

变转速齿轮箱振动信号监测的 无键相时域同步平均方法

张西宁, 吴婷婷, 徐进杰, 李兵

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了克服传统时域同步平均方法应用中需要键相信号及恒定转速的要求, 提出了一种不需要键相信号的变转速齿轮箱振动信号时域同步平均方法. 该方法通过振动信号时频域滤波及滤波信号的瞬时相位计算来估计齿轮箱的瞬时转速, 通过对原始振动信号的等角度间隔重采样来消除转速变化的影响, 并用重采样信号进行了时域同步平均. 变转速齿轮箱实验台的实验数据分析表明, 该方法可以准确地估计变转速齿轮箱的瞬时转速, 从而消除了齿轮箱转速波动对振动信号的影响. 重采样信号的时域同步平均结果为齿轮监测诊断提供了有效信息.

关键词: 监测诊断; 时域同步平均方法; 时频域滤波

中图分类号: TH17 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)06-0111-04

Time-Domain Synchronous Average Method Without Key-Phase Signal for Vibration Monitoring of Variable Speed Gearbox

ZHANG Xining, WU Tingting, XU Jinjie, LI Bing

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To overcome the defects of the traditional time-domain synchronous average (TSA) technique, such as requirements of key-phase signal and constant operating speed of gearbox in application, a new method for implementing TSA of vibration signal without key-phase signal for varying speed condition gearbox is proposed. By time frequency domain filtering and computing the instantaneous phase of filtered signal, the instantaneous speed estimation of gearbox is gained. The influence of speed variation is eliminated by equal angular interval re-sampling of the vibration signal. The re-sampled signal is used to implement the TSA processing. An experimental investigation on a variable speed gearbox test rig indicates that the accurate instantaneous speed of gearbox is estimated and the influence of speed variation of gearboxes is eliminated, and the effective monitoring and diagnostic information is provided by the TSA result of re-sampled vibration signal.

Keywords: monitoring and diagnosis; time-domain synchronous average method; time-frequency domain filtering

齿轮箱是机械设备上重要的变速和动力传递部件, 而时域同步平均方法则是一种非常有效的齿轮

监测诊断方法^[1-3]. 实际中由于键相传感器难于安装, 以及齿轮转速波动等原因给该方法的应用带来

了困难,尤其是在风电、机床、直升机、矿用挖掘机及汽车等的变转速齿轮箱的应用上.因此,基于振动信号瞬时转速估计的时域同步平均方法的关键是对瞬时转速的估计.

Bonnardot 等人^[4]提出了一种不需要转速传感器的角度重采样方法,该方法针对振动信号采用了以啮合频率为中心的窄带滤波来实现瞬时转速的估计,但该方法只适用于转速波动范围较小的场合.在此基础上,Combet 等人^[5]对以上方法进行了扩展,实现了用于瞬时转速估计的啮合频率的自动选择及时域同步平均计算. Combet 等人^[6]提出了一个用振动信号短时变换来估计瞬时速度相对波动的方法,但该方法只适用于转速波动范围较小的场合.

本文根据瞬时转速变化在时频图上的反映,采用时频域滤波及希尔伯特变换实现了对瞬时转速和相位的估计,并通过信号等角度重采样来消除转速变化对时域平均等的影响.由于本文方法无需键相信号,可直接利用原始振动信号来估计瞬时转速,因此可用于转速在大范围变化的齿轮时域同步平均.

1 瞬时转速估计

时频分析提供了一个可以同时时在域和频域观察信号的工具^[7-8].短时傅里叶变换(STFT)是常用的时频分析方法,原理上是信号用滤波器拆分成短片段,然后用傅里叶变换分析每个时间段的频谱,用全部频谱图反映频谱在不同时间的变化. STFT 的时频分布为

$$S_x(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)h(t-\tau)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(\tau, \omega)h(t-\tau)e^{j\omega t} d\tau d\omega \quad (2)$$

式中: ω 为角频率; t 为时间; τ 为窗函数 $h(t-\tau)$ 的中心. 设频率调制信号为

$$x(t) = 10\sin(2\pi 200t + 8\sin(2\pi 10t)) + 10\sin(2\pi 400t + 8\sin(2\pi 10t))$$

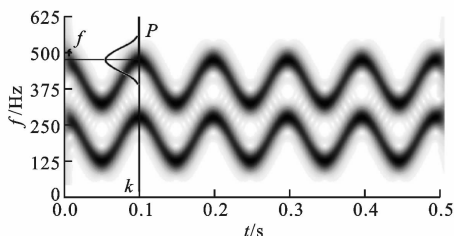
对频率调制信号进行等时间间隔采样后,可得相应的数字信号 $x_i (i=1, 2, 3, \dots, N)$. 图 1 是 x_i 的时频图,它直观地反映了信号中各频谱分量的频率随时间的变化情况.

为提取 400 Hz 附近的瞬变频率分量,先沿时间轴自动搜索出每个时刻该分量的最大幅值点坐标,再建立瞬时频率与时间之间的关系模型,进而可得到该分量在任一时刻的瞬时频率值.

2 振动信号的等角度间隔重采样

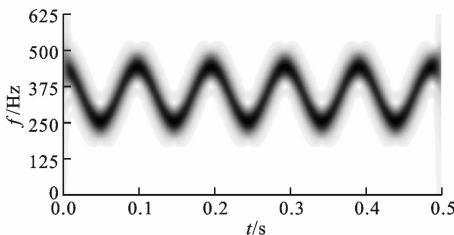
2.1 时频滤波

假设已经建立了瞬时频率变化曲线模型,在时频图中每一时刻的频谱与瞬时转速曲线的交叉点上,沿频率轴方向施加频域滤波器.图 1 给出了在某一交叉点 $P(k, f)$ 上施加滤波器,图 2a 给出了滤波后的时频图,通过逆短时傅里叶变换可以得到滤波信号(图 2b),而滤波信号是与转速相关的单频信号.

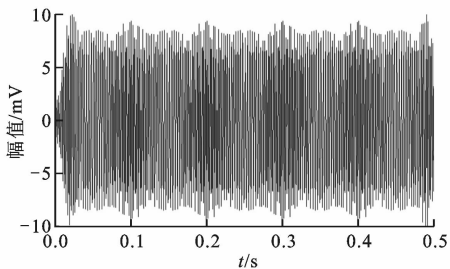


k : P 点的时间; f : P 点的频率

图 1 信号的时频图和时频域滤波过程



(a) 滤波后的时频图



(b) 滤波后的信号

图 2 时频滤波后的结果

2.2 希尔伯特变换提取相位信息

将时间序列的希尔伯特变换^[9]定义如下

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)/(t-\tau) d\tau \quad (3)$$

$x(t)$ 的解析信号为

$$\left. \begin{aligned} z(t) &= x(t) + jy(t) = a(t)e^{j\Phi(t)} \\ |a(t)| &= (x^2(t) + y^2(t))^{1/2} \\ \Phi(t) &= \arctan(y(t)/x(t)) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $a(t)$ 为幅值函数; $\Phi(t)$ 为相位函数. 滤波信号的相位展开曲线如图 3 所示.

2.3 等角度间隔重采样

假设原始信号和重采样信号分别是 $x(t_i)$ ($i=0,1,2,\cdots,N-1$), 以及 $y(t_k)$ ($k=0,1,2,\cdots,M-1$). 其关系^[9]如下

$$y(t_k) = \sum_{i=0}^{N-1} x(t_i) \frac{\sin[(\pi/\Delta T)(t_k - i\Delta T)]}{(\pi/\Delta T)(t_k - i\Delta T)}$$

$k = 0,1,2,\cdots,M-1$

(5)

式中: ΔT 是原始信号的采样间隔; t_k 为重采样时刻. 计算精度允许的条件下, 式(5)的计算可采用插值运算替代. 以等角间隔 Δa 平均分相位轴, 即

$$\Delta a = 2\pi/m$$

式中: m 为齿轮每啮合一次信号重采样的采样点数. t_k 可按照图 4 中的方法得到. 在等分点处沿时间轴做平行线, 每条平行线与相位展开曲线交叉点的横向坐标值即为重采样时刻 t_k .

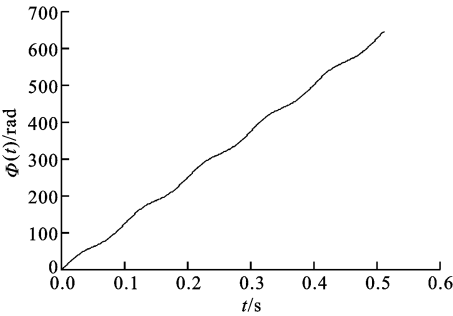


图 3 滤波信号的时间-相位曲线

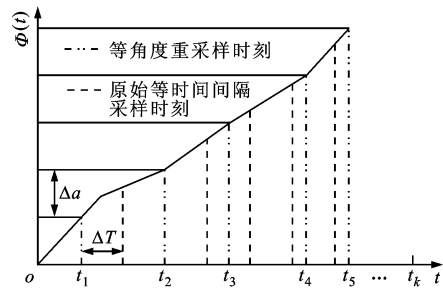


图 4 重采样间隔的确定

3 时域同步平均的实现

设重采样信号为

$$y(t_k) = f(t_k) + n(t_k)$$

式中: $f(t_k)$ 、 $n(t_k)$ 分别为信号中的周期性分量和噪声. 以 m 为长度将信号截成 P 段, 对各段进行时域同步平均得到

$$\bar{y}(t_k) = \frac{1}{P} \sum_{i=0}^{P-1} y(t_k) = \frac{1}{P} \sum_{i=0}^{P-1} f(t_k) + \frac{1}{P} \sum_{i=0}^{P-1} n(t_k) = f(t_k) + \frac{1}{(P)^{1/2}} n(t_k)$$

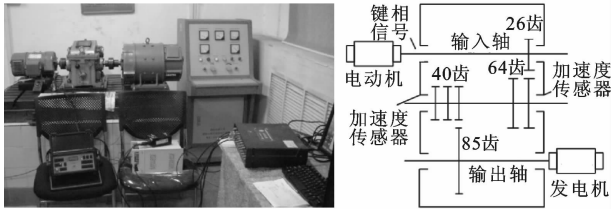
$$k = 0,1,2,\cdots,m-1$$

(6)

变速齿轮振动信号的时域同步平均步骤可归纳如下: ①根据齿轮箱参数及采样定理要求, 对振动信号进行等时间间隔采样; ②对振动信号进行时频分析, 选择与转速相关分量的瞬时频率进行搜索和建模; ③对振动信号的时频域滤波, 通过希尔伯特变换求取展开相位曲线; ④等角度间隔信号重采样; ⑤时域同步平均.

4 实验和验证

图 5 是变转速齿轮实验台及结构图. 齿轮箱输入轴和中间轴上的齿轮均为正常, 齿数分别为 26、64. 电机与齿轮箱输入轴间的联轴节存在明显的不对中, 实验时采用光电传感器收集输入轴的键相信号, 齿轮箱振动采用安装在左、右两侧轴承座顶上的加速度传感器进行测量. 实验中将振动信号采样频率设为 12 kHz, 输入轴转速波动范围设为 800 ~ 1 500 r/min.



(a)变转速齿轮实验台

(b)实验台结构图

图 5 齿轮箱实验台

图 6 给出了振动信号放大后的时频图, 从图中可以清楚地看出由转速变化引起的输入轴、中间轴齿轮啮合频率的变化. 由于啮合频率与输入轴转速存在确定的关系, 因此可用搜索出的啮合频率变化

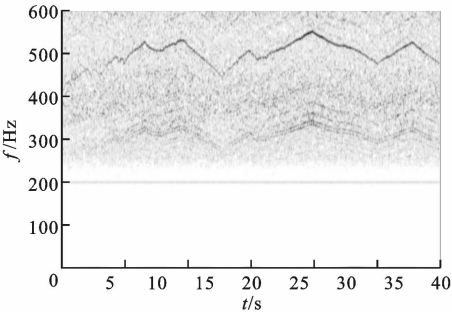


图 6 局部时频图

曲线建立转速模型. 图 7 是原始信号和重采样信号的频谱对比, 在重采样信号频谱上出现平均啮合频率 495 Hz 和 310 Hz 的频谱分量, 以及转轴的调制分量.

图 8 为时域同步平均后信号的时域波形和频谱

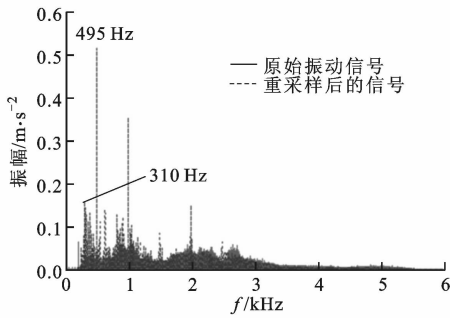
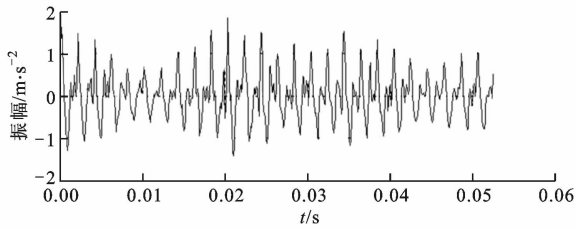
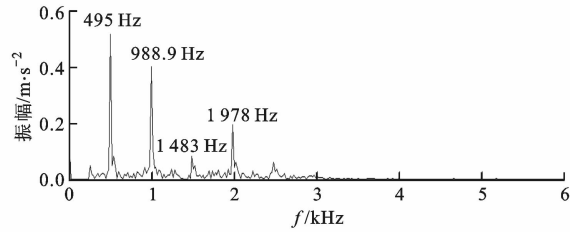


图 7 信号重采样前后的频谱图

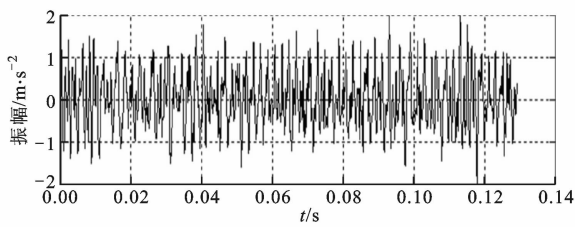
图. 图 8a 和图 8c 分别显示了 26 齿和 64 齿的齿轮转动一圈的振动情况, 波形图上出现的 26、64 个振动周期分别与输入轴齿轮(26 个齿)、中间轴齿轮(64 个齿)相对应. 图 8b、8d 的频谱图上也出现了输



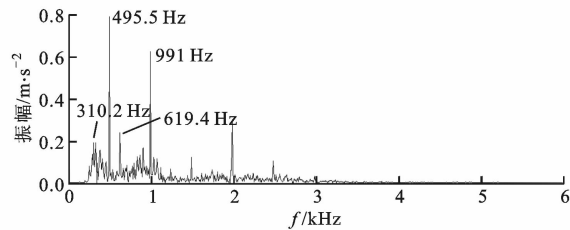
(a) 输入轴 26 齿齿轮振动波形图



(b) 输入轴 26 齿齿轮振动频谱图



(c) 中间轴 64 齿齿轮振动波形图



(d) 中间轴 64 齿齿轮振动频谱图

图 8 时域同步平均后的振动波形图及频谱图
入轴和中间轴的 494.5 Hz 啮合频率分量, 及其倍频分量, 同时还出现了中间轴与输出轴间 310.2 Hz 的

啮合频率分量及其倍频分量, 而且这些分量与实际的啮合频率(495.6、309.73 Hz)非常接近. 另外, 在输入轴和中间轴齿轮时域平均信号的包络谱上出现了清晰的 19.02、7.74 Hz 的转频及其倍频分量, 与计算得到的 19.06、7.74 Hz 相一致. 其中, 输入轴包络谱上的二倍频分量幅值是转频分量幅值的 5.3 倍, 表明输入轴存在着不对中的故障, 这与齿轮箱的实际情况是一致的. 因此, 通过瞬时转速估计、信号等角度间隔重采样和时域平均, 可有效地消除大转速波动的影响, 从而实现了大范围变速齿轮的无时标信号时域平均.

5 结 论

本文对变转速齿轮振动信号时域平均过程中的瞬时转速估计及振动信号等角度间隔重采样的关键问题进行了研究, 给出了一种无需键相信号的变转速齿轮箱振动信号时域同步平均方法. 本文的研究得出了如下结论.

- (1) 通过时频分析和时频域滤波计算瞬时频率的方法是可行的, 可用于转速大范围变化齿轮瞬时转频的估计.
- (2) 基于希尔伯特变换的等角度间隔重采样方法, 可以实现变转速条件下齿轮振动信号的等角度重采样.
- (3) 采用振动信号的等角度间隔重采样, 可以消除由变转速工况对时域平均等分析方法的影响.
- (4) 实验结果表明, 本文提出的变转速时域同步平均方法是有效的, 在风电、汽车等转速大范围变化的齿轮箱振动信号处理中有良好的应用前景.

参考文献:

- [1] DALPIAZ G, RIVOLA A, RUBINI R. Gear fault monitoring: comparison of vibration analysis techniques[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques, Courbevoie, France: French Society of Mechanics, 1998:623-637.
- [2] BRAUN S. The extraction of periodic waveforms by time domain averaging [J]. Acoustica, 1975, 32(2): 69-77.
- [3] MCFADDEN P D. A revised model for the extraction of periodic waveforms by time-domain averaging [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1987, 1(1): 83-95.
- [4] BONNARDOT F, EIBADAoui M, RANDALL R B.

et al. Use of the acceleration signal of a gearbox in order to perform angular resampling (with limited speed fluctuation) [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(4):766-785.

[5] COMBET F, GELMAN L. An automated methodology for performing time synchronous averaging of a gearbox signal without speed sensor [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(6):2590-2606.

[6] COMBET F, ZIMROZ R. A new method for the estimation of the instantaneous speed relative fluctuation in a vibration signal based on the short time scale transform [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(4):1382-1397.

[7] COHEN L. Time-frequency analysis [M]. New Jersey, USA: Prentice Hall PTR, 1995:91-96.

[8] GRÖCHENIG K. Foundations of time-frequency analysis [M]. Boston, USA: Birkhäuser, 2001:21-26, 37-41.

[9] 程乾生. 数字信号处理的数学原理 [M]. 北京:石油工业出版社, 1979:113-122.

(编辑 管咏梅)