

激光与光电子学进展

基于自混合干涉技术和希尔伯特-黄变换的
齿轮箱故障检测

周旭明*, 徐鹏, 赵芬妮, 李鹏飞

中国人民武装警察部队后勤学院, 天津 300309

摘要 齿轮箱的振动信号当中包含齿轮运转过程中的所有特征信息,通过采集分析振动信号即可掌握设备当前运转状态。采集齿轮箱振动信号的方法有很多,利用激光自混合干涉原理实现的非接触式测量手段具有极其独特的优势:一是该方法能采集到齿轮箱故障早期的特征信号,以便及时采取对应措施;二是该方法在测量过程中无需破坏齿轮箱箱体表面即可得到检测所需的特征信息;三是相比于安装加速度传感器,该方法对箱体附着的反光镜片产生的影响很微小,可忽略不计。在实验过程中,人为制作行星轮磨损故障并采集故障特征信号,然后使用希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)信号处理方法对采集到的行星轮的故障振动信号进行提取,并分析HHT所得到的各阶固有模式函数(IMF)分量以及希尔伯特谱。从希尔伯特谱中能够分析得出齿轮磨损故障的周期,所得结果与理论值对比吻合良好,说明该方法能够有效地检测齿轮箱振动故障。

关键词 仪器、测量与计量; 振动信号; 故障诊断; 自混合干涉技术; 希尔伯特-黄变换

中图分类号 TP-39

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2312002

Gearbox Fault Detection Based on Self-Mixing Interference
Technology and Hilbert-Huang Transform

Zhou Xuming*, Xu Peng, Zhao Fenni, Li Pengfei

Logistics University of People's Armed Police Force, Tianjin 300309, China

Abstract The vibration signal of the gearbox contains all the characteristic information during gear operation. The current running state of the equipment can be mastered by collecting and analyzing vibration signals. There are many methods for collecting gearbox vibration signals. The noncontact measurement method, based on the principle of laser self-mixing interference, has extremely unique advantages. First, this method can collect the early characteristic signals of gearbox fault and take corresponding measures in time. Second, the method can obtain the required characteristic information without damaging the gearbox's surface. Third, compared with the installation of an acceleration sensor, the influence of this method on the reflector attached to the gearbox is very small and can be ignored. The planetary gear wear fault is artificially made, and the fault characteristic signal is collected during the experiment. Furthermore, the fault vibration signals of planetary gears are extracted and the intrinsic mode function (IMF) components of each order and Hilbert spectrum are analyzed using the Hilbert-Huang transform (HHT) signal processing method. The Hilbert spectrum can be analyzed during the period of gear wear fault. The results are in good agreement with the theoretical values, showing that this method can effectively detect gearbox vibration faults.

Key words instrumentation, measurement and metrology; vibration signal; fault detection; self-mixing interference technology; Hilbert-Huang transform

1 引言

齿轮箱的系统结构主要是齿轮、传动轴、轴承

等^[1]。据统计^[2],超过90%齿轮箱故障表现为齿轮、传动轴和轴承方面。这些故障均表现为振动信号,其表现形式也有较大差别。在检测齿轮故障时,主要以齿

收稿日期: 2021-09-30; 修回日期: 2021-11-01; 录用日期: 2021-11-15

基金项目: 中国人民武装警察部队后勤学院应用研究项目(WHY202007)

通信作者: *zhou05008@126.com

形误差、齿轮磨损、断齿为主,并且这些故障发生在箱体内部的太阳轮、行星轮、行星架等关键部位^[3]。传统的测振手段主要是通过安装加速度传感器^[4]的形式实现,也即振动分析法^[5-6],除此之外还有声发射测振法^[7],但这些方法都需要在设备上安装附加装置^[8],并且无法测量体积较小的齿轮箱。激光自混合干涉(SMI)测振方法作为一种光学非接触式测量技术^[9],不仅能够适配复杂工况,同时对被测物体体积无限制,设备简单易操作,测量精度高。本文使用激光SMI测振技术进行信号采集,然后使用希尔伯特-黄变换(HHT)完成信号处理,得到希尔伯特谱^[10]并进行分析。HHT信号处理方法在傅里叶变换的基础上吸取了小波变换多分辨率的优势,并且该方法具备自适应性,能够分析处理线性和非线性振动信号^[11]。

2 SMI测振原理

自混合测振的原理可以通过三镜腔模型来理解^[12]。首先激光器射出一束光,这束光经过激光器内腔射向外界,照射在外界振动物体的表面返回。返回的光再进入内腔时,与射出光发生光耦合现象。由于射出光与返回光是同一束光,因此称之为自混合。发生光耦合现象后,由于外界物体振动,输出的光功率和初相角均发生改变。调整外界物体与激光器的间距直至发生激光SMI现象,此时可通过三镜法布里-珀罗(F-P)腔^[13]来描述此现象,如图1所示。

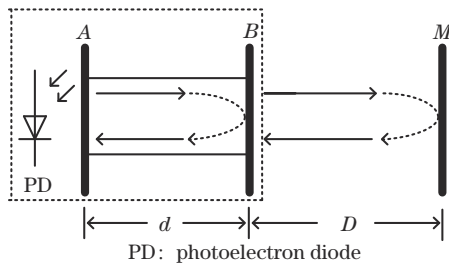


图1 三镜腔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three mirror cavity

图1中,虚线框表示激光器,A、B分别表示激光器的两个端面,间距恒定为 d 。AB段构成了激光器的内腔,SMI现象即在内腔AB中发生。M为外界反射面,端面B与反射面的距离为 D 可调。光束从端面A射出,经内腔AB段被端面B反射回到端面A,该束光同时从端面B透射出,经BM段被外界反射面M反射回到内腔AB中,与AB段的返回光发生光耦合现象。该过程可概括为,被端面B反射的光束和被M反射的光束在内腔AB中发生光耦合。此时,内腔AB的距离 d 恒定,外界反射面M不断振动导致端面B与外界反射面M的距离 D 不断变化,从而引起端面A接收到的耦合光相位和光功率发生变化^[14],实时监测端面A接收的耦合光相位和光功率即可得到反射面M的振动特

征信息。上述过程可用公式表述为

$$\omega_0 \tau_{AD} = \omega_F \tau_{AD} + C \sin[\omega_F \tau_{AD} + \arctan \alpha], \quad (1)$$

式中: $\tau_{AD} = 2(d+D)/C$ 为光从端面A发射,经反射面M返回端面A所经历的时间; ω_0 为BM段无光反馈时的角频率; ω_F 为BM段存在光反馈时的角频率; C 为光反馈系数; α 为线宽展宽因子。令

$$x_0(t) = \omega_0 \tau_{AD}, \quad (2)$$

$$x_F(t) = \omega_F \tau_{AD}, \quad (3)$$

此时,式(1)可表达为

$$x_0(t) = x_F(t) + C \sin[x_F(t) + \arctan \alpha], \quad (4)$$

式中: $x_0(t)$ 表示激光器发射出的激光经过谐振腔时的初始相位; $x_F(t)$ 表示激光经外界反射面M反射回到谐振腔发生耦合时的相位。

由于光在内腔AB中被端面A反射所经过的光程为 $2d(t)$,被反射面M反射所经过的光程为 $2[d(t)+D(t)]$ 。根据几何光学的基本原理,相位函数 $x_0(t)$ 、 $x_F(t)$ 和波长函数 $\lambda_0(t)$ 、 $\lambda_F(t)$,内腔AB距离函数 $d(t)$ 、端面B与M的距离函数 $D(t)$ 即可表示为^[15]

$$x_0(t) = 2\pi \frac{2d(t)}{\lambda_0(t)} = \frac{4\pi d(t)}{\lambda_0(t)}, \quad (5)$$

$$x_F(t) = 2\pi \frac{2[d(t)+D(t)]}{\lambda_F(t)} = \frac{4\pi[d(t)+D(t)]}{\lambda_F(t)}. \quad (6)$$

在式(5)和式(6)中,波长函数为 $\lambda_0(t)$ 、 $\lambda_F(t)$ 固定,内腔AB距离函数 $d(t)$ 也为定值,端面B与M的距离函数 $D(t)$ 为变量。由此可得,相位函数 $x_F(t)$ 与物体振动有关。

在三镜腔模型中,激光器的输出功率可表达为

$$P = P_0 [1 + m \cos(\omega_F \tau_{AD})], \quad (7)$$

式中: P_0 表示无光反馈时激光器的输出功率; m 表示激光器频率调制系数。将式(1)代入式(7)得

$$P = P_0 [1 + m \cos(\omega_F \tau_{AD})] = P_0 \{1 + m \cos[\omega_0 \tau_{AD} - C \sin(\omega_0 \tau_{AD} - \dots + \arctan \alpha)]\}, \quad (8)$$

化简式(8)得

$$P(\omega_F \tau_{AD}) = P(\omega_F \tau_{AD} \pm 2b\pi), \quad b = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (9)$$

由式(9)可知,有光反馈时的输出功率是 $\omega_F \tau_{AD}$ 的周期函数,其周期为 2π 。由于 $\tau_{AD} = 2(d+D)/C$,可知输出光功率随 D 的改变发生周期性变化,当 D 的长度每改变半个波长时,SMI条纹随之变化一个条纹,这与传统双光干涉相比,其条纹分辨率一致。

在式(8)中, C 表示反射面M的反馈系数,光耦合现象从弱反馈到适度反馈^[16]时, C 的取值范围为(0.1, 4.6)。为便于理解,通过具体实验说明上述公式的内容。图2为实验过程中调试激光器与扬声器(扬声器与信号发生器连接)相关参数,确定 $C=1.3$ 、振幅 $A=1.5\lambda_0$ (初始波长 $\lambda_0=650\text{ nm}$)、 $\alpha=3$ 时,得到的输出功率 P 的波形,该波形包含了扬声器的振动频率、振动幅值和振动方向等全部特征信息。

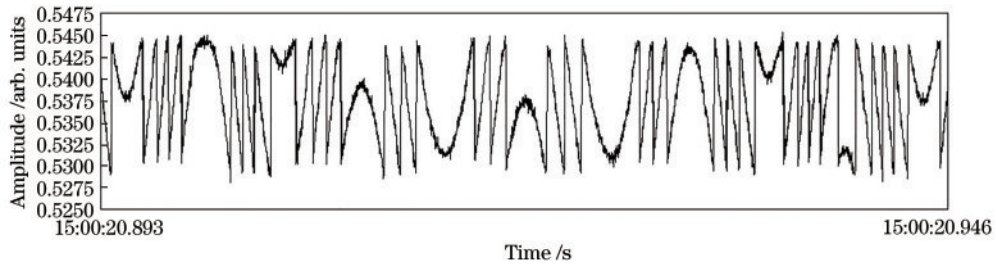


图 2 $C=1.3, A=1.5\lambda_0, \alpha=3$ 时输出功率 P 的波形

Fig. 2 Waveform of output power P when $C = 1.3, A = 1.5\lambda_0$, and $\alpha = 3$

3 检测平台设计

搭建的检测实验系统平台如图 3 所示。其中信号采集板卡选取 NI sbRIO-9636 型采集卡, 由于波形信号的数据量和采样率对硬件采集设备的要求较高, 选用 9636 型板卡具备 512 MB 内存及 256 MB RAM 完全能够满足使用需求。采集卡采集到的激光器光功率, 在波形显示端表现为幅值。在光路设计中加入恒流源作为激光器的驱动信号。在齿轮箱的箱体上附着反光片, 附着位置需要尽量靠近齿轮运转的箱体, 以便凸显故障特征信号, 从而更容易地采集到故障信号的特征信息。

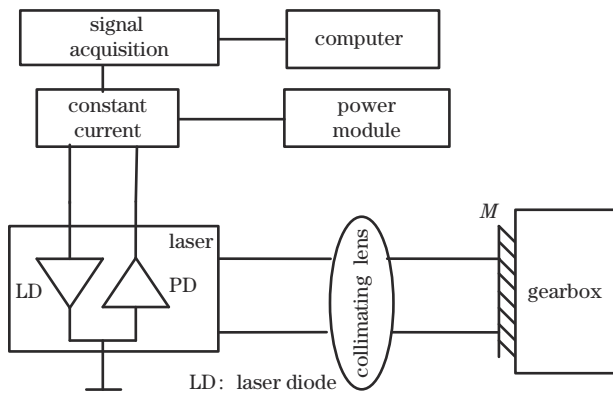


图 3 检测平台示意图

Fig. 3 Schematic diagram of detection platform

4 HHT 理论及具体实验

HHT 可以从两个角度进行理解: 第一步是经验模态分解 (EMD) 算法; 第二步是将 EMD 算法的结果进行 HHT。HHT 信号处理方法的优点在于其能够针对性地处理非线性信号。HHT 先通过 EMD 算法将一时间序列数据进行分解, 然后再通过 HHT 获得该时间序列数据的运行特征, 通过分析算法处理得到的希尔伯特谱获取到齿轮箱的时频特征信息^[17]。

实验过程中选择 TSUKASA 的电动机, 具体型号为 TG-85-CH-77-D919, 在其正常运转时的额定工作电压为 24 V, 输出轴的额定转速为 98 r/min。该齿轮箱内部齿轮的齿数及额定转速见表 1。

表 1 中数据为 TG-85-CH-77-D919 型齿轮箱内部齿轮相关参数。齿轮箱内部电动机上的带动轮有 11

表 1 齿数及额定转速数据

Table 1 Number of teeth and rated speed data

Composition	Driving wheel	Sun wheel	Planet wheel	Output shaft
Number of teeth	11	47 and 12	59 and 15	55
Rated speed / (r·s ⁻¹)	125.815	29.446	5.989	1.634

齿。带动轮连接太阳轮, 太阳轮为大小两圈共体结构, 齿数分别为 47 齿和 12 齿。太阳轮与行星轮连接, 其构造与太阳轮类似, 齿数分别为 59 齿和 15 齿。输出轴的齿圈由 55 齿构成。齿轮箱工作状态下, 带动轮的 11 齿与太阳轮的 47 齿啮合; 太阳轮的 12 齿与行星轮的 59 齿啮合; 行星轮的 15 齿与输出轴的 59 齿啮合。额定状态下, 输出轴转速为 98 r/min, 也即 1.634 r/s, 推算可得太阳轮的转速为 29.446 r/s, 行星轮的转速 5.989 r/s。

在实验前先将齿轮箱进行调速处理, 以便波形数据清晰完整。处理后的各齿轮部件及对应转速见表 2。

表 2 齿数及调速转速数据

Table 2 Number of teeth and speed regulation data

Composition	Driving wheel	Sun wheel	Planet wheel	Output shaft
Number of teeth	11	47 and 12	59 and 15	55
Rated speed / (r·s ⁻¹)	14	3.27778	0.66667	0.18181

在齿轮箱的箱体上粘贴反光片, 用于获取振动信号。选取太阳轮 47 齿的某一齿作为故障点并认为制作齿磨损故障, 此时太阳轮 47 齿的上的转速为 3.27778 r/s, 也即 0.3051 s/r。调试 SMI 检测平台并利用 Labview 软件采集实验波形数据如图 4 所示。

在信号采集处理方面, 通过 Labview 软件配合 NI9636 采集板卡完成信号采集工作, 设定采样率为 8 K。通过分析齿轮箱振动信号波形, 清晰明确地显示出已出现自混合现象。使用 HHT 处理波形信号, 设定 HHT 的采样率与采集板卡采样率保持一致, 均为 8 K, 最终得到波形数据量为 40330。结果显示 HHT 的各阶固有模态函数 (IMF) 分量及最终希尔伯特谱如图 5 所示。

图 5 为经过 HHT 分解后的一阶 IMF 模分量, 及其残差 (残余) 信号。原始信号被分解为 (-0.5, 0.5)、(-0.2, 0.2)、(-0.1, 0.1)、(-0.1, 0.1) 4 组包络区

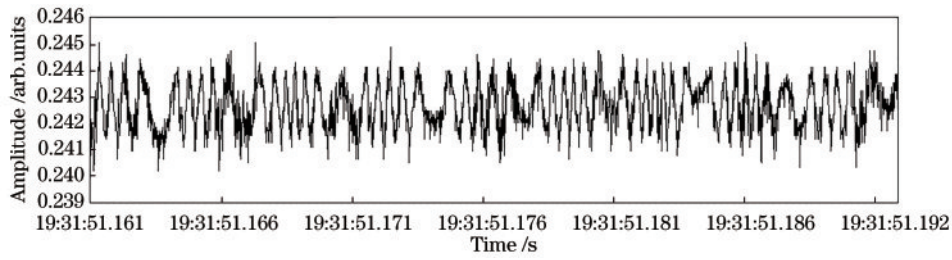


图 4 太阳轮 47 齿磨损故障 SMI 波形

Fig. 4 SMI waveform of 47 tooth wear fault of sun wheel

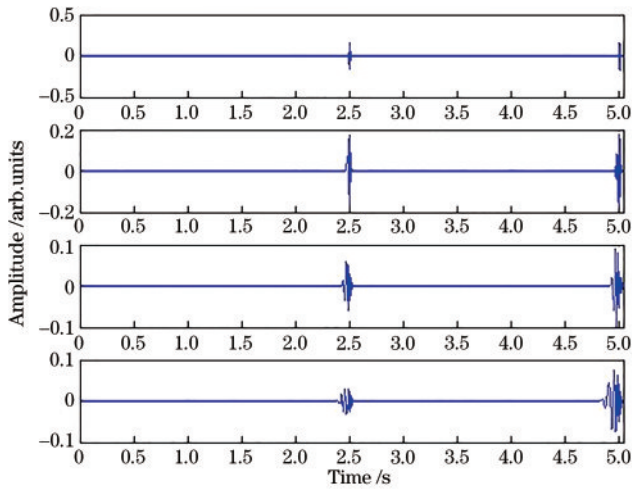


图 5 HHT 的 IMF 分量 I

Fig. 5 IMF component I of HHT

间。其中,第 4 组 $(-0.1, 0.1)$ 包络区间为其残差信号需进一步分解。由此结果可知,原始信号在第 1、2、3 组包络区间内已被完全分解,信号特征信息可通过希尔伯特谱时频表示。

图 6 为经过 HHT 分解后的二阶 IMF 模分量,及其残差(残余)信号。图 5 第 4 组残差信号被分解为 $(-0.05, 0.05)$ 、 $(-0.05, 0.05)$ 、 $(-0.02, 0.02)$ 、 $(-0.01, 0.01)$ 4 组包络区间,第 1、2、3 组包络区间的

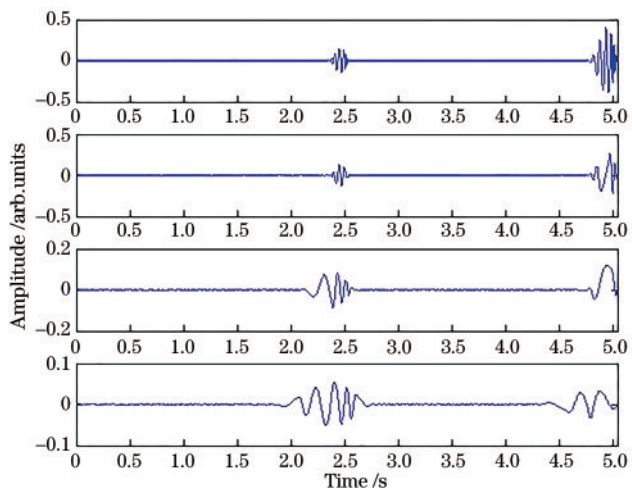


图 6 HHT 的 IMF 分量 II

Fig. 6 IMF component II of HHT

信号特征信息可由希尔伯特谱表示。

图 7 为经过 HHT 分解后的三阶 IMF 模分量,及其残差(残余)信号。在此图中,图 6 的 $(-0.01, 0.01)$ 包络区间被分解为 $(-0.01, 0.01)$ 、 $(-0.005, 0.005)$ 、 $(-0.005, 0.005)$ 、 $(-0.005, 0.005)$ 4 组包络区间,再次得到 3 组包络信号的希尔伯特谱。

图 8 为经过 HHT 分解后的四阶 IMF 模分量。此分量中,第 4 组包络区间 $(-0.002, -0.001)$ 的上下包

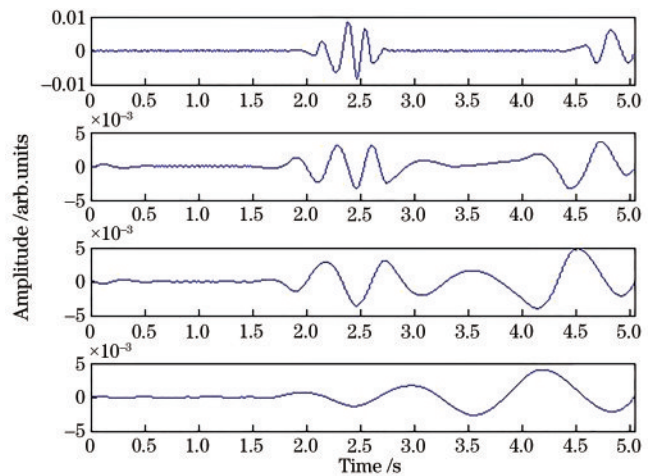


图 7 HHT 的 IMF 分量 III

Fig. 7 IMF component III of HHT

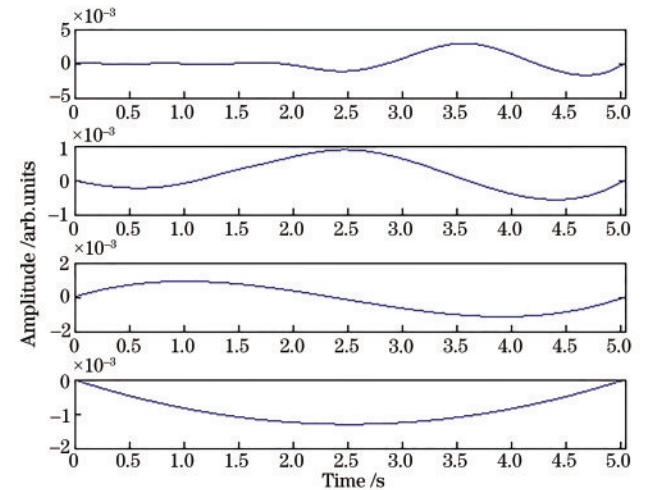


图 8 HHT 的 IMF 分量 IV

Fig. 8 IMF component IV of HHT

络线均小于 0, 说明残差(残余)信号已被完全分解。

将图 5~8 的各阶 IMF 分量进行希尔伯特变换, 得到希尔伯特谱如图 9 所示。

图 9 表示各阶 IMF 分量的时频信息及能量分布, 汇总能量分布频率带出现的时间点, 得到数据如表 3

所示。

分析表 3 中的希尔伯特谱可得到在 0.5744 s 至 4.5700 s 时间段内, 存在规律性的时间间隔, 时间间隔分别为 0.3161、0.3335、0.3190、0.3150、0.3250、0.2490、0.3190、0.2860 s, 其平均值为 0.3078 s。

表 3 希尔伯特谱数据

Table 3 Hilbert spectrum data

Time /s	0.5744	0.8905	1.2240	1.7500	2.0690	3.0760	3.3910	3.7160	3.9650	4.2840	4.5700
Instantaneous frequency /Hz	483.8	439.2	159.7	432.4	520.6	476.8	463.5	225.4	361.1	223.9	186.7
Time interval /s	/	0.3161	0.3335	/	0.3190	/	0.3150	0.3250	0.2490	0.3190	0.2860

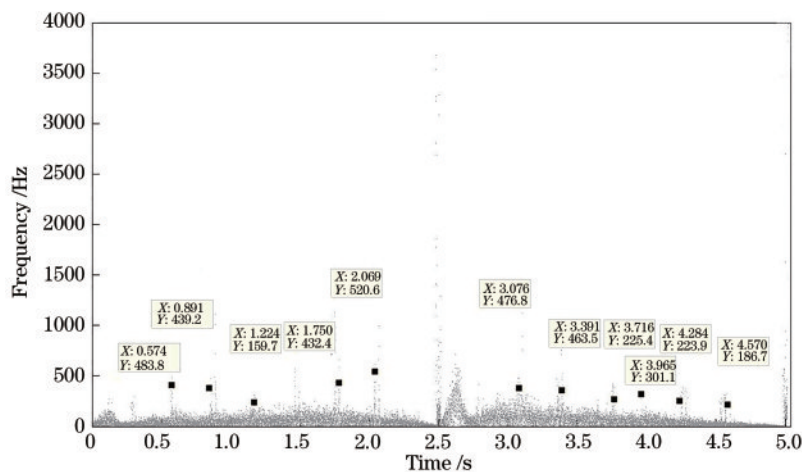


图 9 齿轮磨损故障的希尔伯特谱

Fig. 9 Hilbert spectrum of gear wear fault

5 结 论

由理论分析表明, 齿轮一大圈 47 齿的额定故障周期为 0.3051 s/r, 实验所得故障周期平均值为 0.3078 s/r, 相对误差率为 0.88%, 实验结果与理论值吻合良好。结果显示, 使用激光 SMI 技术采集到的齿轮箱磨损故障振动信号再用 HHT 进行信号处理, 能够准确地定位并检测齿轮的早期磨损故障。

参 考 文 献

- [1] 李庆, 胡炜, 彭二飞, 等. 基于增广 Huber 正则化稀疏低秩矩阵的旋转机械微弱故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4579-4589.
Li Q, Hu W, Peng E F, et al. Weak fault diagnosis of rotating machinery based on augmented Huber regularized sparse low-rank-matrix approach full text replacement[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4579-4589.
- [2] 李峰. 基于振动和电流信号的行星齿轮箱多故障诊断方法[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
Li F. Research on multi-fault diagnosis of planetary gearbox based on vibration and current signals[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [3] 冯志鹏, 赵镭镭, 褚福磊. 行星齿轮箱齿轮局部故障振动

频谱特征[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 119-127.

Feng Z P, Zhao L L, Chu F L. Vibration spectral characteristics of localized gear fault of planetary gearboxes [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(5): 119-127.

- [4] 宁少慧. 基于嵌入式传感器的齿轮箱早期故障诊断研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
Ning S H. Research on early fault diagnosis of gearbox based on embedded sensors[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [5] Jamaludin N, Mba D. Monitoring extremely slow rolling element bearings: part I[J]. NDT & E International, 2002, 35(6): 349-358.
- [6] 肖鑫. 基于跨层设计的机械振动无线传感器网络同步采集方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
Xiao X. Synchronous acquisition based on cross-layer design for mechanical vibration wireless sensor networks [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [7] Liu J, Shao Y M, Lim T C. Vibration analysis of ball bearings with a localized defect applying piecewise response function[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 56: 156-169.
- [8] 王文韬. 结构损伤声发射和超声/相控阵检测与识别方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

- Wang W T. Study on structural damage detection and identification method based on acoustic emission and ultrasonic waves/phased array[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [9] 吴腾飞, 周强, 林嘉睿, 等. 光频扫描干涉绝对距离测量[J]. 中国激光, 2021, 48(19): 1918002.
Wu T F, Zhou Q, Lin J R, et al. Frequency scanning interferometry absolute distance measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(19): 1918002.
- [10] 刘译胶. 一种时域希尔伯特变换方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
Liu Y J. Time domain Hilbert transform method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [11] 宋向金, 王卓, 胡静涛, 等. Hilbert解调制方法诊断异步电机轴承故障[J]. 电工技术学报, 2018, 33(21): 4941-4948.
Song X J, Wang Z, Hu J T, et al. Diagnosis of bearing fault in induction motors using Hilbert demodulation approach[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(21): 4941-4948.
- [12] 王琦, 黄辉, 王兴妍, 等. InP基一镜斜置三镜腔型光电探测器理论分析及实验研究[J]. 中国激光, 2005, 32(8): 1045-1049.
Wang Q, Huang H, Wang X Y, et al. Theoretical analyses and experimental investigations of InP-based one-mirror-inclined three-mirror-cavity photodetector[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(8): 1045-1049.
- [13] 伍锡山, 张鹏, 周博睿, 等. 具有频率转换机制的激光器的回馈效应研究[J]. 激光杂志, 2018, 39(10): 49-52.
Wu X S, Zhang P, Zhou B R, et al. Research on the feedback effect in the lasers with frequency conversion mechanism[J]. Laser Journal, 2018, 39(10): 49-52.
- [14] Fang H, Deng W, Zhang X J, et al. Few-layer formamidinium lead bromide nanoplatelets for ultrapure-green and high-efficiency light-emitting diodes[J]. Nano Research, 2019, 12(1): 171-176.
- [15] Xi Y, Xi J Q, Gessmann T, et al. Junction temperature measurements in deep-UV light-emitting diodes[J]. MRS Proceedings, 2004, 831: 299-304.
- [16] Donati S, Giuliani G, Merlo S. Laser diode feedback interferometer for measurement of displacements without ambiguity[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1995, 31(1): 113-119.
- [17] Zhang Z H, Li C W, Huang Z. Vibration measurement based on multiple Hilbert transform for self-mixing interferometry[J]. Optics Communications, 2019, 436: 192-196.