

# 旋转机械故障诊断中的哈尔谱研究\*

徐尹格 颜玉玲

(北京交通管理干部学院) (南京航空学院)

## 摘 要

本文将哈尔变换应用于旋转机械故障诊断之中, 并提出了用于诊断的“脉冲锐度”指标。基于付立叶分析的频谱分析是目前广泛采用的方法, 与快速付立叶变换相比, 哈尔变换具有实时性, 逼近效果好, 适用于对脉冲的提取等优点。而不足之处是受样本始点选取及样本长的影响大。对此, 本文提出了控制各次样本的等效性的方法, 改善了哈尔谱的稳定性与比较性。最后, 通过对滚珠轴承故障模拟试验台进行试验得到的结果证实了哈尔谱及脉冲锐度指标对故障的敏感性。

**关键词** 哈尔变换 实时诊断 故障诊断

## 一、引 言

机械故障诊断技术的迅速发展是工业生产向现代化发展的必然结果。由于设备的大型化、复杂化, 一旦故障发生, 不但造成巨大的经济损失, 还可能危及人身安全。旋转机械是石化工业, 发电等重要行业中的主要设备, 对旋转机械的故障诊断研究已逾二十年, 至今已出现许多诊断方法, 主要有时域的振动水平测量法, 频域内基于FFT的频谱分析, AR谱, Walsh谱分析等, 这些方法虽适用于某些情况, 但总的来说, 尚不够完善。寻求敏感而且稳定有效的诊断指标一直是人们研究的宗旨。

旋转机械的振动信号具有周期性特征。当机械运行正常时, 信号一般为平缓随机变化的, 一旦转动出现故障, 如轴承内外圈或滚动体损坏, 齿轮齿面损坏都将引起周期性间隔性冲击, 这时测量到的信号则变为脉冲型信号。

哈尔变换(HT)是归一化的正交变换。根据它的基底构造的特殊性, 哈尔谱特别适用于对脉冲的提取。由于HT矩阵元素只取1、-1和0值, 所以运算速度相当快, 能适应运行中机器的在线监测要求, 做到实时处理。这是FFT所不及的。此外, 哈尔函数对信号的逼近效果也是其它正交函数系所不及的。

当然, 哈尔谱也有其不足之处, 它的缺点是对每次分析样本的等效性要求高, 而且受采样频率大小的影响。所幸, 这些缺点都是可以设法克服。哈尔谱可望成为一种有效的诊断手段。

\* 创刊十周年暨一百期纪念特刊(I)论文。1990年1月29日收到。

## 二、哈尔变换

### 1. 哈尔函数系

哈尔函数是完备的归一化正交系，它的特点是其部分和的一致收敛性。图 1 中示出了前八个哈尔函数

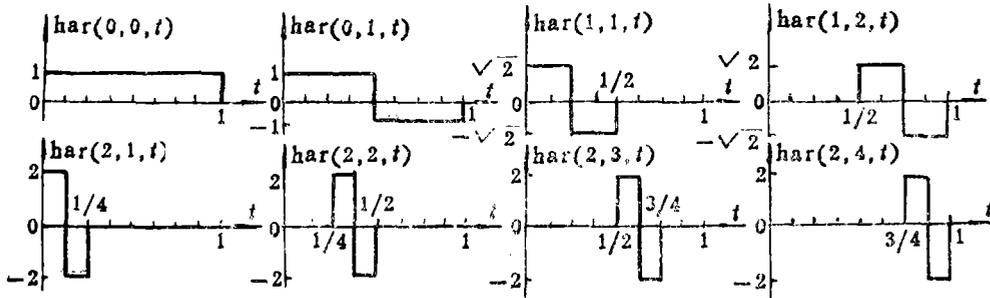


图 1 前八个哈尔函数的图形

哈尔函数的定义为

$$\text{har}(0, 0, t) = 0 \quad (t \in [0, 1])$$

$$\text{har}(r, m, t) = \begin{cases} 2^{r/2} & \left( \frac{2m-2}{2^{r+1}} \leq t < \frac{2m-1}{2^{r+1}} \right) \\ -2^{r/2} & \left( \frac{2m-1}{2^{r+1}} \leq t < \frac{2m}{2^{r+1}} \right) \\ 0 & (t \text{ 为 } [0, 1] \text{ 内其它点}) \end{cases}$$

$$(0 \leq r < \log_2 N, 1 \leq m \leq 2^r)$$

当  $t$  在  $[0, 1]$  区间外时，取值为  $[0, 1]$  内的周期延拓。

由哈尔函数的定义，不难证得它的正交性以及完备性。

### 2. 哈尔变换的定义

哈尔矩阵是通过哈尔函数离散采样形成的。假如， $8 \times 8$  阶哈尔矩阵为

$$[H]_{8 \times 8} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} & -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{2} & \sqrt{2} & -\sqrt{2} & -\sqrt{2} \\ 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -2 \end{pmatrix}$$

归一化得：

$$[H]_{8 \times 8} = \frac{1}{\sqrt{8}} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} & -\sqrt{2} & -\sqrt{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sqrt{2} & \sqrt{2} & -\sqrt{2} & -\sqrt{2} \\ 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -2 \end{pmatrix}$$

对于 $N$ 维数组 $\{X(N)\}$ ，其哈尔变换（或称哈尔谱）定义为：

$$\{H(N)\} = [H]_{N \times N} \cdot \{X(N)\}$$

### 三、信号的脉冲锐度指标

信号中脉冲的尖锐度在哈尔谱上表现为在不同的序列区的谱分量大小，脉冲愈小，则在愈高序列区具有较大分量。根据哈尔变换的基底构造，在第 $2^{k-1}$ 到 $(2^k-1)$ 序列区间内各谱分量表示了同样锐度的脉冲成份，据此，我们定义下列脉冲锐度指标， $((M+1)$ 个)

$$\begin{aligned} I(0) &= H^2(0) \\ I(1) &= H^2(1) \\ I(2) &= H^2(2) + H^2(3) \\ I(3) &= H^2(4) + H^2(5) + H^2(6) + H^2(7) \\ &\vdots \\ I(M) &= \sum_{k=2^{M-1}}^{2^M-1} H^2(k) \end{aligned}$$

其中  $M = \log_2 N$  ( $N$ 为数组的维数)。

由以上定义的脉冲锐度指标具有能量的量纲，它们表示了原信号中不同锐度脉冲的成份大小。

### 四、哈尔变换(HT)的特点及在应用中的具体实施

HT与FFT相比，有如下优缺点：

- 优点：1. 运算速度快，仅需 $2(N-1)$ 次加减法和 $N$ 次乘法，  
 2. 用较少分量即能很好地逼近原信号；  
 3. 适合于对脉冲信息的提取，对故障敏感。

- 缺点：1. 在每次分析时，由于样本始点选取不同，会引起哈尔谱稳定性差；  
 2. 不同的采样频率对哈尔谱有较大的影响。

针对HT的不足之处，我们在具体分析中采取了如下办法：

1. 为了保证每次样本的等效性，我们以主轴转速信号来控制样本的选取，使每次样本在同样的初始位置取点，样本长为**主轴转动周期的整数倍**。

2. 由于故障诊断一般都是基于状态间比较的, 所以采样频率的影响不大, 只要保证比较时用同样的采样频率即可。最佳采样频率的选取应视具体情况而定。

## 五、实验过程和结果分析

图2为一滚动轴承故障模拟试验台。

### 1. 试验台及测试装置

试验台由滚动轴承(306型两个)、轴、电机及皮带传动装置组成。测试仪器包括加速度计、电荷放大器、涡流传感器, 全部分析在Super III/XT微机上完成。机内带有A/D转换设备。

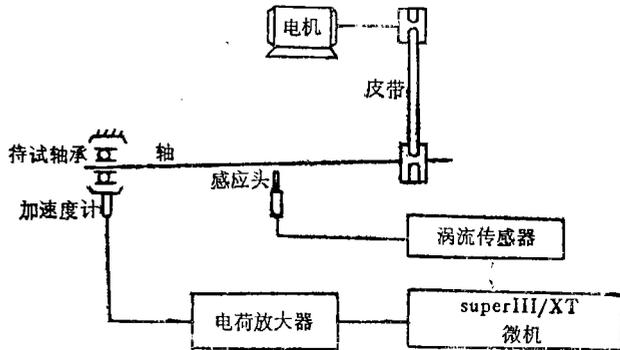
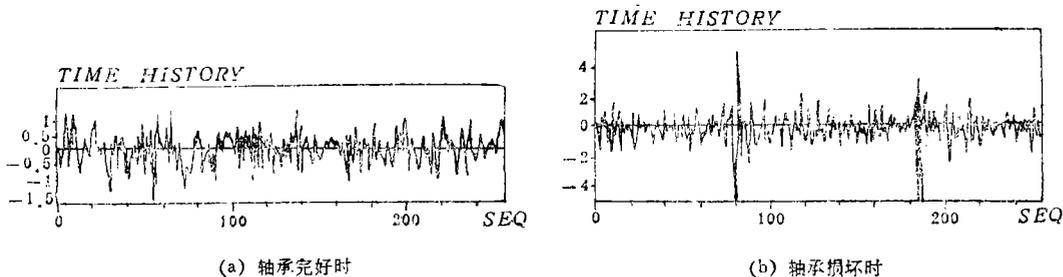


图2 试验装置图

### 2. 试验结果及对比

在试验过程中, 我们分别在轴承完好以及损坏(由人工破坏来模拟。在此, 是在轴承外圈内切割了一宽0.2mm, 深2mm的凹槽)时测试了轴承轴的加速度信号, 并以涡流传感器输出的转速信号作为控制信号, 使每次分析样本起点相同, 样本长为转轴转动周期的整数倍。由于每周期内样本点数不一定为2的整数次幂, 所以必须第二次取样, 在此用抛物线插值来实现。图3、图4及图5中绘出了在轴承完好以及损坏时的时域曲线、哈尔谱(幅值的平方的量纲)和八个脉冲锐度指标连成的曲线。

由图3中可见, 当轴承损坏时, 信号中出现了脉冲, 表现在哈尔谱图上(见图4), 各序列所占成份由较为均布变成窄带序列形式, 全部能量集中在较高序列区, 而在脉冲锐度指标曲线上(图5), 第9个脉冲锐度指标 I(8)有很明显的增加(大约为完好轴承的九倍左右), 是最敏



(a) 轴承完好时

(b) 轴承损坏时

图3 加速度信号的时域离散序列

感指标。

图6为基于FFT分析的功率谱图。显然，它对故障的敏感度不如哈尔谱以及脉冲锐度指标 I(8)。

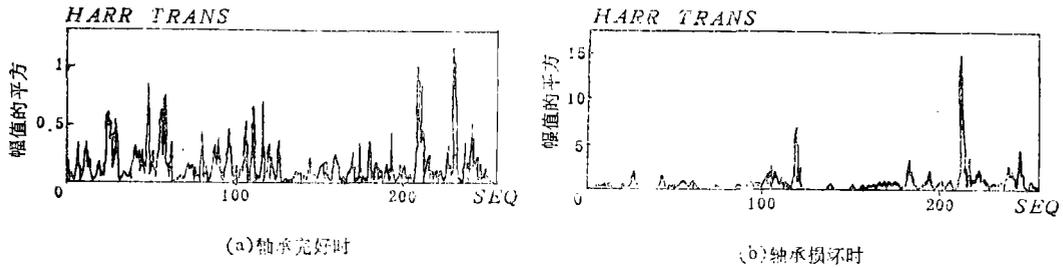


图4 时域信号的哈尔谱

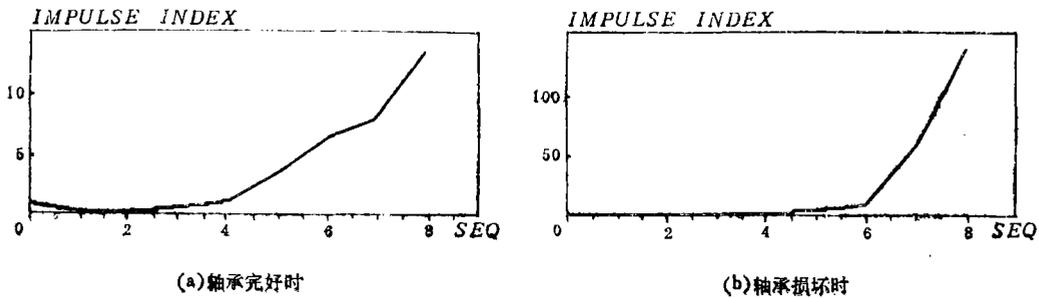


图5 八个脉冲锐度指标曲线

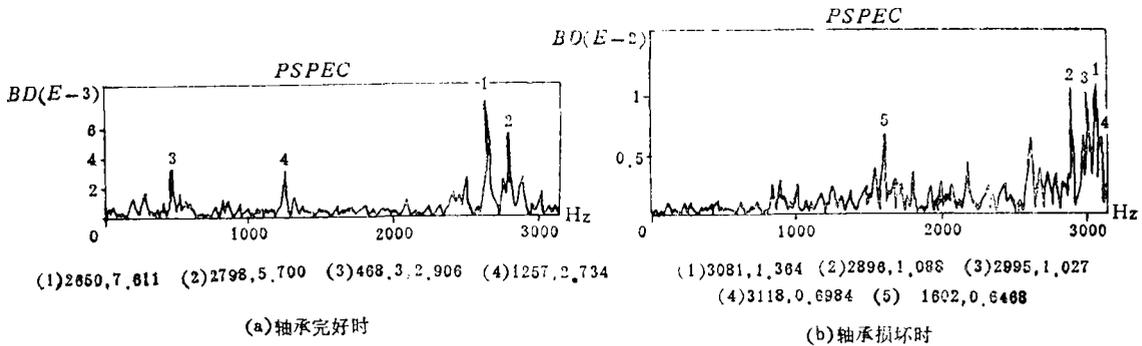


图6 功率谱图

## 六、结 束 语

哈尔谱的特点是运算速度快，其部分和具有一致收敛性。而不足之处是对样本起点选取和样本长有较大影响。本文通过控制每次样本的等效性保证了哈尔谱的稳定性和可比性。

根据哈尔变换的基底构造形式，本文还提出了具有物理意义的脉冲锐度指标，它们直接反映了信号中脉冲的尖锐度，因而对故障信号十分敏感，而且稳定性好，易于比较，我们试图使哈尔谱及脉冲锐度指标分析将为机械故障诊断开辟一条新途径。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Ahmed, N. and K. R. Rao, *Orthogonal Transforms for digital Signal Processing*, Berlin-Heidelberg, New York (1975).
- [ 2 ] 柳重堪, < 正交函数及其应用 >, 国防工业出版社 (1982).

## Research on Haar Spectrum in Fault Diagnosis of Rotating Machinery

Xu Yin-ge

(Beijing Jiaotong Manager College, Beijing)

Yan Yu-ling

(Nanjing Aeronautical Institute, Nanjing)

### Abstract

In this paper, Haar Transform (HT) is used in the fault diagnosis of rotating machinery, and the "Impulse Sharpness" is presented as a diagnostic index. At present, Fourier Spectrum analysis is most widely used. Compared with FFT, HT is more rapid in computation and more effective in discrete approximation. It's very suitable for the extraction of pulses in the signal. However, HT has some shortcomings. It's greatly affected by the starting point and length of the sample. Here, the authors present a method to improve the stability and comparability of Haar Spectrum. The fault imitating test of rolling bearing is carried out, and the results obtained have verified the sensitivity of Haar Spectrum and Impulse Index to the fault.

**Key words** Haar transform, real-time diagnosis, fault diagnosis