

电流变阻尼器用于转子振动控制的实验研究*

西北工业大学 孟 光** 姚国治
美国 ABB 公司燃汽轮机部 殷达章

【摘要】 实验研究了电流变阻尼器在转子振动控制中的应用。实验发现, 电流变阻尼器的刚度及阻尼随外加电场强度的增加而增大, 支承在电流变阻尼器上的转子系统的振幅在亚临界区及临界转速处随施加的电场强度的增加而减小, 而在超临界处则随电场强度的增加而增大; 系统的临界转速随电场强度的增加而升高。电流变阻尼器提供的阻尼具有库仑阻尼和粘性阻尼的特点。实验表明电流变阻尼器具有控振效果明显、瞬时可控、耗能小、频带宽及结构简单的特点。

主题词: 转子 电流 变液 振动 控制

分类号: O 328

1 前 言

电流变技术是当前国际上的高新技术, N i k o l a j s e n 等首次将电流变技术应用于转子振动控制, 发现电流变阻尼器的阻尼减振效果很好且容易控制^[1]。T i c h y^[2]用电流变液体填充到挤压油膜阻尼器内, 通过控制加在极板上的电场强度以达到控制转子振动的目的。

这一技术的关键是电流变液体, 它是由细微的固体颗粒(尺度为 1- 100 μm) 均匀分散在低导电率或绝缘的低粘度的母液中制得的悬浮体。当在悬浮体中施加一电场时($\sim \text{kV}/\text{mm}$), 液体的表观粘度增加几个数量级。当电场强度达到一定值时, 悬浮体由液态迅速向类固态转换, 具有很大的抗剪切能力, 当外加电场撤去后, 又由类固态迅速回复到液态。电流变液的这种特性使得由其做成的产品具有响应时间快、阻尼和刚度连续可调、能耗小和便于计算机控制等优点, 在实现机电一体化的实时控制方面具有广阔的应用前景。

电流变液通常由三部分组成: (1) 基础流体(分散介质): 其要求是绝缘性好, 零电场时粘度小。目前最常用的为硅油; (2) 固体微颗粒(分散相): 要求粒度小, 介电常数高。目前常用的有有机半导体类、硅酸盐类、有机含水材料(如淀粉)、无机含水材料(如硅胶)及微晶等; (3) 添加剂: 固体或液体的表面活性剂。性能良好的电流变液体应具有如下特性: 零电场时的粘性系数小, 屈服应力小; 电流变效应明显, 达到固化状态的电场强度低; 基础流体的绝缘性好, 化学性能稳定; 不沉淀, 无毒, 无腐蚀, 廉价, 不含水。在本文的研究中使用了两种自制的电流变液体, 分别是用运动粘度为 $3.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $0.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 的硅油与淀粉的混合物。

2 实验装置及实验过程和结果

图 1 为实验装置简图, 其由转轴, 悬臂盘及电流变阻尼器组成。转轴 1 的直径为 2.54 cm, 长为 61.9 cm; 转轴 2 直径为 2.54 cm, 长为 25.36 cm; 悬臂盘的直径为 10.16 cm, 厚为 1.91 cm。阻尼器由 5 块静止和 6 块涡动摩擦板组成, 板间距为 1.59 mm。静止板做为电压负极, 涡动板做为电压正极。通过改变鼠笼杆的数量和紧度可使实验转

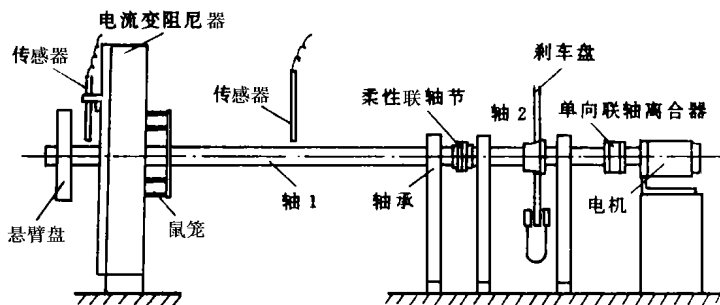


图 1 实验装置简图

子的一阶临界转速在 5000 r/min 和 8000 r/min 之间变化。

测试设备由位移及光电传感器, 示波器, FFT 动态信号分析仪, AD/DA 板及计算机组成。电流变阻尼器所需的电压由一计算机可控的高压放大器施加, 可将计算机输出的 0 到 +10 V 的模拟信号放大为最大为 5000 V 及 2 mA 的控制信号。实验中首先对传感器及测试设备进行了校准和标定, 接着对系统轴承的刚度进行了静态测量。测试结果表明水平和垂直方向的刚度相差不大, 可近似为相等的。

2.1 锤击法测试结果

利用锤击法测试了系统的自由振动和自然频率。在不加电流变液时, 测量的水平方向的自然频率为 101 Hz (6060 r/min), 垂直方向的自然频率为 102.5 Hz (6150 r/min)。同样利用锤击法测试了加 $3.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $0.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 的电流变液后, 并对电流变阻尼器施加零到 2500 V 电压情况下系统的自然频率。实验结果表明: 加电流变液后, 在不加电压或低电压时, 谱图的尖峰不明显, 激发出了多阶模态, 较难识别出系统的一阶自然频率。随着电压的升高, 尖峰逐渐突出。另外, 随着电压的升高, 系统的峰值频率 (或一阶自然频率) 增大, 这是因为阻尼器的刚度增加造成的。实验发现, 在低频时, 主要是在亚临界区, $0.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 电流变液的电流变效应要显著的多, 这可能是因为 $0.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 液体本身在零电压时的粘度较小。

实验中发现系统自由振动的衰减表现出了线性衰减和指数衰减两种情况。由于线性衰减表示了库仑 (Coulomb) 阻尼的作用, 而指数衰减则表示了粘性阻尼的作用, 因而电流变阻尼器同时具有这两种阻尼特性。初步实验表明: 在大位移时, 库仑阻尼占主导地位; 而在小位移时则是粘性阻尼占主导地位, 这一结果有待进一步验证。

2.2 系统的不平衡响应

首先实验研究了不加电流变液时系统的升速过临界响应及在不同转速时的响应轨迹, 测点位置在阻尼器左端。最大振幅出现在 6000 r/min 附近, 故系统的一阶临界为 6000 r/min, 这与锤击法测得的结果非常接近。由于陀螺效应的影响, 实际的临界转速应该比锤击法测得的 (静态) 临界转速高, 这里出现相近的结果可能是因为转子转动后引起了轴承和鼠笼等结构的松动, 从而减少了支承刚度, 造成了临界转速的下降。接着测试了加了 $3.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 及 $0.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 电流变液后, 对阻尼器施加不同电压时系统的动态响应特性。

图 2 的(a)和(b)分别是用上述两种电流变液时,系统在临界转速处的响应轨迹随施加电压的变化。从图 2(a)可见:当施加一定电压时(如 500 V),系统在临界处的峰值减小了,但继续升高电压,对减小峰值几乎没有效果,只是使轨迹的形状发生了改变。这表明存在一个能提供最佳阻尼的电压值,也表明用 $3.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 电流变液的阻尼器在高电压时阻尼已基本不随电压变化了,而刚度可能产生了非对称,从而引起了轨迹主轴发生了偏转。从图 2(b)可见:电

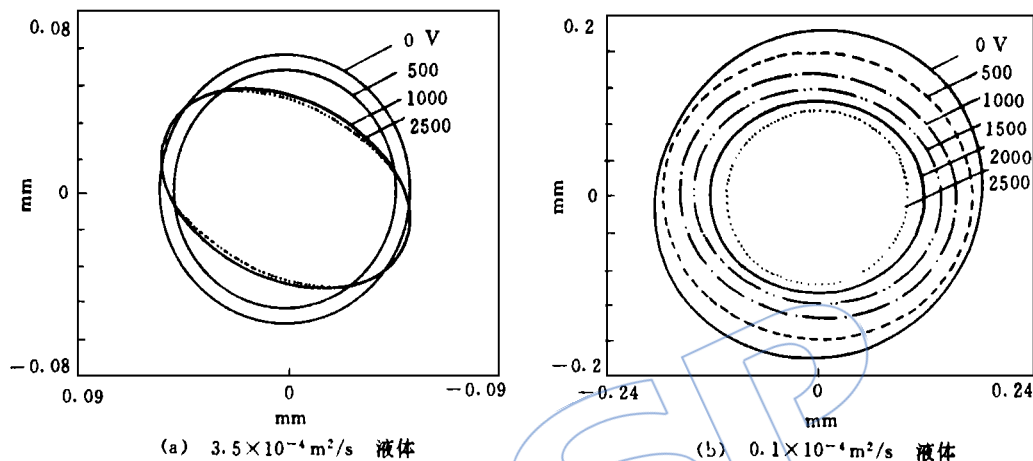


图 2 在临界转速为(a)6000 r/min 和(b)5800 r/min 时转子轨迹随电压的变化

压越高,系统在临界转速处的振幅越小。与在 0 V 时的振幅峰—峰值相比,系统在 2500 V 时的振幅峰—峰值减小了 45.3%。另外,该图及其它结果表明用 $0.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 电流变液的阻尼器在临界转速处的阻尼效果基本与施加的电压成正比,即在临界转速 5800 r/min 时系统响应的振幅峰—峰值 A 为: $A = 0.382 - (0.172/2500)V$ (mm)。

图 3(a)和(b)分别表示用两种电流变液时的系统的频响曲线(波德(Bode)图)。从图 3(a)可见:对于 $3.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 的电流变液,增加电压可在亚临界区减小响应振幅,但在超临界区却使振幅增大。此外,在亚临界区,电流变效应也不显著,这可能是因为 $3.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 液体本身的粘度很大。在超临界,由于电流变阻尼器刚度的增大,使得第二个峰值越来越明显,可见这时阻尼器的刚度随电压的增加起了主导作用。需再次说明的是加装 $0.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 电流变液时,由于将转子系统重新进行了装配,从而使系统的临界转速从 6000 r/min 降为 5800 r/min。从图 3(b)可以看出:当用 $0.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 电流变液时,系统的临界转速从零电压时的 5800 r/min 提高到 2500 V 时的 6200 r/min,这是因为增加电压使阻尼器的刚度增加了,因而使临界转速升高。系统响应的振幅在亚临界区随电压增加而减小,而在超临界区则随电压的增加而增大。在第二峰值前,第一峰值(临界)后振幅随电压的增大主要是由于第一临界随电压的升高而造成的,而在第二峰值处振幅随电压的增大可能是由于阻尼器刚度随电压的增加造成的。对比图 3(a)可以看出,在亚临界区和临界转速处,用 $0.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 液体的电流变阻尼器对响应振幅的阻尼作用随电压的变化要比用 $3.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 液体的显著得多,可见其阻尼器的阻尼作用占主导地位,其电流变效应在亚临界区较明显。

实验表明:可以通过选择恰当的电流变液体,合理地设计电流变阻尼器使阻尼器具有最佳

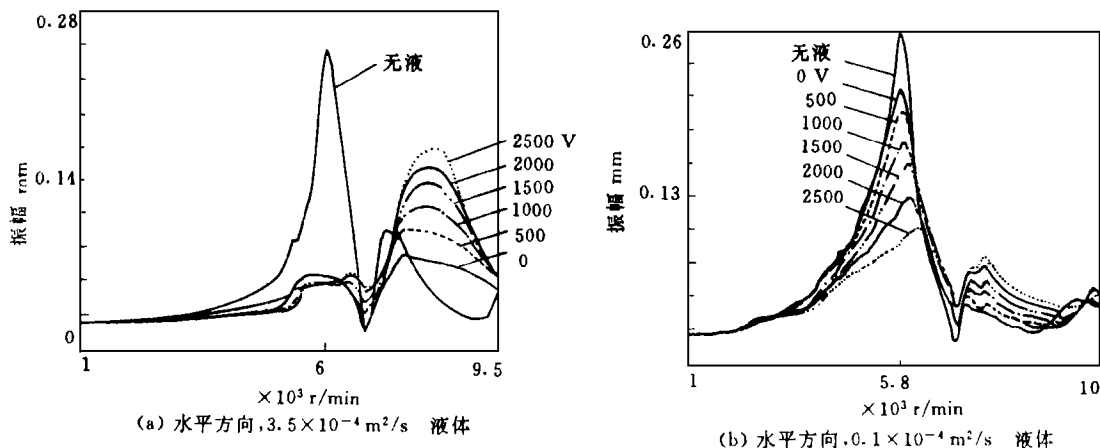


图3 转子升速时的频响曲线随电压的变化 (a) $3.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 液体和 (b) $0.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 液体

的阻尼和刚度特性。另外还发现: 用 $0.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 液体的电流变阻尼器提供的库仑阻尼要比粘性阻尼大, 而用 $3.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 液体的阻尼器则刚好相反。通过简单的“开关”控制即可达到使振幅在全转速区内最小的目的, 即开始先施加 2500 V 电压, 这时响应沿 2500 V 的曲线, 过临界后切断电源, 响应则沿着 0 V 的曲线。其特性可在瞬间(几个毫秒内)发生变化。

3 结 论

实验研究了用电流变阻尼器控制一悬臂转子的振动, 实验结果表明: (1) 电流变阻尼器在亚临界区和临界转速处的控振效果很好。支承在电流变阻尼器上的悬臂转子的振幅在亚临界区和临界转速处随电压增加而减小, 在超临界区则随电压增加而增大。(2) 电流变阻尼器的刚度随电压增加而增大, 因而系统的临界转速随电压的增加而增高。(3) 电流变阻尼器提供的阻尼具有库仑阻尼及粘性阻尼的特点。一般情况下, 对零电压时粘度小的电流变液体或大位移时, 库仑阻尼占主导地位; 而对零电压时粘度较大的电流变液体或小位移时, 粘性阻尼占主导地位。这一结果有待进一步验证。(4) 可以通过选择合适的电流变液体使电流变阻尼器的减振效果达到最优。良好的电流变阻尼器具有减振效果明显, 瞬时可控, 频带宽, 耗能小等特点。

参 考 文 献

- 1 Nikolajsen J L, Hoque M S An Electro-Viscous Damper for Rotor Applications Trans ASME, J. of Vibration and Acoustics, 1990, 112: 440- 443
- 2 Tichy J. Behavior of a Squeeze Film Damper with an Electro-Rheological Fluid STLE J. of Tribology, Trans, 1993, 36(1): 127- 133

(责任编辑 王震华)

rotary speeds of the cage and the balls decrease and their skiddings become serious as the thrust goes down, especially to a small value. So the minimum thrust preload for prevention of skidding of the balls on the inner race can be estimated.

Key Words rolling bearings Mechanical drives Kinetic analysis

INTERMITTENT AND CHAOTIC PHENOMENA IN A RUB IMPACT ROTOR SYSTEM

Chu Fulei, Feng Guanping, Zhang Zhengsong

(Dept. of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

ABSTRACT Vibration characteristics of a rub impact rotor system supported on oil film bearings were investigated. Elastic impact and the Coulomb type of frictional relationship was assumed. Rotating speed and the system damping were used as control parameters to discover routes to and out of chaos and to study various forms of periodic, quasi-periodic and chaotic vibrations. Very rich types of chaotic vibrations were found for the model discussed. Also the system motion shows two different forms of intermittent phenomena. One is the interchange between periodic and quasi-periodic vibrations. Another is between periodic and chaotic vibrations. Vibration features such as chaotic vibration, intermittent phenomena and broad-band of periodic vibration can be effectively used to diagnose the rub impact fault which often happens in a rotor system.

Key Words Rotors Chaos Vibration Damping

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON ROTOR VIBRATION CONTROL BY ELECTORHEOLOGICAL DAMPER

Meng Guang, Ying Dazhang, Yao Guozhi

(Institute of Vibration Engineering, Northwestern polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT In this paper the Electrorheological (ER) fluid and its characteristics are introduced briefly and the application of an ER damper in rotor vibration control is studied experimentally. It is found that by increasing the applied electrical field strength, the damping and stiffness of ER damper are increased, the vibration amplitude of the rotor system supported on ER damper is decreased in the sub-critical speed range and at the critical speed, and is increased in the super-critical speed range. The critical speed of the rotor system can be changed by means of the applied electrical field strength. The damping provided by the ER damper has the properties of both the Coulomb damping and the viscous damping. Experimental results show that the ER damper has obvious effect on vibration control, and features instantaneous control, little energy consumption and broad frequency range. Besides, its structure is simple.

Key Words Rotors Electric current Rheostats Vibration Control action

AN EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER BY JET IMPINGEMENT ON ROUGHENED SURFACE WITH INITIAL CROSSFLOW

Zhang Dalin, Chang Haiping, Han Dong

(2nd Dept. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Sheng Rongchang

(Zhuzhou Power Plant Research Institute, Zhuzhou 412002)

ABSTRACT Impingement heat transfer from the rib roughened surface with