

文章编号: 1000-8055(2000) 01-0063-04

用于高速转子振动主动控制的智能变刚度支承系统

阎晓军 聂景旭 孙长任
(北京航空航天大学 405 教研室, 北京 100083)

摘要: 在主动变刚度理论的基础上, 利用形状记忆合金(Shape Memory Alloys)作为驱动元件, 设计了用于高速转子振动主动控制的智能变刚度支承系统。试验证明: 利用该支承系统实现了主动变刚度控制转子振动理论, 对高速转子的振动主动控制效果显著。

关键词: 转子动力学; 主动隔振; 形状记忆合金; 支承

中图分类号: V 231.92 文献标识码: A

1 主动变刚度下转子的瞬态响应

对于如何避开高速旋转转子系统在临界转速下的剧烈振动, 在主动减振技术中, 比较接近工程实际应用的是电磁悬浮轴承(AMB)。近年来提出了有关主动变刚度的试验方案^[1,2], 由于控制系统复杂, 以及实施上的技术问题, 有些方案很难在工程上得以应用。本文研究和探讨了主动变刚度理论, 并利用新型的形状记忆合金作为驱动元件设计了智能变刚度支承系统, 结构简单, 很好地验证了主动变刚度理论。

转子系统的响应随支承刚度的变化而变化。如图 1 所示, 设转子支承系统的支承刚度可在 K_1

统的动态响应如图 2 中的 K_1 (或 K_2) 曲线。在转子系统加速运转过程中, 初始支承刚度为 K_2 , 当系统转速至 ω_1 时, 突然改变系统支承刚度为 K_1 , 则整个系统的响应曲线如图 2 中的阴影所示; 同理, 减速过程的刚度变化则由 K_1 变为 K_2 。这样, 在整个运行范围内, 系统响应的最大振幅 $A_{\max}$ 将不超过 A_B , 实现平稳运转。

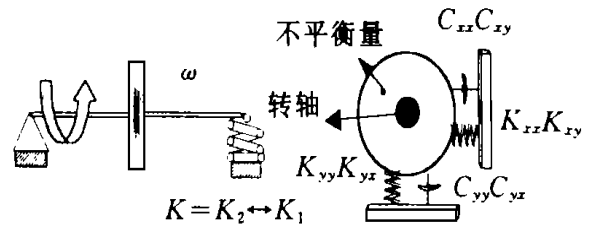


图 1 支承刚度可变的转子系统模型

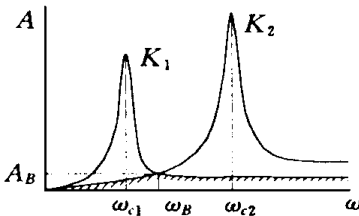


图 2 主动变刚度下转子系统的动态响应

由于在刚度变化过程中, 转子系统由亚临界向超临界状态过渡, 必然伴随着各种力的调整和平稳过程, 整个系统有可能因此而失稳。因此, 如何成功抑制系统在刚度变化过程中的响应, 将是实现变刚度理论的关键。

刚度可变的二自由度转子系统的振动方程可写为:

和 K_2 之间变换, 当支承刚度为 K_1 (或 K_2) 时, 系

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K(t)_{xx} & K(t)_{xy} \\ K(t)_{yx} & K(t)_{yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = m \begin{Bmatrix} \ddot{\Theta} \cos \Theta - \dot{\Theta}^2 \sin \Theta \\ \ddot{\Theta} \sin \Theta - \dot{\Theta}^2 \cos \Theta \end{Bmatrix} \quad (1)$$

收稿日期: 1999-01-28; 修订日期: 1999-03-10

作者简介: 阎晓军(1963-), 男, 北京航空航天大学 405 教研室, 博士

上式中: m 为轮盘质量, C 为阻尼系数, K 为系统支承刚度, Θ 为角位移, e 为轮盘偏心距, x 和 y 为轮盘质心位移, 下标 x 和 y 为坐标轴方向。

令 ω 为初始角速度, α 为角加速度, 设转子的加速和减速过程为匀加速/匀减速运动:

$$\Theta = \omega t + \alpha^2/2 \tag{2}$$

由于控制执行机构需要一定的时间来完成系统支承刚度的改变。假设支承刚度在 $t_1 \sim t_2$ 时间内按线性关系由 K_2 变化到 K_1 , 刚性变化过程可描述为:

$$K(t) = \begin{cases} K_2 & t \leq t_1 \\ K_2 + (t - t_1) \frac{K_1 - K_2}{t_2 - t_1} & t_1 < t < t_2 \\ K_1 & t \geq t_2 \end{cases} \tag{3}$$

其中: t_1 为刚度开始改变时刻, t_2 为终止时刻, 变换间隔 $\Delta t = t_2 - t_1$ 。

按照上述计算模型, 对转子系统在刚度改变过程中的瞬态响应进行了模拟计算。模拟系统中轮盘质量 $m = 1 \text{ kg}$, 支承刚度可变 ($K_1 = 1.0 \times 10^4 \text{ N/m}$, $K_2 = 6.0 \times 10^4 \text{ N/m}$), 系统阻尼比为 ξ , 计算结果如图 3 和图 4 所示。从图 3 可见, 刚性变换间

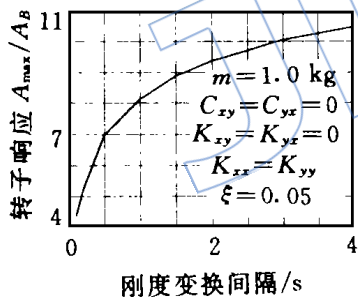


图 3 变刚度间隔时间对系统响应的影响

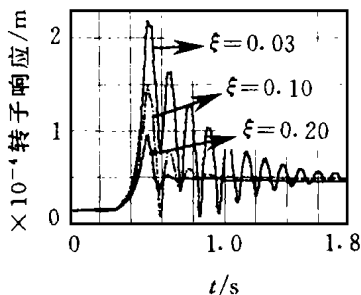


图 4 阻尼系数对系统响应的影响
(变换间隔 $\Delta t = 0.2 \text{ s}$)

隔越长, 系统振动就越大, 当变换间隔时间超过 4 秒后, 变刚度将失去实际意义, 其响应将和不实施

变刚度下转子通过临界转速时的振动相当。同时, 适当增加阻尼, 将有效地控制了变刚度过程中转子系统的响应(图 4)。

从计算结果可以看出, 成功实施主动变刚度理论的关键, 是要解决好以下几个技术问题: (1) 选择支承刚度时, 要保证 K_2 适当大于 K_1 , 以使 A_B 获得较小的幅值; (2) 支承刚度 K_1 和 K_2 之间的变换一定要快, 如图 3 所示, 变换间隔 Δt 越短, 系统的主动控制效果越好。 (3) 支承系统应有一定的阻尼, 以限制系统的最大振幅响应。

2 智能变刚度支承系统

2.1 形状记忆合金特性介绍

形状记忆合金具有形状记忆效应(SME), 在加热之后可以恢复到以前的形状, SME 是由金属内部的两相相互转变而引起的(马氏体—奥氏体)。马氏体相变有 4 个特征温度值: M_s (马氏体相变开始), M_f (马氏体相变结束), A_s (奥氏体相变开始), A_f (奥氏体相变结束)。图 5 是形状记忆合金 NiTi 在两种温度范围下表现出的不同的应力—应变关系。

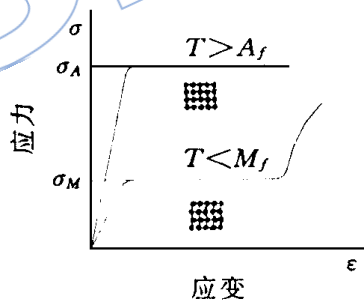


图 5 形状记忆合金不同温度下应力—应变曲线

形状记忆合金的记忆效应受到外界约束后, 加热恢复原形过程中受阻时, 便会产生回复力(图 6)^[3]。SMA 的此项特性可以使其作为驱动元件应用在结构控制中, 本文的智能主动变刚度支承系统即利用了 SMA 的此项特性。由于 SMA 丝具有较大的电阻率, 通常采用的加热加热方式为通电加热。研究结果还表明: 用交流电加热 SMA 丝, 效果比直流电要好。

2.2 智能主动变刚度系统结构及工作原理

利用形状记忆合金的上述特性, 设计的智能变刚度支承系统如图 7 所示。材料用 $\Phi 1 \text{ mm}$ 的 NiTi 合金丝, 相变温度 M_f 为 23°C , M_s 为 40°C , A_s 为 45°C 和 A_f 为 63°C 。支承刚度为 $K_1 = 1.217$

$\times 10^6 \text{ N/m}$ 和 $K_2 = 6.46 \times 10^6 \text{ N/m}$ 。偏压弹簧刚度为 $K_{s1} = 1.5 \times 10^4 \text{ N/m}$ 和 $K_{s2} = 5.0 \times 10^3 \text{ N/m}$ 。加热方式: 用 30 V 交流电, 通电时间为 3 秒, 支承刚度改变间隔为 0.1 秒。

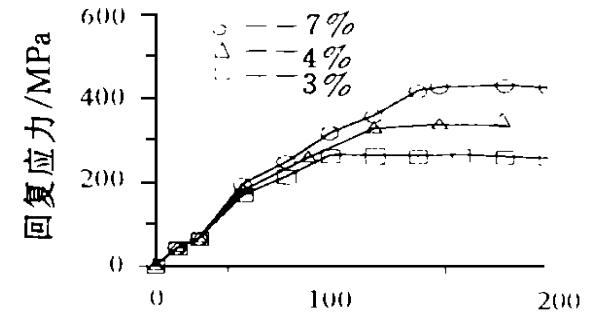


图 6 不同初始应变下 NiTi 丝回复力和温度关系

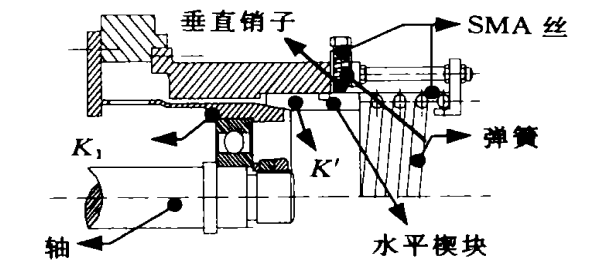


图 7 智能主动变刚度系统剖面图

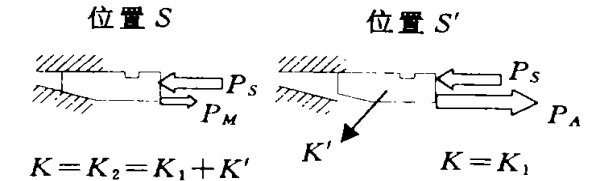
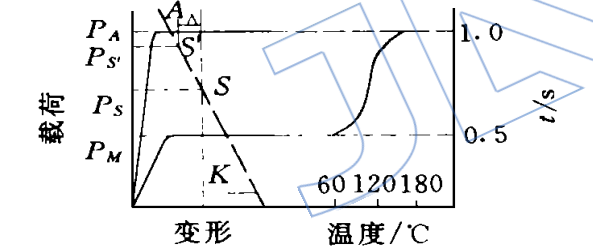


图 8 系统工作原理

整个系统通过水平方向和垂直方向作动部分的共同配合, 完成变刚度过程。水平作动部分包括 SMA 丝、偏压弹簧和楔块, 垂直部分由 SMA 丝、偏压弹簧、销子组成。系统工作原理叙述如下: 水平方向 SMA 丝和偏压弹簧的力-位移曲线如图 8(左)所示, 当系统中的水平楔块处于位置 S 时, 整个支承系统提供的支承刚度为 K_2 , 此时水平

SMA 丝提供的作动力 P_M 小于水平偏压弹簧的 P_S ; 当系统加速/减速通过图 2 中所示的 ω 时, 加热水平 SMA 丝, 由于回复力 P_A 大于 P_S , 将拖动水平楔块至 S' 位置, 此时, 纵方向的销子在弹簧的作用下, 进入楔槽; 在温度稍降后, 由于垂直方向销子的作用, 整个系统处于 S' 位置, 提供的支承刚度为 K_1 。同理, 系统支承刚度由 K_1 到 K_2 的转变则通过加热垂直方向的 SMA 丝来完成。

用 $\Delta P_K = P_S - P_M$ 表示水平方向偏压弹簧力和 SMA 丝(未加热)回复力之差, $\Delta P_C = P_A - P_S$ 表示水平方向 SMA 丝(加热后)回复力和偏压弹簧回复力之差, $\Delta P_C = P_S - P_M$, 表示楔块在 S 位置下弹簧回复力和 SMA 丝回复力(未加热)之差。从以上的分析中可以看出: (1) ΔP_K 的增加, 将会引起 K 的增大, 从而导致 K_2 值的增大 ($K_2 = K_1 + K$); (2) ΔP_C 或 ΔP_C 的增加, 将会使系统刚度变换的时间 Δt 缩短。因此, 应细致地分析和调整试验系统, 以保证其成功进行。本试验系统中刚度变换间隔 $\Delta t = 0.1$ 秒。

3 试验

在高速旋转试验台 B710 上, 对智能变刚度支承系统进行了试验, 试验系统如图 9 所示, 图中

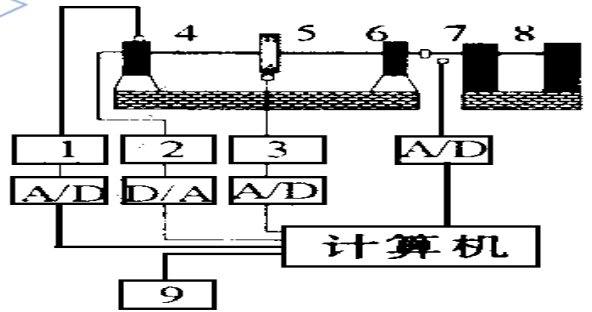


图 9 高速旋转试验台 B710 及智能变刚度支承试验系统

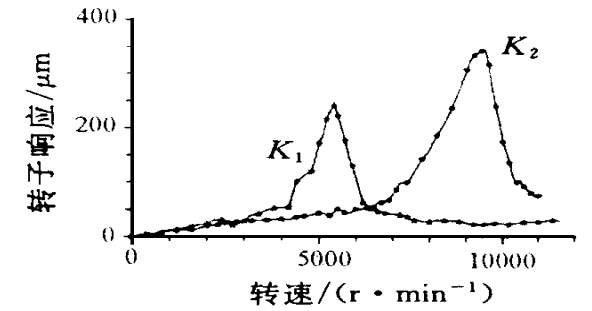


图 10 转子系统在不同支承刚度下的响应曲线

为智能支承, 5 为轮盘, 6 为刚性支承, 7 为增速器, 8 为电机, 9 为外设。

试验过程如下: 首先, 转子系统分别在支承刚度 K_1 和 K_2 下从零转速运转至工作转速, 试验结果如图 10 所示, 其目的是为了确定 ω_c (6350 r/min) 的值。在得到 ω_c 值之后, 按如下步骤进行试验: 加速过程中, 系统在支承刚度 K_2 下, 从零转速运转至转速 ω_c , 加热水平方向 SMA 丝, 系统支

承刚度变为 K_1 ; 减速过程, 系统在支承刚度 K_1 下, 从工作转速运转至 ω_c , 加热垂直方向 SMA 丝, 系统支承刚度变为 K_2 。试验结果(位移响应及相位角变化)如图 11 所示。可以看到, 智能支承变刚度系统抑制了高速转子系统的振动, 实现了主动变刚度理论。

4 结 论

由此可见, 利用 SMA 作为驱动元件, 设计的智能变刚度支承系统, 结构简单, 利于实现, 很好地实现了主动变刚度理论, 是一种有效的控制高速转子振动的方法。

参 考 文 献

- 1 Nagaya K and Takeda S. Active Control Method for Passing Through Critical Speeds of Rotating Shafts by Changing Stiffness of the Supports with Use of Memory Metals[J]. Journal of Sound and Vibration, 1987, 113(2): 307- 315
- 2 Sandler B. Adaptive Mechanisms (Automatic Vibration Control)[J]. Journal of Sound and Vibration, 1980, 73(2): 161- 175
- 3 孙长任. 智能材料结构与系统的振动主动控制特性研究: [博士学位论文][D]. 北京航空航天大学, 1995

(责任编辑 王震华)

图 11 变刚度支承系统下转子系统在加速过程中的位移响应及相位角变化

Intelligent Support System for Passing Through Critical Speed of High-Speed Rotor by Changing Stiffness

Yan Xiaojun, Nie Jingxu, Sun Changren

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The SMA (Shape Memory Alloys) are applied as actuators and a series of experiments have been done for investigating their mechanical behaviors. An intelligent support system has been designed for active control of high-speed rotor vibration and tested to verify its effectiveness. The tests indicate that the application has a magnificent effect on the active vibration control.

Key words: rotor dynamics; vibration isolation; shape memory alloys; supporting