

基于时延自相关降噪与局部特征尺度分解的齿轮故障检测

崔伟成, 刘林密, 杨诗寓, 宗富强

(海军航空大学, 山东 烟台 264001)

摘要: 为了准确检测故障类型, 综合运用时延自相关降噪和局部特征尺度分解方法, 对齿轮的振动信号进行故障检测; 对传感器测到的齿轮箱子振动信号进行自相关函数运算, 将 $[-20, 20]$ 的低时延区间、左右端点内 20 个数据间的高时延区间内的自相关函数值置零以抑制噪声, 得到时延自相关降噪信号; 对该信号运用局部特征尺度分解方法进行分解, 得到多个单分量信号, 依据包含啮合频率准则选取有效分量; 对有效分量应用包络分析技术进行故障检测; 通过齿轮断齿故障振动试验数据的分析, 发现该方法能明显抑制噪声, 信噪比增益可达 8.096 3 dB, 能够在故障信息不明显的情况下检测出齿轮箱故障与否, 若存在故障则检测故障类型, 能够有效支撑故障诊断。

关键词: 自相关函数; 局部特征尺度分解; 有效分量; 齿轮故障检测

Gear Fault Detect Based on Delayed Autocorrelation Denoising and Local Characteristic-scale Decomposition

CUI Weicheng, LIU Linmi, YANG Shiyu, ZONG Fuqiang

(Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to accurately detect gear faults, a comprehensive delayed autocorrelation denoising and local characteristic-scale decomposition (LCD) method was proposed to detect the faults of gear vibration signals, which calculated the autocorrelation function on the vibration signal of gear box measured by the sensor, and the low delay time of $[-20, 20]$ and high delay time of last 20 points of the autocorrelation function were set to zeros. The noise was suppressed to obtain the delayed autocorrelation denoising signals, the LCD method was used to decompose the signals and obtain multiple single component signals, and the intrinsic scale components (ISC) included the mesh frequency were selected as the effective component. The fault was detected by the envelope analysis techniques to effective components. The analysis of vibration test data for the gear broken tooth fault shows that the method can significantly suppress noise, the signal to noise ratio (SNR) can be 8.096 3 dB, the method can detect gearbox fault without obvious fault information, if present, it can also detect the type of the gear fault, the method can effectively support fault diagnosis.

Keywords: autocorrelation function; local characteristic-scale decomposition; effective component; gear fault detect

0 引言

齿轮是常见的旋转机械, 其故障诊断是一个研究热点。当齿轮发生故障时, 其特征能反映在振动信号中, 因此, 对齿轮箱得到信号进行振动分析, 检测故障的有无及故障类型, 从而进行故障诊断是一种常用的方法。当齿轮存在故障时, 振动信号的幅值以及相位可被齿轮的故障特征调制, 振动信号一般表现出调幅—调频现象, 可利用包络分析提取幅度调制函数蕴含的故障特征、利用瞬时频率分析技术提取相位调制函数蕴含的故障特征。在工程实践中发现, 在齿轮故障的早期, 由于故障信息不明显, 往往淹没于噪声之中, 因此增强故障信息或者抑制噪声的影响是有效的早期故障特征提取方法^[1-4]。

由于故障特征信号与噪声的自相关特性具有明显差异, 自相关函数能将故障特征能量分散在较长的时延区间, 而将噪声能量聚集在零时延附近, 因此对原始振动信号取自相关函数并将指定时延区间的自相关函数值置零即可保留特征信息、抑制噪声影响, 该方法称为时延自相关降噪。文献 [5-9] 分别运用该方法实现了故障特征的提取。对于早期故障特征提取来说, 仅靠降噪一般难以达到良好的效果, 需要与其他方法联合应用。

齿轮箱运行过程具有典型的谐振现象, 齿轮故障特征将会调制谐振频率, 因此, 可添加合适的带通滤波器进行滤波, 得到谐振频带, 进而通过包络分析技术求取包络谱, 根据包络谱上转频的分布确定齿轮箱是否存在故障, 若有则进行故障类型识别, 这种方法称为共振解调。但是共振

收稿日期: 2023-03-28; 修回日期: 2023-04-20。

作者简介: 崔伟成(1981-), 男, 博士, 副教授。

引用格式: 崔伟成, 刘林密, 杨诗寓, 等. 基于时延自相关降噪与局部特征尺度分解的齿轮故障检测[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(9):

解调中起关键作用的带通滤波器参数不易确定, 学者们尝试研究滤波器参数自适应的共振解调技术。一个热门的方向就是将经验模态分解 (EMD, empirical mode decomposition)^[10-11] 为代表的自适应时频分析技术引入共振解调。由于 EMD 方法的固有缺陷, 陆续出现了相应的改进算法如局部均值分解 (LMD, local mean decomposition)^[12]、变分模态分解 (VMD, variational mode decomposition)^[13] 等。EMD、LMD 能实现自适应分解, 但分解过程中易受过/欠包络、频率混淆的影响, 得到的分量往往与实际信号有较大的差异。VMD 的分解能力和噪声抑制能力优于 EMD 和 LMD, 但分量个数不易确定, 自适应能力不足。在后续的研究中一种称为局部特征尺度分解 (LCD, local characteristic-scale decomposition)^[14] 的方法被提出, 该方法具有很强的自适应能力, 且能较好地抑制过/欠包络、频率混淆等问题, 保证分解所得分量物理意义清晰, 适宜应用于旋转机械故障诊断领域^[15]。

为了最大程度地从齿轮早期故障的微弱信号中提取故障特征, 进而准确地判断故障有无并进行故障类型识别, 本文给出了一种新的方法。首先, 对齿轮故障振动信号取自相关函数, 将低时延、高时延区间的自相关函数值置零, 以降低噪声的影响, 得到时延自相关降噪信号; 然后, 对该信号运用 LCD 方法进行分解, 得到多个单分量信号, 依据包含啮合频率准则选取有效分量; 最后, 对有效分量进行 Hilbert 包络分析, 根据包络谱上的谱线分布情况判断是否存在故障, 若存在则给出故障类型。

1 时延自相关降噪

时延自相关降噪能增强信号中的周期性成分, 从而有效降低随机噪声的影响, 可应用于齿轮等旋转机械故障特征提取中, 其根本原因在于自相关函数良好的降噪特性。

1.1 自相关函数

如果信号与时间有关, 便可引入自相关函数, 信号 $x(t)$ 的自相关函数定义为:

$$R_x(\tau) = \frac{1}{T} \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt \quad (1)$$

式中, τ 为时延; T 为信号周期。

自相关函数如下性质:

- 1) 自相关函数为偶函数;
- 2) 高斯白噪声的自相关函数在时延的零点处具有最大的值, 随着的增大快速衰减至零;
- 3) 周期信号的自相关函数并不会随着的增大而明显衰减;
- 4) 调制信号的自相关函数仍然是调制信号, 且载波频率与调制频率保持不变^[5-8]。

由自相关函数的性质能够看出, 如果待分析信号是一个周期信号且淹没在噪声背景下, 因为在自相关域, 信号仍具有周期性, 而噪声则在零点处快速聚集, 通过合适的处理, 去除噪声聚集区的自相关函数值, 则能有效地抑制

噪声, 从而增强有用的周期信号成分。

1.2 齿轮故障振动信号的数学模型

齿轮箱存在局部故障时, 故障特征表现为周期性的冲击, 周期性的冲击会调制谐振频率等高频振动的幅值和频率。忽略传递函数的影响, 可将齿轮故障振动信号的数学模型表示为多阶啮合频率谐波分量的幅值调制与相位调制的叠加^[16]:

$$y(t) = \sum_{m=1}^M X_m [1 + d_m(t)] \cos[2\pi m z f_r t + \varphi_m + b_m(t)] \quad (2)$$

式中, f_r 为转轴的频率; z 为齿轮的齿数; X_m 为各谐波分量的幅值; φ_m 为各谐波分量的初相位; d_m 和 $b_m(t)$ 为谐波分量的幅值和相位调制函数, 两者都是周期函数, 重复频率为 f_r 及其倍频。

可以看出: 齿轮故障信号是可视多个分量的叠加, 每一个分量的幅值调制函数 d_m 可以反映齿轮的故障特征。应用自适应时频分析技术对振动 $y(t)$ 进行分解, 可得到多个调幅—调频分量, 选取部分蕴含故障信息的分量进行 Hilbert 包络分析, 可根据包络谱上转频及其倍频的谱线分布情况进行故障检测。

1.3 齿轮故障振动信号的时延自相关降噪

实际传感器获得的齿轮故障振动信号可视式 (2) 与噪声的叠加, 因此, 故障振动信号在自相关域是可分的, 通过将振动信号取自相关函数变换, 得到故障信号与噪声的自相关域描述, 根据故障特征与噪声自相关域特征的不同, 滤去噪声能量聚集的区域, 可实现故障振动信号的降噪。在齿轮早期故障特征提取中, 虽然原始振动信号故障信息不明显, 淹没于噪声之中, 但是经过时延自相关降噪, 信噪比能明显增强, 便于后续故障特征的提取。

故障振动信号具有调幅—调频特性, 经时延自相关处理后, 其载波频率与调制频率保持不变, 幅度调制、频率调制等特征信息仍很好地保留在自相关函数中, 能量分散在较长的时延区间; 噪声的自相关函数在时延的零点附近集中了大部分的能量, 表现在自相关函数幅值在时延零点附近具有明显的峰值, 随着时延的增大, 快速趋近于零。

在信号处理过程中, 对原始振动信号取自相关函数, 然后将零点附近 (低时延部分) 的自相关函数值置零, 由于该部分能量大部分为噪声, 极少量为故障信号, 因此, 上述处理方法可有效滤除噪声。自相关函数具有无偏估计式的误差, 当时延逐步增大时, 故障信号的自相关函数幅值也比较大, 也应该将高时延部分置零。

2 局部特征尺度分解

2.1 内禀尺度分量

旋转机械的振动信号具有非线性、非平稳的特性, 为了表述信号的时频局部特性, 需要定义“单分量”信号, “单分量”信号是时频分析技术的前提。LCD 方法认为“单分量”信号是正弦、调幅、调频及调幅—调频等典型信号中的一个, 在总结等典型信号的基础上 LCD 定义了一种新

的“单分量”信号：内禀尺度分量（ISC, Intrinsic scale components）^[14]。

ISC 为满足下面两个式子的单分量：

1) 在整个数据段，任意 2 个相邻的极值点符号互异，并且两个极点之间的数据单调。

2) 取两个相距最近且符号互异的极值点 (τ_k, X_k) 和 (τ_{k+2}, X_{k+2}) ，则 τ_{k+1} 时刻的函数值：

$$A_{k+1} = X_k + \frac{\tau_{k+1} - \tau_k}{\tau_{k+2} - \tau_k} (X_{k+2} - X_k) \quad (3)$$

与极值点 X_{k+1} 的比值关系不变，即：

$$aA_{k+1} + (1-a)X_{k+1} = 0 \quad (4)$$

式中， X_k 为极值点； τ_k 为时刻，其取值为 $k = 1, 2, \dots, M$ ， M 为极值点的个数； $a \in (0, 1)$ 为常量，典型值为 0.5。

若分量具有式 (3)、(4) 定义的特性，则信号在相邻极值点之间单调，且波形光滑、对称，即具有单一的模式，可以近似地认为是“单分量”信号相，保证了分量具有物理意义。

2.2 局部特征尺度分解的分解过程

LCD 方法借鉴 EMD 方法，利用单分量信号应该“局部关于零均值对称”，并给予 2.1 中的结论构造均值曲线，通过迭代将均值曲线不断从原始信号中分离，直至信号为 ISC。

具体的分解过程可描述如下^[14]：

1) 设置参数 a 的值，按照式 (5) 计算基线控制点（局部均值点）。

$$L_{k+1} = aA_{k+1} + (1-a)X_{k+1} = a \left[X_k + \frac{\tau_{k+1} - \tau_k}{\tau_{k+2} - \tau_k} (X_{k+2} - X_k) \right] + (1-a)X_{k+1} \quad (5)$$

2) 采用线性、三次样条等插值方法由基线控制点计算基线信号段（局部均值曲线） $H_1(t)$ 。

3) 将 $H_1(t)$ 从原始信号中分离出来，即：

$$h_1(t) = x(t) - H_1(t) \quad (6)$$

若 $h_1(t)$ 是一个 ISC 分量，输出 $ISC_1(t) = h_1(t)$ 。否则将 $h_1(t)$ 作为原始信号将步骤 1) ~ 3) 重复循环 $k - 1$ 次，得到内禀尺度分量。

4) 将 $ISC_1(t)$ 从信号 $x(t)$ 中分离出来，得到 1 个新的剩余信号 $r_1(t)$ ，即：

$$r_1(t) = x(t) - ISC_1(t) \quad (7)$$

5) 将 $r_1(t)$ 视为原始数据，将步骤 1) ~ 4) 重复循环 $n - 1$ 次，直至 $r_n(t)$ 为单调或者为一常数。

6) 得到 $x(t)$ 的最终分解结果：

$$x(t) = \sum_{p=1}^{n-1} ISC_p(t) + r_n(t) \quad (8)$$

2.3 基于局部特征尺度分解的共振解调

国内外在振动信号分析中最有效、最常用的方法就是共振解调法，又称包络分析法或高频共振法。具体过程为设计合适的带通滤波器，把系统的高频固有振动分离出来，

再利用 Hilbert 等技术解调出低频包络信号，包络信号蕴涵了故障特征信息，对之进行 Fourier 频谱分析就可以进行故障诊断。

传统的共振解调中，带通滤波器的中心频率和带宽两个参数对分析结果的准确性影响很大，但需要根据先验知识预先确定。在实际应用中，振动信号载波的中心频率和带宽很难确定，在带通滤波器的参数选择中具有很大的主观性。因此，共振解调技术需要一个自适应带通滤波器，以避免选择参数。

LCD 方法具有类似于 EMD 方法的二进滤波特性。本文采用 LCD 方法对振动信号进行从高频到低频自适应分解，ISC 分量相当于原始信号经过带通滤波器组得到的多个信号，部分分量就包含了高频固有振动频带的信息，对之进行包络解调并求取频谱，就可进行故障检测。

3 故障检测方法

3.1 故障检测流程

齿轮故障检测流程见图 1。

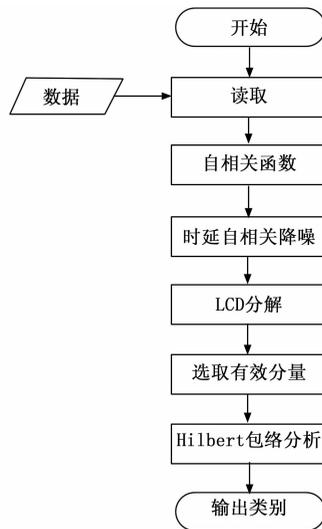


图 1 故障检测流程图

具体的故障检测流程为：

- 1) 对齿轮故障振动信号求取自相关函数。
- 2) 时延自相关降噪。

自相关函数的低时延部分包含大量的噪声及极少量的故障信号，高时延部分包含一定的噪声及少量信号，因此，选取合适的低时延、高时延范围，将自相关函数值置零，即可有效滤除噪声。

3) 对时延自相关降噪信号进行局部特征尺度分解，得到若干 ISC 分量。

在分解过程中，为了抑制端点效应，可对信号进行延拓再进行分解；若信号序列足够长，在满足后续处理的情况下，可直接对信号分解，然后对得到的 ISC 分量截取中间段分析即可。

4) 选取包含啮合频率的 ISC 分量作为有效分量。

在 LCD 方法的应用中, 分量的筛选是一个需要解决的问题。在传统的共振解调中, 一般以啮合频率为中心, 根据经验取一定的带宽进行滤波, 再经包络分析即可故障检测^[17]。本文结合实际将问题简化, 直接选取包含啮合频率的 ISC 分量作为有效分量, 其本质是利用 LCD 方法的自适应滤波特性, 将分解的分量频带作为共振解调中依靠经验选取的频带。

5) 对有效分量进行 Hilbert 包络分析, 根据包络谱上转频及其倍频的谱线分布情况进行故障检测。

3.2 相关参数设置

3.2.1 时延自相关降噪参数设置

时延自相关降噪需要将低时延、高时延区间置零。由于噪声在时延零点附近能量快速聚集, 通过多次仿真发现, 噪声的能量基本聚集在时延零点附近的 10~30 个数值点区间, 可取 $[-20, 20]$ 作为低时延置零区间, 即可有效滤除噪声。若将置零时延范围扩大, 对故障检测的影响较小。在工程实际中, 处理前可观察自相关函数明显峰值部分是否位于预制的 $[-20, 20]$ 区间, 若不满足上述条件, 可适当放大低时延置零区间。

高时延部分只包含了极少量的信号能量, 噪声零散分布, 通过多次仿真发现, 该部分置零区间的选择对检测效果影响极小, 为便于操作, 只需将端点内 10~30 个自相关函数置零即可。

3.2.2 局部特征尺度分解参数设置

LCD 方法具有良好的自适应能力, 分解效果对参数设置不敏感, 但要注意两点。

1) 插值方法:

标准 LCD 方法采用线性变换方法插值均值曲线, 在其改进算法中, 相关文献提出用三次样条、格林样条、有理 Heimit 等方法代替线性方法。从分解的最终结果来看, 三次样条方法比较适用于工程应用^[15]。

2) 分量终止条件:

标准 LCD 方法并未给出独立的分量终止条件, 实际应用可采用能量判据作为分解终止条件, 采用标准差阈作为迭代变量的判据^[18]。在仿真中发现, LCD 方法具有很好的鲁棒性, 两个参数数值的改变对分析结果影响不大。本文后续的处理过程中, 两个参数参照文献 [18], 分别设置为 0.1、0.01。

4 试验数据分析

4.1 实验条件与实验步骤

4.1.1 实验条件

为验证方法的有效性, 对某齿轮实验台的振动试验信号进行分析。齿轮实验台的齿轮箱包括齿数为 37 的主动齿轮与从动齿轮各一个, 两者直接啮合。主动齿轮由变频调速电机通过联轴节驱动。齿轮箱体上放置加速度传感器获取振动信号。

4.1.2 实验步骤

- 1) 在从动齿轮上人为设计断齿故障, 故障长度为 0.187 9 mm;
- 2) 将齿轮箱的负载去除, 即系统运行状态为空载;
- 3) 在变频调速器上将电机转速设置为 $n=420$ r/min;
- 4) 在数据采集软件上设置采样率为 $f_s=1\ 024$ Hz, 采样时间为 1 s;
- 5) 启动电机, 待转速稳定后, 确认实际转速;
- 6) 电机“记录”按钮, 记录并保存数据;
- 7) 导出试验数据, 采用自编软件进行分析。

4.1.3 试验数据计算

由采样率、采样时间, 可计算数据长度 $N=1\ 024$ 。根据电机轴的转速可计算转频为 $f_r=n/60=7$ Hz, 啮合频率为 $f_m=f_r \times 37=259$ Hz。

4.2 原始信号分析

将原始信号的时域波形、频谱及 Hilbert 包络谱列到图 2。

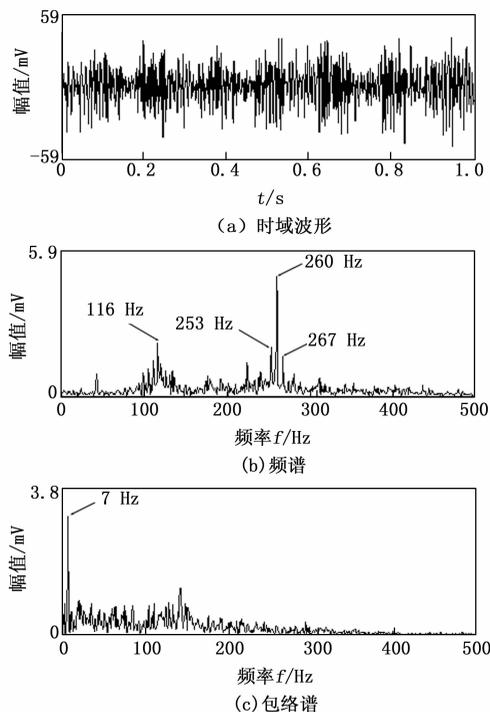


图 2 原始信号的时域波形、频谱和包络谱

由图 2 可以看出: (1) 原始信号的时域波形中存在大量脉冲, 能看到信号为具有一定的调制特征的周期信号, 但信号比较杂乱, 周期性脉冲成分不明显; (2) 在原始信号的频谱中, 260 Hz 处、116 Hz 存在明显的峰值。260 Hz 处的谱线为全谱最大峰值, 116 Hz 处的谱线为全谱次大峰值。考虑到计算误差, 可将 260 Hz 视为齿轮啮合频率 f_m , 为齿轮箱的谐振频率; 116 Hz 为另一个谐振点, 但该谐振带能量相对较弱, 故障特征不明显, 在一定程度上会干扰故障检测; 在 260 Hz 两侧存在两个清晰的谱线: 253 Hz 和

267 Hz, 可分析出两个谱线为啮合频率 f_m 被转频 f_r (7 Hz) 调制的一阶边频带。(3) 在图 2 (c) 包络谱中, 7 Hz 处存在明显的谱线, 峰值为全谱最大, 其他谱线较为凌乱。

结合原始信号的频谱和包络谱, 可以找到转频的一倍频, 可以判定齿轮存在故障, 故障类型应为齿轮偏心或不同轴。但齿轮断齿故障的典型征兆为频谱中啮合频率两侧存在转频的多阶调制边频带, 包络谱中出现转频及其多个倍频。原因在于噪声及次大谐振带干扰了故障的检测, 因此, 需要进行进一步的处理。

4.3 时延自相关降噪信号分析

对振动信号进行时延自相关降噪, 其时域波形、频谱及包络谱如图 3 所示。

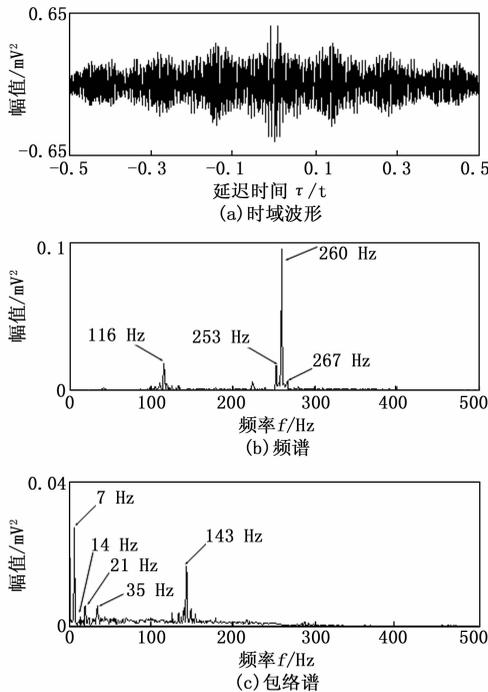


图 3 时延自相关降噪信号的时域波形、频谱和包络谱

由图 3 可以看出: (1) 在时延自相关降噪信号的时域波形中, 信号较原始信号具有更明显的周期特性, 噪声得到了抑制, 可直观地看出信号的信噪比得到了提高; (2) 在时延自相关降噪信号的频谱中, 全谱最大值的谱线仍在 260 Hz 处, 啮合频率被转频调制的一阶边频带 253 Hz、267 Hz 处存在明显的谱线, 116 Hz 处也存在一个明显的谱线; (3) 在时延自相关降噪信号的包络谱中, 转频 f_r 及其 2、3、5 倍频 7 Hz、14 Hz、21 Hz 及 35 Hz 处存在明显的谱线, 但 143 Hz 处存在更为明显的谱线, 该频率点的谱线不易解释, 对故障检测来说是一个干扰项, 不便于故障类型的判读。时延自相关降噪结合包络分析可给出齿轮存在局部故障的结论, 但结果不够清晰明了。

4.4 时延自相关降噪—局部特征尺度分解信号分析

4.4.1 有效分量分析

对时延自相关降噪信号进行局部特征尺度分解, 得到 4

个 ISC 分量, 选取包含啮合频率 f_m (260 Hz) 的 ISC1 作为有效分量, 并将有效分量的时域波形、频谱及包络谱列于图 4。

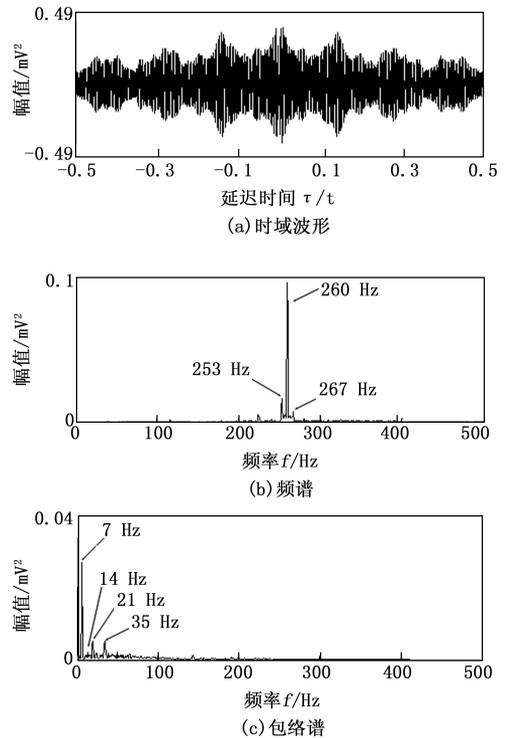


图 4 有效分量的时域波形、频谱和包络谱

可以看出: (1) 在时域波形中, 信号幅值的较大, 说明有效分量保留了时延自相关降噪信号的大部分能量; 从信号形状上看, 有效分量与时延自相关降噪信号具有高度的相似性, 说明选取包含啮合频率的 ISC 分量作为有效分量是合理的, 有效分量的周期性及调制特性更明显, 说明 LCD 方法自适应滤波的有效性; (2) 在频谱中, 只有啮合频率 260 Hz 处以及啮合频率被转频调制的一阶边频带 253 Hz、267 Hz 处存在明显的谱线, 时延自相关降噪信号频谱中的 116 Hz 处的谱线已不明显, 这是因为 LCD 方法将 116 Hz 所在的频带分解至其他 ISC 分量, 使有效分量更接近单分量信号, 便于后续的 Hilbert 包络分析。同时, 该图也从侧面说明了 LCD 方法具有良好的抑制频率混淆的效果。(3) 包络谱中, 转频 f_r 及其 2、3、5 倍频 7 Hz、14 Hz、21 Hz 及 35 Hz 处存在明显的谱线, 143 Hz 处的谱线已不明显。根据上述分析, 可以明确给出齿轮存在局部故障的结论。

4.4.2 局部特征尺度分解滤波处理效果分析

为了进一步分析 LCD 方法滤波处理的效果, 将 ISC2 的时域波形、频谱及包络谱列到图 5。

可以看到: (1) 在时域波形中, 分量 ISC2 的幅值较小, 周期性及调制特性比较明显, 但与时延自相关降噪信号的相似程度不高; (2) 在频谱中, 分量 ISC2 保留了时延自相关降噪信号的次大谐振峰 116 Hz 处的谱线及相应的谱

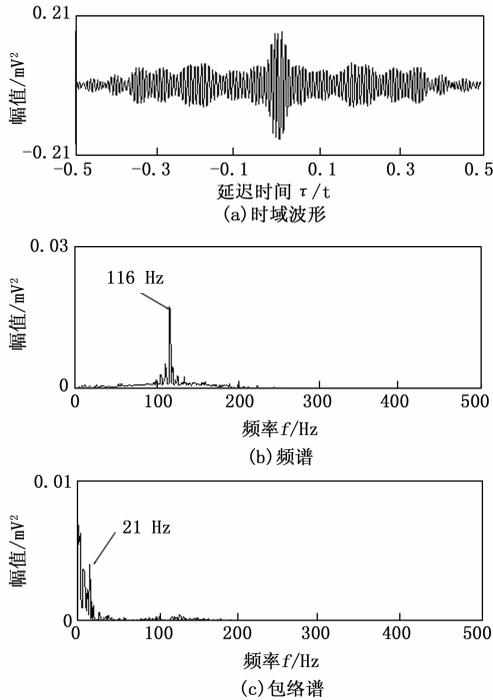


图 5 分量 ISC2 的时域波形、频谱和包络谱

带, 频谱结构与有效分量 ISC1 没有混叠; (3) 包络谱中, 转频 f_r 的 3 倍频 21 Hz 处存在相对明显的谱线, 但低频段比较凌乱, 不便于故障的判读。这是由于在原始信号以及时延自相关降噪信号中, 次大谐振峰 116 Hz 能量较弱, 经分解, 虽然分量 ISC2 蕴含了一定的故障信息, 但其调制特性易受到噪声的影响, 该分量对故障检测的贡献较小, 应舍弃, 只保留能量占优的有效分量效果更好。利用 LCD 方法滤波处理的内在机理在于将时延自相关降噪自适应分解成近似的单分量, 挑选故障信息能量占优的分量, 使 Hilbert 包络分析效果更佳。

4.4.3 处理效果定量分析

为了定量分析本文方法的处理效果, 采用信噪比 (SNR, signal to noise ratio) 来评价, 其定义为:

$$SNR = \frac{\sum_{i=1}^I \hat{S}^2(i)}{\sum_{n=1}^{N/2} S^2(n) - \sum_{i=1}^I \hat{S}^2(i)} \quad (9)$$

其中: $\hat{S}^2(i)$ 为包络谱上转频及其 i 倍频处的谱线能量, 由于高于 5 倍频的谱线能量不大, 后续计算 I 的取值为 5, $S^2(n)$ 为包络谱各谱线的能量, 其和为包络谱总能量。

信噪比可表征故障特征与噪声的能量比值关系, 该值越大说明处理方法效果越好。计算原始信号、降噪信号及有效分量的信噪比并列于表 1。

表 1 3 个信号的信噪比

| | 原始信号信噪比/dB | 降噪信号信噪比/dB | 有效分量信噪比/dB |
|-----|------------|------------|------------|
| SNR | -1.324 8 | 4.480 2 | 6.771 5 |

由表 1 可以看出原始齿轮振动信号包络谱中有效的谱线能量与噪声能量相比较微弱, 只有 -1.324 8 dB; 由于噪声不具有自相关特性, 经时延自相关降噪后, 噪声得以滤除, 而信号能量得以保留, 信噪比增强明显, 达到了 4.480 2; 对时延自相关降噪信号进行分解并选取有效分量后, 由于滤除了故障特征不够明显的其他分量, 故障特征更为明显, 信噪比可进一步提升至 6.771 5 dB。

4.4.4 稳定性与鲁棒性分析

为了进一步分析本文方法的稳定性与鲁棒性, 采用信噪比增益来评价, 其定义为:

$$SNR_{\Delta} = SNR_2 - SNR_1 \quad (10)$$

其中: SNR_2 为有效分量的信噪比, 计算方法见公式 (9); SNR_1 为原始信号的信噪比; SNR_{Δ} 表示经时延自相关降噪与局部特征尺度分解处理后的信噪比增益, 即故障特征增强情况。

将前文所述工况记为工况 1, 另外设置 3 种工况作为对比。工况 2 转速设置为 $n=420$ r/min, 添加轻型负载, 转矩为 1.71 Nm; 工况 3 转速设置为 $n=280$ r/min, 空载; 工况 4 转速设置为 $n=280$ r/min, 添加轻型负载, 转矩为 2.51 Nm。分别按照前述方法记录数据, 并按本文方法处理, 计算信噪比增益, 将结果列到表 2。

表 2 3 种工况的信噪比增益

| | 工况 2 信噪比增益/dB | 工况 3 信噪比增益/dB | 工况 4 信噪比增益/dB |
|-----|---------------|---------------|---------------|
| SNR | 7.564 8 | 8.502 4 | 7.983 6 |

由表 2 可以看出对 3 种对比工况下, 由于时延自相关降噪和 LCD 方法的合理使用, 信噪比增益在 8dB 左右, 与工况 1 的 8.096 3 相比, 差异不大。说明本文方法能适用于不同转速、不同负载等工况下的齿轮微弱故障特征提取, 具有较好的稳定性与鲁棒性。

4.4.5 与相关方法的比对分析

将本文方法与文献 [5]、[8-9] 方法进行对比, 同样采用信噪比增益来评判。3 种方法在工况 1 的信噪比增益见表 3。

表 3 3 种方法的信噪比增益

| | 文献[5]信噪比增益/dB | 文献[8]信噪比增益/dB | 文献[9]信噪比增益/dB |
|-----|---------------|---------------|---------------|
| SNR | 7.859 4 | 7.156 3 | 5.385 1 |

由表 3 可以看出, 3 种方法信噪比增益均不及本文方法。其中, 文献 [5] 方法效果最好, 与本文方法效果基本相当。原因在于 VMD 能通过迭代搜索变分模型的最优解, 具有良好的分解能力和噪声抑制能力, 但其分量个数不易确定, 需要经验确定, 自适应能力不足, 且计算时间较长, 不便于在线实时分析。综合信噪比增益、自适应能力、计

算成本来考虑, 本文方法均具有优势。

5 结束语

本文综合运用时延自相关降噪与 LCD 方法, 对齿轮故障振动信号求取自相关函数, 将低时延、高时延区间的自相关函数值置零, 以降低噪声的影响, 得到时延自相关降噪信号; 对该信号运用 LCD 方法进行分解, 得到多个单分量信号, 依据包含啮合频率准则选取有效分量选取有效分量; 最后, 对有效分量进行 Hilbert 包络分析, 根据包络谱上的谱线分布情况判断是否存在故障, 若存在则给出故障类型。以齿轮断齿故障振动信号为例, 进行了验证, 得出了如下结论:

1) 对原始齿轮振动信号进行时延自相关降噪可有效滤除噪声, 信噪比能明显增强, 便于后续故障特征的提取。

2) 局部特征尺度分解具有较好的抑制模态混叠的效果, 能保证分解所得分量物理意义清晰, 对齿轮振动信号的时延自相关降噪信号进行分解, 可得到若干蕴含故障特征的调幅-调频信号。

3) 选取包含啮合频率的 ISC 分量作为有效分量可使所选择的分量能量占优, 且故障特征明显, 便于故障检测的实施。该选取策略避免单纯依靠经验选取频带, 是一种有效的方法。

4) 有效分量的幅值和频率均被转频及其倍频调制, 通过 Hilbert 包络分析可有效提取故障特征, 后续可以开展对瞬时频率的研究分析, 两者结合, 进一步增强故障检测的稳定性和鲁棒性。

因此, 该方法能够在故障信息不明显的情况下检测出齿轮箱故障与否, 还能准确地判断齿轮故障的类型, 具有一定的工程应用价值。

参考文献:

[1] 曾明, 杨宇, 郑近德, 等. μ -SVD 降噪算法及其在齿轮故障诊断中的应用 [J]. 机械工程学报, 2015, 51 (3): 95 - 103.

[2] MCDONALD G L, ZHAO Q. Multipoint optimal minimum entropy deconvolution and convolution fix: application to vibration fault detection [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 82: 461 - 477.

[3] 王志坚, 王俊元, 赵志芳, 等. 基于 MKurt-MOMEDA 的齿

[13] 路勇, 熊华钢, 杨东凯, 等. 多通道 GPS 原始数据采集系统设计与实现 [J]. 数据采集与处理, 2009 (5): 699 - 702.

[14] 孙永荣, 丁晓莉, 陈武, 等. GPS 多天数据数据采集与控制系统 [J]. 数据采集与处理, 2003 (1): 74 - 77.

[15] 牛立, 王景中. GPS 导航数据提取的设计与研究 [J]. 微型机与应用, 2010 (20): 1 - 3.

[16] 任晓莉. 基于 GPS 的车辆定位监控系统 [J]. 计算机测量与控制, 2016 (2): 74 - 76.

轮箱复合故障特征提取 [J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37 (4): 830 - 834.

[4] 祝小彦, 王永杰. 基于 MOMEDA 与 Teager 能量算子的滚动轴承故障诊断 [J]. 振动与冲击, 2018, 37 (6): 104 - 110.

[5] 李兴慧, 申永军, 武友德. 基于时延自相关与变模态分解的故障诊断方法 [J]. 兰州理工大学学报, 2017, 43 (4): 42 - 46.

[6] 李兴慧, 李小汝, 申永军. 自相关函数在机械故障诊断中的应用 [J]. 机械设计与制造, 2018, 10: 24 - 26.

[7] 杨斌, 祁映强, 王建国, 等. 基于自相关能量算子解调的旋转机械故障诊断方法 [J]. 机械设计与制造, 2015, 9: 69 - 72.

[8] 李兴慧, 申永军, 武友德. 时延自相关和 ITD 相结合的故障诊断方法 [J]. 机械设计与制造, 2018, 7: 97 - 99.

[9] 黄艳庭, 谷玉海, 黄竞楠, 等. 基于 EEMD 和自相关阈值降噪的滚动轴承故障诊断 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019, 10: 78 - 82.

[10] 于德介, 程军圣, 杨宇. Hilbert-Huang 变换在齿轮故障诊断中的应用 [J]. 机械工程学报, 2005, 41 (6): 102 - 107.

[11] HUANG N E, WU Z H. A review on Hilbert - Huang transform: Method and its applications to geophysical studies [J]. Adv. Adapt. Data Anal, 2009, 1: 1 - 23.

[12] SMITH J S. The local mean decomposition and its application to EEG perception data [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2005, 2 (5): 443 - 454.

[13] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62 (3): 531 - 544.

[14] 程军圣, 郑近德, 杨宇. 一种新的非平稳信号分析方法——局部特征尺度分解法 [J]. 振动工程学报, 2012, 25 (2): 215 - 220.

[15] 崔伟成, 李伟, 孟凡磊, 等. 局部特征尺度分解与局部均值分解的对比研究 [J]. 机械传动, 2017, 41 (4): 10 - 14.

[16] 崔伟成, 许爱强, 李伟, 等. 基于局部特征尺度分解与瞬时频率谱的齿轮故障诊断 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (3): 29 - 32.

[17] 陈克坚, 崔伟成, 朱良明. 基于变分模态分解与最小熵解卷积的齿轮故障诊断 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (3): 54 - 56.

[18] 杨宇, 曾鸣, 程军圣. 局部均值尺度分解方法及其分量判据研究 [J]. 中国机械工程, 2013, 24 (2): 195 - 208.

[17] 陈特放, 袁雄兵, 龚志鹏. 基于 MVB 的机车逻辑控制单元 [J]. 计算机测量与控制, 2008 (7): 976 - 979.

[18] 黄志武, 周胜, 刘剑锋. 基于共享内存的 MVB 与 LON 总线网关设计 [J]. 计算机测量与控制, 2008 (11): 1676 - 1677, 1681.

[19] 徐顺. 基于动车组 MVB 网络的故障分析算法研究与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (10): 64 - 67.

[20] 方鑫, 党宏社, 强飞莉. 城市公交报站自动化的无线实现 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (11): 2263 - 2266.