

# 基于频谱细化和相位差校正的全息谱研究

杜 威 汤宝平 陈仁祥

重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆,400044

**摘要:**针对全息谱在频谱密集情况下精度会降低的问题,提出了基于频谱细化和相位差校正的全息谱分析方法。该方法采用复解析带通滤波器选带细化方法对以阶次频率为中心的局部区间进行细化分析,通过提高频率分辨率来消除密集频谱对精确获取幅值、相位信息的影响,运用相位差法对细化区间内的最大谱峰进行频率、幅值、相位校正,准确地提取出各阶次的幅值、相位信息,最后合成全息谱图。仿真及对柔性转子试验台振动信号的分析结果表明,基于频谱细化和相位差校正的全息谱能有效提高其分析精度,更加精确有效地诊断旋转机械的故障。

**关键词:**密集频谱;细化;相位差;全息谱

**中图分类号:**TH113.1;TN911.7

**文章编号:**1004—132X(2011)21—2577—06

## Study on Hologpectrum Based on Spectrum Refining and Correction of Phase Difference

Du Wei Tang Baoping Chen Renxiang

State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing, 400044

**Abstract:** A new method of hologpectrum based on zoom spectrum and correction of phase difference was put forward against to the lower precision of traditional hologpectrum in intensive spectrum environment. First, it took complex analytical band-pass filter to conduct zoom, analysed the local range, the center of which was order frequency, and then the impact of intensive spectrum could be eliminated by increasing the frequency resolution. With correction of phase difference for the max peak, the amplitude and phase of each order frequency can be acquired. At last, the hologpectrum was synthesized. Through simulation and analysis of flexible rotor's vibration signals, the results show that it has higher precision in practice and can diagnose the rotation machinery fault more accurately and more effectively.

**Key words:** intensive spectrum; zoom; phase difference; hologpectrum

## 0 引言

全息谱<sup>[1]</sup>分析作为广泛应用的旋转机械故障诊断技术,充分利用了两相互垂直信号的幅值、相位信息,全面反应了设备的振动形态,其基础是二维全息谱。由于信号被时域截断,所以振动信号直接经过FFT谱分析后得到的幅值、频率和相位与原信号存在较大的误差,实际中往往需要对频谱进行校正,但在密集频率成分和噪声的干扰下,频谱校正精度会有所下降。文献[2]在综合分析各种单频率频谱校正方法优缺点的基础上,采用时移相位差法提高了全息谱在噪声干扰下的整体分析精度。但当被分析信号表现为密集频谱时,相邻频率谱线间隔小于4个频率分辨率,主瓣干涉造成相位差法等频谱校正方法无法正确校正,这样为正确获得全息谱图带来很大的不确定性。针对上述问题,本文引入了频谱细化和相位差校正法,以提高全息谱在密集频谱干扰下的整

体分析精度。

## 1 全息谱不足分析及解决方法

在工程实际中,采样频率过高、频率分辨率过低掩盖了细节频率信息,为正确获得全息谱造成了困难,同时,机械振动信号中低频段的成片有色噪声<sup>[3]</sup>,也是形成密集频谱的因素之一。对信号进行全息谱分析一般需要进行频谱校正,而目前频谱校正方法多是建立在单谐波或间隔较远的多谐波信号基础之上,无法用于密集频率成分环境中。

分析国内外相关文献可知,密集频率成分下精确获得频率、幅值、相位的方法有如下两种:一种是通过时域或频域参数识别理论进行密集频谱的识别与校正,如频率抽取法<sup>[4]</sup>、改进的比值校正法<sup>[5]</sup>等;另一种是通过细化提高频率分辨率,将相邻频率谱线分开达到单频率成分的要求,然后运用频谱校正方法进行校正。前一种研究方法尚不成熟,不仅存在需迭代求解、算法复杂的问题,而且在未考虑噪声影响条件下也只能识别两个密集频率成分,将其运用到频率成分复杂的工程实际

收稿日期:2010—09—28

基金项目:中央高校基本科研业务经费资助项目(CDJZR10118801)

中受到很大限制。为此,本文选取第二种方法。

针对全息谱分析需准确获得幅值、相位信息的特点,细化方法的选取要遵循两个原则:一是细化要真正实现密集频谱的分离;二是细化对原始序列的幅值、相位影响小。常用的细化分析方法有 Chirp-Z 变换、小波细化、ZoomFFT 等。Chirp-Z 变换在不增加采样长度的情况下可以实现局部频谱的放大,但不能实现频谱的真正分离;由于小波基的时域有限性,造成其频域特性差,故小波细化带来的幅值误差大;ZoomFFT 是基于长样本数据的细化分析方法,能够实现频谱的真正分离。基于复解析带通滤波器的选带细化方法<sup>[6-7]</sup>是改进的 ZoomFFT 方法。它具有以下特点:①采用对滤波器的复调制取代传统 ZoomFFT 对整个信号的复调制,减小了运算量;②复解析带通滤波器对应的时间序列是实部偶对称,虚部奇对称,由数字信号处理基本知识可知,复解析带通滤波器可实现零相位滤波;③只在正频率部分有幅值,消除了传统滤波器负频率旁瓣干涉的影响,避免了滤波后频率成分的调整,通过滤波器外扩的方法,将过渡带外移,保证了通带的精度要求。因此,本文采用基于复解析带通滤波器选带细化方法对以阶次频率为中心的局部区间进行统一细化分析。对于密集频谱,选带细化方法可消除主瓣干涉的影响,达到单频率成分校正的要求;对于非密集频谱,亦可减轻旁瓣干涉,进一步提高幅值精度。本方法相比传统 ZoomFFT,不仅能实现真正的频谱分离,更能最大程度提高运算速度,降低选带细化对原始信号幅值、相位信息的影响。

由于细化后的时间序列有限,同时考虑到校正方法的抗噪能力<sup>[8-10]</sup>,故本文采用改变窗长相位差法<sup>[11]</sup>对细化后的峰值谱线进行校正。

## 2 基于频谱细化和相位差校正的全息谱原理

假设在同一截面同时采集的水平和垂直方向的时域振动信号为  $x(n)$  和  $y(n)$ ,对两方向信号加 Hanning 窗直接做  $N(1024)$  点 FFT,这里以水平信号为例进行阐述。参照水平信号全景谱图,同时结合键相信号确定工频,可得

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j(\frac{2\pi}{N})nk} \quad (1)$$

其中,  $k=k_1, k_2, k_3, k_4$ , 依次对应低阶、1 阶、2 阶、3 阶特征谱线,其对应频率为

$$f_c(r) = k_r f_s / N \quad (2)$$

其中,  $r=1, 2, 3, 4$ ,  $f_s$  为采样频率,低阶特征谱线

为零频与工频之间的最大幅值谱线。改写成实部和虚部之和可得到如下公式:

$$x(k) = R_k + j I_k \quad (3)$$

对应地得到信号的幅值谱和相位谱如下:

$$\left. \begin{aligned} A_k &= \sqrt{(R_k)^2 + (I_k)^2} \\ \alpha_k &= \arctan(I_k/R_k) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

根据全息谱分析对幅值、相位的精确需要,须保证通带边缘不受过渡带影响,故确定复解析带通滤波器的宽度为  $f_s/(2D)$ , 其中,  $D$  为细化倍数,理想通带为  $f_c \pm f_s/(4D)$ , 将滤波频带外扩 100%, 滤波半阶数  $M=4D$ , 则实际滤波器通带上、下截止角频率如下:

$$\begin{aligned} \omega_h &= 2\pi f_h = 2\pi[f_c + 1.5f_s/(4D)] \\ \omega_l &= 2\pi f_l = 2\pi[f_c - 1.5f_s/(4D)] \end{aligned} \quad (5)$$

滤波器实部、虚部为

$$h_r(m) = \frac{1}{\pi m} (\sin 2\pi m \omega_h - \sin 2\pi m \omega_l) \quad (6)$$

$$h_i(m) = \frac{1}{\pi m} (\cos 2\pi m \omega_l - \cos 2\pi m \omega_h) \quad (7)$$

$$m = 0, \pm 1, \dots, \pm M$$

选抽与滤波同时进行,同时为消除卷积滤波中前后出现的暂态过程对幅值的影响,将前后  $M$  个不准确点去掉,这样带来的时移误差需在后续的相位校正中进行补偿。则有

$$x_0(n) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=-M}^M (h_r(-m) + j h_i(-m)) x(M+nD+m) \quad (8)$$

对序列进行复调制移频,移频量为  $Df_1/f_s$ , 则有

$$x_{01}(n) = x_0(n) e^{-j2\pi n D f_1 / f_s} \quad (9)$$

将  $x_{01}(n)$  前  $N/2$  点向后平移  $N/4$ , 再将前后  $N/4$  点置零即可得新序列  $x_1(n)$ , 由于上述两个序列出自同一信号,具有相同的频率、幅值,而窗函数的长度不同造成两个序列具有不同的初始相位,因此可利用峰值谱线处的相位差求出频率校正量,实现峰值谱线频率、幅值、相位的校正。

对  $x_{01}(n)$  和构造的新序列  $x_1(n)$  加同类型的窗函数分别进行  $N$  点和  $N/2$  点 FFT 变换,得  $x_{01}(n)$  对应谱图峰值谱线号为  $i$ ,  $x_1(n)$  对应谱图峰值谱线号为  $j$ , 则两段信号同峰值下初始相位角之差  $\Delta\theta$  可写为

$$\Delta\theta = \theta_{k_0} - \theta_{k_1} = -(\pi\Delta k)/2 + \pi(2j-i)/2 \quad (10)$$

其中,  $\theta_{k_0}$  为  $x_{01}(n)$  对应峰值谱线的初始相位角,  $\theta_{k_1}$  为  $x_1(n)$  峰值谱线的初始相位角。由式(10)得到误差校正系数:

$$\Delta k = -2[\Delta\theta - \pi(2j-i)/2]/\pi \quad (11)$$

由误差校正系数  $\Delta k$  得到校正后频率:

$$f_k = (k + \Delta k) \frac{f_s}{N} \quad (12)$$

若窗函数的谱函数为  $W(f)$ , 则可实现幅值的校正, 校正后幅值为

$$A'_k = \frac{A_k}{W(\Delta k)} \quad (13)$$

校正后相位为

$$\alpha'_k = \arctan(I_k/R_k) - \Delta k\pi + 2\pi\Delta kM/(DN) + \frac{\pi}{2} \quad (14)$$

式(14)中校正后的相位与相位差频谱校正存在着差别, 除了全息谱中频域内谱线的参数方程是以正弦函数表示外, 还有滤波过程中时移的相位补偿。这样便完成了幅值、相位的校正。

设两振动信号频域内第  $k$  根谱线校正后得到的以  $t$  为参数的参数方程为

$$\begin{aligned} x(k) &= A'_k \sin(kt + \alpha'_k) \\ y(k) &= B'_k \sin(kt + \beta'_k) \end{aligned} \quad (15)$$

式中,  $A'_k, \alpha'_k$  为水平信号校正后的幅值、相位;  $B'_k, \beta'_k$  为垂直信号校正后的幅值、相位。

消去参数  $t$  即可得到全息谱方程:

$$\frac{x(k)^2}{A_k'^2} + \frac{y(k)^2}{B_k'^2} - \frac{2x(k)y(k)}{A_k'B_k'} \cos(\beta'_k - \alpha'_k) = \sin^2(\beta'_k - \alpha'_k) \quad (16)$$

由此可得到全息谱中一些重要的结果:

$$\left. \begin{aligned} s_x &= A' \cos \alpha' & c_x &= A' \sin \alpha' \\ s_y &= B' \cos \beta' & c_y &= B' \sin \beta' \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

离心率:

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \quad (18)$$

$$a = \frac{\sqrt{c+d} + \sqrt{c-d}}{2} \quad c = A'^2 + B'^2$$

$$b = \frac{\sqrt{c+d} - \sqrt{c-d}}{2} \quad d = 2A'B' \sin(\alpha' - \beta')$$

由正弦项系数  $s_x$  和  $s_y$  以及余弦项系数  $c_x$  和  $c_y$  还可以得到各阶椭圆的初始点以及长轴倾角等参数, 在此不一一列出。全息谱的流程如图 1 所示。

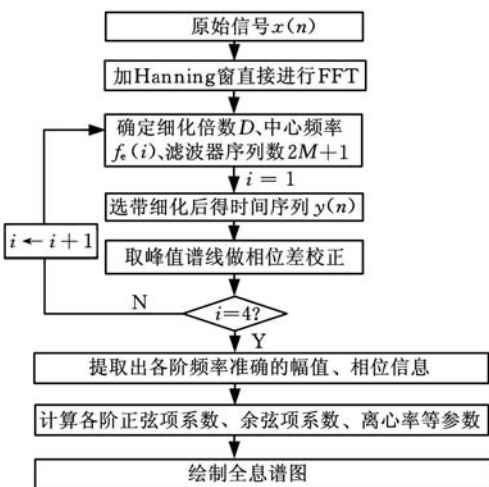


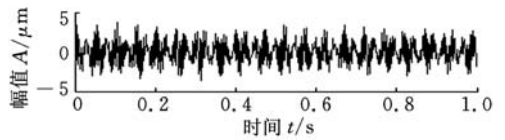
图 1 基于频谱细化和相位差校正的全息谱流程图

### 3 仿真分析

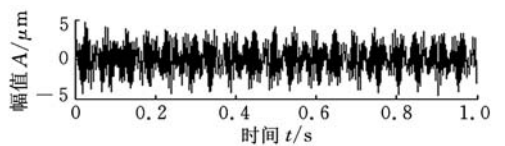
设  $x(t), y(t)$  分别为一含密集频谱及随机高斯噪声的仿真信号, 其表达式如下:

$$\begin{aligned} x(t) &= \sin(2\pi 40.6t + 20\pi/180) + [0.3\sin(2\pi 180.625t + 40\pi/180) + \sin(2\pi 180.805t + 70\pi/180) + \\ &\quad 0.3\sin(2\pi 180.925t + 100\pi/180)] + \sin(2\pi 200.2t + 50\pi/180) + \text{rand}(0.5, N) \\ y(t) &= \sin(2\pi 40.6t + 20\pi/180) + [0.3\sin(2\pi 180.625t + 130\pi/180) + 2\sin(2\pi 180.805t + 160\pi/180) + \\ &\quad 0.3\sin(2\pi 180.925t + 190\pi/180)] + \sin(2\pi 200.2t + 140\pi/180) + \text{rand}(0.5, N) \end{aligned}$$

采样频率为 1024Hz, 采样点数为 101 000, 每段分析点数为 1024, 考虑到半阶数的存在, 设最大细化倍数为 100。为方便叙述, 这里将时移相位差法简称相位差法 1, 改变窗长相位差法简称相位差法 2, 仿真信号的时域图形如图 2 所示, 经过相位差法 1 校正后的频域图形如图 3 所示, 经细化 + 相位差法 2 校正后的频域图形如图 4 所示, 直接相位差法 1 校正后的全息谱图如图 5 所示, 基于细化、相位差法 2 校正后的全息谱图如图 6 所示。为方便对比分析, 本文将理论值、相位差法 1 校正、细化 + 相位差法 2 校正得到的各全息谱参数进行了记录, 结果如表 1 所示。

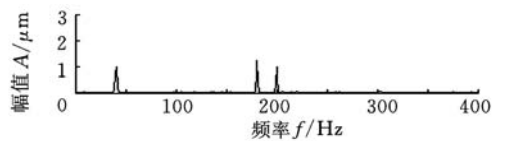


(a) x 向

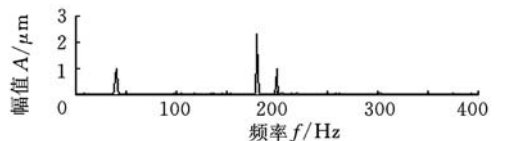


(b) y 向

图 2 x 向和 y 向振动信号时域图

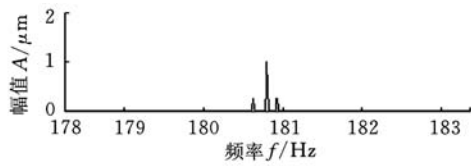


(a) x 向

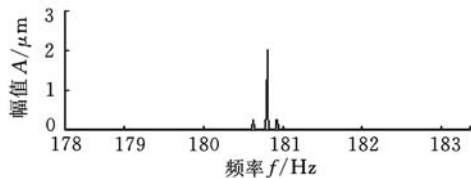


(b) y 向

图 3 x 向和 y 向振动信号频域图



(a) x 向



(b) y 向

图 4 中心频率为 180.6Hz 的细化区间的频域图

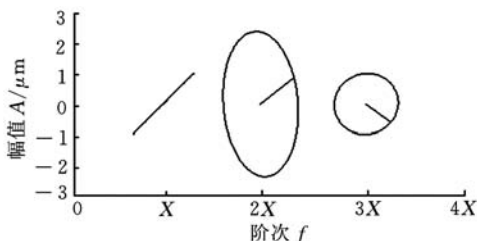


图 5 直接相位差法 1 得到的全息谱图

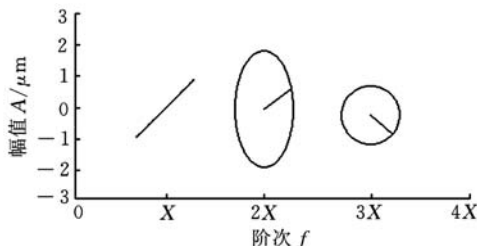


图 6 细化校正后得到的全息谱图

由图 5、图 6 可以直观地看出,全息谱 X、3X 基本一致,由于 2X 存在密集频谱,造成两种方法提取的幅值、相位差异较大,图上表现为离心率、初相角的不同,且图 5 中 2X 整体向左倾,对比之下,图 6 更符合 90°相位差的仿真结果。进一步分析表 1 可以看出,对于全息谱 2X 的正弦项系数和余弦项系数,由于细化前频率分辨率为 1Hz,密集频谱干涉严重,相位差法 1 无法识别出密集频率,得到参数误差较大,绝对误差保持在 0.3 左右,离心率绝对误差更是达到 0.04 左右,显然已不能达到工程需要。对比之下,细化后的频率分辨率达到 0.01Hz,密集频谱主瓣干涉完全消除,2X 正弦项系数绝对误差都保持在 0.001 左右,离心率误差仅为 0.000 11,准确度得到很大的提高。

对于全息谱 X 和 3X 的各参数项,不存在密集频谱,只有噪声的影响,直接相位差法 1 和细化+相位差法 2 均保持较高的精度,相比之下,通过细化,将谱线间的旁瓣干涉进一步降低了,细化+相位差法 2 的校正精度高于直接相位差法 1 的校正精度。从上面的分析可以看出,本文方法的校正精度高于直接相位差法 1 的校正精度。

由此可以看到,基于频谱细化和相位差校正的全息谱在频谱密集及噪声状况下,提高了全息谱的分析精度,为正确地进行故障诊断提供了保证。

表 1 两种方法的全息谱各参数结果对照表

阶数		$s_x$	$c_x$	$s_y$	$c_y$	离心率
X	理论值	0.939 69	0.342 02	0.939 69	0.342 02	1.000 00
	直接相位差法 1	0.935 25	0.338 84	0.935 25	0.338 84	1.000 00
	细化+相位差法 2	0.937 91	0.342 73	0.937 91	0.342 73	1.000 00
2X	理论值	0.342 02	0.939 69	-1.879 40	0.684 04	0.866 03
	直接相位差法 1	0.510 09	1.220 30	-2.151 1	0.849 33	0.820 48
	细化+相位差法 2	0.341 63	0.938 56	-1.878 10	0.682 23	0.866 14
3X	理论值	0.642 79	0.766 04	0.766 04	-0.642 79	0
	直接相位差法 1	0.639 55	0.769 27	0.764 61	-0.637 83	0.099 50
	细化+相位差法 2	0.642 28	0.766 16	0.764 45	-0.640 67	0.064 54

#### 4 应用实例

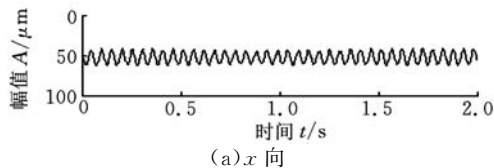
为验证本文方法的有效性,本文对转子稳速运行阶段引起的振动进行了实际测试实验。如图 7 所示,第一通道数据为转速脉冲,由光电转速传感器采集而得,第二通道数据为水平振动信号(x 向),第三通道数据为垂直振动信号(y 向),二、三通道的振动信号由电涡流传感器采集而得,四通道数据为实验台振动信号,由速度传感器采集备



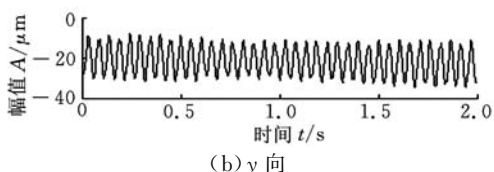
图 7 转子实验台信号采集系统

用。采样频率为512Hz,采集卡选用4位同步数据采集卡,并加入滤波放大器进行数据的预处理,采样数据长度为11 000。

图8是转子在稳定转速下运行测得的 $x$ 向和 $y$ 向的振动时域图,得到信号的实际转速为2820r/min,工频为47Hz。图9是传统比值校正得到的 $x$ 向和 $y$ 向的频域图,图10为经细化10倍后采用相位差法2校正后的频域图,图11是经细化10倍后采用相位差法2校正后得到的二维全息谱图,为了便于比较,图12给出了传统比值校正得到的二维全息谱。

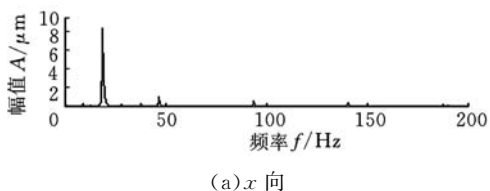


(a)  $x$  向

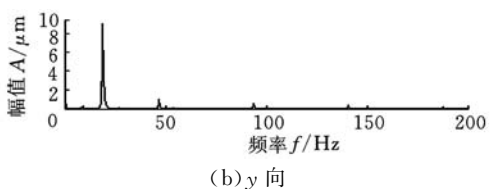


(b)  $y$  向

图8  $x$ 向和 $y$ 向振动信号时域图

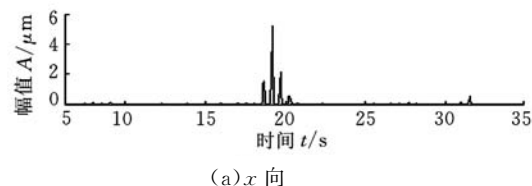


(a)  $x$  向

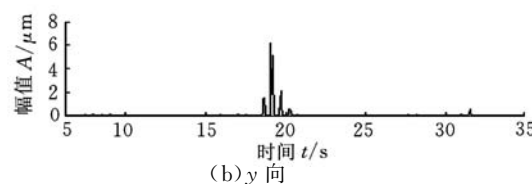


(b)  $y$  向

图9  $x$ 向和 $y$ 向振动信号频域图



(a)  $x$  向



(b)  $y$  向

图10 中心频率为19Hz的细化区间的频域图

从图9可以看出,分数谐波分量接近0.5倍频,且幅值明显大于其他倍阶频,而引起轴振动0.5倍频谐波分量幅值高的主要原因包括油膜涡

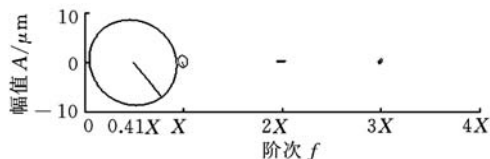


图11 细化+相位差法2得到的全息谱图

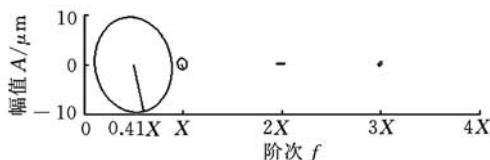


图12 传统比值校正得到的全息谱图

动和管道激励,单从谱图上我们很难确定具体是哪一种故障。油膜涡动是由润滑油集结在转子的一侧形成油团引起的,不可能只在一个方向上出现,理论上应该是各个方向相等,表现在全息谱图上其离心率很小;而管道激励往往是单方向的,表现在全息谱图上其离心率很大。对比图11、图12可知,倍阶全息谱大致相同,而在0.41X处,全息谱图差异较大,主要原因在于采用本文方法分析后,消除了密集频谱干扰,频域图如图10所示,提取出的特征谱线幅值、相位信息更加精确,图12中0.41X二维全息谱离心率更小,更接近于一个圆,这与油膜涡动故障吻合,因此我们能确认故障类型为油膜涡动。

## 5 结论

(1)针对全息谱在密集频谱下精度降低的问题,本文提出了基于频谱细化和相位差校正的全息谱分析方法,在密集频谱及噪声环境下提高了全息谱的分析精度和分辨率。

(2)仿真及对柔性转子实验台振动信号的分析结果表明,本方法能有效地提高分析精度,更加精确有效地诊断旋转机械的故障,有较高的工程应用价值。

(3)如何在样本数据有限的情况下实现密集频率成分的校正是一个难点,需要进一步的深入研究。

## 参考文献:

[1] 屈梁生,史东峰.全息谱十年:回顾与展望[J].振动、测试与诊断,1998,18(4):235-242.  
 [2] 汤宝平,陈建波,章国稳.基于相位差校正法的全息谱研究[J].振动与冲击,2009,28(8):99-102.  
 [3] 屈梁生.机械故障的全息诊断原理[M].北京:科学出版社,2007.  
 [4] 段虎明,秦树人,李宁.离散频谱的频率抽取法[J].振动与冲击,2007,26(7):59-62.

# 基于容错度自适应支持向量机的液压泵故障诊断

吴丹<sup>1,2</sup> 金敏<sup>1</sup>

1. 湖南大学,长沙,410082      2. 三一智能控制设备有限公司,长沙,410100

**摘要:**针对已有在线故障诊断方法在数据量大、噪声强条件下分类速度较低、分类精度不够高等问题,结合液压泵故障类别数目大、工作环境恶劣的特点,提出了一种适用于混凝土泵车液压泵在线诊断的状态识别算法——容错度自适应支持向量机。该方法主要从四个方面对分类速度做了改进:①引入容错度因子进行模型训练;②优先选择能将某一类故障样本单独分离出来的二分类器;③在满足②的基础上选择平均支持向量机少的分类器;④引入增量学习算法对参数进行自适应调整,提高多故障诊断中对新故障类别和新故障数据的适应性,保证系统的分类精度。通过对混凝土泵车的液压泵故障诊断,证明了该方法在明显提高分类速度的同时保证了较高的分类精度。

**关键词:**容错度因子;增量学习;支持向量机;多分类;故障诊断

**中图分类号:**TP1      **文章编号:**1004-132X(2011)21-2582-06

## New Method Based on Fault-tolerant Adaptive SVM to Fault Diagnosis of Hydraulic Pump

Wu Dan<sup>1,2</sup> Jin Min<sup>1</sup>

1. Hunan University, Changsha, 410082

2. Sany Intelligent Control Equipment Co., Ltd, Changsha, 410100

**Abstract:** According to poor performance of the traditional method in large dataset and strong noise environment, the various kinds of fault class and atrocious work conditions of hydraulic pumps, a novel state recognition method called fault-tolerant adaptive SVM (FTASVM) was proposed herein. It achieved a fast classification by: ① importing fault-tolerant; ② selecting the binary SVMs which can divide one class from all other classes; ③ selecting the binary SVMs with the fewest average number of support vectors (SVs); ④ To improve the adaptability of multi-fault diagnosis, an incremental learning algorithm was imported to train the model. In order to verify the superiority of FTASVM, it was applied to the fault diagnosis of hydraulic pump of concrete pump truck. Experiments demonstrate FTASVM can speed up the test phase remarkably and remain the high accuracy of classification.

**Key words:** fault-tolerant; incremental learning; support vector machine (SVM); multi-class; fault diagnosis

## 0 引言

由于工程机械设备体系结构复杂、工作环境

恶劣,以及高荷载的长时间作业效应和疲劳效应,致使各种设备故障频发,严重威胁着人民生命和设备财产的安全。统计表明,液压泵的故障率约占所有工程机械设备故障率的 30%~40%。液压泵故障具有潜伏性,早期孕育阶段往往不易察觉,因此,实时在线监测液压泵的运行状态、早期

收稿日期:2011-06-16

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助重点项目(2008AA042802);国防科工局军用技术推广专项资助项目(2011240);中央高校基本科研业务费资助项目

- [5] 徐培民,杨积东,闻邦椿. 离散频谱分析中两个邻近谱峰参数的识别[J]. 振动工程学报,2001,14(3): 254-258.
- [6] 丁康,谢明,张彼德,等. 基于复解析带通滤波器的复调制细化谱分析原理和方法[J]. 振动工程学报,2001,14(1):29-35.
- [7] 谢明,丁康. 基于复解析带通滤波器的复调制细化谱分析的算法研究[J]. 振动工程学报,2002,15(4): 479-483.
- [8] 朱小勇,丁康. 离散频谱校正方法的综合比较[J]. 信号处理,2001,17(1):91-97.
- [9] 丁康,谢明,杨志坚. 离散频谱分析校正理论与技术[M]. 北京:科学出版社,2008.

- [10] Ding Kang, Yang Zhijian. Improvement and Anti-Noise Performance Analysis of Windowlength Changing Phase Difference Correction[J]. Journal of South China University of Technology, 2007, 35(10): 210-213.
- [11] 黄云志,徐科军. 基于相位差的频谱校正方法的研究[J]. 振动与冲击,2005,24(2):77-79,86.

(编辑 王艳丽)

**作者简介:**杜威,男,1986年生。重庆大学机械工程学院硕士研究生。主要研究方向为设备状态监测与故障诊断。汤宝平,男,1971年生。重庆大学机械工程学院教授、博士研究生导师。陈仁祥,男,1983年生。重庆大学机械工程学院博士研究生。