DOI: 10.3901/JME.2014.23.075

滚动轴承性能退化静电监测方法及试验*

刘若晨 左洪福 张 营 梁 坤
(南京航空航天大学民航学院 南京 211106)

摘要: 采用静电方法对滚动轴承进行在线监测以及退化评估的研究。在滚动轴承寿命强化试验机平台上,使用自研磨损区域静电传感器对滚动轴承进行在线监测,通过多组试验采集得到滚动轴承磨损静电信号,在对滚动轴承磨损过程静电产生机理分析的基础上,进行静电信号的特征提取,通过加速疲劳全寿命周期试验进行滚动轴承性能退化评估,并与振动信号与温度信号进行对比验证。研究结果表明,磨损区域静电监测技术可以实现滚动轴承性能退化的在线监测,该研究是机械系统在线监测以及故障诊断和预测的重要组成部分,并为仪器实现产品化奠定了基础。

关键词: 静电监测;滚动轴承;磨损区域;特征提取;性能退化

中图分类号: TH133

Electrostatic Monitoring of Oil Lubricated Rolling Bearing Performance Degradation and Experiment

LIU Ruochen ZUO Hongfu ZHANG Ying LIANG Kun

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106)

Abstract: Study of on-line monitoring of oil lubricated rolling bearing and performance degradation with electrostatic sensing method. Electrostatic monitoring is a new method for rolling bearing with self-made wear-site sensor (WSS) on rolling bearing accelerated life testing rig. With the analysis of charge generating process induced by tribological activity, the experiments are carried out to collect the electrostatic signals. Then feature extraction of the electrostatic signals is taken for rolling bearing performance degradation assessment, compared with the vibration signals and the temperature signals. The study result shows that the wear-site electrostatic sensor technology can be used to realize the on-line monitoring of lubricated oil rolling bearing performance degradation, which is an essential part of state monitoring and fault diagnosis for mechanical system and lays a foundation for the commercialization of the instrument.

Key words: electrostatic monitoring; rolling bearing; wear-site sensor; feature extraction; performance degradation

0 前言

滚动轴承是机械设备中最常用的重要支承部件,也是旋转机械中的故障多发部件。因此滚动轴承的状态监测和故障诊断及预测一直是机械系统领域的研究热点。目前针对滚动轴承使用的主要监测方法有:振动分析法、温度监测法、声发射诊断法等。静电监测技术是一种新型在线监测手段。与以上传统方法相比,主要优势在于,静电监测技术是对区域摩擦磨损产生的电荷的直接监测方法,而不是该部件产生的二次效应,如振动过大或超温现象^[1]。因此,静电监测方法对于磨损区域的变化更为敏感,对机械设备的状态监测更为直接有效。

静电监测技术最早由英国 Smiths Aerospace(后被美国 GE 公司收购)开发,并成功应用于 F-35 战机上进行发动机的烧蚀、碰磨、喷油嘴堵塞和燃烧效率下降等气路故障监测^[2]。此后,英国南安普顿大学对静电监测技术进行了进一步的深入研究,并扩展到多个领域。包括在销盘磨损试验机上进行静电监测研究^[1,3-5],对润滑条件下油路中磨损颗粒静电监测可行性的验证^[6-7],进而在轴承试验机和 FZG 齿轮箱上进行试验与应用^[8-10]。国内关于静电监测相关技术的研究刚刚起步,主要包括基于静电感应的航空发动机气路监测技术研究^[11-14],滑油系统全流量磨粒在线监测技术研究^[15-17]以及静电传感器本身特性的研究^[18]。

虽然国内外针对静电监测技术已经进行了一系列的研究,但主要还是应用在气路和油路的这些电荷感应过程较为简单的系统中,对于区域磨损的

* 国家自然科学基金资助项目(60939003)。20131219 收到初稿,20140610 收到修改稿

监测尤其是滚动轴承的磨损研究才刚刚开始, 由于摩擦磨损过程复杂性造成电荷产生机理的多样性, 给磨损区域静电监测带来了很大的困难, 这也是目前区域磨损静电监测的瓶颈所在。本文采用自制的磨损区域静电传感器, 搭载滚动周期全寿命试验台, 力图通过多次试验充分验证静电监测在滚动轴承区域磨损领域的可行性和准确性, 同时首次利用静电信号对全寿命周期的滚动轴承性能退化过程作出分析和评估, 同时通过对比分析体现了静电监测与传统监测手段相比的优势。为进一步的故障诊断与预测提供了基础。

1 滚动轴承静电监测原理

1.1 滚动轴承静电信号产生机理

与航空发动机气路和滑油路静电监测原理不同, 滚动轴承磨损区域静电监测不是单一的带电颗粒感应产生静电信号, 而是在磨损过程中多种荷电机理综合产生的复杂静电感应现象。在产生静电的过程中, 相互接触的两种物质的材料、接触面积和接触压力以及环境因素等都对静电强度产生影响。摩擦副表面区域的荷电机理很复杂, 并且受润滑剂和接触材料的化学、物理性质影响, 因此很难详细定量研究各因素与荷电量之间的关系。从目前国内研究来看, 具体磨损过程静电产生原因如图1所示^[5]。

图1 磨损过程静电产生机理

1.2 静电传感器基本原理及特点

根据工作原理的不同静电传感器分为电荷直接传递和感应式两种。本试验采用感应式静电传感器, 即磨损颗粒不与传感器直接接触, 而将传感器感应面尽可能接近磨损区域, 当磨损过程中产生的各种电荷通过感应探极区域时, 将在探极上产生相应的感应电量, 感应探极表面电子将重新分配, 从而产生能够被采集到的静电信号。图2为理想状态下带电颗粒经过静电传感器时所产生的感应电荷的原理示意图^[4]。图3为本试验所采用静电传感器的结构示意图和实物图。

图2 静电传感器原理示意图

(a) 结构示意图

(b) 实物图

图3 磨损区域静电传感器

静电传感器等效测量电路如图4所示, 其中 R 为测量回路的等效电阻, C 为测量回路的等效电容, A 为传感器感应面积, q 为施感电荷, 运动速度为 v , 探极与施感电荷运动路径间的垂直距离为 h 。设 t 时刻, 带电颗粒在传感器探极上的感应电荷量为 $Q(t)$, 则 t 时刻静电传感器实际输出信号, 感应电压 $U(t)$ 与传感器感应电荷量 $Q(t)$ 的关系为

$$U(t) = RQ(t) = R \frac{dQ}{dt} = -2RCAqv^2t \cdot [h^2 + (vt)^2]^{-2} \quad t \in [0, \infty) \quad (1)$$

图4 静电传感器等效测量电路

静电传感器有棒状、点状和圆环状等形式。本试验传感器采用棒状形式, 其主要优点有: ① 结构简单, 紧凑, 对于轴承运转所引起的振动具有较好的抗干扰能力, 容易达到静电屏蔽的效果, 且价格便宜; ② 由于其为非接触式, 所以不会对轴承的运转产生任何影响, 也不会给润滑油液带来压力损失;

③ 灵敏度高, 响应时间快, 测量范围大; ④ 性能较稳定, 适用于恶劣的工业环境。

2 滚动轴承加速疲劳寿命试验

2.1 试验仪器及设备

本试验所用试验机为杭州轴承实验中心的 ABLT-1A 型轴承寿命强化试验机。该试验机包括加载系统、传动系统、润滑系统、电气控制系统、计算机监控系统、试验头和试验头座。该试验机的特点是加载自动稳压、试验轴承外圈温度自动显示、试验时间自动累计显示、疲劳剥落自动停机等。所安装的传感器的位置如图 5 所示, 通过温度、静电、振动传感器来分别采集信号, 以便更加准确地监测轴承的状态。

图 5 轴承寿命强化试验机平台及传感器安装图

本试验主要是对轴承进行径向加载, 轴承节径为 D , 滚动体的直径为 d , 滚动体个数为 Z , 接触角为 α , 轴承在运动过程中外圈固定, 内圈随轴一起转动, 轴承载荷分布及结构如图 6 所示。本试验中所用所有轴承均为单列深沟球轴承 6207, 其主要参数如表 1 所示。

图 6 轴承载荷分布及结构图

表 1 试验轴承主要参数

轴承 型号	节径 D/mm	滚动体直径 d/mm	滚动体个数 Z	接触角 $\alpha(^{\circ})$	径向额定 动载荷 C_r/kN
6207	53.5	11.112 5	9	0	25.7

2.2 试验方案及流程

试验具体步骤如下。

(1) 对将进行试验的轴承进行清洗, 保证轴承性能完好。

(2) 按固定位置安装好静电传感器、温度传感器、振动传感器。

(3) 对编好号的轴承进行安装, 开始时在轴上同时安装 4 个 6207 轴承。

(4) 依次调试各传感器及采集设备, 当各项设备都调试完成时, 准备开始试验并记录数据。轴承与静电传感器相对位置如图 7 所示。

(5) 将油液润滑系统打开, 不加载启动机器, 运转 1~2 h 在额定动载范围内逐步进行径向加载, 打开数据采集系统开始记录各项运行数据。

(6) 定期检查轴承试验机运行状况, 通过观察静电信号方均根值(Root mean square, RMS)等参数判断轴承运转情况。图 8 所示为数据采集系统流程图。

(7) 当 4 个轴承中一个发生故障时, 试验机将会自动报警并停机。

(8) 拆卸下轴承并详细检查各轴承的状况并加以记录, 同时将损坏的轴承进行更换, 换上新的轴承。

(9) 循环重复步骤(3)~(8)的过程, 直到轴承全部更替完结束, 则一次试验结束。

试验中采用油液浇注润滑方式, 试验主要参数见表 2。

图 7 静电监测示意图

图 8 静电采集系统流程图

表 2 试验主要参数

参数	数值
轴承型号	6207
试验载荷(径向)/kN	20
试验转速/(r/min)	3 000
采样频率/kHz	10
数据保存间隔时间/min	5

3 轴承静电信号特征提取及性能退化评估

3.1 特征参数提取

对滚动轴承进行性能退化评估之前, 首先必须对原始信号进行处理, 即特征提取。不同的特征参数对于轴承状态的敏感程度也不同。考虑到静电感应信号的特殊性, 主要采用时域特征参数提取方法。

本文所采用时域特征提取参数主要有: 方均根值、峰-峰值、峰值指标、波形指标、脉冲指标、裕度指标和峭度指标等。具体时域特征参数见表 3。

表 3 时域特征提取参数

参数	公式
方均根值	$X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$
峰-峰值	$X_{p-p} = X_{\text{max}} - X_{\text{min}}$
峰值指标	$C_f = \frac{X_{\text{max}}}{X_{\text{rms}}}$
波形指标	$S_f = \frac{X_{\text{rms}}}{ \bar{X} }$
脉冲指标	$I_f = \frac{X_{\text{max}}}{ \bar{X} }$
裕度指标	$CL_f = \frac{X_{\text{max}}}{X_r}$
峭度指标	$K_v = \frac{\beta}{X_{\text{rms}}^4}$

表 3 中, $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$, $X_{\text{max}} = \max\{x_i\}$,

$i=1, 2, \dots, N$, $X_r = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{|x_i|} \right]^2$, $\beta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^4$ 。表

3 中除了前两项外其他项均为量纲一参数, 可用于量纲一诊断。主要优点在于可直接使用检测信号而不需要进行信号处理, 量纲一参数受转速或者轴承工况的影响较小, 因此能较好地反应轴承的工作状态。

3.2 基于静电的滚动轴承性能退化评估

根据滚动轴承的工作机理, 其从正常工作状态到早期故障包括轻微的点蚀、击蚀以及摩擦腐蚀, 再到产生裂纹、剥落等严重磨损阶段直至最后由于严重变形和断裂等最终完全失效的整个过程为轴承

性能退化的过程。因此本试验利用静电方法对轴承全寿命周期进行监测和分析。

在滚动轴承静电监测试验过程中, 每 1 min 采集 10 000 个静电信号数据, 利用以上公式计算各特征参数的值, 对全寿命周期进行研究。限于篇幅, 选取具有代表性的一组滚动轴承全寿命周期变化如图 9 所示。本次寿命试验从机器开始运作(采集开始)到采集结束总共持续时间为 4 509 min。从图 9 中可以看出静电信号 RMS 幅值基本在 0~6 mV 直接波动。

图 9 滚动轴承全寿命周期试验静电 RMS 时域信号

对该信号进行进一步分析, 可以明显看出在全寿命周期试验过程中滚动轴承的运行状态可以分为四个阶段, 即早期磨合阶段、平稳阶段、早期磨损阶段和严重磨损阶段。分别对应图 10~13。这与轴承运转的实际情况非常符合, 也从侧面说明了信号的真实性和准确性。

图 10 滚动轴承初始磨合阶段静电 RMS 时域信号

图 11 滚动轴承平稳阶段静电 RMS 时域信号

图 12 滚动轴承早期故障静电 RMS 时域信号

图 13 滚动轴承严重磨损阶段静电 RMS 时域信号

在早期磨合阶段，由于加工工艺和装配工艺等问题，使轴承在刚开始运转产生了比较大的摩擦磨损，因此静电监测信号比平稳阶段要大一些。随着早期磨合阶段的结束，轴承运转逐渐趋于平稳，而静电信号也相应地趋于平稳。本次试验中早期磨合阶段在 0~400 min，试验的大部分时间轴承都处于平稳运转状态，时间在 400~3 000 min。当轴承运行到 3 200 min 左右时，静电信号明显出现了一个尖峰，虽然此后略有下降又逐步增大，但根据静电监测原理可以判断出此时出现了一个比较严重的早期磨损，这也意味着故障从此刻开始产生。当轴承运行到大约 4 013 min 时静电信号开始急剧上升，直到 4 049 min 时达到静电 RMS 值达到最大值 5.51 mV，说明此时轴承已经到达严重磨损状态，直到 4 056 min 时轴承试验机因轴承故障而停机。在试验机停机后又采集了大约 500 min 停止采集，从图 14 可以看出，当试验机停止采集时，静电信号稳定在 0.24 mV 左右，与正常采集的静电信号相差 10 倍左右，属于传感器的背景噪声，这也从另一个侧面反映出该静电传感器的可靠性。

RMS 参数作为一个非常重要的机械设备检测诊断参数，其计算值的大小常常能直接反映信号的能量情况，因此也被广泛地应用于各种信号参数提取与分析中。本文针对静电信号也采用了这一参数，试验证明效果非常明显，因此也验证了 RMS 值也适用于滚动轴承静电信号。对于其他峰-峰值、波形指标等参数经过分析也有类似规律与退化趋

势，限于篇幅仅列出峰-峰值(图 15)，其他就不一一列出。另外，其他多组试验也证明了上述分析的正确性，限于篇幅仅给出其中一组全寿命试验信号时域图像，如图 16 所示。

图 14 停机状态静电 RMS 时域信号

图 15 轴承全寿命静电峰-峰值信号

图 16 另一组全寿命试验静电时域信号

3.3 与振动温度信号对比验证

振动与温度是轴承监测的常用方法，相关技术已经十分成熟并被广泛应用于各个领域。因此，考虑同一次试验下所采集的振动与温度信号与静电信号进行对比分析与验证。

图 17 所示为与前文分析的静电信号同一组试验下同时采集得到并处理过的 RMS 值的时域信号图。可以清楚看到振动信号的 RMS 值在 3 200 min 时突然增大，表示此时开始出现早期磨损，至 4 056 min 时停止。这与上文针对静电信号分析的结果完

全一致,证明了静电信号的正确性。同时可以看出振动信号无法反应早期磨合的过程,而静电信号却十分明显,从这个角度上可以体现出静电信号比振动信号要更为优越。

图 17 轴承全寿命周期振动 RMS 时域信号

图 18 所示为同一组试验下同时采集得到的时域温度信号,可以清楚看到早起磨合阶段温度不断上升,直到 400 min 左右时开始温度趋于稳定,这与静电信号中反映的早起磨合阶段相一致。在平稳阶段温度基本保持不变甚至略有下降,直到最后失效。后期磨损过程基本不能体现,直到轴承失效停机温度下降到常温。由此对比可以看出静电信号要远优于温度信号。

图 18 轴承全寿命周期温度时域信号

4 结论

本文采用磨损区域静电监测的方法对滚动轴承全寿命周期的性能退化进行研究与分析,得出以下结论。

(1) 利用静电原理自制了磨损区域静电传感器并成功安装到滚动轴承寿命试验台上,实现了滚动轴承磨损区域的静电监测。

(2) 通过对信号的采集和特征提取,获得了滚动轴承磨损区域的静电信号,通过对全寿命周期的静电信号分析,将滚动轴承的运行状态清晰地分成四个阶段,并做了详细的性能退化评估与分析。

(3) 与传统监测方法振动和温度进行对比,不仅验证了静电监测方式的可行性和准确性,同时还体现出了静电监测的优越性。为以后静电监测方法在工程实践中的真正应用奠定了基础。后续将进一步利用摩擦磨损试验机对测得电量与磨损量间的量化曲线进行重点研究。

参 考 文 献

- [1] TASBAZ O D, WOOD R J K, BROWNE M, et al. Electrostatic monitoring of oil lubricated sliding point contacts for early detection of scuffing[J]. *Wear*, 1999, 230: 86-87.
- [2] POWRIE H E G, NOVIS A. Gas path debris monitoring for F235 joint strike fighter propulsion system PHM[C/CD]// IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2006.
- [3] WOOD R J K, BROWNE M, THEW M T. Electrostatic charging precursor to scuffing in lubricated contacts[C/CD]// Proceedings of the IMechE World Tribology Congress, London, September 8-12, 1997.
- [4] MORISS S, WOOD R J K, HARVEY T J, et al. Use of electrostatic charge monitoring for early detection of adhesive wear in oil lubricated contacts[J]. *Transactions of the ASME Journal of Tribology*, 2002, 124: 288-296.
- [5] WANG L, WOOD R J K, CARE I, et al. Electrostatic wear sensing of ceramic-steel lubricated contacts[J]. *Tribology Series*, 2003, 43: 711-720.
- [6] WANG L, WOOD R J K, HARVEY T J, et al. Wear performance of oil lubricated silicon nitride sliding against various bearing steels[J]. *Wear*, 2003, 255: 657-668.
- [7] HARVEY T J, MORISS S, WANG L, et al. Real-time monitoring of wear debris using electrostatic sensing techniques[J]. *Proc. IMechE Part J: J. Engineering Tribology*, 2007, 221: 27-40.
- [8] POWRIE H E G, WOOD R J K, HARVEY T J, et al. Re-analysis of electrostatic wear-site sensor data from FZG gear scuffing tests[J]. *Condition Monitor*, 2001, 177: 6-12.
- [9] HARVEY T J, WOOD R J K, POWRIE H E G. Electrostatic wear monitoring of rolling element bearings[J]. *Wear*, 2007, 263: 1492-1501.
- [10] CHEN S L, CRAIG M, WOOD R J K, et al. Use of artificial intelligence methods for advanced bearing health diagnostics and prognostics[C/CD]// IEEE Aerospace Conference, Montana, 2007.

- [11] 文振华, 左洪福, 李耀华. 气路颗粒静电监测技术及试验[J]. 航空动力学报, 2008, 23(12): 2322-2326.
WEN Zhenhua, ZUO Hongfu, LI Yaohua. Gas path debris electrostatic monitoring technology and experiment[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(12): 2322-2326.
- [12] 李耀华, 左洪福. 碰摩故障静电监测方法及模拟试验[J]. 航空学报, 2010, 31(6): 1156-1163.
LI Yaohua, ZUO Hongfu. Method for rub fault detection based on electrostatic technique: model and simulated experiments[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(6): 1156-1163.
- [13] 李耀华, 左洪福, 刘鹏鹏. 某型航空涡轮轴发动机尾气静电监测探索性试验[J]. 航空学报, 2010, 31(11): 2174-2181.
LI Yaohua, ZUO Hongfu, LIU Pengpeng. Gas path electrostatic monitoring of turbo-shaft engine: An exploratory experiment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(11): 2174-2181.
- [14] 刘鹏鹏, 左洪福, 孙见忠, 等. 涡喷发动机气路滑油泄漏故障在线监测研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2601-2607.
LIU Pengpeng, ZUO Hongfu, SUN Jianzhong, et al. Study of on-line monitoring of lubricating oil leakage in turbojet engine gas path[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(11): 2601-2607.
- [15] 李绍成, 左洪福. 磨粒在线监测静电传感器设计[J]. 压电与声光, 2010, 32(2): 325-328.
LI Shaocheng, ZUO Hongfu. Design of electrostatic sensor for wear debris on-line monitoring[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(2): 325-328.
- [16] 陈志雄, 左洪福, 詹志娟, 等. 滑油系统全流量在线磨粒静电监测技术研究[J]. 航空学报, 2012, 33(3): 446-452.
CHEN Zhixiong, ZUO Hongfu, ZHAN Zhijuan, et al. Study of oil system oil-line debris electrostatic monitoring technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(3): 446-452.
- [17] 黄文杰, 左洪福, 王瑞凯. 轴向磁化双环嵌套磁场的解析模型及其应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(19): 122-127.
HUANG Wenjie, ZUO Hongfu, WANG Ruikai. Analytic model and application of the axially magnetized and bi-annular-shaped magnetic field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(19): 122-127.
- [18] 徐一鸣, 左洪福, 詹志娟, 等. 基于灵敏度分析的静电传感器优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(5): 1084-1089.
XU Yiming, ZUO Hongfu, ZHAN Zhijuan, et al. Optimal design of electrostatic sensor based on sensitivity analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(5): 1084-1089.

作者简介: 刘若晨(通信作者), 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为在线监测与智能诊断。

E-mail: liuruochen_nuaa@163.com

左洪福, 男, 1959 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为状态监测与故障诊断、航空器健康管理, 可靠性与安全性工程。

E-mail: aerodiag@nuaa.edu.cn