



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109682601 B

(45) 授权公告日 2020.11.17

(21) 申请号 201910160331.4

(22) 申请日 2019.03.04

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 109682601 A

(43) 申请公布日 2019.04.26

(73) 专利权人 北京天泽智云科技有限公司
地址 100191 北京市海淀区知春路17-7号
致真大厦C座4层北区

(72) 发明人 朱瑜

(74) 专利代理机构 北京煦润律师事务所 11522
代理人 惠磊

(51) Int. Cl.
G01M 13/045 (2019.01)
G06K 9/00 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 104568444 A, 2015.04.29

CN 107941510 A, 2018.04.20

CN 109063672 A, 2018.12.21

CN 107917806 A, 2018.04.17

任学平.“基于角域级联最大相关峭度反褶积的滚动轴承早期故障诊断”.《仪器仪表学报》.2015,第36卷(第9期),第2104-2111页.

唐贵基.“自适应最大相关峭度解卷积方法及其在轴承早期故障诊断中的应用”.《中国机械工程学报》.2015,第35卷(第6期),第1436-1444页.

审查员 鲍桂清

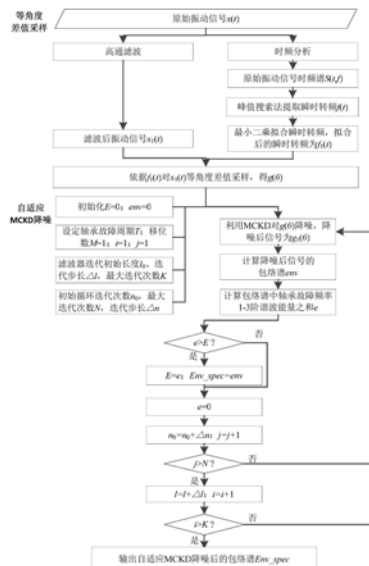
权利要求书1页 说明书6页 附图5页

(54) 发明名称

一种变转速工况下滚动轴承的早期故障识别方法

(57) 摘要

本发明涉及一种变转速工况下滚动轴承的早期故障识别方法。首先将滚动轴承的振动信号进行时频分析,获取时频谱。其次,采用峰值搜索法提取时频谱中的瞬时转频,并对其进行数据拟合。接着对原始振动信号进行高通滤波,并依据数据拟合后的瞬时转频对原始振动信号进行等角度采样,获取角域信号。最后利用自适应MCKD方法对原始振动信号进行降噪处理并对降噪后信号进行包络谱分析识别滚动轴承故障。本方法不依赖于转速传感器,并且自适应地搜索MCKD最优参数,不再依赖于人的经验,方便可靠,特别适用于信噪比低的变转速工况滚动轴承的振动信号分析。



CN 109682601 B

1. 一种变转速工况下滚动轴承的早期故障识别方法,其特征在于,包括以下步骤:

(1) 对原始振动信号 $x(t)$ 进行时频分析,获取变转速工况下振动信号的时频谱 $S(t, f)$;

(2) 提取时频谱 $S(t, f)$ 中的瞬时转频 $f(t)$;

(3) 对整个时间段的瞬时转频进行数据拟合得到拟合后瞬时转频 $f_1(t)$;

(4) 对原始振动信号 $x(t)$ 进行滤波,去除振动信号中的低频成分,滤波后振动信号为 $x_1(t)$;

(5) 依据拟合后瞬时转频 $f_1(t)$ 对滤波后振动信号 $x_1(t)$ 进行等角度差值采样,获取等角度差值采样后振动信号 $g(\theta)$;

(6) 以降噪后包络谱中滚动轴承故障频率前 P 阶谐波对应的幅值之和 E 为目标,采用自适应MCKD法对 $g(\theta)$ 进行迭代降噪处理,获得MCKD的最优输入参数;

(7) 迭代计算后,输出自适应MCKD降噪后振动信号的包络谱 Env_spec ,识别轴承的故障特征;

其中,所述自适应MCKD法包括以下步骤:

(a) 初始化包络谱中轴承故障频率前 P 阶谐波幅值之和 $E=0$,初始化包络谱 $Env_spec=0$;

(b) 依据滚动轴承故障特征参数设定滚动轴承故障周期 T , $T=ord/bf$;其中, ord 为采样阶次, bf 对应转频1Hz条件下滚动轴承元件的故障特征频率;

(c) 设定滤波器迭代初始长度 l_0 、迭代步长 Δl ,最大迭代次数 K ;设定初始移位数 $M=1$;

(d) 在某一滤波器长度 l 下设定初始循环迭代次数 n_0 ,最大迭代次数 N ,迭代步长 Δn ,其中:

$$l=l_0+\Delta l\times i \quad i=0,1,2,\dots,K-1$$

(e) 将 l 、 n 、 M 、 T 作为最大相关峭度解卷积输入参数对等角度差值采样后振动信号 $g(\theta)$ 进行降噪处理,得降噪后振动信号 $g_1(\theta)$,其中:

$$n=n_0+\Delta n\times j \quad j=0,1,2,\dots,N-1$$

(f) 计算降噪后振动信号 $g_1(\theta)$ 的包络谱 env ,并计算包络谱 env 中轴承元件故障频率前 P 阶谐波对应的幅值之和 e ;

(g) 若 $E<e$,更新 E 和 Env_spec 值,使 $E=e$, $Env_spec=env$,并记录此时对应的 l 和 n ;

(h) 重新步骤(d)-(g),直至迭代完成,最终获得自适应降噪后振动信号的包络谱 Env_spec 。

2. 根据权利要求1所述的早期故障识别方法,其特征在于,提取瞬时转频的方法为峰值搜索法。

3. 根据权利要求1或2所述的早期故障识别方法,其特征在于,数据拟合的方法为最小二乘法。

4. 根据权利要求1或2所述的早期故障识别方法,其特征在于, P 的值为2或3或4或5。

一种变转速工况下滚动轴承的早期故障识别方法

技术领域

[0001] 本申请涉及一种变转速工况下滚动轴承的早期故障识别方法,适用于机械监测和故障诊断的技术领域。

背景技术

[0002] 变转速工况是工业生产中旋转类设备的常见工况,如各类旋转设备的启停机工况、风电机组的变转速运行等均为变转速工况。滚动轴承作为旋转类机械设备中的核心部件,其健康状态直接影响着机械设备整体的健康状况。实际中,由滚动轴承故障引起的设备停机现象时有发生,不仅影响正常生产,而且某些严重的滚动轴承故障甚至会引发生产安全事故。由此可见,对滚动轴承故障早期故障进行识别,及早采取处理措施,对确保设备安全稳定运行至关重要。实际中,通常对滚动轴承进行振动监测,并对振动信号进行分析来识别滚动轴承故障。变转速工况下滚动轴承故障诊断主要面临两个难题:(1)滚动轴承振动信号的降噪;(2)变转速工况下非平稳振动信号的分析。

[0003] 目前,对滚动轴承故障信号的降噪方法主要包括:带通滤波、小波分析、经验模态分解、最大相关峭度解卷积(MCKD)方法。带通滤波方法是对轴承共振频带进行带通滤波,对滤波后的信号进行频谱分析实现轴承故障识别。带通滤波的方法主要缺点是滤波截止频率较难确定。而目前常用的谱峭度确定带通截止频率的方法也存在缺陷,振动信号中非周期性异常脉冲通常会严重影响谱峭度分析结果。小波分析通过将振动信号进行分解到不同的频带,选择某频带下故障特征明显的振动信号作为有效信号进行进一步频谱分析。小波分析主要缺点是小波基较难选择,分解层数也较难确定。经验模态分解是一种自适应的信号分解方法,可将信号分解为具有单一模态的分量。经验模态分解的主要缺点是存在模态混叠和端点效应,并且该方法没有经过严格的数学证明。MCKD方法在剔除滚动轴承信号中噪声方面具有明显的优势,可提取振动信号中周期性的冲击成分,对非周期性的冲击成分不敏感。MCKD的主要缺点是其参数往往通过人为指定,对经验依赖较大。并且,由于变转速工况下,轴承故障引发的冲击具有非周期性,MCKD已不再适于该类信号的处理。此外,变转速工况下,滚动轴承振动信号为典型的非平稳信号,传统的频谱分析方法,如FFT频谱、包络谱、倒谱等已不再适用于滚动轴承故障诊断。目前,针对变转速工况下滚动轴承故障诊断主要采用阶次跟踪的方法,依据瞬时转频对振动信号进行等角度采样,进而将时域非平稳振动信号转化为角域平稳信号。变转速工况下瞬时转速的获取通依赖于转速传感器,在不具备转速传感器的场景下其应用受到限制。由此可见,上述变转速工况下滚动轴承的早期故障识别方法均存在一定的不足,不能很好满足变转速工况下滚动轴承故障早期识别。

发明内容

[0004] 本发明的目的是设计一种变转速工况下滚动轴承的早期故障识别方法。首先,该方法在不依靠转速传感器的情况下,通过计算变转速工况下时域振动信号的时频谱实现振动信号的等角度重采样,将时域非平稳振动信号转化为角域平稳信号,解决了MCKD不能处

理变转速工况下非平稳振动信号的难题;接着将本发明所设计的自适应MCKD方法用于等角度采样后滚动轴承早期故障振动信号中随机噪声剔除,避免了传统MCKD方法参数难以选择的问题,可有效突出变转速工况下滚动轴承早期故障特征,有利于变转速滚动轴承早期故障的识别。

[0005] 根据本申请的变转速工况下滚动轴承的早期故障识别方法,包括以下步骤:

[0006] (1) 对原始振动信号 $x(t)$ 进行时频分析,获取变转速工况下振动信号的时频谱 $S(t, f)$;

[0007] (2) 提取时频谱 $S(t, f)$ 中的瞬时转频 $f(t)$;

[0008] (3) 对整个时间段的瞬时转频进行数据拟合得到拟合后瞬时转频 $f_1(t)$;

[0009] (4) 对原始信号 $x(t)$ 进行滤波,去除振动信号中的低频成分,滤波后信号为 $x_1(t)$;

[0010] (5) 依据瞬时转频 $f_1(t)$ 对滤波后振动信号 $x_1(t)$ 进行等角度差值采样,获取等角度采样后振动信号 $g(\theta)$;

[0011] (6) 以降噪后包络谱中滚动轴承故障频率前 P 阶谐波对应的幅值之和 E 为目标,采用自适应MCKD法对 $g(\theta)$ 进行迭代降噪处理,获得MCKD的最优输入参数;

[0012] (7) 计算降噪后振动信号 $g_1(\theta)$ 的包络谱 env ,并计算包络谱中轴承元件故障频率前 P 阶谐波对应的幅值之和 e ;

[0013] (8) 迭代计算后,输出自适应MCKD降噪后振动信号的包络谱 Env_spec ,识别轴承的故障特征。

[0014] 优选地,所述自适应MCKD法包括以下步骤:

[0015] (1) 初始化包络谱中轴承故障频率前 P 阶谐波幅值之和 $E=0$,初始化包络谱 $Env_spec=0$;

[0016] (2) 依据滚动轴承故障特征参数设定滚动轴承故障周期 $T, T=ord/bf$;其中, ord 为采样阶次, bf 对应转频1Hz条件下滚动轴承元件的故障特征频率;

[0017] (3) 设定滤波器迭代初始长度 l_0 、迭代步长 Δl ,最大迭代次数 K ;设定初始移位数 $M=1$;

[0018] (4) 在某一滤波器长度 l 下设定初始循环迭代次数 n_0 ,最大迭代次数 N ,迭代步长 Δn ,其中:

[0019] $l=l_0+\Delta l\times i \quad i=0,1,2,\dots,K-1$

[0020] (5) 将 l 、 n 、 M 、 T 作为最大相关峭度解卷积输入参数对等角度采样后信号 $g(\theta)$ 进行降噪处理,得降噪后信号 $g_1(\theta)$,其中:

[0021] $n=l_0+\Delta n\times j \quad j=0,1,2,\dots,N-1$

[0022] (6) 计算降噪后振动信号 $g_1(\theta)$ 的包络谱 env ,并计算包络谱中轴承元件故障频率前 P 阶谐波对应的幅值之和 e ;

[0023] (7) 若 $E<e$,更新 E 和 Env_spec 值,使 $E=e, Env_spec=env$,并记录此时对应的 l 和 n ;

[0024] (8) 重新步骤(4)-(7),直至迭代完成,最终获得自适应降噪后的包络谱 Env_spec 。

[0025] 优选地,提取瞬时转频的方法为峰值搜索法,数据拟合的方法为最小二乘法, P 的值可以为2或3或4或5。

[0026] 本申请针对变转速工况下滚动轴承的早期故障识别问题,设计了一种将瞬时转频估计与自适应MCKD相结合的滚动轴承的早期故障识别方法,其有益效果包括:

[0027] (1) 通过计算滚动轴承振动信号的时频谱,并从时频谱中提取变转速工况下滚动轴承振动信号的瞬时转频,依据瞬时转频对变转速工况下非平稳时域振动信号进行等角度重采样,将时域非平稳振动信号转化为角域平稳信号,避免了传统等角度采样方法对转速传感器的依赖,并解决了MCKD方法无法处理变转速工况下时域振动信号的难题。

[0028] (2) 采用自适应MCKD方法实现等角度采样后信号去噪,可自适应地搜索MCKD最优参数,解决了传统MCKD方法参数难以选择的问题,可有效突出变转速工况下滚动轴承早期故障特征。自适应MCKD方法以降噪后包络谱中滚动轴承故障频率前P阶谐波对应的幅值之和为目标,采用MCKD方法对等角度采样后振动信号 $g(\theta)$ 进行迭代降噪处理,最终获得MCKD最优输入参数。

附图说明

[0029] 图1是滚动轴承的典型结构图。

[0030] 图2是本申请的变转速工况下滚动轴承的早期故障识别方法的流程图。

[0031] 图3是升速工况下滚动轴承故障信号的波形图。

[0032] 图4是升速工况下滚动轴承振动信号的FFT频谱图。

[0033] 图5显示了升速工况下轴承振动信号的小波时频谱。

[0034] 图6显示了对图5中提取的瞬时转频进行数据拟合以后的结果。

[0035] 图7显示了自适应MCKD降噪前后的角域波形图。

[0036] 图8显示了自适应MCKD降噪前后的阶次包络谱。

具体实施方式

[0037] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白,下文中将结合附图对本发明的实施例进行详细说明。需要说明的是,在不冲突的情况下,本申请中的实施例及实施例中的特征可以相互任意组合。

[0038] 如图1所示,其中显示了滚动轴承的典型结构,通常包括外圈1、内圈2、滚动体3和保持架4。内圈的作用是与轴相配合并与轴一起旋转;外圈作用是与轴承座相配合,起支撑作用;滚动体借助于保持架分布在内圈和外圈之间;保持架能使滚动体均匀分布,引导滚动体旋转起润滑作用。实践中,也有滚动轴承可以不包括保持架。

[0039] 针对变转速工况下滚动轴承故障早期识别问题,本发明设计了一种将瞬时频率估计与自适应最大相关峭度解卷积(MCKD)相结合的滚动轴承故障早期识别方法。首先将滚动轴承的振动信号进行时频分析,获取时频谱,其中的振动信号可以由设置在轴承座上的振动加速度传感器或者振动速度传感器来采集。其次,采用峰值搜索法提取时频谱中的瞬时转频,并对其进行数据拟合,例如可以采用最小二乘法拟合。接着对原始振动信号进行高通滤波,并依据数据拟合后的瞬时转频对原始振动信号进行等角度采样,获取角域信号。最后利用自适应MCKD方法对原始振动信号进行降噪处理并对降噪后信号进行包络谱分析识别滚动轴承故障。本方法不依赖于转速传感器,并且自适应地搜索MCKD最优参数,不再依赖于人的经验,方便可靠,特别适用于信噪比低的变转速工况滚动轴承振动信号分析。本发明的滚动轴承的早期故障识别方法的具体步骤如下:

[0040] (1) 对原始振动信号 $x(t)$ 进行时频分析,例如可以采用小波分析、短时傅里叶变换

等方法,获取变转速工况下振动信号的时频谱 $S(t, f)$;

[0041] (2) 采用例如峰值搜索法来提取时频谱 $S(t, f)$ 中的瞬时转频 $f(t)$;

[0042] (3) 对整个时间段的瞬时转频进行数据拟合得到拟合后的瞬时转频 $f_1(t)$;

[0043] 例如,针对瞬时转频 $f(t)$ 波动较小的情况,可以采用最小二乘法拟合;针对瞬时转频波动较大的情况,可以采用分段最小二乘拟合方法对瞬时转频进行最小二乘拟合得拟合后瞬时转频 $f_1(t)$;

[0044] (4) 对原始信号 $x(t)$ 进行滤波,去除振动信号中的低频成分,滤波后信号为 $x_1(t)$ 。

[0045] 对于滚动轴承来说,其故障主要出现在振动信号的高频成分中,因此需要将振动信号中的低频成分去除;滤波的方法可以采用高通滤波。

[0046] (5) 依据瞬时转频 $f_1(t)$ 对滤波后振动信号 $x_1(t)$ 进行等角度差值采样,获取等角度采样后振动信号 $g(\theta)$;

[0047] (6) 以降噪后包络谱中滚动轴承故障频率前P阶(优选为1-5阶;更优选为1-3阶,即前3阶)谐波对应的幅值之和E为目标,采用自适应MCKD法对 $g(\theta)$ 进行迭代降噪处理,获得MCKD的最优输入参数;

[0048] (7) 计算降噪后振动信号 $g_1(\theta)$ 的包络谱 env ,并计算包络谱中轴承元件故障频率前P阶谐波对应的幅值之和 e ;

[0049] (8) 迭代计算后,输出自适应MCKD降噪后振动信号的包络谱 Env_spec ,识别轴承的故障特征。

[0050] 本申请采用的自适应MCKD降噪方法的原理如下:

[0051] (1) 初始化包络谱中轴承故障频率前P阶谐波幅值之和 $E=0$,初始化包络谱 $Env_spec=0$;

[0052] (2) 依据滚动轴承故障特征参数设定滚动轴承故障周期 $T, T=ord/bf$;其中, ord 为采样阶次(即每转的采样点数,可以预先设定), bf 对应转频1Hz条件下滚动轴承元件(例如可以是内圈、外圈、滚动体或保持架)的故障特征频率;

[0053] (3) 设定滤波器迭代初始长度 l_0 、迭代步长 Δl ,最大迭代次数 K ;设定初始移位 $M=1$;

[0054] (4) 在某一滤波器长度 l 下设定初始循环迭代次数 n_0 ,最大迭代次数 N ,迭代步长 Δn ,其中:

$$[0055] \quad l = l_0 + \Delta l \times i \quad i = 0, 1, 2, \dots, K-1 \quad (1)$$

[0056] (5) 将 l, n, M, T 作为最大相关峭度解卷积输入参数对等角度采样后信号 $g(\theta)$ 进行降噪处理,得降噪后信号 $g_1(\theta)$ 。其中:

$$[0057] \quad n = l_0 + \Delta n \times j \quad j = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2)$$

[0058] (6) 计算降噪后振动信号 $g_1(\theta)$ 的包络谱 env ,并计算包络谱中轴承元件故障频率前P阶谐波对应的幅值之和 e ;

[0059] (7) 若 $E < e$,更新 E 和 Env_spec 值,使 $E = e, Env_spec = env$,并记录此时对应的 l 和 n ;

[0060] (8) 重新步骤(4)-(7),直至迭代完成,最终获得自适应降噪后的包络谱 Env_spec 。

[0061] 其中,最大相关峭度解卷积法的原理如下:

[0062] 最大相关峭度解卷积本质是以相关峭度为评价指标,通过解卷积运算,突出信号中被噪声湮没的周期性冲击成分。相关峭度定义为:

$$[0063] \quad \max_{\hat{f}} = \max_{\hat{f}} \frac{\sum_{n=1}^N \left(\prod_{n=0}^M y_{n-mT_s} \right)^2}{\left(\sum_{n=1}^N y_n^2 \right)^{M+1}} \quad (3)$$

[0064] 式中： $f = [f_1 \ f_2 \ \cdots \ f_L]^T$ 为长度为L的滤波器系数；M为移位数，一般不超过300； T_s 为冲击周期对应的采样点数。

[0065] 对式(3)的求解过程等价于求解方程：

$$[0066] \quad \frac{d}{df_k} CK_M(T) = 0, \quad k=1,2,\dots,L \quad (4)$$

[0067] 求得结果如下：

$$[0068] \quad f = \frac{\|y\|^2}{2\|\beta\|^2} (X_0 X_0^T)^{-1} \sum_{m=0}^M (X_{mT} \alpha_m) \quad (5)$$

[0069] 式中：

$$[0070] \quad X_r = \begin{bmatrix} X_{1-r} & X_{2-r} & X_{3-r} & \cdots & X_{N-r} \\ 0 & X_{1-r} & X_{2-r} & \cdots & X_{N-1-r} \\ 0 & 0 & X_{1-r} & \cdots & X_{N-2-r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & X_{N-L-r+1} \end{bmatrix}_{L \times N};$$

[0071] $r = [0, T, 2T, 3T, 4T, \dots, mT]$ ；

$$[0072] \quad \alpha_m = \begin{bmatrix} y_{1-mT}^{-1} (y_1^2 y_{1-T}^2 \cdots y_{1-MT}^2) \\ y_{2-mT}^{-1} (y_1^2 y_{2-T}^2 \cdots y_{2-MT}^2) \\ \vdots \\ y_{N-mT}^{-1} (y_N^2 y_{N-T}^2 \cdots y_{N-MT}^2) \end{bmatrix}; \quad \beta = \begin{bmatrix} y_1 y_{1-T} \cdots y_{1-MT} \\ y_2 y_{2-T} \cdots y_{2-MT} \\ \vdots \\ y_N y_{N-T} \cdots y_{N-MT} \end{bmatrix}$$

[0073] 最大相关峭度解卷积求解f的过程为：

[0074] a) 选择滤波器长度L、周期T、移位数M；

[0075] b) 计算原始信号x(t)的 $X_0 X_0^T$ 和 X_{mT} ；

[0076] c) 计算滤波后信号y(θ)；

[0077] d) 由y(θ)计算 α_m 与 β ；

[0078] e) 计算得新滤波器系数f；

[0079] f) 若达到最大迭代次数N，停止迭代。

[0080] 本申请对应的流程图如附图2所示。

[0081] 实施例

[0082] 本实施例将利用一组升速工况下滚动轴承外圈故障仿真信号对本发明设计的方法进行验证。仿真信号时长10s，采样频率 $f_s = 12800\text{Hz}$ 。转频1Hz条件下，轴承外圈故障特征频率为5.4Hz。升速工况下单一故障周期轴承的冲击信号表示为：

$$[0083] \quad b_i(t_j) = (1 + a_j) \times e^{-2\pi \times 250 \times t_i} \times \cos(2\pi \times 4500 \times t_i) \quad (6)$$

$$[0084] \quad a_i = (T_i/10)^2 \quad i=1,2,\dots,n \quad (7)$$

[0085] 式(6)和式(7)中： t_i 为单一故障周期时长； $t_i = a_i$ 为升速工况引起的冲击幅值波动系数， T_i 为第*i*个冲击对应的时刻， n 为10s内所包含故障周期个数。

[0086] 将生成的*n*个单一故障冲击进行组合可得整个时间段内轴承外圈故障冲击信号 $B(t)$ ，在 $B(t)$ 中加入随机噪声 $n(t)$ 和转频成分；最终生成的升速工况下轴承外圈故障仿真信号表达式如下：

$$[0087] \quad x(t) = B(t) + 0.5 \times (1 + (t/20)^2) \sin(2\pi(18 \times t + 0.125 \times t^2)) + n(t) \quad (8)$$

[0088] 升速工况下滚动轴承故障信号波形如图3所示，对应的振动信号FFT频谱如图4所示。

[0089] 图4中原始振动信号的FFT频谱中含有较大的随机噪声，并且滚动轴承外圈早期故障频带幅值较低，湮没在底部噪声中，不利于故障频带的提取和解调分析。对图3所示振动信号进行时频分析，如采用小波分析，对应的小波时频谱如图5所示。

[0090] 对原始振动信号进行高通滤波，滤波下限截止频率 $f_L = 2000\text{Hz}$ 。并依据图5提取的瞬时频率对滤波后的振动信号进行等角度差值采样，获取等角度采样后信号。并利用自适应MCKD方法对等角度采样后信号进行降噪处理。设定自适应MCKD参数：

[0091] (1) 滤波器初始长度 $l_0 = 50$ ，迭代步长 $\Delta l = 30$ ，最大迭代次数 $K = 9$ 。

[0092] (2) 某滤波器长度下，初始循环迭代次数 $n_0 = 10$ ，最大迭代次数 $N = 5$ ，迭代步长： $\Delta n = 5$ 。

[0093] (3) 外圈故障周期： $T = \frac{ord}{5.4}$ ，其中ord为采样阶次。

[0094] 自适应MCKD降噪前后振动信号角域波形如图7所示。自适应MCKD降噪前后振动信号阶次包络谱如图8所示。

[0095] 对比图7和图8可看出，经自适应MCKD降噪后，振动信号时域波形冲击特性更加明显。对应的包络谱中在A、2A、3A、4A、5A轴承外圈故障特征频率处的谱线相对于底部噪声更加突出，非常便于轴承故障特征的识别。

[0096] 虽然本发明所揭露的实施方式如上，但所述的内容只是为了便于理解本发明而采用的实施方式，并非用以限定本发明。任何本发明所属技术领域内的技术人员，在不脱离本发明所揭露的精神和范围的前提下，可以在实施的形式上及细节上作任何的修改与变化，但本发明的专利保护范围，仍须以所附的权利要求书所界定的范围为准。

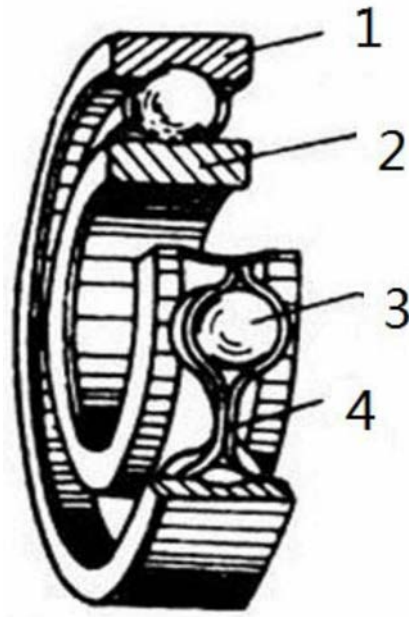


图1

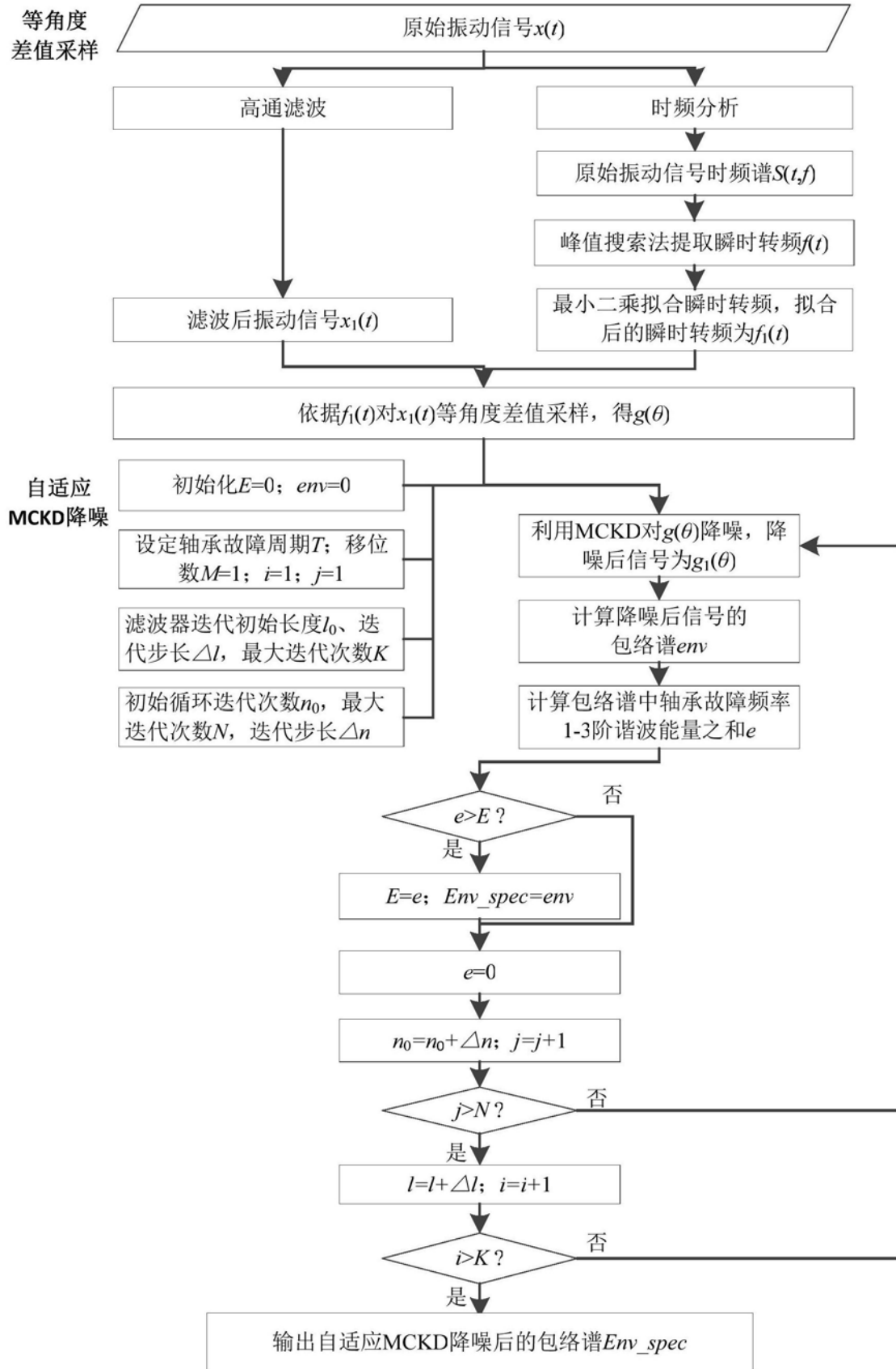


图2

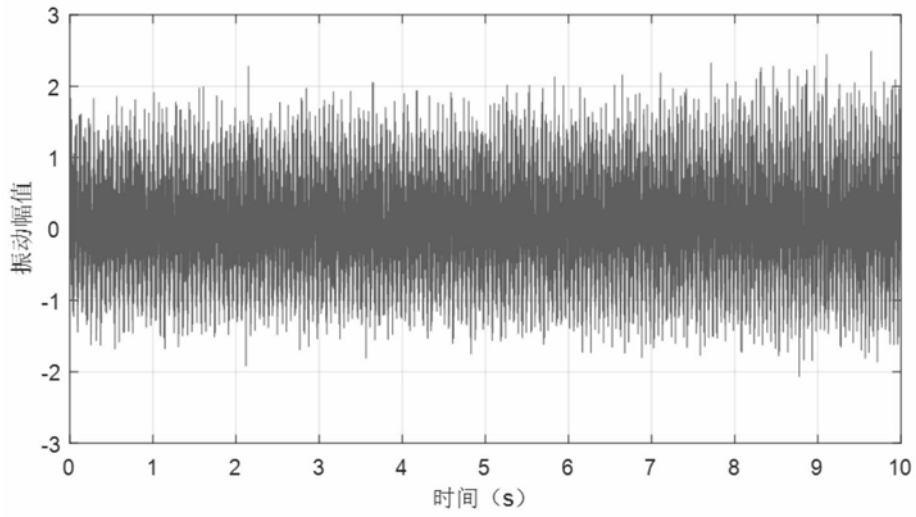


图3

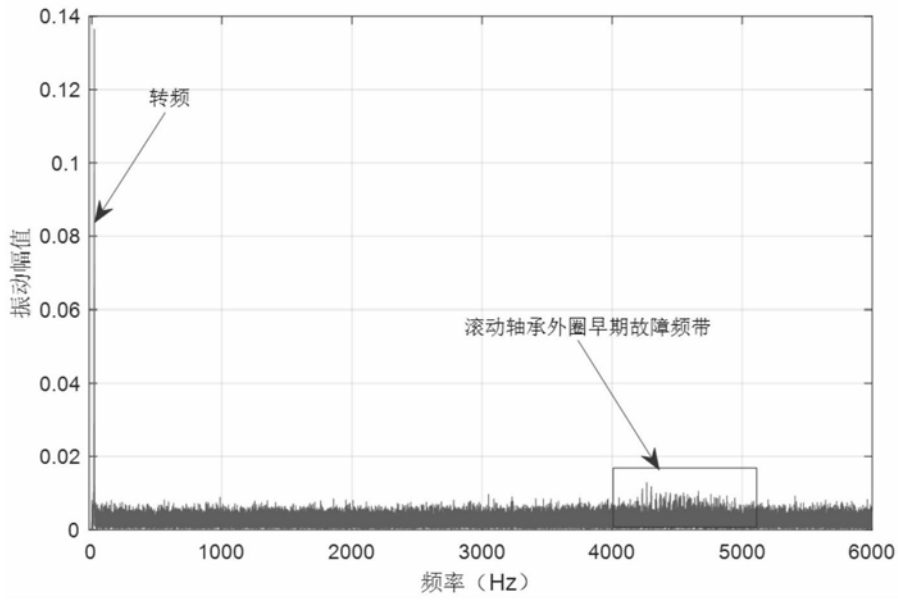


图4

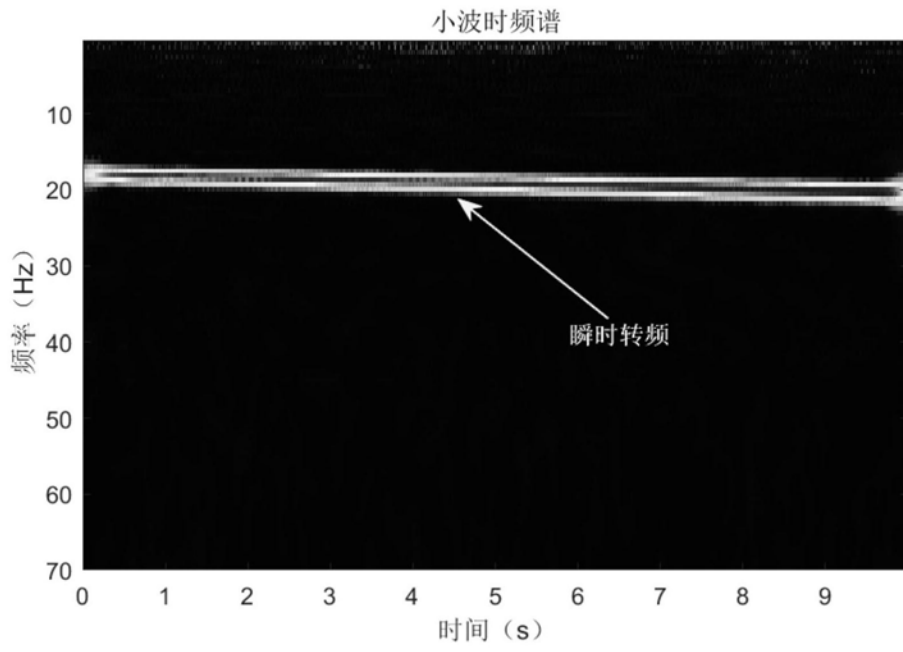


图5

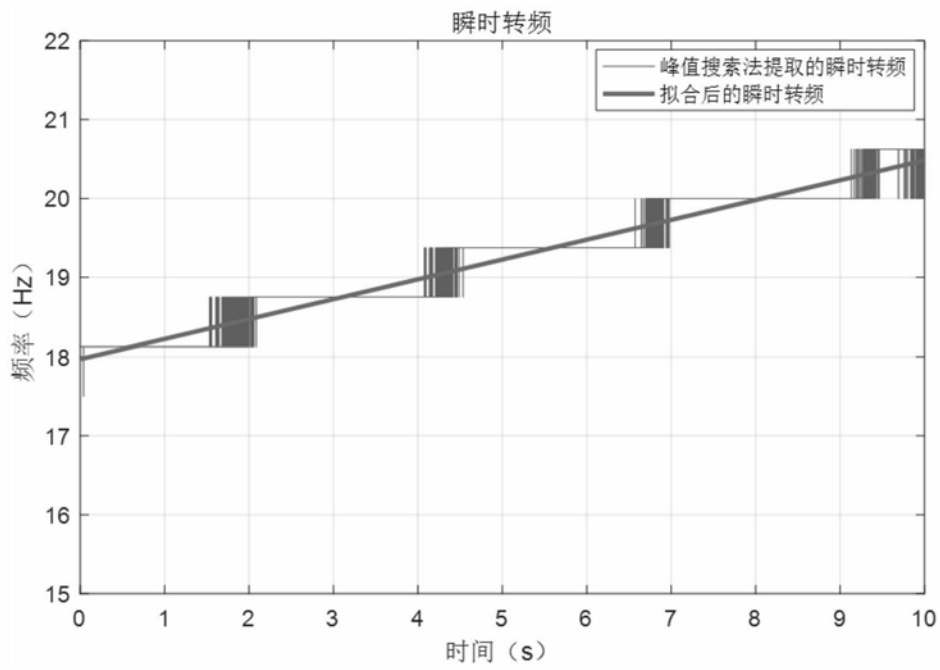


图6

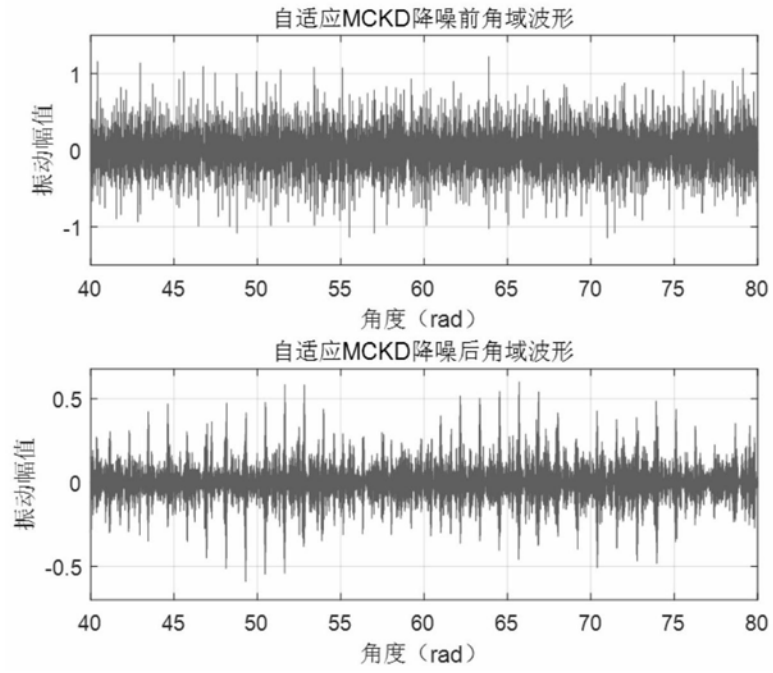


图7

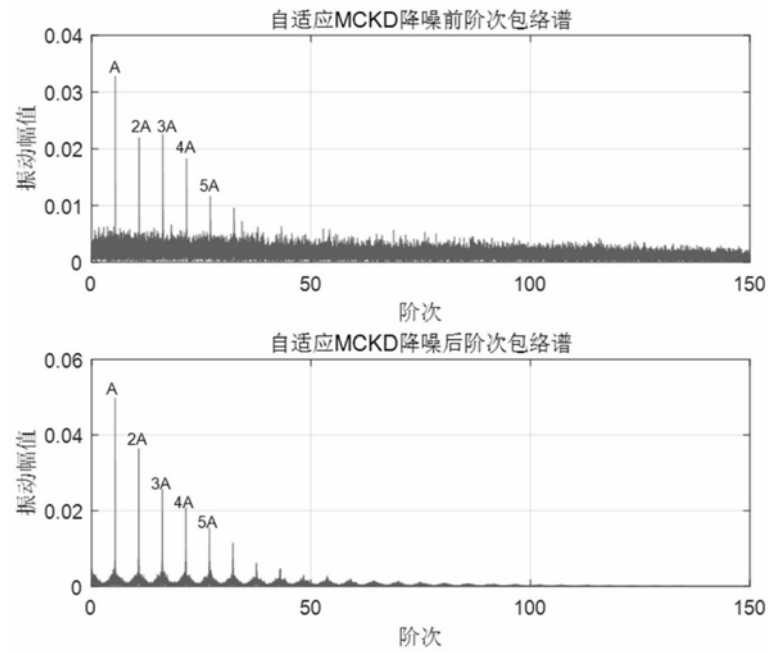


图8