

文章编号:1671-6833(2008)03-0059-03

矢谱分析技术在转子系统振动分析中的应用

陈 宏, 韩 捷, 王丽雅, 郝 伟

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对矢谱分析技术在转子振动分析应用中的不足, 从转子系统动力学角度, 在仅考虑圆盘运动的情况下, 推导出了矢谱参数与系统动力学参数之间的关系式, 从理论上证明了在转速恒定的前提下, 振失角及振失比仅与系统的刚度系数和阻尼系数有关, 该研究结果为应用矢谱分析技术进行转子系统振动分析以及系统参数辨识提供了一定的理论依据。

关键词: 矢谱; 主振失; 振失角; 振动分析

中图分类号: TP 306; TH 113.2

文献标识码: A

0 引言

旋转机械在国民经济发展中占有重要地位, 大多是企业的重大关键设备^[1]。对旋转机械的核心部件——转子系统进行振动分析是提高故障诊断准确率和效率的重要手段。

传统的转子振动分析, 一般都是通过分析在一定条件下获得的单通道系统响应的幅值、相位、频率等参数来获得转子系统的刚度、阻尼、不平衡量等信息。然而由于单通道信息的不完备性, 通过单通道信号获得的系统动态特性也是不完备的。矢谱分析技术^[2]就是为了弥补这种信息残缺不全而提出的一种全信息分析技术, 不但能够获得更加准确的幅值、相位等信息, 而且能够识别出振动响应最大的方向, 为转子振动分析提供了一种全新的方法。经过近十多年的研究^[3-6], 矢谱分析技术已经逐步形成了一套比较完善的分析体系, 但是, 由于各参数与转子振动特性参数之间的关系并没有进行过系统研究, 矢谱分析技术在转子振动分析中还没有得到应用。笔者通过研究矢谱分析技术中主要参数与旋转机械系统特征征数之间的关系, 为矢谱分析技术在转子振动分析中的应用提供理论依据。

1 转子系统响应

旋转机械转子系统的典型结构如图1所示。

其中, c_x 、 c_y 、 k_x 、 k_y 、 M 、 mr 分别为转轴在 x 、 y 方向的阻尼系数、刚度系数、圆盘质量、偏心量。

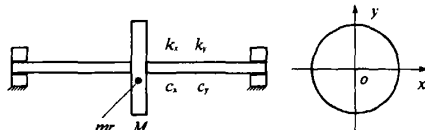


图1 转子系统简图

Fig.1 Rig of a rotor system

在仅考虑圆盘运行的情况下, 系统为一个2自由度系统, 设圆盘旋转角速度为 Ω , 时间为 t , 不平衡质量的初相位角为 α , 不考虑 x 方向与 y 方向的交叉刚度、阻尼, 则系统运动微分方程可以表示为

$$\begin{cases} M\ddot{x} + c_x\dot{x} + k_x x = mr\Omega^2 \cos(\Omega t + \alpha) \\ M\ddot{y} + c_y\dot{y} + k_y y = mr\Omega^2 \cos(\Omega t + \alpha - \pi/2) \end{cases} \quad (1)$$

该系统的稳态响应可以表示为

$$\begin{cases} x = X \cos(\Omega t + \varphi_x) \\ y = Y \cos(\Omega t + \varphi_y) \end{cases} \quad (2)$$

式中: X 、 Y 分别为响应在 x 、 y 方向的振幅; φ_x 、 φ_y 分别为响应在 x 、 y 方向的相位角, 正值表示超前, 负值表示滞后, 解此运动微分方程组, 可得

$$\begin{cases} X = \frac{mr\Omega^2}{\sqrt{(k_x - M\Omega^2)^2 + (c_x\Omega)^2}} \\ Y = \frac{mr\Omega^2}{\sqrt{(k_y - M\Omega^2)^2 + (c_y\Omega)^2}} \\ \tan(\varphi_x - \alpha) = -c_x\Omega / (k_x - M\Omega^2) \\ \tan(\varphi_y - \alpha + \pi/2) = -c_y\Omega / (k_y - M\Omega^2) \end{cases} \quad (3)$$

收稿日期: 2008-06-01; 修订日期: 2008-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(50675209); 河南省杰出人才创新基金项目(0621000500)

作者简介: 陈 宏(1976-), 男, 河北秦皇岛人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事设备故障机理与智能诊断技术研究, E-mail: hongchen229@zzu.edu.cn.

2 矢谱分析技术

如图2所示,其中 R_a 、 R_b 、 θ 分别为椭圆轨迹的长轴、短轴以及长轴与 x 坐标轴的夹角。

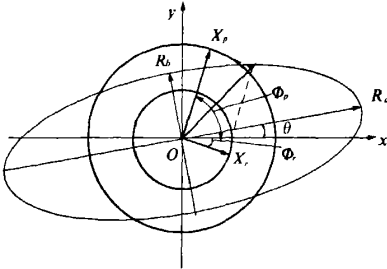


图2 纯频率下转子的涡动轨迹

Fig. 1 Mono-frequency whirl orbit of rotor

采用上节中的参数,则圆盘中心的运动轨迹可以表示为式(2)的形式,如果令

$$\begin{cases} X_c = X \cos \varphi_s \\ X_r = X \sin \varphi_s \end{cases}, \quad \begin{cases} Y_c = Y \cos \varphi_r \\ Y_r = Y \sin \varphi_r \end{cases} \quad (4)$$

则有

$$\begin{cases} x = X_c \cos \Omega t - X_r \sin \Omega t \\ y = Y_c \cos \Omega t - Y_r \sin \Omega t \end{cases} \quad (5)$$

又因为沿着椭圆运动的一个点的轨迹可以表示为两个运动方向相反角速度相等的两个圆的合成,即

$$z = x_p e^{i\Omega t} + x_r e^{-i\Omega t} \quad (6)$$

式中: x_p 、 x_r 分别表示正进动与反进动的复振幅,经过变换,式(6)可以表示为

$$\begin{cases} x = \operatorname{Re} \{ (x_p + \bar{x}_r) e^{i\Omega t} \} \\ y = \operatorname{Re} \{ (i(-x_p + \bar{x}_r)) e^{i\Omega t} \} \end{cases} \quad (7)$$

其中, \bar{x}_r 为 x_r 的共轭。联系式(5)与式(7),可以推出:

$$\begin{aligned} X_p &= \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{(X_c - Y_r)^2 + (X_r + Y_c)^2} \\ &= \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{(X^2 + Y^2) + 2XY \sin(\varphi_s - \varphi_r)} \\ &= \frac{x}{2\sqrt{2}} \sqrt{(1 + \beta^2) + 2\beta \sin(\varphi_s - \varphi_r)} = \frac{x}{2} \gamma_1 \\ X_r &= \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{(Y_c - X_r)^2 + (Y_r - X_c)^2} \\ &= \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{(X^2 + Y^2) + 2XY \sin(\varphi_s - \varphi_r)} \\ &= \frac{x}{2\sqrt{2}} \sqrt{(1 + \beta^2) - 2\beta \sin(\varphi_s - \varphi_r)} = \frac{x}{2} \gamma_2 \\ \tan \phi_p &= (X_r + Y_c) / (X_c - Y_r) \\ \tan \phi_r &= (Y_c - X_r) / (X_c + Y_r) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: X_p 、 X_r 、 ϕ_p 、 ϕ_r 分别为正、反进动幅值、相位角; $\beta = Y/X$ 为振幅比。

这样,椭圆的参数即可求得

万方数据

$$\begin{cases} R_a = X_p + X_r \\ R_b = |X_p - X_r| \\ \phi_a = \phi_p \\ \tan 2\theta = \tan(\phi_p + \phi_r) \end{cases} \quad (9)$$

其中, ϕ_a 为圆盘中心沿椭圆轨迹运动时的相位角,称为矢相位。显然,当 $X_p > X_r$ 时有 $R_b > 0$, $X_p < X_r$ 时 $R_b < 0$,而这恰恰与圆盘中心的进动方向一致。因此,可以用该式的正负号来判断圆盘运动轨迹的进动方向,并用 V_s 表示,称为副振矢;而通过椭圆长轴来评价振动强度,称其为主振矢,用 V_m 表示; θ 角表示椭圆长轴与 x 方向的夹角,称为振矢角。

3 矢谱参数与转子系统特性参数的关系

通过式(2)、(3)、(5)、(9),并令 $\rho = V_s/V_m$ (称之为振矢比),可以推出

$$\begin{cases} V_m = \frac{X}{2}(\gamma_1 + \gamma_2) \\ V_s = \frac{X}{2}(\gamma_1 - \gamma_2) \\ \rho = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \\ \tan 2\theta = \frac{2XY \cos(\varphi_s - \varphi_r)}{X^2 - Y^2} = \frac{2 \cos(\varphi_s + \varphi_r)}{1/\beta - \beta} \\ \tan \phi_a = \frac{X^2 \sin(2\varphi_s) + Y^2 \sin(2\varphi_r) + 2XY \cos(\varphi_s - \varphi_r)}{2(X^2 - Y^2)} \\ = \frac{\sin(2\varphi_s) + \beta^2 \sin(2\varphi_r) + 2\beta \cos(\varphi_s - \varphi_r)}{2(1 - \beta^2)} \end{cases} \quad (10)$$

另外,

$$\varphi_s - \varphi_r = (\varphi_s - \alpha) - (\varphi_r - \alpha + \frac{\pi}{2}) + \pi/2 \quad (11)$$

由此可见,当圆盘转速一定时, x 、 y 两个通道信号的相位差只与系统的刚度系数和阻尼系数有关。再考虑到 X 、 Y 的表达式,我们可以看出,振矢角在转速一定时只与系统的刚度系数和阻尼系数有关,与不平衡质量的大小、初相位角、每个响应的初相位等无关。而主振矢、副振矢不但与系统的刚度系数和阻尼系数有关,而且与不平衡量有关,但是振矢比与不平衡量无关,也即椭圆形状不会因不平衡量的变化而变化,这就提示我们,在实际的振动分析中,如果椭圆的形状与振矢角不发生变化,但是椭圆的大小发生了改变,那么将预示着系统的平衡出现了问题,反之,则不是平衡问题。

4 应用实例

图3和图4分别给出了一转子实验台在正常

情况和支承松动情况下测得的全矢谱图,转速为 1 500 r/min.

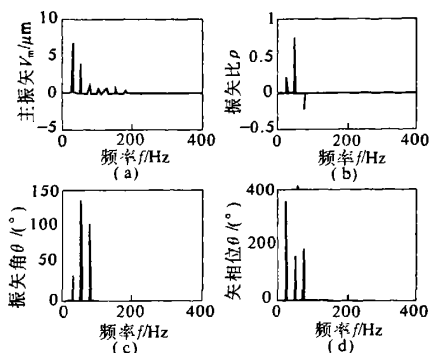


图3 正常转子全矢谱图

Fig.3 The vector spectra of a normal rotor

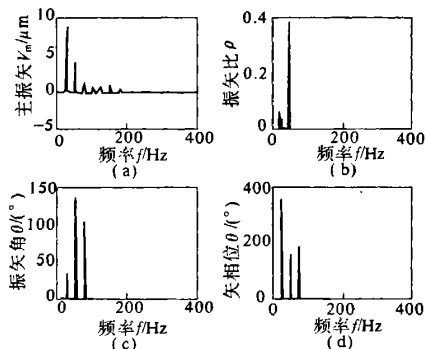


图4 支承松动转子全矢谱图

Fig.4 The vector spectra of a rotor with looseness faults

由图3和图4可知,在正常情况和支承松动情况下,转子的主振矢、振矢比、振矢角、矢相位均发生的明显变化,其中1倍频主振矢明显增加(由 $6.4\mu m$ 增加到 $8.8\mu m$),振矢比则有较大减小(由0.18减小到0.06),这说明椭圆的形状更扁了,说明转子一个方向的刚度有减弱;而振矢角和矢相位则无明显变化,这说明刚度下降对1倍

频的振矢角和矢相位影响不大;2倍频的主振矢和振矢比的变化规律与1倍频类似,而振矢角则有较明显变化,松动时的振矢角要比未松动时增加了,说明振动方向向竖直方向偏移了,这与实际情况一致.由此可见,通过对正常转子和支承松动故障转子全矢谱图的比较分析,能够较准确地分析出转子系统特性的变化,这对于准确地诊断故障提供了一个很好的分析手段.

5 结论

(1)在仅考虑圆盘运行的前提下,推导了矢谱参数——主振矢、副振矢、振矢角与转子系统特性参数之间的关系式;

(2)研究结果表明,在转速恒定的前提下,主振矢、副振矢之比以及振矢角只与系统的刚度系数和阻尼系数有关,这为旋转机械的故障诊断以及系统参数的辨识提供了一个新的依据.

参考文献:

- [1] 钟一谔,何衍宗,王正,等. 转子动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1987.
- [2] 韩捷,关惠玲,梁川,等. 矢谱:一种实用的旋转机械故障诊断分析方法[J]. 机械强度,1998,20(3):212-215.
- [3] 毕果,韩捷,梁川. 基于矢量振动信号的AR功率谱分析及应用[J]. 郑州大学学报:工学版,2003,24(2):80-83.
- [4] 王丽雅,韩捷,陈磊. 基于信息融合的短时矢功率谱分析方法[J]. 机械科学与技术,2007,26(4):437-440.
- [5] 张海涛,韩捷,李志农,等. 基于全矢谱分析的故障诊断系统的开发[J]. 煤矿机械,2007,28(3):184-187.
- [6] 李中原,韩捷,雷文平,等. 基于矢双谱分析的旋转机械故障诊断研究[J]. 汽轮机技术,2006,48(6):430-432.

Application of Vector Spectrum in Vibration Analysis of Rotor Systems

CHEN Hong, HAN Jie, WANG Li-ya, HAO Wei

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: From the view of rotor dynamics, when the motion of the disk is only considered, the relations between parameters of vector spectrum and of rotor dynamics' are derived. It is proved that the vibration vector angular and ratio of the main vibration vector and second vibration vector are only related to stiffness coefficients and damping coefficients of the rotor system when the rotating speed is constant. The study presents the foundation for vector spectrum technology in vibration analysis and parameter identification of rotor systems.

Key words: vector spectrum; main vibration vector; vibration vector angle; vibration analysis