

采用频谱细化的超声法在线测量 滚动轴承保持架转速

陈书恒^{1,2}, 李猛^{1,2,3,4}, 刘恒^{1,2}, 梅凯路^{1,2}, 贺凤祥⁵

(1. 西安交通大学润滑理论及轴承研究所, 710049, 西安; 2. 西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 710049, 西安; 3. 长安大学汽车学院, 710064, 西安; 4. 洛阳LYC轴承有限公司航空精密轴承国家重点实验室, 471039, 河南洛阳; 5. 中国航发湖南动力机械研究所机械系统研究部, 412002, 湖南株洲)

摘要: 针对实际工况下超声时间差法在线测量滚动轴承保持架转速的噪声抑制及高速测量准确性问题,提出了一种采用频谱细化的滚动轴承保持架转速超声测量方法。通过引入自相关分析及快速傅里叶变换抑制时域噪声对超声回波脉冲信号的影响,使用线性调频Z变换(CZT)频谱细化算法提高滚动体通过频率的计算精度,进而提高轴承保持架转速测量准确性。28 000 r/min下的高速滚动轴承保持架转速超声测量试验结果表明,该方法能够有效克服实际工况下的噪声影响,实现高速实际工况下轴承保持架转速波动的准确测量,测量误差在0.1%以内。

关键词: 超声测量;滚动轴承;保持架;频谱细化

中图分类号: TH133.33;TB551 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202007017 **文章编号:** 0253-987X(2020)07-0139-07



OSID 码

On-Line Rotational Speed Measurement of Rolling Bearing Cage Based on Ultrasonic Measurement with Spectrum Refinement

CHEN Shuheng^{1,2}, LI Meng^{1,2,3,4}, LIU Heng^{1,2}, MEI Kailu^{1,2}, HE Fengxiang⁵

(1. Lubrication Theory and Bearing Research Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 4. State Key Laboratory of Aviation Precision Bearing, LYC Bearing Corporation, Luoyang, Henan 471039, China; 5. Mechanical System Research Department, AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou, Hunan 412002, China)

Abstract: Aiming at the problems of noise suppression and high-speed measurement accuracy in the on-line measurement of the rotational speed of rolling bearing cage under actual working conditions, a method for measuring the rotational speed of rolling bearing cage based on the ultrasonic measurement with spectrum refinement is proposed. The influence of time-domain noise on the ultrasonic echo pulse signal is suppressed by introducing autocorrelation analysis and FFT transform. The CZT spectrum refining algorithm is used to improve the calculation accuracy of the passing frequency of the roller, so as to improve the calculation accuracy of the bearing cage's rotational speed. Experimental results of high-speed rolling bearing at 28 000 r/min show that this method can effectively overcome the influence of noise under actual working conditions, and achieve accurate measurement of high rotational speed under speed fluctuation with a measurement error less than 0.1%.

Keywords: ultrasonic measurement; rolling bearing; bearing cage; spectrum refinement

随着现代装备向高速、重载等方向的发展,对轴承性能提出了更高要求^[1]。滚动轴承作为旋转机械设备中最常见也是最易发生故障的零部件之一,其自身的性能和质量控制、运行状态监测等是决定旋转机械安全运行的重要因素^[2]。高速滚动轴承运行过程中发生的打滑现象会引起轴承内外圈滚道和滚动体表面的磨损和早期失效,这会对滚动轴承的正常工作产生极大的影响,从而严重威胁机械设备的运行安全^[3-4]。轴承保持架的转速可以作为判断轴承是否打滑及其打滑程度的实测指标^[5-6],准确实时地测量保持架转速对于判断实际工况下滚动轴承的打滑状态具有重要的意义。

针对轴承保持架转速的检测,传统方法有电磁感应法^[7]、电涡流法^[8]、光电法^[9]等,但是这些方法都存在一定的缺陷,无法应用于高速下滚动轴承保持架的测量。例如电磁感应法对滚动体进行了磁化,磁场会使高速运行的滚动轴承剧烈磨损,而且高速运行的滚动轴承一般都处于高温环境中,高温会减弱磁场的强度,导致信号减弱,造成测量结果不准确,甚至无法测量。在实际高速工况下,现场环境比较复杂,由于润滑油油雾对光传播的影响可能造成光学测量结果偏差较大甚至测量结果失效。采用超声对轴承保持架转速进行检测计算,无需对轴承做任何处理,且对油雾等环境因素不敏感^[10],具备在实际工况中测量轴承保持架转速的可行性,而且超声也已被广泛应用于故障诊断^[11]、润滑状态监测^[12]、接触刚度^[13]、轴承润滑油膜厚度测量^[14]等领域。刘智祥等提出基于超声波的轴承保持架转速的测量方法,并对该方法测量的准确性进行了实验验证^[15]。采集超声反射回波数据后将数据提取出来,再通过找到信号凹坑(滚子经过时的信号特征)的最低点,计算相邻凹坑的时间差,进而得到轴承的保持架转速。采用这种基于时间差的算法,当信号噪声较大时,无法判断滚子经过超声探头正下方时信号中凹坑最低点的具体位置,所以该方法无法在轴承实际工作的复杂工况条件下对轴承保持架转速进行在线检测。为了解决滚动轴承保持架转速在线检测及其测量准确性的问题,本文基于超声反射理论在滚动轴承上的应用^[16-17],提出一种超声法测量滚动轴承保持架转速的新方法,并且通过实验验证了使用该方法进行在线检测滚动轴承保持架转速的可行性及测量的准确性。

1 理论基础

1.1 超声法测量滚动轴承保持架转速原理

图1给出了采用超声法测量滚动轴承保持架转速的实验原理图。超声探头以一定的脉冲重复频率发射超声波脉冲;选用和钢的声阻抗接近的耦合剂,这样超声波从探头通过耦合剂入射进轴承外圈的总反射率比较小。

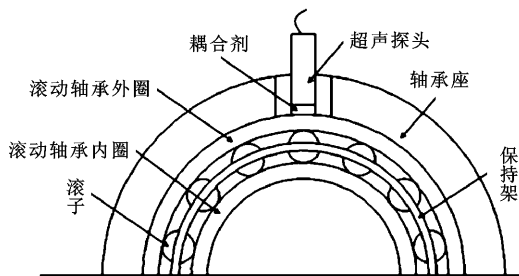


图1 超声法测量滚动轴承保持架转速的实验原理图

在实际工况中,滚动轴承的滚子和滚道之间存在润滑油或润滑脂,由于滚动轴承的润滑油膜很薄,远小于入射超声波波长,借鉴弹簧模型测量油膜厚度的方法^[18],此时超声波在这3种介质中传播的反射系数为

$$R = \left(1 + \left(\frac{K}{\pi f z} \right)^2 \right)^{-1/2} \quad (1)$$

式中: K 为油膜层等效弹簧刚度; f 为超声波发射频率; z 为两侧钢的声阻抗。

图2给出了超声波在轴承外圈的传播模型, T_1 和 B_1 是超声探头发射的两个超声波信号。滚动轴承实际运转过程中,滚子会以一定的频率经过超声探头下方,当滚子经过超声探头正下方的位置时,超声反射波 T_2 即为钢油钢接触界面的反射波;当滚子没有到达该位置时,反射波 B_2 为钢油空气界面的反射波。由式(1)以及钢、油、空气的声阻抗计算可知,超声波在钢油空气界面的反射率(接近1)大于在钢油钢界面的反射率(0.5~0.9)。所以,当无滚子滚过超声探头正下方时,反射回波 B_2 的幅值

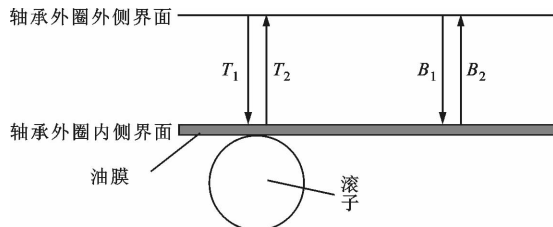


图2 超声波在轴承外圈的传播模型

大于有滚子滚过时反射回波 T_2 的幅值,则在滚子经过探头正下方超声波聚焦区域的过程中,所得到的超声反射波的信号幅值先下降后升高,呈缺口状、凹坑状。

本文采用声波发射收发一体化、中心频率为 10 MHz 的超声探头 OLYMPUS XMS-310-B,超声脉冲重复频率为 5 kHz,实验轴承为圆柱滚子轴承 N2204,载荷为 5 kN,内圈转速为 190 r/min,外圈固定,采集 1 000 段超声脉冲的反射回波信号数据,图 3 给出了含有凹坑特征的原始信号。

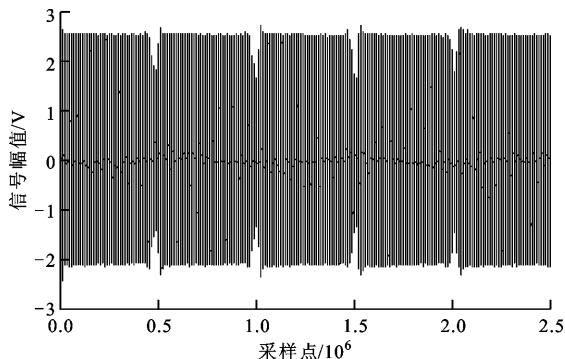


图 3 含有凹坑特征的原始信号

采用超声法测量滚动轴承保持架转速可以看做是使用一定超声脉冲重复频率的超声波去采集、记录滚子经过超声探头正下方的信号现象,则超声脉冲重复频率越高,可测转速上限越高^[19]。

当采用基于时间差法来计算滚动轴承保持架转速时,需要对采集得到的每段超声反射回波信号数据分别进行峰峰值计算,从得到的峰峰值信号序列中找到相邻凹坑各自最低点的位置,即相邻的两个滚子经过超声探头正下方的时间差,进而计算得到滚动轴承保持架转速。为了避免两个连续发射的超声脉冲之间发生重叠,一般选择在探头接收到第 1 个超声脉冲反射回波信号时再发射第 2 个超声脉冲,这样第 1 个超声脉冲在轴承外圈传播的总时间应当小于两个连续脉冲间隔(脉冲重复频率的倒数),即

$$T = 2 \frac{H_0}{V_0} < \frac{1}{f_{\text{PRR}}} \quad (2)$$

式中: H_0 为顶端轴承外圈厚度; V_0 为轴承外圈中的声速; f_{PRR} 为超声脉冲重复频率。可见,超声脉冲重复频率的上限受限于轴承外圈厚度。

由上面的分析可得,每一次凹坑出现,均有一个滚子经过超声探头正下方。当轴承保持架转速较高时,单位时间内凹坑数增多。由于超声脉冲重复频率的限制,当轴承保持架转速较高时,采集单个凹坑

的超声脉冲点数会减少,使得整个采集过程存在漏采,可能会丢失滚子经过超声探头正下方时的信号。图 4 给出了单个凹坑信号特征的峰峰值,这样所找到凹坑最低点便不是滚子经过超声探头正下方的时刻,此时采用基于时间差法来计算轴承保持架转速就会产生偏差。

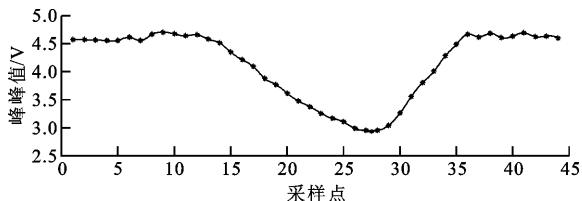


图 4 单个凹坑信号特征的峰峰值

另外,当超声反射回波的信号噪声过大时,造成采集所得的凹坑信号被覆盖,被噪声污染的信号如图 5 所示,此时无法使用时间差法来计算轴承保持架转速。

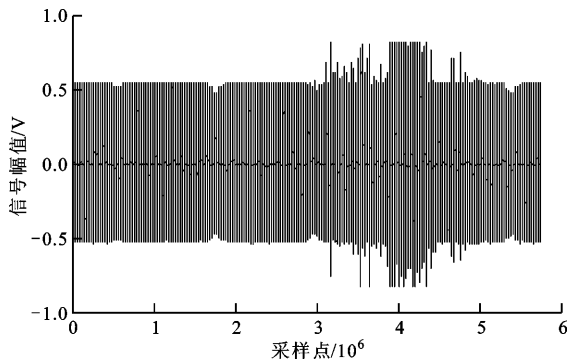


图 5 被噪声污染的信号

1.2 轴承保持架转速计算原理

从图 3 可以看出,凹坑现象以一定频率有规律地出现,则可根据凹坑这种信号特征出现的频率来计算轴承保持架的转速,即采集 n 段超声脉冲的反射回波,并求取其各段的峰峰值,再对所得到的峰峰值序列 $x(n)$ 进行傅里叶变换得到其频谱,频谱的基频位置即为 Δt 时间内轴承滚子经过超声探头正下方的个数 k ,则可通过下式得出 Δt 时间内轴承的保持架转速

$$v = 60 \frac{k}{\Delta t N} = 60 \frac{f_{\text{PRR}} k}{n N} \quad (3)$$

式中

$$\Delta t = \frac{n}{f_{\text{PRR}}} \quad (4)$$

N 为所测轴承的滚子数。

当滚子经过超声探头正下方的频率不在快速傅里叶变换量化频率点处时,直接用快速傅里叶变换

所得的基频位置来估计其频率将存在量化误差。根据式(3)可得,此时由于量化误差造成轴承保持架转速计算结果的偏差为

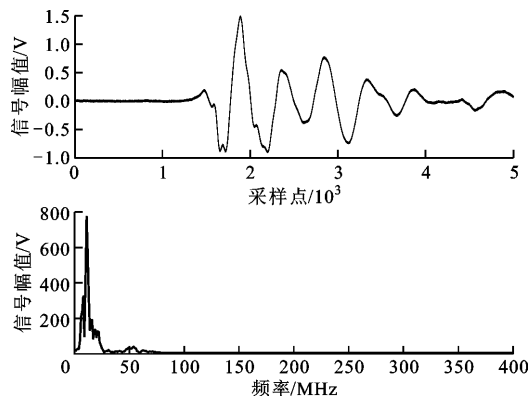
$$\Delta v = 60 \frac{f_{\text{PRR}}}{nN} \quad (5)$$

在圆柱滚子轴承 N2204(滚子数 N 为 18)、载荷为 5 kN、内圈转速为 190 r/min、超声脉冲发射频率 f_{PRR} 为 5 kHz 时采集 1 000 段超声脉冲的回波信号数据,则由式(5)可得 $\Delta v = 16.67$ r/min,而此时其轴承保持架理论转速 $v_t = 81.34$ r/min,可见偏差 Δv 已经严重影响保持架转速的计算。此时,可以通过使用线性调频 Z 变换(CZT)频谱细化算法对其基频位置进行修正,提高其频率的计算精度^[20]。

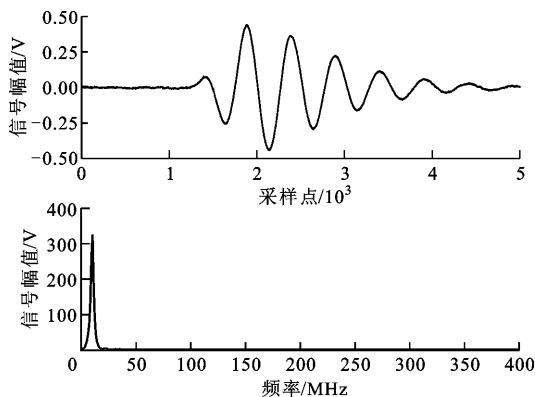
2 采用频谱细化的轴承保持架转速计算流程

2.1 超声反射回波信号分析

图 6 为含噪声和不含噪声的超声反射回波信号的时域波形及其相应的频谱图,可以看出,不含噪声的超声反射回波信号其频率集中在超声探头的中心频率附近,含噪声的超声反射回波信号其频率分布



(a) 含噪声



(b) 不含噪声

图 6 超声反射回波信号的时域波形及其频谱图

分散。如果采用峰峰值对超声反射回波信号进行处理,则当信号噪声过大时,就会得到错误的峰峰值数据,出现图 5 所示的现象,滚子经过时的凹坑信号已经被噪声覆盖。信号频谱中超声探头中心频率对应的幅值大小能够反映原信号峰峰值的大小,二者具有一致性。由于采用超声法测量轴承保持架转速时所关注的是超声信号的幅值变化,则可选用超声反射回波经过快速傅里叶变换(FFT)后其频域的主频,即超声探头中心频率幅值来代替时域信号的峰峰值,这样就可以减小噪声对信号的干扰。

2.2 轴承保持架转速计算流程

图 7 给出了轴承保持架转速的计算流程。首先采集 n 段超声脉冲的反射回波,对单段回波数据进行 FFT 变换,并提取其主频幅值,得到含有凹坑特征的信号序列 X ;之后对该序列 X 进行自相关分析,根据自相关分析的结果进行 FFT 变换,找出其基频位置 f_m ,即可进行 CZT 频谱细化,得到精确的基频位置 f_m ,则通过式(4)得出轴承保持架转速 v 。

使用 CZT 频谱细化算法计算轴承保持架转速时,所需要确定的参数为细化频带的上下限 f_1 、 f_2 以及细化点数 M ,具体确定方式为 $f_1 = 0.9f_m$, $f_2 = 1.1f_m$, M 等于采样段数 n , f_m 是经过 FFT 变换后得到的基频位置。

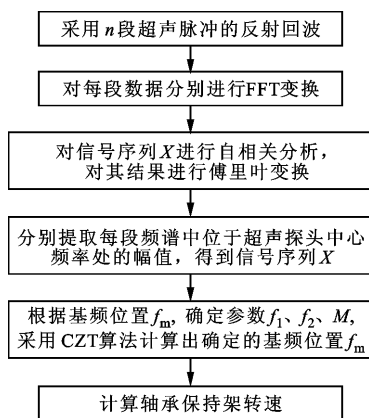


图 7 轴承保持架转速的计算流程

3 超声测量实验

3.1 检测装置

为了验证采用频谱细化的轴承保持架转速计算方法的可行性和准确性,搭建滚动轴承超声检测仪,其系统框图如图 8 所示,主要由超声探头(OLYMPUS XMS-310-B)、超声发射接收模块(UPR 超声驱动板卡)、数据采集模块(PICO 5244B 数据采集卡)、数据处理及显示模块(HQisQnse 工控机)组成。

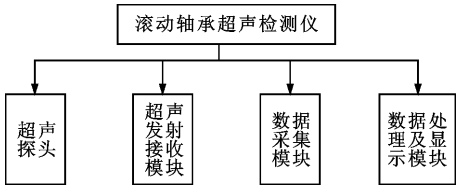


图 8 滚动轴承超声检测仪的系统框图

3.2 实验方法

具体实验方法为采用滚动轴承超声检测仪测量不同工况(主轴转速,即轴承内圈转速)下轴承保持架转速 v ,并将其对应的超声反射回波的原始信号保存下来,采用时间差法对该原始信号数据分析得出轴承保持架转速 v_s ,并计算 v 与 v_s 之间的差值。

3.3 数据处理

在圆柱滚子轴承 N2204、滚子数 N 为 18、载荷为 5 kN、内圈转速为 200 r/min、超声脉冲发射频率 f_{PRR} 为 7 500 Hz 时,采集 2 000 段(每段含有 5 002 个采样点)超声脉冲反射的回波信号数据,如图 9 所示。从图 9 可以看出,噪声对超声反射回波信号的影响较大,大部分凹坑特征已经被噪声淹没。

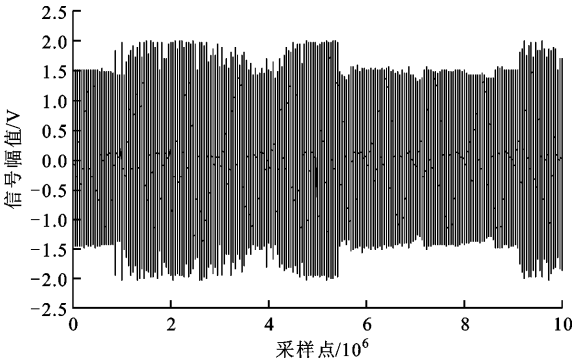


图 9 采集 2 000 段超声脉冲反射的回波信号

针对图 9 所示的信号数据,对每段信号进行 FFT 变换并提取其主频幅值,图 10 给出了含有凹坑信号特征的信号序列 X 的波形。从图 10 中可以分辨出部分凹坑特征,信号中的噪声得到了部分抑制。

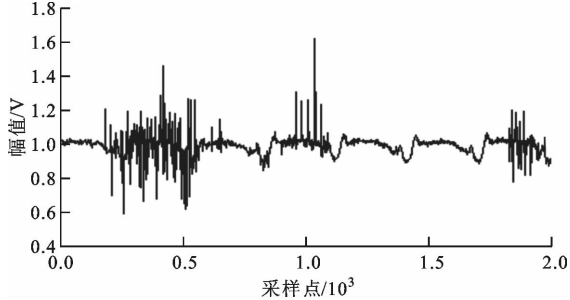


图 10 含有凹坑特征的信号序列 X 的波形

图 11 给出了对该序列 X 进行自相关分析的结果,可以看出,噪声对信号的影响得到了进一步的抑制。由于本身自相关是偶函数,所以经过自相关分析后得到的结果是一个中心对称的偶函数序列,其数据点为原信号序列 X 的 2 倍,所以在最终计算轴承保持架转速时需要对其基频位置 f_m 除以 2。

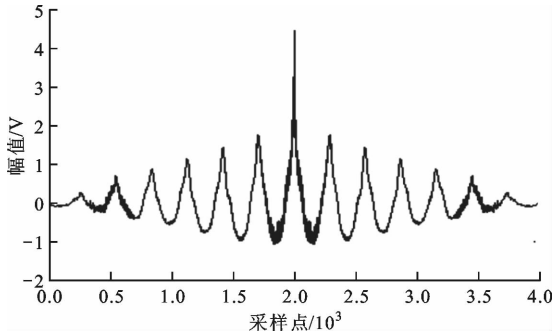


图 11 信号序列 X 的自相关分析的结果

图 12 给出了对自相关分析的结果进行 FFT 变换后得到的频谱图,根据该频谱数据,找出其基频位置 f_m ,计算所需细化频带上下限 f_1 、 f_2 及细化点数 M ,之后即可进行 CZT 频谱细化。图 13 给出了经过 CZT 变换后的细化频谱数据,得到精确的基频位置 f_m 为 13.696 5 Hz,则 k 为 6.848 25,通过式(3)

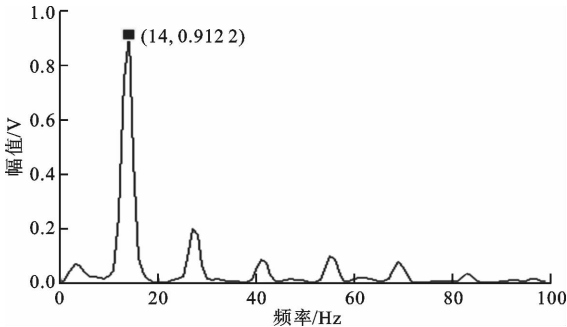


图 12 信号序列 X 自相关分析结果进行 FFT 变换后得到的频谱图

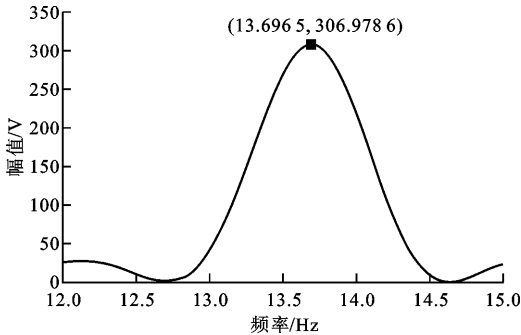


图 13 CZT 变换后的细化频谱

得出,测得的轴承保持架转速 v 为 85.603 1 r/min, 轴承保持架的理论转速 v_t 为 85.62 r/min。

4 实验结果分析

4.1 轴承保持架转速测量精度分析

采用上述测试方案,在高速圆柱滚子轴承实验台上进行轴承保持架转速的高速测量实验,实验轴承为圆柱滚子轴承,外圈固定,轴承内径为 85.004 mm,外径为 117.48 mm,滚子数为 16,滚子直径为 8 mm,主轴转速 v_m (即内圈转速)分别设定为3 000、10 000、14 000、18 000、22 000 和 28 000 r/min,记录各个转速下的保持架转速 v 实测值。

计算各个主轴转速下轴承保持架的理论转速 v_t 、基于时间差法求得的轴承保持架转速 v_s ,对比结果见表 1、表 2,其中 Δ_c 、 Δ_h 分别为实测 v 与 v_s 、 v_t 的偏差。

表 1 轴承保持架转速 v 实测值与基于时间差法求得的保持架转速 v_s 的结果对比			
$v_m/(r \cdot \min^{-1})$	$v/(r \cdot \min^{-1})$	$v_s/(r \cdot \min^{-1})$	$\Delta_c/\%$
3 000	1 396.05	1 396.58	0.04
10 000	4 620.15	4 620.67	0.01
14 000	6 441.75	6 437.77	-0.06
18 000	8 273.25	8 272.06	-0.01
22 000	10 100.20	10 102.37	0.02
28 000	12 919.10	12 931.03	0.09

表 2 保持架转速 v 实测值与保持架理论转速 v_t 的结果对比			
$v_m/(r \cdot \min^{-1})$	$v/(r \cdot \min^{-1})$	$v_t/(r \cdot \min^{-1})$	$\Delta_h/\%$
3 000	1 396.05	1 425.03	2.03
10 000	4 620.15	4 750.11	2.74
14 000	6 441.75	6 650.15	3.13
18 000	8 273.25	8 550.20	3.24
22 000	10 100.20	10 450.24	3.35
28 000	12 919.10	13 300.31	2.87

从表 1 的结果可以看出,采用频谱细化的滚动轴承保持架转速计算方法测得的转速 v 与基于时间差法轴承保持架转速计算方法得到的轴承保持架转速 v_s 之间的偏差在 0.1% 以内。

4.2 高速滚动轴承保持架转速的在线测量

采用滚动轴承超声检测仪在高速圆柱滚子轴承试验台对滚动轴承保持架转速进行在线测量并对其轴承保持架转速进行记录。当主轴转速为 22 000

r/min 时,轴承保持架转速波动结果如图 14 所示,对比了采用 CZT 频谱细化算法计算得到的轴承保持架转速、直接使用 FFT 频谱基频计算得到的轴承保持架转速和理论计算得到的轴承保持架转速。从图 14 可以看出:在该工况下,使用 CZT 频谱细化算法计算得到的轴承保持架转速存在上下波动,其波动范围为 10 068.8~10 107 r/min,若未采用 CZT 频谱细化算法计算,则难以测出轴承保持架转速的动态波动,与实际工况不符。可见,采用 CZT 频谱细化算法来提高滚动轴承保持架转速的计算精度,能够测出轴承保持架转速的动态波动,更加有利于对滚动轴承打滑的检测分析。

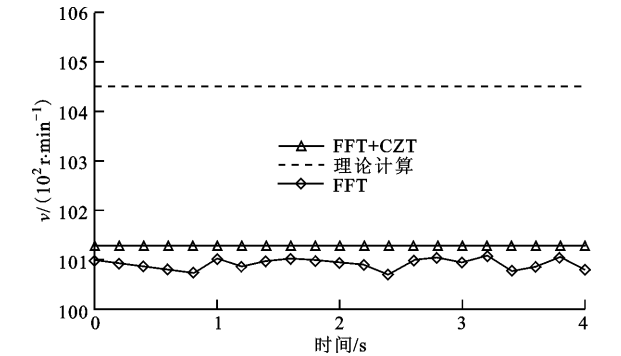


图 14 在线测量的轴承保持架转速波动结果

5 结 论

本文提出一种采用频谱细化的超声法在线测量滚动轴承保持架转速的方法,基于该方法设计了一套滚动轴承超声检测仪,实现了 28 000 r/min 的高速滚动轴承保持架转速的在线检测。实验结果表明,该方法能够有效克服实际工况下的噪声影响,实现高速实际工况下轴承保持架转速波动的准确测量,测量误差在 0.1% 以内,为研究和保障高速滚动轴承运行状态提供了准确测量手段。

参考文献:

[1] 王云龙,王文中. 高速滚动轴承动力学及润滑热失效研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(8): 200.
WANG Yunlong, WANG Wenzhong. Study on dynamics and lubrication thermal failure of high speed rolling bearing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 200.
[2] 贾艳秋,张兵,陈雪梅. 滚动轴承的故障机理及诊断[J]. 化工装备技术, 2011(4): 59-61.
JIA Yanqiu, ZHANG Bing, CHEN Xuemei. Malfunction mechanism and diagnosis of rolling bearing [J]. Chemical Equipment Technology, 2011(4): 59-61.

- [3] 焦育洁. 航空发动机主轴轴承可靠性技术研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004: 5-7.
- [4] 焦育洁, 周志澜. 航空发动机主轴轴承失效分析 [J]. 轴承, 1998(6): 6-11.
JIAO Yujie, ZHOU Zhilan. Failure analysis for main shaft bearings of aircraft engine [J]. Bearing, 1998(6): 6-11.
- [5] 丁洪福, 景敏卿, 王风涛, 等. 加速工况下高速圆柱滚子轴承打滑分析 [J]. 机械设计与制造, 2016(2): 64-67.
DING Hongfu, JING Mingqing, WANG Fengtao, et al. Skidding analysis of high speed cylindrical roller bearing considering acceleration of bearing [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2016(2): 64-67.
- [6] 殷锋. 航空发动机高速轴承打滑检测的一种新方法探讨 [J]. 测控技术, 1994(6): 22-24.
YIN Feng. The discussion of a new method for detecting the sliding of aircraft engine high-speed bearing [J]. Measurement and Control Technology, 1994(6): 22-24.
- [7] HARRIS T. An analytical method to predict skidding in high speed roller bearings [J]. ASLE Transactions, 1966, 9(3): 229-241.
- [8] 生寿华. DZ-8208 轴承打滑仪的原理及使用 [J]. 轴承, 1985(3): 29-32.
SHENG Shouhua. Principle and application of DZ-8208 bearing slipmeter [J]. Bearing, 1985(3): 29-32.
- [9] 孙岩, 乔鸿春. 光纤传感器在轴承保持架转速测量中的应用 [J]. 轴承, 1993(1): 30-32.
SUN Yan, QIAO Hongchun. Application of optical fiber sensor in the measurement of rotation speed of bearing cage [J]. Bearing, 1993(1): 30-32.
- [10] 韦兴平, 车畅, 宋春华. 超声波传感器应用综述 [J]. 工业控制计算机, 2014, 27(11): 135-136.
WEI Xingping, CHE Chang, SONG Chunhua. Application overviews of ultrasonic sensor [J]. Industrial Control Computer, 2014, 27(11): 135-136.
- [11] ACHMAD W, BO-SUK Y, ERIC Y K, et al. Fault diagnosis of low speed bearing based on acoustic emission signal and multi-class relevance vector machine [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 24(4): 313-328.
- [12] 苏连成, 李成成, 李兴林, 等. 基于超声信号的轴承润滑状态监测研究 [J]. 燕山大学学报, 2013(5): 442-447.
SU Liancheng, LI Chengcheng, LI Xinglin, et al. Study on bearing lubrication condition monitoring based on ultrasonic signals [J]. Journal of Yanshan University, 2013(5): 442-447.
- [13] DWYER-JOYCE R S, GONZALES-VALADEZ M. Ultrasonic determination of normal and shear interface stiffness and the effect of Poisson's ratio [J]. Tribology, 2003, 43: 143-149.
- [14] 蔡小龙. 基于超声的防水材料厚度无损测量方法研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016: 52-53.
- [15] LIU Zhixiang, XU Cong, LI Meng, et al. Study on the rotational speed of bearing cage based on ultrasonic measurement [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part K Journal of Multi-body Dynamics, 2017, 231(4): 684-689.
- [16] 许聪, 李猛, 景敏卿, 等. 超声法测量圆柱滚子轴承润滑油膜厚度 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(10): 61-66.
XU Cong, LI Meng, JING Mingqing, et al. Measurement of lubricant film thickness of cylindrical roller bearing using ultrasound [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(10): 61-66.
- [17] LI Meng, LIU Heng, XU Cong, et al. Ultrasonic measurement of cylindrical roller bearing lubrication using high pulse repetition rates [J]. ASME Journal of Tribology, 2015, 137(4): 042202.
- [18] 李猛. 圆柱滚子轴承亚微米级弹流膜厚度分布的超声测量技术研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2016: 20-22.
- [19] WAN IBRAHIM M K, GASNI D R S, DWYER-JOYCE R S. Profiling a ball bearing oil film with ultrasonic reflection [J]. Tribology Transactions, 2012, 55(4): 409-421.
- [20] 赵宏强. 频谱细化算法分析 [J]. 四川兵工学报, 2013, 34(5): 105-109.
ZHAO Hongqiang. Analysis of spectrum zoom algorithms [J]. Journal of Sichuan Industry and Technology, 2013, 34(5): 105-109.

(编辑 武红江)