

齿轮裂纹故障声发射检测技术*

明廷锋¹ 姚晓山^{1,2} 陈双桥¹ 张永祥¹

(1. 海军工程大学, 湖北 武汉, 430000)

(2. 空军雷达学院, 湖北 武汉, 430000)

摘要: 设计了齿轮故障试验平台, 构建了声发射检测系统, 进行了齿轮裂纹故障声发射检测试验研究。通过分析齿轮裂纹故障的声发射信号的特征, 并运用小波包技术、Hilbert变换等信号分析方法, 有效提取了齿轮裂纹故障的信息。

关键词: 声发射; 齿轮; 裂纹故障

Abstract: The gear fault simulation platform is designed and the acoustic emission (AE) testing system is set up. By analyzing the characteristics of the fatigue fracture gear's AE signals, the faults information is obtained using the wavelet packet analysis and Hilbert transformer.

Key Words: Acoustic Emission; Gear; Fatigue Fracture

齿轮是机械设备重要功率传动部件, 其运转状况直接影响到整个系统的正常运行。据日本新日铁会社的统计^[1], 齿轮故障约占机器总故障次数的 10.3%。据统计, 在齿轮箱失效零件中, 齿轮本身的失效比重最大约占 60%。如果齿轮出现危险性的裂纹, 将直接影响到它的安全性, 甚至会导致灾难性事故发生。为了避免由于齿轮断裂故障造成的巨大经济、军事和人员损失, 开展齿轮裂纹, 尤其是初期裂纹的检测方法研究是一项十分重要的工作。

声发射技术是一种有效的无损探伤技术, 且已在诸多领域得到了广泛的应用, 例如大型储罐的在线检测、压力管道泄漏检测、阀门检漏等。对于齿轮装置来说, 一般包括多对齿轮副、各级传动轴、轴承及齿轮箱。现场监测时, 比较实际的方法是将声发射传感器放置在齿轮箱上。声发射信号从信号源到传感器必然经过衰减和变化, 声发射波传播过程中波形和能量转换规律如何, 目前尚未见到相关报道, 因此, 有必要作深入的理论研究, 尤其是结构复杂的齿轮箱系统中声波传播和波形转换规律, 并据此寻求声发射源的特征。国外已开展了声发射在齿轮缺陷诊断方面的研究, 参考文献 [2] 进行了齿轮故障诊断时分别应用声发射、振动分析和铁谱技术之间的比较试验, 参考文献 [3] 还给出了声发射用于齿轮箱故障诊断的局限性。而国内有关声发射技术在齿轮裂纹故障诊断方面的实际应用鲜有报道。本文从试验出发, 研究齿轮裂纹故障的声发射检测技术。

* 湖北省自然科学基金项目资助 (批准号: 2006ABA011)。

1 齿轮裂纹的声发射信号特征

齿轮裂纹处即为声发射源，所发出的声信号以弹性波的形式向四周传播，由于扩展损失使声波衰减，频率越高衰减越严重。同时声发射波碰到界面时会被反射，反射时会产生波形变换。因此，实际上到达传感器的声发射波是经过多次发射和不同模式的波叠加的复杂波形。

由于轮齿具有盘状结构，因此可以利用基于板波理论的模态声发射技术来检测和分析其表面和内部的声发射信号。使用模态声发射技术可以在对声发射信号波形进行分析的基础上，提取声发射源的有关特征，如裂纹的大小、损伤程度和声发射源的方位等。根据板波理论，声发射波（亦是一种机械波）在平板内按三种模式传播：

- (1) 在板平面内沿传播方向运动的扩展波；
- (2) 垂直于板平面运动的弯曲波；
- (3) 在板平面内垂直于传播方向运动的剪切波。

一般在板状结构中只能检测到扩展波和弯曲波，剪切波是很难检测到的，并且其影响可以忽略不计。扩展波的传播速度最快，且无色散效应，且具有不同频率分量的扩展波按照相同的速度运动；弯曲波的传播速度较慢，有色散效应，其传播速度与频率的平方根成正比。具有较高频率的弯曲波会先到达传感器，由于衰减严重，幅值较低；具有较低频率的弯曲波会较晚到达传感器，同时由于不同频率分量的分离，弯曲波随着时间的推移，幅度会逐渐衰减。

齿轮裂纹产生的是具有较大高频分量的扩展波分量，而背景噪声信号和零件塑性变形产生的是频率相对较低的弯曲波分量。由于这两种波的频率范围不同，波速不同，波形特征亦存在明显差别，因而可以通过波形分析的方法，提取信号波形中表征疲劳裂纹萌生和扩展的扩展波，同时有效抑制弯曲波的影响，实现齿轮裂纹故障的检测^[4]。

2 试验的设计

2.1 试验平台的介绍

为了开展齿轮裂纹故障声发射检测试验研究。设计并搭建了一台齿轮故障诊断试验平台。平台结构见图1。主要由齿轮副、电机、轴承、齿轮油泵、联轴节、轴等构成，电机转速为2830r/min。载荷由齿轮泵的出口阀门的开度大小而不同。大齿齿数 $z_1 = 30$ ，小齿齿数 $z_2 = 180$ ，模数 $m = 1\text{mm}$ ，大齿齿宽 $b_1 = 20\text{mm}$ ，小齿齿宽 $b_2 = 20\text{mm}$ 。大、小齿轮材料皆为45#钢，表面高频淬火，齿面硬度250HBS，磨齿加工，齿轮精度8级。为使齿轮达到弯曲疲劳强度极限，产生裂纹并扩展。将一个齿沿宽度方向铣削，仅保留6mm齿宽，减弱其强度，并在该齿的齿根处沿切线方向用线切割的方法预制3mm深的裂纹（如图2所示）。

2.2 声发射检测系统

声发射检测系统由传感器、前置放大器、主放大器和计算机采集系统构成。声发射信号

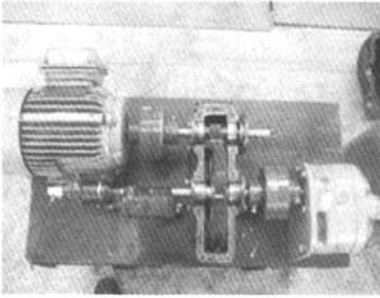


图1 试验平台

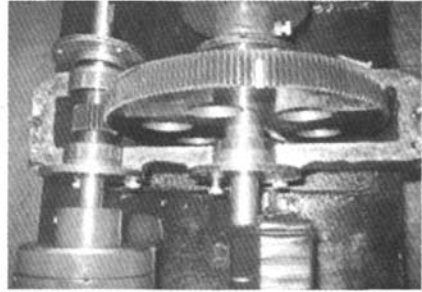


图2 齿轮裂纹故障

经传感器接收后先经过前置放大器,再送入主放大器进一步放大和调理,最后进入计算机采集系统。根据试验的实际情况来决定声发射检测系统的声发射传感器、主放大器、采集卡等组件的性能参数选择和设置。传感器选用北京声华兴业科技有限公司研制的150A声发射传感器,带宽为50~400kHz;前置放大器增益为40dB,带宽跟传感器的带宽一致。采集系统为四川拓普测控科技有限公司生产的Topview2000高速数据采集卡,单通道采样频率为2MHz,采样时间长度为1s。

试验中使用了2个声发射传感器,为了得到有效信号,减弱信号由于传递界面过多而产生损失,其中一个直接与大齿轮传动轴的端面相接触。当电机运转时,传感器与传动轴同频转动。为了避免信号线被缠绕,试验中使用了水银滑环作为信号线的转接,具体情况见图1中大齿轮左端传动轴部分。另一个齿轮安装在齿轮箱箱体上,用来试验能否从齿轮箱箱体直接测取齿轮裂纹故障的声发射信号。

3 试验结果与数据分析

声发射信号的持续时间一般只有几十到数百微秒,持续时间短,数据量大,依靠硬件记录、存储声发射信号的瞬态波形比较困难,不仅硬件投入较大,而且很难保证实时性。单个声发射事件的持续时间很短,频带很宽,高频成分穿过物体时衰减严重,而低频成分又与机械噪声重叠,不易分离,因此可用较高的通频带检测声发射信号,并进一步提取出表征疲劳裂纹特征的频率较高的扩展波分量。金属疲劳裂纹声发射信号频率范围大概是150~200kHz。故所选用的传感器和测试装置基本能够适用。

使用该声发射测试系统记录齿轮裂纹故障状态下运转过程中产生的声发射信号。在使用较高的通频带和用较大的阈值水平滤除背景噪声的基础上,再使用小波分析的方法进一步滤除背景噪声和弯曲波信号的分量,突出表征裂纹的扩展波分量,同时有效抑制其他信号的影响,最后得到的裂纹齿牙在承载过程中的信号波形如图3所示。

先对信号进行小波包分解后,重构所关心频带的声发射信号。再经过对信号进行Hilbert变换和FFT变换,得到图4的声发射信号频谱图。从图中可以清晰地看出齿轮的转频及其倍频的信息。

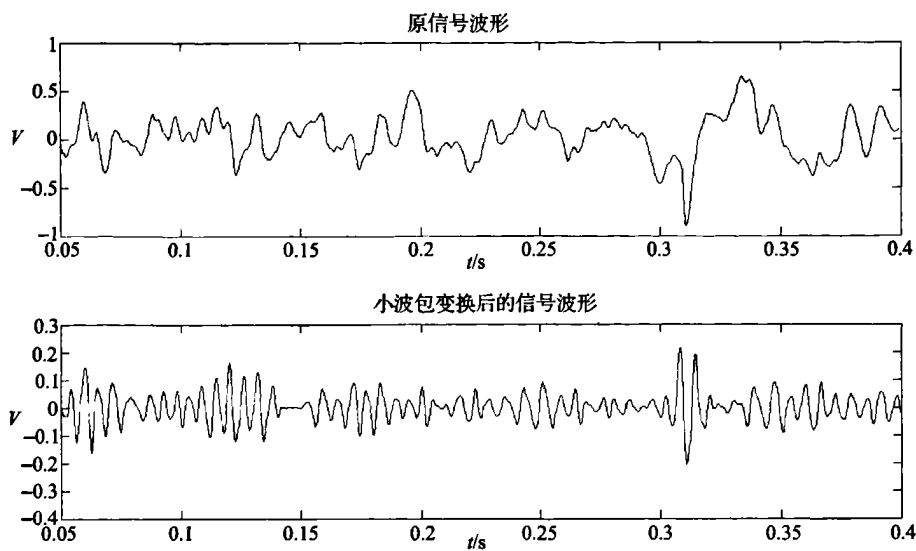


图3 齿轮裂纹声发射信号波形图

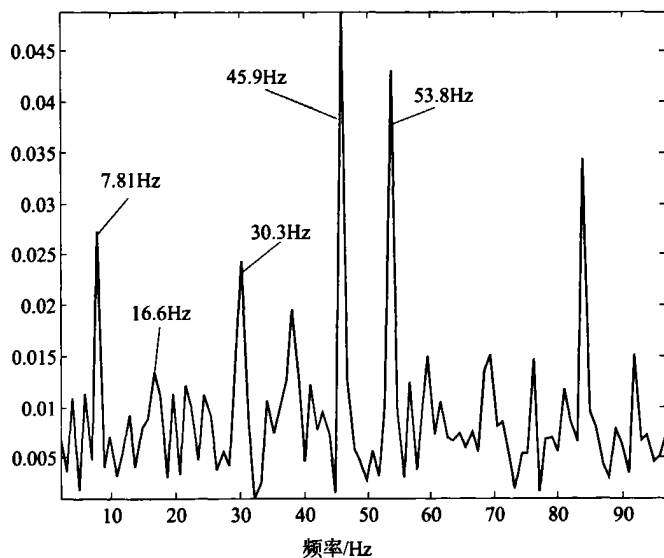


图4 Hilbert 变换后信号的频谱图

4 结论

(1) 通过在齿轮箱上的试验过程分析可知,合理设计试验方法与测试系统,可以有效地测取旋转齿轮裂纹故障的声发射信号。

(2) 先提取声发射信号中裂纹的扩展波分量,再利用小波包、Hilbert 变换和频谱分析方法,可有效地识别齿轮故障信息。

(3) 如何运用声发射信号识别齿轮裂纹、轮齿间隙过大、齿面损伤等故障,还需要进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] 屈梁生, 何正嘉. 机械故障诊断学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986.
- [2] Chee Keong Tan, Phil Irving, David Mba. A comparative experimental study on the diagnostic and prognostic capabilities of acoustics emission, vibration and spectrometric oil analysis for spur gears [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, (21): 208-233.
- [3] Chee Keong Tan, David Mba. Limitation of acoustic emission for identifying seeded defects in gearboxes [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2005, 24 (1): 18-25.
- [4] 李耀东, 黄成祥, 侯力. 疲劳裂纹的声发射信号检测技术 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12 (6): 504-506.

作者简介:

明廷锋 (1975—), 博士, 海军工程大学船舶与动力学院机械工程系机械电子与信息教研室讲师。研究方向: 机械设备状态监测与故障诊断。

作者：[明廷锋](#)，[姚晓山](#)，[陈双桥](#)，[张永祥](#)

作者单位：

相似文献(10条)

1. 期刊论文 [明廷涛](#), [张永祥](#). [MING Ting-tao](#), [ZHANG Yong-xiang](#) [齿轮裂纹故障仿真计算与诊断 -机械设计与制造](#) 2005, "" (6)

提出了一种利用仿真信号对齿轮裂纹故障进行诊断的方法.从齿轮的单一自由度振动模型出发,将裂纹故障等效为模型中轮齿刚度的削减,运用差分算法对模型进行求解,得到齿轮的振动位移、速度以及加速度响应,利用傅立叶变换和双谱分析对仿真结果进行处理,成功地提取了齿轮裂纹的故障信息.

2. 期刊论文 [张延超](#), [邵忍平](#), [刘宏昱](#). [ZHANG Yan-chao](#), [SHAO Ren-ping](#), [LIU Hong-yu](#) [裂纹故障对齿轮传动系统动力特性的影响 -机械设计与制造](#)2006, "" (10)

建立了正常与故障齿轮传动系统的动力学模型,并对其进行了动力学分析,研究了齿轮出现裂纹故障后齿轮啮合刚度的变化以及对整个齿轮传动系统动力特性的影响,通过对正常系统和故障系统动力特性的对比分析以及对正常和故障齿轮系统进行试验,表明理论分析的准确性和可靠性,这对齿轮机械系统的设计和对故障齿轮系统进行诊断有重要的价值,并对齿轮系统进行实时监测有着重要意义.

3. 期刊论文 [杨龙兴](#), [贾民平](#), [许飞云](#), [钟秉林](#) [齿轮裂纹故障的循环矩诊断 -中国机械工程](#)2003, 14 (19)

介绍了循环平稳信号的二阶循环矩分析和处理方法、循环矩分析的抑噪特性.在给定的齿轮裂纹调频信号数学模型的基础上,证明了其二阶循环平稳性.利用二阶循环矩-滞后平面图,分析了裂纹故障信号特征的循环矩提取方法,进行了仿真实验.针对齿轮裂纹故障实例,说明其对故障信号解调的有效性.

4. 会议论文 [周志兵](#), [王正生](#) [直八型机中减变速器齿轮裂纹故障研究](#) 1999

基于直八试飞考核机的中尾减变速器在工作349.5小时后返厂检修时发现中减主动齿轮裂纹故障,通过失效分析,确定中减主动齿轮裂纹系数大应力疲劳裂纹;同时对中减主动齿轮进行了振动特性及受力状况分析,确认大应力产生的主要原因为严重偏载所致,其实质属齿根弯曲疲劳失效.为了提高中减齿轮抗疲劳能力,从设计、工艺方面作了一系列改进,通过疲劳试验验证,齿轮随载能力明显提高.

5. 期刊论文 [刘宏昱](#), [邵忍平](#), [张延超](#). [Liu Hongyu](#), [Shao Renping](#), [Zhang Yanchao](#) [基于高阶累积量的齿轮裂纹故障检测与识别 -机械科学与技术](#)2006, 25 (9)

介绍了高阶累积量理论,分析了它提取复杂耦合信号和非线性特性的理论基础.在此基础上将高阶累积量方法应用于机械齿轮故障特征分析诊断之中,对无故障齿轮和故障齿轮受激振后的振动耦合信号进行了分析和特征提取,从而成功地实现了对不同裂纹类故障的识别与诊断,通过与传统的功率谱等方法比较,说明了高阶累积量方法在齿轮故障诊断中的可靠性和有效性.

6. 期刊论文 [张延超](#), [邵忍平](#), [刘宏昱](#) [裂纹故障齿轮动力特性的有限元分析与仿真 -机械制造](#)2005, 43 (12)

用Pro/E软件建立了正常齿轮体和裂纹齿轮体模型,采用有限元软件ANSYS对模型进行了仿真模拟计算,研究了不同位置、不同大小的裂纹对齿轮结构动力特性的影响,并用实物进行了结构动力学实验,仿真模拟结果和实验结果非常吻合,这为带有裂纹故障齿轮的动力特性的研究提供了一种可靠而有效的方法,对齿轮的损伤和诊断研究具有重要价值.

7. 期刊论文 [王凯](#), [张永祥](#), [李军](#). [WANG Kai](#), [ZHANG YongXiang](#), [LI Jun](#) [齿轮裂纹故障的双谱分析 -机械强度](#)

2006, 28 (3)

齿轮振动信号中的非线性给故障特征的提取带来较大难度,通过分析裂纹齿轮振动信号非线性产生的原因,利用双谱分析具有提取信号非线性耦合特征的能力,将双谱分析应用于齿轮裂纹的故障诊断中.试验结果表明,该方法能够有效地将正常及不同裂纹程度的齿轮区分开来.

8. 学位论文 [周焱强](#) [直齿圆柱齿轮及其裂纹故障的动态特性分析与数值模拟](#) 2008

齿轮传动是机械传动中应用最广泛的传动机构.其中,齿轮作为承受载荷和传递动力的主要承担者,在工程中常会遇到裂纹、断裂、振动等情况,因此,有必要对齿轮系统的运动学、动力学行为进行研究和分析.本文基于三维建模软件Pro/E,构建了直齿圆柱齿轮的三维参数化模型,并将其导入机械系统动力学仿真软件ADAMS中,在ADAMS中建立齿轮的虚拟样机模型,对此样机模型进行动力学仿真,得到转速、轮齿啮合力等参数特性曲线,对其进行分析,为动态特性优化提供理论指导.

随着工业的迅速发展,对齿轮传动装置的承载能力提出了更高的要求,而齿轮的接触疲劳强度是评价齿轮承载能力的一个重要尺度.目前已经广泛采用有限元法对齿轮传动强度进行分析计算.本文利用Pro/E与ANSYS接口技术和ANSYS软件,对Pro/E中设计的具体渐开线直齿圆柱齿轮在一定载荷作用下的应力状态进行了有限元仿真分析.研究结果对齿轮模型库的开发、改进和优化齿轮设计具有一定的参考价值.

而随着对机械系统可靠性和安全性要求的不断提高,人们对机械元件和系统的故障诊断的研究越来越重视.本文建立了裂纹齿轮结构的三维有限元动力学模型,分析了齿轮轮齿发生裂纹后的齿轮动力特性(固有频率、振型等),并对裂纹出现位置和裂纹尺寸等对齿轮动力特性的影响进行了深入探讨和计算机模拟.指出裂纹尺寸和位置对于齿轮的固有频率和振型都有影响,当出现裂纹后固有频率发生下降,振型也发生变化.而裂纹位置对固有频率和振型影响大于裂纹尺寸的影响,当裂纹位于齿根处时齿轮固有频率下降较大.当裂纹位于分度圆处时齿轮固有频率下降较小.当裂纹出现后齿轮体的振型明显不同于无裂纹时的振型.在裂纹附近振动的振幅增大.并且齿轮体的动态应力也发生变化,与无裂纹的齿轮结构动力特性完全不同.这些结论对有效地进行齿轮裂纹故障分析提供了理论依据,对机械传动系统的故障发生机理研究具有一定的实用价值.

9. 期刊论文 [陈仲生](#), [杨拥民](#), [胡政](#), [沈国际](#) [基于循环平稳时间序列的齿轮裂纹故障早期检测 -航空动力学报](#)

2005, 20 (1)

在分析齿轮振动信号的基础上,结合其具有循环平稳性的特点,提出了基于线性几乎周期时变AR模型的故障早期检测方法,推导了基于高阶循环累积量的模型参数辨识算法,具有抑制加性平稳噪声的优点.最后在某一型直升机齿轮裂纹故障早期检测中进行了应用,结果表明该方法具有很好的预测能力,利用模型残差的峭度能够检测和预报早期裂纹故障,同时为根据正常样本检测旋转机械故障提供了一种思路.

10. 期刊论文 [陈略](#), [訾艳阳](#), [何正嘉](#), [成玮](#). [CHEN Lue](#), [ZI Yanyang](#), [HE Zhengjia](#), [CHENG Wei](#) [总体平均经验模式分解与](#)

[1.5维谱方法的研究 -西安交通大学学报](#)2009, 43 (5)

针对复杂背景下机行走部齿轮箱齿轮裂纹故障微弱特征的提取问题,提出了总体平均经验模式分解(EEMD)与1.5维谱的故障特征提取方法.首先运用EEMD方法对振动信号进行自适应抗混分解,得到不同频带的基本模式分量(IMF),然后运用1.5维谱方法对停含有故障特征信息的IMF进行后处理.该方法具有避免模式混淆、抑制高斯白噪声、检测非线性耦合特征等特性,并以此来提取故障的微弱特征信息.根据待处理信号的时频特性与EEMD原理,提出了在EEMD方法中加入高斯白噪声的准则,通过信号仿真验证了EEMD方法的抗混分解能力.将EEMD与1.5维谱方法应用于机行走部齿轮箱的监测诊断中,成功地提取出齿轮箱大齿轮齿根早期的裂纹故障.

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_6802368.aspx

下载时间: 2010年5月27日