

基于磁流变阻尼器的转子系统 振动随动控制

王 钢, 何立东, 邢 健, 胡航领
(北京化工大学 机电工程学院

高端机械装备健康监测与自愈化北京市重点实验室, 北京 100029)

摘 要: 针对大型旋转机械通过临界转速时振动过大的问题, 搭建了转子系统实验台, 实验台保持原本的支撑形式, 并安装磁流变阻尼器, 实验研究不同工况下磁流变阻尼器对转子系统振动的影响规律. 结果表明: 磁流变阻尼器可以有效抑制转子系统临界转速附近的振动, 降幅可达 90%. 根据实验结果提出一种以振幅为反馈控制参数的随动控制方法, 对转子系统的振幅变化进行追踪, 根据振幅实时调节磁流变阻尼器电流, 在线抑制振动. 结果表明随动控制可以随着转子系统振动变化而在线改变控制电流, 使转子系统振动稳定在目标值附近, 实现了转子振动的自动调控.

关 键 词: 磁流变阻尼器; 阻尼减振; 转子; 振幅反馈; 随动控制

中图分类号: V216.2⁺1; TH165⁺.3; TB535⁺.1 **文献标志码:** A

Rotor system's vibration servo control based on magneto-rheological dampers

WANG Kai, HE Li-dong, XING Jian, HU Hang-ling

(Beijing Key Laboratory of Health Monitoring and Self-recovery of Advanced Mechanical
and Equipment, College of Mechanical and Electrical Engineering,
Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to solve the problem of too large rotating machinery vibration around the critical speed, a rotor system test bench was established. Without changing the original supports of the rotors system, one magneto-rheological damper was installed onto each shaft. Different working conditions were set to study the influences of the magneto-rheological dampers on rotor system's vibration. The results showed that the magneto-rheological damper could reduce the vibration of the rotor system near the critical speed, and the decreasing amplitude was 90%. According to the test results, a servo control strategy based on vibration amplitude feedback of rotor was proposed to control the rotor vibration amplitude, which could follow the vibration amplitude, change the current of magneto-rheological damper according to the vibration amplitude to control the rotor system's vibration on line. The results show that the servo control method can adjust the current varying with rotor system's vibration in real time, and make the amplitude stay stable around the target value, so as to achieve the auto control of rotor system vibration.

Key words: magneto-rheological dampers; vibration damping; rotor;
vibration amplitude feedback; servo control

在机械、石油化工等领域的旋转机械中,不可避免会涉及到振动问题,而质量不平衡是导致其转子振动剧烈的主要原因之一,严重时可致机组停机^[1-3]. 现场动平衡是常用的改善转子振动的方法,但此过程必须重复启停机组,费时费力.

在轴系上安装阻尼器能够有效抑制转子的这种不平衡振动,从而使轴系在升速到工作转速的过程中平稳地通过临界转速. 磁流变液阻尼器^[4-5]具有能耗低、响应快、阻尼力大的优势,是一种新型智能减振装置,目前它的作用已获得肯定并在建筑等结构振动控制领域得到广泛应用^[6-8]. 近年来,研究人员逐渐对其进行转子振动控制方面的研究. 汪建晓、孟光、祝长生^[9-16]在转子系统中引入一种剪切式磁流变阻尼器替换原有刚性支撑,在不同参数下对这种支撑形式对转子系统刚度和阻尼的影响进行了实验. 实验发现转子系统刚度受磁流变阻尼器电流影响较大,随电流增加而大幅升高,提升了系统固有频率,使系统在原临界转速时不发生共振,振动大幅降低. 但在这种情况下,系统原本的结构改变了,刚度也发生了变化,而有限的阻尼力不能将振动能量及时耗散,这不仅影响系统稳定性,还无法避免系统在新的共振区发生剧烈振动. 文献[12]以磁流变液阻尼器和滑动轴承作为支撑,研究了单盘转子系统的运动稳定性,并进行了简单开关控制实验. 文献中的开关控制不能根据系统转速和振动情况实时控制电流,面临突发振动时,控制效果不理想.

本文搭建转子实验台,将两个滑动轴承作为支撑,并在转轴上安装磁流变阻尼器,研究这一辅助结构对转子系统不平衡振动的抑制规律. 同时,基于 Labview 编程环境开发了振动采集、实验及振动控制软件平台,提出一种以振幅为反馈控制参数的随动控制方法,跟踪转子系统振幅的变化,实时改变磁流变阻尼器电流,研究其对转子系统振动实时、在线的控制效果.

1 磁流变阻尼器的结构与参数

磁流变阻尼器(下文简称阻尼器)是一种以磁流变液在磁场下发生磁流变效应为基本原理的减振装置. 磁流变液在不受磁场作用时表现出低黏度、良好流动性,强磁场条件下则在毫秒级时间内变为类半固体. 图 1 为阻尼器结构示意图. 阻尼器由 5 个部分组成,分别为连接轴承、阻尼片、磁流变液、铁心和线圈. 阻尼片分为上阻尼片和下阻尼片,两者之间留有间隙且上下交叉排列. 上阻尼片

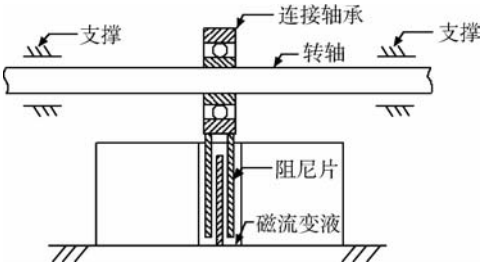


图 1 阻尼器结构示意图
Fig. 1 Structure sketch of the damper

与连接轴承固定,下阻尼片与底板固定,铁心与实验台固定.

选用文献[17-18]中的 Bingham 模型来描述阻尼力与电流之间的关系. 阻尼力 $F_m(I, t)$ 为

$$F_m(I, t) = S\eta u(t)/h + S\tau_y(I) \tag{1}$$

式中 S 为磁效面积, η 为磁流变液黏度, I 为电流, h 为阻尼片间隙, τ_y 为磁流变液屈服应力, u 为剪切速率, t 为时间. 表 1 为阻尼器电流与磁场强度的对应关系.

表 1 阻尼器电流与磁场强度对应关系
Table 1 Correspondence between the current of damper and the magnetic field strength

电流 I/A	磁场强度 $H/(kA/m)$	磁感应强度 B/T
0.5	30	0.240
1.0	60	0.440
1.5	90	0.568
2.0	120	0.665

2 抑振规律

2.1 实验台参数

选用经典的 Jeffcott 转子和圆柱滑动轴承搭建阻尼器实验台,在转盘右侧 120 mm 处安装阻尼器,如图 2 所示;直流电动机驱动转子,可以对转子进行无级调速;转轴直径 $d=10$ mm,跨度 $L=460$ mm,转盘直径 $D=70$ mm,转盘宽度 $B=15$ mm. 阻尼器线圈由漆包线绕制而成,使用 0~12 V 可调电源供电.

2.2 抑振规律实验研究

实验所用转子系统的 1 阶临界转速在 2 700 r/min 左右,故选择 1 000~3 600 r/min 作为测量转速. 阻尼器电流设置为 0(无阻尼),0.9,1.2,1.5 A,分别测得设定转速范围内的振动数据,如图 3 所示. 取转速为 2 700 r/min 时,各运行电流

下的振幅及降幅(通电状态下振动相对无电流状态下振动的降低幅度),如表 2 所示.

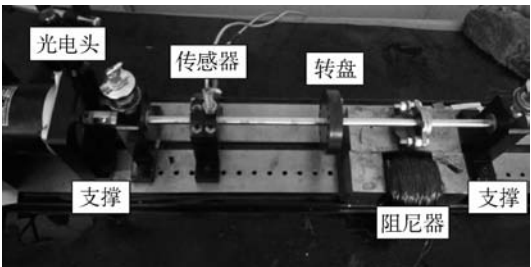


图 2 转子系统实验台
Fig. 2 Rotor system test bench

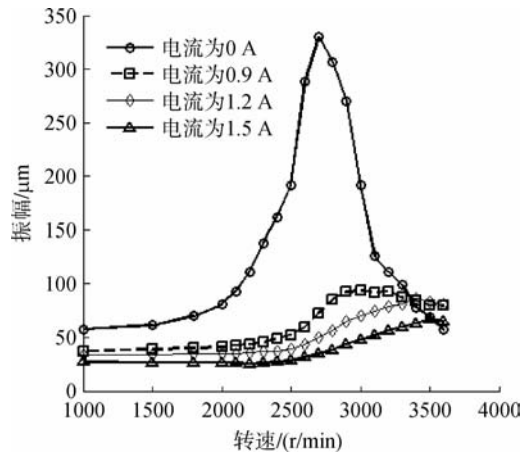


图 3 不同电流下的振幅对比
Fig. 3 Comparison of vibration amplitude at different currents

表 2 转速为 2700 r/min 下振动数据及振动降幅 Table 2 Vibration data and amplitude reduction at speed of 2700 r/min		
电流/A	振幅/ μm	降幅/%
0	330.0	
0.9	72.5	78.03
1.2	49.5	85.00
1.5	34.8	89.45

如表 2 中数据所示,电流 0 A 下原始振动为 330.0 μm ,电流从 0.9 A 增加到 1.5 A,振幅由 72.5 μm 降到 34.8 μm ,降幅由 78.03% 增加到 89.54%,系统的临界转速升高到 3500 r/min 左右.由图 3 可得:当转速在 1000 r/min 到 3400 r/min 之间,阻尼器可以有效抑制系统振动,且抑制幅度随电流增加而加强,降幅可达 90%.

3 随动控制实验

3.1 随动控制软件平台

本文设计并开发了基于阻尼器的采集、实验及振动控制软件平台,分为由可调电源和 NI9263 模块组成的硬件平台和基于 Labview 编程环境开发的振动控制软件的软件平台两部分.本文与随动控制方法结合,基于振幅反馈,设计以振幅为目标值的随动控制程序,设定振幅上下限,使转子系统振动稳定在某一范围,研究振动实时调控效果.图 4 为基于振幅的随动控制策略.图 5 为基于振幅的随动控制器.

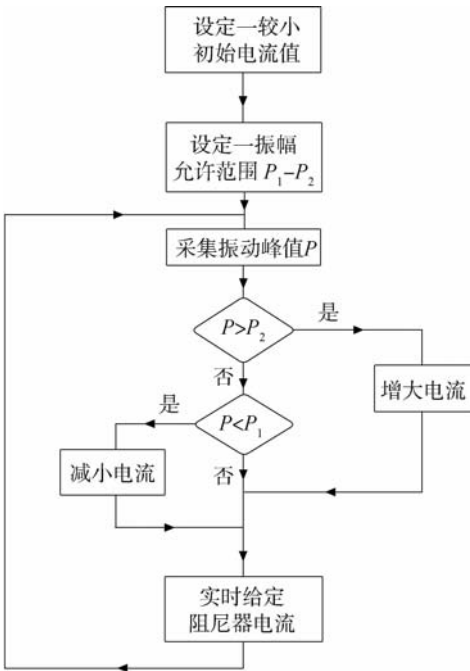


图 4 基于振幅的随动控制策略
Fig. 4 Servo control strategies based on vibration amplitude

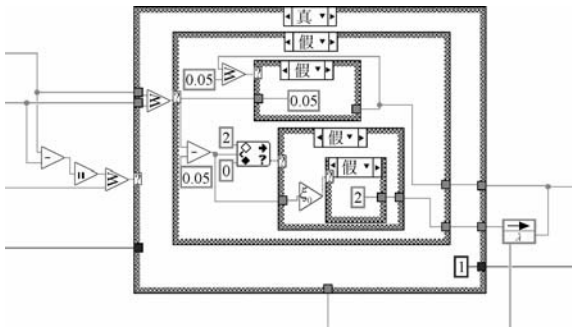


图 5 基于振幅的随动控制器
Fig. 5 Servo controller based on vibration amplitude

3.2 随动控制实验

设定目标值为 $60\text{ }\mu\text{m}$, 振幅上下限分别为 $57\text{ }\mu\text{m}$ 和 $63\text{ }\mu\text{m}$, 转子系统由 1000 r/min 均匀升速到 4000 r/min (时长为 90 s), 电流变化步长为 0.15 A , 图 6 为转子系统在平稳升速过程中的振幅实时变化曲线. 图 7 为转子系统振幅及电流实时变化曲线.

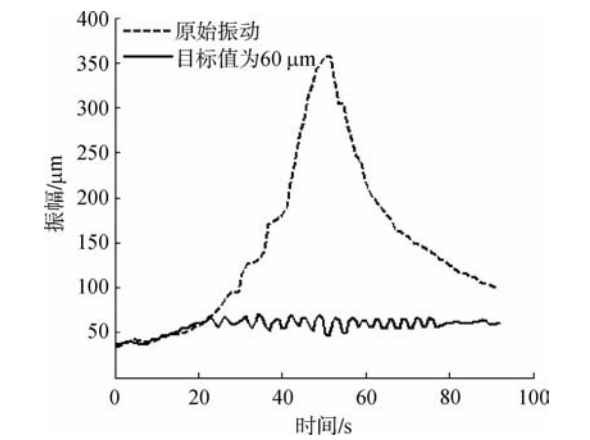


图 6 目标值为 $60\text{ }\mu\text{m}$ 时振幅变化过程
Fig. 6 Vibration amplitude change process at target value of $60\text{ }\mu\text{m}$

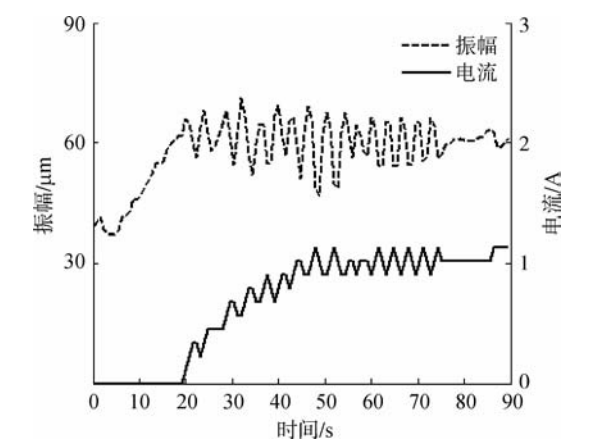


图 7 电流变化步长为 0.15 A 时振幅变化过程
Fig. 7 Vibration amplitude change process at current change step of 0.15 A

如图 6 所示, 振幅随转速升高增加到 $60\text{ }\mu\text{m}$ 后不再增加, 维持小幅波动直至安全通过 1 阶临界转速, 基本实现了振动的实时稳定调控, 但此时需要的控制电流较大.

由图 7 可得, 19 s 时电流开始增大, 50 s 时电流达到 1.0 A 左右, 但是出现较大波动, 同时对应的振幅也出现较大波动, 出现超出上下限的现象. 其原因是电流变化步长过大, 导致出现过调波动

现象. 基于此, 将原电流步长 0.15 A 减小到 0.075 A , 转子升速时振幅及电流实时变化曲线, 如图 8 所示.

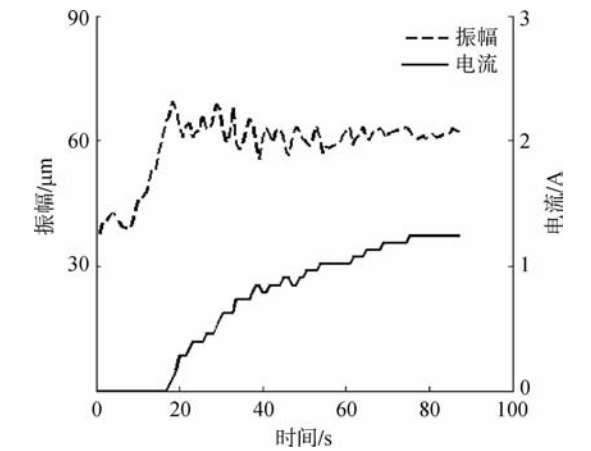


图 8 电流变化步长为 0.075 A 时振幅变化过程
Fig. 8 Vibration amplitude change process at current change step of 0.075 A

由图 8 可得, 在 18 s 处电流开始增加, 电流一直处于较为平稳增加状态, 同时对应的振幅出现较大波动、超出上下限的现象也明显改善. 这说明电流变化步长为 0.075 A 更为适合该系统. 在此基础之上, 改变目标幅值, 分别实验目标幅值为 $80\text{ }\mu\text{m}$ 和 $100\text{ }\mu\text{m}$ 工况下的振动情况, 如图 9、图 10 所示.

由图 9 可得, 在 19 s 处电流开始增加, 之后一直处于较为平稳增加状态, 在 50 s 处增加到最大值 0.9 A , 并伴有小幅波动, 同时对应的振幅波动较小.

由图 10 可得, 由于目标振幅较大, 在 29 s 处

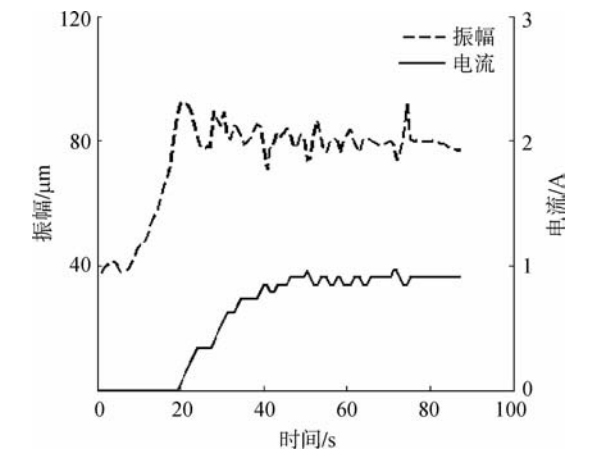


图 9 目标值为 $80\text{ }\mu\text{m}$ 时振幅变化过程
Fig. 9 Vibration amplitude change process at target value of $80\text{ }\mu\text{m}$

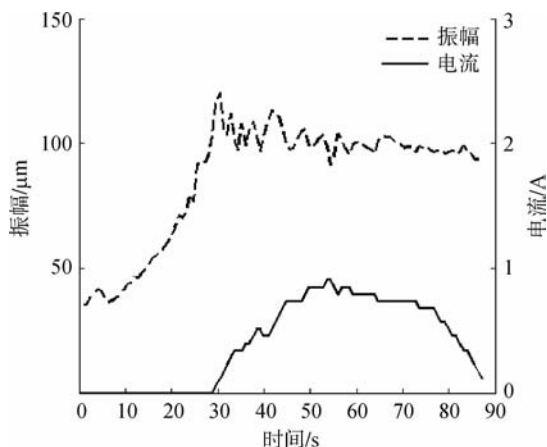


图10 目标值为 $100\mu\text{m}$ 时振幅变化过程

Fig. 10 Vibration amplitude change process at target value of $100\mu\text{m}$

电流开始增加,之后一直处于较为平稳增加状态,在 55 s 处增加到最大值 0.9 A,此时,系统已基本通过共振区;之后,电流逐渐减小,使振幅仍然稳定在 $100\mu\text{m}$ 附近。

4 结 论

本文搭建转子实验台,在转轴上安装磁流变阻尼器,研究这一辅助结构对转子系统不平衡振动的抑制规律。在转子系统开机过程中,得到阻尼器对转子不平衡振动的抑制规律,并开发振动随动控制软件平台,研究其对转子系统振动的实时调控效果,得到如下结论:

1) 在转子系统开机过程中,阻尼器可以有效抑制系统振动,且抑制幅度随电流增加而加强,降幅可达 90%。

2) 阻尼器作为辅助机构安装在转轴上,不改变原有支撑形式,有利于保证系统稳定性,同时可以提供转子系统较大的阻尼力,不大幅改变系统刚度,将振动能量很好的耗散掉,从而减小系统振动。

3) 设计的基于振幅的随动控制程序,可以实时跟踪转子振幅的变化而改变阻尼器电流,使振动在允许范围内小幅波动,直至安全通过 1 阶临界转速,基本实现了转子系统振动的实时稳定调控。

参考文献:

[1] 孟光. 转子动力学研究的回顾与展望[J]. 振动工程学报, 2002, 15(1): 1-9.
MENG Guang. Review and prospect of rotor dynamics[J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(1): 1-9. (in

Chinese)

[2] 高金吉, 缪红燕, 徐鸿, 等. 多转子轴系优化耦联及其不平衡响应有限元分析[J]. 振动与冲击, 2005, 24(2): 1-4.
GAO Jinji, MIAO Hongyan, XU Hong, et al. Multi-rotors system coupling optimization and unbalance response analysis with finite element method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(2): 1-4. (in Chinese)

[3] 缪红燕, 高金吉, 徐鸿, 等. 基于有限元法的柔性转子虚拟动平衡研究[J]. 振动、测试与诊断, 2004, 24(3): 14-18.
MIAO Hongyan, GAO Jinji, XU Hong, et al. A study of virtual balancing of flexible rotor based on finite element method[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2004, 24(3): 14-18. (in Chinese)

[4] Rabinow J. The magnetic fluid clutch[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineering, 1948, 67(2): 1308-1315.

[5] 周治江, 廖昌荣, 谢磊, 等. 硅基磁流变粘弹性流体制备方法与流变学特性研究[J]. 功能材料, 2013, 44(17): 2554-2558.
ZHOU Zhijiang, LIAO Changrong, XIE Lei, et al. Preparation and rheological properties research for silica based magneto-rheological viscoelastic fluid (MRVF) [J]. Journal of Functional Material, 2013, 44(17): 2554-2558. (in Chinese)

[6] 廖昌荣, 余森, 陈伟民, 等. 汽车磁流变减振器设计原理与实验测试[J]. 中国机械工程, 2002, 13(16): 1391-1394.
LIAO Changrong, YU Miao, CHEN Weimin, et al. Design theory and experimental test of a magneto-rheological fluid shock absorber for automobile suspension systems [J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(16): 1391-1394. (in Chinese)

[7] 王修勇, 陈政清, 高赞明, 等. 磁流变阻尼器对斜拉索振动控制研究[J]. 工程力学, 2002, 19(6): 22-28.
WANG Xiuyong, CHEN Zhengqing, GAO Zanming, et al. Study of mitigating vibration on stay cables using magneto-rheological damper[J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(6): 22-28. (in Chinese)

[8] 周云, 谭平. 磁流变阻尼控制理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[9] 汪建晓, 孟光. 磁流变液阻尼器在转子振动控制中的应用[J]. 化学物理学报, 2001, 14(5): 548-554.
WANG Jianxiao, MENG Guang. Application of magneto-rheological fluid damper in rotor vibration control[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2001, 14(5): 548-554. (in Chinese)

[10] 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 Jianxiao, MENG Guang. Vibration control of rotor by magneto-rheological fluid damper[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2001, 29(7): 47-49. (in Chinese)

[11] 汪建晓, 孟光. 磁流变液阻尼器用于振动控制的理论及实验研究[J]. 振动与冲击, 2001, 20(2): 41-47, 95.

WANG Jianxiao, MENG Guang. Theoretical and experimental study on the vibration control by magnetorheological fluid dampers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2001,20(2):41-47,95. (in Chinese)

[12] 汪建晓,孟光. 磁流变液阻尼器-转子-滑动轴承系统稳定性实验研究[J]. 振动工程学报,2003,16(1):71-74.

WANG Jianxiao, MENG Guang. Experimental study on stability of a rotor supported on a MR fluid damper and sliding bearing [J]. Journal of Vibration Engineering, 2003,16(1):71-74. (in Chinese)

[13] 汪建晓,孟光. 磁流变液阻尼器-柔性转子系统振动特性与控制的再研究[J]. 机械强度,2003,25(4):378-383.

WANG Jianxiao, MENG Guang. Re-study on vibration performance and control of magnetorheological fluid damper-flexible rotor system [J]. Journal of Mechanical Strength,2003,25(4):378-383. (in Chinese)

[14] 祝长生. 剪切型磁流变流体阻尼器-柔性转子系统动力特性的理论和试验研究[J]. 功能材料,2006,37(6):1006-1012.

ZHU Changsheng. Experimental and theoretical investigation on dynamic behavior of a flexible rotor supported on a shear-type magnetorheologic fluid damper[J]. Journal of Functional Material,2006,37(6):1006-1012. (in Chinese)

[15] 祝长生. 剪切型磁流变脂阻尼器柔性转子系统不平衡响应的试验研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(18):48-54.

ZHU Changsheng. Experimental investigation on unbalance response of a shear-type magnetorheologic grease damper flexible rotor system[J]. Proceedings of the Chinese of Society for Electrical Engineering,2007,27(18):48-54. (in Chinese)

[16] 祝长生. 剪切型磁流变脂阻尼器转子系统的动力特性[J]. 机械工程学报,2006,42(10):91-94.

ZHU Changsheng. Dynamic behavior of shear-type magnetorheologic grease damper rotor system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(10): 91-94. (in Chinese)

[17] Carlson J D, Catanzarite D M, St Clair K A. Commercial magneto-rheological fluid devices[J]. International Journal of Modern Physics B,1996,10(23/24):2857-2865.

[18] Milecki A. Investigation and control of magneto-rheological fluid dampers [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2001,41(3):379-391.

(编辑:陈 越)