

轮对轴承故障声发射检测方法

汪文有

(美国物理声学公司北京代表处, 北京 100029)

摘要: 本文论述了声发射技术的特点, 介绍了声发射技术在轮对轴承故障检测的原理、找到针对轮对轴承故障检测的方法, 采用声发射技术对轮对轴承故障信号特征进行有效识别, 阐述了声发射技术在轮对轴承故障检测上的应用策略, 对轮对轴承故障检测应用具有实际的指导意义。

关键词: 声发射, 轮对轴承, 故障检测, 应用策略。

中图分类号: TG115.28 文献标识码: B

Acoustic emission detection method for wheel bearing fault

WANG Wen You

(Physical Acoustics Corp. Beijing Office, Beijing 100029, China)

Abstract: This paper discusses the characteristics of acoustic emission technology, acoustic emission technology are introduced in this paper, the principle of the bearing fault detection, the method of using acoustic emission technology to detect wheel bearing fault signal characteristic for effective identification, this paper expounds the wheel bearing fault detection of acoustic emission technique in the application of strategy, to the wheel bearing fault detection application has practical guiding significance.

Keywords: Acoustic emission, wheel bearing, fault detection, application strategy.

一 概述

轴承是铁路车辆中重要的结构部件, 其运行的可靠对车辆的性能和安全其中重要的作用, 轴承故障使得高速铁路载人列车高速运行状态的改变, 轻则导致机车故障停运, 重则造成不可挽回的人员伤亡和经济损失。因此保证轴承部的安全运行, 具有现实的重要的价值和意义。

目前轴承故障国内外采用的诊断方法有振动谱分析法、铁谱分析法和铁磁分析法。在实际现场中应用会受到不同程度的限制, 如铁谱分析法适用于实验室环境且设备昂贵; 振动谱分析法受到轴承安装和工作状况的影响; 铁磁分析法易受到现场电磁干扰。

作者简介: 汪文有 (1981-), 性别: 男, 学位: 硕士, 毕业学校: 北京化工大学, 毕业时间: 2009 年, 工作单位: 美国物理声学公司北京代表处, 职务: 技术工程师, 研究方向从事声发射检测研究, 地址: 北京市朝阳区北辰西路 69 号峻峰华亭 C 座 2006, 邮编: 100029, 联系电话: 13811474661, E-mail: wang19812008@126.com

二 声发射技术

2.1 声发射^{[1][2][3][4][5]}

声发射检测是一种在役, 实时, 动态检验方法; 实时反映被测构件内的损伤发生、发展的动态变化过程, 使得检测人员根据现场的数据及时采取相应措施, 防止重大事故的发生。声发射是一种动态检验方法, 对线性缺陷较为敏感, 在一次实验中, 能够整体探测和评价整个结构中缺陷的状态。

基于以上机理, 对于材料的微观形变和开裂以及裂纹的发生和发展, 就可以利用声发射来提供他们的动态信息, 声发射源往往是材料灾难性破坏的发源地, 由于声发射现象往往在材料破坏之前就会出现, 因此只要及时捕捉这些信息, 根据其声发射信号的特征及其发射强度, 就可以推论得知声发射远的目前状态, 以及它形成的历史并对其发展趋势进行预报。

2.2 轴承故障声发射检测机理^[6]

滚动轴承的疲劳故障, 是由于轴承经常

受到交变载荷作用，使轴承金属件内部产生位错运动和塑性变形，首先产生疲劳裂纹源，然后沿着最大切应力方向向金属内部扩展，当扩展到某一临界尺寸时就会发生瞬时断裂。

疲劳磨损是由于循环接触压应力周期性地作用在摩擦表面上，使表面材料疲劳而产生微粒脱落的现象。这种故障的发生过程是在初期阶段，金属内晶格发生弹性扭曲；当晶格的弹性应力达到临界值后，开始出现微观裂纹；微观裂纹再进一步扩展，就会在轴承的内、外圈滚道上出现麻点、剥落等疲劳损坏故障。

保持架断裂处在轴承转动过程中会与滚动体及内外滚道或断裂部分之间相互摩擦碰撞，导致声发射现象。

上述故障的发生与发展，都伴随着声发射信号的产生。

2.3 声发射优势^[6]

与传统的振动信号分析法比较，用声发射法进行故障监测诊断有以下主要优点。

(1) 特征频率明显。声发射信号频谱较宽，而振动信号相对较低。用声发射的高频信号特性(几十千赫以上)可有效抑制干扰，提高检测正确率。

(2) 预报故障时间早。载荷和工作转速完全相同的条件下，同时用声发射和振动信号监测轴承工作状态时，由于轴承微裂纹要经过一个慢扩展阶段，这个阶段还不足以引起轴承明显振动，而声发射信号已经比较明显，因而声发射法能早期预报和诊断故障。

(3) 声发射法特别适用于现场检测。检测装置简单，体积小，可靠性高，抗干扰性好，使用方便。其次，不需要将轴承高速旋转，只需利用人工将轴承提速旋转即可，特别适合例行车检。

(4) 在低速轻载的工况下进行故障轴承的检测时，大量的外界噪声和与轴承故障无关的信号会产生干扰。

三 轮对轴承故障声发射检测

3.1 轴承常见故障

滚动轴承故障形式包括：轴承转动困难、发热、轴承运转有异响、轴承产生振动、内座圈剥落、开裂、外座圈剥落、开裂、轴承滚道和滚动体产生压痕。

列车轴承的非正常磨耗，当轴承运用一段时间后，轴承内圈、滚动体、保持架、外圈、滚道等产生一定的缺陷、伤痕，造成轴承的润滑不良，引起轴承的发热，长时间的发热，会导致轴承润滑油的稀释，加速材质的疲劳，硬度下降。

使用时间过长超过轴承的使用寿命而容易造成材质的疲劳，加上强烈的冲击作用而使材质变形，使得滚子、滚道面产生剥离、碾片，从而造成润滑不良和振动加大。

轴承安装不当，也容易造成轴承故障，游隙小很容易造成滚子和滚道摩擦发热，随着温度的不断上升，轴承内圈、滚动体、保持架、外圈、端盖的温度并不相同，相互之间存在着温差，因而膨胀量也略有不同，也就造成配合间隙的进一步减少，加剧轴承的生热。间隙过大，滚子的振动加大，加剧滚子和滚道的冲击，同时也易造成内部负荷分布不均，承载滚子减少，中央滚子负荷过大。

3.2 对比检测



图1 传感器布置图

图1中左侧为1号传感器监测的故障轴承端，右侧为2号传感器监测的完好轴承端。

表1 参数解释

绝对能量：	表征信号的绝对能量大小
幅度：	表征信号的最高电压值
波形流：	记录并表征一段时间内损伤的周期性波形特征
TAFI：	表征损伤周期性的特征指数谱

以下分别采用绝对能量，幅度，波形流，TAFI 四种方法，涵盖了信号特征参数，信号波形流，周期性特征识别谱共同分析试验数

据。表 1 为各组数据的相应解释。

3.2.1 绝对能量

通过分析可知，故障端（1号传感器-左图所示）传感器接收到明显的周期性损伤信号；完好端（2号传感器-右图所示）传感器接收的信号主要为转动过程的背景噪音信号；当故障信号随着转速的升高而不断加大时，区别更加明显。

表 2 绝对能量统计表

绝对能量 A _{Jmax}	1号传感器-左 侧故障端	2号传感器-右 侧完好端
10km/h	14000	1800
20km/h	1200000	2200
30km/h	15000000	3200
40km/h	38000000	5000

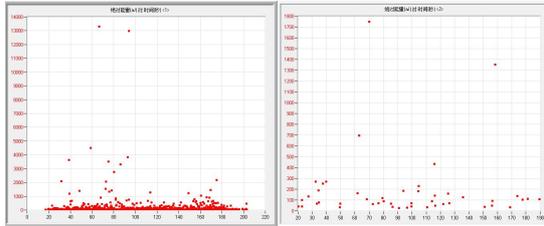


图 2 从 0km/h-10km/h-0km/h 转速过程信号绝对能量-时间散点图

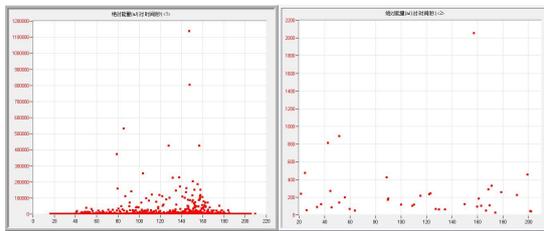


图 3 从 0km/h-20km/h-0km/h 转速过程信号绝对能量-时间散点图

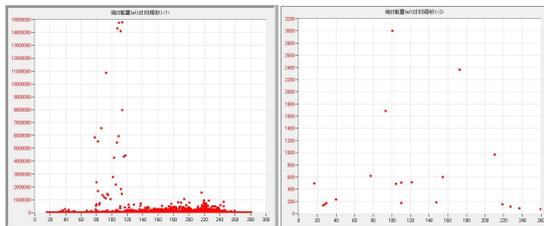


图 4 从 0km/h-30km/h-0km/h 转速过程信号绝对能量-时间散点图

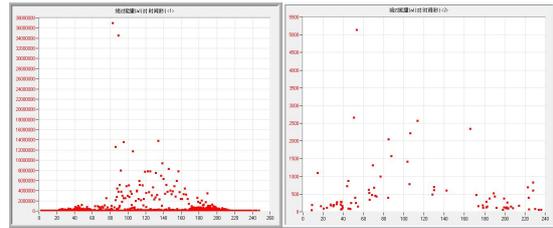


图 5 从 0km/h-40km/h-0km/h 转速过程信号绝对能量-时间散点图

3.2.2 不同转速下信号幅值-时间散点图

通过分析可知，故障端（1号传感器-左图所示）传感器接收到明显的周期性损伤信号；完好端（2号传感器-右图所示）传感器接收的信号主要为转动过程的背景噪音信号；当故障信号随着转速的升高而不断加大时，区别更加明显。

表 3 幅值统计表(A_{max})

幅值-dB	1号传感器-左 侧故障端	2号传感器-右 侧完好端
10km/h	68	60
20km/h	90	62
30km/h	95	64
40km/h	98	64

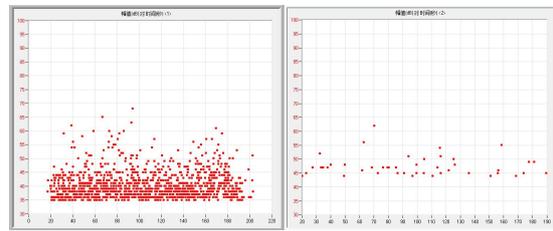


图 6 从 0km/h-10km/h-0km/h 转速过程信号幅值-时间散点图

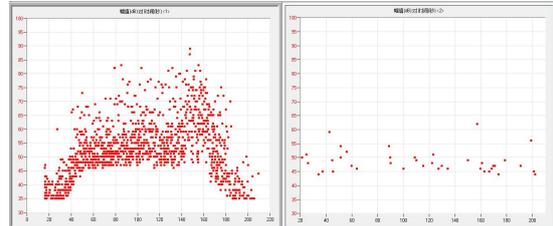


图 7 从 0km/h-20km/h-0km/h 转速过程信号幅值-时间散点图

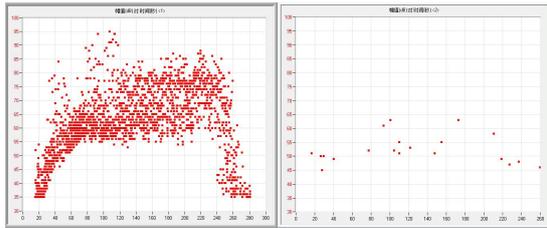


图 8 从 0km/h-30km/h-0km/h 转速过程信号幅值-时间散点图

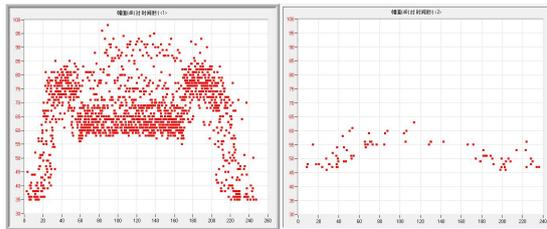


图 9 从 0km/h-40km/h-0km/h 转速过程信号幅值-时间散点图

3.2.3 不同转速下信号波形流图

通过分析可知，故障端（1号传感器-左图所示）传感器接收到明显的周期性损伤信号；完好端（2号传感器-右图所示）传感器接收的信号主要为转动过程的背景噪音信号；当故障信号随着转速的升高而不断加大时，区别更加明显。

表 4 波形流统计表（Vmax）

波形流 Vmax	1号传感器-左侧故障端	2号传感器-右侧完好端
10km/h	250	35
20km/h	1000	33
30km/h	5000	140
40km/h	5000	140

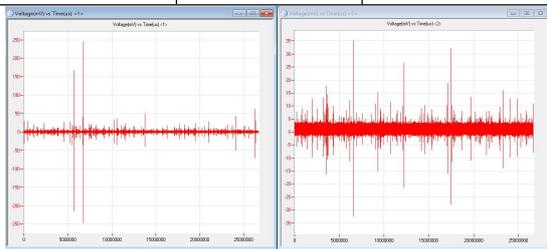


图 10 从 0km/h-10km/h-0km/h 转速过程信号波形流图

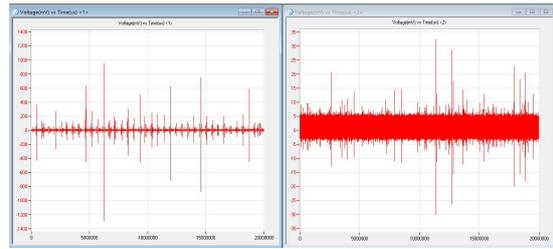


图 11 从 0km/h-20km/h-0km/h 转速过程信号波形流图

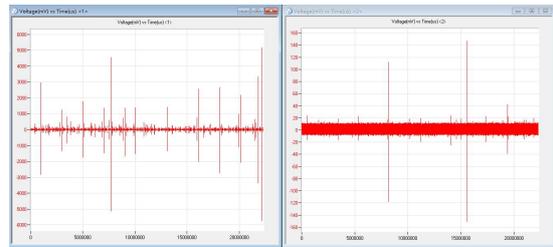


图 12 从 0km/h-30km/h-0km/h 转速过程信号波形流图

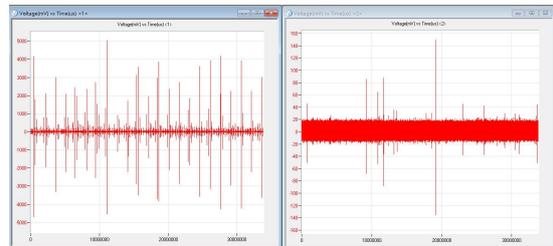


图 13 从 0km/h-40km/h-0km/h 转速过程信号波形流图

3.2.4 不同转速下信号 TAFI-时间散点图

通过分析可知，故障端（1号传感器-左图所示）传感器接收到明显的周期性损伤信号；完好端（2号传感器-右图所示）传感器接收的信号主要为转动过程的背景噪音信号；当故障信号随着转速的升高而不断加大时，区别更加明显。

表 5 TAFI 统计表

TAFI	1号传感器-左侧故障端	2号传感器-右侧完好端
10km/h	周期性	无周期性
20km/h	周期性	无周期性
30km/h	周期性	无周期性
40km/h	周期性	无周期性

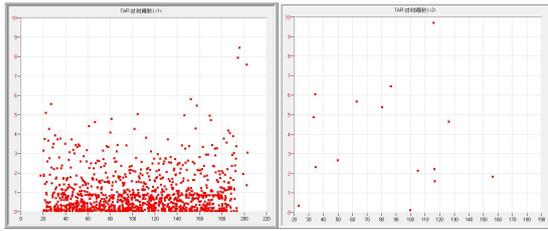


图 14 从 0km/h-10km/h-0km/h 转速过程信号 TAFI-时间散点图

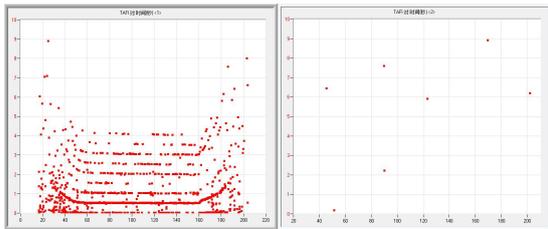


图 15 从 0km/h-20km/h-0km/h 转速过程信号 TAFI-时间散点图

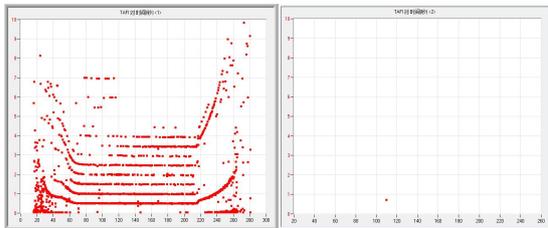


图 16 从 0km/h-30km/h-0km/h 转速过程信号 TAFI-时间散点图

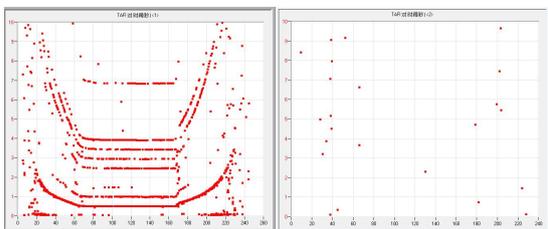


图 17 从 0km/h-40km/h-0km/h 转速过程信号 TAFI-时间散点图

3.3 应用策略

旋轮过程每次对 4 个车轮同时旋轮，采用 4 个 R15I 对 4 个轴承座分别监测，固定位置根据轴承座的结构特点，选择与轴承外圈过盈配合的轴承座平坦部位，采用磁性夹具快速安装固定，如表面有污物，采用铁刷清除后贴放传感器，如图 18 所示：



图 18 传感器布置位置

3.3.1 有效性分析

针对动车组轮对旋轮过程的特点，声发射可以有效监测轮对轴承故障，基于以下原因：

高灵敏度：声发射传感器的灵敏度是目前已知在线监测方法最高的，特别敏感于微小故障的检测-监测。

直判法：基于非先验方法，不需要知道相应的故障模式特征，而采用相同工况对比方法，即可傻瓜式判断故障轮对，增加了判断的准确性、可靠性，提高检测效率。

故障周期性：轴承的故障一旦形成，在旋转过程中会周期性出现故障信号，这就是快速检测判断的基础。

工装设计：轮对轴承座的平面部位以及大曲率弧面有利于安装传感器，采用磁性夹具快速固定，每次两个轮对，四个轴承座需要四个传感器同时监测。

旋轮工序设计：需要在旋轮之前贴放传感器，以旋轮速度进行空转 5min，有利于去除噪音，识别轴承故障。

实时判断：通过软件的单界面即可判断传感器的完好状态，设置报警阈值，当轴承转动信号超过阈值，即为报警，采用记号喷涂到相应轴承座进行标识。

3.3.2 数据处理（后处理）

数据处理包括横向对比与纵向对比两种方式进行解读，横向对比是指不同轮对轴承的转动设备在空转或者旋轮过程的数据对比，纵向对比是指同一轮对轴承的转动设备在空转与旋轮过程的数据对比。纵向对比有利于找出同一个轮对轴承中具有特殊信

号特征的旋转结构，横向对比有利于在不同轮对轴承中找出特征信号规律。

图 18 为动轮轮对轴承前轮对结构图，轮对重点结构部位为轴端轴承旋转部件，因此在轮轴端布置监测传感器，经过校准，耦合效果良好。

图 19、图 20 分别为动轮、拖轮空转声发射信号图，空转过程中，最大转速 8r/min 左右，幅度不超过 50db，出现的规律具有周期性。

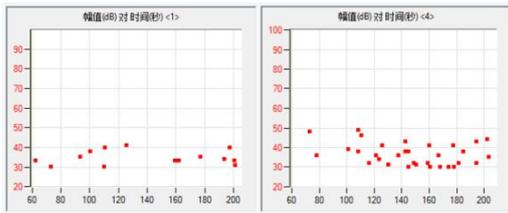


图 19 动轮空转声发射信号图

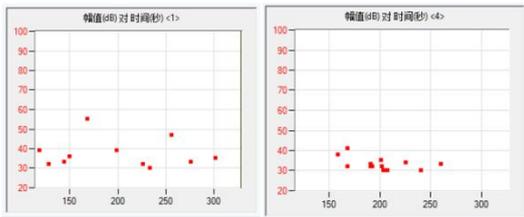


图 20 拖轮空转声发射信号图

图 21 分别为动铤轮声发射信号图，铤轮过程为全自动控制，其最高转速达到 25r/min，其转速与刀具切削量、进给量为固定参数。明显看到，铤轮过程的信号幅度远远高于空转信号，最高幅度到 90db。

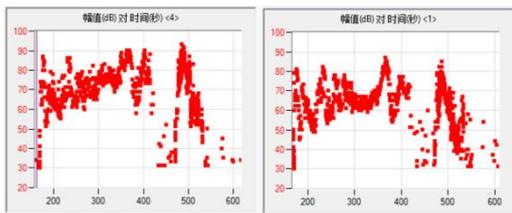


图 21 铤轮声发射信号图

3.4 故障轮对信号对比

监测地点选择在合肥车辆段轮对跑合试验台，选取了 5 组不同故障的轴承轮对进行跑合，在跑合过程中监测了两组刚出厂的轮对，观察完好轴承与故障轴承的信号特征差别。传感器布置方式如图 22 所示。



图 22 动轮空转声发射信号图

在信号处理分析过程找出轮对故障信号有效识别特征参数，包括幅度，能量，绝对能量，ASL 值等，采用四种特种参数作为对比参数进行信号处理分析，得到故障轴承信号的参数特征变化范围，有利于指导实际监测过程的信号判读，通过多个判据参数的相互验证，增加结果判断的可靠性和准确性。

检测结果的统计对比数据表如表 6 所示，根据表 6 测得的数据统计分析，故障轴承与完好轴承在不同转速下的声发射参数相差明显，统计结果如表 7 所示，结果表明，可以在动车不同的运转速度下设计相应的声发射参数阈值，作为疑似故障隐患报警参考值。

3.3.3 参数对比表

表 6 故障轴承与无故障轴承信号对比

轴承故障类型	监测部位	转速 r/min	幅度 db	绝对能量	完好/故障	备注
轮对编号 1101-1110382; 左侧滚子故障	左侧轴承	60	95	7000000	故障	检测结果与实际故障一一对应, 滚子故障区 别明显
		180	100	1000000	故障	
	右侧轴承	60	50	600		
		180	60	1500		
轮对编号 2175-1306340, 右侧滚子故障	左侧轴承	60	60	5000		检测结果与实际故障一一对应, 滚子故障区 别明显
		180	60	1000		
	右侧轴承	60	70	15000	故障	
		180	90	5000000	故障	
轮对编号 3132-1207615, 左侧内圈故障	左侧轴承	60	88	1500000	故障	检测结果与实际故障一一对应, 内圈故障区 别明显
		180	96	10000000	故障	
	右侧轴承	60	60	30000		
		180	60	4000		
轮对编号 4208-1102616, 左侧外圈故障	左侧轴承	60	70	30000	故障	检测结果与实际故障一一对应, 外圈故障区 别较明显
		180	70	14000	故障	
	右侧轴承	60	50	500		
		180	60	600		
无故障轮对 1	左侧轴承	230	50	1000	完好	完好
	右侧轴承	230	60	2000	完好	
无故障轮对 2	左侧轴承	230	50	1000	完好	
	右侧轴承	230	60	2000	完好	

由表格发现, 无故障轴承的相应参数如下表 2 所示, 因此可以设置多个参数作为实时预警参数, 超过该参数的轴承进行标记。

表 7 故障轴承与无故障轴承参数对比表

轴承故障类型	监测部位	转速 r/min	幅度 db	绝对能量	完好/故障	备注
无故障	轴承	230	<60	<2000	完好	
故障	轴承	230	>80	>10000	故障	

四 结论：

4. 1、声发射技术非常有效监测到故障轴承的重复出现的故障信号
4. 2、多种方式可以识别转动故障信号特征（绝对能量-幅值-波形流-TAFI）
4. 3、通过不同位置的传感器信号的对比，更有利于对结果的判定，
4. 4、声发射技术既有利于人工对数据的离线分析，也有利于选择特征参数的逻辑关系作为车载数据实时监测-分析-预警。

五、后续工作

5. 1、需要与振动检测方法进行对比检测，观察振动实时监测的有效范围
5. 2、减小缺陷尺寸，观察声发射检测的尺度的有效范围
5. 3、车载试运行，观察实车全路段噪音水平分布范围以及统计规律
5. 4、结合以上过程，确定未来声发射车载运行时那种状况更加有利于对结果的判断，由于转动故障会持续甚至一直发生，有利于选择运行在那种转速下，那种路段，监测时间长短，预警参数的逻辑关系（同一轴不同传感器同一参数的对比，同一节车厢不同传感器同一参数的对比……）
5. 5、故障识别，预警，疲劳使用寿命预测模型建立
5. 6、温度参数，振动参数，转速等行车数据与声发射数据进行信息融合与同步处理、分析、预警
5. 6、基于多参数融合的数据库建立，为智慧列车在线健康监测系统的建设搭建平台

六参考文献：

- [1]沈功田, 耿荣生, 刘时风. 声发射信号的参数分析方法[J]. 无损检测, 2002, 24 (2) :72-77
- [2]沈功田, 耿荣生, 刘时风. 声发射源定位技术[J]. 无损检测, 2002, 24 (3) :114-117
- [3]耿荣生, 沈功田, 刘时风. 模态声发射基本理论[J]. 无损检测, 2002, 24(7) :302-306
- [4]沈功田, 耿荣生, 刘时风. 连续声发射信号的源定位技术[J]. 无损检测, 2002, 24 (4) :164-167
- [5]李光海, 刘时风, 耿荣生, 等. 声发射源特征识别的最新方法[J]. 无损检测, 2002, 24 (12) :534-538
- [6]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
- [7]Hideshi KAKISHIMA 等. 滚动轴承人工缺陷的声发射和振动测定法[J]. 无损检测, 2001, 03: 25-28