

质量偏心旋转机械碰摩故障特征 及全息谱分析

北京航空航天大学 刘献栋* 李其汉

【摘要】 本文针对仅考虑质量偏心的 Jeffcott 转子碰摩的动力学方程, 用二维全息谱理论研究了各阶谐波特性, 得出碰摩的重要特征; 分析了摩擦系数、转速对进动规律的影响, 发现在摩擦系数较小时不平衡力引起的规则正进动起决定作用, 较大时一定转速下将出现拟周期运动及失稳。

主题词: 旋转 机械 质量偏心 摩擦 全息诊断

分类号: 231.96

1 模型建立

以 Jeffcott 转子为模型进行研究。假定: 转轴无质量, 刚性系数为 k ; 转盘质量为 m , 偏心距为 e , 转速为 Ω 。转子无偏移, 转、静子同心, 间隙为 r_0 ; 转盘振幅为 r ; 转子受到外部阻尼的阻尼系数为 c ; μ 为转、静件间的摩擦系数; k_c 是静子刚性系数; 结构各向同性。碰摩模型如图 1 所示。当 $r \leq r_0$ 时, 不发生碰摩; $r > r_0$ 时, 碰摩发生。转子的运动微分方程如文献[1]所示。对微分方程实施无量纲化, 取:

$$X = x/e, \quad Y = y/e, \quad R_0 = r_0/e$$

$$R = r/e = \sqrt{x^2 + y^2}/e = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

取新的时间刻度:

$$\tau = \omega_\Omega t, \quad \omega_\Omega^2 = (k + k_c)/m$$

另取:

$$c/m = 2\zeta\omega_\Omega, \quad \tilde{\omega} = \Omega/\omega_\Omega, \quad \beta = k/(k + k_c)$$

考虑到:

$$\ddot{x} = \ddot{X}e = X''\omega_\Omega^2 e, \quad \dot{x} = X'\omega_\Omega e$$

则不发生碰摩与发生碰摩时的运动微分方程分别变为(1)式和(2)式:

$$X'' + 2\zeta X' + \beta X = \tilde{\omega} \cos(\tilde{\omega}\tau), \quad Y'' + 2\zeta Y' + \beta Y = \tilde{\omega} \sin(\tilde{\omega}\tau) \quad (1)$$

$$\begin{cases} X'' + 2\zeta X' + \beta X + (1 - \beta)(1 - R_0/R)(X - \mu Y) = \tilde{\omega} \cos(\tilde{\omega}\tau) \\ Y'' + 2\zeta Y' + \beta Y + (1 - \beta)(1 - R_0/R)(\mu X + Y) = \tilde{\omega} \sin(\tilde{\omega}\tau) \end{cases} \quad (2)$$

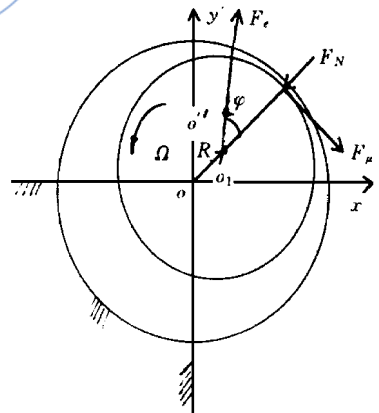


图 1 Jeffcott 转子碰摩模型($o_1 o = e$)

2 数值结果与分析

在计算中, 取 $\beta = 0.1$, $\zeta = 0.05$, 其它参数在不同分析内容中取不同数值。

一般认为由于结构及运动方程的对称性, 一旦发生碰摩应是转子轴心轨迹为圆的整圈碰摩, 但实际情况要复杂些, 轴心轨迹可能是圆形, 也可能是花瓣形状, 碰摩方式可能是整圈碰摩, 也可能是局部碰摩, 这些主要取决于转速、摩擦系数及间隙的大小。

2.1 全息谱分析^[2]

传统的频谱分析方法使振动信号的幅值与相位分离, 且不能给出一截面内转子在垂直、水平方向振动之间的关系, 全息谱分析能够解决这些问题, 以便充分了解振动全部情况及各谐波成分产生原因, 因此有助于诊断碰摩故障。本文用二维全息谱理论对碰摩故障特征进行分析。

用 FFT 变换得到的幅值谱为: $X(f_k) = \sum_{i=0}^{N-1} x(i) e^{-j i k (2\pi/N)}$ ($k = 0, 1, 2, \dots, N-1$), 其中, $f_k = k/N \triangle t$, $X(f_k)$ 是复数, 可写成: $X(f_k) = |X(f_k)| e^{j\varphi_k}$ 。由离散 FFT 变换得:

$$X(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(f_k)| e^{j(\omega_k i \Delta t + \varphi_k)} \quad (3)$$

频率成分为 f_k 的谐振方程为 $(1/N) |X(f_k)| \cos(\omega_k t + \varphi_k)$, 可见幅值谱的幅值并非真正的振幅, 而是振幅的 N 倍。经过对 x, y 方向上振动的 FFT 变换能得到 x, y 方向各频率成分及相位角, 于是可得各频率成分对应的轴心轨迹及旋转方向, 该轨迹可能是圆、椭圆或直线。

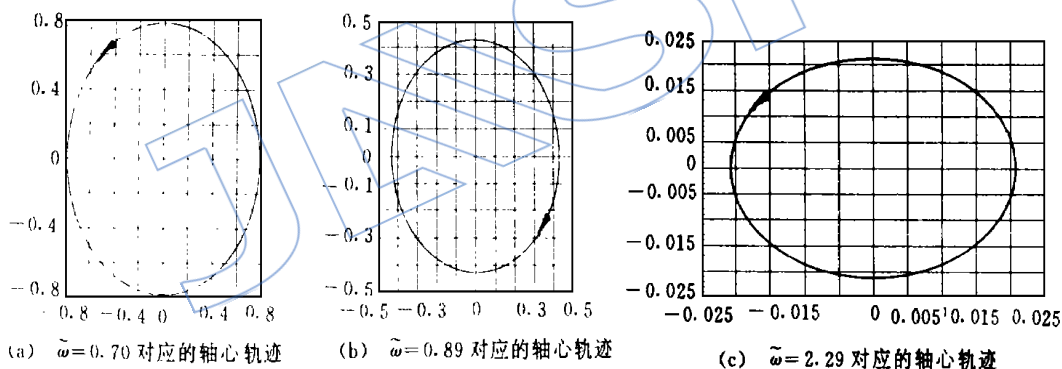


图2 二维全息谱分析图($R_0 = 1.0, \mu = 0.13$)

由图2可见, 一阶频率成分 $\tilde{\omega} = 0.7$ 等于不平衡力的频率, 旋转方向是逆时针, 显然该谐波是由不平衡力引起的; 二阶频率 $\tilde{\omega} = 0.89$, 旋转方向是顺时针, 发生碰摩时转子受到法向力 F_N 及切向力 F_μ (摩擦力) 的作用, F_μ 与正进动方向相反, 即顺时针, F_μ 的作用使得出现顺时针旋转方向的频率成分, 故 $\tilde{\omega}$ 是由摩擦力引起, 可见若有反进动频率成分存在, 就可考虑是否有碰摩发生, 所以反进动成分的存在可作为碰摩故障诊断的依据之一; 三阶频率成分 $\tilde{\omega} = 2.292$ 对转子进动贡献很小, 其旋转方向逆时针, 由于碰摩, 系统的刚度增加, 固有频率增加, 所以 $\tilde{\omega}$ 可能与碰撞力有关。对其他参数的情况进行分析, 可得到近似的结论。

2.2 μ 的大小对进动频率的影响

经数值计算得出, $\mu < 0.12$ 时, 进动所含频率成分单一, 由不平衡力引起的振动频率起决定作用, 其它频率成分的贡献极小, 在此情况下, $\tilde{\omega}$ 的增加仅引起进动与不平衡力之间的相位差 φ (见图1) 的改变, φ 随 $\tilde{\omega}$ 的增加而增大。

当 $\mu > 0.12$ 时, 随 $\tilde{\omega}$ 的增加, 进动一般经过: 周期运动 $\rightarrow$ 拟周期运动 $\rightarrow$ 周期运动 (μ 较大

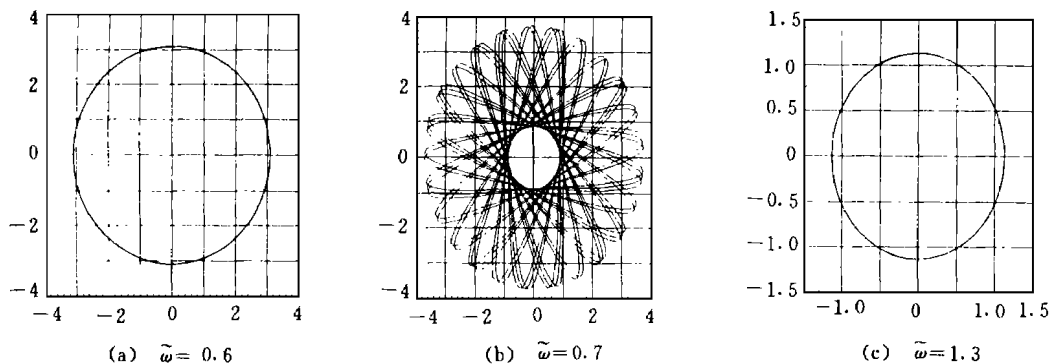


图 3 转子轴心轨迹 ($R_0 = 1.0, \mu = 0.13$)

时, 一定条件下还可发生失稳), 图 3 显示了该过程。图 3(a) 表示系统处于周期运动中, 不平衡力引起的进动起决定作用; 图 3(b) 显示此时系统处于拟周期运动中, 其 Poincaré 映射图是闭曲线; 图 3(c) 表示 $\tilde{\omega} = 1.3$ 时转子进动轨迹是圆, 频谱显示此时不平衡力引起的进动起决定作用, 这是由于高速运转时转子具有自动定心作用, 转、静子之间碰摩力减小, 从而又恢复规则正进动状态的原因。在数值分析中未发现混沌运动存在。

2.3 失稳分析

系统在一定的参数条件下会发生失稳, 失稳表现为进动的幅值越来越大。数值计算表明, 在 $\mu \geq 0.15$ 时, 转速比 $\tilde{\omega}$ 超过一定数值, 转子会失稳, 且失稳后转子发生反进动, 图 4 显示了失稳现象。大量计算还表明, 随着 μ 的增加, 保证转子稳定进动的 $\tilde{\omega}$ 的范围减小。

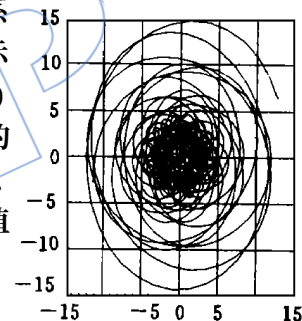


图 4 转子轴心轨迹
($R_0 = 1.0, \mu = 0.15, \tilde{\omega} = 0.75$)

3 结 论

在摩擦系数较小时, 由不平衡力引起的规则正进动在转子进动中起决定作用, 在摩擦系数较大而转速适当时, 也有此情况存在; 在系统发生拟周期运动时, 利用全息谱理论得出了碰摩的一个重要特征—当碰摩发生时, 在其频谱中有反进动频率成分存在, 所以监测反进动频率成分有助于碰摩故障诊断; 在一定参数下系统会发生失稳, 且随摩擦系数的增大, 保证转子稳定进动的范围减小。

参 考 文 献

- 1 John L. I Dynamics of A Rotor with Annular Rub, Proceedings of the Fourth International Conference on Rotor Dynamics, Chicago, U.S.A., September, 1994
- 2 刘雄, 赵振毅, 屈梁生. 转子监测和诊断系统. 西安交通大学出版社, 1991

cation rubber damper have been studied experimentally. The results indicate that the vibration of the cantilever beam can be greatly reduced, only if the construction parameters of the metal rubber are properly selected

Key Words Vibration Damping Beam Damper

IMPACT- RUB FAULT CHARACTERISTICS AND HOLOSPECTRUM ANALYSIS OF ROTATING MACHINERY WITH IMBALANCE

L i u X i a n d o n g and L i Q i a n

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

ABSTRACT With respect to the impact- rub dynamic equations of Jeffcott rotor only with imbalance, the characteristics of every harmonic wave in the spectrum domain are studied according to the 2- dimension holospectrum theory, and an important feature of the impact- rub is obtained. The effects of friction coefficient and rotating velocity on the precession are analysed. It is discovered that the regular forward precession resulting from unbalancing force plays a critical role when the friction coefficient is small, but as the friction coefficient is enlarged, the quasi- periodic precession or instability will appear at certain rotating velocity.

Key Words Rotating machinery Imbalance Rubbing Holographic diagnostics

ADDITIONAL PAPERS

NUMERICAL METHOD FOR DETERMINING DYNAMIC STRESSES IN FLUTTER BLADES

Chen Zuoyi and Wu Xiaofeng

(Dept of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

ABSTRACT A numerical method is presented to determine the dynamic stresses and fatigue life of a flutter blade in turbomachinery. The method contains the calculation of unsteady aerodynamic work and damping work of the vibrating blades; the conception of equilibrium amplitude; and the estimation of its fatigue life in accordance with the dynamic stresses of the vibrating blades under the equilibrium amplitude. The unsteady aerodynamic work is obtained from the calculation of 3- D unsteady N- S equations with the Oscillating Fluid Mechanics Method (OFMM) and the Parametric Polynomial Method (PPM). The maximum kinetic energy and dynamic stresses of the vibrating blades are calculated with FEM. The fatigue life of the blade is estimated with Manson- Coffin Equation. The calculated results demonstrate that the blades can operate even the unsteady aerodynamic work is positive