

机械振动特征分析中的信号处理 技术与微机特征分析系统

曲 绚 唐丙阳 温熙森

(精密机械与仪器系)

摘 要 文中指出抑制阶比混迭和泄漏是建立一套完整的微机特征分析系统中需要解决的二个关键的信号处理问题。提出了阶比滤波器是抑制阶比混迭有效和实用的方法；并研制频率比合成器以抑制泄漏。介绍了由频率比合成器、阶比滤波器、TMS32010数据采集装置、主机和绘图仪所组成的微机特征分析系统。最后给出了该微机特征分析系统对轴承进行故障诊断的结果。

关键词 特征分析，频率合成器；阶比分析，阶比滤波器，阶比泄漏，阶比混迭

分类号 TH113.1

前 言

特征分析技术是研究旋转机械振动特征的各种运动频率及其谐波的一系列数据处理技术。一般说来，旋转机械存在有两类性质的振动：一类是与转速无关的振动，一般系统的固有振动就属于这一类；另一类是与转速有关的振动，如迴转零部件的缺陷所产生的振动。常规频谱分析法分析第一类振动信号是有效的和可行的，对于第二类振动现象，对于由于负载变化或处于起止状态的转速波动的情况，由于振动信号与转速有关，若用常规谱分析则容易造成谱值模糊不准，这样引出了特征分析中的阶比分析方法。

1 阶比分析方法与采样定理

阶(E)的定义为每转振动的次数

$$E = \text{振动次数/每转} \quad (1)$$

它与频率的关系为：

$$f = \frac{\text{RPM}}{60} \cdot E \quad (2)$$

式中：RPM—转速，转/分

令 $f_n = \frac{\text{RPM}}{60}$. f_n 为旋转频率, 转/秒。

则 $f = f_n \cdot E$ (3)

显然, 阶只与每转振动的次数有关, 不管每秒转动的次数, 这样很容易识别出与旋转有关的振动, 它们常常代表了部件和结构的旋转特征。阶比分析方法是通过对振动信号进行整周期等角度采样, 通过 FFT, 将角域信号转换成阶域信号, 通过谱估计, 谱图绘制得到各类阶比谱图。

必然提出这样一个问题: 在阶比分析时, 采样定理还适用吗?

设模拟信号为 $x_a(\theta)$ (θ 为转角连续变量), 它在角域理想采样后的情况下:

采样脉冲为

$$M(\theta) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(\theta - n\Delta\theta) \quad (4)$$

按等角采样后的输出为

$$\hat{x}_a(\theta) = x_a(\theta)M(\theta) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_a(\theta)\delta(\theta - n\Delta\theta) \quad (5)$$

$x_a(\theta)$ 的付氏变换为

$$X_a(\theta) = \mathcal{F}[x_a(\theta)] = \int_{-\infty}^{\infty} x_a(\theta)e^{-j2\pi E\theta}d\theta \quad (6)$$

$$\hat{X}_a(\theta) = \mathcal{F}[\hat{x}_a(\theta)] = \mathcal{F}[x_a(\theta)M(\theta)] \quad (7)$$

采样脉冲为周期函数, 则

$$M(\theta) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(\theta - n\Delta\theta) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} a_m e^{j2\pi m E_s \theta} \quad (8)$$

采样阶次 $E_s = 2\pi/\Delta\theta = 1/\Delta r$ (9)

则 $a_m = \frac{2\pi}{\Delta\theta}$ (10)

$$M(\theta) = \frac{2\pi}{\Delta\theta} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} e^{jm2\pi E_s \theta} \quad (11)$$

将(11)式代入(7)式得

$$\begin{aligned} \hat{X}_a(\theta) &= \int_{-\infty}^{\infty} \hat{x}_a(\theta)e^{-j2\pi E\theta}d\theta = \int_{-\infty}^{\infty} x_a(\theta)M(\theta)e^{-j2\pi E\theta}d\theta \\ &= \frac{2\pi}{\Delta\theta} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_a(\theta)e^{-j2\pi(E-E_s m)\theta}d\theta \\ &= \frac{2\pi}{\Delta\theta} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} X_a(E - mE_s) \end{aligned} \quad (12)$$

很明显, 在角域采样后, 阶比谱依 E_s 作周期延拓, 保证阶比谱不混迭的充要条件是

$$E_s \geq 2E_{\max} \quad (13)$$

2 阶比混迭与抑制阶比混迭的方法

上面已推出阶域采样定理为

$$E_s \geq 2E_{\max} \quad (14)$$

在频谱分析中，往往通过滤波或提高采样频率以满足采样定理。而在阶比分析中，如果理想的等角采样，需要使用光电码盘，这样 E_s 是固定的，即使不使用光电码盘，用频率变换的方法， E_s 也是有限的。为避免混迭，只有滤波，滤除 $E_s/2$ 以上的阶次，而恰恰我们没有阶比滤波器，截止频率与截止阶次是两个不同的概念，同一阶次在不同转速下对应于不同的频率，这种关系为

$$f_c = \frac{\text{RPM}}{60} \cdot E_c \tag{15}$$

显然，当 E_c 为固定值时， f_c 是 RPM 的函数，借助于通用的频率滤波器，在连续的变速过程的角域信号采样时，改变滤波器的截止频率是不可行的。在某一截止频率下，低速时， $E_s/2$ 阶附近可能出现混迭；高速时，又可能将有用信号 $E_s/2$ 滤除了，所以在没有阶比滤波器的情况下， $E_{\text{max}} \geq E_s/2$ 只是保证阶比谱不混迭的必要条件。

已知截止频率 f_c 与截止阶次的关系为

$$f_c = f_n E_c \tag{16}$$

当 E_c 固定， f_n 变化时， f_c 也随之变化。所以阶比滤波器实质上是一截止频率随转速线性变化的低通跟踪频率滤波器。因此采用开关电容滤波的方法设计了阶比滤波器，其滤波器的中心频率由外时钟控制。图1给出了阶比滤波器的电路原理框图。

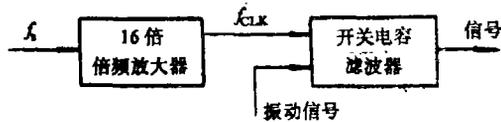


图1 阶比滤波器原理框图

3 泄漏与抑制泄漏误差的方法

当对角域随机信号采样时，一般认为这种信号为实平稳随机过程，其中含有一定的周期分量，它以旋转件旋转的整圈数为周期，很自然在某一转速下采样时，必须采得旋转件的整圈数，否则频谱将产生泄漏。

为保证整圈数采样，目前一般采用光电码盘，但光电码盘在使用中受到了一些限制。一方面光电码盘安装麻烦，在某些场合受空间限制无法安装，并且当光电码盘上的孔数定了，其采样阶次也就定了；另一方面在工程应用中还有另一类问题，在一些齿轮传动装置中，待测轴是封闭安装的没有外伸端，无法给出旋转信号。但与该轴传动比已知的另一轴旋转频率是可测的，这时就考虑借助于这一可测轴对待测轴进行测速。这样提出了传动比修正的问题。

假设待测轴转速为 RPM1，可测轴转速为 RPM2，二轴之传动比为 $\delta_1 = N_2/N_1$ ，一般情况下 δ_1 为有理数。也就是说可测轴与待测轴之间的圈数关系不为整圈关系，为保证对待测轴的整圈数采样，我们考虑对可测轴的转速施以某种变换 δ_2 ，使

$$\text{RPM1} = \text{RPM2}' \tag{17}$$

其中 $\text{RPM2}' = \delta_2 \text{RPM2}$ (18)

已知转速与旋转频率之间的关系为

$$f = \text{RPM}/60 \tag{19}$$

得

$$f'_2 = \delta_2 f_2 \tag{20}$$

$$f_2 = \delta_1 f_1 \tag{21}$$

由(20)、(21)式得

$$f'_2 = \delta_1 \delta_2 f_1 \tag{22}$$

为满足式(1)的条件，得

$$\delta_2 = 1/\delta_1 \tag{23}$$

若对可测轴的旋转频率 f_2 施以 δ_2 的变换，所得的 RPM2' 与 RPM1 相一致，通过对 RPM2' 的测速就保证了对 RPM1 的整周期采样，避免了泄漏。由上面的推导可知，转动比的修正实质上是频率变换的问题。频率比合成器就是用来实现传动比修正和取代光电码盘的硬件装置，它用来实现频率变换二部分功能：

第一部分为阶比部分，实现对旋转频率的 2^N ($N=1, 2, \dots, 10$) 倍频，产生外时钟采样脉冲序列。

设旋转频率为 f_1 ，则外时钟采样频率 f_{s1} 为

$$f_{s1} = 2^N \cdot f_1 \quad (N=1, 2, \dots, 10) \tag{24}$$

第二部分为比值部分，用来修正传动比，修正系数为 δ_2

$$\delta_2 = \frac{1}{\delta_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\text{RPM1}}{\text{RPM2}} \tag{25}$$

设输入频率为 f_{s1} ，则输出频率 f_0 为

$$f_0 = \delta_2 f_{s1} = \frac{N_1}{N_2} f_{s1} \tag{26}$$

频率比合成器采用锁相与频率合成技术。图 2 给出了频率比合成器原理框图。

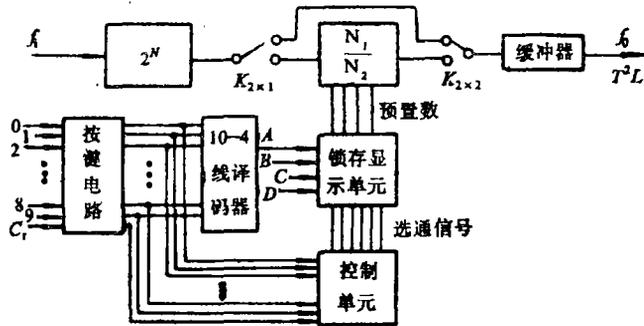


图 2 频率比合成器原理框图

4 微机特征分析系统

微机特征分析系统由外部装置、数据采集装置、主机和绘图仪四部分组成。

1. 外部装置

外部装置用来实现信号提取的功能，通过位移传感器或加速度传感器拾取振动信号，由光—电转换方式给出旋转信号。还有一些常规的测试仪器。外部装置中最重要的

是阶比滤波器和频率比合成器。

2. 数据采集装置^[3]

其数据采集装置是在 TMS32010 单片信号处理机上开发而成的。采集方式有：时域信号采集、角域信号采集，具有转速自动跟踪采集、外触发采集的功能。

3. 主机

主机用来实现操作控制、FFT 和谱估计的数据处理，主机选用 IBM PC/XT。

4. 绘图仪

绘图仪将分析结果按一定形式绘制出特征分析各类谱图。

微机特征分析系统框图如图 3 所示。

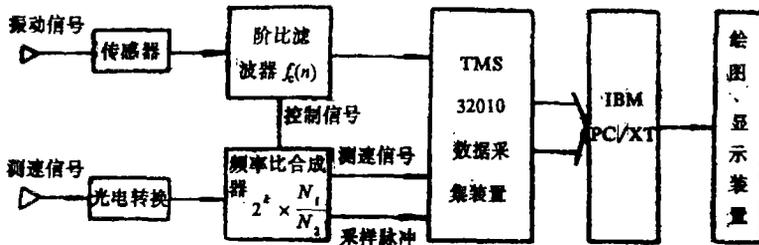


图 3 微机特征分析系统框图

5 实 验

诊断对象：207 轴承。轴承内环上有条 $0.1\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ 的缝隙，轴承安装在齿轮箱的高速轴上，加速度传感器 YD-12 放在箱盖上，光电传感器 SZGB-11 给出转速信号，振动信号经共振解调器^[5]后送入数据采集装置，旋转信号经频率比合成器后得出转速信号和采样脉冲序列，测试系统如图 4 所示。

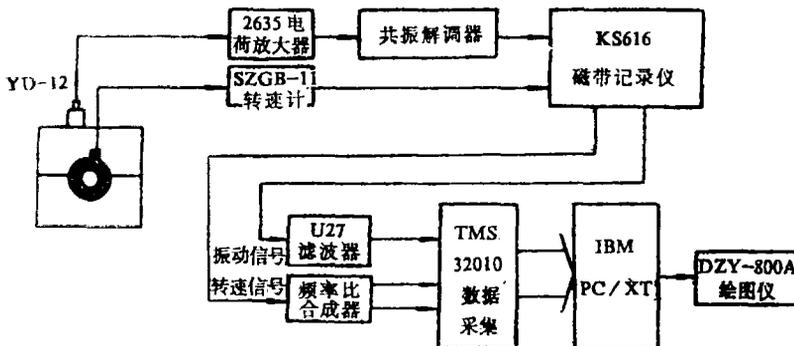


图 4 轴承故障诊断测试系统框图

对信号进行了频率转速谱阵、阶比转速谱阵分析。频率转速谱阵分析时，取滤波器截止频率 $f_c = 400\text{Hz}$ ，采样频率 $f_s = 1000\text{Hz}$ ，采样点数 $N = 512$ ，转速范围 $800\text{RPM} \sim$

1200RPM, 转速间隔为 25RPM, 其谱阵见图 5.

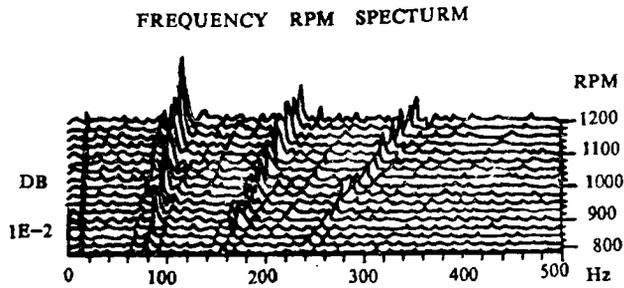


图 5 频率转速谱阵

谱阵中最明显的一条射线对应于内环 $0.1\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ 的缝隙所产生的振动基频分量, 800RPM 时, 频率值为 78Hz, 1200RPM 时, 频率值为 120Hz, 其基频频率值和能量均随转速增高而增高, 在基频的二、三次谐波处均出现了波峰。谱阵分析与理论分析结果相一致^[5]。

相应的阶比谱阵 ($f_c=1000\text{Hz}$, $E_s=256$, $N=256$, 800~1200RPM, $\Delta\text{RPM}=25\text{RPM}$) 示于图 6, 从图中可以看出, 相应于频率谱阵中的基频、二、三次谐波, 阶比谱阵中 6, 12, 18 阶振动分量, 其能量也随转速的增大而增高, 与频率谱阵分析结果相一致。

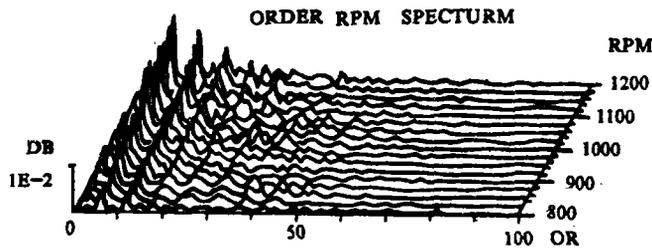


图 6 阶比转速谱阵

6 结 论

本文在讨论特征分析中信号处理问题的基础上, 根据工程应用的需要, 提出并实现了一套完整的微机特征分析系统, 其中包括阶比滤波器和频率比合成器, 它们是特征分析系统中抑制阶比混迭和泄漏的关键外部装置。采用频率比合成器、TMS32010 数据采集装置和 IBM PC/XT 等组成的微机特征分析系统所进行的实验结果证明了整个系统可靠、性能良好。

参 考 文 献

- [1] 徐敏. 机械设备故障诊断与振动信号处理技术展望. 动态分析与测试技术, 1986, (2)
- [2] Qu Xuan, Tang BingYang, Wen Xisen. Researchs and Development of Signature

Analysis System in Microcomputer, IASTED 88

- [3] 曲绚. 微机特征分析系统的开发与研究. 国防科大硕士学位论文
- [4] 戴诗亮. 随机振动与实验技术
- [5] 范新勇. 滚动轴承疲劳故障的精密诊断. 国防科大硕士学位论文

Signal Processing Technique in Signature Analysis and the Signature Analysis System in the Microcomputer

Qu Xuan Tang Bingyang Wen Xisen

Abstract

This paper presents that the order ratio aliasing and leaking are two main problems of signal processing in the signature analysis and discusses the reasons for the order ratio aliasing and leaking. The paper presents that the order ratio filter (ORF) is a good method of restraining order ratio aliasing. The frequency ratio synthesizer (FRS) is developed for restraining leakage and engineering applications. The ORF and FRS are the main hardware devices in the whole signature analysis system in a microcomputer.

The paper gives the design principles, circuit block diagrams, system block diagram of the signature analysis system in a microcomputer which is composed of the FRS, TMS32010 data acquisition device, master computer and plotter.

Finally, the results of fault diagnosis using the system to a ball bearing are given.

Key words: signature analysis, frequency synthesizer, order ratio analysis, order ratio filter, order ratio leaking, order ratio aliasing