

声发射检测技术用于滚动轴承故障诊断的研究综述

郝如江^{1,2}, 卢文秀¹, 褚福磊¹

(1. 清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084; 2. 石家庄铁道学院计算机与信息工程分院, 石家庄 050043)

摘要: 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, 特别是在轴承低速和故障早期的检测中更能发挥作用。

关键词: 声发射; 滚动轴承; 故障诊断

中图分类号: TH113, TG115 **文献标识码:** A

滚动轴承是各种旋转机械中最常用的通用零部件之一, 也是旋转机械易损件之一。据统计, 旋转机械的故障有 30% 是轴承故障引起的, 它的好坏对机器的工作状况影响极大^[1]。滚动轴承主要损伤形式有: 疲劳、胶合、磨损、烧伤、腐蚀、破损、压痕等^[2]。轴承的缺陷会导致机器剧烈振动和产生噪声, 甚至会引起设备的损坏。因此, 对重要用途的轴承进行工况检测与故障诊断是非常必要的。

滚动轴承故障的检测诊断技术有很多种, 如振动信号检测、润滑油液分析检测、温度检测、声发射检测等。在各种诊断方法中, 基于振动信号的诊断技术应用最为广泛, 该技术分为简易诊断法和精密诊断法两种。简易诊断利用振动信号波形的各种参数, 如幅值、波形因数、波峰因数、概率密度、峭度系数等, 以及各种解调技术对轴承进行初步判断以确认是否出现故障; 精密诊断则利用各种现代信号处理方法判断在简易诊断中被认为是出现了故障的轴承的故障类别及原因。振动信号检测并非在任何场合都很适用, 例如在汽轮机、航空器变速箱及液体火箭发动机等鲁棒性较低的系统中, 轴承的早期微弱故障就会导致灾难性的后果, 但是早期故障的振动信号很微弱, 又容易被周围相对幅度较大的低频环境噪声所淹没, 从而无法有效检测出故障的存在^[3]。由于声发射是故障结构本身发出的高频应力波信号, 不易受周围环境噪声的干扰^[4], 因此声发射检测方法在滚动轴承的故障诊断中得到了应用。

1 滚动轴承故障声发射检测机理

1.1 声发射检测技术原理

材料受到外力或内力作用产生变形或者裂纹扩展

时, 以弹性波的形式释放出应变能的现象称为声发射^[5]。用仪器检测、分析声发射信号和利用声发射信号推断声发射源的技术称为声发射检测技术, 它是 20 世纪 60 年代发展起来的一种动态无损检测新技术, 其利用物质内部微粒 (包括原子、分子及粒子群) 由于相对运动而以弹性波的形式释放应变能的现象来识别和了解物质或结构内部状态。

声发射信号包括突发型和连续型两种。突发型声发射信号由区别于背景噪声的脉冲组成, 且在时间上可以分开; 连续型声发射信号的单个脉冲不可分辨。实际上, 连续型声发射信号也是由大量小的突发型信号组成的, 只不过太密集而不能分辨而已。目前对于声发射信号的分析方法主要包括参数分析法和波形分析法。

1.2 滚动轴承故障声发射源问题

滚动轴承在运行不良的情况下, 突发型和连续型的声发射信号都有可能产生。轴承各组成部分 (内圈、外圈、滚动体以及保持架) 接触面间的相对运动、碰摩所产生的赫兹接触应力, 以及由于失效、过载等产生的诸如表面裂纹、磨损、压痕、切槽、咬合、润滑不良造成的表面粗糙、润滑污染颗粒造成的表面硬边以及通过轴承的电流造成的点蚀等故障, 都会产生突发型的声发射信号。

连续型声发射信号主要来源于润滑不良 (如润滑油膜的失效、润滑脂中污染物的浸入) 导致轴承表面产生氧化磨损而产生的全局性故障、过高的温度以及轴承局部故障的多发等, 这些因素造成短时间内的大量突发声发射事件, 从而产生了连续型声发射信号。

滚动轴承在运行过程中, 其故障 (不管是表面损伤、裂纹还是磨损故障) 会引起接触面的弹性冲击而产生声发射信号, 该信号蕴涵了丰富的碰摩信息, 因此可利用声发射来监测和诊断滚动轴承故障。与振动方法不同的是, 声发射信号的频率范围一般在 20 kHz 以上, 而振动信号频率比较低, 因此它不受机械振动和噪声

基金项目: 863 计划 (2006AA04Z438) 资助; 河北省自然科学基金 (E2007000649) 资助

收稿日期: 2007-06-25 修改稿收到日期: 2007-07-12

第一作者 郝如江 男, 博士生, 副教授, 1971 年生

的干扰,基于声发射监测和诊断滚动轴承故障有其独特的优越性。

1.3 滚动轴承故障声发射信号传播衰减及测量问题

滚动轴承声发射信号主要是以瑞利波形式传播^[5]。声发射源发出的信号经过轴承各组成部分的共振放大和滤波、接触面的作用(折射、反射、散射)后由传感器测得,并根据传感器测量方向(径向、轴向)的不同而不同。轴承结构对声发射信号传播影响的机械因子 Q 具有强烈的不确定性,受轴承座、轴承类型等诸多因素的影响^[6,7]。

关于滚动轴承声发射信号的衰减,不同的研究人员得出了并不尽相同的结论,Catlin^[6]认为,超声频的声发射信号衰减很快,可以用来区别轴承故障与其他干扰源(如不对中、不平衡、轴弯曲等),要求测量的传感器尽量接近轴承。Li^[8]对比了滚动轴承故障声发射和振动信号的衰减,在远离轴承 30cm 的情况下,声发射信号可以拾取到故障特征,而振动信号则不能。Morhain^[9]的研究表明声发射信号在同一介质传播中衰减减小,而越过介面传播的衰减较大。另外,Mba^[5]指出,表面故障如裂纹、擦伤等,以及表面磨光会导致瑞利波的衰减。

金属材料的声发射信号频率分布范围很宽,从数十千赫兹到数百千赫兹。对于大多数材料研究和构件的非破坏性检测,一般采用单端谐振式声发射传感器,其谐振频率多位于 50 kHz ~ 300 kHz 内,典型应用为 150 kHz,响应频带窄,波形畸变大,但灵敏度高,操作简便,价格便宜,适于大量常规检测。声发射传感器的固定方法一般有磁座式和磁环式两种,要求传感器的固定面光滑平整,涂抹适量的耦合剂以降低信号的衰减。

2 声发射信号参数分析方法用于滚动轴承故障诊断分析

简化波形特征参数分析方法是广泛使用的经典声发射信号分析方法。与全波形信号分析方法相比,参数分析法虽然损失了大量的信息,但是由于它记录速度快,检测分析的实时性强,目前在声发射工程检测中得到广泛应用。参数分析的常用经典方法包括参数随时间的变化分析、参数的分布分析和参数的关联分析。常用的分析参数有振铃计数、事件计数、持续时间、门槛值、RMS值、峰值、峭度等。具有代表性的研究结果有: Tan^[10]分析了滚动体滚过故障点时的声发射脉冲信号,通过计算信号幅值曲线下的积分面积(信号能量),认为随着故障尺寸和转速的增加,声发射事件呈指数增长,事件的持续时间和上升时间也随着故障尺寸的增大而增加。Tandon^[11]利用振铃计数和峰值两个参数,在变载荷、变转速、变故障尺寸的工况下对承受径向载荷的故障轴承进行诊断分析,认为峰值更有利于

故障诊断,能够区别较小的故障,并且发现声发射技术在轴承低速运转时能和正常运转时具有同样的检测效果,这是振动检测无法做到的。Choudhury^[12]利用振铃计数-事件数、峰值-事件数统计分布图两种参数分析方法,分析了变载荷、变故障尺寸、变转速情况下的承受径向载荷的脂润滑圆柱滚子轴承的内圈和滚子故障,得出的结论是:振铃计数是检测轴承早期故障的有效参数,通过事件数分布随着振铃计数和峰值变化的规律可以诊断和预测轴承故障的发展趋势。Abdulah^[13]研究了径向载荷作用下深沟球轴承外圈故障的声发射信号的 RMS 值和幅值与故障大小的关系,对比了相同工况下同时测量的振动信号的 RMS 值和幅值,得出声发射检测不仅能够诊断和识别早期故障,而且能够提供故障不同破坏程度的信息,适用于轴承的状态监测。Al-Ghandi^[14]进一步研究了滚球轴承外圈故障声发射信号和振动信号的峭度值,认为声发射信号峭度值的变化可以用来作为故障有无和大小的指标,而振动信号峭度值则无明显变化。作者更进一步得出声发射的持续时间与故障的长度(沿滚圈方向)正相关,而声发射事件幅度与背景噪声的比率与故障的宽度(垂直于滚圈方向)正相关的结论。

在低速滚动轴承故障诊断中,由于故障信号的幅值比较小,特别是在轴承的早期故障阶段,振动方法不能取得理想的结果,而声发射方法检测效果明显。Rogers^[15]在低速转动轴承的裂纹定位分析中,比较了振动方法和声发射方法的优劣。在转速大于 5 r/min 时采用振动信号峭度分析,可以得到很好的效果,然而当转速继续降低时,加速度传感器没有拾取到低频的振动信号,证明该方法已不适用。在相同条件利用声发射方法进行诊断时,采用幅度-计数分布图分析法诊断出轴承故障,取得了理想的效果。Jamaludin^[16]研究了声发射在 1.12 r/min 低速滚动轴承早期故障诊断中的应用,故障类型为早期表面损伤和润滑脂污染,利用峰值和能量分布图的曲线拟合,可以区分不同大小的故障和润滑污染情况。相比采用振动检测方法不能得到故障特征。作者认为,声发射检测用于低速运转的滚动轴承状态监测和故障诊断将是今后研究的热点,具有重要的工程意义。

3 声发射信号波形分析方法用于滚动轴承故障诊断分析

随着计算机技术的发展,基于波形的各种现代信号处理方法已得到了广泛应用。如信号时频分析、高阶统计分析、现代谱分析等方法在滚动轴承振动信号处理中都有相关的文献报导。现代信号处理方法应用于滚动轴承声发射信号分析的文献国内外相关的文献还很少,这可以部分归因于声发射信号是宽频分布的

信号,频率范围从数十千赫兹到数兆赫兹,其次是由于采样频率很高,信号数据量很大,复杂的信号处理算法要用很长时间才能得到计算结果。有研究人员对滚动轴承声发射信号包络后进行频谱分析,取得了一定的结果。Hawman^[3]对声发射信号进行包络解调,然后对包络信号进行谱分析,在外圈故障频率附近看到了明显的突出成分。TAVAKOLI^[17]对声发射信号各单元段的 RMS 值进行包络和 FFT 分析,成功提取了外圈和内圈故障特征频率。Pineyro^[18]利用二阶能量谱密度、倒谱、Haar 小波变换三种方法对滚动轴承外圈故障进行早期诊断,在对滚动轴承声发射信号进行 Haar 小波变换分析时,故障特征不明显,作者认为 Haar 小波用于轴承声发射信号处理具有一定的局限性。

4 声发射方法在滚动轴承故障定位中的应用

滚动轴承的故障定位可以分为两种:一是故障在滚动轴承各组成部件中的定位,如故障产生于外圈、内圈、滚动体、保持架等,这种定位主要通过故障特征频率来解决;二是已知故障的发生部件,通过研究确定故障的具体位置,如确定磨损故障在外圈滚道上的具体位置。由于滚动轴承内、外圈,滚动体,保持架发生故障时其故障特征频率不同,将故障声发射波形信号通过包络分析容易得到故障特征频率,因此第一种定位方法实现比较简单。故障点的精确定位主要是根据声发射波在轴承各部件中传播到达传感器的时间差,根据波速反推出故障点距离传感器的位置。根据波动理论,纵波和横波在同种介质中的传播速度不同,轴承各部件的几何结构复杂,考虑到不同界面波的反射、散射以及不同波的耦合,因此传感器所接收到的信号包含非常复杂的成分,这对于故障定位的精度带来很大的影响。Korenaga^[19]通过对声发射信号进行包络,对两次超过阈值的脉冲数进行数值积分,获得声发射事件的间隔时间,然后与轴承各部分的特征频率进行对比,用于确定故障源(内圈和滚珠)。Yoshioka^[20,21]设计了由单通道传感器接受声发射信号的故障定位系统,用一个磁检测仪确定滚珠滚过外圈的时间及其位置,用定位仪来确定外圈故障的位置。定位结果与故障实际位置取得了良好的一致。Yoshioka^[22]又在上述研究的基础上,设计了一种通过测量两个传感器接收到故障信号的时间差,利用双曲线与轴承圈的交点来定位故障的方法,通过与前文的方法结合使用,可以达到更为准确的定位,作者将该方法用于检测轴承外圈滚道上的裂纹,取得了满意的效果。

5 基于滚动轴承故障声发射信号特征的模式识别方法

故障诊断最终要实现故障模式的分类和识别,在

声发射技术应用于滚动轴承故障诊断的过程中,一些分类识别的方法得到了应用。Li^[8]提出了一种基于自相关系数的线性判别方法。在对声发射信号进行高通滤波和中值平滑后,计算其短时能量函数和短时平均过零率,然后分别计算两者的自相关函数,据此可以获得声发射信号脉冲出现的频率和两个自相关函数曲线的峰峰值。前者用于定位故障产生的部位,后者用于确定故障是否产生。以正常轴承和故障轴承的两个峰峰值训练并确定线性判别函数,完成模式分类器的设计。文中给出了该故障诊断系统的在线实现,并利用该系统提出了三个线性判别函数,可以鉴别出正常轴承与滚珠故障轴承、正常轴承与外圈故障轴承、单外圈故障轴承与多外圈故障轴承。Kaewongka^[23]提出一种三维空间的模糊 c 均值聚类分析方法,对测得的声发射信号计算事件持续时间、峰值、能量,然后利用这三个参数在三维空间内进行模糊 c 均值聚类分析,经训练后,其判断准确率为 97%,误判率低,适用于轴承的故障模式识别。Salvan^[24]介绍了三角定位技术、用于模式识别和分类的神经网络技术、结合小波的时频多分辨率的模糊分析方法,最后将这些方法综合应用于试验中,在众多待测轴承中定位故障轴承,但是由于声发射信号传播速度难以精确确定以及测量技术的局限性,得到的结果并不十分理想。Mba^[16]指出具有不同传播途径的声发射信号在波形上是不同的,它们具有各自不同的自回归系数,通过自回归系数分类对声发射信号的传播途径进行分析,用于区分不同源声发射信号,因此可以实现不同故障源的分类。

6 滚动轴承故障声发射检测与其他检测方法的比较研究

滚动轴承的各种诊断方法都有其优缺点,对于声发射与其他诊断方法的比较分析,研究人员也进行了大量的比较研究工作。Yoshioka^[20,21]针对承受轴向载荷滚动轴承的早期疲劳故障及其发展过程,进行了声发射及振动诊断的比较分析,认为声发射比振动方法能更早的检测到疲劳故障。Miettinen^[25]分析比较了振动信号和声发射信号分别用包络谱、峰值方法、冲击脉冲、谱放射能量方法在滚动轴承润滑状态监测中的不同效果,得出声发射方法在监测润滑脂清洁程度及其污染颗粒时更有效的结论。Schoess^[26]比较了火车车厢轴承故障诊断中常用的六种方法:温度、加速度、霍尔效应轮速、声发射、红外测温、应力监测。通过比较认为声发射检测效果较好,同时指出了声发射测试的设备费用贵、误报警率高等缺点。N. Tandon^[27]针对振动、声发射、冲击脉冲与定子电流谐波四种方法在感应电机轴承外圈故障、润滑脂污染监测中的应用进行了分析比较,认为声发射方法最为有效。Shioishi^[28]对圆

锥滚子轴承故障诊断时,利用相同的技术处理后,认为声发射信号与加速度信号相比无优势可言,甚至效果不如后者;在对内圈故障进行诊断时,声发射信号是无效的。作者给出了可能的原因:传播路径的复杂造成信号的衰减过大,信号的传播方向与声发射传感器的位置可能不匹配。William s^[29]对运行过程中的滚动轴承故障(非人为加工故障)利用振动和声发射信号分别选取 RMS值、峰值、峭度值、峰值因子四个参数进行分析,作者同样认为声发射检测并无优势可言。通过以上的比较发现,由于高频声发射信号传播过程的快速衰减特性,加上滚动轴承结构的复杂性,往往使声发射传感器不能拾取到有用的故障信号,导致测试结果不理想。因此,声发射检测要求对测试条件、测试环境、测试参数的选择以及测试信号的消噪预处理等环节都有明确的要求。

7 国内在声发射轴承故障诊断方面的研究

我国声发射技术最早开始在锅炉、管道等压力容器方面的检测应用,北京声华科技公司开发了声发射检测的软硬件设备并已经在石油、化工、钢铁、运输等行业采用。声发射用于滚动轴承的故障诊断在 20 世纪 90 年代才开始,在工程应用方面取得了一定的成果。北京理工大学理华^[30]等人利用声发射信号的参数分析方法,设计了一种针对低速轻载的铁路货车轴承的声发射检测仪器。该仪器对铁路货车轴承故障声发射进行高通滤波、包络解调、低通滤波后,采取双阈值(幅度、宽度)处理,如果信号超过阈值的次数达到一定指标,则故障报警。该仪器为单通道信号采集处理,测试方法简单,测试硬件容易实现,非常适用于实时监测,该仪器已经在北京铁路局所属各车辆段投入使用,检测效果明显,大大提高了检测效率。理华等人还通过基于特征频率的小波包分解消噪方法,提取特征频带的声发射信号,通过波形分析能够区分缺油轴承和内圈严重锈蚀以及滚子锈蚀的故障轴承。杨黎明^[31]提出将声发射的方法用于轴承的在线故障诊断,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特征以及声发射信号特征的表示方法,对实验台上振动法和声发射法采集的实验数据进行了对比分析,证明了使用声发射法对轴承故障检测的可行性和有效性。李凤英^[32]用声发射方法检测滚动轴承故障,把声发射信号与振动信号作对比。通过高通滤波后利用希尔伯特变换实现包络解调,然后对包络信号进行了频谱分析,结果表明声发射信号可以较早地诊断出故障,抗干扰性好,而且经过信号处理之后,声发射信号分析的频率比较单纯,能够很简单地判断出故障部位。

与滚动轴承故障振动信号的低频分布相比,声发

射信号为数十到数百千赫兹分布的宽带高频信号,因此声发射传感器必须采用宽频带高灵敏度传感器。由于高频信号的快速衰减特性,滚动轴承结构的复杂性,因此要求传感器测试位置尽量接近故障声发射源。由于轴承在运转过程中滚动体与内外圈的滚动接触以及其他旋转部件的相互作用,也会产生声发射信号,相对故障信号,这些作为背景噪声处理,有时背景噪声很大甚至淹没了故障信号,因此声发射信号的降噪处理也是故障诊断的前提。以上问题都是声发射检测技术推广应用于工程实际检测的困难所在。考虑到旋转机械轴承的实际工况,以及轴承座等的安装要求,振动检测仍然是轴承故障检测的主要手段,声发射方法是振动检测的很好的补充工具。

8 滚动轴承故障声发射检测技术的研究展望

滚动轴承声发射检测技术作为振动检测方法的有力补充工具,特别是对于超低转速和早期微弱故障的监测和诊断效果明显。滚动轴承声发射检测技术在以下几个方面有待进一步研究。

声发射参数分析法用于轴承故障的预测研究。研究和完善各种参数条件的确定准则,针对轴承故障在不同工况下信号参数的变化规律来预测故障的发展趋势,为设备状态监测和维修提供可靠的参考依据。

现代信号处理方法用于声发射信号的特征提取。选择合适的信号处理方法对故障信号进行准确的特征提取,了解不同故障机理,为故障模式识别提供准确的特征信息。

模态声发射理论的研究和应用。针对声发射信号在滚动轴承不同部件、不同耦合界面间传播速度的不同、考虑信号传播反射、折射、散射的影响,对于指导测试过程中传感器的合理布置以及轴承故障的精确定位具有重要意义。

参考文献

- [1] 钟秉林,黄仁.机械故障诊断学[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [2] 韩捷,张瑞林.旋转机械故障机理及诊断技术[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [3] Hawman M W, Galinaitis W S. Acoustic emission monitoring of rolling element bearings [J]. Ultrasonics symposium, 1988, 885—889.
- [4] Tandon N, Choudhury A. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings [J]. Tribology International, 1999, 32: 469—480.
- [5] Mba D, Raj B. K. N. Rao. Development of acoustic emission technology for condition monitoring and diagnosis of rotating machines: bearings, pumps, gearboxes, engines and rotating structures [J]. The shock and vibration digest, 2006, 38(1): 3—16.

- [6] Catlin J B, Jr The use of ultrasonic diagnostic technique to detect rolling element bearing defects Proceedings of the machinery and vibration monitoring and analysis meeting [J]. Vibration institute, L. 1983, 4 : 123—130.
- [7] Sundt P C. Monitoring acoustic emission to detect mechanical defects [J]. In tech, 1979, 12: 43—44.
- [8] Li C J, Li S Y. Acoustic emission analysis for bearing condition monitoring [J]. Wear, 1985, 185: 67—74.
- [9] Morhain A, Mba D. Bearing defect diagnosis and acoustic emission Proc Instn mech. engrs, Part J [J]. Journal of engineering tribology 2003, 217: 257—272.
- [10] Tan C C. Application of acoustic emission to the detection of bearing failures International tribology conference, reliability and maintainability through lubrication and wear technology [J]. Australia 1990, 12: 110—114.
- [11] Tandon N, Nakra B C. Defect detection of rolling element bearings by acoustic emission method [J]. Journal of acoustic emission 1990, 9 (1): 25—28.
- [12] Choudhury A, Tandon N. Application of acoustic emission technique for the detection of defects in rolling element bearings [J]. Tribology international 2000, 33: 39—45.
- [13] Abdullah M. Al-Ghamdi, Zhechkov D, Mba D. The use of acoustic emission for bearing defect identification and estimation of defect size EWGAE 2004 Lecture 38 : 397—406.
- [14] Al-Ghamdi, A. M, D. Mba A Comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size [J]. Mechanical systems and signal processing 2006, 20 (7): 1537—1571.
- [15] Rogers L M. The application of vibration analysis and acoustic emission source location to on-line condition monitoring of antifriction bearings [J]. Tribology international, 1979, 12 (2): 51—59.
- [16] Jamaludin N, Mba D. Monitoring extremely slow rolling element bearings Part 1 [J]. NDT&E International, 2002, 35: 349—358.
- [17] Tavakoli, Massouds Bearing fault detection in the acoustic emission frequency range Proceedings of the 11th National conference on noise control engineering, Tarrytown, NY, United States 1991: 79—86.
- [18] Pineyro J, Klemptow A, Lescano V. Effectiveness of new spectral tools in the anomaly detection of rolling element bearings [J]. Journal of alloys and compounds 2000, 310: 276—279.
- [19] Yoshioka T, Korenaga A, Mano et al T. Diagnosis of rolling bearing by measuring time interval of acoustic emission generation [J]. Journal of tribology Transactions of ASME 1999, 121: 468—472.
- [20] Yoshioka T, Fujiwara T. A new acoustic emission source locating system for the study of rolling contact fatigue [J]. Wear 1982, 81 (1): 183—186.
- [21] Yoshioka T, Fujiwara T. Application of acoustic emission technique to detection of rolling bearing failure [J]. American society of mechanical engineers 1984, 14: 55—76.
- [22] Takeo, Yoshioka A detection of rolling contact subsurface fatigue cracks using acoustic emission technique [J]. Lubrication engineering 1993, 49 (4): 303—308.
- [23] Kaewkongka T, Au Y H J. Application of acoustic emission to condition monitoring of rolling element bearings [J]. Measurement and control 2001, 34: 245—247.
- [24] Salván SM E, Parkin R M, Coy J, Li W. Intelligent condition monitoring of bearings in mail processing machines using acoustic emission Proceedings of COMADEM 2001, 2001: 67—74.
- [25] Miettinen J, Andersson P. Methods to monitor the running situation of grease [J]. lubricated rolling bearings Finland, 1989, 92—101.
- [26] Schoess J N. Development and application of stress-wave acoustic diagnostics for roller bearings Proceedings of the SPIE 2000, 3986: 58—70.
- [27] N. Tandon G S, Yadava K M. Ramakrishna A comparison of some condition monitoring techniques for the detection of defect in induction motor ball bearings [J]. Mechanical systems and signal processing, 2007, 21 (1): 244—256.
- [28] Shiroishi J, Li Y, Liang L S, Kurfess, et al Bearing condition via vibration and acoustics emission measurements [J]. Mechanical systems and signal processing 1997, 11 (5): 693—705.
- [29] Williams T, Ribadeneira X, Billington S, Kurfess T. Rolling element bearing diagnosis in run-to-failure lifetime testing [J]. Mechanical systems and signal processing 2001, 15 (5): 979—993.
- [30] 理 华, 徐春广, 肖定国, 等. 滚动轴承声发射检测技术 [J]. 轴承, 2002 (7): 24—26.
- [31] 杨黎明. 声发射技术用于段修货车轴承故障诊断研究 [D] : [学位论文]. 成都: 西南交通大学车辆工程系, 2003, 11.
- [32] 李凤英, 沈玉娣, 熊 军. 滚动轴承故障的声发射检测技术 [J]. 无损检测, 2005, 27 (11): 583—586.

REVIEW OF DIAGNOSIS OF ROLLING ELEMENT BEARINGS DEFAULTS BY MEANS OF ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE

HAO Ru-jiang^{1,2}, LU Wen-xiu¹, CHU Fu-lei¹

(1. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Computer and Information Engineering, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: A review of the acoustic emission (AE) techniques applied in the diagnosis of rolling element bearings is presented, that includes: the mechanism of AE signals emerged from the defective bearings, the characteristics of propagation and attenuation about the AE signals in the bearings and housings, the methods for parameters analysis and complete waveform analysis used in the defect characters extraction, determination of the location of AE sources in the outer or inner races of bearings, the pattern recognition of different types of defects according to the AE signals, the difference between the AE and vibration measurement in the diagnosis of bearings. The research that should be done in the future about rolling bearing diagnosis using the AE techniques is discussed and the conclusion is that the AE measurement technology is a good complementary tool for the vibration diagnosis, especially in monitoring extremely low speed rolling element bearings and in the early stage of defects emergence.

Key words: acoustic emission; rolling element bearing; faults diagnosis

(pp: 75 - 79)

COMPARISON OF GALERKIN METHOD AND COMPLEX MODE METHOD IN NATURAL FREQUENCY ANALYSIS OF TUBE CONVEYING FLUID

YANG Xiao-dong, JIN Ji-duo

(Department of Engineering Mechanics, Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110034, China)

Abstract: Two methods, namely Galerkin method and complex mode method are applied in natural frequency analysis of tube conveying fluid. The 2-term and 4-term Galerkin method are implemented to transform the partial differential governing equation to the ordinary differential equations. The first 2 or the first 4 natural frequencies can be found numerically. To evaluate the errors caused by the trial functions, which are taken from stationary beam eigenfunctions, the results are compared to those obtained by complex mode method, which yields more accurate numerical results but complicated mode expressions. It is concluded that the results using Galerkin method are satisfactory when the order of the truncation term is rather high in comparison with the order of natural frequencies considered.

Key words: pipe conveying fluid; natural frequency; Galerkin method; complex mode method (pp: 80 - 81, 86)

OPTIMAL SENSOR PLACEMENT ON BRIDGE STRUCTURE BASED ON GENETIC ALGORITHM

HUANG Min-shui^{1,2}, ZHU Hong-ping^{1,2}, LI Weiming^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hubei Key Laboratory of Control Structure, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: An optimization approach based on coding genetic algorithms was developed for optimal sensor placement in health monitoring of bridge structure. The coding method was improved, in which the initialization, crossover and mutation are based on dual-structure coding, and the elitist strategy, adaptive partially matched crossover, and adaptive inversion mutation are adopted respectively in the processes of selection, cross and mutation. The method overcomes the defects of slow convergence rate and easily getting stuck at a local optimum when traditional genetic algorithms are applied in health monitoring of bridge structure. Through a bridge example, the method was proved to have better search capability,