

基于 LabVIEW 的阶次分析系统设计与仿真

沈宫新¹, 刘其和^{1,2}

(1. 南京科技职业学院 信息工程学院, 南京 210048;

2. 江苏省流体密封与测控工程技术研究开发中心, 南京 210048)

摘要: 对于非稳态振动信号, 使用 FFT 分析会产生谱模糊现象; 为了消除谱模糊, 最常用的方法是计算阶次跟踪, 目前计算主要采用商业软件进行; 文章根据阶次分析流程, 计算转速剖面, 采用拉格朗日 7 点插值算法; 计算重采样时刻, 采用给定角加速度阈值进行分段插值方法; 角域重采样, 采用滑动低通滤波插值方法; 基于 LabVIEW 设计了阶次分析软件系统; 通过仿真分析表明, 设计的基于 LabVIEW 的阶次分析系统可以有效的解决谱模糊现象。

关键词: 键相脉冲; 转速剖面; 重采样; 低通滤波器

Design and Simulation of Order Analysis System Based on LabVIEW

SHEN Gongxin¹, LIU Qihe^{1,2}

(1. School of Information Engineering, Nanjing Polytechnic Institute, Nanjing 210048, China;

2. Fluid Sealing Measurement and Control Engineering Research and Development Center of Jiangsu Province, Nanjing Polytechnic Institute, 210048, Nanjing, China)

Abstract: For the unsteady vibration signal, spectrum ambiguity will be produced by FFT analysis. In order to eliminate spectral ambiguity, the most commonly used method is to calculate order tracking, which is mainly carried out by commercial software. In this paper, according to the order analysis process, the speed profile is calculated, and the Lagrange 7-point interpolation algorithm is used; the resampling time is calculated by using the given angular acceleration threshold segmentation interpolation method; the angular domain resampling adopts the sliding low-pass filter interpolation method. The order analysis software system is designed based on LabVIEW. Through the analysis of simulation signal, the order analysis system based on LabVIEW can effectively solve the spectrum ambiguity phenomenon.

Keywords: keyphasor pulse; speed profile; resampling; low pass filter

0 引言

振动信号是分析机械故障诊断的重要部分, 传统的方法是用傅里叶变换进行谱分析, 傅里叶变换对于稳态信号效果明显, 启停或变速旋转分析时, 信号的基频及谐波是非稳态的, 使用傅里叶变换等时间间隔采样, 会出现每轴的采样数不相同。谱图上的谱分量会不断的移动, 在一些频段上产生严重的频率模糊现象。对于旋转机械启动、停车及变速旋转导致的基频及谐波变化, 适用的方法主要有 SFFT 三维谱法、Kalman 时域滤波法、自适应递推滤波的 ARX 方法、计算阶次跟踪 (COT) 法等^[1-6]。

计算阶次跟踪 (COT) 法的核心思想是对旋转机械振动信号进行等角度间隔重采样, 将时域上的非稳态信号转换为稳态的角域信号。以角度为变量进行傅里叶变换, 即可获得稳态不模糊的基频和谐波阶次, 从而规避了频域的频率模糊现象。目前计算阶次跟踪 (COT) 法主要是借助于商业软件进行分析, 涉及算法及软件设计的几乎没有。本文对阶次分析的相关算法进行了分析, 在算法分析的基

础上先基于 LabVIEW 设计了阶次分析软件, 最后使用该软件对仿真振动信号进行阶次分析。

1 阶次分析流程

基于等时间间隔 T 冲激采样振动信号和转速键相信号; 分离振动信号和转速键相信号, 对转速键相信号采样冲激序列进行处理获取键相时标向量 $T [M]$; 根据键相时标向量计算转速剖面; 根据转速剖面中的转速自适应定阶; 依据键相时标向量及其相邻时标转过的角度 (2π), 按照给定的算法, 用最高阶作为插值系数对键相时标向量插值, 得到等角度间隔的重采样时标数组; 结合振动信号冲激采样序列和重采样时标数组, 使用滤波插值的方法重采样, 得到等角度间隔的振动信号^[7]。在此信号的基础上即可进行相关的阶次分析。阶次分析系统设计的核心环节是重采样时刻的计算及等角度间隔重采样, 流程如图 1 所示。

2 转速剖面的计算

2.1 键相时标向量的计算

转速剖面获取流程为: ①信号采集; ②键相脉冲信号/

收稿日期: 2020-11-15; 修回日期: 2021-01-04。

基金项目: 江苏省第五期“333 工程”科研项目 (BRA2017482)。

作者简介: 沈宫新 (1975-), 男, 安徽滁州人, 硕士, 讲师, 主要从事计算机测控方向的研究。

引用格式: 沈宫新, 刘其和. 基于 LabVIEW 的阶次分析系统设计与仿真[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(7): 180-184.

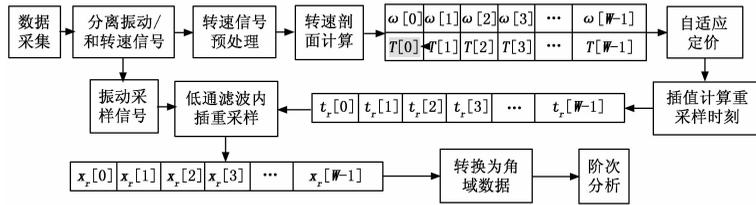


图 1 阶次分析系统设计流程

振动信号分离获取键相脉冲信号波形采样数据; ③根据转速键相脉冲采样序列自动计算键相脉冲阈值 v_k ; ④根据 v_k 进行波形整形; ⑤键相脉冲信号边沿侦测; ⑥计算键相脉冲信号上升沿的时标向量 $\mathbf{T} [M]$ 。

2.2 转速向量的计算

根据键相脉冲采集过程, 转速脉冲的到达时刻是转角的函数 $t = f(\theta)$, 两相邻脉冲到达时刻的转角间隔是一样的, 对于每转一个键相脉冲, 角步长 $h = 2\pi$ 。

依据圆周运动学, 圆周运动的角速度为:

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt} = \left(\frac{dt}{d\theta}\right)^{-1} = (f'_{\theta})^{-1} \quad (1)$$

键相时标 $\mathbf{T} [M]$ 、函数 $t = f(\theta)$ 与转角的对应关系如表 1 所示。

表 1 转角与键相时标的对应关系表

$\mathbf{T}[0]$	...	$\mathbf{T}[i]$	...	$\mathbf{T}[M-1]$
$t_0 = f(\theta_0)$	...	$t_i = f(\theta_i)$	...	$t_{M-1} = f(\theta_{M-1})$
$\theta_0 = 0$	...	$\theta_i = 2\pi(i-1)$	...	$\theta_{M-1} = 2\pi(M-2)$

从式 (1) 可以看出, 依据表 1 对函数 $t = f(\theta)$ 建立插值多项式 $t = L_m(\theta)$, 取 $L'_m(\theta)$ 的值作为 $f'(\theta)$ 的近似值, 就可以计算出 $\mathbf{T} [i]$ 对应的 $\omega [i]$ 。为了确保精度, 使用拉格朗日 7 点插值算法。算法模型为: $L_6(\theta) = \sum_{j=0}^6 \prod_{i=0, i \neq j}^6 \left[f(\theta_i) \prod_{j=0, j \neq i}^6 \left(\frac{\theta - \theta_j}{\theta_i - \theta_j} \right) \right]$ 。令 $\theta_i = \theta_0 + ih (i = 0, 1, 2, \dots, 6; h = 2\pi)$, 进一步推导, 拉格朗日 7 点插值公式为:

$$\begin{bmatrix} L'_6(\theta_{i-3}) \\ L'_6(\theta_{i-2}) \\ L'_6(\theta_{i-1}) \\ L'_6(\theta_i) \\ L'_6(\theta_{i+1}) \\ L'_6(\theta_{i+2}) \\ L'_6(\theta_{i+3}) \end{bmatrix} = \frac{1}{180h} \cdot \begin{bmatrix} 441 & 1080 & -1350 & -1200 & -675 & 216 & -30 \\ -30 & -231 & 450 & 300 & 150 & -45 & 6 \\ 6 & -72 & -105 & -240 & -90 & 24 & -3 \\ -3 & 27 & -135 & 0 & 135 & -27 & 3 \\ 3 & -24 & 90 & 240 & 105 & 72 & -6 \\ -6 & 45 & -150 & -300 & -450 & 231 & 30 \\ 30 & -216 & 675 & 1200 & 1350 & -1080 & 441 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{i-3} \\ t_{i-2} \\ t_{i-1} \\ t_i \\ t_{i+1} \\ t_{i+2} \\ t_{i+3} \end{bmatrix}$$

$$f'(\theta_i) \approx L'_6(\theta_i)$$

当 $3 \leq i \leq M-4$ 时, 中心点所在时刻的数值微分计算式为:

$$\omega_i = \frac{1}{180h} \begin{bmatrix} -3 & 27 & -135 & 0 & 135 & -27 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{i-3} \\ t_{i-2} \\ t_{i-1} \\ t_i \\ t_{i+1} \\ t_{i+2} \\ t_{i+3} \end{bmatrix}^{-1}$$

$i = 0$ to $M-1$ 循环计算 ω_i 并存入转速数组 $\omega [M]^{[2]}$ 。

2.3 边界问题的处理

为了使时标向量的起始点和最后一个点都能作为 7 点插值的中心点, 计算前必须在 t_0 的前面插 3 个点, 在 t_{M-1} 的后面插 3 个点, 前插和后插均采用线性拟合的方法实现。将键相脉冲时标 $\mathbf{T} [M]$ 和对应的转速数组 $\omega [M]$ 绑定为一个簇, 即转速剖面。

3 自适应阶

设振动信号的最高频率为 f_{max} , 时域采样频率为 f_s , 在转速剖面的 $\omega [M]$ 中查找获得的最小角速度为 ω_{min} , 则角域信号的最大阶次为 $O_{max} = \frac{2\pi f_{max}}{\omega_{min}}$, 根据奈奎斯特定理, $f_{max} \leq f_s/2$, 则 $O_{max} \leq \frac{\pi f_s}{\omega_{min}}$ 。与时域采样定理类似, 为了避免阶次域混迭现象, 角域采样率 $O_s \geq 2O_{max}$, 才不会出现阶次混叠, 则角域重采样率为 $O_s \geq \frac{2\pi f_s}{\omega_{min}}$, 为了便于后期对重采样信号进行 FFT 变换, O_s 取大于并最接近于 $\frac{2\pi f_s}{\omega_{min}}$ 的 2 的 n 次幂, 设为 S 。S 就是后期计算重采样时刻的插值系数。

4 重采样时刻计算

计算阶次跟踪 (COT), 实质上是计算重采样时刻, 目前比较有代表性的方法有线性法、基于圆周运动方程法、基于二次曲线拟合法、基于三次样条插值法。其中线性法适用于匀角速旋转、圆周运动方程法及基于二次曲线拟合法适用于匀角加速且转速变化不剧烈旋转状态, 三次样条插值适用于转速变化比较剧烈的状态。常用的二次曲线法是基于转子连续 2 转角加速度相同的假设, 才能建立角度与时间的二次函数; 圆周运动方程法只要求一转内角加速度不变, 就能建立角度与时间的二次函数; 三次样条函数是在确保函数连续的前提下在一个脉冲区间上建立角度与时间的三次函数, 并不要求在一转内角加速度不变。本系统选择圆周运动方程法和三次样条函数法, 转速平稳阶段选择线性法。

4.1 基于圆周运动方程计算阶次跟踪

在所求得的转速剖面中, 相邻键相脉冲时标 $[\mathbf{T} [i], \mathbf{T} [i+1]]$ 对应的角速度为 $[\omega [i], \omega [i+1]]$, 对应的转角 $\theta \in [0, 2\pi]$ 。假设在一转内为匀角加速度转动, 加速度

α 恒定, 推导可得转角与时间的函数关系 $\theta(t) = \theta_i + \omega_i t + 1/2 \alpha t^2$, 令 $\theta = \theta(t) - \theta_i$, $t = \frac{\sqrt{\omega_i^2 + 2\alpha\theta} - \omega_i}{\alpha}$, $t \in [T[i], T[i+1]]$, $\theta \in [0, 2\pi]$ 。

4.2 基于三次样条曲线计算阶次跟踪

对于转速变化比较剧烈的情况, 旋转轴在一周内并不是匀角加速度旋转, 使用圆周运动方程计算重采样时刻不合适, 可以使用三次样条插值计算重采样时刻。转轴旋转一周, 转轴上某个质点的旋转时间是转轴转角的函数 $t = f(\theta)$ 。

转速剖面键相时标 $T[i]$ 、函数 $t = f(\theta)$ 与转角的对应关系见表 1。

设 $\theta_0 = 0$, $a = \theta_0 < \theta_1 < \theta_2 < \dots < \theta_{M-2} < \theta_{M-1} = b$, 因为转轴旋转一周产生一个键相脉冲, 所以步长 $h = \theta_{i+1} - \theta_i = 2\pi$ 。

设在区间 $\theta \in [\theta_i, \theta_{i+1}]$ 上的三次样条插值函数为: $Y_i(\theta) = a_i + b_i(\theta - \theta_i) + c_i(\theta - \theta_i)^2 + d_i(\theta - \theta_i)^3$, $i \in [0, M-2]$ 。

$f(\theta)$ 单调递增且连续, 满足三次样条插值的条件。

设 $m_i = S''_i(\theta_i)$, Y 完全由 $\{m_i\}_{i=0}^{M-1}$ 和 $\{f(\theta_i)\}_{i=0}^{M-1}$ 确定, 根据三次样条条件推导出 m_i 的方程如式 (2):

$$\begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 1 & 4 & 1 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_0 \\ m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_{M-2} \\ m_{M-1} \end{bmatrix} = 6h^{-2} \begin{bmatrix} \Delta f(\theta_0) - hf'(a) \\ \Delta^2 f(\theta) \\ \Delta^2 f(\theta) \\ \vdots \\ \Delta^2 f(\theta_{M-3}) \\ hf'(b) - \vdots f(\theta_{M-2}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $\Delta f(\theta_i) = \Delta f(\theta_{i+1}) - f(\theta_i)$, $\Delta^2 f(\theta_i) = f(\theta_{i+2}) - 2f(\theta_{i+1}) + f(\theta_i)$ 。

在解此方程组前, 必须确定始端边界和末端边界的导数 $f'(a)$ 、 $f'(b)$ 。对 $t = f(\theta)$ 的前 4 点 $\{\theta_i\}_{i=0}^3$ 及后 4 点 $\{\theta_i\}_{i=M-4}^{M-1}$, 使用牛顿插值公式拟合出三次多项式 $P_a(\theta)$ 、 $P_b(\theta)$, 使 $f'(a) \approx P'_a(\theta_0)$ 、 $f'(b) \approx P'_b(\theta_{M-1})$ 。式 (3)、(4) 分别为前 4 点及后 4 点的牛顿插值多项式。

$$P_a(\theta) = f[\theta_0] + \sum_{i=1}^3 f[\theta_0, \dots, \theta_i] \prod_{j=0}^{i-1} (\theta - \theta_j) \quad (3)$$

$$P_b(\theta) = f[\theta_{M-4}] + \sum_{i=1}^3 f[\theta_{M-4}, \dots, \theta_{M-4+i}] \prod_{j=0}^{i-1} (\theta - \theta_{M-4+j}) \quad (4)$$

$f[\theta_0, \dots, \theta_i]$ 为均差。

求一阶导数并代入 θ_0 、 θ_{M-1} , 可得边界条件:

$$f'(a) = P'_a(\theta_0) = \frac{-12f(\theta_0) + 18f(\theta_1) - 9f(\theta_2) + 2f(\theta_3)}{6h};$$

$$f'(b) = P'_b(\theta_{M-1}) = \frac{-2f(\theta_{M-4}) + 9f(\theta_{M-3}) - 18f(\theta_{M-2}) + 11f(\theta_{M-1})}{6h};$$

方程组 (2) 是三对角方程组, 使用先代后回代算法解此方程组, 结果存入二次微分数组 $m[M]$ 。根据计算出的二次微分数组 $m[M]$ 和键相时标数组 $T[M]$, 计算三次样条插值函数 $S_i(\theta)$ 的系数如下:

$$a_i = T[i]; b_i = \frac{T[i+1] - T[i]}{h} - \frac{h}{6}(m[i+1] + 2m[i]); c_i = \frac{m[i]}{2}; d_i = \frac{m[i+1] - m[i]}{6h}, \text{其中 } i \in [0, M-2]。$$

4.3 重采样时刻的计算流程

三次样条的计算量很大, 基于分段插值思想, 对应变化比较平缓的段使用线性插值或圆周方程插值, 可以极大的减少计算量。根据转速剖面中相邻两点可以计算出转轴旋转的角加速度 $\alpha_i = \frac{\omega[i+1] - \omega[i]}{T[i+1] - T[i]}$, 设定一个阈值 $\alpha_k = 10$, $|\alpha_i| \leq 0.01$ 使用线性插值, $0.01 < |\alpha_i| \leq \alpha_k$ 使用圆周运动方程法插值, $|\alpha_i| > \alpha_k$ 使用三次样条函数插值。重采样时刻计算流程如图 2 所示, 内循环用于区间 $\theta \in [\theta_i, \theta_{i+1}]$ 内插值, 循环 S 次, S 为最大阶, 角增量 $d\theta = 2\pi/S$, 插值结果存入两维数组 $TR[M][S]$ 的第 $i-1$ 行。外循环 M 次, M 为键相脉冲个数。 $TR[M][S]$ 为计算辅助数组, 最后将该两维数组按行拆分并连接成一维数组 $t_r[W]$ ($W = M \times S$), $t_r[W]$ 中存放的就是角域重采样时刻。

5 重采样

鉴于重采样时刻分布是非均匀的, 通常的升采样或降采样方法不适用, 如果输入端有模拟抗混叠滤波器, 对于重采样时刻 $t_r[i]$, 可以对原采样信号直接进行样条插值或多项式插值另存, 获取对应 $t_r[i]$ 的采样值。一般系统在输入端都不具备模拟抗混滤波器, 在这种情况下就必须使用 II 型 FIR 低通滤波插值。

5.1 波形重构插值重采样

根据香农采样定理, 将满足奈奎斯特采样条件的离散采样序列 $x(nT_s)$ 和理想低通滤波器卷积就可重构原波形。

香农重构公式为: $x_r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s) \frac{T_s \omega_c}{\pi} \text{sinc}(\omega_c(t - nT_s))$, 据此重构公式, 首先获取离 $t_r[i]$ 最近的

采样时标 CT_s 作为中心点, 设 $k = \text{int}(\frac{t_r[i]}{T_s})$ (向下取整), 若 $t_r[i] \leq kT_s + T_s/2$ then $C = k$ else $C = k + 1$ 。设参与运算的点数为 m (奇数, 一般取 11 即可确保插值精度), 重构公式中 n 的取值范围为: $n \in \{C - \text{int}(\frac{m}{2}), C - \text{int}(\frac{m}{2}) + 1, \dots, C - 1, C, C + 1, \dots, C + \text{int}(\frac{m}{2}) - 1, C + \text{int}(\frac{m}{2})\}$ 将 $t_r[i]$ 代入重构公式并循环累加, 获取 $t_r[i]$ 时刻对应的重采样值。这种方法简单明了, 但实际运行结果不正确, 仿真结

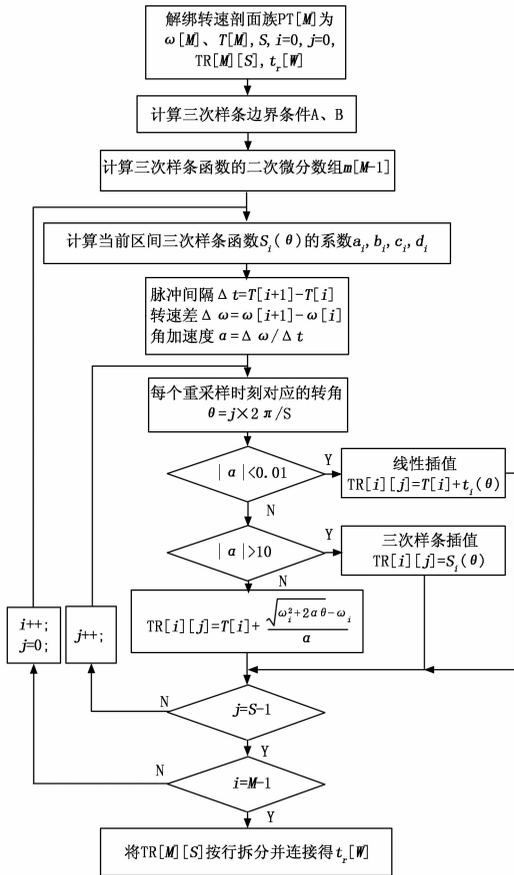


图 2 重采样时刻计算流程图

果如图 3~4 所示^[9]。之所以不正确是参与重构的理想低通滤波是非因果的。解决的办法是将理想低通滤波器的频响做傅里叶逆变换转换到时域, 然后在时域加窗截断^[10]。

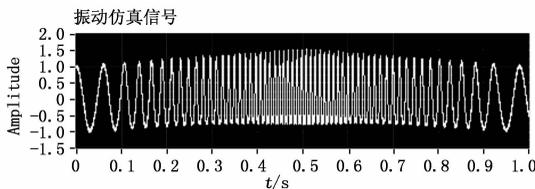


图 3 振动/转速混合仿真信号

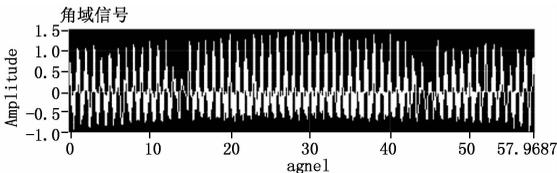


图 4 重构插值的角域信号

5.2 理想因果低通滤波器逼近设计

理想低通滤波器的频响为:

$$H(e^{j\omega}) = \begin{cases} 1 & |\omega| \leq \omega_c \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \left(\omega_c = \frac{\omega_p + \omega_s}{2} \right)$$

ω_c 为截止频率; ω_p 为通带最高频率; ω_s 为阻带起始

频率。

有限长理想滤波器的单位冲激响应:

$$h_d(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} H(e^{j\omega}) \cdot e^{jn\omega} d\omega = \frac{\sin(n\omega_c)}{n\pi} \left(-\frac{L-1}{2} \leq n \leq \frac{L-1}{2} \right)$$

L 为滤波器阶数、奇数。

在诸多窗函数中 Kaiser 窗的效果最理想, Kaiser 窗函数:

$$\omega(n) = \frac{I_0(\beta \sqrt{1 - [2n/(N-1)]^2})}{I_0(\beta)} \quad -\frac{L-1}{2} \leq n \leq \frac{L-1}{2}; I_0(x) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{(x/2)^k}{k!} \right]^2, I_0(x) \text{ 为零阶修正贝塞尔函数, } \beta \text{ 是在阻带实现衰减 } \alpha_s = -20 \lg \delta \text{ 所需的参数, 由以下经验公式给出:}$$

$$\beta = \begin{cases} 0.1102(\alpha_s - 8.7) & \alpha_s > 50 \\ 0.5842(\alpha_s - 21)^{0.4} + 0.07886(\alpha_s - 21) & 21 \leq \alpha_s \leq 50 \\ 0 & \alpha_s < 21 \end{cases} \quad (5)$$

滤波器的阶数 L 的经验估计公式为:

$$L = \left[\frac{\alpha_s - 7.95}{2.285(\Delta\omega)} \div 2 \right] \times 2 + 1 \quad (6)$$

$\Delta\omega = \omega_s - \omega_p$ 为过渡带宽。加窗后的低通滤波器冲激响应为:

$$h_w(n) = h_d(n) \omega(n) \quad -(L-1)/2 \leq n \leq (L-1)/2$$

$h_w(n)$ 是非因果的, 延迟 $(L-1)/2$ 即为因果滤波器, 即 $h(n) = h_w(n - (L-1)/2) \quad 0 \leq n \leq L-1$ 。实际滤波器设计: 从转速剖面簇中解绑出速度向量 $\omega[M]$ 取最大值 ω_{\max} , 归一化频率为 ω_{\max}/f_s , 假设轴最高转速为 6 000 r/s, 最高轴频就是 100 Hz, 设采样率为 10 k, ω_{\max} 对应的归一化频率为 $\pi/100$, 一般振动信号频率是轴频的倍数, 假设最高为 10 倍, 那么通带最高频率 $\omega_p = \pi/10$, 取阻带起始频率为 $\omega_s = \pi/5$, 取 $\alpha_s = 125$, 根据式 (5) ~ (6) 计算出 β 和 L 。

根据上述算法和给定的参数即可计算出因果低通滤波器系数存入数组 $h[L]$, 作为卷积核参与加窗滤波。

5.3 低通滤波插值重采样

对采样信号进行加窗滤波就是对长度等于滤波器阶数的采样信号数组子集进行卷积运算, 其算法公式为: $y[n] = \sum_{k=0}^{L-1} h[k] x[n-k] = h[0] x[n] + h[1] x[n-1] + \dots + h[L-1] x[n-L+1]$, L 为滤波器阶数。从此算法公式可以看出, 滤波求 $y[n]$ 必须先取采样信号数组子集 $x[n-L+1] \sim x[n]$, 然后将该数组子集倒排与滤波器系数数组 $h[L]$ 相乘即可。这里有边界滤波问题需要考虑, 比如滤波求重采样时刻 $t_r[0]$ 对应的重采样值, 设 $m = \text{int} \left(\frac{t_r[0]}{T_s} \right)$, $y[m] = \sum_{k=0}^{L-1} h[k] x[m-k] = h[0] x[m] + h[1] x[m-1] + \dots + h[L-1] x[m-L]$

+1], 如果 $m < L$, $x[m-L+1] \sim x[-1]$ 不存在, 因此在滤波前必须在原采样信号数组的 $x[0]$ 前插入 L 个值为 0 的数组元素, 然后将 $m = \text{int}\left(\frac{t_r[i]}{T_s}\right)$ 作为采样序列数组的起始索引, 获取长度为 L 的子集, 参与卷积运算。根据前期求得的重采样时刻数组 $t_r[W]$, 循环滑动滤波插值求每一个重采样时刻的采样值。求重采样时刻 $t_r[i]$ 的重采样值的算法步骤为:

$$(1) m = \text{int}\left(\frac{t_r[i]}{T_s}\right);$$

$$(2) y(m) = \sum_{k=0}^{L-1} h[k] x[(m-k)];$$

$$y(m+1) = \sum_{k=0}^{L-1} h[k] x[(m+1-k)];$$

(3) $y(m)$, $y(m+1)$ 与对应的原采样时刻为 mT_s 、 $(m+1)T_s$, 使用线性插值计算 $x_r[i]$; $i=0$ to $W-1$ $x_r[0]$, $x_r[1]$, $x_r[2]$, ..., $x_r[W-1]$ 循环 (1) ~ (3), 求得重采样序列数组。如果要使用二次多项式插值, 可以在第 (2) 步计算出 $y(m-1)$, $y(m)$, $y(m+1)$, 拟合二次多项式后插值; 如果要使用三次样条插值, 可以在第二步计算出 $y(m-j)$, ..., $y(m)$, ..., $y(m+j)$, 与对应的原采样时刻 $(m-j)T_s$, ..., mT_s , ..., $(m+j)T_s$ 结合拟合出三次样条函数, 然后插值。关于 j 的取值问题, 考虑到最后一个键相脉冲到采样结束有一定的转角, 最后的重采样时刻 $t_r[W-1]$ 后的样本个数为 $N - \text{int}\left(\frac{t_r[W-1]}{T}\right)$ (N 为原信号的采样点数), 因此取 $j = \min\left\{L, N - \text{int}\left(\frac{t_r[W-1]}{T}\right)\right\}$ 。在滑动滤波插值的过程中, 三次样条的拟合插值需重复进行进行 W 次, 计算量太大, 一般线性插值即可满足要求。

6 仿真实验与分析

根据上述算法, 利用 LabVIEW 软件编程, LabVIEW 提供的 `oax Generate OAT simulated signals.vi` 可以产生振动和转速混合的仿真信号, 将该函数的采样率设为 10 kHz, 采样时长设为 1 s, 转速参数设为 1 000—6 000—1 000 r/s, 即可产生图 3 所示的仿真信号。运行程序, 对生成的仿真信号进行处理, 可得转速剖面如图 5 所示, 滤波插值后的角域信号仿真结果如图 6 所示, 阶次谱如图 7 所示。比较图 6 与图 4 可以看出, 低通滤波插值重采样与波形重构插值重采样相比可以更真实的构造出振动信号对应的角域信号。

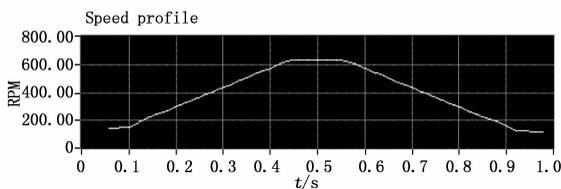


图 5 转速剖面

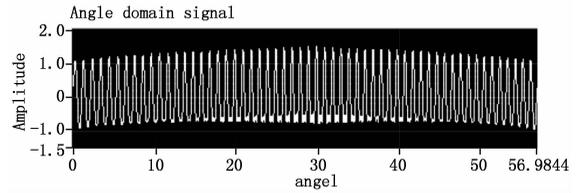


图 6 角域信号

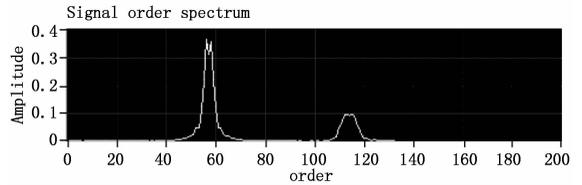


图 7 阶次谱

7 结束语

通过上述仿真实验可见, 对于非稳态振动信号, 本文设计的基于 LabVIEW 的阶次分析系统, 在信号仿真中可以有效地消除 FFT 分析中的频率模糊, 计算分析中得到的角域信号和转速剖面, 也可用于级联图、瀑布图、波德图等的应用, 对于设计基于 Labview 的测控系统具有很好参考价值。

参考文献:

- [1] 褚福磊, 李贵三, 张正松. 旋转机械常见故障的振动三维谱特征及其识别 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 1996 (7): 88-93.
- [2] 陈 钊, 任瑞冬, 符 尧. 一种基于时域滤波算法的振动信号有效值计算方法研究 [J]. 现代机械, 2015 (3): 52-55.
- [3] 朱继梅. 非稳态振动信号分析 (连载) [J]. 振动与冲击, 2000 (3): 87-90.
- [4] 黄全振, 易金聪, 李恒宇, 等. 基于递推最小二乘的自适应滤波振动主动控制算法分析 [J]. 计算机应用, 2013, 33 (9): 2643-2646.
- [5] 荆双喜, 罗志鹏, 冷军发, 等. 基于时变滤波与 CWT 的齿轮箱无转速计阶次跟踪 [J]. 机械传动, 2019, 43 (6): 144-149.
- [6] 邢义通, 周鸿博, 李志鹏, 等. 阶次跟踪和双树复小波的轴承在非稳定运行时的故障诊断研究 [J]. 机械科学与技术, 2020, 39 (3): 361-366.
- [7] 朱继梅. 非稳态振动信号分析 [J]. 振动与冲击, 2000 (2): 87-89
- [8] LIU Q H. Measurement and Calculation of Speed Profile for Rotating Machinery, [J]. Journal of Physics, 2019, 1314: 1-9.
- [9] 刘进明, 应怀樵, 沈 松. 基于波形重构的阶次分析和全息谱分析方法 [C] // 第十八届全国振动与噪声高技术及应用会议论文集, 2005.
- [10] 梁凤岗. 瞬态信号波形重构及其应用 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 1997 (5): 20-27.