

AE 信号的事件谱分析技术应用于 滚动轴承故障诊断

杨占才 张来斌 王朝晖 樊建春

摘要:以声发射事件采样法为基础构造一个基于事件的时间序列。通过对事件谱的分析表明:即能够在故障的早期阶段有效地提取故障特征,又能够精确地检测和定位故障,而且信号处理速度快,能够满足现场设备故障诊断的实时要求。通过对滚动轴承故障诊断的实验研究表明,事件谱分析方法对于提高滚动轴承故障诊断的可靠性是行之有效的。

关键词:声发射、故障诊断、滚动轴承、事件谱

一、问题的提出

在各种回转机械设备中,滚动轴承是普遍使用的重要标准部件,它的工作状态如何将直接影响机器的工作性能。若未及时对轴承故障进行诊断和预报,不但会影响设备的正常运行,而且可能造成巨大的经济损失。

目前,基于 AE 技术的滚动轴承故障诊断常用时间序列和谱分析方法提取隐含于 AE 包络信号中的故障特征。然而在故障的早期阶段,将会产生具有微弱周期的 AE 事件,在诊断中不能确定某一个声发射信号是否与轴的旋转过程有关,这样埋没了轴承故障特征,从而使诊断的可靠性降低,应用传统的功率谱分析方法难以检测。另外,实时处理超高频率 AE 信号方面,计算速度成为制约设计一个低成本、实时的诊断系统的一个重要因素。

研究表明:声发射信号的事件谱分析方法适合于对轴承故障的声发射信号进行处理,而且能够得到理想的诊断结果,其检测水平优于传统的功率谱分析方法。本文提供了一种可靠的滚动轴承 AE 诊断方法。

二、AE 信号的事件谱分析

事件谱分析方法与传统功率谱分析方法类似,其不同之处在于前者采用的时间序列用事件发生的时间及其对应的幅度表示,而后者采用的是按照等时间间隔采样的时间序列。下面介绍事件谱函数的推导过程:

(1)时间序列 $p(\tau)$

$$p(\tau_i) = (1/\Delta) \sum A_i \quad i=0,1,2,\dots,m-1 \quad (1)$$

$$\tau_i = i\Delta \quad (2)$$

$$A_i = \max |a_{ik}| \quad k=0,1,2,\dots,N-1 \quad (3)$$

式中 N —在 Δ 时间间隔内的振铃计数值

a_{ik} —在 Δ 时间间隔内第 k 个振铃幅值

A_i — τ_i 满足关系式 $(i\Delta - \Delta/2) < \tau_i < (i\Delta + \Delta/2)$ 所对应的振铃最大幅值

传统的傅立叶分析方法,要求对时域波形以较高的采样频率进行采样,才能达到预期效果,然而对于事件谱技术,仅对那些具有某一强度的 AE 事件进行采样,因此其采样点数明显低于传统傅立叶分析方法处理的数据点数,为开发滚动轴承的实时诊断系统提供了有效保障。

对时间序列 $P(\tau_i)$,仅含有与故障有关的 AE 事件,与故障无关的 AE 信号被有效剔除,突出了故障特征。即使在故障的早期阶段所产生的具有微弱周期的 AE 信号,采用这种方法构造的时间序列也能够有效地提取故障特征,从而提高诊断的可靠性。

(2)事件谱函数 $Q(\omega)$

$$Q(\omega) = \sum_{i=0}^{m-1} [P(\tau_i)]^2 e^{-i\omega\tau_i} \quad (4)$$

当滚动轴承部件外圈、内圈及滚动体出现故障时,会产生周期性的冲击现象;通过(1)式构造的时间序列携带有相同周期性的特征信息。对此时间序列按照(3)式进行事件谱分析,在轴承某一频率处会出现清晰的谱峰,将此频率与事先计算的轴承特征故障频率进行比较,即可判断轴承有无故障及故障发生的部位,且峰值的大小反映了故障的严重程度。

三、诊断实例

声发射信号提取与分析系统原理如图 1 所示。在 AE 换能器与轴承座之间加入耦合剂,目的是减少声发射信号在传递过程中不必要的衰减。由 AE 换能器接收的声发射信号进入前置放大器、滤波器之后,变成适合于后续处理的声发射信号,经事件采样器之后构造一个基于事件的时间序列,突出了与故障特征有关的声发射事件,然后进行事件谱分析即可判断轴承有无故障及故障发生的部位。

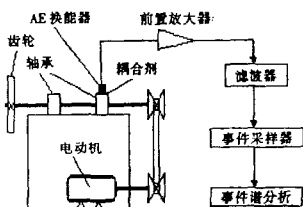


图 1

实验采用一个完好轴承和三个具有不同类型故障的轴承在实验台架上进行实验。具体实验条件如表 1 和表 2 所示。轴承特征故障频率(冲击频率)计算公式如表 3 所示。

a)完好轴承,转速 400r/min;

b)内圈故障轴承,转速 200r/min,故障频率 32.46Hz,谱密度 $0.428g^2 \cdot s$;

- c) 内圈故障轴承, 转速 400r/min, 故障频率 65.34Hz, 谱密度 $0.451g^2 \cdot s$;
- d) 内圈故障轴承, 转速 600r/min, 故障频率 98.57Hz, 谱密度 $0.496g^2 \cdot s$;
- e) 外圈故障轴承, 转速 400r/min, 故障频率 54.87Hz, 谱密度 $0.464g^2 \cdot s$;
- f) 滚动体故障轴承, 转速 400r/min, 故障频率 109.98Hz, 谱密度 $0.512g^2 \cdot s$;

图 2a) 为完好轴承事件谱图, 曲线平坦, 没有明显峰值; 由图 2b) 可见, 在频率 32.46Hz, 64.92Hz 及 97.38Hz 处出现有明显的谱峰, 与轴承的特征故障频率(理论计算值)进行比较, 由此可判断是轴承内圈故障的一阶, 二阶及三阶频率, 在谱峰的两侧出现边频, 这是由于内圈故障频率受到转动频率调制作用而产生的; 图 2c) 至图 2f) 在故障频率处均出现明显的谱峰, 由此可判断轴承故障发生的部位, 峰值的大小与故障的严重程度有关。

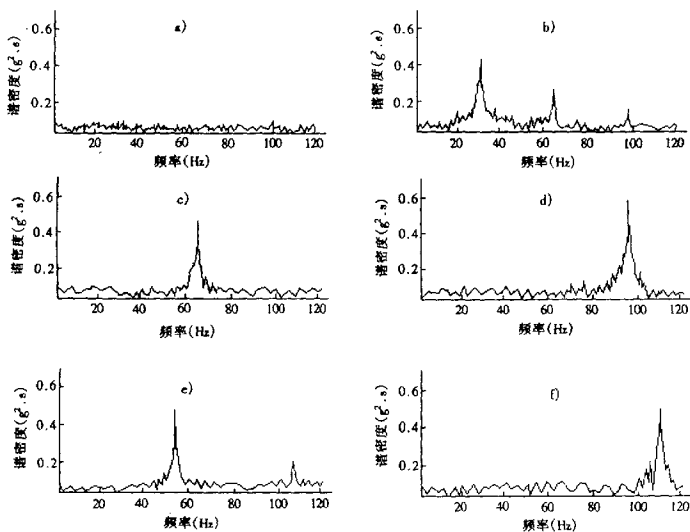


图 2 声发射事件谱图

四、结论

1. 能够在滚动轴承故障的早期阶段有效地提取故障特征, 而且具有比较理想的诊断效果。
2. 既能判断滚动轴承有无故障, 又能确定故障发生的部位, 且峰值的大小反映了故障的严重程度, 实验结果与理论分析相符合。
3. 采用事件采样方法, 加快了信号处理速度, 因此能够开发出一套实时的、商业上可行的滚动轴承故障诊断系统, 适合于应用推广。

表 1 不同转速下轴承内圈故障频率值(2#)

转速, r / min	200	400	600
项 目			
理论值(Hz)	32.75	65.50	98.25
实测值(Hz)	32.46	65.34	98.57

表 2 同一转速下轴承故障频率值(400r/min)

轴承特征	外圈故障(1#)	内圈故障(2#)	滚动体故障(3#)
项 目			
理论值(Hz)	54.62	65.50	110.06
实测值(Hz)	54.87	65.34	109.98

表 3 轴承故障频率(冲击频率)理论计算公式

外圈滚动体通过频率	$f_o = n/2[1 - (d/D)\cos\beta]f_r$
内圈滚动体通过频率	$f_i = n/2[1 + (d/D)\cos\beta]f_r$
滚动体故障	$f_s = D/d[1 - (d/D)^2\cos^2\beta]f_r$
式中: d -滚动体直径; D -轴承的节径; β -接触角; n -滚动体的数量, f_r -内圈旋转频率(N/60)。	

参考文献

1. Snyder, D. L., Random Point Processes, John Wiley & Sons, New York, 1975
2. 王祖荫, 声发射技术基础, 济南, 山东科技出版社, 1990

地址: 石油大学(北京)机电学院, 北京昌平

邮编: 102249

故障诊断

作者：[杨占才](#)，[张来斌](#)，[王朝晖](#)，[樊建春](#)作者单位：[大学\(北京\)机电学院, 北京昌平](#)

相似文献(10条)

1. 期刊论文 [郝如江, 卢文秀, 褚福磊, HAO Ru-jiang, LU Wen-xiu, CHU Fu-lei](#)[声发射检测技术用于滚动轴承故障诊断的研究综述—振动与冲击2008, 27\(3\)](#)

声发射是材料受力变形产生弹性波的现象, 故障滚动轴承在运转过程中会产生声发射. 从几个方面综合阐述了国内外轴承故障声发射检测技术的研究和发展现状, 即轴承故障声发射信号的产生机理, 故障声发射信号的传播衰减特性, 声发射信号的参数分析法和波形分析法对故障特征的描述, 轴承故障声发射源的定位问题, 根据信号特征进行故障模式识别以及声发射检测和振动检测的比较问题. 通过分析总结出滚动轴承声发射检测技术下一步的研究方向, 并指出滚动轴承故障的声发射检测是振动检测的有力补充工具, 特别是在轴承低转速和故障早期的检测中更能发挥作用.

2. 学位论文 [邓艾东 基于声发射的旋转机械碰摩故障诊断基础问题研究 2008](#)

旋转机械动静部件之间的碰摩是运行中的常见故障, 也是亟待解决的重大研究课题. 声发射以其灵敏度、频响范围宽、信息量大、动态检测等特点为碰摩检测提供了一条新的途径. 但由于声发射源多样性、噪声干扰复杂性, 特征信号难以提取与识别, 使其在实际应用中受到很大限制.

本文就降噪、识别和定位这三个AE技术中的基础问题, 进行了较为系统而深入的研究. 通过引入现代信号处理技术, 提出了几种分析处理AE信号的新方法, 在降噪、识别和定位三个方面都有所创新.

1. 对分数变换理论在AE信号降噪处理中的应用进行了探索性研究, 建立了一个基于态函数的三周期离散分余弦变换算法用于降噪模型运算. 实验结果表明: 该算法具有比标准离散余弦变换更大的灵活性, 通过选择适当的分数阶, 能够获得比离散余弦变换更好的降噪效果, 是对声发射信号进行降噪处理的有效途径.

2. 在碰摩AE信号的识别研究中, 应用了分形理论和分形维数来识别碰摩AE的发生. 通过对碰摩声发射信号的分形维分析表明: 无碰摩时, 采样的信号是随机噪声, 此时分形维最大; 开始轻微碰摩时, AE信号表现出突变型特征, 波形相对光滑和简单, 分形维变得最小, 且从噪声到轻微碰摩时, 分形维数值有较大的变化; 碰摩趋于加重时, AE波形变得密集复杂, 分形维又开始增大; 分形维与信号的强弱无关, 而与波形的复杂程度相关. 因此, 根据碰摩AE信号的分形维变化规律, 不仅可以作为识别碰摩的一个依据, 还可以作为表征碰摩发展趋势的一种指标.

3. 针对常用分形算法计算量大和参数选择困难的缺点, 推导了一种基于波形长度的分形维算法, 理论分析与实验结果表明, 该算法的区分噪声能力、计算量、精确度和稳定性都优于和该算法类似定义的盒维与Katz维.

4. 基于模态声发射理论, 分析了在转子系统结构中, 静态时垂直碰撞和切向摩擦激励的声发射信号的模态特征及声发射波在不同路径中的传播特征. 结合模态声发射和窄带信号理论, 给出了描述多模态声发射信号的数学表达式, 提出了将对数倒谱系数结合分形维一起作为声发射信号识别特征参数的方法. 建立了一个基于高斯混合模型的碰摩声发射识别模型. 实验结果表明: 这种基于模态声发射理论的识别系统模型有较高的识别率.

5. 在碰摩声发射源定位研究中, 引入了时延估计理论计算时间差. 结合窄带信号理论、模态声发射理论和随机过程理论, 提出了基于相同分数阶因子和不同分数阶因子的最佳线形分数滤波的广义互相关时延估计, 针对AE信号中不同模式波速度不同而引起的传播过程中波形失真, 导致可能无法获取最大相关点情况, 提出了对信号进行分段相关乘积处理和分段相关指数变换处理的方法. 实验结果表明: 该算法优于普通的时延相关估计法, 有较高的定位精度.

3. 期刊论文 [吴艳, 许宝杰, 徐小力, WU Yan, XU Bao-jie, XU Xiao-li](#) [声发射用于旋转机械故障诊断的实验研究](#) -北京机械工业学院学报 (综合版)

2005, 20(3)

在旋转机械实验台上利用声发射传感器检测声发射信号, 通过检测到的声发射信号对旋转机械的运行状态做出监测与判断, 并进行故障诊断, 介绍了以滚动轴承的人为缺陷为对象进行的基础试验, 测评结果表明了用声发射方法进行旋转机械故障状态监测和诊断的可行性。

4. 期刊论文 [李录平, 靳倩, 黄琪, LI Lu-ping, JIN Qian, HUANG Qi](#) [声发射检测技术在汽轮发电机组故障诊断中的应用与展望](#) -汽轮机技术2008, 50(5)

作为传统检测手段的有益补充, 声发射检测技术在汽轮发电机组故障诊断中有重要的应用价值。从动静碰摩故障检测与定位、滑动轴承状态监测与诊断、加热器内部泄漏检测3个方面, 介绍了声发射检测技术在汽轮发电机组故障诊断中的应用和研究现状, 并指出了今后的主要研究方向和内容。

5. 学位论文 [张怡然](#) [基于声发射的旋转机械碰摩故障诊断基础问题研究](#) 2009

对于旋转系统的故障诊断近年来称为研究热点。由于故障信号通常是非平稳的, 而且是暂态的, 因此, 以往常规和经典的信号处理方法通常难以有效, 准确, 实时的检测系统的状态, 对故障做出判断。

随着研究的深入, 人们发现声发射信号伴随着旋转系统的状态而发生变化, 因此对声发射信号的研究以及状态的判断可以为检测旋转系统的运行状态提供很好的技术支持。从上个世纪声发射被提出以来, 越来越多的研究开始针对声发射信号, 并且声发射信号广泛存在于机械系统之中, 对他的研究有很强的适用性。

本文首先对转子系统发出的信号进行采集, 对采集的信号进行信号检测。与以往的常规方法不同, 本文考虑到声发射信号是非平稳的, 运用了高阶谱(双谱)的分析方法和小波检测的方法。高阶谱通常因为运算量大而实现困难, 但是旋转系统中, 实验发现运用三阶谱(双谱)能够直观并且有效地对信号进行检测。

在信号增强方面, 本文主要考虑的是用语音信号处理的方法来对声发射信号进行降噪和增强。本文使用的是减谱法。除了使用经典的减谱法对信号进行降噪, 本文还提出了基于全局加权值的减谱法, 并且通过实验, 确定了加权值的范围, 能够有效地增强信号同时抑制噪声。

在信号的特征提取方面, 本文同样提出了运用分形维的方法。分形维是最近几十年来新兴的方法, 而通常使用的关联维和盒维都有着运算量比较大, 而且拟合程度不尽人意的缺陷。基于以上, 本文提出了基于对数波长维的算法, 意在降低运算复杂度, 以及有效地对信号进行特征提取。在信号识别方面, 本文提出了基于主元素的特征提取算法。通过实验, 证明该方法能够比较好的对信号进行识别。初次之外, 实验也证明了运用语音信号处理的方法能够比较有效地对声发射信号进行处理, 获得比经典方法更加有效的结果。

6. 期刊论文 [秦萍, 傅和平, 闫兵, 谭达明, QIN Ping, FU He-ping, YAN Bing, TAN Da-ming](#) [基于声发射监测的静载荷滑动轴承接触摩擦故障诊断的实验研究](#) -摩擦学报2006, 26(6)

在利用振动信号诊断静载荷滑动轴承接触摩擦故障的基础上, 利用声发射监测方法对静载荷滑动轴承接触摩擦故障进行诊断。研究表明, 与振动信号相比, 声发射信号的频率响应范围更宽, 所包含的信息量更大, 能较好地反映轴承的摩擦规律, 故障特征明显, 易于识别, 参数稳定性较好, 因而可以更加有效地诊断静载荷滑动轴承接触摩擦故障。

7. 学位论文 [田增国](#) [长江三峡永久船闸边坡故障诊断——声发射信号分析处理研究](#) 2002

该文在“长江三峡永久船闸边坡稳定性声发射监测”课题基础上及实际检测中面临的问题进行较深

入而有针对性的研究。首先,该文对一种新的信号分析处理方法—小波分析理论进行了深入探讨。小波分析作为一种时频分析方法,通过调整窗口的长与宽可同时解决信号在时域和频域分辨率差的问题。根据小波分析的特点,该文对小波变换用于实际信号处理进行了可行性研究,选择Debauchies小波对采集的数据信号进行小波变换,提取声发射信号。最后,将小波分析、小波神经网络用于长江三峡永久船闸边坡声发射监测,通过合理选择参数,能够理想地实现声发射信号提取及大批量数据处理。

8. 会议论文 巩亚东,王宛山 声发射故障诊断的实验研究 1997

该文利用自制AE-1型微机化声射检测仪进行实验,在分析设备产生故障前后的信号变化的基础上,指出设备出现故障前后声发射信号会出现很大变化,提出了设备故障诊断声射检测敏感的特征参量和阈值的确定方法,可以根据声发射信号变化分析的结果作为故障的判断标志,并提出了抗干扰信号,保证检测精度的措施。

9. 会议论文 卢文秀,褚福磊,李学军 基于振动、声和声发射信号的碰摩故障诊断研究 2006

转子碰摩是旋转机械中常见的有破坏性的故障之一,传统的诊断方法是基于单一信号如振动信号或者声信号或者声发射信号,在一定程度上能进行碰摩的诊断,但在诊断精度等方面还有不足。本文提出基于振动、声和声发射信号的联合诊断方法,并在碰摩实验台上进行应用。实验结果表明,基于振动、声和声发射信号的碰摩故障联合诊断方法,不但能诊断出早期碰摩,还能确定每周碰摩的次数,碰摩的相位等信息。

10. 学位论文 姜诚君 铁路货车滚动轴承元件损伤故障诊断实验研究 2004

铁路货车轮对轴承的正常运转直接关系到车辆的安全行驶,因此,滚动轴承状态检测一直是各车辆段安全检测的重要内容。当前,国内普遍采用共振解调等振动法诊断轴承故障,但现有的解调分析方法存在某些局限性,生产实践表明,采用这种技术原理研制的诊断系统对某些故障的诊断准确性较差,且系统结构复杂,稳定性差,维修保养不便。该课题将前期实验室研究中所采用的轴承振动信号幅值域无量纲参数(裕度因子、峭度因子)诊断方法应用在车辆段检修线上,并研制了现场所使用的铁路货车滚动轴承故障检测装置,实现了在线轴承故障检测。生产现场大量在线试验的结果验证了前期研究结果,但试验中也出现了系统泄漏电荷影响试验结果等问题,造成有些试验数据离散,影响了参数门限值的制定。对此,提出将声发射(Acoustic Emission, AE)诊断方法引入铁路货车滚动轴承的故障诊断,从理论上分析了声发射现象,从应用的角度分析故障轴承的声发射信号的特征以及声发射信号特征的表示方法;分别在实验室和段修生产现场,采用声发射法和振动法对不同典型状态的铁路货车滚动轴承进行了试验对比。对比试验分析结果表明:声发射诊断法用于铁路货车轮对滚动轴承故障检测是可行的;声发射检测装置简单、可靠性高、抗干扰性好、使用方便等特点使得声发射法更适用于段修生产现场的恶劣环境。对比试验结果为实验室的后续研究,以便开发出一套AE信号分析软件打下一定的基础,对于进一步将AE技术应用于铁路货车滚动轴承的在线不解故障诊断有着重要的意义。

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_260776.aspx

下载时间: 2010年5月27日