

# 弹支干摩擦阻尼器在线控制转子失稳\*

王四季, 廖明夫

(西北工业大学动力与能源学院 西安, 710072)

**摘要** 为了实现转子失稳振动的主动控制,建立了基于主动弹支干摩擦阻尼器(ESDFD)的锁相延迟反馈控制法控制转子失稳振动的理论模型和消除转子失稳振动的在线实现方法。理论分析了弹支干摩擦阻尼器提高转子失稳门槛转速,模拟了转子的失稳振动,并对基于锁相延迟反馈控制的在线控制转子失稳振动的效果进行了试验验证。试验结果表明,主动弹支干摩擦阻尼器能够有效地控制转子失稳振动,为转子失稳振动控制提供了一种新途径。

**关键词** 转子失稳; 在线控制; 主动弹支干摩擦阻尼器; 锁相延迟反馈控制

**中图分类号** V231.9

## 引言

在航空、航天领域,航空发动机和火箭涡轮泵的转子系统一般都设计成超临界转速的柔性转子,其工作转速一般在1阶临界转速的2倍以上。由于内摩擦、转/静碰摩和气弹效应等因素会引起转子的自激振动,即失稳。一旦发生失稳振动,将对机器造成严重的破坏。为此,人们不仅在机械设计中采取多种措施来避免失稳振动的发生,同时还积极研究利用主动控制抑制转子的失稳运动<sup>[1-6]</sup>。其中,文献[5-6]建立了应用锁相延迟反馈控制在线消除转子失稳振动的最优实现方法。该方法在转子系统参数未知情况下,通过判断转子是否失稳,利用转子相邻周期的振动差作为反馈量,借助外界控制力给转子系统外加阻尼和支承刚度。反之,对转子的稳态周期运动不施加任何影响,即无失稳故障发生时,不改变转子的任何参数。文献[5-6]在具体控制转子失稳时,外界的附加阻尼和刚度采用什么方式,并没有给出具体的措施。由文献[7]可知,弹支干摩擦阻尼器在工作时,不仅能够给转子系统附加阻尼,同时还能够给转子系统附加刚度。不工作时,动、静摩片分离,不影响转子的稳定运行的状态;因此,研究利用基于主动弹支干摩擦阻尼器的锁相延迟反馈控制方法在线控制转子失稳振动,具有重要的工程实践意义。

## 1 主动ESDFD控制转子失稳振动

### 1.1 锁相延迟反馈控制的基本原理

以支承在滚动轴承上的Jeffcott转子模型为分析对象,并且转子系统的阻尼为负。对此转子施加锁相延迟反馈控制,以 $x$ 方向为例,转子的运动微分方程<sup>[5]</sup>为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m\epsilon\Omega^2\cos\Omega t + A[x(t) - x(t - T)] + B[\dot{x}(t) - \dot{x}(t - T)] \quad (1)$$

其中: $m$ 为轮盘质量; $c$ 和 $k$ 为阻尼系数和刚度;方程的右侧分别为不平衡力和控制力; $\epsilon$ 为质心偏心距; $A, B$ 为控制参数; $T(T=2\pi/\Omega)$ 为不平衡激振力的周期。

由分析可知<sup>[6]</sup>,当转子系统阻尼 $c$ 为负时,转子受到外部干扰时会发生失稳,如果控制参数 $A=0, B<0$ 或者 $A<0, B<0$ ,均可达到控制转子失稳。

### 1.2 带ESDFD的转子系统模型

为便于理论分析,把文献[7]中带有主动弹支干摩擦阻尼器的转子视为受简谐激振力的单自由度强迫振动系统,如图1(b)所示。由于模型结构对称,两个主动弹支干摩擦阻尼器的各参数相同,故只需对1/2模型进行分析。

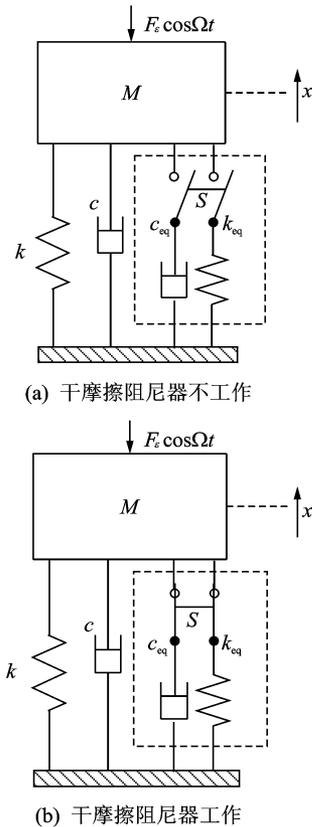


图1 带有主动ESDFD的转子系统简化模型

### 1.3 控制机理

为了说明主动弹支干摩擦阻尼器控制转子失稳的机理,取图1转子的模型为例。当转子稳定运行时,不对转子系统进行控制,即弹支干摩擦阻尼器不工作,如图1(a)所示,此时转子的运动微分方程为

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_e \cos \Omega t \quad (2)$$

其中: $M$ 为1/2轮盘质量和弹支质量之和; $c, k$ 为系统阻尼系数和弹支刚度; $F_e \cos \Omega t$ 为不平衡激振力。

当转子系统阻尼系数 $c$ 为负时,一旦受到外界干扰,转子就可能作失稳运动。此时,引入主动弹支干摩擦阻尼器,如图1(b)所示,主动弹支干摩擦阻尼器给转子系统增加了外阻尼和刚度,使用锁相延迟反馈控制法控制时,转子的运动微分方程为

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_e \cos \Omega t + (-k_{eq})[x(t) - x(t-T)] + (-c_{eq})[\dot{x}(t) - \dot{x}(t-T)] \quad (3)$$

其中: $k_{eq}, c_{eq}$ 分别为弹支干摩擦阻尼器的等效刚度和等效阻尼系数<sup>[8]</sup>;  $T=2\pi/\Omega$ 为转子运动周期。

比较式(1)和式(3)可以看出

$$\begin{cases} A = -k_{eq} \\ B = -c_{eq} \end{cases} \quad (4)$$

对于主动弹支干摩擦阻尼器来说,当其工作(即动、静摩擦片在外力作用下接触)时,有 $k_{eq}, c_{eq}$ 。因此,

由上述分析可知,施加合适的正压力,主动弹支干摩擦阻尼器就能够利用锁相延迟反馈控制法控制转子的失稳振动。

### 1.4 控制方法及策略

用主动弹支干摩擦阻尼器控制转子失稳振动的实质是,在转子失稳振动发生时,选择合适的控制力 $N$ (即动、静摩擦片之间的正压力),给转子系统提供附加阻尼和刚度,使转子的失稳故障消除。

因此,笔者根据主动弹支干摩擦阻尼器的特点和锁相延迟反馈控制法控制转子失稳振动的机理,建立了基于主动弹支干摩擦阻尼器的锁相延迟反馈控制法控制转子的失稳振动,即选择振动位移信号 $x(t)$ 与若干周期之后的振动信号 $x(t-nT)$ ( $T$ 为周期, $n=1,2,3,\dots$ )之差作为反馈量,调整主动弹支干摩擦阻尼器动、静摩擦片之间的正压力,从而达到控制作用在转子系统上的外阻尼和刚度。根据振动反馈量的大小衡量转子失稳振动的大小,根据反馈量的大小作为开启失稳控制的控制参数,这样,不仅减少了控制参数,提高了系统反应的速度,而且由于控制参数的减少,提高了控制系统的可靠性。图2为基于主动弹支干摩擦阻尼器的锁相延迟反馈控制法的控制框图,其中 $f(\tau)$ 为干摩擦力。

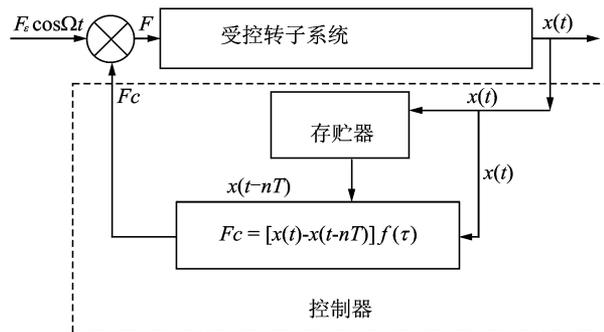


图2 基于主动ESDFD的锁相延迟反馈控制法控制

## 2 基于主动ESDFD的转子失稳振动在线控制方法

由文献[6]可知,采用锁相延迟反馈控制法控制转子的失稳振动无需知道转子的参数,只需要知道所测转子的转速和振动信号。在监测过程中,构造目标函数用于判断转子的失稳振动是否发生。目标函数 $J$ 为

$$J = \sum_{i=1}^k [x(t_i) - x(t_i - n\tau)]^T \cdot G[x(t_i) - x(t_i - n\tau)] \quad (5)$$

同时,由于测量误差和噪声,控制目标应为

$$J \leq \delta \quad (6)$$

其中: $\delta$ 根据测量误差和噪声水平确定。

这一控制过程为:实时监测转子转速和振动信号进行,并计算目标函数 $J$ 的值。当 $J > \delta$ 并有上升趋势时,打开主动弹支干摩擦阻尼器控制系统开始工作,即在线选择主动弹支干摩擦阻尼器动、静摩擦片之间的正压力 $N$ ,使得目标函数始终保持为 $J \leq \delta$ 。

## 3 数值仿真与试验验证

### 3.1 数值仿真

对图1转子系统模型取如下参数: $M=0.6 \text{ kg}$ , $k=7\ 200 \text{ N/m}$ , $k_{\text{eq}}=0.2 k$ , $c_{\text{eq}}=0.5 c$ , $F_e=0.1 M$ 。

根据Routh准则,计算可得到图3的无控制与受控制转子不平衡响应曲线。

由图3可见,采用基于主动弹支干摩擦阻尼器的锁相延迟反馈控制法,转子的稳定性有明显改善,即转子的稳定性边界由 $2\ 310 \text{ r/min}$ 扩大到 $2\ 980 \text{ r/min}$ ,扩大了30%。在稳定区域,该方法并不影响转子的稳态不平衡响应。

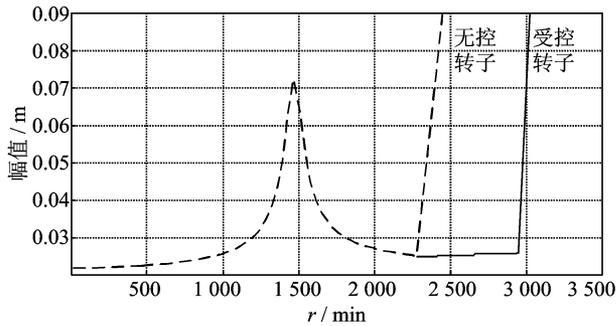


图3 无控转子与受控转子的不平衡响应曲线

仍取上述转子系统为控制对象。转子和弹性支承的参数与前例相同。由图3可知,该转子系统模型的失稳转速门坎为 $2\ 310 \text{ r/min}$ 。当转速超过失稳门坎时,使用上述的控制方法对转子失稳振动进行控制。图4为目标函数 $J$ 值随时间变化曲线。由图可知,无控制时,目标函数 $J$ 的值随时间迅速增大,说明转子已经发生失稳振动。在 $t=0.085 \text{ s}$ 时,控制系统开始工作,当 $t=0.21 \text{ s}$ 时,失稳振动已经完全得到控制,即经过基于主动弹支干摩擦阻尼器的锁相延迟反馈控制法控制后,转子的失稳运动能够得到控制,转子将保持稳定周期运动。

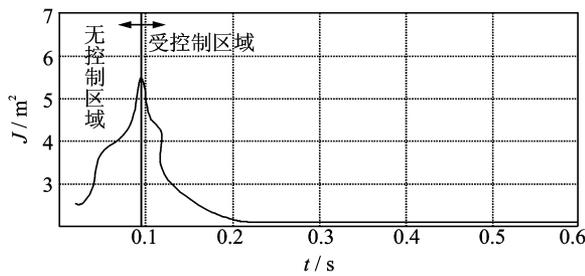


图4 目标函数的变化

### 3.2 试验验证

#### 3.2.1 试验装置

图5所示为主动弹支干摩擦阻尼器的结构<sup>[9]</sup>,主要由弹性支承、动摩擦片、静摩擦片和电磁铁组成。电磁铁提供法向力,可以控制动、静摩擦片之间的压紧力以及动、静摩擦片的接触和分离。动、静摩擦片在电磁铁的法向力作用下接触,阻尼器将增加转子系统的支承刚度和阻尼。

试验装置和测控系统的组成参见文献[9]。在控制过程中,振动信号选择的是圆盘处的振动位移信号,只选择水平方向。

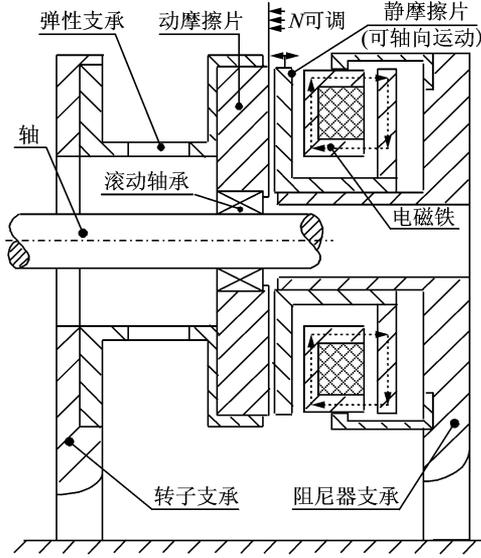


图5 主动弹支干摩擦阻尼器结构

#### 3.2.2 失稳过程的模拟

由于所建立的转子试验器无法出现失稳振动现象,为了验证主动弹支干摩擦阻尼器对转子失稳振动的主动控制效果,将文献[9]中带有弹支局部断裂的转子通过临界转速时,由于振动过大无法越过临界转速的情况作为转子失稳振动,然后利用失稳振动的在线控制算法进行振动控制,检验其控制效果。

由文献[9]可知,当弹支断裂后,会造成转子支承刚度和阻尼的减小。因此,转子通过临界转速时,

造成转子振动急剧增大,无法通过临界转速,这一过程与转子失稳过程类似。因此,用带有弹支局部断裂的转子系统通过临界转速振动急剧增大模拟转子失稳过程,检验基于主动弹支干摩擦阻尼器锁相延迟反馈控制法在线对转子失稳振动的控制过程具有一定的意义。

### 3.2.3 试验结果和分析

图6为转子转速到达1573 r/min时,转子由于弹支局部断裂,造成支承刚度减小和阻尼的减小。过临界振动急剧增大,利用基于主动弹支干摩擦阻尼器锁相延迟反馈控制法在线对转子失稳振动的控制效果。图6中竖实线的左侧无控制,竖实线的右侧有控制。

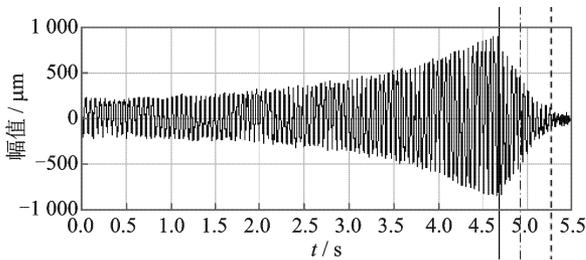


图6 转子失稳振动的在线控制效果

由图6可以看出,实施控制后,转子的振动幅值能够很快得到控制,大约需要0.28 s(竖实线到点画线之间的时间间隔),而从转子振动幅值最大处到最终的振幅稳定状态需0.6 s(竖实线到虚线之间的时间间隔)。

上述分析表明,在对实际转子系统参数未知或掌握不准确的情况下,仅根据所测转子的转速以及所测量的振动位移信号,即可利用基于主动弹支干摩擦阻尼器的锁相延迟反馈控制法在线控制转子的失稳振动。这样,可以减小控制参数,提高控制系统的可靠性。数值仿真和试验结果表明,该方法可行且有效。

## 4 结论

1) 利用基于主动弹支干摩擦阻尼器的锁相延迟反馈控制法能够有效控制转子的失稳振动。

2) 基于主动弹支干摩擦阻尼器的锁相延迟反馈控制方法在线控制转子失稳振动,具有控制效果好、控制参数少、可靠性高以及具备工程实践的特点。

### 参 考 文 献

[1] Shaw J, Albion N. Active control of the helicopter rotor for vibration reduction[C]//Proc of the 36th An-

nual Forum of the American Helicopter Society. Washington D C: [s. n.], 1980.

- [2] Matsushita O, Takagi M, Yoneyama M, et al. Stabilization by cross stiffness control of electromagnetic damper for contained liquid rotor unstable vibration [C]//Proc IMechE 4th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery, Heriot-Wall. Edinburgh: [s. n.], 1988:77-85.
- [3] Burrows C R, Sahinkaya N, Traxler A, et al. Design and application of a magnetic bearing for vibration control and stabilization of a flexible rotor[C]//Proc of First International Symmetry Magnetic Bearings. ETH Zurich Berlin: Springer Verlag, 1988.
- [4] Weitz B. Stabilitätsuntersuchung eines hochtourigen schleuderstandes mitaktiv geregeltm magnetlager [M]. Duesseldorf: VDI-Verlag, 1993.
- [5] 廖明夫, Gasch R, Kolk O, 等. 转子失稳故障的在线消除[J]. 机械科学与技术, 1999, (18)4: 539-543. Liao Mingfu, Gasch R, Kolk O, et al. In-line elimination of the fault of rotor instability[J]. Mechanical Science and Technology, 1999, 18 (4): 539-543. (in Chinese)
- [6] Liao Mingfu, 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):291-308.
- [7] 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 clamber[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(11):1893-1897. (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
- [9] 王四季, 廖明夫. 弹支局部断裂后主动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)

**第一作者简介:**王四季,男,1981年5月生,讲师。主要研究方向为转子振动控制与故障诊断。曾发表《主动式弹支摩擦阻尼器控制转子振动的实验研究》(《航空动力学报》2007年第22卷第11期)等论文。

E-mail:sjwang@nwpu.edu.cn