尼器是磁流变液的一种主要应用装置,可用于控制振动系统的阻尼和刚度,是被动控制元件的理想替代装置,已在汽车、机械、建筑等领域的振动主动控制方面得到了一定的应用^[1,2]。根据转子及其支承系统的结构和振动特点,文献[3~5]将剪切式和挤压式磁流变液阻尼器引入转子振动主动控制,可抑制柔性转子通过临界转速的振动,取得了较好的振动控制效果。这些成果显示出磁流变液阻尼器在航空发动机和转子试验器等高速旋转机械上有潜在的应用前景,但是文献[3~5]中试验所用转子轴径($\Phi 9.5\text{ mm}$)较小,弹性支承的精度和刚度也远低于工程实际应用的航空发动机转子,因此,试验得出的振动控制特性可能与工程实际还有一定距离。本研究以工程应用的小型航空发动机转子为研究参考,采用较大的转子轴径和航空发动机所用的鼠笼式弹性支承结构,对挤压式磁流变液阻尼器应用于柔性转子系统振动控制的特性进行试验研究,得出了磁流变液阻尼器的一些新特点,对磁流变液阻尼器的工程应用具有参考价值。

1 试验装置

试验转子为单盘转子,轴的左侧通过球轴承支承刚性支座上,右侧通过球轴承支承在磁流变液阻尼器的弹性支座上,其力学模型可看作一端刚性支承、一端弹性支承的Jeffcott转子。支点跨距为400 mm。转子主要轴段直径为25 mm,轴颈直径为20 mm。圆盘直径为160 mm,质量为6.2 kg。转子轴刚支端通过弹性销联结的套筒联轴器与驱动电机轴相连。试验转子系统如图1所示。

挤压式磁流变液阻尼器相当于使用磁流变液的挤压油膜阻尼器,其基本结构如图2所示。内环通过球轴承与转子相连,跟随转子轴心涡动,而不跟随转子回转。外环固定于刚性支座内,内环由鼠笼式弹性支承(图中未示出)定心。转子涡动时,内环挤压外环与内环之间的磁流变液,从而产生挤压反力。由于磁流变液的屈服应力受磁场控制,从而挤压反力也受磁场控制。内环与外环的间隙为2 mm。本试验使用美国Lord公司的磁流变液。内环、外环与磁流变液均是磁路的一部分,磁力线如图2所示。产生磁场的电磁线圈匝数为550。

转子振动试验在中国航空动力机械研究所

B710 临界转速试验器上进行,其驱动电动机输出转速范围为0~45 000 r/min。在本试验中,考虑到转子的二阶临界转速与球轴承采用脂润滑时的极限转速(15 000 r/min)较为接近,为轴承的安全起见,将试验目标定为对转子一阶临界振动进行控制,因而试验转速范围定为0~10 000 r/min。

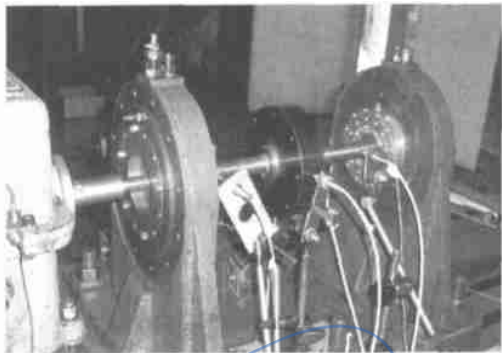


图1 试验转子系统照片
Fig. 1 Photo of the testing rotor system

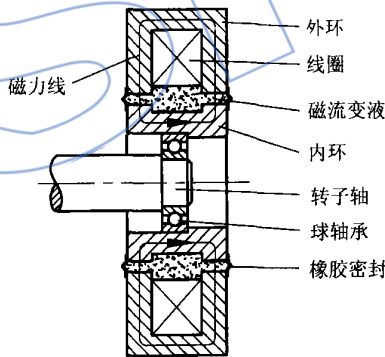


图2 阻尼器的结构
Fig. 2 Structure of the damper

测试系统主要由电涡流传感器及其前置器、示波器、数据采集接口箱、笔记本电脑和磁带记录仪等设备组成。两只 $\Phi 8\text{ mm}$ 电涡流传感器用来测量圆盘对机座的水平方向(# 1)和垂直方向(# 2)的相对位移。另有两只 $\Phi 8\text{ mm}$ 电涡流传感器用来测量靠近阻尼器处轴对机座的水平方向(# 3)和垂直方向(# 4)的相对位移。使用另一只电涡流传感器(# 5)作为键相传感器,使其在轴向对准粘在轴上的金属片,用于测量转速,并作为测量相位角的参考标志。用示波器监视各信号的状态。由数据采集接口箱和笔记本电脑组成Bently 旋转机械振动监视及分析系统,用于信号的监视、采集、记录以及分析,可以获得转子在跨中圆盘和靠近

右支承处轴的轴心轨迹、时域波形、频响曲线和瀑布图等。

2 试验过程

为了研究试验转子系统在各种状态和控制条件下的振动特性, 主要分两个阶段进行试验:

第一阶段: 磁流变液阻尼器内未加入磁流变液, 圆盘上加不平衡配重 $2.8\text{ g}\cdot\text{cm}$, 进行以下两项实验:

- (1) 转子的转速从 0 升速到 $10\,000\text{ r/min}$, 阻尼器不加控制电流, 用于确定系统的临界转速。
- (2) 转子在临界转速附近稳定运转、阻尼器控制电流从 0 A 逐渐增大到 2 A, 用于研究磁拉力的影响。

第二阶段: 磁流变液阻尼器内加入 Lord 公司的磁流变液, 圆盘上加不平衡配重 $9.8\text{ g}\cdot\text{cm}$ 。在此阶段主要进行了以下两项实验:

- (1) 转子的转速从 0 升速到 $10\,000\text{ r/min}$, 阻尼器分别施加 0, 0.5, 1.0 和 1.5 A 的稳态电流, 用于获得在不同控制电流时转子系统的频率特性。
- (2) 转子在临界转速附近若干转速稳定运转, 阻尼器分别施加或撤除 0.5, 1.0 A 的电流, 用于研究控制电流对转子运动稳定性的影响。

3 试验结果及分析

3.1 未加入磁流变液时的试验

不加控制电流时的升速试验发现转子系统的一阶临界转速在水平方向和垂直方向基本一致, 为 $5\,440\text{ r/min}$, 说明弹性支承的刚度基本是对称的。在临界转速附近加控制电流的试验发现, 即使当控制电流增加到 2 A 时, 转子圆盘的振幅也没有发生改变, 表明单独的磁场所产生的磁拉力不足以控制转子的振动。这一结果与文献[5]的试验结果不同, 其原因在于本试验所用的鼠笼式弹性支承的刚度 ($2.12\times 10^6\text{ N/m}$) 和定心精度远比文献[5]的小型阻尼器所用的组合弹性杆式弹性支承的刚度 ($8.7\times 10^4\text{ N/m}$) 和定心精度高, 使得不平衡磁拉力的作用效果微弱。因此可以说, 对工程应用的弹性支承转子系统, 磁拉力的作用可以忽略。

3.2 加入磁流变液后的试验

图 3 是阻尼器分别施加 0, 0.5 和 1.0 A 稳态电流时转子系统升速的波德图 (频率特性曲线)。图上共有 4 幅波德图, 其中 (a), (b), (c), (d) 分别对应 # 1, # 2, # 3, # 4 电涡流传感器的测试信号的波德图 (图中符号 A_{pp} 表示振幅峰-峰值)。

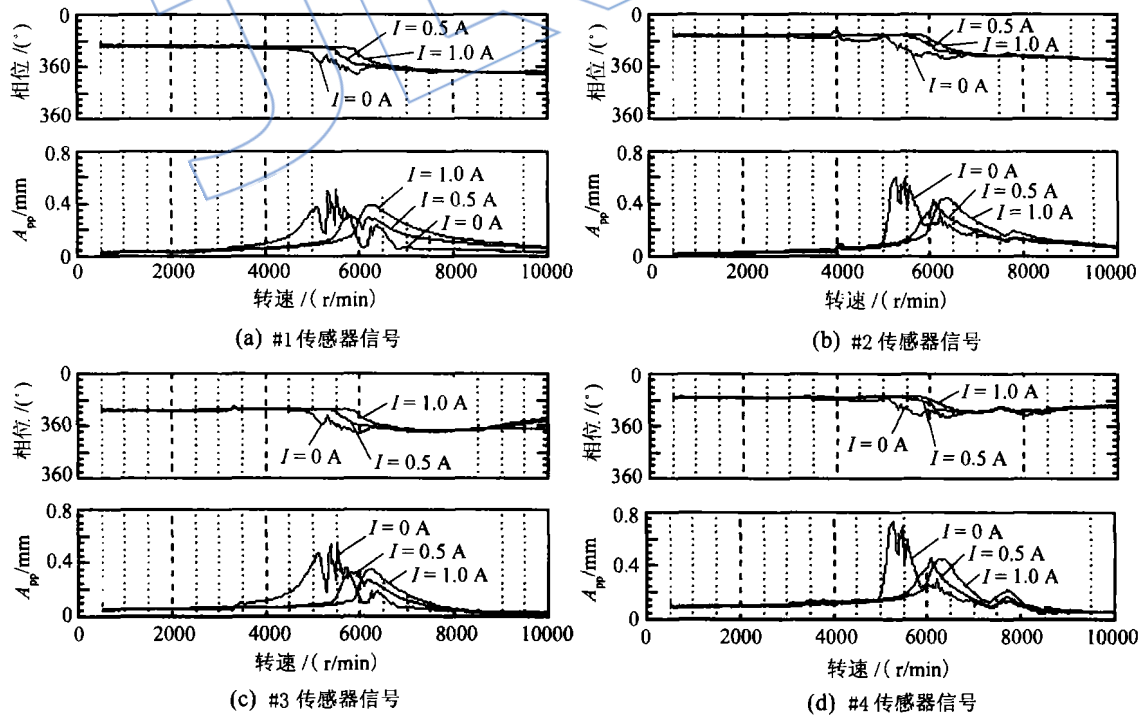


图 3 控制电流对转子系统频率特性的影响

由图3 各幅频曲线可见,当 $I=0\text{ A}$ 时,转子在一阶临界转速附近振幅出现波动,各通道未在同一转速下达到最大振幅。水平方向(# 1, # 3)最大振幅出现在 $5\,550\text{ r/min}$,而垂直方向(# 2, # 4)最大振幅出现在 $5\,300\text{ r/min}$,其平均临界转速为 $5\,440\text{ r/min}$,恰与未加入磁流变液时转子系统的临界转速一致。显然,磁流变液的加入使支承刚度产生了不对称,造成水平方向临界转速有所增加,而垂直方向临界转速有所下降。另外,次最大振幅的幅度和最大振幅极为接近,说明转子振幅出现较大波动。

当 $I=0.5\text{ A}$ 时,转子也在一阶临界转速附近振幅出现少许波动,各通道也未在同一转速下达到最大振幅。水平方向(# 1, # 3)最大振幅出现在 $5\,850\text{ r/min}$,而垂直方向(# 2, # 4)最大振幅出现在 $6\,120\text{ r/min}$,其平均临界转速为 $5\,990\text{ r/min}$,比 $I=0\text{ A}$ 时的平均临界转速提高了 550 r/min (10%)。这说明随着磁流变液的屈服应力增大,增大了附加的支承刚度。圆盘的最大振幅在水平方向和垂直方向分别比 $I=0\text{ A}$ 时下降了 41.4% 和 29.0% 。另外,虽然仍存在支承刚度的不对称,但转子在临界转速附近的运动已较为平稳,在垂直方向只出现最大振幅,未出现次最大振幅。

当 $I=1.0\text{ A}$ 时,转子在一阶临界转速附近振幅变化较为平稳。水平方向(# 1, # 3)和垂直方向(# 2, # 4)的最大振幅均出现在 $6\,300\text{ r/min}$,即临界转速为 $6\,300\text{ r/min}$,比 $I=0\text{ A}$ 时的平均临界转速提高了 860 r/min (15.8%),比 $I=0.5\text{ A}$ 时的平均临界转速提高了 310 r/min (5.2%)。这说明进一步增大控制电流提高了附加的支承刚度,从而使临界转速进一步提高,同时,因加入磁流变液而产生的支承刚度不对称也得到了改善。圆盘的最大振幅在水平方向和垂直方向分别比 $I=0\text{ A}$ 时下降了 23.3% 和 28.4% ,但比 $I=0.5\text{ A}$ 时却增加了 30.9% 和 0.9% 。这说明控制电流进一步增大,阻尼减振效果降低,磁流变液的固化主要用于提高系统的临界转速。此时,虽然仍然存在支承刚度的不对称,但转子在临界转速附近的运动已非常平稳。在临界转速附近水平方向和垂直方向都只出现最大振幅,未出现次最大振幅。

当 $I=1.5\text{ A}$ 时,转子系统的波德图与 $I=1.0\text{ A}$ 时几乎没有区别,表明磁场已经饱和,磁流变液已固化到极限状态。按 $\Phi 25\text{ mm}$ 直轴径计算可知其刚临界转速约为 $6\,300\text{ r/min}$,即当 $I\geq 1.0\text{ A}$ 时阻尼器的弹性支承已转化为准刚性支承。

从以上试验结果可以看出,阻尼器的控制电流对转子系统频率特性具有显著影响。由于该阻尼器具有明显的提高临界转速的效果,所以,与文献[3, 5] 相似,可以采用开关控制,使转子的振幅在全转速区达到最小。具体方法是:转子升速时先对阻尼器施加 1.0 A 控制电流,这时转子将沿 $I=1.0\text{ A}$ 的频率曲线;当转速达到 $5\,950\text{ r/min}$ (即 $I=0\text{ A}$ 和 $I=1.0\text{ A}$ 幅频曲线的交点附近)时,切断阻尼器供电,此后转子将沿 $I=0\text{ A}$ 的频率曲线。转子停机的控制方法则与上述相反。若按此方法对转子进行控制,依据图 3(a) 和(b) 可知,转子最大振幅将比 $I=0\text{ A}$ 时下降 50% 以上。

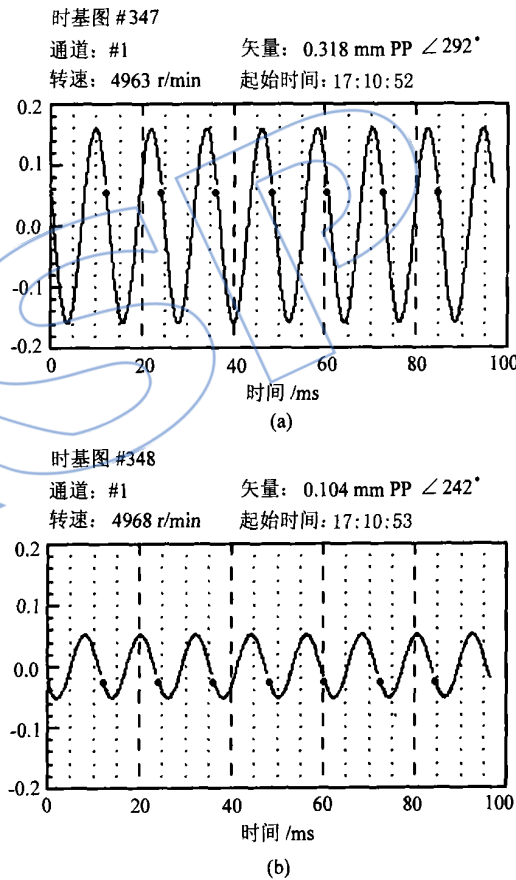


图4 施加控制电流前后转子的位移响应
Fig. 4 Displacement curves before and after exerting 1 A current

转子分别在临界转速附近 $5\,000, 6\,000, 6\,300\text{ r/min}$ 稳定运行,突然施加或撤除 0.5 A 或 1.0 A 电流时,转子都能很快从一个稳态到达另一个稳态,即在控制电流不同的频率曲线间转换幅值和相位,没有发生失稳。图4(a) 和(b) 分别显示了在设定转速为 $5\,000\text{ r/min}$ 时突然施加 1.0 A 电流前、后两次采样(采样间隔为 0.7 s)得到的#

1 传感器测试信号(位移曲线)。虽然由于采样系统的特点与设置,未能记录下完整的过渡过程,但可以说,状态转换时间小于 0.7 s 。实际状态转换时间应与剪切式磁流变液阻尼器-转子系统的状态转换时间^[4]处在同一量级,即 0.1 s 左右。

限于试验时间,本试验中未能直接进行开关控制试验,但依据上述两项试验(即在恒定控制电流下升速和在恒定转速下施加瞬态控制电流)以及文献[3~5]的试验研究,可以断定采用开关控制也不会引起系统失稳。

4 结 论

本试验对所设计的挤压式磁流变液阻尼器-转子系统的振动特性进行了测试,获得了较为满意的振动控制效果。研究表明,挤压式磁流变液阻尼器具有结构简单、控振效果明显、反馈迅速等特点,在高速柔性转子系统的振动控制中极具应用前景。主要结论如下:

(1) 对工程应用的弹性支承转子系统,磁拉力的作用可以忽略。

(2) 施加适当的恒定控制电流,磁流变液阻尼器可具有较好的阻尼减振效果,转子临界振幅可减少 $20\%\sim 40\%$ 。

(3) 磁流变液可能会加大弹性支承刚度的不对称,使转子在临界转速附近的轨迹不稳,但随着控制电流增大,转子在临界转速附近的轨迹变化趋于稳定。

(4) 随着磁流变液阻尼器控制电流的增大,支承在磁流变液阻尼器上的柔性转子系统的有阻尼临界转速逐渐升高。

(5) 突然施加和撤除控制电流时,转子能很快从一个稳态过渡到另一个稳态,不会引起系统失稳。

(6) 开关控制能使阻尼器具有最佳的减振效果,抑止柔性转子通过临界转速过程中的振动,使转子的振幅在全转速区达到最小。

前3条结论是本研究新得出的,而后3条结论与文献[5]的试验研究相一致。

致谢 本研究受振动、冲击、噪声国家重点实验室资助,在试验过程中得到上海交通大学振动、冲击、噪声国家重点实验室荆建平博士和吴峰崎博士以及中国航空动力机械研究所七室704组全体同志的帮助和支持,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Carlson J D. Magnetorheological Fluid Actuators. In: Janocha H, Adaptronics and Smart Structures [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1999. 180~195.
- [2] Wang J, Meng G. Magnetorheological Fluid Devices: Principles, Characteristics and Applications in Mechanical Engineering [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L, Journal of Materials: Design & Applications*, 2001, 215(L3): 165~174.
- [3] 汪建晓, 孟光. 磁流变液阻尼器用于转子振动控制的实验研究[J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(7): 47~49.
Wang Jian-xiao, Meng Guang. Vibration Control of Rotor by Magnetorheological Fluid Damper [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2001, 29(7): 47~49.
- [4] Wang J, Meng G. Experimental Study on Stability of an MR Fluid Damper-Rotor-Journal Bearing System [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 262: 999~1007.
- [5] 汪建晓, 孟光, 陈运西. 挤压式磁流变液阻尼器-转子系统的动力学特性与控制[J]. 机械工程学报, 2004, 40(3): 76~83.
Wang Jian-xiao, Meng Guang, Chen Yun-xi. Dynamic Performance and Control of Squeeze Mode MR Fluid Damper-Rotor System [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(3): 76~83.