

基于声发射的滚动轴承损伤振动机理研究

廖传军, 罗晓莉, 李学军

(湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湘潭 411201)

摘要:论述了声发射技术应用于滚动轴承状态监测和故障诊断的方法。对各典型状态滚动轴承在不同转速和载荷下的声发射信号进行了振动分析,研究了滚动轴承的损伤振动随转速和载荷的变化规律。定义了基于振动分析的声发射信号特征参数,研究了各特征参数随转速、载荷和损伤类型的变化规律。研究结果为滚动轴承的安全运行、状态监测和故障诊断提供了一种新的方法。

关键词:声发射检测;滚动轴承;损伤振动;载荷;转速

中图分类号: TG115.28; TB53; TH133.33

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2007)12-0712-04

Research on Damage Vibration Mechanism of Rolling Element Bearing Using Acoustic Emission Testing

LIAO Chuan-jun, LUO Xiao-li, LI Xue-jun

(Key Lab of Health Maintenance for Mechanical Equipment of Hunan Province, Hunan Science and Technology University, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The AE technique is a very functional and valid technique applied on rolling element bearings diagnosis and examination. Based on the vibration analysis of AE signals under varying load and rotating speed, the patterns of damage vibration of rolling element bearings under varying load and rotating speed were researched. The characteristic parameters of AE which were defined based on vibration analysis under varying load, rotating speed and damage type were also studied. The results provided a new technique for security running, condition monitoring, and fault diagnosis of rolling element bearings.

Keywords: Acoustic emission testing; Rolling element bearing; Vibration damage; Load; Rotating speed

滚动轴承是各种旋转机械中应用最广泛的一种通用机械,是大型或重载设备主轴的支撑元件,它的运动状态是否正常直接影响整个系统的精度、可靠性及寿命等性能,其缺陷会导致系统产生异常振动和噪声,甚至导致设备损坏。因此,开展滚动轴承的状态监测和故障诊断及其系统的健康维护研究工作有着重要的意义。

1 基于声发射的滚动轴承检测技术

1.1 声发射技术简介

收稿日期: 2006-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50675066); 湖南省科技计划项目(2007FJ3025)

作者简介: 廖传军(1979—),男,硕士,讲师,主要从事测控技术、机械设备故障诊断、无损检测等领域的科研及教学工作。

材料中局域源快速释放能量产生瞬态弹性波的现象称为声发射。用仪器检测、记录和分析声发射信号以及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。目前声发射检测作为一种成熟的无损检测方法,已被广泛应用于石油化工、电力、航空航天和交通运输等多个领域^[1]。

1.2 声发射技术在滚动轴承检测中的应用研究

在目前滚动轴承的诊断方法中,振动分析是应用最广泛的方法。然而这种方法对滚动轴承内部微小裂纹及摩擦等早期故障不是很有效。其主要原因是振动分析方法是通过对加速度和位移等振动信号的分析处理来判断故障,相当于对故障的二次信号进行处理,没有实现真正意义下的实时检测。声发射是一种动态检验方法,声发射信号反映的是故障的一次信号,信号中隐含着有关声发射源特性的重

要信息(如缺陷的类型、大小、位置 and 变化趋势等),其对缺陷的反映具有真实性和实时性的特点,因而适用于高速、连续工作的滚动轴承在线监控及早期或临近破坏预报^[2]。

滚动轴承一般需要在工作状态下进行实时检测。如果采用振动加速度传感器,则需要用电荷放大器将电荷量转化为电压量,而电荷放大器的抗干扰能力很难满足现场工况的要求,从而造成采集到的信号除有滚动轴承的故障信号外,还伴随有大量机构碰撞、摩擦以及发动机声音等噪声信号。声发射传感器输出的是电压信号,不需要中间的转换仪器,从而简化了检测系统;对于 AE 信号的放大可采用前置放大器,其体积远小于电荷放大器,且现场工况对其影响很小。因此声发射检测装置相对振动分析装置而言,具有简单、可靠性高、抗干扰性好和使用方便等优点^[3]。

因此,利用声发射检测装置来拾取滚动轴承工况下的声发射信号,再对声发射信号进行振动分析,来判断滚动轴承运行状态的方法,能充分发挥声发射检测技术和振动分析各自在滚动轴承故障诊断中的优势,是一种科学、有效且实用的方法。

2 振动机理

滚动轴承在工作时,一般是外圈固定或相对固定在轴承座或机壳上,内圈连接在设备的传动轴上,并随轴一起转动。实际工作中的滚动轴承振动机理比较复杂,与其装配质量、制造质量、润滑质量、固有频率、载荷大小、转速、工作环境及滚道表面缺陷等多种因素有关。滚动轴承故障诊断工作的关键在于从综合振动中把运行故障引起的振动信号提取出来,因此首先需要研究滚动轴承运行故障引起的振动及其信号特征^[4]。滚动轴承在运行过程中出现的故障按其振动信号的特征不同可分为两大类:一类为表面损伤类故障,另一类为磨损类故障。在正常使用情况下,滚动轴承工作表面磨损故障经历的时间较长,是一种渐变性故障,且不会马上引起轴承破坏,其危害程度远小于表面损伤类故障^[5]。所以对滚动轴承振动机理的研究重点应放在损伤类故障及其振动机理上。

3 实验研究

实验研究了滚动轴承的正常、外环损伤、内环损伤、滚动体损伤和保持架损伤五种典型状态在不同

载荷和转速下的振动响应,并对各状态下的声发射信号进行了振动分析,定义了基于振动分析的声发射信号特征参数^[6]。

3.1 实验系统简介

实验选用故障诊断综合实验台作为滚动轴承的运行环境,根据滚动轴承信号拾取及分析的要求,在北京声华兴业科技有限公司生产的 SWAES 全波形数字化声发射系列产品中,选用频率响应为 10 kHz~1.25 MHz $\pm$ 3.0 dB 的 SWAE-5 声发射采集卡,频率带宽为 20 kHz~2 MHz,增益为 40 dB 的 PAI 前置放大器;谐振频率为 150 kHz、灵敏度 $>$ 65 dB 的 SR150 传感器,组成了声发射检测装置,并与自行开发的声发射信号分析软件及计算机组成了声发射在线检测系统。实验系统见图 1。

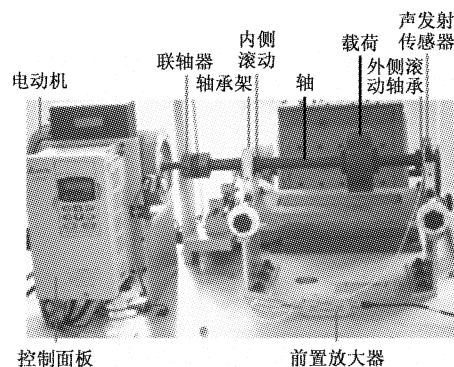


图1 声发射在线检测系统实物图

图1中前置放大器与计算机 PCI 插槽中的声发射采集卡(图中未列出)相连接。实验轴承是五种典型状态的 205 滚动轴承各一只。内侧滚动轴承为同型号正常轴承,作为工作轴承无须更换,外侧滚动轴承为实验轴承,按实验需要进行更换。在加有载荷的实验中,载荷(3 kg)装在靠近外侧轴承架的位置。声发射传感器固定在外侧轴承的外圈上。

3.2 信号的处理分析

整个实验分为 10 个小实验,分别是正常轴承有载和无载实验(实验 1 和 2)、内环损伤轴承有载和无载实验(实验 3 和 4)、外环损伤轴承有载和无载实验(实验 5 和 6)、滚子损伤轴承有载和无载实验(实验 7 和 8)、保持架损伤轴承的有载和无载实验(实验 9 和 10)^[4]。每个实验均记录了实验轴承在不同转速下的声发射信号。

描述声发射信号的参数有很多,常用的有事件记数、振铃记数、能量记数和有效值电压等。实验目的是对声发射信号进行振动分析,所以选取滚动轴

承故障诊断常用的有效参数峰值、均方根值、峭度和峰值因子作为声发射信号振动分析的特征参数。

(1) 峰值 X_P 是信号 $\{x_i\}$ 在一个周期 T_0 的时间内可能出现的最大瞬时值,即:

$$X_P = |x(t)|_{\max} \quad (t < T)$$

(2) 均方根值 X_{rms} 是信号 $\{x_i\}$ 的均方根值,即:

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (i = 1 \sim N, N \text{ 为采样点数})$$

(3) 峭度 $K = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x^4 p(x) dx}{(\int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p(x) dx)^2}$ (其中 $p(x)$ 是

$x(t)$ 的概率密度分布函数)

(4) 峰值因子 $C = \frac{X_P}{X_{rms}}$

利用声发射信号分析软件对各实验条件下的特征参数进行了统计分析,其值见表 1。

为探索特征参数的统计规律,利用 MATLAB7.0 强大的数值计算功能获取了各状态下的特征参数趋势分析图(图 2~5)。图中所示 1~10 依次代表实验 1~10 的实验数据。根据各实验的声发射信号波形图、频谱图、特征参数值及趋势分析,总结出基于振动分析的滚动轴承声发射信号特征参

表 1 不同转速下测得的声发射特征参数

实验	转速/Hz	$X_P/\mu V$	$X_{rms}/\mu V$	K	C	实验	转速/Hz	$X_P/\mu V$	$X_{rms}/\mu V$	K	C
1	10	51.2 481	13.544 2	4.688 8	3.783 8	6	10	59.256 2	12.245 7	7.064 7	4.838 9
	20	56.725 4	14.889 6	5.185 9	3.809 7		20	70.524 7	13.912 4	7.147 1	5.069 2
	30	62.586 9	16.558 6	4.883 5	3.779 7		30	74.857 3	15.309 1	6.990 5	4.889 7
	40	69.325 6	17.525 8	5.108 8	3.955 6		40	73.224 7	15.863 1	7.122 1	4.616 0
	50	73.714 2	18.752 3	5.197 2	3.930 9		50	82.889 7	16.390 1	6.861 1	5.057 3
	60	79.625 4	19.326 5	4.876 3	4.120 0		60	90.552 7	18.540 2	6.975 5	4.884 1
2	10	38.256 3	10.837 6	5.101 2	3.530 0	7	10	100.123 2	17.260 5	8.760 0	5.800 7
	20	47.556 9	11.925 9	4.846 7	3.987 7		20	105.548 7	18.846 5	8.401 0	5.600 4
	30	58.556 8	14.199 2	4.998 6	4.124 0		30	106.228 8	19.017 4	8.450 7	5.585 9
	40	62.224 5	15.869 2	5.101 7	3.921 0		40	121.552 4	21.407 2	8.556 7	5.678 1
	50	70.225 7	16.286 3	4.825 2	4.311 0		50	133.698 0	22.695 6	8.631 6	5.890 9
	60	69.336 5	17.552 8	5.049 2	3.952 0		60	144.357 4	24.147 6	8.448 6	5.978 1
3	10	90.124 5	18.325 4	7.600 0	4.918 0	8	10	89.865 7	15.557 4	8.558 6	5.776 3
	20	98.325 5	19.658 4	7.442 0	5.001 7		20	94.695 8	16.558 9	8.490 4	5.718 7
	30	98.265 6	20.225 4	7.683 6	4.858 5		30	100.556 8	18.387 4	8.737 7	5.468 8
	40	105.362 4	21.689 8	7.373 0	4.857 7		40	107.326 5	18.987 6	8.415 4	5.652 5
	50	115.322 2	23.458 6	7.484 9	4.916 0		50	112.358 7	19.268 7	8.581 0	5.831 2
	60	127.000 0	25.225 9	7.669 9	5.034 5		60	128.259 8	22.368 8	8.471 8	5.733 9
4	10	78.221 4	15.835 4	7.694 6	4.939 7	9	10	62.965 7	14.886 7	6.420 7	4.229 7
	20	80.236 5	16.152 4	7.678 1	4.967 7		20	68.558 7	15.698 7	6.555 2	4.367 1
	30	90.914 3	18.489 4	7.499 6	4.917 1		30	75.448 9	17.036 8	6.660 7	4.428 6
	40	104.256 3	20.707 1	7.590 7	4.034 8		40	84.687 4	17.832 4	6.605 6	4.749 1
	50	112.321 5	21.503 2	7.5105	5.223 5		50	93.998 6	19.112 2	6.464 7	4.918 3
	60	114.857 6	22.740 1	7.422 7	5.050 9		60	102.258 6	21.669 2	6.508 3	4.719 1
5	10	68.258 4	16.125 7	6.993 4	4.232 9	10	10	50.000 0	10.014 4	6.560 5	4.992 8
	20	73.698 3	16.755 8	7.196 6	4.279 0		20	61.228 4	12.040 9	6.721 6	5.085 0
	30	76.254 6	17.685 7	7.268 5	4.331 7		30	68.556 8	13.878 8	6.412 2	4.939 7
	40	84.522 2	18.889 6	6.861 1	4.527 5		40	75.985 4	14.617 8	6.416 4	5.198 1
	50	91.328 9	19.667 8	7.127 1	4.643 6		50	82.389 2	16.055 3	6.585 2	5.131 6
	60	103.785 4	21.669 2	6.888 8	4.789 5		60	94.658 4	18.375 2	6.427 2	5.151 4

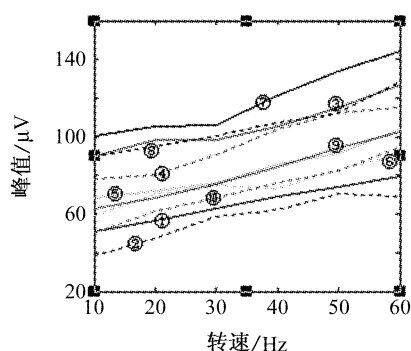


图2 转速-峰值趋势

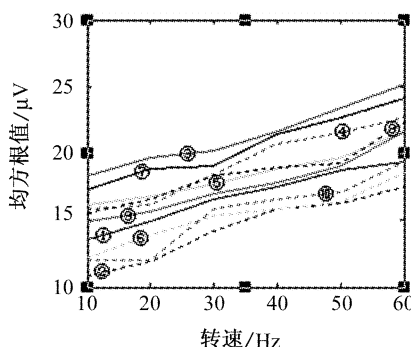


图3 转速-均方根值趋势

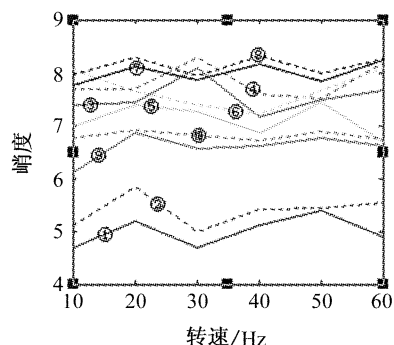


图4 转速-峭度趋势

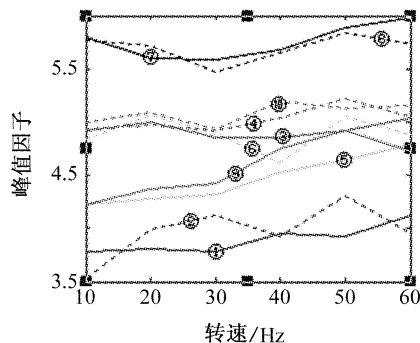


图5 转速-峰值因子趋势

数的规律如下^[7]:

(1) 正常滚动轴承的波形有两个特点:一是无冲击,二是变化慢。当轴承元件有损伤时,波形快

速、周期性变化,且有脉冲振动产生,冲击脉冲振动周期为基阶故障特征频率的倒数^[8]。

(2) 同一滚动轴承,峰值随载荷增加而增大。

(3) 同一转速下,加载后峰值增大;出现损伤后峰值增大;对于内环和滚动体损伤轴承,由于轴承径向间隙的存在,损伤和滚动体会产生冲击振动,出现振幅调制现象;对于外环和保持架损伤轴承,由于损伤处的位置与承载方向之间的位置关系是不一定的,无振幅调制现象^[9],所以相同条件下滚子、内环损伤轴承的峰值水平要高于外环和保持架损伤轴承。

(4) 基阶工频及其倍频处均有峰值出现,最大峰值出现在三倍工频处。基于峰值上述特点,参照相对标准值,可以从峰值的大小判断滚动轴承是否出现损伤及其位置。

(5) 同一滚动轴承,加载时声发射信号加强,均方根值随着转速的增加而增大。

(6) 同一转速下,加载后均方根值增大。

(7) 滚动轴承在各典型状态下的均方根值的层次结构不明显,由此可见均方根值对轴承损伤的变化不敏感。

(8) 转速和载荷的变化对峭度的影响不明显。各典型状态下的滚动轴承峭度均在某一个值附近波动:正常轴承约为5.0,内环损伤轴承约为8.0,外环损伤轴承约为7.0,滚子损伤轴承的约为8.5,保持架损伤轴承约为6.5。当滚动轴承有损伤发生时,其峭度值会增加,参照相对标准值,可以根据峭度值判断损伤发生的位置。

(9) 峰值因子对载荷和转速的变化不敏感。

(10) 当轴承有损伤发生时,峰值因子增大。随损伤位置的不同,峰值因子值的层次结构十分明显,滚子损伤轴承的峰值因子最大,内环损伤轴承、外环损伤轴承及保持架损伤轴承的依次减小。参照相对标准值,可以利用峰值因子判断滚动轴承损伤位置。

(11) 峭度和峰值因子不受转速、载荷因素的影响,尤其适用于无需考虑以往数据的滚动轴承的状态监测和故障诊断。

4 结论

研究成果对进一步开展基于声发射技术的滚动轴承损伤振动机理研究工作打下了良好的基础,同时也为滚动轴承的状态监测、故障诊断及其系统的健康维护工作提供了一项很好的方法。

(下转第735页)

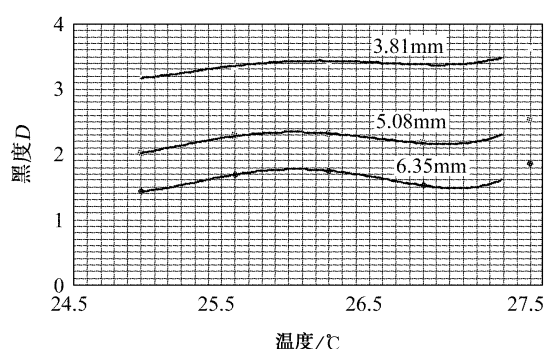


图2 显影温度与底片黑度关系曲线

对黑度要求较高的工作时更应注意。

图2由三条曲线组成,三条曲线的变化趋势一致,即由上升→相对平稳→下降→反转四个过程组成。当洗片机的工作温度为26℃左右时,曲线所示底片黑度变化很小。因此当进行对底片黑度控制要求较高的工作时,应尽量选择该显影温度范围。底片黑度稳定段对应的显影温度并非不变,会随着洗片机设置温度的不同而不同,因此应定期校验显影温度,调整洗片机温控仪的控制点。

曲线上的横轴呈延伸趋势,这是由于洗片机后

半部分的烘干电机处于持续工作状态,造成即使在洗片机停止处理胶片期间,加热电路断开,烘干电机仍照常工作,散发出大量的热量,热流回转造成显影温度不断升高;另外夏天环境温度较高,也会对显影温度的升高起促进作用。

5 结论

自动暗室处理时,影响射线底片黑度的三个因素中,显影温度对底片处理黑度的影响最大,因此此时对洗片机显影温度的监控非常重要。通常洗片机只具有升高显影温度的功能,实验结果迫切希望洗片机生产厂家能考虑显影制冷的问题,即在对显影温度进行监控的同时,增加冷却装置或阻止烘干电机的热流回转,避免显影温度过分持续升高。

在实际工作中,为了使底片处理过程控制更加严格,提高处理底片质量,需要注意:①洗片机持续工作时间不宜太长。②应定期校验显影温度,调整洗片机温控仪的控制点。③在洗片机停止处理胶片期间最好打开顶盖,释放烘干电机所产生的热量。④洗片机最好采用热辐射较小的烘干系统。⑤改善环境条件,降低环境温度。

(上接第715页)

参考文献:

- [1] 沈功田,戴光,刘时风.中国声发射检测技术进展[J].无损检测,2003,25(6):302-307.
- [2] D MBA.声发射与轴承安全监测[J].轴承,2005,(2):39-42.
- [3] 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.
- [4] Hideshi KAKISHIMA,潘琴华,云济.滚动轴承人工缺陷的声发射和振动测定法[J].无损检测,2001,23(3):25-28.
- [5] 唐英,孙巧.滚动轴承振动信号的小波奇异性故障检测研究[J].振动工程学报,2002,(3):111-113.
- [6] 刘春浩,王吉林,杨晨,等.滚动轴承振动的模拟和实验分析[J].轴承,2000,(6):36-43.
- [7] 马家驹,梁文梅.滚动轴承振动统计特性分析[J].轴承,1994,(1):33-44.
- [8] Kim Sun-Min, Lee Kang-Jae. Effect of bearing support structure on the high-speed spindle bearing compliance[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2002,(3):365-373.
- [9] 尼格姆 NC.随机振动理论[M].上海:上海交通大学出版社,1985.

(上接第727页)

3 结论

(1)用ICT技术可以直观地反映出材料内的密度分布情况。

(2)用曲线拟合方法可以得到CT数与材料物理密度的关系曲线,从而较为准确地得出材料各处的密度值,为材料的工艺优化提供技术指导。

(3)该方法可推广应用到其它复合材料材料的密度分布研究中。

参考文献:

- [1] 强玉俊,蒋大真,盛康龙.工业CT研究进展[J].核物理动态,1994,11(4):64-66.
- [2] 张朝宗,郭志平,董宇峰.工业CT的系统结构与性能指标[J].CT理论与应用,1994,3(3):13-17.
- [3] 杨凤民.工业用X-CT检测技术[J].铸造设备研究,2001,(4):30-32.
- [4] Douarche N, Rouby D, Peix G, et al. Relations between X-ray tomography, density and mechanical properties in carbon-carbon composites[J]. Carbon, 2001,39:1455-1465.