

基于阶次分析理论的变速器故障判别实现方法^{*}

周晓锋^{1,2}, 史海波¹, 尚文利¹, 闫一功³, 高明山⁴

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 长春工业大学 基础科学学院, 长春 130012; 4. 东风朝阳柴油机有限责任公司信息中心, 辽宁 朝阳 122000)

摘要: 根据变速器下线产品质量检测的要求,研究了基于阶次分析理论的变速器故障判别实现方法。通过阶次跟踪计算将等时采样转换为等角度采样。并分析了对振动信号进行分轴重采样的原理和必要性,给出了分轴阶次谱计算的详细步骤。通过对故障变速器数据的分析表明,提出的方法可以明显识别变速器出现的齿轮啮合故障,并可以准确地定位故障零件。

关键词: 阶次分析; 变速器; 故障诊断; 重采样

中图分类号: TH165

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)08-2967-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.042

Implementation method for transmission fault diagnosis based on order analysis

ZHOU Xiao-feng^{1,2}, SHI Hai-bo¹, SHANG Wen-li¹, YAN Yi-gong³, GAO Ming-shan⁴

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. College of Basic Science, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China; 4. Dongfeng Chaoyang Diesel Co., Ltd, Chaoyang Liaoning 122000, China)

Abstract: According to the requirements of quality inspecting for the transmission products, this paper proposed an implementation method for the transmission fault discrimination based on order analysis. Turn the constant time interval sampling to the constant angle interval sampling by order tracking. Gave the implementation steps in detail after analyzed the necessity of resample vibration signal. The analysis result from the transmission's signal have shown that, the proposed method by can identify the fault messages of meshing gears and locate the fault part's exactly location accurately.

Key words: order analysis; transmission; fault diagnosis; resample

0 引言

在汽车变速器下线产品质量检测过程中,由于变速器的机械特性随转速变化而变化,需要对变速器进行升速或降速的加载实验来检测变速器产品是否存在质量缺陷,从而达到对生产过程进行跟踪和对产品质量进行实时监控的目的。随着汽车制造业自动化程度的不断提高,变速器的检测工作也由原来的人工检测逐渐向由计算机进行的振动噪声检测改进。由于变速器检测时处于变速旋转运动的工况下,其产生的振动信号为非平稳信号^[1],如果采用谱分析技术,会造成一些频率分量的重叠,形成所谓的“谱涂抹”现象^[2]。EMD技术^[3]和小波分析^[4]是近年来被广泛采用的旋转机械故障诊断技术,EMD方法可将信号分解为若干个IMF分量之和,然后对每个分量进行Hilbert变换得到信号的Hilbert谱,可表示信号完整的时间—频率分布^[5];小波分析方法具有可变的时频窗口,使其既能对非平稳信号中的短时高频成分进行定位,又可以对低频成

分进行分析^[6],但是EMD方法由于需要进行大量的迭代计算,在响应时间上不适合变速器的在线实时诊断要求^[7]。小波变换一个突出的问题是小波基函数的选择问题,不同的小波基具有不同的结构和特性,分析的效果也有所不同,并且参数的变化也会对分析结果产生较大影响,小波基函数和参数的自适应性是现阶段的研究热点^[8]。阶次分析是一种分析旋转或往复机械噪声与振动信号的技术,适用于分析转速随时间变化的噪声与振动信号^[9,10]。阶次分析通过时频信号同步采集,将等时采样转换为等角度采样,满足了变速状态下的变速器故障诊断需求,同时其阶次分辨率与采样时间无关,处理速度也很快,同样可以满足实时性的要求^[11,12]。

本文以阶次分析理论为基础,结合变速器在线质量检测的特点,详细阐述了利用阶次分析理论计算并得到变速器的分轴阶次谱的实现过程。所提出的算法经过实际系统的现场验证,通过对故障变速器进行的阶次谱分析,证明了该方法的有效性。

收稿日期: 2011-12-26; **修回日期:** 2012-02-20 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60904047);国家自然科学基金—新疆地区科学合作基金资助项目(611640123);辽宁省科技攻关项目(2011020085-301)

作者简介: 周晓锋(1978-),辽宁本溪人,博士,主要研究方向为故障诊断(zhouxf@sia.cn);史海波(1966-),浙江宁波人,研究员,博导,博士,主要研究方向为生产与运作管理、制造执行系统技术、物联网技术;尚文利(1974-),黑龙江北安人,副研究员,硕导,博士,主要研究方向为故障诊断、制造执行系统技术、物联网技术;闫一功(1954-),吉林长春人,博士,主要研究方向为故障诊断;高明山(1962-),工程师,主要研究方向为柴油机生产管理。

1 等角度采样

在变速器总成加载检测过程中,为了满足阶次分析的计算条件,需要对变速器箱体的振动信号和变速器输入轴的转速信号进行同步采集。通过加速度传感器采集到的振动信号是具有固定采样频率的等时间间隔的采样信号,通过转速编码器采集到的转速信号是记录变速器输入轴转过一定角度的时标序列信号,两路信号需要严格的时间同步。

如图1所示,当旋转轴在作升速运动时,随着转速频率的增加,旋转轴转过 2π 角度所需要的时间越来越短,采样点数也相应地越来越少。为了进行阶次分析,需要利用转速信号对振动信号进行插值重采样,将等时间序列振动信号转换为等角度序列振动信号,即无论转速为多少,旋转轴转过特定角度内的采样点数都相等,这样就可以有效地避免频谱分析中频率模糊的现象。

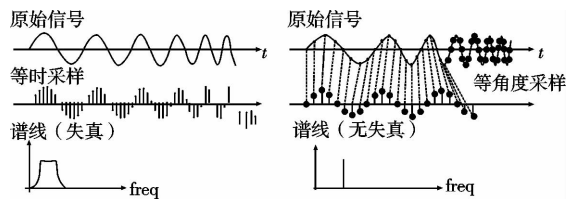


图1 将等时采样转换为等角度采样

2 振动信号分轴分析

变速器箱体上的振动加速度传感器采集到的原始振动信号是变速器箱体内所有零件振动信息的总和,包含变速器输入轴、中间轴、输出轴以及壳体的振动信息。由于变速器的内部构造原因以及振动加速度传感器与各轴的距离不同,采集到的振动信号所反映的各轴的振动能量级别也各自不同。如果在阶次分析的过程中将各轴的振动信息混合在一起处理形成一个阶次谱,则振动能量弱的轴的振动信号有可能被淹没在其他轴的强信号中。另外,由于所有零件的振动信号都包含在同一阶次谱中,有可能会不同轴上的不同零件的基频或倍频计算出来的阶次相同,给阶次与零件的对应定位造成困难。基于以上原因,本文将振动信号以轴为单位进行分析和处理,得到单根轴的阶次谱来突出显示本轴的信息,这样在分轴阶次谱上对各零件的状态可以有更为精确的反映,也为故障定位和检修提供了便利。

从图2中可以看出,由于传动比的原因,变速器振动综合信号中每根轴旋转一周的长度各不相同。实现分轴分析的依据是根据传动比计算出以输入轴为基准的各轴旋转周期长度,然后以各轴的旋转周期长度为基准截取数据,便可得到变速器的分轴振动信号。

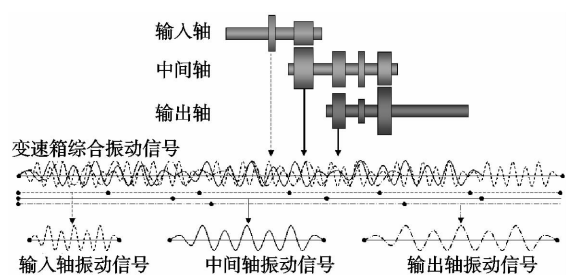


图2 振动信号分轴分析

3 角域同步平均

将等时间信号转换成分轴等角度信号之后,为了消除信号中的随机干扰信号,保留感兴趣的周期分量及其倍频分量,需要对信号进行角域平均处理。角域平均方法是从时域平均方法推广而来的。时域平均方法是从混有噪声干扰的信号中提取周期性信号的过程,也称相干检波。对振动波形以一定的周期为间隔去截取信号,然后将所截得的信号叠加平均,可消除信号中的非周期分量和随机干扰,保留确定的周期分量。

在时域平均算法中,如果一信号 $x(t)$ 由周期信号 $f(t)$ 和白噪声 $n(t)$ 组成,则 $x(t) = f(t) + n(t)$ 。

本文以 $f(t)$ 的周期去截取信号 $x(t)$,共截得 N 段,然后将各段对应点相加,由于白噪声的不相关性,可得到 $x(t_i) = Nf(t_i) + \sqrt{N}n(t_i)$ 。再对 $x(t_i)$ 平均,便得到输出信号为

$$y(t_i) = f(t_i) + \frac{n(t_i)}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

此时输出的白噪声是原来输入信号 $x(t)$ 中的白噪声的 $\frac{1}{\sqrt{N}}$,因此信噪比将提高 $\sqrt{N}$ 倍。

由此,可以推出角域信号的计算。设 $x(t)$ 为回转机械运行中产生的振动信号,对应的离散信号为 $x_n = x(n\Delta)$, Δ 为采样间隔。设每根轴的旋转周期内的重采样数为 N ,则将 x_n 分为 P 段,以 N 为周期,那么,角域同步平均 $\overline{X_n}$ 可以表示为

$$\overline{X_n} = \frac{1}{p} \sum_{p=0}^{P-1} x_n + PN \quad (2)$$

4 阶次谱计算

振动数据经重采样处理后,振动分析的视角从简单频谱转换到了阶次谱。经过FFT变换可以将时域信号转换成频域信号,再利用式(3)(4)将 Δf 改写成 $\Delta\omega$ 可得阶次转换关系式,将角度域信号转换成阶次域信号,从而直接分析振动信号在阶次域中的特性。

$$F(n\Delta f) = T \sum_{k=0}^{N-1} f(k\Delta t) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad n=1, \dots, N \quad (3)$$

$$O(n\Delta\omega) = R \sum_{k=0}^{N-1} o(k\Delta\theta) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad n=1, \dots, N \quad (4)$$

5 实现方法

在得到同步采集的振动信号和转速信号后,先利用变速器传动比和预设参数进行计算预处理,再对振动信号进行重采样、角域平均、FFT变换、阶次变换等一系列运算,最终得到阶次谱。其主要过程如图3所示。

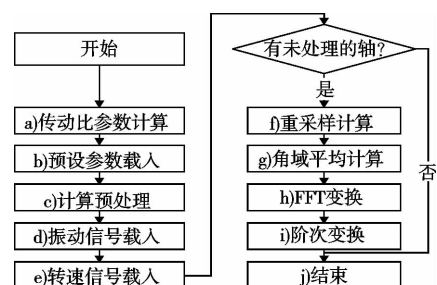


图3 阶次谱计算步骤

图3中列举了进行阶次分析的关键步骤,详细解释如下:

a) 步骤 a) 传动比参数计算,即以输入轴为基准,计算各轴与输入轴之间的传动比系数。

b) 步骤 b) 预设参数载入,即包括振动加速度传感器采样频率、转速信号采集卡时钟频率、转速编码器分辨率、FFT 计算点数、角域平均最大周期数、角域平均最小周期数等。

c) 步骤 c) 计算预处理,即需要根据传动比计算出各轴参与运算的转速脉冲数、计算单位转角 $\Delta\theta$ (转速编码器分辨率的倒数即为 $\Delta\theta$) 内的重采样点数、计算转速脉冲重采样处理步长等重采样过程中需要用到的中间变量。

d) 步骤 f) 重采样计算:

(a) 为重采样后的数组开辟内存空间;

(b) 根据步骤 c) 中的计算结果计算 $\Delta\theta$ 内对应的转速脉冲的计数个数,即插值时间点步长 d ;

(c) 在 $\Delta\theta$ 内,以 d 为步长,计算每个插值点的时间;

(d) 计算每个插值点对应的标准时间;

(e) 根据步骤 d) 计算的标准插值时间序列,对振动信号进行线性插值计算。设计算得到的标准时间序列为 $t_1, t_2, \dots, t_n$, 对振动信号 w 进行插值重采样计算;设振动信号采样频率为 f_s , 则振动信号每个采样点之间的采样时间间隔为 $\frac{1}{f_s}$, 这样任意一个振动信号 w_j 所对应的采样时刻 $t_j = j \times \frac{1}{f_s}$ (j 为振动信号 w 中第 j 个值)。利用线性插值公式

$$L_1(x) = \frac{x-x_1}{x_0-x_1}f(x_0) + \frac{x-x_0}{x_1-x_0}f(x_1) \quad (5)$$

就可以计算出与时间序列 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 相对应的振动信号值,便可得到等角度采样的振动信号。

e) 步骤 g) 角域平均计算,即将重采样之后的信号按照第3章中式(2)进行角域平均之后,便可得到某轴旋转一个周期的去噪加强信号。

f) 步骤 h) FFT 变换。FFT 算法是基于可将一个长度为 N 的序列的离散傅里叶变换逐次分解为较短的离散傅里叶变换来计算这一基本原理进行的。具体实现时有许多不同的算法,本文采用的算法流程如图4所示。

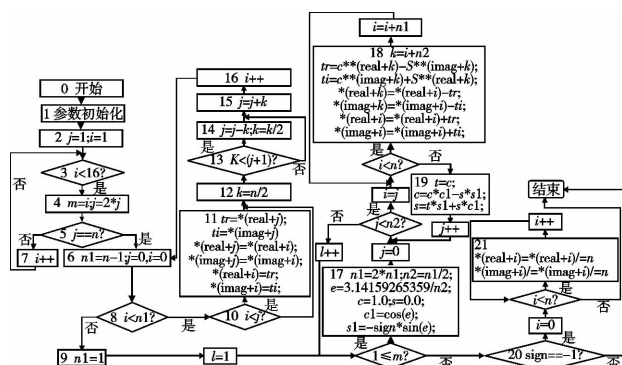


图4 FFT算法流程

图4中,变量 $real$ 为傅里叶变换的实部, $image$ 为傅里叶变换的虚部。步骤2~6为参数的初始化;10~16为倒序排列算法;17为计算旋转因子;18为蝶形算法:序列经时域抽选(倒序)后,存入数组中,如果蝶形运算的两个输入数据相距 B 个点,应用原位计算;19为中间变量,返回进行循环;20为判断输入是否规范,满足条件后转向21进行FFT归一化。

g) 步骤 i) 阶次变换,第4章中已进行了详细阐述。

6 检测实例

在变速器生产现场检测过程中,型号为 CH5M 的某变速器5档发生异响,系统检测报告显示5档从动轴齿轮啮合故障。图5为现场采集到的原始振动信号,图6为原始转速信号。将原始振动信号进行FFT变换得到的频谱如图7所示。从转速信号中可以看出,振动信号的采集过程中,变速器输入轴转速从1300 rpm 逐渐上升到2000 rpm。对于处在升速阶段的转速信号,其频谱产生了严重的模糊现象,不能得到清晰的振动特征图谱。

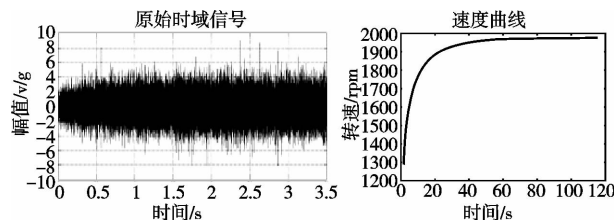


图5 原始振动信号

图6 原始转速信号

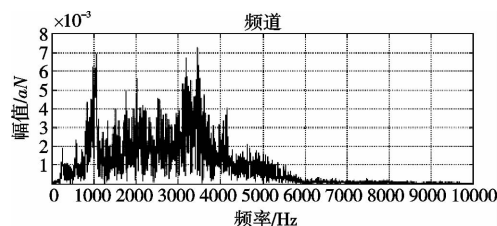


图7 振动信号频谱图

运用本文提出的阶次分析计算方法得到如图8所示的故障变速器分轴阶次谱图。图8中左上和左下分别为故障变速器5档主动轴和从动轴的振动信号经过重采样和角域平均后的波形;右上和右下分别为故障变速器5档主动轴和从动轴的阶次谱图与大量合格变速器5档阶次谱均值谱图的叠加。该型号变速器5档的主动轴啮合齿轮齿数为39,从动轴啮合齿轮齿数为33。从图中可以明显地看出,该故障变速器的主动轴和从动轴阶次谱在齿轮啮合处的阶次谱峰值均远远超过合格变速器阶次谱图中在该处的均值,其中主动轴齿轮啮合处峰值超均值140%左右,从动轴齿轮啮合处峰值超均值400%左右,并且在从动轴齿轮啮合峰值的右边可见明显的谐波。由此断定,该故障变速器5档从动轴啮合齿轮有故障。在后续的跟踪拆箱检修中,证实该变速器从动轴5档齿轮存在毛刺,经去毛刺处理后重新检测,故障症状消失,检测系统也判定该变速器质量合格。本文算法在CPU频率为2.6 GHz(双核),内存2 GB的Windows7系统中运行,整个阶次分析的运算时间为0.065 s,完全可以满足工业现场故障检测的实时性要求。

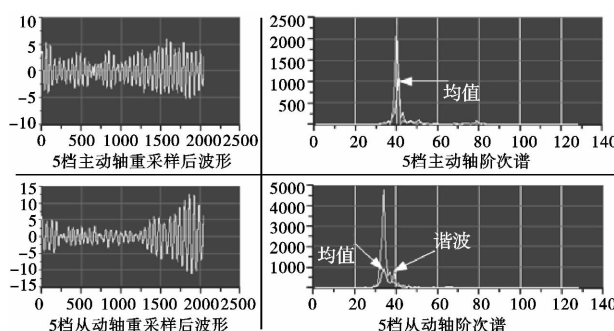


图8 故障变速器阶次谱图

(下转第2981页)

7 结束语

为了达到在生产线上实时对变速器进行质量检测的目的,本文分析了常用的变速器振动信号故障特征提取不适用于实时故障检测工况的原因,提出了基于阶次分析理论进行变速器故障特征提取的方法,并给出了该方法的详细处理过程,最后得到可反映变速器各个轴振动特征的分轴阶次谱。通过对生产现场的故障变速器信号的分析,分轴阶次谱算法可以准确有效地判别变速器的故障信息并将故障定位到零件级别。该方法解决了谱分析方法的频率模糊问题,并且计算速度可以满足工业现场对实时性的要求。

参考文献:

- [1] 何正嘉. 机械设备非平稳信号的故障诊断原理及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [2] 王卫群, 朱晓民. 变速器故障诊断中信号分析理论探讨[J]. 制造业自动化, 2006, 28(5): 76-77.
- [3] CHIOU D J, HSU W K, CHEN C W, *et al.* Applications of Hilbert-Huang transform to structural damage detection[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2011, 39(1): 1-20.
- [4] ZHANG Guang-bin, GE Yun-jian, LIU Yong-jiu. Fault diagnosis of gearbox based on wavelet transforms and neural networks[C]//Proc of International Conference on Mechanical Engineering, Materials and Energy. 2012: 919-922.
- [5] 杨宇, 于德介, 程军圣. 基于 EMD 的奇异值分解技术在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2005, 24(2): 12-15.
- [6] SHEN Zhong-jie, CHEN Xue-feng, ZHANG Xiao-li, *et al.* A novel intelligent gear fault diagnosis model based on EMD and multi-class TSVM[J]. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2012, 45(1): 30-40.
- [7] 高强, 杜小山, 范虹, 等. 滚动轴承故障的 EMD 诊断方法研究[J]. 振动工程学报, 2007, 20(1): 15-18.
- [8] JAHANGIRI F, DOUSTMOHAMMADI A, MENHAJ M B. An adaptive wavelet differential neural networks based identifier and its stability analysis[J]. *Neurocomputing*, 2012, 77(1): 12-19.
- [9] FYFE K R, MUNCK E D S. Analysis of computed order tracking[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1997, 11(2): 187-205.
- [10] ZHAO Xiao-ping, KONG Qing-peng, GUO Qing-tao. Study of time-frequency order tracking of vibration signals of rotating machinery in changing state[C]//Proc of International Symposiums on Information Processing. 2008: 559-563.
- [11] 陈恩伟, 刘正士, 王勇, 等. 齿轮箱故障诊断的阶次分析方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(S4): 239-242.
- [12] WANG K S, HEYNS P S. The combined use of order tracking techniques for enhanced Fourier analysis of order components[J]. *Mechanical systems and signal processing*, 2011, 25(3): 803-811.