

基于扭振信号加窗 RMS 时域同步平均的行星齿轮箱裂纹故障诊断

魏 伟¹ 李云鹏¹ 梁景源²

(1 机械科学研究总院 青岛分院有限公司, 山东 青岛 266000)

(2 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要 行星齿轮箱具有结构紧凑、传动效率高、运行平稳等优点,被广泛应用于关键机械装备中。由于恶劣的工作环境,行星齿轮箱易产生齿根裂纹故障损伤且不易被识别,易造成安全隐患。扭转振动信号理论上不受行星架旋转引入的路径调制影响,相比于传统研究中的横向振动信号具有很大的优越性,频率成分简单,易于提取故障特征。为此,以扭振信号为分析对象,提出了一种加窗 RMS(Root mean square)时域同步平均技术,实现行星齿轮箱的早期齿根裂纹故障诊断;并搭建故障模拟试验台,验证了该方法的有效性。

关键词 行星齿轮箱 齿根裂纹 扭振信号 时域同步平均 加窗 RMS

Diagnosis of Planetary Gearbox Crack Fault based on Torsional Vibration Signal Windowed RMS Time-domain Synchronous Averaging

Wei Wei¹ Li Yunpeng¹ Liang Jingyuan²

(1 Qingdao Branch of China Academy of Machinery Science & Technology, Qingdao 266000, China)

(2 School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract Planetary gearboxes have the advantages of compact structure, high transmission efficiency, stable operation, etc., and are widely used in heavy loads and key mechanical equipment. Since planetary gearbox often works in harsh environment, its key components are prone to tooth root crack fault damage and are not easy to be identified, easy to cause security risks. Compared with traditional transverse vibration signal, torsional vibration signal is not affected by the modulation of time-varying transmission path in theory, it has great advantages, so its frequency component is simple and it is easy to extract fault features. Taking torsional vibration signals as the analysis object, a windowed RMS time-domain synchronous averaging technique is proposed to realize the early tooth root crack fault diagnosis of planetary gearbox, and a fault simulation test bed is built to verify the effectiveness of the method.

Key words Planetary gearbox Tooth root crack Torsional signal Time-domain synchronous averaging Windowed RMS

0 引言

行星齿轮箱传动效率高、结构紧凑、运行稳定、维护简单,被广泛应用于航空航天、工程机械、风力发电机等大型机械设备中^[1]。由于工作环境恶劣,行星齿轮箱易出现齿根裂纹故障。若不能及时识别早期裂纹故障,当裂纹扩展到一定程度,可能会导致轮齿折断,甚至卡入齿圈之中,造成设备停机,产生经济损失。目前,针对行星齿轮箱的诊断技术难以准确识别早期裂纹故障,亟待进一步研究。

分析振动信号特征,实现行星齿轮箱的齿根裂纹故障诊断,是目前最成熟的早期诊断技术方法,得到了广泛的应用。传统诊断方法的分析对象为行星齿轮箱的横向振动信号,通过安装于壳体的加速度传感器采集。由于行星齿轮箱的结构及运动形式复杂,产生的横向振动信号也极为复杂^[2],早期齿根裂纹故障引起的冲击信号很容易被淹没^[3-5]。当横向振动信号能反映出较明显的故障特征时,故障往往已经发展的比较严重。为了更好地取得故障预警的效果,本文中将对组成成分简单的扭振信号进行研

究分析,从而实现行星齿轮箱齿根裂纹故障的早期诊断。由于从齿轮副啮合点到转矩传感器的距离不变,不受行星架旋转带来的调幅调频影响,该方法易于后期的信号处理分析^{[6]102-103}。

目前,齿轮箱故障诊断的对象多基于齿轮箱横向振动信号,对行星齿轮扭转振动信号的频率和幅值调制问题关注不足。文献[6]¹⁰⁴⁻¹⁰⁵中指出,扭振信号成分简单,没有行星架旋转带来的调制作用。文献[7-8]中通过分析转矩信号成功诊断了高速列车中的齿轮箱。张辉^[9]运用小波包分解方法对扭振信号进行分析,成功识别了定轴齿轮箱的断齿故障。但目前对扭振信号的研究多集中于定轴齿轮箱的故障诊断,对于运用扭振信号实现行星齿轮箱的早期裂纹故障识别的文献较少。

传统的扭振信号分析方法大多基于故障特征频率实现裂纹故障诊断,如小波分析^[10]、经验模式分解(EMD)^[11]、最小熵解卷积^[12]、最大相关峭度解卷积^[13]、稀疏分解^[14]等方法。然而,早期裂纹故障特征不明显,故障特征信号往往隐没于背景噪声中,基于故障特征频率的方法难以取得好的效果。

时域同步平均分析是一种常用的信号降噪方法,按感兴趣的特定周期对原始信号进行截断、叠加后平均,消除其他周期的信号及背景噪声,是一种有效的信号时域特征分析方法。McFadden^[15]通过加窗时域同步平均分析,得到了单个行星轮的啮合振动信号。Smidt^[16]在行星架上安装传感器,通过时域同步平均分析对齿轮箱进行状态监测。Yip^[17]通过时域同步平均法对振动信号进行预处理,再从预处理结果中提取特征指标实现齿轮箱的故障诊断。Abboud 等^[18]提出了广义的时域同步平均算法,可以在变速变载工况下应用。然而,早期齿根裂纹故障引起的冲击信号很微弱,传统的时域同步平均分析无法凸显冲击成分,突出故障特征。

基于上述讨论,本文中以扭振信号为分析对象,提出了一种加窗 RMS(Root mean square)时域同步平均分析方法,实现行星齿轮箱早期齿根裂纹故障识别。首先,分析传统的时域同步平均方法,在此基础上提出加窗 RMS 时域同步平均技术;其次,搭建行星齿轮箱裂纹故障模拟试验台,完成传感器的选型及数据采集系统的开发;最后,采集额定工况下的转矩数据并进行分析。结果表明,加窗 RMS 时域同步平均技术可以凸显故障特征,清晰识别早期裂纹故障。利用该技术进行行星齿轮箱故障诊断具有

一定的应用前景。

1 加窗 RMS 时域同步平均分析

旋转机械最大的特征是其运动呈准周期性或周期性,因此,与设备运行状态相关的扭振信号也为准周期或周期信号。传感器采集到的原始扭振信号中往往含有大量的干扰信号,时域同步平均可以将感兴趣的特定周期信号提取出来,抑制其余周期的信号,大幅提高信噪比,便于分析行星轮系中是否存在齿根裂纹故障。

1.1 时域同步平均分析

传统的时域同步平均技术原理如图 1 所示。将原始信号按照所要提取的信号周期进行分段划分,得到 R 段子信号,将 R 段子信号进行叠加取和后求算术平均值。

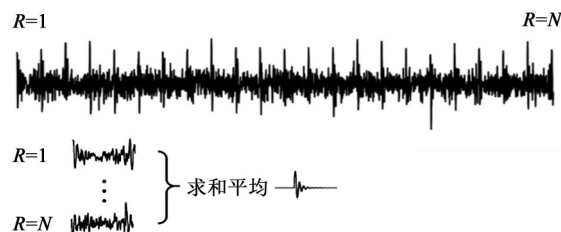


图1 时域同步平均原理

Fig. 1 Principle of time-domain synchronous averaging

设 $x(t)$ 为行星轮系产生的原始振动信号,传感器采集到的为离散信号 $x(n\Delta t)$, Δt 即为采样间隔。感兴趣的振动信号周期为 $T = 1/f_0$, f_0 为对应转频。将每个感兴趣的周期内的点数设为 N ,则采集到的振动信号共有 RN 个点,关于感兴趣的周期 T 的时域同步平均信号可表示为式(1),幅频特性可表示为式(2)。

$$y_n = \frac{1}{R} \sum_{r=0}^{R-1} x_{n+rN} \quad (1)$$

$$|H(f)| = \frac{1}{R} \frac{\left| \sin\left(R\pi \frac{f}{f_0}\right) \right|}{\left| \sin\left(\pi \frac{f}{f_0}\right) \right|} \quad (2)$$

根据式(2)可以发现,时域同步平均技术本质上为一个梳状滤波器,如图 2 所示。该滤波器的通带为 f_0 及其倍频,只有相关频率能得以保留。通带内的增益为 1,半功率带宽近似为 f_0/R 。当平均次数 R 逐渐增加时,通带的宽度将越来越窄,对原始信号中与目标频率 f_0 无关的频率信号抑制越强烈,信噪比也越高。

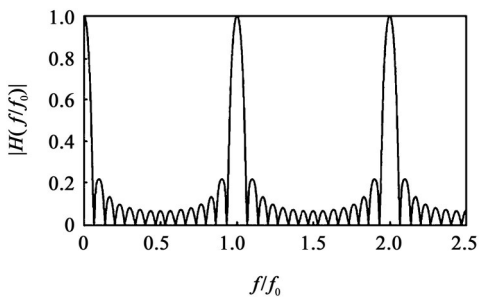


图2 梳状滤波器

Fig. 2 Comb filter

1.2 加窗 RMS 时域同步平均分析

传统的时域同步平均技术计算的是各段子信号的算术平均值。由于RMS值更能体现轮齿振动信号的冲击特征，能够反映出每个轮齿的状态，本研究将计算各段子信号对应点的RMS值来代替算术平均值。RMS时域平均同样具有传统时域同步平均的梳状滤波性质，并且能够完全保留冲击振动信号的相位信息。

RMS时域平均分析结果中可以清晰观察到各轮齿的状态。当各轮齿均处于健康状态时，各轮齿对应峰值的大小近乎相等；当某轮齿出现齿根裂纹故障时，其对应峰值将明显增大。图3所示为内齿圈上1个轮齿出现齿根裂纹故障时，转矩信号的RMS时域平均结果示意图。可以观察到，在内齿圈的一个相对旋转周期内，出现了3个异常峰值，间隔为相对旋转周期的1/3，与实际情况相符，故障齿在1个周期内分别与3个行星轮各啮合1次，表现为3个异常峰值。

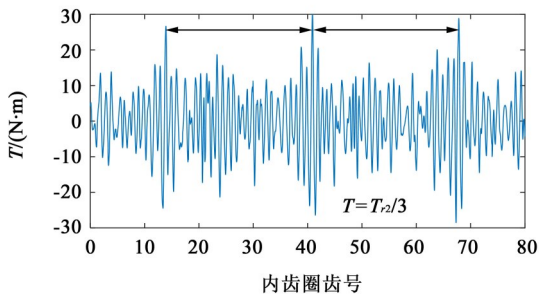


图3 内齿圈裂纹故障RMS时域平均结果

Fig. 3 RMS time-domain averaging result of inner gear ring crack fault

为了进一步凸显冲击特征，本研究设计了一种矩形滑动窗，如图4所示。由于直齿轮工作时同时只有1~2对轮齿参与啮合，滑动窗宽可设计为1~2齿宽。通过比较发现，窗宽为2齿宽时，冲击成分无法得到凸显，反而会被平滑，因此，将矩形窗宽设置为1个齿宽。

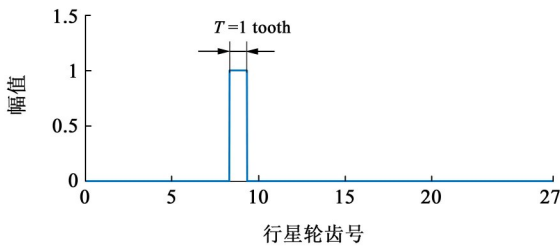


图4 矩形滑动窗

Fig. 4 Rectangular sliding window

将该矩形窗应用于RMS时域同步平均分析得到的结果中，从第一个轮齿对应位置开始，截取第一个轮齿的扭振信息并计算其有效值，而后滑动至第二个轮齿对应位置重复上述操作，直到遍历完所有的齿，生成加窗RMS时域平均分析结果，凸显冲击特征。

2 行星齿轮箱裂纹故障模拟试验台

搭建了行星齿轮箱齿根裂纹故障模拟试验台，通过电火花线切割技术模拟齿根裂纹故障，采集试验数据并分析，验证本研究所提方法的有效性。

搭建的试验台为电封闭功率流型试验台，可用于大功率齿轮箱的试验研究。试验台由变频控制系统、驱动电机、测试齿轮箱、陪试齿轮箱、加载电机和测试系统组成，整体布局及结构如图5所示。测试齿轮箱及陪试齿轮箱为相同型号的行星齿轮箱，额定转速为1 500 r/min，速比为28.2，额定功率为49 kW，结构参数如表1所示。



图5 试验台结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of test bed structure

表1 行星齿轮箱结构参数

Tab. 1 Structural parameters of planetary gearbox

高速级行星轮系		低速级行星轮系	
内齿圈齿数	101	内齿圈齿数	80
行星轮齿数	41	行星轮齿数	27
太阳轮齿数	16	太阳轮齿数	25
行星轮个数	3	行星轮个数	3
高速级齿轮宽度/mm	38	低速级齿轮宽度/mm	55

采用LabVIEW软件开发数据采集系统，主界面如图6所示。

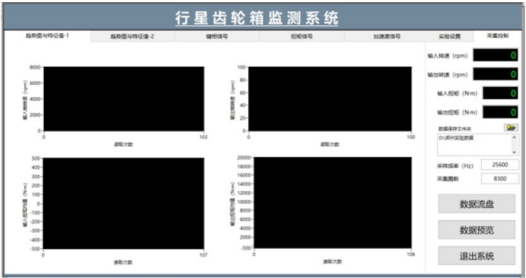


图6 数据采集系统

Fig. 6 Data acquisition system

由于行星齿轮箱的低速级承受着更大的转矩，容易出现齿根裂纹故障，将在低速级上模拟故障。行星轮既与太阳轮啮合，同时又与内齿圈啮合，其运动形式复杂，早期裂纹故障更难以识别。因此，将加工行星轮裂纹故障并进行分析。

应用电火花线切割技术在齿根处加工裂纹，如图 7 所示。模拟裂纹的深度设置为最大裂纹深度的 10%，加工得到的裂纹故障如图 8 所示。



图7 电火花线切割
Fig. 7 EDM wire cutting

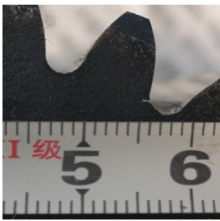


图8 行星轮齿根裂纹
Fig. 8 Planet gear tooth root crack

3 试验信号分析

以 1 500 r/min、250 N·m 工况下的转矩信号为例进行分析。图 9 所示为转矩信号的阶次谱，齿根裂纹故障状态和健康状态阶次谱成分基本一致，在 1 倍啮合阶次附近出现了行星轮故障特征阶次调制边带，但很不明显。因此，应用传统的谱分析方法难以识别早期裂纹故障，不适用于工业现场。

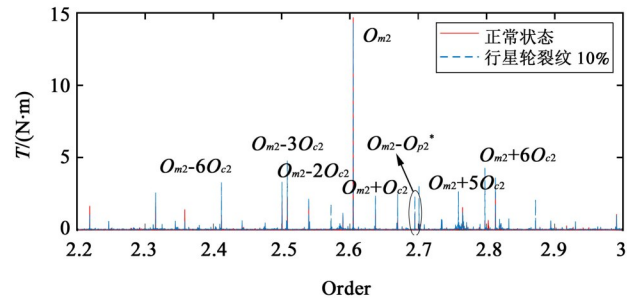


图9 转矩信号阶次谱

Fig. 9 Order spectrum of torque signal

用本文中提出的 RMS 时域同步平均技术对转矩

信号进行分析，平均周期为 3 倍行星轮故障特征周期。图 10 所示为转矩信号 RMS 时域同步平均分析结果。从图中可以观察到明显的故障特征，存在 3 个明显的异常值，间隔为行星轮相对旋转周期，表明行星轮上有 1 个轮齿出现了齿根裂纹故障，故障齿每个相对旋转周期与内齿圈啮合 1 次，产生 1 次异常峰值。

进一步地，设计如图 4 所示的矩形滑动窗对 RMS 时域平均分析结果进行分析，结果如图 11 所示。经过加窗分析后，转矩信号中的周期性冲击成分得到了突出，行星轮的 15 号齿出现了齿根裂纹故障。图 11(b)所示为健康状态转矩信号的加窗 RMS 时域平均结果，无异常峰值的出现，表明各轮齿状态良好，传动平稳，与实际情况相符。

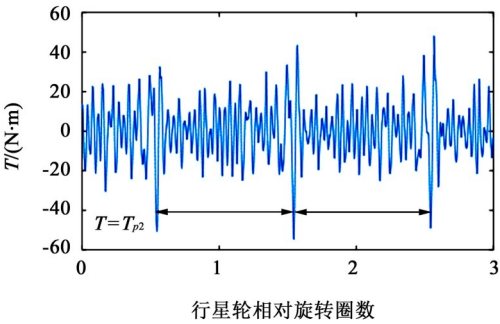
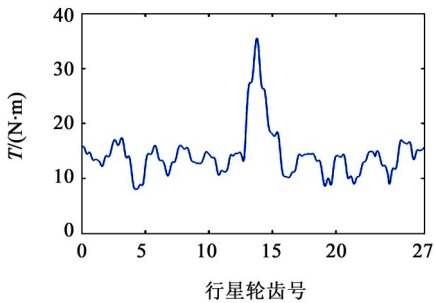
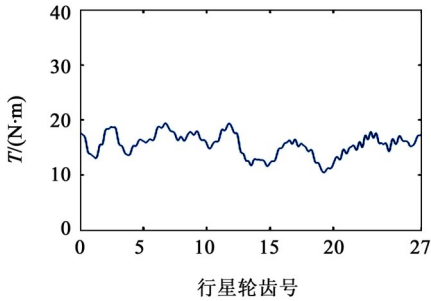


图10 裂纹故障转矩信号 RMS 时域平均分析结果

Fig. 10 RMS time-domain averaging analysis results of crack fault torque signal



(a) 裂纹状态



(b) 健康状态

图11 加窗 RMS 时域同步平均分析结果

Fig. 11 Results of windowed RMS time-domain synchronization averaging analysis

4 结论

提出了一种加窗 RMS 时域同步平均技术,并搭建了行星齿轮箱裂纹故障模拟试验台进行试验验证,主要结论如下:

(1) 尽管扭振信号相比于传统的横向振动信号,不受行星架旋转的影响,但其频率成分仍然较为复杂,当早期裂纹故障发生时,难以从频谱中观察到故障特征频率。

(2) 加窗 RMS 时域同步平均分析可以大大凸显转矩信号中的冲击成分,对早期齿根裂纹故障的识别具有直观且明显的效果,具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 雷亚国,何正嘉,林京,等.行星齿轮箱故障诊断技术的研究进展[J].机械工程学报,2011,47(19):59-67.
LEI Yaguo, HE Zhengjia, LIN Jing, et al. Research advances of fault diagnosis technique for planetary gearboxes[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(19): 59-67.
- [2] 康传章,陈兵奎,张靖,等.齿轮系统振动信号的边频带研究及其应用[J].机械传动,2013,37(4):41-43.
KANG Chuanshang, CHEN Bingkui, ZHANG Jing, et al. Research on the sideband of gear system vibration signal and its application[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2013, 37(4): 41-43.
- [3] 郜立焕,张利娜,朱建国,等.基于小波分析的齿轮箱振动信号消噪处理[J].机械传动,2010,34(3):50-52.
GAO Lihuan, ZHANG Li'na, ZHU Jianguo, et al. Gearbox vibration signal de-noising processing based on wavelet analysis[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2010, 34(3): 50-52.
- [4] 李国彦.复合行星齿轮传动系统损伤建模与故障诊断技术研究[D].济南:山东大学,2017:78-90.
LI Guoyan. Research on damage modeling and fault diagnosis of the compound planetary gear system[D]. Ji'nan: Shandong University, 2017: 78-90.
- [5] 李国彦,李方义,刘浩华,等.含裂纹复合两级行星轮系振动特性研究[J].振动工程学报,2018,31(3):500-512.
LI Guoyan, LI Fangyi, LIU Haohua, et al. Study on vibration characteristics of compound two stage planetary gearbox with crack[J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(3): 500-512.
- [6] 冯志鹏,褚福磊.行星齿轮箱故障诊断的扭转振动信号分析方法[J].中国电机工程学报,2013,33(14):101-106.
FENG Zhipeng, CHU Fulei. Torsional vibration signal analysis method for fault diagnosis of planetary gearboxes[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(14): 101-106.
- [7] KIA S H, HENAO H, CAPOLINO G A. Torsional vibration assessment using induction machine electromagnetic torque estimation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 209-219.
- [8] HENAO H, KIA S H, CAPOLINO G A. Torsional-vibration assessment and gear-fault diagnosis in railway traction system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1707-1717.
- [9] 张辉.基于扭振分析方法的齿轮传动系统故障辨识的研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2018:33-50.
ZHANG Hui. Research on the fault classification of gear drive system based on torsional vibration analysis method[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2018: 33-50.
- [10] SAXENA A, WU B, VACHTSEVANOS G. A methodology for analyzing vibration data from planetary gear systems using complex morlet wavelets[C]//Proceedings of the 2005 American Control Conference, June 8-10, 2005, OR, Portland. New York: IEEE, 2005: 4730-4735.
- [11] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science, 1998, 454 (1971): 903-995.
- [12] ENDO H, RANDALL R B. Enhancement of autoregressive model based gear tooth fault detection technique by the use of minimum entropy deconvolution filter[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2006, 21(2): 906-919.
- [13] McDONALD G L, ZHAO Q, ZUO M J. Maximum correlated kurtosis deconvolution and application on gear tooth chip fault detection[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 33: 237-255.
- [14] FENG Z P, LIANG M. Complex signal analysis for wind turbine planetary gearbox fault diagnosis via iterative atomic decomposition thresholding[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333 (20): 5196-5211.
- [15] McFADDEN P D. A technique for calculating the time domain averages of the vibration of the individual planet gears and the sun gear in an epicyclic gearbox[J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 144(1): 163-172.
- [16] SMIDT M R D. Internal vibration monitoring of a planetary gearbox[J]. Ring Gear, 2010: 56-60.
- [17] YIP L. Analysis and modelling of planetary gearbox vibration data for early fault detection[D]. Toronto: University of Toronto, 2011: 15-74.
- [18] ABBOUD D, ANTONI J, SIEG-ZIEBA S, et al. Deterministic-random separation in nonstationary regime[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 362: 305-326.

收稿日期: 2021-06-16

作者简介: 魏伟(1980—),男,河南荥阳人,高级工程师;研究方向为机械传动及成套装备的设计与制造。