

文章编号: 1000 8055(2008)11-2026-05

弹支局部断裂后主动弹支干摩擦阻尼器 对转子的保护

王四季, 廖明夫

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 分析了弹支笼条局部断裂后对转子的影响; 实验研究了弹支笼条没有裂纹、有裂纹时, 升、降速等情况下转子的振动特性, 包括有、无主动弹支干摩擦阻尼器控制等. 实验发现, 主动弹支干摩擦阻尼器能减小由于弹支发生局部断裂而增加的振动; 选择 P 控制方案, 主动式弹支干摩擦阻尼器能够在转子弹支局部断裂后, 实现应急停机, 起到保护转子系统的作用.

关 键 词: 主动弹支干摩擦阻尼器; 弹支局部断裂; 应急停机

中图分类号: V231.9

文献标识码: A

Protection of a rotor against violent vibrations caused by a crack in elastic supports by using active elastic support/dry friction dampers

WANG Si ji, LIAO Ming-fu

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The dynamic behavior of rotor systems with a cracked elastic support was analyzed. Experimental investigations of rotor vibration characteristics, in particular, caused by a crack in elastic supports by using the control of an active elastic support/dry friction damper, was carried out. It is proven that the damper is effective to reduce rotor vibration caused by cracked elastic supports. Experimental results show that the damper with the P control method, can be achieved with the emergency shutdown, and plays a key role of protecting rotor systems.

Key words: active elastic support/dry friction damper; cracked elastic supports; emergency shutdown

发动机运行过程中, 转子支承部件或弹支有时会出现局部断裂. 此时, 发动机振动会增大, 若发动机转子工作在临界转速之上, 停机时要越过临界转速, 振动会进一步加剧, 有可能导致发动机破坏, 或更严重的后果. 在条件允许的情况下(例如双发飞机), 若能使发动机顺利停机, 则会减小风险, 保护人、机. 为此, 希望有主动保护机构, 使转子过临界转速时的振动尽量减小, 实现急救停机.

弹支干摩擦阻尼器(已授权发明专利“一种抑制带弹性支承转子系统振动的方法及装置”, 专利号: ZL200410073346.0)作为一种新的转子振动控制机构具有很好的减振效果^[1,2], 在控制转子振动时能够给转子系统提供附加阻尼和附加刚度^[3], 因此, 在弹支或支承局部断裂时, 利用可控的弹支干摩擦阻尼器增加转子系统刚度和阻尼, 对减小振动和保证转子系统在减速时能安全越过

收稿日期: 2007 11 05; 修订日期: 2008 04 29

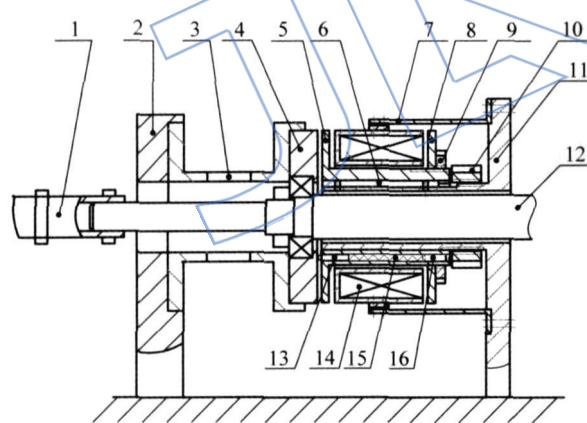
作者简介: 王四季(1981-), 男, 安徽濉溪人, 博士, 主要从事转子振动控制、旋转机械状态监测与故障诊断方面研究.

临界转速具有重要的作用。

本文介绍利用主动弹支干摩擦阻尼器实现这一目标的实验研究。在带有弹支局部断裂的转子上进行升速和降速运行实验。当没有主动弹支干摩擦阻尼器控制时, 振动太大, 转子无法越过临界转速; 有主动弹支干摩擦阻尼器控制时, 转子可顺利越过临界转速, 并且平稳停机。进行了多次实验, 结果证实, 主动弹支干摩擦阻尼器, 能够减小转子通过临界转速的振动并增加支承刚度, 达到应急停机的目的。

1 阻尼器的结构和实验装置

图 1 给出了主动弹支干摩擦阻尼器的详细结构^[3] (已申请专利“一种弹支干摩擦阻尼器电控装置”, 申请号: 200710017593. 2), 其主要由弹性支承、动摩擦片、静摩擦片和电磁铁组成。电磁铁提供法向压力, 可以控制动、静摩片之间压力以及动、静摩片的接触和分离。当动、静摩擦片在电磁铁的法向压力下接触后, 无疑阻尼器会增加转子系统的支承刚度; 同时由于转子振动致使动、静摩擦片之间具有径向相对运动而产生摩擦力, 从而给转子系统提供额外阻尼。这对转子弹支局部断裂时, 减小转子通过临界转速振动, 保护支承不进一步损坏具有重要的作用。



1 柔性联轴器; 2 轴承支座; 3 鼠笼式弹性支承;
4 动摩片; 5 静摩片; 6 导向键; 7 磁铁支架; 8 磁铁衔铁;
9 衔铁锁紧螺帽; 10 定位螺帽; 11 支撑; 12 轴;
13 复位导杆; 14 电磁铁; 15 复位弹簧; 16 调节螺栓。

图 1 主动弹支干摩擦阻尼器结构图

Fig.1 Cross section of an active elastic support/ dry friction damper

图 2 是实验装置图, 其主要由盘、轴、限幅器、主动弹支干摩擦阻尼器、柔性联轴器、电机以及测控系统组成。转子转速可以从 0~1800r/min 连续可调。转子圆盘的不平量为 $\varepsilon=20\text{g}\cdot\text{cm}$ 。转子和

鼠笼式弹支参数详见表 1 和表 2。

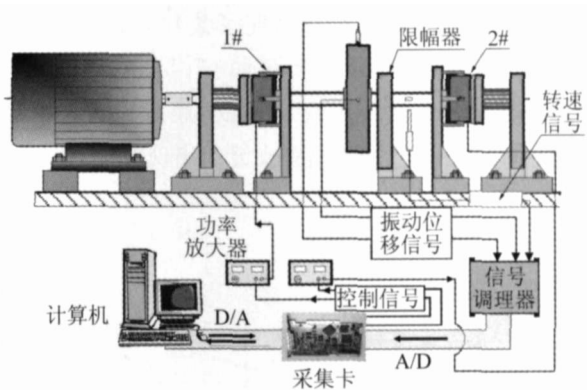


图 2 实验装置及测控系统图

Fig.2 Test rig and measurement control system

表 1 转子参数及材料特性

Table 1 Rotors parameters and materials properties

部件	直径/ mm	长度/ mm	厚度/ mm	材料名称	弹性模量/ 10^{11}Pa
轴	28	700	—	45# 钢	2.1
盘	120	—	40	A3 钢	—

表 2 弹支参数及材料特性

Table 2 Elastic support parameters and materials properties

部件	笼条数/ 个	有效长度/ mm	厚度/ mm
弹支	8	70	4

部件	宽度/ mm	材料	弹性模量/ 10^{11}Pa
弹支	3	45# 钢	2.1

测控系统主要由电涡流位移传感器 (SCHENCK IN-085)、光电传感器 (SCHENCK P-84)、信号调理器、功率放大器、数据采集卡、电脑等组成。两只电涡流位移传感器用来测量圆盘垂直方向 (CH1) 和水平方向 (CH2) 处的振动位移量。光电传感器用于测量转速, 并作为测量相位角的参考标志。信号调理器和功率放大器分别用于测量信号的调理和控制信号的放大。数据采集卡主要用于转速和振动信号的采集以及控制信号的输出。用自行研制的旋转机械振动状态监测与控制系统, 作为信号的监视、采集、记录、分析以及控制。

2 弹支笼条裂纹及其影响

弹支笼条裂纹是转子实验器长时间运行, 并多次过临界转速的情况下, 自然产生的真实裂纹。

图 3 是弹支笼条裂纹位置示意图. 其中, 图 3(a) 中 1# 弹支有两个笼条出现了裂纹, 裂纹分别出现在弹支安装位置的 22.5°和 67.5°; 图 3(b) 中 2# 弹支有一个笼条出现了裂纹, 裂纹位置在弹支安装位置的 270°. 图 4 是弹支笼条出现裂纹的照片.

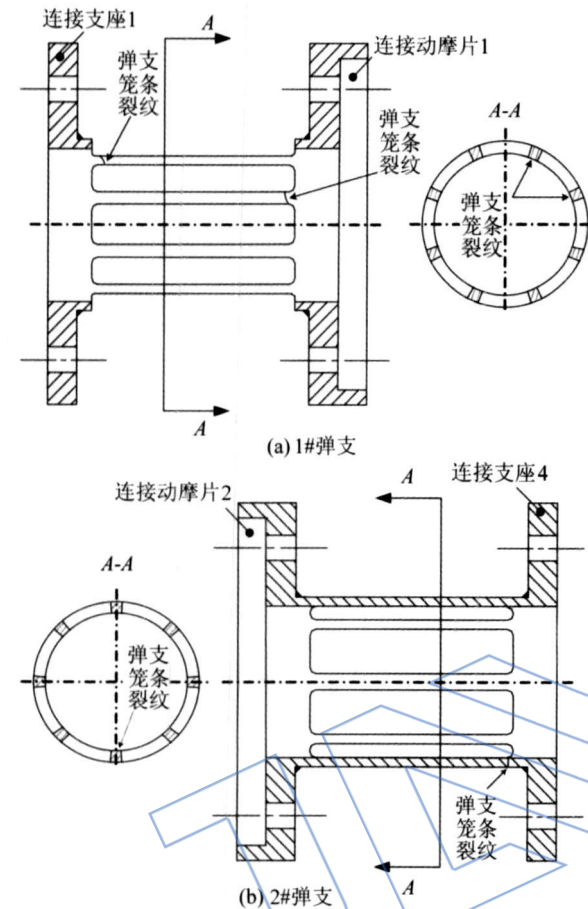


图 3 弹支笼条断裂位置示意图

Fig. 3 Cracked elastic support location

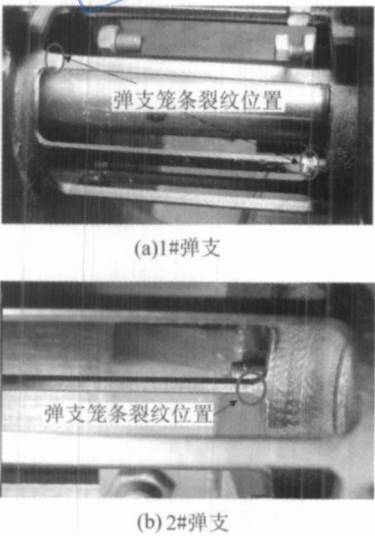


图 4 弹支笼条裂纹照片

Fig. 4 Pictures of cracked elastic supports

根据文献[4]中鼠笼式弹支刚性系数计算公式

$$k_1 = \frac{ZEh^2b^2}{l^3} \tag{1}$$

把表 2 弹支的参数代入式(1), 可计算出刚度系数为 $k_1 = 7.06 \times 10^5 \text{ N/m}$.

根据式(2)可以求得安装盘处轴的刚度

$$k_2 = \frac{48EI}{L^3} \tag{2}$$

其中 $I = \pi D^4/64$, 把表 1 轴的参数带入到式(2), 可计算出 $k_2 = 8.87 \times 10^5 \text{ N/m}$.

由于 $k_1 < k_2$, 根据文献[4]可知, 该弹支可近似看作低刚度弹支.

当转子系统的弹支笼条发生裂纹后, 势必造成弹支刚度进一步降低. 由低刚度弹支的特性可知^[4], 当弹支刚度降低后, 在低阶临界转速, 转子基本上不发生变形, 变形主要发生在弹支上, 这对具有裂纹的弹支来说弹支应力变大, 加速弹支损坏; 而高阶临界转速, 转子发生较大弯曲变形, 转子的振幅加大, 同样加剧了转子弹支的损坏. 由文中弹支发生裂纹的位置可知: 转子支承刚度在垂直方向减小较大, 在水平方向减小相对较小; 转子运行中, 弹支变形会增大. 由于转子系统弹支可以近似看成低刚度弹支, 所以转子的变形会主要发生在弹支处, 故测得转子振动应该增大.

3 实验过程及结果分析

为了研究转子系统在弹支发生裂纹后振动特性的变化, 以及主动弹支干摩擦阻尼器对转子弹支发生裂纹后的保护作用, 主要进行以下实验.

实验 1: 转子弹支没有裂纹时, 主动弹支干摩擦阻尼器不控制, 转子转速从 400 r/min 均匀升至 1800r/min, 确定转子的临界转速和转子的幅频特性.

实验 2: 根据实验 1 中的幅频曲线, 设置 400~ 1800 r/min 升速过程中的转速阈值, 在阈值范围内, 1# 和 2# 阻尼器打开, 并且动、静摩片之间的正压力根据转子振动大小进行 P 控制; 在阈值范围之外, 1# 和 2# 阻尼器关闭. 记录电磁铁在此控制过程中的功率曲线.

实验 3: 转子 1# 和 2# 弹支笼条发生如图 3 所示的裂纹, 主动弹支干摩擦阻尼器不控制, 转子转速从 400r/min 均匀升至 1800r/min, 确定转子的临界转速和转子的幅频特性.

实验 4: 根据实验 3 中的幅频曲线, 设置 400~ 1800 r/min 升速过程中的转速阈值, 在阈值范围

内, 1# 和 2# 阻尼器打开, 并且动、静摩片之间的正压力根据转子振动大小进行 P 控制; 在阈值范围之外, 1# 和 2# 阻尼器关闭. 记录电磁铁在此控制过程中的功率曲线.

实验 5: 在实验 4 中, 当转速上升至 1 800 r/min 后, 把 1# 和 2# 阻尼器关闭, 调节转速从 1 800 r/min 均匀下降, 如果振动过大, 则把转速上升至 1 800 r/min, 然后打开阻尼器给阻尼器施加一恒定电压, 调节转速自 1 800 r/min 匀速下降, 并记录这一实验过程的幅频特性数据.

在上述实验过程中, P 控制是基于转子圆盘处振动位移的反馈控制. P 控制被定义为^[56]

$$U = U_i + k_p(D - D_r)$$

(3)

其中 U 为电磁铁控制电压, U_i 是初始电压, k_p 是比例增益, D 是所测振动位移, D_r 是参考振动位移. 其控制框图如图 5 所示.

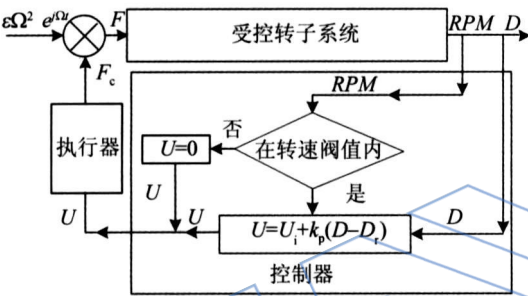


图 5 控制框图
Fig. 5 The controller system

图 6 是按照实验 1 和实验 3, 没有施加 P 控制时, 转速从 400 r/min 到 1 800 r/min 的增速 Bode 图. 其中图 6(a) 的弹支笼条是完好的; 图 6(b) 的弹支笼条有裂纹. 从图中可以看出, 当笼条完好时, 转子在垂直方向 (CH1) 和水平方向 (CH2) 振动的临界转速分别为 1 495 r/min 和 1 517 r/min, 相差很小, 并且转子通过临界转速时, 垂直方向和水平方向的最大振动 (PP 值) 分别为 752. 7 μm 和 1 424. 5 μm; 当弹支笼条有裂纹时, 由于振动过大垂直方向的振动没有通过临界转速就停机了, 但通过图 6(b) 可以看出转子垂直方向 (1 293 r/min) 和水平方向 (大约在 1 450 r/min) 的临界转速相差加大, 并且垂直方向和水平方向的振动都有所增大, 而临界转速都有所下降 (垂直方向下降大于水平方向), 这与前面的分析完全吻合. 其中图 6(a) 中的低速峰是转子系统的 1/2 临界转速引起的.

图 7 是按照实验 2 和实验 4, 分别在转速阈值为 1 249~ 1 800 r/min 和 1 065~ 1 800 r/min 范

围内, 施加 P 控制时的转子增速 Bode 图. 其中图 7(a) 的弹支笼条是完好的; 图 7(b) 的弹支笼条有裂纹. 从图中可以看出, 施加 P 控制后, 转子通过临界转速的振动大幅减小, 特别是在弹支笼条有裂纹时, 转子通过临界转速振动不仅减小, 而且转子的临界转速也增加至 1 490 r/min 左右, 这对弹支笼条有裂纹的转子来说, 起到重要的保护作用. 图 8 是实验 2 和实验 4 中 P 控制时, 电磁铁消耗的功率曲线. 其中图 8(a) 的弹支笼条是完好的; 图 8(b) 的弹支笼条有裂纹. 从图中可以看出当弹支笼条有裂纹后, 振动控制所需要的功率要大于弹支完好的功率. 这也从侧面说明了弹支笼条有裂纹后, 振动加大了, 主动弹支干摩擦阻尼器所耗功率也增加. 但总的来说, 主动式弹支干摩擦阻尼器具有功耗小的特点. 其中图 7(b) 中的两个低速峰分别是转子系统 1/2 临界转速和控制起始位置引起的.

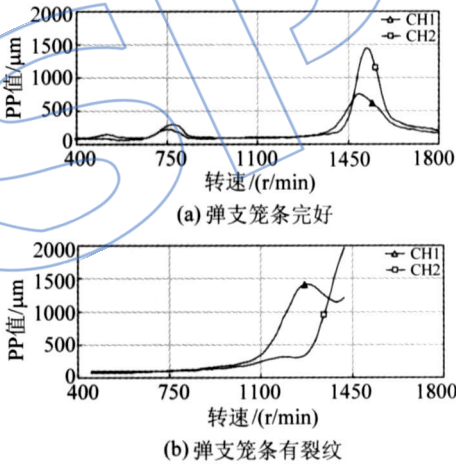


图 6 增速 Bode 图(无控制)
Fig. 6 Accelerating Bode diagrams (Uncontrolled)

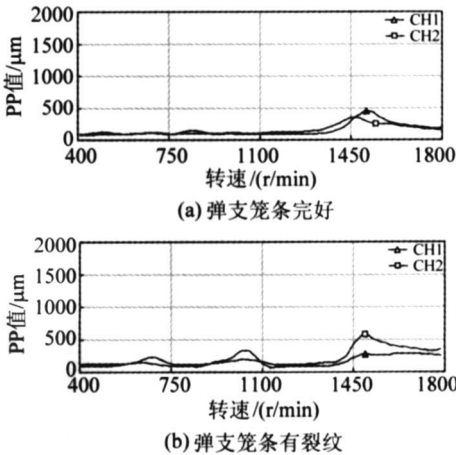


图 7 增速 Bode 图(P 控制)
Fig. 7 Accelerating Bode diagrams (Using P control)

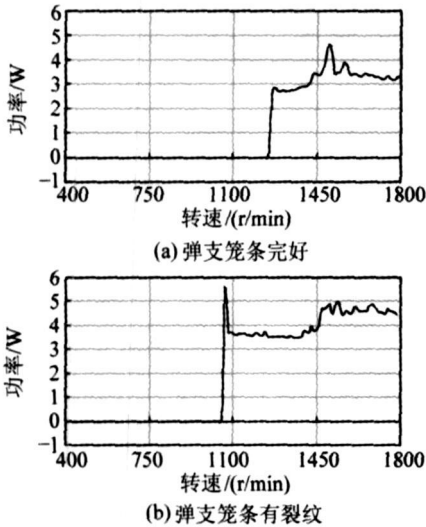


图 8 控制功率曲线(P 控制)

Fig. 8 Power curves of electromagnets (P control)

图 9 是按照实验 5, 在弹支笼条有裂纹时, 无控制和有控制时转子的减速 Bode 图. 其中图 9 (a) 是无控制的减速 Bode 图, 图 9 (b) 是在 1800~500r/min 的转速范围内给主动式弹支干摩擦阻尼器施加恒定电压 9 V 的减速 Bode 图. 从图中可以看出, 当没有控制时由于转子通过临界转速的振动过大, 无法实现停机; 当施加控制后, 转子通过临界转速的振动大幅减小, 能够在振动比较小的情况下停机, 实现了应急停机.

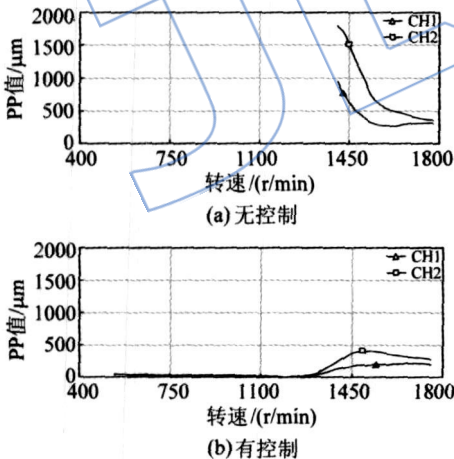


图 9 减速 Bode 图(弹支笼条有裂纹)

Fig. 9 Decelerating Bode diagrams

(Rotors with cracked supports)

综合上述分析可以看出, 当弹支笼条发生裂

纹后, 主动弹支干摩擦阻尼器在选择合适的控制方案后, 能够给转子系统增加阻尼和提供附加刚度, 从而降低转子振动, 实现应急停机, 起到保护转子系统的作用.

4 结 论

本文用主动弹支干摩擦阻尼器对转子弹支笼条发生裂纹后的转子振动控制进行了实验研究. 结果表明:

- 1) 主动弹支干摩擦阻尼器能够减小因弹支笼条发生裂纹后增加的转子振动;
- 2) 选择 P 控制方案, 主动弹支干摩擦阻尼器能够在转子弹支笼条发生裂纹后, 实现应急停机, 起到保护转子系统的作用.

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, 5(22): 743-745.
FAN Tianyu, LIAO Mingfu. Dynamic behavior of a rotor with dry friction dampers[J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 5(22): 743-745. (in Chinese)
- [2] 范天宇, 廖明夫, 王俨凯. 弹性支承干摩擦阻尼器减振实验研究[J]. 机械科学与技术, 2005, 9(24): 1063-1065.
FAN Tianyu, LIAO Mingfu, WANG Yankai. Experimental investigation of dry friction damper with elastic support[J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 9(24): 1062-1065. (in Chinese)
- [3] 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研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(11): 1893-1897.
WANG Siji, LIAO Mingfu, YANG Shenji. Experimental investigation on rotor vibration control by elastic support/dry friction damper[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(11): 1893-1897. (in Chinese)
- [4] 晏砺堂. 航空燃气轮机振动和减振[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
YAN Litang. Vibration and vibration damping of aero gas turbine[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991. (in Chinese)
- [5] Liao M F, Gasch R, Kolk O, et al. Stability improvement of motion of a rotor with an active control method[J]. Journal of Vibration and Control, 2000, 6(2): 29-308.
- [6] ZHU Changsheng, Robb A, Ewins J. Magneto-rheological fluid dampers for rotor vibration control[R]. AIAA 2000-1469.