

# 基于改进型峰值搜索法的变速箱振动阶比分析\*

陈 龙, 史文库, 张曙光, 陈志勇

(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室 长春, 130022)

**摘要** 基于传统内燃机汽车发动机引起振动噪声阶次特征明显的特点,运用短时傅里叶变换(short-time Fourier transform,简称STFT)进行转速估计,结合阶次追踪法,对汽车加速工况变速器振动信号进行阶次分析。首先,利用STFT对加速工况变速器振动信号进行时频分析;其次,利用改进型峰值搜索法提取特征阶次所对应的瞬时频率值,进一步计算得到发动机转速信号表达式;然后,根据发动机转速信号表达式对振动信号在角域重采样,进行阶次分析;最后,利用本研究方法对变速器加速过程振动信号进行阶次分析,并与商用软件LMS Test.lab分析结果进行对比。结果表明,本研究方法无需布置转速传感器即可对变速器振动信号进行阶次分析,为整车振动噪声试验分析提供参考。

**关键词** 变速器振动;时频分析;转速估计;角域重采样;阶次跟踪

**中图分类号** TH113.1

## 引 言

传统内燃机汽车发动机输出转矩的不平稳性会导致变速器产生振动噪声问题,比如齿轮啮合振动噪声、轴系的振动噪声以及变速器壳体的模态共振等<sup>[1-2]</sup>。变速器振动噪声信号采集、频谱分析以及阶次分析是研究和解决变速器振动噪声问题的主要方法<sup>[3-4]</sup>。频谱分析主要是针对平稳信号,非平稳信号主要采用阶次分析。阶次分析通过对时域信号等角度重采样,信号在角度域变为平稳信号,利用傅里叶变换即可分析变速器振动阶次,从而能够快速定位问题源<sup>[5]</sup>。

阶次跟踪分析方法主要有硬件阶次跟踪和计算阶次跟踪方法<sup>[6-7]</sup>。硬件阶次跟踪存在系统成本较高、硬件电路复杂等缺点,而计算阶次跟踪法是通过软件的手段,对等时间间隔的采样信号,通过软件重采样转化成等角度重采样信号,然后通过多项式或者样条插值算法来获得角度域的等角度采样序列。

实现等角度重采样的前提是需要获得转速信号时域表达式,需利用转速传感器来获取实时转速信号,然后采用多项式拟合来获得转速信号表达式。但是多数情况转速传感器布置难度较大,比如汽车

传动系转速传感器布置,如何通过非转速信号中的阶次信息估计转速成为研究热点,而其中的难点是主要阶次瞬时频率的估计。

文献[8]提出一种基于短时傅里叶变换、瞬时频率估计的阶次分析方法,采用峰值搜索算法对瞬时频率进行估计,用软件的方法实现了阶次跟踪。文献[9]为了解决峰值搜索算法瞬时频率估计时噪声对临界信号的干扰,采用隐马尔可夫模型降噪,降低噪声对峰值搜索算法的干扰。文献[10]提出基于Vold-Kalman滤波的阶比跟踪技术,利用加权因子选择和分离邻近阶比分量和交叉阶比分量,提升瞬时频率估计精度。文献[11]针对峰值搜索算法抗干扰能力不强的缺点,提出一种基于峰值频率变化率约束的改进峰值搜索算法。文献[12]提出一种利用自动搜峰的瞬时频率估计技术来实现旋转机械自适应多阶比分析方法,实现所有阶比分量的提取。文献[13-14]提出了短时傅里叶-维特比拟合法(STFT-Viterbi fitting,简称STFT-VF)和短时傅里叶-接缝雕刻法(STFT-seam carving,简称STFT-SC)瞬时频率估计算法,仿真试验结果表明,两种方法都能够快速准确地提取复杂信号的瞬时频率。

上述方法中峰值搜索算法计算简单,效率高,但是易受噪声信号干扰。为了解决这一问题,笔者提

\* 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0106203);国家自然科学基金资助项目(51205158)

收稿日期:2019-01-22;修回日期:2019-06-18



## 2 仿真分析

通过仿真验证本算法的有效性,仿真信号采样频率  $f_s = 1\ 024$ , 采样时间为 3s, 其表达式为

$$y(t) \begin{cases} x(t) & (t \in [0, 1.5] \cup [1.9, 3.0]) \\ x(t) + e(t) & (t \in (1.5, 1.9)) \end{cases} \quad (3)$$

$$x(t) = 2\sin(40\pi t^2) \quad (4)$$

$$e(t) = 8\sin(100\pi t) \quad (5)$$

其中:  $e(t)$  为噪声干扰信号。

仿真信号的时域曲线如图 1 所示,运用短时傅里叶变化得到的时频图如图 2 所示。

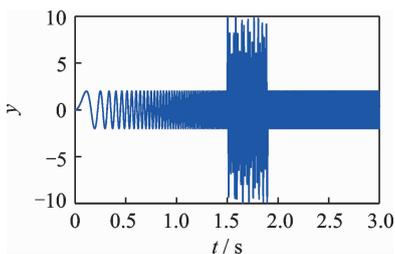


图 1 仿真信号时域曲线  
Fig. 1 Simulation signal curve

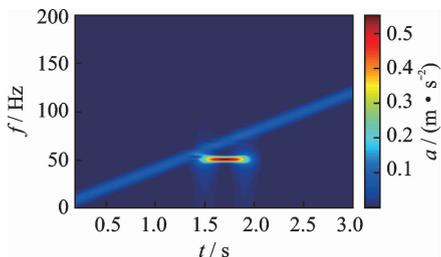


图 2 仿真信号时频分布

Fig. 2 Spectrogram of simulation signal

由图 1 可知,原始信号在 1.5~1.9 s 受到噪声信号的严重干扰。图 2 时频图中存在一条频率值随时间线性增大的频率带及其附近的干扰信号。分别采用传统峰值搜索算法<sup>[8,11]</sup>和笔者所提出的改进型峰值搜索算法提取仿真信号的瞬时频率,结果如图 3 所示。

由图 3 可知:传统方法在受到噪声干扰信号时,无法有效剔除干扰频率;文献[11]方法则没有完全克服干扰频率的影响;本研究方法则没有受到噪声信号干扰,准确提取到信号的瞬时频率。因此,笔者提出的方法能够抑制噪声信号的干扰,从而准确提取信号的瞬时频率。

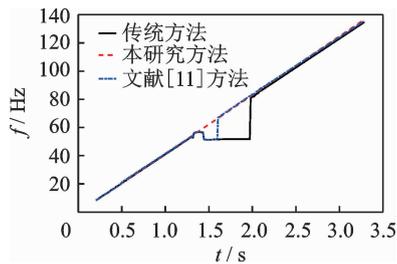


图 3 瞬时频率估计

Fig. 3 Instantaneous frequency estimation

## 3 加速工况变速箱振动阶次分析

利用本研究方法对四挡加速工况下的变速箱振动进行阶次分析。该车型四挡传动比  $i_4 = 1.33$ , 传感器布置位置如图 4 所示,数据采集设备为比利时 LMS 数据采集前端,传感器为 PCB 振动加速度传感器,采样频率为 10kHz。



图 4 传感器布置位置图  
Fig. 4 Sensor layout map

加速过程变速箱振动信号时频分布如图 5 所示。

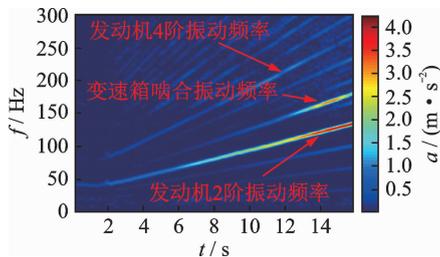


图 5 加速工况变速箱振动信号时频分布

Fig. 5 Vibration signal spectrogram of gearbox under acceleration condition

由图 5 可知 0~300Hz 内振动信号所包含的频率分量与时间的变化关系,从图中可发现,振动信号中存在 3 个主要阶次分量,分别是发动机 2 阶、4 阶以及 2.68 阶振动,其中 2.68 阶为变速箱四挡齿轮

啮合频率,2阶为主要分量。

采用笔者提出的改进型峰值搜索算法提取2阶振动对应的瞬时转速,并与实测转速信号进行对比,结果如图6所示。

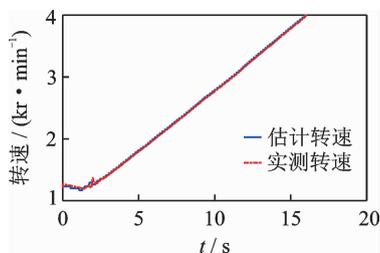


图6 加速过程发动机转速估计值与实测值对比图

Fig. 6 Comparison between estimated and measured engine speed

由图6可知,转速估计值与实测转速曲线基本一致。图中转速在0~1s为匀速,这是由于数据采集过程是先开始数据采集,然后再开始加速,转速拟合时未考虑这一段时间的转速,最终得到的转速拟合表达式为

$$n(t) = 193.4t + 877 \quad (6)$$

根据拟合得到的转速表达式,对变速箱振动信号进行阶次分析并绘制阶次追踪图,如图7、图8所示。

由图7可知,在频率2kHz左右存在共振带,可能是变速箱壳体发生模态共振引起。由图8可知,

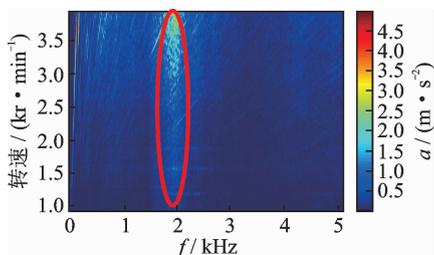


图7 加速过程变速箱振动阶次追踪图

Fig. 7 Gearbox vibration order tracking diagram of acceleration process

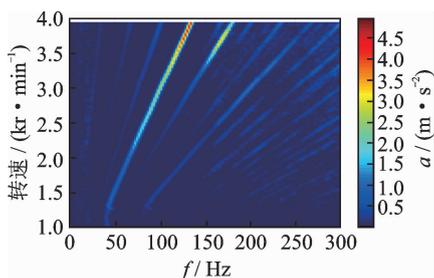


图8 0~300 Hz 放大图

Fig. 8 0~300 Hz enlarged image

变速箱振动主要是由发动机输出2阶振动引起,同时变速箱齿轮啮合振动随着转速的升高,振动变大。变速箱振动阶次如图9所示。

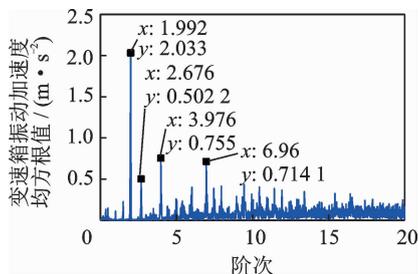


图9 3 kr/min时变速箱振动阶比图

Fig. 9 Vibration order diagram of gearbox at 3 kr/min

图9中取发动机变速箱振动前20阶,由图可知,2阶为主要振动阶次,啮合振动(2.676阶)和4阶也较为明显,同时7阶振动也较大。进一步提取变速箱2阶振动和齿轮啮合振动成分,将本研究计算结果与商用软件 LMS. Test. lab 计算结果进行对比,结果如图10、图11所示。

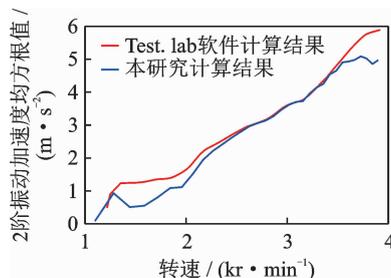


图10 变速箱振动2阶

Fig. 10 Gearbox vibration of 2 order

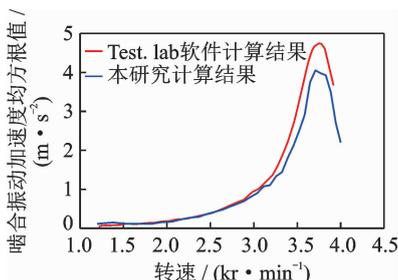


图11 变速箱啮合振动2.68阶

Fig. 11 Gearbox vibration of 2.68 order

图10为变速箱2阶振动,图11为变速箱齿轮啮合振动。由图可知,本研究计算结果与 Test. lab 计算结果趋势一致,仅在曲线峰值附近存在误差,啮合振动峰值都出现在3.7 kr/min附近,峰值转速、峰值加速度以及各自峰值误差如表1所示。

表 1 峰值及峰值误差  
Tab.1 Peak value and peak error

参数	本研究结果	Test. lab 软件	误差/%
峰值转速/(r · min <sup>-1</sup> )	3 709	3 751	1.12
峰值加速度/(m · s <sup>-2</sup> )	4.053	4.747	14.60

由表 1 可知:峰值转速误差较小,仅为 1.12%;峰值加速度值误差为 14.6%,由于傅里叶变换导致幅值偏小;啮合振动在 3.7 r/min 左右出现振动峰值的原因是齿轮轴系发生模态共振。

计算观察信号前 6 阶振动分量与振动信号的相关系数柱状图,如图 12 所示。由图发现:2 阶振动和齿轮啮合振动相关系数最高,说明加速过程变速箱振动主要是由其引起;同时整体相关系数偏低,这是由于噪声信号以及频带较宽、能量分散较大等原因造成。

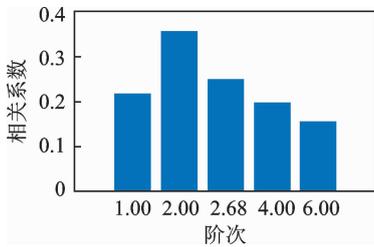


图 12 振动加速度原始信号与各阶次成分相关  
Fig.12 Order component correlation coefficient

## 4 结 论

1) 针对内燃机汽车发动机引起的振动噪声存在明显的阶次特征,采用瞬时频率估计的方法计算发动机输出转速,对变速箱振动进行阶次分析该方法无须布置转速传感器,可简化试验过程。

2) 针对传统峰值频率搜索算法易受噪声信号的干扰,提出同时考虑频率变化率和时频点能量变化率的改进型峰值搜索算法。仿真表明,改进型峰值搜索算法抗干扰能力增强,能够准确识别阶次频率。

3) 通过与商用软件 LMS. Test. lab 计算结果对比可知,估计转速与实测转速一致性非常好,基于转速估计的阶次分析结果与 LMS. Test. lab 软件计算结果一致,证明该方法是可行的。

4) 加速工况下变速箱振动信号阶次分析结果

表明,变速箱振动主要是由发动机 2 阶振动和变速箱齿轮啮合振动引起,分析可知变速箱壳体在 2kHz 附近发生模态共振,齿轮轴系在 3.7kr/min 附近出现共振峰值。

## 参 考 文 献

[1] 栾文博, 吴光强, 徐炜卿. 基于阶次跟踪的变速箱啸叫噪声分析[J]. 振动与冲击, 2013 (11): 95-99.  
LUAN Wenbo, WU Guangqiang, XU Weiqing. Gear-box whine noise analysis based on order tracking[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013 (11): 95-99. (in Chinese)

[2] 郭磊, 郝志勇, 蔡军, 等. 汽车变速箱齿轮传动系动力学振动特性的研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(1): 103-107.  
GUO Lei, HAO Zhiyong, CAI Jun, et al. Vibration characteristics of transmission gear-train for a car[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29 (1): 103-107. (in Chinese)

[3] 王志杰, 丁康. 汽车变速器故障振动特征提取的试验研究[J]. 汽车工程, 1994, 16(4): 242-249.  
WANG Zhijie, DING Kang. Experimental investigation on vibration feature extraction of automotive gearbox faults[J]. Automotive Engineering, 1994, 16(4): 242-249. (in Chinese)

[4] 方源, 章桐, 于蓬, 等. 电动车动力总成振动噪声的试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(2):218-224.  
FANG Yuan, ZHANG Tong, YU Peng, et al. Experiment study on vibration and noise of electric powertrain[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(2):218-224. (in Chinese)

[5] FYFE K R, MUNCK E D S. Analysis of computed order tracking [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1997, 11(2): 187-205.

[6] 林京, 赵明. 变转速下机械设备动态信号分析方法的回顾与展望[J]. 中国科学(技术科学), 2015, 7: 669-686.  
LIN Jing, ZHAO Ming. Dynamic signal analysis for speed-varying machinery: a review[J]. Scientia Sinica ( Technologica), 2015, 7: 669-686. (in Chinese)

[7] BOSSLEY K M, MCKENDRICK R J, HARRIS C J, et al. Hybrid computed order tracking[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999, 13 (4): 627-

- 641.
- [8] 郭瑜, 秦树人, 汤宝平, 等. 基于瞬时频率估计的旋转机械阶比跟踪[J]. 机械工程学报, 2003, 39(3): 32-36.  
GUO Yu, QIN Shuren, TANG Baoping, et al. Order tracking of rotating machinery based on instantaneous frequency estimation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(3): 32-36. (in Chinese)
- [9] 梁玉前, 秦树人, 郭瑜. 旋转机械升降速信号的瞬时频率估计[J]. 机械工程学报, 2003, 39(9): 75-80.  
LIANG Yuqian, QIN Shuren, GUO Yu. Instantaneous frequency estimation of run-up or run-down sign of rotating machinery[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(9): 75-80. (in Chinese)
- [10] PAN M C, LIN Y F. Further exploration of Vold - Kalman-filtering order tracking with shaft-speed information—I: theoretical part, numerical implementation and parameter investigations[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(5): 1134-1154.
- [11] 胡爱军, 朱瑜. 基于改进峰值搜索法的旋转机械瞬时频率估计[J]. 振动与冲击, 2013, 32(7): 113-117.  
HU Aijun, ZHU Yu. Instantaneous frequency estimation of a rotating machinery based on an improved peak search method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(7): 113-117. (in Chinese)
- [12] 王栋, 丁雪娟. 基于自动搜峰瞬时频率估计的自适应多阶比分析技术研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(18): 19-24.  
WANG Dong, DING Xuejuan. Tacholess adaptive multi-order tracking technology based on instantaneous frequency estimation with automatic peak search algorithm and its application[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(18): 19-24. (in Chinese)
- [13] 赵晓平, 赵秀莉, 侯荣涛, 等. 一种新的旋转机械升降速阶段振动信号的瞬时频率估计算法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(7): 103-108.  
ZHAO Xiaopin, ZHAO Xiuli, HOU Rongtao, et al. A new method for instantaneous frequency estimation of run-up or run-down vibration signal for rotating machinery[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(7): 103-108. (in Chinese)
- [14] 赵晓平, 吴家新, 周子贤. 改进的 Seam Carving 瞬时频率估计算法研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2017, 9(2): 214-219.  
ZHAO Xiaopin, WU Jiixin, ZHOU Zixian. Instantaneous frequency estimation based on improved Seam Carving algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology(Natural Science Edition), 2017, 9(2): 214-219. (in Chinese)
- [15] FENG Z, MING L, CHU F. Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: a review with application examples[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2013, 38(1): 165-205.
- [16] LEI Y, LIN J, HE Z, et al. A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 35(1/2): 108-126.
- [17] 康兵, 关向雨, 舒乃秋, 等. 几种时频分析方法在 VF-TO 频谱分析中的应用[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 680-686.  
KANG Bing, GUAN Xiangyu, SHU Naiqiu, et al. Several time-frequency analysis methods applied in spectral analysis of VF-TO[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(2): 680-686. (in Chinese)
- [18] YAN R, GAO R X, CHEN X. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: a review with applications[J]. Signal Processing, 2014, 96(5): 1-15.
- [19] 徐平, 郝旺身. 振动信号处理与数据分析[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 144-163.



**第一作者简介:**陈龙,男,1990年12月生,博士生。主要研究方向为汽车系统动力学与控制。曾发表《分段刚度双质量飞轮非线性振动特性研究》(《汽车工程》2019年第41卷第4期)等论文。  
E-mail: cl8450@163.com