

文章编号: 1000-8055(2002) 03-0357-06

# 带挤压油膜的裂纹转子非线性响应特性分析

秦卫阳<sup>1</sup>, 孟光<sup>1,2</sup>

(1. 西北工业大学 振动工程研究所, 陕西 西安 710072;

2. 上海交通大学 振动、冲击、噪声国家重点实验室, 上海 200030)

**摘要:** 本文研究了支承在挤压油膜阻尼器上的裂纹转子系统的非线性动态响应特性。研究结果表明: 油膜力可以有效地抑制非协调响应, 而且轴承参数的增大, 可以抑制混沌运动。在较小的轴承参数下, 转速比、裂纹深度等参数的变化会导致系统产生非协调响应, 而且随裂纹深度的增加, 响应会进入周期阵发性混沌。阻尼比的增大可以使运动锁相到周期解上。周期3解的出现, 往往意味着混沌运动。系统的响应主要是由阵发性和拟周期进入混沌的。

**关键词:** 挤压油膜阻尼器; 裂纹转子; 阵发性混沌;

中图分类号: TH133

文献标识码: A

## Nonlinear Response Characteristics of Cracked Rotor Supported on Squeeze Film Dampers

QIN Wei-yang<sup>1</sup>, MENG Guang<sup>1,2</sup>

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** In this paper, the nonlinear responses of cracked rotor system supported on squeeze film damper (SFD) are studied. The results show that the squeeze film force can depress non-synchronous response effectively and the increase of squeeze film bearing parameter can depress chaotic response. When bearing parameter is small, a certain range of rotating speed and crack depth can lead the system response to non-synchronous response and the system response will become chaotic with the increase of crack depth. The system response can be fixed to stable periodic movement by increasing the damping ratio. In general case, period-3 movement means that the response will be chaotic. The main route for system response going to chaos is the route of intermittence to chaos and another route is from quasi-periodic response to chaos.

**Key words:** squeeze film damper; cracked rotor; chaotic response; non-synchronous response

## 1 前言

挤压油膜阻尼器(SFD)对转子系统的响应影响一直是一个研究的热点<sup>[1~3]</sup>。近几年, 又出现了

新型的挤压油膜阻尼器, 如锥形挤压油膜阻尼器等, 希望将被动的减振作用转变为主动的控制效果<sup>[4]</sup>。

转子系统轴上产生横向裂纹后, 随着裂纹的

收稿日期: 2001- 05- 14; 修订日期: 2001- 11- 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19502010); 广东省高教基金资助课题

作者简介: 秦卫阳(1967- ), 男, 西北工业大学振动工程研究所讲师, 博士。

发展,转子的响应会表现出很强的非线性,会出现次谐波、高次谐波分量,混沌,甚至在非临界转速区振动会发散。对于这种情况,挤压油膜阻尼器是否仍然有抑制作用,就成为一个值得研究的问题。

本文研究两端带有挤压油膜阻尼器的裂纹转子的非线性动态响应,由结果可以看出, SFD 可以有效地抑制裂纹转子的非协调响应,在系统的各项参数中,轴承参数  $B$  对响应的影响最大,裂纹深度对响应也有影响。

## 2 转子模型与运动方程

### 2.1 运动方程推导

选取如下的两端带有挤压油膜阻尼器的单盘 Jeffcott 转子(图1)作为研究对象。

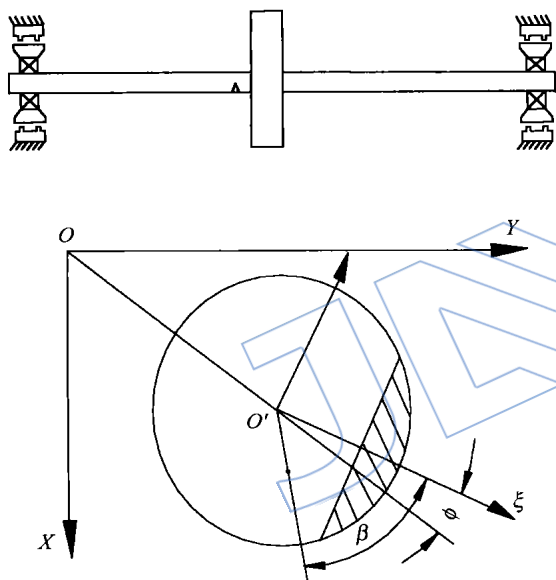


图1 带挤压油膜阻尼器的裂纹转子简图

假定:

- (1) 轴的质量等效均分于盘及支承处;
- (2) 旋转角速度为常数;
- (3) 短轴承理论、 $\pi$ 油膜(半油膜)假设等近似理论是适用的。

则系统的运动方程如下:

$$\begin{aligned} m_b \ddot{x}_b + c_d(\dot{x}_b - \dot{x}_d) + (k - f \Delta k \cos^2 \omega) \cdot \\ (x_b - x_d) + f \frac{\Delta k}{2} \cos \omega \sin \omega (y_b - y_d) = \\ m_b g + m_b \omega^2 \cos(\omega + \beta) \\ m_d \ddot{y}_d + c_d(\dot{y}_d - \dot{y}_b) + (k - f \Delta k \sin^2 \omega) \cdot \\ (y_d - y_b) + f \frac{\Delta k}{2} \cos \omega \sin \omega (x_d - x_b) = \\ m_d \omega^2 \sin(\omega + \beta) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} m_b \ddot{x}_b + \frac{c_d}{2}(\dot{x}_b - \dot{x}_d) + \frac{1}{2}(k - f \Delta k \cos^2 \omega) \cdot \\ (x_b - x_d) + f \frac{\Delta k}{2} \cos \omega \sin \omega (y_b - y_d) = \\ m_b g + f_x \\ m_d \ddot{y}_d + \frac{c_d}{2}(\dot{y}_d - \dot{y}_b) + \frac{1}{2}(k - f \Delta k \sin^2 \omega) \cdot \\ (y_d - y_b) + f \frac{\Delta k}{2} \cos \omega \sin \omega (x_b - x_d) = \\ f_y \end{aligned}$$

式中:  $\Delta k$  为裂纹引起的刚度变化,  $f$  为开关函数,  $f_x$  和  $f_y$  为油膜力。

$$f(\Phi) = \begin{cases} 1 & \Phi = 0 \sim \frac{\pi}{2}, \quad \frac{3\pi}{2} \sim 2\pi \\ 0 & \Phi = \frac{\pi}{2} \sim \frac{3\pi}{2} \end{cases}$$

对方程(1)无量纲化,得到:

$$\begin{aligned} X_d'' + \frac{2\zeta}{\Omega}(X_d' - X_b') + f \frac{1}{\Omega^2}(1 - \Delta K \cos^2 \tau) \cdot \\ (X_d - X_b) + f \frac{\Delta K}{\Omega^2} \cos \tau \sin \tau (Y_d - Y_b) = \\ \frac{Wg}{\Omega^2} + U \cos(\tau + \beta) \\ Y_d'' + \frac{2\zeta}{\Omega}(Y_d' - Y_b') + f \frac{1}{\Omega^2}(1 - \Delta K \sin^2 \tau) \cdot \\ (Y_d - Y_b) + f \frac{\Delta K}{\Omega^2} \cos \tau \sin \tau (Y_d - Y_b) = \\ U \sin(\tau + \beta) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} X_b'' + \frac{\zeta}{\alpha\Omega}(X_b' - X_d') + f \frac{1}{2\alpha\Omega^2} \cdot \\ (1 - \Delta K \cos^2 \tau)(X_b - X_d) + f \frac{\Delta K}{2\alpha\Omega^2} \cdot \\ \cos \tau \sin \tau (Y_b - Y_d) = \frac{Wg}{\Omega^2} + \frac{B}{\Omega} f_x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_b'' + \frac{\zeta}{\alpha\Omega}(Y_b' - Y_d') + f \frac{1}{2\alpha\Omega^2} \cdot \\ (1 - \Delta K \sin^2 \tau)(Y_b - Y_d) + f \frac{\Delta K}{2\alpha\Omega^2} \cdot \\ \cos \tau \sin \tau (X_b - X_d) = \frac{B}{\Omega} f_y \end{aligned}$$

式中:  $B$  为轴承参数,  $e$  为不平衡偏心距,  $R$  为轴承半径,  $\zeta$  为外阻尼比,  $c$  为阻尼器径向间隙,  $\omega$  为峰—峰临界转速,  $\tau$  为  $\omega$ ,  $\beta$  为裂纹法向与偏心方向的夹角,  $U$  为不平衡参数( $e/c$ ),  $Wg$  为重力参数( $g/c\omega^2$ ),  $\alpha$  为质量比( $m_b/m_d$ ),  $k$  为轴刚度,  $\Omega$  为转速比( $\omega/\omega_c$ ),  $T = 2\pi$  下标:  $B$ —挤压油膜阻尼器,  $D$ —转子盘,  $x, y, r$  和  $t$  为方向下标。

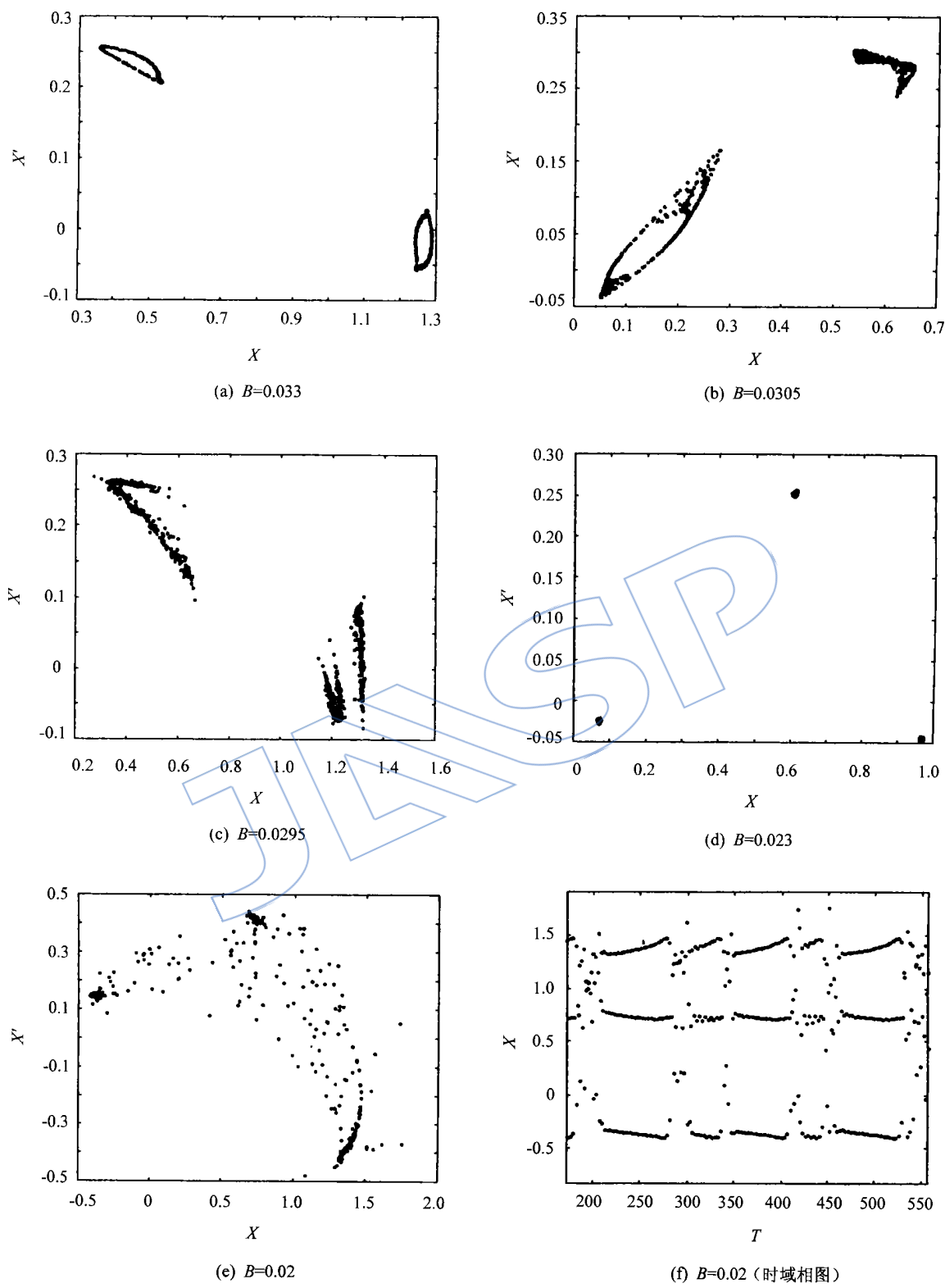


图2 轴承参数  $B$  对系统非线性响应的影响( $\Omega=0.95, \Delta K=0.5, D=0.01$ )

2.2 油膜力的表达式

油膜力采用短轴承模型,  $\pi$ 油膜假设。则有:

$$f_x = - \frac{1}{(X_b^2 + Y_b^2)^{1/2}}(X_b f_r - Y_b f_t)$$

$$f_y = - \frac{1}{(X_b^2 + Y_b^2)^{1/2}}(Y_b f_r + X_b f_t)$$

其中:

$$f_r = \Theta \Psi_b' I_1 + \Theta' I_2$$

$$f_t = \Theta \Psi_b' I_3 + \Theta' I_1$$

而

$$I_1 = \int_1^{+\pi} \frac{\cos \theta \sin \theta}{(1 + \epsilon_b \cos \theta)^3} d \theta$$

$$I_2 = \int_1^{+\pi} \frac{\cos^2 \theta \sin \theta}{(1 + \epsilon_b \cos \theta)^3} d \theta$$

$$I_3 = \int_1^{+\pi} \frac{\sin^2 \theta \sin \theta}{(1 + \epsilon_b \cos \theta)^3} d \theta$$

$$\theta_l = \arctan \left[ -\frac{\epsilon_b'}{\epsilon_b \Psi_b} \right]$$
$$\Psi_b = \arctan \left[ \frac{Y_b}{X_b} \right]$$

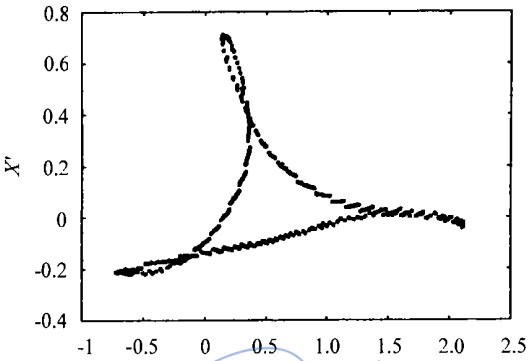
$$\epsilon_b = (X_b^2 + Y_b^2)^{1/2}$$

以往的许多文献中,都将油膜力等效为线性的刚度与阻尼系数,这样的处理可以简化方程,但只是实际油膜力的一种近似。本文采用 Matlab 语言直接求解非线性微分方程,因此将油膜力的表达式带入运动方程,求解微分方程,就可以得到转子盘处及轴颈处的响应。

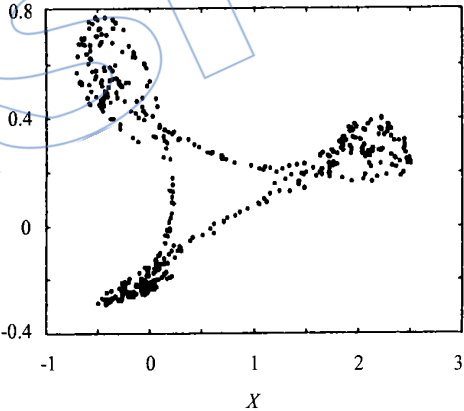
3 计算结果及分析

为突出重要参数的影响,本文主要研究了轴

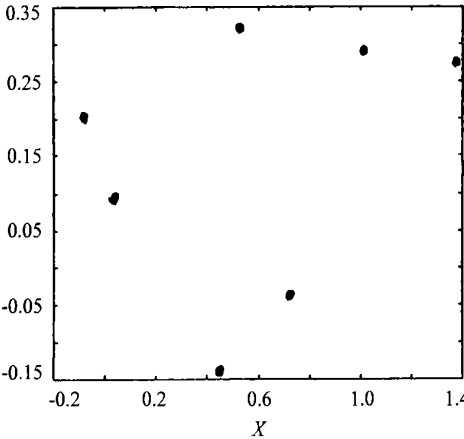
承参数  $B$ 、转速比  $\Omega$  阻尼比  $D$ 、裂纹深度引起的刚度变化  $\Delta K$  等对转子系统的响应的影响。其他的参数,取固定值为:  $\beta = \pi, \alpha = 0.2, U = 0.35, Wg = 0.05$ 。系统的响应取盘在  $X$  方向的位移。为能更好地观察阵发性混沌,此处选择了一种可以称为时域相图的表示方法,即将响应信号间隔  $2\pi$  采一个点,由这些点构成图。



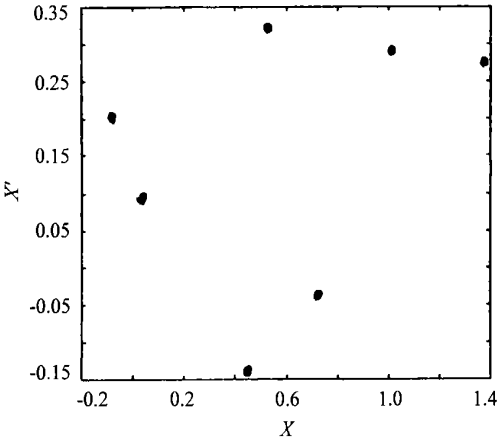
(a)  $\Omega=1.8$



(c)  $\Omega=1.9$



(d)  $\Omega=2.17$

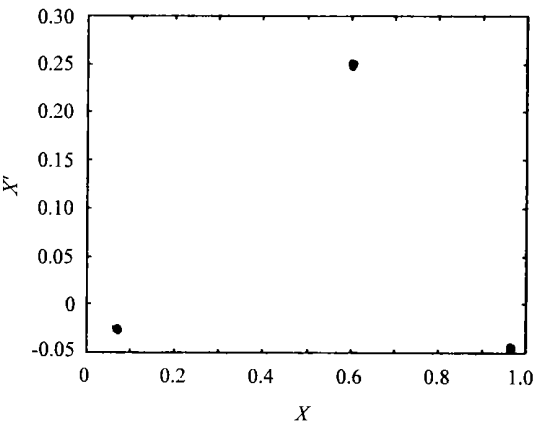


(e)  $\Omega=2.2$

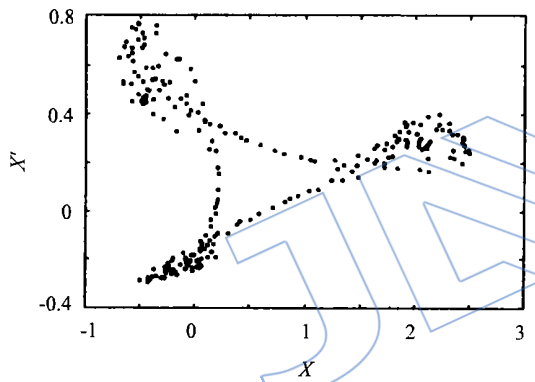
图3 转速比  $\Omega$ 对转子系统响应的影响( $B = 0.025, D = 0.01, \Delta K = 0.25$ )

3.1 轴承参数  $B$  的影响

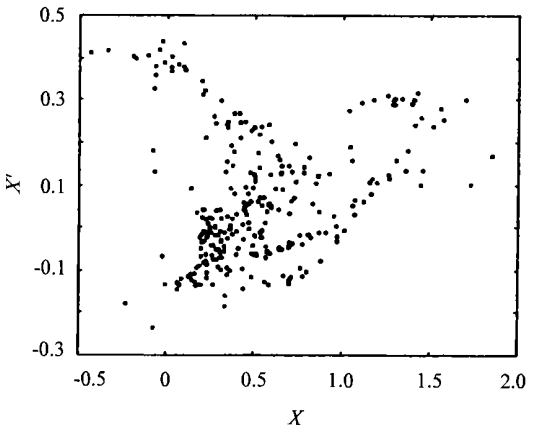
轴承参数  $B$  的大小, 对裂纹转子系统的响应影响很大。较大的  $B$ , 对系统的非协调响应有很好的抑制作用, 尤其是对各种超谐波响应。在裂纹转子



(a)  $\Delta K=0.2$



(b)  $\Delta K=0.23$



(c)  $\Delta K=0.3$

图4 裂纹深度( $\Delta K$ ) 的变化对系统响应的影响

( $\Omega=1.9, B=0.025, D=0.01$ )

中常常出现的超谐波响应, 在带有挤压油膜阻尼器

的裂纹转子中则很少出现。而且即使裂纹的深度很大( $\Delta K > 0.8$ ), 也不会产生混沌运动。但此时响应的振动幅值也比较大。当  $B$  较小时, 随着  $B$  的减小, 会出现拟周期运动、混沌运动, 以及周期2、周期3、周期7等谐波响应。系统进入混沌时有明显的阵发性特征。如图2显示, 当  $B$  较大时, 响应为拟周期运动; 随着  $B$  的进一步减小, 响应进入混沌运动。当  $B = 0.023$  时, 出现了周期3窗口, 响应变为周期3运动; 此后随着  $B$  的变化, 系统由周期3运动经阵发性混沌再次进入了混沌运动。由图2 (f) 的时域相图, 可以明显地看到周期3的阵发性现象。

3.2 转子转速比  $\Omega$  的影响

转子系统中, 转速是一个很重要的参数。当  $B$  较大时, 随着转速的变化, 转子的响应一般为主谐波响应, 在有些转速下也有周期2的运动。当  $B$  较小时, 随着转速的变化, 会出现很丰富的非线性响应, 如拟周期运动、混沌运动等。而且在混沌的发展过程中, 主要是通过周期性阵发运动进入混沌。同时, 在拟周期运动中, 随转速变化, 响应会锁相到周期解上。由图3可以看出, 随着  $\Omega$  的变化, 响应由拟周期锁相到周期3解, 随后直接进入混沌。随着  $\Omega$  进一步升高, 响应退出混沌, 变为拟周期, 再经锁相到周期7解。

3.3 裂纹深度的影响

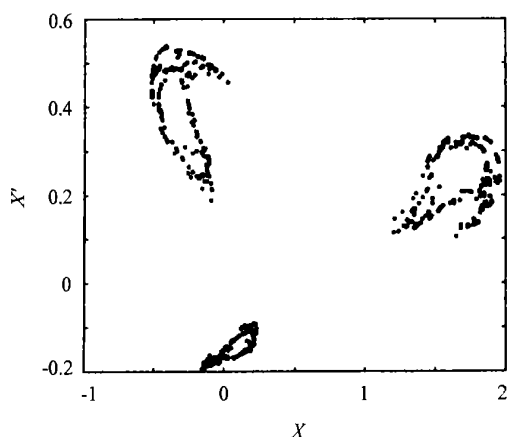
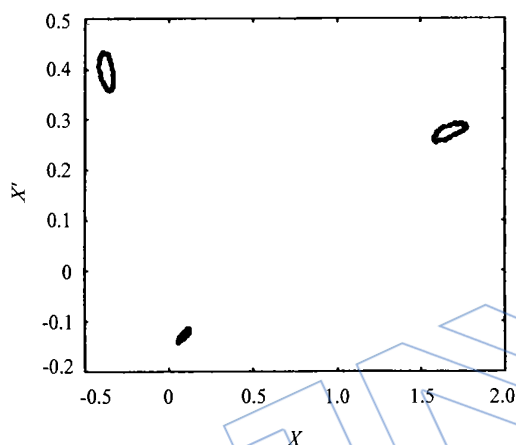
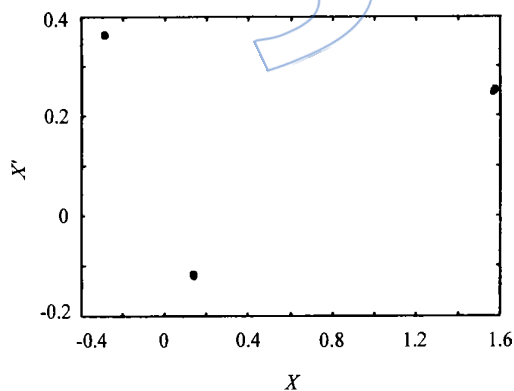
裂纹深度是通过刚度变化比  $\Delta K$  来表示的,  $\Delta K$  越大, 则表示裂纹的深度越深。在带挤压油膜阻尼器(SFD)的裂纹转子系统中, 可以明显地看到油膜力对非线性响应的抑制作用。随着裂纹深度的发展, 系统会出现混沌运动, 但是这是与  $B$  和  $\Omega$  有密切关系的。由图4中可以看到, 随着  $\Delta k$  的增大, 响应由周期3直接进入混沌, 随着  $\Delta k$  的进一步增大, 混沌的程度加强。

3.4 外阻尼比的影响

外阻尼比对非协调响应有着明显的抑制作用。但外阻尼比很大时, 系统一般保持周期运动。当外阻尼比逐渐变小时, 会出现拟周期运动, 最后到达混沌运动。如图5所示, 随着阻尼比的增大, 响应由混沌变为拟周期, 再由拟周期锁相到周期3解。

3.5 通向混沌的道路

带 SFD 的裂纹转子, 其响应进入混沌的方式, 主要为周期性的阵发混沌, 也存在由拟周期进入混沌的方式。值得注意的是, 大部分混沌的产生

(a)  $D=0.01$ (b)  $D=0.02$ (c)  $D=0.03$ 图5 外阻尼比  $D$  对系统响应的影响( $\Omega = 1.8, B = 0.05, \Delta K = 0.6$ )

都与周期3运动有着密切的联系。可以看到,周期3进入混沌,有三种不同的方式。一种是在周期3运动中产生阵发性的混沌(图2(e)与图2(f));另外一种是在运动开始时是周期3的,然后随着参数变化,有进入到拟周期运动的趋势,但最终变为混沌运动。再有一种情况,运动开始时是拟周期,随参数变化,锁相到周期3运动,然后随着参数的进一步变化,运动又有回到拟周期的趋势,但是由于运动的不稳定性,运动最终转变为混沌运动。后两种情况由其 Poincaré 图可以明显看到拟周期进入混沌的特征(图3(c)与图4(b))。

## 4 结 论

由以上的计算结果以及分析,可以得到以下结论:

(1) 对带 SFD 的裂纹转子系统,油膜力可以有效地抑制非协调响应。当轴承参数  $B$  足够大时,可以明显地抑制混沌运动。

(2) 转速比、裂纹深度、阻尼比对转子系统的运动有很重要的影响。随着裂纹深度的增加,响应会进入混沌;而随着阻尼比的增大,响应会稳定到周期解上。

(3) 带 SFD 的裂纹转子系统,在进入混沌时,大部分为由阵发性进入;也有由拟周期进入混沌的。在进入混沌时或是在混沌状态中,会存在周期3解。

## 参考文献:

- [1] Bonneau Olove. Non-Linear Behavior of a Flexible Shaft Partially Supported by SFD[J]. Wear, May, 1997, 206: 255- 260.
- [2] Meng Guang. Nolinear Mechanism of Bi-Stable Response of a Flexible Rotor Supported on Squeeze Film Dampers [A]. Third Int. Symp. On Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery[C]. 1990: 1- 5.
- [3] 黄文虎等. 设备故障诊断原理、技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [4] 任兴民. 航空发动机整机动力特性分析[D]. 西安: 西北工业大学.

(责任编辑 王震华)