

文章编号 :1671 - 6833(2002)03 - 0044 - 04

# 全谱分析技术及其在故障诊断中的应用

韩 捷<sup>1</sup>, 石来德<sup>2</sup>

(1. 郑州大学机械工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 同济大学机械工程学院, 上海 200092)

**摘 要:**介绍了全谱分析技术的思路,研究了全谱分析技术与旋转机械回转信号之间的理论关系,导出了全谱分析基于复合信号的理论计算公式及简洁数值算法,并将其应用于实际故障诊断系统中。研究及应用表明:全谱分析作为对转子涡动信号综合处理的分析方法,能够清晰处理转子轨迹和正反进动之间的关系,经过简单换算也可识别转子的回转强度,表明全谱分析对于旋转机械故障诊断是一种非常实用的分析工具。

**关键词:**全谱分析; 旋转机械; 故障诊断

**中图分类号:**TP 206.3; TH 113 **文献标识码:**A

旋转机械在工业生产中占有极其重要的位置,是石油、化工、冶金、电力、机械等领域的关键设备。保证这些关键设备的安全、稳定、长周期、满负荷、连续优质运行,对于安全生产、提高企业的社会效益和经济效益具有十分重要的工程意义。

旋转机械的监测与诊断是机械故障诊断界始终十分关注的课题。经过长期不懈的努力,旋转机械的监测与诊断产品在生产现场已经获得了很好的应用,解决了大量的工程实际问题。然而如何使状态监测、信息处理与故障诊断方法更接近实际工况,提高故障诊断的可操作性以及准确性,仍然是一个长期而艰巨的任务。

由于转子涡动的物理特性,旋转机械的测量一般采用同一截面相互垂直的两个探头来完成<sup>[1]</sup>。然而,同一截面用于监测旋转机械的两个探头中的任一探头所检测到的信息,无论在量值和结构方面均很难反映机组运行的实际状况。在很多情况下,差异是很大的,会直接影响到诊断结果并造成误判。为了能够客观地反映转子的振动状态,避免因此造成的误判,许多学者做了大量的研究和应用工作。全谱(Full Spectrum)分析技术<sup>[2]</sup>就是其中的一种。本文旨在对全信息分析处理基础上探讨旋转机械的全谱分析方法及其工程应用,全方位介绍和探讨全谱分析方法的理论概念、数值方法、图谱表达以及工程应用等。

## 1 全谱分析技术基础

假定旋转机械的运行是平稳的,则采用双向垂直探头获得转子振动信息,在探头所在平面内以若干角频率的 $\omega_i$ 组合做稳态涡动,其 $x, y$ 向的运动方程式一般可以表达为

$$\begin{cases} x = \sum_{i=1}^{\infty} X_i \cos(\omega_i t + \phi_{xi}); \\ y = \sum_{i=1}^{\infty} Y_i \cos(\omega_i t + \phi_{yi}), \end{cases} \quad (1)$$

式中: $X_i, Y_i$ 表示频率为 $\omega_i$ 的运动幅值; $\phi_{xi}, \phi_{yi}$ 表示频率为 $\phi_{xi}$ 的谐波运动的相位角。对某一谐波,

设

$$\begin{cases} X_{Ci} = X_i \cos \phi_{xi}; \\ X_{Si} = X_i \sin \phi_{xi}; \\ Y_{Ci} = X_i \cos \phi_{yi}; \\ Y_{Si} = X_i \sin \phi_{yi}, \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i = 1, 2, 3, \dots$

其运动规律为一椭圆,即

$$(Y_{Ci}^2 + Y_{Si}^2)x_i^2 + (X_{Ci}^2 + X_{Si}^2)y_i^2 - 2(X_{Ci}Y_{Si} + X_{Si}Y_{Ci})x_i y_i = (X_{Si}Y_{Ci} + X_{Ci}Y_{Si})^2. \quad (3)$$

式中: $i = 1, 2, 3, \dots$

在转子运动学上,一般总可以把一个沿椭圆轨迹的运动看成沿两个圆轨迹运动的合成<sup>[3]</sup>。这两个分运动的圆频率(角速度)相等而转向相反,如图1所示。

收稿日期:2002-05-20; 修订日期:2002-07-03

作者简介:韩捷(1957-),男,河南省安阳市人,郑州大学教授,同济大学博士研究生,主要从事设备故障机理及智能诊断技术研究与产品开发。

万方数据

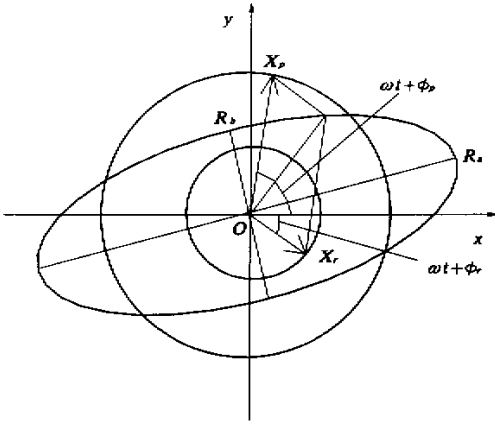


图1 纯频下转子的回转轨迹

Fig.1 Rotor trace in pure frequency

设  $X_{pi}, \phi_{pi}$  为圆频率为  $+\omega_i$  的圆轨迹的半径(幅值)和相位角;  $X_{ri}, \phi_{ri}$  为圆频率为  $\omega_i$  的圆轨迹的半径和相位角. 则

$$\begin{cases} x_i = X_{pi} \cos(\omega_i t + \phi_{pi}) + X_{ri} \cos(\omega_i t + \phi_{ri}); \\ y_i = X_{pi} \sin(\omega_i t + \phi_{pi}) + X_{ri} \sin(\omega_i t + \phi_{ri}). \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $i = 1, 2, 3, \dots$

若也像式(2)那样定义了  $X_{pCi}, X_{pSi}, X_{rCi}$  及  $X_{rSi}$  且令

$$\begin{cases} x_{pi} = X_{pCi} + jX_{pSi}; \\ x_{ri} = X_{rCi} + jX_{rSi}. \end{cases} \quad (5)$$

则有其复数表达形式

$$\begin{cases} x_i = \text{Re}\{[(X_{pCi} + jX_{pSi}) + (X_{rCi} + jX_{rSi})]e^{j\omega_i t}\} \\ = \text{Re}\{(x_{pi} + x_{ri})e^{j\omega_i t}\}; \\ y_i = \text{Re}\{[-i(X_{pCi} + jX_{pSi}) + i(X_{rCi} + jX_{rSi})]e^{j\omega_i t}\} \\ = \text{Re}\{(x_{pi} - x_{ri})e^{j\omega_i t}\}. \end{cases}$$

$x_{pi}$  对应的运动与转子转动方向相同称为正进动,  $x_{ri}$  对应的运动与转子转动方向相反称为反进动. 则图1两个圆参数可用下式得到

$$\begin{cases} X_{pi} = \sqrt{X_{pCi}^2 + X_{pSi}^2} = \frac{1}{2} \sqrt{(X_{Ci} - Y_{Si})^2 + (X_{Si} + Y_{Ci})^2}; \\ X_{ri} = \sqrt{X_{rCi}^2 + X_{rSi}^2} = \frac{1}{2} \sqrt{(X_{Ci} - Y_{Si})^2 + (X_{Si} + Y_{Ci})^2}; \\ \text{tg} \phi_{pi} = \frac{X_{Si} + Y_{Ci}}{X_{Ci} - Y_{Si}} = \text{tg} \phi_{ai}; \\ \text{tg} \phi_{ri} = \frac{X_{Si} - Y_{Ci}}{X_{Ci} + Y_{Si}}. \end{cases} \quad (7)$$

设  $R_{ai}$  为椭圆的长轴或最大强度, 定义为主振矢;  $R_{bi}$  为椭圆的短轴或最大强度的垂直方向, 定义为副振矢. 则上述两正圆与其对应的椭圆轨

迹有如下关系

$$\begin{cases} R_{ai} = X_{pi} + X_{ri}; \\ R_{bi} = X_{pi} - X_{ri}. \end{cases} \quad (8)$$

在进行信息处理时, 将各谐波频率下组成椭圆的两个正圆, 取其半径分别按正、负频率轴展示出来, 比较同一谐波下正、负频率下的幅度大小, 可以断定该椭圆的进动方向以及定性的振动强度. 全谱分析的优点是判断进动方向方便, 图谱分辨率高. 其缺点是由于图谱是直接利用正圆半径表示的, 故图谱中难以准确表达各谐波下的振动强度.

## 2 全谱分析的数值计算

假定  $\{x_i\}$  和  $\{y_i\}$  分别为  $x, y$  方向上的离散序列, 为了进一步提高计算效率, 采用通过一次 FFT 计算四个参数  $X_C, X_S, Y_C, Y_S$  的方法, 用序列  $\{x_i\}, \{y_i\}$  构成复序列  $\{z_i\}$ , 即  $\{Z_i\} = \{X_i\} + j\{Y_i\}$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, N/2 - 1$ ), 其 Fourier 变换为  $\{Z_i\}$ ,  $\{Z_{Ri}\}, \{Z_{Li}\}$  分别为  $Z_i$  的实部和虚部, 这样可以大大提高融合算法的计算效率. 即

$$\begin{cases} X_{Ci} = \frac{Z_{Ri} + Z_{R(N-i)}}{2}; \\ X_{Si} = \frac{Z_{Li} - Z_{L(N-i)}}{2}; \\ Y_{Ci} = \frac{Z_{Li} + Z_{L(N-i)}}{2}; \\ Y_{Si} = \frac{Z_{R(N-i)} - Z_{Ri}}{2}, \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $i = 0, 1, 2, \dots, N/2 - 1$ .

从而

$$\begin{cases} X_{pi} = \frac{1}{2} \sqrt{Z_{Ri}^2 + Z_{Li}^2} = \frac{1}{2} |Z_i|; \\ X_{ri} = \frac{1}{2} \sqrt{Z_{R(N-i)}^2 + Z_{L(N-i)}^2} = \frac{1}{2} |Z_{N-i}|. \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $i = 0, 1, 2, \dots, N/2 - 1$ .

## 3 全谱分析图谱表达

全谱分析从机理上是将各个谐波频率下转子的椭圆轨迹分解为两个转动方向相反的正圆, 一个为正进动, 另一个为反进动. 其中半径较大的正圆的涡动方向决定了该频率下转子的进动方向. 因此, 全谱分析在图谱在横坐标上采用了正负频率轴表达的方式, 其中正频率轴依次表达正进动的正圆半径值, 负频率轴依次表达反进动正圆的半径值. 如果在某一频率下, 正半频率的谱值大于负半频率的谱值, 则表明转子在该频率下是正进

动,能够迅速识别转子的正反进动对于旋转机械的故障诊断非常重要。

同时也可以根据正、负频率处的谱值绝对大小来判断该谐波下转子的运行轨迹,基本思路是椭圆轨迹的长轴为两个圆半径之和,椭圆轨迹的短轴为两个圆半径之差,利用这一经验可以判断转子的振动强度和回转轨迹。

全谱分析图谱可以分析稳态下转子的运行状况,也可以分析瞬态下转子的运动状态,在瞬态情况下其形式为双向瀑布图方式。

#### 4 全谱分析工程应用

图 2(a)是某大型离心压缩机发生摩擦时在  $X, Y$  方向的信号时基图。信号是由一般工程中常用的双向布局涡流传感器拾取,其信号为转子的位移振动信号。图 2(b)为该信号所对应的幅值谱图。可以看出,该信号在  $X$  和  $Y$  向有较大差异,其谱值及其谱结构差异也很大。从图 2(b)可以怀疑设备可能有摩擦现象,但由于进动状况不明和谱

值信息的不完备,不能断定,显然直接诊断较难把握故障实质。事实上,一般情况下采用常规分析方法很难克服两个方向谱差异的弊端。

采用全谱分析可以很好地解决谱差异问题,同时可以立即判断出转子的进动方向。图 2(c)分别为该信号的全谱分析图谱,分别由式(9)(10)计算得到。从图中可以看出,不仅谱图上分次谐波和倍频谐波非常丰富,而且主要频带下全谱的反向进动幅值大于正向进动幅值,表明转子的总体轨迹是反向涡动。明显的分频、倍频特征及反向涡动特征已构成诊断设备摩擦故障的所有要素。

同时,根据各个频带下正进动圆半径和反进动圆半径的和值,可以确定在该频率下,转子的涡动椭圆轨迹的长轴,根据各个频带下正进动圆半径和反进动圆半径的差值,可以确定在该频率下,转子的涡动椭圆轨迹的短轴,进而间接得出该频率下转子的涡动轨迹概貌以及振动的强度大小。当然,在很多情况下,现场应用的熟练程度、工程经验和丰富的想象力,起着至关重要的作用。

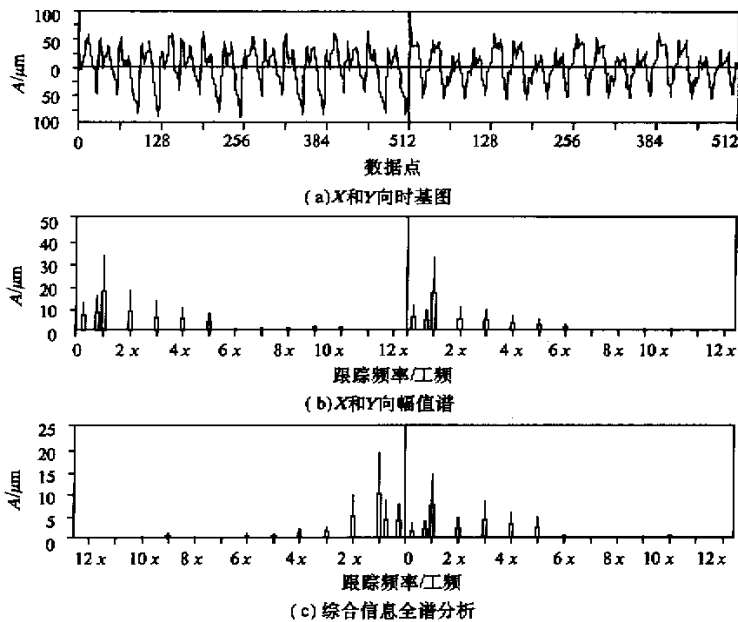


图2 转子回转信息全谱分析

Fig.2 Full spectrum analysis on rotation information of rotor

#### 5 结论

通过对转子信号的全谱分析研究及应用,可以得出以下结论:

(1) 全谱分析对旋转机械是非常实用的,对万方数据

于避免产生误判具有非常积极的工意义。

(2) 文中导出的基于复傅立叶变换的全谱计算公式简洁、正确,可直接在工程实际中应用。

(3) 全谱分析具有较高的分辨率,计算直观、简单,能够对转子系统进行进动分析,在这方面和

其他分析方法相比具有明显的优越性.

(4)通过简单的换算,全谱分析可以得出转子回转轨迹的概貌以及振动强度的大小,这对于实际工程诊断是极其重要的.

参考文献：

[ 1 ] 韩 捷,张瑞林. 旋转机械故障机理及诊断技术 [ M ]北京 机械工业出版社 ,1997.

[ 2 ] MUSZYNSKA Agnes. BENTLY ,ALEX Petchenev. Vibration response of rotor supported in one rigid and one poorly lubricated fluid filmbearing[ J]. ORBIT ,1996 ,17( 3 ) :7 - 9.  
[ 3 ] 钟一谔 ,何衍宗 ,王正 ,等. 转子动力学[ M ],清华大学出版社 ,1987.  
[ 4 ] 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.

Full Spectrum Analysis Technology and Its Application in Fault Diagnosis

HAN Jie<sup>1</sup> , SHI Lai - de<sup>2</sup>

( 1. College of Mechanical Engineering ,Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002 ,China ; 2. College of Mechanical Engineering ,Tongji University ,Shanghai 200092 ,China )

**Abstract :** The clew of full spectrum is introduced , the theory relationship between the full spectrum and the signals of the rotary machinery are studied , and the theory calculation formula and simple numerical method of full spectrum based on complex signals are deduced , and they are applied to the actual fault diagnosis systems. It shows that as an analysis method of comprehensively processing whirl signals of rotors , the full spectrum can clearly deal with the relationship between the orbits and positive/negative eddy. Through the simple conversion , we can also identify the turning intention of the rotors , and it is a very practical analysis tool for fault diagnosis of rotary machinery.

**Key words :** full spectrum analysis ; rotary machinery ; fault diagnosis