

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.04.009

基于短时傅里叶变换的滚珠丝杠副丝杠滚道故障定位研究*

张子锋, 胡建中*

(东南大学 机械工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 针对滚珠丝杠副丝杠滚道故障定位困难问题,对存在单一点蚀故障的滚珠丝杠副进行了研究,提出了一种基于短时傅里叶变换(STFT)的滚珠丝杠副丝杠滚道故障定位方法,通过理论分析确定了针对滚珠丝杠副振动信号STFT理想的窗函数及其参数。利用STFT分析了滚珠丝杠副仿真与实验振动加速度信号,根据丝杠滚道出现故障时的频率响应特性以及信号瞬时频率随时间的变化,以瞬时频率为特征确定了故障位置。仿真与实验研究结果对比表明,STFT时频分析方法能够用于有效地识别出滚珠丝杠副的故障位置。

关键词: 滚珠丝杠副;丝杠滚道;故障定位;短时傅里叶变换

中图分类号: TH17; TH133.33 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2015)04-0484-05

Fault location on ball track of ball screw shaft based on STFT

ZHANG Zi-feng, HU Jian-zhong

(School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Aiming at the problems of fault location for ball screw, a ball screw with a single localized defect was studied, and a method based on STFT for fault location of ball track of ball screw shaft was proposed. By theory analysis, the perfect window function used in STFT of vibration signal of ball screw was defined. Short-time Fourier transform (STFT) was used to analyse the vibration acceleration signal of ball screw, according to the frequency response characteristic of ball screw with defect in screw raceway and the instantaneous frequency of signal changes with time, fault was located by using the instantaneous frequency as characteristic. Compared the experimental results with simulated results, it is indicated that STFT can recognise the fault location of ball screw effectively.

Key words: ball screw; screw raceway; fault location; short-time Fourier transform (STFT)

0 引 言

滚珠丝杠副是数控系统的重要组成部件之一。当滚珠丝杠副出现故障时,会直接影响数控机床的加工精度。因而对滚珠丝杠副进行监测,对尽早发现滚珠丝杠副的故障、及时维修更换以保证设备正常运行具有重要的意义。

文献[1]利用多体建模方法对滚珠丝杠驱动系统进行振动分析。文献[2-3]对滚珠丝杠副驱动系统以及进给系统进行混合动力建模。文献[4]采用拟静态法并考虑接触角的影响分析双螺母滚珠丝杠副动态接触刚度。相关文献对滚珠丝杠副的研究主要集中于接触刚度变形分析以及动力学建模等,但针对滚珠丝杠副的故障定位问题研究涉及较少。不同于其他旋转机械,滚珠丝杠副在运动过程中,丝杠做旋转运

收稿日期: 2014-10-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075069)

作者简介: 张子锋(1991-),男,安徽滁州人,主要从事故障诊断和状态监测的研究。E-mail: seuzzf@163.com

通信联系人: 胡建中,男,副教授,硕士生导师。E-mail: hjz@seu.edu.cn

动,滚珠螺母做直线运动。当丝杠滚道存在故障时,傅里叶变换能够从螺母的振动信号中提取出信号的特征频率,但并不能揭示故障特征信号出现在什么时候以及它的变化情况。文献[5]针对旋转机械升降速阶段振动信号的特点,利用STFT对旋转机械升降速阶段振动信号瞬时频率进行估计。文献[6]用STFT来分析某动车地板在加速过程中的时频特性,解决样本数据不够或采样时间太短又无法全面反映系统特性问题。文献[7-9]提出一种改进相邻系数方法和非抽样多小波变换融合的降噪方法,使用Hilbert-Huang时频分析作后处理,并将其应用于行星减速器早期故障诊断中。文献[10]提出了一种基于广义同步挤压变换的时频分析方法检测诊断变速箱故障。文献[11]利用STFT对AE信号进行分析,并通过分析确定针对AE信号理想的窗函数及其参数。时频方法作为分析信号的有力工具,能在时间和频率上同时揭示信号的特征,这种方法可以用于更加有效地对信号进行分析和处理,广泛应用于机械故障诊断中。

本研究利用STFT方法对滚珠丝杠副的仿真与实验振动信号进行分析处理,通过分析时频谱图中是否出现故障特征频率以及故障特征频率的随时间轴的变化,判别是否存在故障以及确定故障位置。

1 短时傅里叶变换

1946年,Gabor提出了短时傅里叶变换(short time fourier tranform,STFT)的概念^[12-13],用于测量声音信号的频率定位。

给定信号 $y(t)$,STFT定义为:

$$STFT_y(t,f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(\tau)h(\tau-t)e^{-j2\pi f\tau}d\tau \quad (1)$$

式中: $h(t)$ —窗函数,且 $\|h(t)\|=1$ 。

由式(1)可知,STFT首先利用平移参数 t ,通过窗函数 $h(t)$ 对信号 $y(t)$ 进行分段,获得原信号在 t 时刻附近 τ 时段的信号,然后对该段信号进行傅里叶变换。窗函数 $h(t)$ 随着 t 的改变不断移动,得到不同时刻的傅里叶变换。影响STFT分析结果的主要因素有:①窗函数选择;②窗长选择。

窗函数选择对STFT分析结果产生重要影响,在实际工程应用中,应该根据信号的特性选择不同类型的窗函数。

窗函数长度的选择对分析结果也有较大影响,为保证局部信号的平稳性,窗长要尽可能的短;同时为保证较高的频率分辨率,又需要较长的窗长。一般通过理论分析或实验选择合适的窗长,以获得较好的时间和频率分辨率。

2 丝杠滚道故障特征频率分析

不考虑滚珠滑动,滚珠中心线速度为 v_b 。通常情况下,丝杠做旋转运动,螺母做直线运动。假设螺母不动,丝杠转动,滚珠与螺母滚到的接触点为滚珠的运动瞬心,滚珠丝杠副运动图解如图1所示。

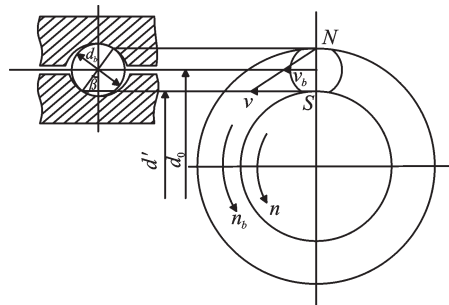


图1 滚珠丝杠副运动图解

根据几何关系,可得:

$$v = 2v_b \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} v = 2\pi \times n \times d'/2 \\ v_b = 2\pi \times n_b \times d_0/2 \\ d' = d_0 - d_b \cos\beta \end{cases} \quad (3)$$

式中: n —丝杠转速, n_b —滚珠转速, d_0 —丝杠公称直径, d_b —滚珠直径, β —接触角。

由式(2,3)可得:

$$n_b = \frac{n(d_0 - d_b \cos\beta)}{2d_0} \quad (4)$$

丝杠与滚珠的转动方向相同,则滚珠绕丝杠转动的相对速度为:

$$n'_b = n - n_b = \frac{n(d_0 + d_b \cos\beta)}{2d_0} \quad (5)$$

且转向与 n 相反。

所以滚珠通过丝杠滚道的故障特征频率为:

$$f_s = \frac{n'_b N_0}{60} = \frac{n(d_0 + d_b \cos\beta)N_0}{120d_0} \quad (6)$$

式中: N_0 ——一圈滚道中滚珠个数。

3 滚珠丝杠副仿真振动信号时频分析

根据滚珠丝杠副丝杠滚道故障振动信号具有的鲜明特点,本研究选择合适的窗函数和窗函数长度,STFT能够正确反映滚珠丝杠副的丝杠滚道故障的时频特性,克服窗函数大小及形状不变在信号分析中的缺陷。

滚珠丝杠副丝杠滚道故障振动信号特征频率包括故障特征频率及其倍频,因此振动信号由多频率分

量组成。当信号有多个频率分量,频谱表现十分复杂,同时分析目的更多关注频率点而非能量的大小,适宜选择汉宁窗。

为了验证上述分析的正确性,本研究以SFU2005-3型滚珠丝杠副为例,其参数如表1所示。

表1 SFU2005-3型滚珠丝杠副基本参数

参数名称	数值
丝杠公称直径 d_0 /mm	20
滚珠直径 d_b /mm	3.175
接触角 β /($^\circ$)	45
导程 P_H /mm	5
滚珠圈数/圈	3
每圈滚珠数/个	20

本研究根据文献[14]中建立的滚珠丝杠副模型,对动力学方程进行数值求解,采样频率设为1 024 Hz。丝杠转速为360 r/min,由式(6)计算出丝杠滚道故障特征频率 $f_f=66.73$ Hz。由于实际信号中存在着噪声信号,故在仿真数据上叠加系数为 10^{-3} 的高斯白噪声,仿真信号的时域波形及频谱如图2所示。

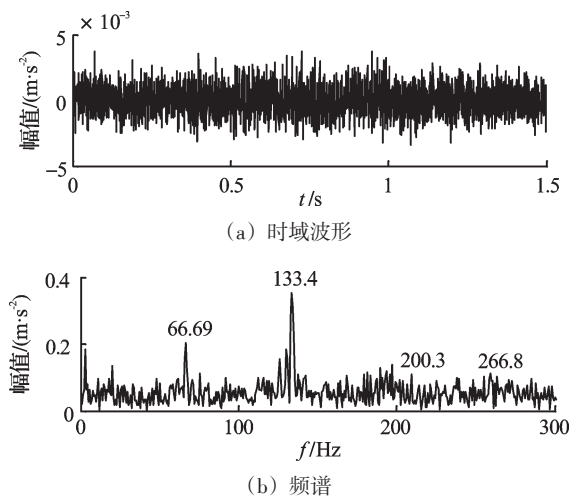


图2 滚珠丝杠副仿真信号时域和频谱图

由图2(b)可知,仿真信号频谱图中由基频(66.69 Hz)及其倍频组成,分别对应于丝杠滚道的故障特征频率(66.73 Hz)及其倍频。傅里叶变换可以用于有效提取出信号的特征频率。针对丝杠滚道故障定位的问题,本研究采用STFT时频分析方法对仿真信号进行分析和处理。

滚珠丝杠副振动仿真信号主要是由基频以及其倍频信号组成,本研究对仿真信号进行STFT分析,窗函数选择汉宁窗,同时考虑窗函数长度对分析结果的影响,窗长分别取256、512和1 024,结果如图3所示。从图3可知,窗长为256时,具有较高的时间分辨率,窗长为1 024时,具有较高的频率分辨率,当窗长

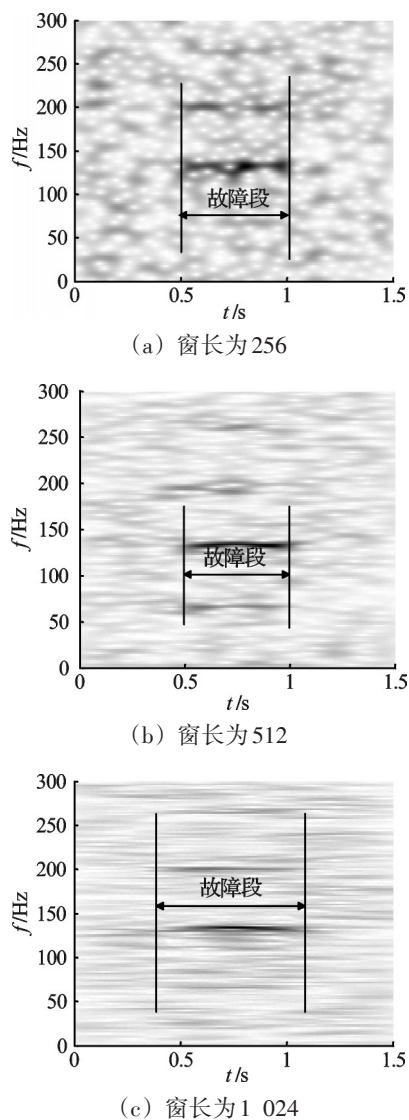


图3 滚珠丝杠副仿真信号STFT时频谱

为512时,能够同时保证较高的时间和频率分辨率。笔者主要研究滚珠丝杠副故障定位问题,故需要保证分析结果具有较高的时间分辨率,在此前提下,尽量提高频率分辨率。根据图3分析结果,窗函数长度折中选择512。根据转速以及滚珠圈数计算可知,所有滚珠全部经过缺陷处需要0.5 s的时间。从图3(b)可以看出,STFT时频谱可以分析出信号随着时间变化其频率的改变,在0.5 s~1 s时刻之间出现故障频率,时间长度为0.5 s,与实际值0.5 s相符。仿真结果表明,STFT能够比较准确地识别出滚珠丝杠副局部故障仿真信号中的正常段与故障段信号,从而准确找到故障位置。

4 实验分析

为验证时频分析方法的有效性,笔者在滚珠丝杠副测试实验台上进行实验,实验台如图4所示。本研究利用激光加工的方法在SFU2005-3型滚珠丝杠副丝杠

滚道上设置两个缺陷,两个缺陷之间距离为10个导程。滚珠丝杠副转速 n 为360 r/min,则第1个滚珠进入第1个缺陷到进入第2个缺陷的时间间隔约为1.67 s。笔者采用PCB 608A11型振动加速度传感器采集滚珠螺母的振动加速度信号。采样频率为1 000 Hz,采样长度为2 500。

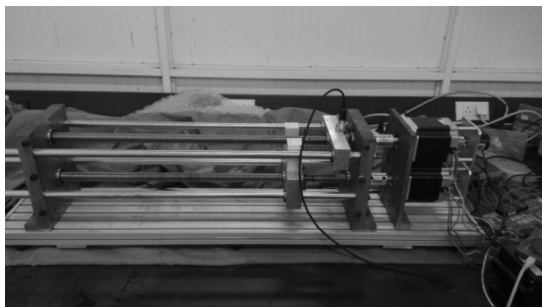


图4 滚珠丝杠副测试实验台

实验采集的振动信号的时域波形如图5(a)所示,对时域信号进行傅里叶变换得到信号的频谱如图5(b)所示。

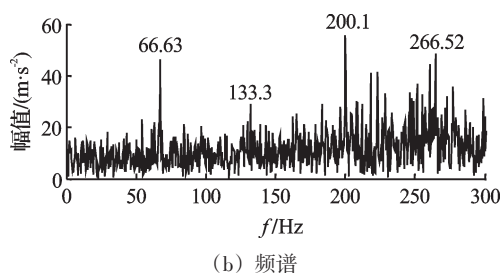
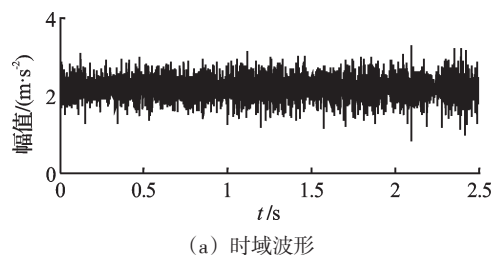


图5 滚珠丝杠副实验数据时域与频谱图

从图5(b)可以看出丝杠滚道的故障特征频率(66.63 Hz)及其倍频。实测的故障特征频率与理论计算值相差0.1 Hz,出现误差的主要原因在于理论计算值只考虑滚珠作纯滚动运动,而滚珠丝杠副实际运动过程中滚珠同时也会有滑动运动。

对实验振动信号进行STFT得到其时频谱如图6所示。从图6(b)中可以看出在0.2 s~0.7 s以及1.8 s~2.35 s这两个时间段出现丝杠滚道的故障频率,两个

时间段的间隔分别为0.5 s,0.55 s,与从第一个滚珠进入缺陷到最后一个滚珠离开缺陷需要0.5 s相对应;两段故障起始时间相隔1.6 s与上述的1.67 s对应,误差是由于STFT的时间分辨率引起的。通过计算可以得出故障点与采样开始点之间位置关系,从而找到故障点位置。

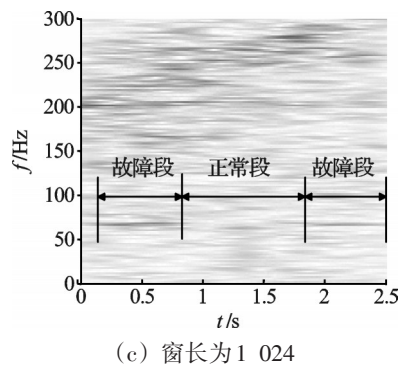
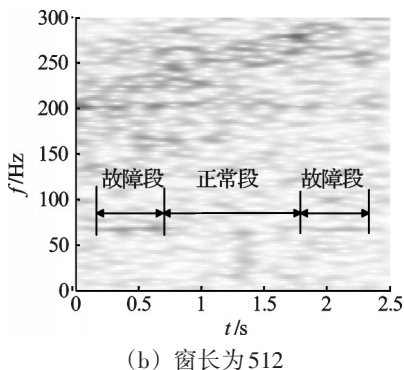
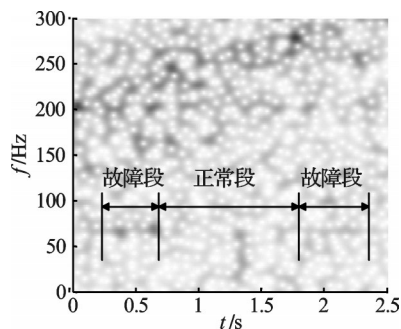


图6 滚珠丝杠副实验数据STFT时频谱

5 结束语

STFT时频分析方法能够同时从时域和频域揭示信号的特征,能够直观地描述信号频域特征随时间的变化。

(下转第492页)

本文引用格式:

张子锋,胡建中. 基于短时傅里叶变换的滚珠丝杠副丝杠滚道故障定位研究[J]. 机电工程,2015,32(4):484-487,492.

ZHANG Zi-feng, HU Jian-zhong. Fault location on ball track of ball screw shaft based on STFT[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(4):484-487,492.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>