

碰摩转子系统中的阵发性及混沌现象

清华大学 褚福磊* 冯冠平 张正松

【摘要】 分析了一个由油膜轴承支承的转子在碰摩时的振动特性。转子转速与系统的阻尼被用来作为控制参数以研究进入和离开混沌区域的路径和系统的各种形式的周期、概周期与混沌振动。结果证明碰摩转子系统所展示的混沌振动、阵发性现象以及周期振动的广谱特性,可以被用于诊断转子系统的碰摩故障。

关键词: 转子 混沌 振动 阻尼

分类号: O 323

1 引言

建立一个完备的带有各种故障转子系统的振动特征知识库是对旋转机械进行准确诊断的主要依据。而带故障的转子系统常常为复杂的非线性振动系统,它的振动不仅包含同频及亚谐和超谐振动,有些还产生非常丰富的概周期与混沌振动。深入研究带有各种故障的转子系统的各种形式的振动,对于建立可靠的诊断专家系统具有重要的意义。转子与定子的碰摩是一类常见的旋转机械故障,通常表现为其它故障的间接结果。碰摩发生时,一般都是先有局部摩擦。这时在一个周期内,转子与定子发生一次或数次碰撞,转轴内产生不断变化的应力,同时伴有非常复杂的振动现象,在某些条件下还产生混沌振动。局部摩擦的不断加剧最后导致整周摩擦,剧烈的振动使得机器无法正常运转。由于一些故障的复杂性,仅考虑系统的同频振动与分频振动还不足以进行准确的诊断,还必须考虑更复杂的振动特性。近两年来,已经提出了应用混沌振动作为描述故障特征的工具^[1]以用于故障诊断。本文讨论了一个工程实际中更为典型的碰摩模型,即由油膜轴承支承的转子系统,利用转子转速与系统的阻尼作为控制参数研究了进入和离开混沌区域的路径,分析了系统的混沌振动以及与此有关的一些现象。

2 数学模型

所分析的模型为一 Jeffcott 转子,在转盘处的等效集中质量为 $2m$,两端由相同的油膜轴承支承,转子与支承之间为无质量弹性轴段。

对于短轴承近似的油膜轴承,油膜压力 p 所满足的雷诺方程为^[2]

$$(\partial/\partial t)[(h^3/\mu)(\partial p/\partial t)] = 6\omega(\partial h/\partial \theta) + 12(\partial h/\partial t)$$

将油膜压力 p 沿整个轴承表面积分,可以得到油膜力沿 x 和 y 两个方向的分量为

$$P_x = - \mu TRL^3 \left[\frac{\omega y + 2\dot{x}}{2(c^2 - x^2 - y^2)^{3/2}} + \frac{3x(\dot{x}x + \dot{y}y)}{(c^2 - x^2 - y^2)^{5/2}} \right]$$

$$P_y = -\mu TRL \left[\frac{2y - \alpha x}{2(c^2 - x^2 - y^2)^{3/2}} + \frac{3y(x\dot{x} + y\dot{y})}{(c^2 - x^2 - y^2)^{5/2}} \right]$$

参考图 1, 设在静止时转子与定子之间的间隙为 δ , 则碰摩时的正向碰撞力 F_N 与切向摩擦力 F_T 可以表示为

$$F_N = \begin{cases} 0 & (e < \delta \text{ 时}) \\ (e - \delta)K_c & (e \geq \delta \text{ 时}) \end{cases}$$

$$F_T = f F_N$$

式中 f 为转子与定子间的摩擦系数, K_c 为定子的径向刚度,

$e = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。在 x - y 坐标系上, 碰摩力可表示为

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} = -\frac{(e - \delta)K_c}{e} \begin{bmatrix} 1 & -f \\ f & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} \quad (e \geq \delta \text{ 时})$$

$$F_x = F_y = 0 \quad (e < \delta \text{ 时})$$

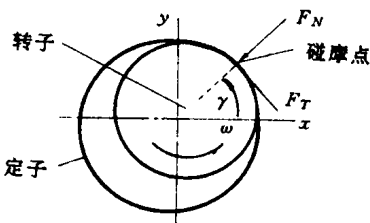


图 1 碰摩力示意图

设转盘处的径向位移坐标为 x_1, y_1 支承处的位移坐标为 x_2, y_2 则系统的运动微分方程为

$$m\ddot{x}_1 + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k(x_1 - x_2) = F_x(x_1, y_1) + m u \omega^2 \cos(\omega t)$$

$$m\ddot{y}_1 + c(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + k(y_1 - y_2) = F_y(x_1, y_1) + m u \omega^2 \sin(\omega t) - m g$$

$$c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k(x_2 - x_1) = P_x(x_2, y_2, \dot{x}_2, \dot{y}_2)$$

$$c(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k(y_2 - y_1) = P_y(x_2, y_2, \dot{x}_2, \dot{y}_2)$$

式中 c 为旋转轴本身的阻尼系数, k 为刚度系数, u 为不平衡量。

对于上面建立的运动微分方程, 首先转化为 $\dot{x} = f(x)$ 形式的一阶微分方程组, 然后应用了四阶龙格—库塔方法进行了数值积分。为了保证得到一个稳定的解及避免在积分至刚度分段线性连接处发生数值不收敛, 必须选用较小的积分步长。为了得到一个稳定解一般需要长时间的计算。对于阻尼较大呈现强稳定特性的运动, 有时几百个周期以后即可得到稳定解; 而对一些稳定较慢的运动, 常常需要几千个周期。

需要说明的是, 在本文所给出的图形中, 所有的轨道图都是同样的刻度, 而且轨道都是用的 50 个周期的数据。所有的 Poincare 图并没有使用同样的刻度, 目的是为了放大吸引子以充分反映吸引子的形状。

3 转子转速的影响

有大量的参数可以用来控制转子系统的振动, 如转子转速、不平衡量、转子本身的阻尼、刚度、轴承参数等, 其中转子转速是最常用的参数。变化转子转速可以观察到转子系统在整个升速过程中的运动情况。

在转速较低的情况下, 转子的运动一般是周期 1 的同频振动, 在 Poincare 图上表现为一个单个的点。对于本文讨论的转子系统, 随着转速的不断增加, 到大约 4200 r/min 时, 同频振动分裂为周期 2 的分频振动, 在 Poincare 图上表现为两个孤立的点。随后又继续分解为周期 4、周期 8、周期 16、… 的分频振动。其中每次分裂

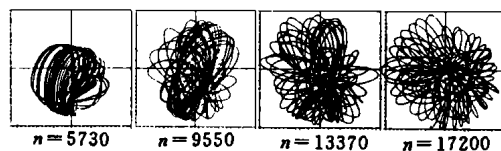


图 2 在不同转速 $n/(r/min)$ 下的混沌运动

都是一个点一分为二,新分离出的两个点的距离逐渐拉开,然后又进行新的分解。这是典型的倍周期分叉,所有这些发生在非常窄的速度范围内。随着转速的进一步增加,倍周期分叉导致了混沌发生。在大约到 4325 r/m in 时,已经显示了混沌的出现。进入混沌区域以后,运动具有非常丰富的形式。图 2 给出了几种典型的轨道。对于离开混沌区域的情况,可观察当转速为

22535.4 r/m in 时转子的运动。若保持转速不变,随着时间的增加,运动一会儿呈现规则的周期 6 分频振动,在经过一段时间之后又呈现不规则的混沌振动。在大约第 2950 转时运动又变为规则的分频振动,然后又变为不规则的混沌振动。如图 3 所示。这种现象是典型的阵发性现象,根据文献[3],它是混沌振动向周期振动或周期振动向混沌振动过渡的一个路径。随着转

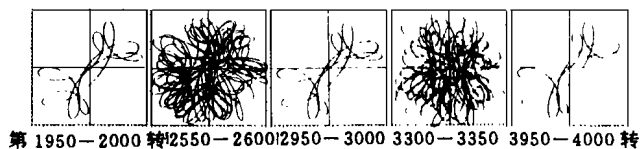


图 3 转子在 $n = 22535.4 \text{ r/m in}$ 时在不同时间内的轨道

速的进一步增加,混沌振动在经过这一路径之后变为稳定的周期 6 分频振动。在从 22540 r/m in 到 24800 r/m in 的转速范围内,运动保持为周期 6 的分频振动,随后周期 6 变为周期 3,然后又突然变为概周期运动,它的吸引子为周期 2 的封闭曲线,如图 4 所示。必须说明的是,

在转速为 $n = 26800 \text{ r/m in}$ 的情况下,由于数据量太大,图中仅画出了轨道的一部分。这种概周期运动表现为非常规则的轨道,而且轨道随着转速的增加不断变稀,最后当转速到达 30500 r/m in 时,运动又变为周期 1 的同频振动。

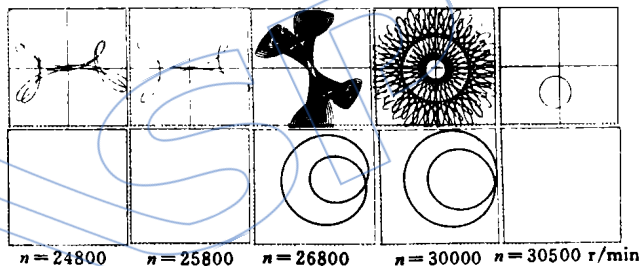


图 4 转子系统的概周期与周期运动

可以看出,当把转子转速作为控制参数时,运动是以倍周期分叉进入混沌区域,以阵发性现象离开混沌区域。在整个转速变化范围内,运动展示了振动的各种形式,即周期振动、概周期振动与混沌振动。对于混沌振动,运动也呈现了不同的形式。

4 阻尼的影响

阻尼的存在对转子系统的振动有较大的影响。一般认为,增大阻尼能够有效地抑制振动。对于混沌振动,可以看到随着阻尼的增大,振动幅值不断地变小,然而阻尼的增大并不意味着能够消除混沌振动。

观察图 5(a) 所示的转子系统的振动。当阻尼系数较小时,如 $c = 230 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 时,系统的运动表现为周期 1 的同频振动,吸引子为一个孤立点。随着阻尼的增大,吸引子的点数逐渐增多,到 $c = 250 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 时,吸引子变成为一个封闭的环,运动为概周期的。然后环吸引子被破坏,点数逐渐减少,到 $270 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 时,运动变为周期 3 的分频振动。此后吸引子的点数又开始增多,增加为一个封闭的环,到 $c = 300 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 时,又衍变为周期 2 的分频振动。观察阻尼系数从 $230 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 增加到 $300 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 的过程,可以看出这是另一种形式的阵发性现象,经历了

两次概周期运动从形成到消失的过程。在经历了这一阵发性现象之后,立即可以观察到另一

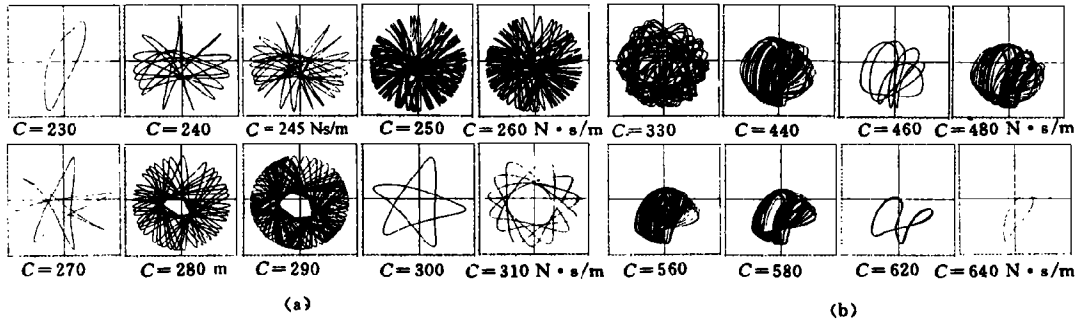


图 5 转子系统在不同阻尼系数 $c/(N \cdot s/m)$ 下的运动轨道

形式的阵发性现象。这一新的阵发性现象与图 3 所示的阵发性现象是一样的,即运动随时间的变化一会儿呈现规则的周期振动,一会儿呈现不规则的混沌振动,图 6 给出了这两种运动的轨道。随着阻尼的增大,运动从阵发性路径进入混沌状态,如图 5(b)所示。从前两个图可以看到混沌振动的不同形式。在 $c = 460 N \cdot s/m$ 附近的一个非常窄的阻尼范围内,存在着混沌运动的中断,运动为非常规则的周期 5 的分频振动,随后又恢复了混沌振动。当阻尼系数增大到 $580 N \cdot s/m$ 时,吸引子在中断发生断裂,其后两部分都逐渐萎缩。最后阻尼的进一步增加使混沌运动突然变为周期 1 的同频振动。

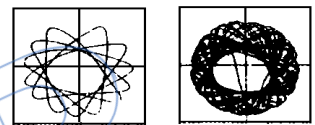


图 6 在 $c = 310.9 N \cdot s/m$ 时阵发性现象的两种轨道

可以看出,当把阻尼系数作为控制参数时,运动是以阵发性路径进入混沌区域,以周期路径离开混沌区域。在整个参数变化范围内,运动经历了两种形式的阵发性现象。第一种是周期振动与概周期振动交替的阵发性,第二种是周期振动与混沌振动交替的阵发性。

5 结 论

转子与定子的碰摩产生非常丰富的周期、概周期与混沌振动。对于周期振动,周期的范围非常广。对于所讨论的模型,运动呈现出了两种形式的阵发性现象,其一是周期振动与概周期振动交替的阵发性,其二是周期振动与混沌振动交替的阵发性。碰摩转子系统具有混沌振动与阵发性现象的特征,对于准确地诊断这一故障具有重要的意义。阻尼能够有效地抑制混沌振动,减弱振动的幅值,但不能消除混沌振动。另外碰摩转子系统中还存在倍周期分叉现象。

参 考 文 献

- 1 Adams M L, Abu-Mahfouz I A. Exploratory Research on Chaos Concepts as Diagnostic Tools for Assessing Rotating Machinery Vibration Signatures. Proceedings of IFTOMM Fourth International Conference on Rotor Dynamics, Chicago, USA, 1994: 29
- 2 Gunter E J, Barrett L E, Allaire P E. Design of Nonlinear Squeeze-Film Damper for Aircraft Engines. Trans ASME, Journal of Lubrication Technology, 1977, 99(1): 57
- 3 Moon F C. Chaotic Vibrations. New York: John Wiley & Sons, 1988

(责任编辑 王震华)

rotary speeds of the cage and the balls decrease and their skiddings become serious as the thrust goes down, especially to a small value. So the minimum thrust preload for prevention of skidding of the balls on the inner race can be estimated.

Key Words rolling bearings Mechanical drives Kinetic analysis

INTERMITTENT AND CHAOTIC PHENOMENA IN A RUB IMPACT ROTOR SYSTEM

Chu Fulei, Feng Guanping, Zhang Zhengsong

(Dept. of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084)

ABSTRACT Vibration characteristics of a rub impact rotor system supported on oil film bearings were investigated. Elastic impact and the Coulomb type of frictional relationship was assumed. Rotating speed and the system damping were used as control parameters to discover routes to and out of chaos and to study various forms of periodic, quasi-periodic and chaotic vibrations. Very rich types of chaotic vibrations were found for the model discussed. Also the system motion shows two different forms of intermittent phenomena. One is the interchange between periodic and quasi-periodic vibrations. Another is between periodic and chaotic vibrations. Vibration features such as chaotic vibration, intermittent phenomena and broad-band of periodic vibration can be effectively used to diagnose the rub impact fault which often happens in a rotor system.

Key Words Rotors Chaos Vibration Damping

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON ROTOR VIBRATION CONTROL BY ELECTORHEOLOGICAL DAMPER

Meng Guang, Ying Dazhang, Yao Guozhi

(Institute of Vibration Engineering, Northwestern polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT In this paper the Electrorheological (ER) fluid and its characteristics are introduced briefly and the application of an ER damper in rotor vibration control is studied experimentally. It is found that by increasing the applied electrical field strength, the damping and stiffness of ER damper are increased, the vibration amplitude of the rotor system supported on ER damper is decreased in the sub-critical speed range and at the critical speed, and is increased in the super-critical speed range. The critical speed of the rotor system can be changed by means of the applied electrical field strength. The damping provided by the ER damper has the properties of both the Coulomb damping and the viscous damping. Experimental results show that the ER damper has obvious effect on vibration control, and features instantaneous control, little energy consumption and broad frequency range. Besides, its structure is simple.

Key Words Rotors Electric current Rheostats Vibration Control action

AN EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER BY JET IMPINGEMENT ON ROUGHENED SURFACE WITH INITIAL CROSSFLOW

Zhang Dalin, Chang Haiping, Han Dong

(2nd Dept. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Sheng Rongchang

(Zhuzhou Power Plant Research Institute, Zhuzhou 412002)

ABSTRACT Impingement heat transfer from the rib roughened surface with