

文章编号:1000-8055(2013)10-2223-05

压电陶瓷弹性支承干摩擦阻尼器减振实验

宋明波¹, 谭大力², 廖明夫¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 海军装备研究院 舰船论证研究所, 北京 100073)

摘 要: 设计一种带有压电陶瓷执行机构的弹性支承干摩擦阻尼器, 对其减振效果进行了实验验证. 首先介绍了弹性支承干摩擦阻尼器的基本工作原理, 接着回顾了一种电磁铁作动方式的弹性支承干摩擦阻尼器, 提出了将压电陶瓷运用于其执行机构的方案, 该方案可简化其结构, 减少其质量, 最后对该方案的减振效果进行了实验验证. 结果表明: 带有压电陶瓷执行机构的弹性支承干摩擦阻尼器对转子系统的振动具有明显的抑制作用, 转子经过临界转速点的振幅最大减小约 66%, 并且与原阻尼器相比, 结构更简单, 质量减少一半, 且功耗仅为 5 W.

关 键 词: 弹性支承干摩擦阻尼器; 压电陶瓷; 转子系统; 临界转速; 振动控制

中图分类号: V231.96

文献标志码: A

Experiment on vibration reduction by elastic support/dry friction damper with piezoelectric ceramic

SONG Ming-bo¹, TAN Da-li², LIAO Ming-fu¹

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Institute of Naval Vessel, Naval Academy of Armament, Beijing 100073, China)

Abstract: An elastic support/dry friction damper using piezoelectric ceramic was designed and its effectiveness of reducing rotor vibration was experimentally verified. Firstly, the basic operation mode of elastic support/dry friction damper was introduced. Then based on the previous structure using an electromagnet, an elastic support/dry friction damper using piezoelectric ceramic which was simpler and lighter was designed, and its effectiveness of reducing rotor vibration was experimentally verified. The experimental results show that the elastic support/dry friction damper using piezoelectric ceramic can significantly reduce vibration in a rotor system; the maximum reduction of vibration amplitude is about 66% at the critical speed. Compared with the previous design, the structure is much simpler, the weight is reduced by half and the power consumption is just 5 W.

Key words: elastic support/dry friction damper; piezoelectric ceramic; rotor system; critical speed; vibration control

弹性支承干摩擦阻尼器是一种新型的安装于转子系统弹性支承处的减振机构^[1]. 理论分析和实验研究均已证明, 用它作为转子的振动控制装置能够明显降低转子通过临界转速区域时的振动

幅值^[1-3]. 主动式弹性支承干摩擦阻尼器结构简单, 便于实现主动控制且不改变原转子系统的临界转速, 控制时只须改变干摩擦控制电压的大小^[4-5]. 对于一些常见的转子故障, 如突加不平衡^[6]、弹性

收稿日期: 2012-10-10

网络出版地址:

作者简介: 宋明波(1985—), 男, 陕西汉中, 博士生, 研究方向为转子动力学、旋转机械故障诊断.

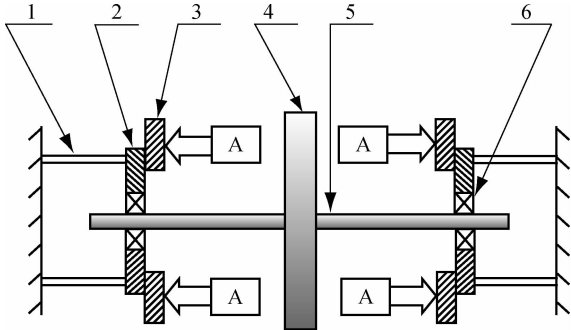
支承局部断裂^[7]及转子的失稳等均有较好的控制效果^[8],但要将其运用于航空发动机的转子系统,技术尚不够成熟,尤其是其比较庞大的电磁铁作动器。

智能材料结构是近些年来兴起的研究领域^[9-11],其在结构振动的控制领域获得了越来越多的关注,为机械结构的设计提供了新的思路^[12-14]。本文设计了一种压电陶瓷弹性支承干摩擦阻尼器,并安装于转子系统进行实验,验证了其有效性与可行性。压电陶瓷弹性支承干摩擦阻尼器具有结构简单、质量少、响应快、耗能小等诸多优点,有很好的工程应用前景。

1 弹性支承干摩擦阻尼器基本工作原理及压电陶瓷执行器结构设计

1.1 弹性支承干摩擦阻尼器基本工作原理

弹性支承干摩擦阻尼器基本工作原理如图 1 所示^[3]。转子系统采用弹性支承 1,转子支承在滚动轴承 6 之上。转子两侧弹性支承处各安装有干摩擦阻尼器。干摩擦阻尼器由动摩擦片 2、静摩擦片 3 和力的施加装置 A 等组成。动摩擦片与弹性支承的一端固定,套装于滚动轴承的外环上,不随转子旋转而转动。静摩擦片固定在机匣或其他固定结构上。两摩擦片之间的摩擦力由力的施加装置控制压紧力来调节。当转子运行时,随着转子的振动,动摩擦片将同轴一起作平面运动,动静摩擦片间就产生了相对滑动,从而起到对转子振动施加阻尼的作用。本文介绍一种干摩擦阻尼器,该阻尼器由压电陶瓷执行器代替了原有的电磁铁作动器,简化了系统结构,减少了系统质量。



1 弹性支承;2 动摩擦片;3 静摩擦片;4 盘;
5 轴;6 滚动轴承;A 力的施加装置

图 1 弹性支承干摩擦阻尼器工作原理

Fig. 1 Basic operation principle of an elastic support/dry friction damper

1.2 压电陶瓷执行器结构设计及实验装置

带有电磁铁作动器的弹性支承干摩擦阻尼器如下图 2 所示^[8],图中虚线框中所示即为电磁铁作动器,理论分析和实验结果都已经证明了弹性支承干摩擦阻尼器对于转子系统的减振效果,并且通过对电磁铁电压的控制,还能对阻尼器对转子系统所提供的附加阻尼实施主动控制,但如图 2 所示的电磁铁作动器结构仍显复杂,需要安装相对庞大的电磁铁。

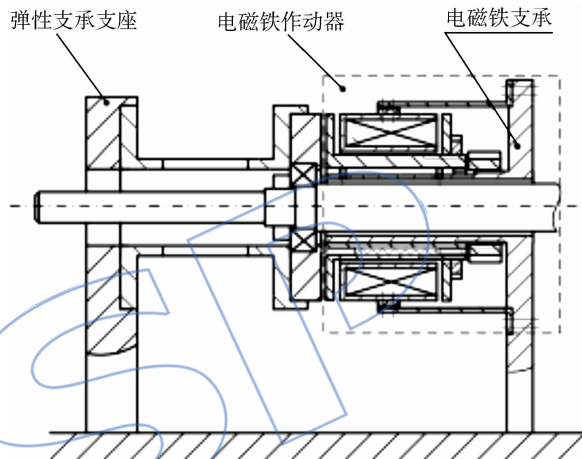


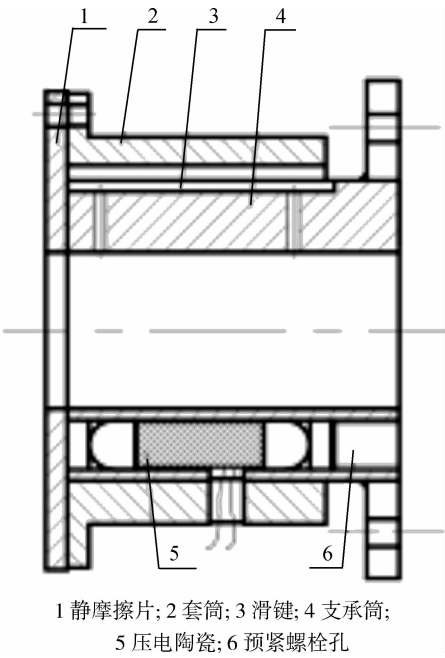
图 2 电磁铁作动的弹性支承干摩擦阻尼器结构

Fig. 2 Structure of an elastic support/dry friction damper actuated by electromagnet

近年来,随着人们研究的不断深入,智能材料在工程领域的运用得到迅猛的发展。为了解决上述问题,本文设计了一种带有压电陶瓷作动器的弹性支承干摩擦阻尼器,如图 3 所示。此套装置仍然安装在电磁铁支承上,仅仅替换图 2 中虚线框里的电磁铁作动器。图 3 中静摩擦片 1,安装在套筒 2 上,套筒 2 又套装在支承筒 4 上,可以在轴向滑动,并由滑键 3 固定其周向位置,压电陶瓷 5 放置于支承筒上轴向的 3 个通孔中,由于压电陶瓷不能承受剪切方向的载荷,在其前后各安装 1 块小圆片和半球柱,使其与压电陶瓷顶紧。调节预紧螺栓 6 中的预紧螺栓,可以调节动、静摩擦片之间的预紧力大小^[15-16]。与电磁铁作动器相同,改变压电陶瓷的控制电压,即可改变动、静摩擦片之间的压紧力,从而实现了对转子系统振动的主动控制。

本文选用的压电陶瓷刚度为 35 N/ μm ,其电压-应变测试曲线如图 4 所示,在工作电压范围内可以产生至少 30 μm 的微位移,即 1000 N 的推力,这已经足够满足干摩擦阻尼器的正压力要求^[8]。

原始电磁铁作动器结构复杂,质量约为 7.4 kg,



1 静摩擦片; 2 套筒; 3 滑键; 4 支承筒;
5 压电陶瓷; 6 预紧螺栓孔

图 3 压电陶瓷作动器结构

Fig. 3 Structure of the piezoelectric ceramic actuator

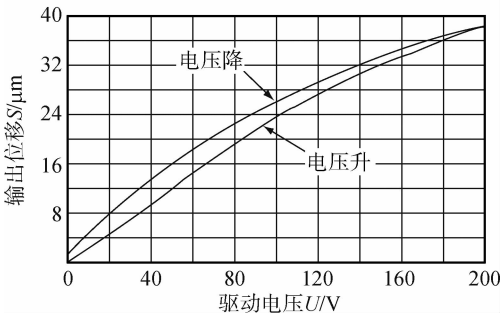
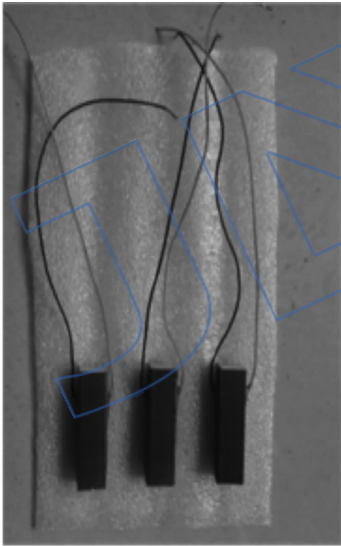


图 4 压电陶瓷及其电压-应变曲线

Fig. 4 Piezoelectric ceramic and its voltage-strain curves
本文所设计的压电陶瓷作动器结构简单,质量约为 4 kg,使得其在下一步的设计中可以与弹性支

承共用一个支座,这将大大简化整个转子的结构,减少系统的质量。

压电陶瓷弹性支承干摩擦阻尼器实验装置整体如图 5 所示。主要由单盘转子实验器、干摩擦阻尼作动器、光电传感器、电涡流位移传感器等组成。传感器的安装与测点信息如表 1 所示。传感器测量信号由 CAMB 9100 旋转机械状态监测与动平衡系统进行采集、处理与分析。

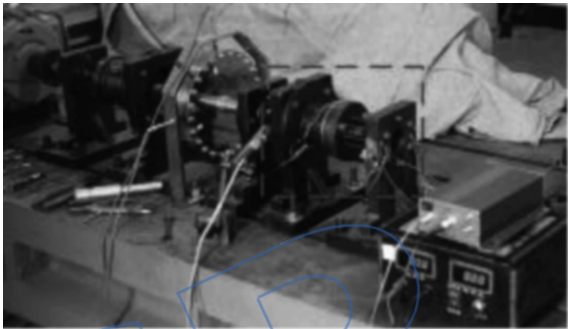


图 5 压电陶瓷弹性支承干摩擦阻尼器实验装置

Fig. 5 Elastic support/dry friction damper actuated by piezoelectric ceramic

表 1 测点信息

Table 1 Sensors messages

通道	传感器类型	安装位置	安装角度
转速	光电	靠近转轴	水平偏 15°
CH 1	位移	轮盘传感器支架	0°(水平)
CH 2	位移	轮盘传感器支架	90°(竖直)

2 实验过程与结果分析

为了验证压电陶瓷弹性支承干摩擦阻尼器对转子系统的减振效果,尤其是在临界转速附近的减振效果,分别在稳态条件和暂态条件下进行了以下实验:

1) 压电陶瓷弹性支承干摩擦阻尼器不加电压,阻尼器不提供附加阻尼,转子从 0 r/min 均匀升速到 2 200 r/min,再均匀减速到 0 r/min,观察转子的减速幅频特性,确定系统的临界转速。

2) 压电陶瓷控制电压递增,分别调节为 19.5,48.5,68.8,97.8,135.5 V,转子系统从 2 200 r/min 均匀减速至 0 r/min,观察转子的减速幅频特性。

3) 驱动电机控制转子转速稳定在临界转速 (1 524 r/min) 附近,干摩擦控制电压调节为实验过程 2) 中的最佳电压,观察阻尼器对稳态条件下

的转子振动抑制情况。

图 6 是根据实验过程 1) 阻尼器不对转子提供附加阻尼, 转子系统从 2200 r/min 均匀减速至 0 r/min 的减速 Bode 图。从图中可以看出该转子的临界转速大概在 1550 r/min, 系统在通过临界转速区域时的振幅增大非常明显, 最大增幅达到 5 倍多。

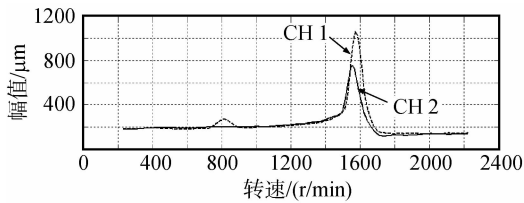


图 6 转子系统减速 Bode 图

Fig. 6 Bode curves of the rotor system during shut down

图 7 是根据实验过程 2) 所作的转子系统减速 Bode 图与实验过程 1) 中没有施加干摩擦阻尼时转子减速 Bode 图的对比(CH1 与 CH2 变化趋势相同, 文中仅讨论 CH2)。从图中可以看出, 压电陶瓷弹性支承干摩擦阻尼器可以明显地减小转子通过临界转速时的振幅, 当控制电压为 68.8 V 时, 振幅从约 750 μm 减小到约 250 μm 振幅, 减少 2/3。当控制电压继续增大时, 转子通过临界转速时的振幅反而增大, 临界转速也发生了变化, 这与文献[2]所描述的现象吻合。本文实验仅验证了弹性支承干摩擦阻尼器对转子系统减振的有效性和可行性, 对于其控制电压的控制策略有待进一步研究。

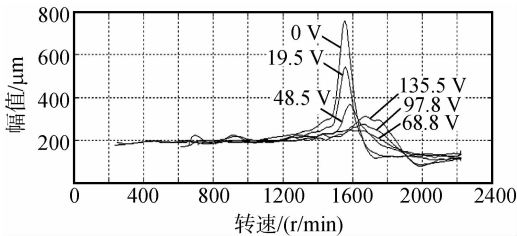


图 7 不同控制电压下转子系统减速 Bode 图对比(CH2)

Fig. 7 Comparison of the Bode curves of the rotor system under different voltages during shut down (CH2)

图 8 是根据实验过程 3) 所作的转子在测点 1 处(水平方向)的时域波形图(测点 2 处振动变化趋势相同), 干摩擦控制电压为 68.8 V。从图中可

以看出, 当 0.8 s 左右时开启压电陶瓷弹性支承干摩擦阻尼器, 动、静摩擦片摩擦, 耗散系统的振动能量, 转子的振幅迅速减小, 大概经过 2~3 个周期(约为 0.1 s), 振幅可减少 1/2。

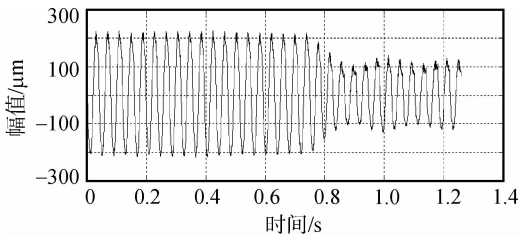


图 8 1524 r/min 稳态时域波形

Fig. 8 Time-domain waveform at 1524 r/min

另外, 在上述实验中, 阻尼器工作时的耗电功率不超过 5 W。压电陶瓷弹性支承干摩擦阻尼器具有结构简单、质量少、响应快、耗能小等特点。

3 结 论

本文设计了一种压电陶瓷弹性支承干摩擦阻尼器, 并通过实验验证了其对转子系统的减振效果, 得到以下结论:

- 1) 压电陶瓷弹性支承干摩擦阻尼器对转子的振动具有较好的抑制效果, 能够明显降低转子系统在临界转速区域的振动幅值。
- 2) 设计的压电陶瓷弹性支承干摩擦阻尼器具有结构简单、质量少、响应快、耗能小等优点, 具有很好的工程应用前景。
- 3) 作为一种新型的减振结构, 压电陶瓷弹性支承干摩擦阻尼器值得继续研究。

参考文献:

[1] 范天宇, 廖明夫. 转子干摩擦阻尼器及其减振机理[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(5): 743-745.
FAN Tianyu, LIAO Mingfu. Dynamic behavior of a rotor with dry friction dampers [J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(5): 743-745. (in Chinese)

[2] 范天宇, 廖明夫, 王俨凯. 弹性支撑干摩擦阻尼器减振试验研究[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(9): 1062-1065.
FAN Tianyu, LIAO Mingfu, WANG Yankai. Experimental investigation of dry friction damper with elastic support [J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(9): 1062-1065. (in Chinese)

[3] 范天宇. 弹性支承干摩擦阻尼器减振研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
FAN Tianyu. Vibration reduction by elastic support dry friction damper [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)

[4] 王四季,廖明夫,杨伸记. 主动式弹支干摩擦阻尼器控制转子振动的实验[J]. 航空动力学报, 2007, 22(11): 1893-1897.
WANG Siji, LIAO Mingfu, YANG Shenji. Experimental investigation on vibration control by elastic support/dry friction damper[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(11): 1893-1897. (in Chinese)

[5] 王四季,廖明夫. 带弹支干摩擦阻尼器的转子振动控制策略和方法[J]. 航空动力学报, 2011, 26(10): 2214-2219.
WANG Siji, LIAO Mingfu. Control strategy and methods of rotor systems by an elastic support/dry friction damper [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(10): 2014-2219. (in Chinese)

[6] 王四季,廖明夫. 主动弹支干摩擦阻尼器控制转子突加不平衡响应的研究[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(5): 667-672.
WANG Siji, LIAO Mingfu. Application of an active elastic support/dry friction damper to control sudden unbalance response of rotor systems[J]. Mechanical Science and Technology, 2008, 27(5): 667-672. (in Chinese)

[7] 王四季,廖明夫. 弹支局部断裂后主动式弹支干摩擦阻尼器对转子的保护[J]. 航空动力学报, 2008, 23(11): 2026-2030.
WANG Siji, LIAO Mingfu. Protection of a rotor against violent vibrations caused by a crack in elastic supports by using active elastic support/dry friction dampers[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(11): 2026-2030. (in Chinese)

[8] 王四季. 主动弹支干摩擦阻尼器控制转子振动的技术研究[D]. 西安:西北工业大学, 2008.
WANG Siji. Vibration control techniques for rotor systems by an active elastic support/dry friction damper [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2008. (in Chinese)

[9] 谢建宏,张为公. 智能材料结构的研究与发展[J]. 传感技术学报, 2004, 3(1): 164-167.
XIE Jianhong, ZHANG Weigong. Research and development of smart material and structure[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2004, 3(1): 164-167. (in Chinese)

[10] 高培德. 智能材料和结构[J]. 功能材料与器件学报, 2002, 8(2): 93-98.
GAO Peide. Intelligent materials and structures[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2002, 8(2): 93-98. (in Chinese)

[11] 杨庆生,刘健. 智能复合材料的应用与力学研究进展[J]. 力学与实践, 2008, 30(6): 11-17.
YANG Qingsheng, LIU Jian. Advances in application and mechanics of intelligent composite materials[J]. Mechanics in Engineering, 2008, 30(6): 11-17. (in Chinese)

[12] 艾亿谋,杜成斌,于国军. 压电智能材料在悬臂梁结构振动控制中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(6): 695-698.
AI Yimou, DU Chengbin, YU Guojun. Vibration control of cantilever beams with piezoelectric intelligent materials [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007, 35(6): 695-698. (in Chinese)

[13] 余森,严小锐,毛林章. 一种刚度、阻尼可控的新智能材料—磁流变弹性体[J]. 材料导报, 2007, 21(7): 103-107.
YU Miao, YAN Xiaorui, MAO Linzhang. A new smart material with controllable stiffness and damping-magnetorheological elastomer[J]. Materials Review, 2007, 21(7): 103-107. (in Chinese)

[14] 吴大方,刘安成,麦汉超,等. 压电智能柔性梁振动主动控制研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(2): 161-163.
WU Dafang, LIU Ancheng, MAI Hanchao, et al. Study on active vibration control of piezoelectric intelligent flexible beam[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(2): 161-163. (in Chinese)

[15] 王三民,诸文俊. 机械原理与设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.

[16] 濮良贵,陈庚梅. 机械设计教程[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2001.