

基于磁编码器和窄带解调的太阳轮故障检测*

尹兴超, 郭瑜, 李震焘, 华健翔

(昆明理工大学机电工程学院 昆明, 650500)

摘要 绝对式磁编码器具有价格低、安装方便等优势, 适合于工程应用, 但在低转速工况下其角度信号受测量误差的影响较大, 需要对角度信号进行拟合以消除测量误差带来的干扰。传统的分段拟合方法在分段点处易出现不连续现象, 角度信号的不连续导致由其计算的瞬时角速度(instantaneous angular speed, 简称 IAS)信号中出现虚假冲击, 并对基于 IAS 信号的故障特征提取造成干扰。针对此问题, 提出一种基于绝对式磁编码器 IAS 估计和窄带解调的太阳轮故障检测方法。首先, 为保证 IAS 信号的连续性与平滑性, 提出基于最小二乘拟合与 5 次 Hermite 插值的方法, 实现了对 IAS 信号的拟合估计和平滑处理; 其次, 结合窄带解调技术实现了对行星齿轮减速器太阳轮故障特征的有效提取; 最后, 通过对正常与故障太阳轮的绝对式磁编码器信号分析对比, 验证了所提方法的有效性。

关键词 磁编码器; 行星齿轮箱; 瞬时角速度信号; 窄带解调; 角域同步平均

中图分类号 TH17; TH132.425

1 问题的引出

行星传动具有传动比大、结构紧凑及传动平稳等优点, 在工业机器人关节、直升机及工程机械中应用广泛。利用旋转编码器(角度)信号获取的 IAS 信号对行星传动系统进行故障诊断可有效克服传统振动分析方法中时变传递路径的影响^[1-2], 且其对扭振较为敏感。用于测量 IAS 信号的传感器主要包括光栅编码器、磁编码器等。与光栅编码器相比, 磁编码器具有安装方便(无接触测量)、价格低等优点, 被广泛运用于工业机器人与工程机械中^[3]。

与光栅编码器具有严格的角度分度不同, 绝对式磁编码器输出的角度信号为模拟量, 没有严格的角度分度且在角度信号的末位存在波动, 因此无法在低转速工况下使用常规的 T 法计算角域 IAS 信号^[4]。在绝对式磁编码器中测量误差会导致角度信号产生一定的波动, 其波动程度主要受安装误差、模数转化精度的影响, 而不受转速变化的影响。其 IAS 信号可表示为

$$v = (\Delta\theta + \epsilon) / \Delta t \quad (1)$$

其中: v 为 IAS 值; $\Delta\theta$ 为 2 次采集所间隔的角度; ϵ 为测量误差。

当以固定时间间隔对绝对式磁编码器信号进行采集时, 转速越高 2 次采样所间隔的角度差就越大。虽然测量误差 ϵ 对瞬时角速度的影响较小, 但在低

转速时测量误差将对 IAS 信号产生较大影响, 如果直接对 IAS 信号进行估计会将噪声放大, 淹没齿轮故障所引起的 IAS 波动, 因此需要对绝对式磁编码器角度信号进行拟合以减小测量误差带来的影响。但是, 传统的分段拟合方法会在分段点处出现不连续的现象^[5], 导致在 IAS 信号中引起虚假冲击。当进行齿轮故障分析时, 虚假冲击会激起全频带的噪声, 使得故障信息被淹没。

笔者提出了一种基于绝对式磁编码器 IAS 估计和窄带解调的太阳轮故障检测方法。首先, 对磁编码器角度信号进行采集; 其次, 使用分段最小二乘拟合对角度信号进行拟合, 并用 5 次 Hermite 插值对拟合信号进行平滑处理, 对拟合的多项式进行求导得到 IAS 信号并去除其趋势项; 然后, 使用角域同步平均技术提取与参考轴转速同步的分量, 并且对噪声及其他非同步分量进行抑制, 从而提高信噪比^[6]; 最后, 通过窄带解调技术^[7-8]实现对太阳轮故障特征的提取。通过对正常与故障太阳轮的试验研究, 验证了该方法的有效性。

2 方法原理

2.1 磁编码器简介

绝对式磁编码器是一种利用霍尔传感器阵列检

* 国家自然科学基金资助项目(52165067); 云南省重点领域科技计划资助项目(202002AC080001)

收稿日期: 2021-09-15; 修回日期: 2022-04-20

测永磁体旋转角度的装置,由永磁体与磁感应芯片组成,其结构原理如图1所示。测量角度信号时将永磁体固定在被测轴上,根据霍尔传感器阵列对永磁体磁场的响应来计算被测角度信号。绝对式磁编码器测量原理^[9]如图2所示。

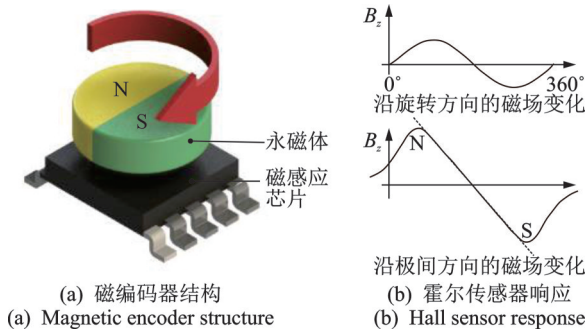


图1 磁编码器结构原理图

Fig.1 Magnetic encoder structure schematic diagram

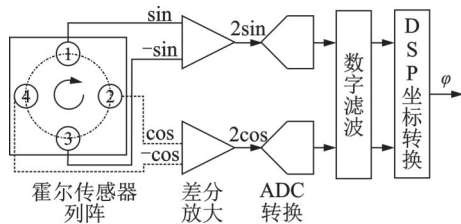


图2 绝对式磁编码器测量原理

Fig.2 Measuring principle of magnetic encoder

2.2 绝对式磁编码器 IAS 信号估计

由于磁编码器受测量误差的影响,在约 30 r/min 的低速工况下测量的角度信号信噪比较低,低速工况下测量误差的影响如图3所示。若直接使用向前差分法进行 IAS 信号计算,测量误差会进一步放大,严重影响对故障对应特征的辨识,因此需要对编码器角度信号进行拟合以消除测量误差引入的干扰。向前差分法可表示为

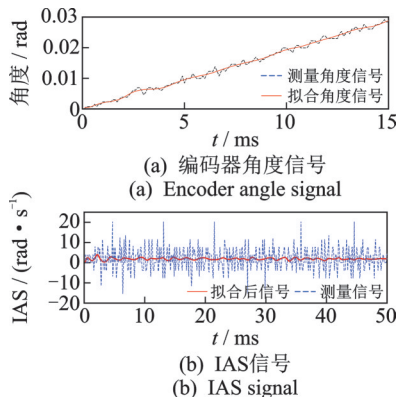


图3 低速工况下测量误差的影响

Fig.3 Influence of measurement error at low speed

$$v(i) = (\varphi(i) - \varphi(i-1)) / \Delta t \quad (2)$$

其中: $v(i)$, $\varphi(i)$ 分别表示第 i 点的瞬时角速度和测量角度; Δt 为测量时间间隔, 设采样频率为 f_s , 则 $\Delta t = 1/f_s$ 。

最小二乘分段拟合见图4。传统的分段拟合方法^[5]易在分段点处产生如图4(a)所示的不连续现象, 并在由角度信号估计的 IAS 信号中产生如图4(b)所示的虚假冲击。在 IAS 信号中虚假冲击与故障对应的冲击相混淆, 如数据分段时采用等分的方式, 则虚假冲击具有周期性, 其周期与分段方式有关。当使用谱分析存在虚假冲击的 IAS 信号时, 虚假冲击所引起的噪声易淹没重要的故障信息。为解决这一问题, 本研究提出一种基于分段最小二乘拟合与 5 次 Hermite 插值的 IAS 信号拟合平滑方法, 实现所获取 IAS 信号的连续性与平滑性, 其具体步骤如下。

1) 将永磁体固定在被测轴端面, 磁编码器芯片平行放置在永磁体上方 1~2 mm 处, 以 f_s 对分辨率为 M 的磁编码器角度信号 φ 进行采样, 则平均速度 \bar{v} 为

$$\bar{v} = \frac{\varphi(n) - \varphi(1)}{n - 1} f_s \quad (3)$$

其中: \bar{n} 为数据长度。

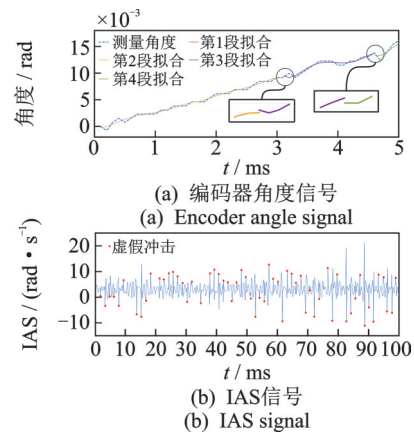


图4 最小二乘分段拟合

Fig.4 Least squares piecewise fitting

由于编码器分辨率有限, 在低速工况下编码器角度信号理论上应为梯形波^[10], 叠加测量误差后, 实测数据会上下波动。有效数据示意图如图5所示。

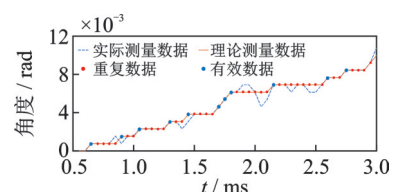


图5 有效数据示意图

Fig.5 Schematic diagram of valid data

将磁编码器角度发生变化时的数据称为有效数据,其他位置处的数据称为重复数据,编码器角度信号拟合中常使用5次多项式进行拟合^[11],以保证IAS与瞬时角加速器(instantaneous angular acceleration,简称IAA)信号的连续性。使用分段最小二乘拟合对旋转编码信号进行拟合时,需要依据平均转速以及所拟合多项式的阶数对每段数据长度进行估计。若使用 k 个有效数据对多项式拟合,则每段所需数据量 $l(k)$ 为

$$l(k) = \text{ceil}(2\pi kf/M\bar{v}) \quad (4)$$

其中:ceil表示向上取整。

为减小分段拟合分段点的不连续性,可以添加过渡区域,但过渡区域过长会使参与拟合的有效数据增多,导致高频信息丢失,所以在适当添加过渡区域后进行平滑处理,可以保留较多信息并消除分段点不连续的现象。当过渡区域的有效数据个数为 e ,分段最小二乘所拟合的多项式可表示为

$$\begin{cases} q_i(x) = S\{[t_{rs(i)-l(e)}, t_{rt(i)+l(e)}], x\} \\ \quad (x \in [t_{rs(i)}, t_{rt(i)}]) \\ rs(i) = (i-1)l(k) \\ rt(i) = il(k) \end{cases} \quad (5)$$

其中: $q_i(x)$ 为使用第 i 段数据进行最小二乘拟合得到的多项式; $S\{\cdot, x\}$ 表示最小二乘拟合, x 为自变量, \cdot 表示拟合所用数据的范围; $rs(i)$ 为第 i 段拟合起始位置; $rt(i)$ 为第 i 段拟合结束位置。

2) 根据文献[5],在自然交点(相邻拟合曲线的交点)处进行平滑可以达到较好的平滑效果。第 i 与 $i+1$ 段多项式的自然交点 X_i 可表示为

$$\begin{cases} q_i(x) = S\{[t_{rs(i)-l(e)}, t_{rt(i)+l(e)}], x\} \\ \quad (x \in [t_{rs(i)}, t_{rt(i)}]) \\ q_{i+1}(x) = S\{[t_{rs(i+1)-l(e)}, t_{rt(i+1)+l(e)}], x\} \\ \quad (x \in [t_{rs(i+1)}, t_{rt(i+1)}]) \end{cases} \quad (6)$$

将在自然交点前一个有效数据所在位置记作 X_{ai} ,后一个有效数据记作 X_{bi} ,自然交点与5次Hermite插值如图6所示。

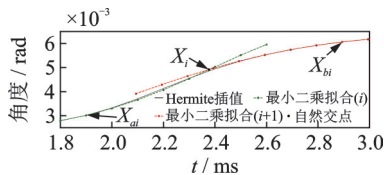


图6 自然交点与5次Hermite插值

Fig.6 Natural intersection and 5-order Hermite interpolation

为解决分段拟合在分段点处的不连续现象,需在 X_{ai} 与 X_{bi} 之间进行平滑,且所使用的多项式要保证IAS信号的连续性与光滑性。因此,用于平滑的

多项式需要满足在分段点处的1阶导数及2阶导数与分段最小二乘拟合构建的多项式在分段点处的1阶导数及2阶导数相等,而5次Hermite插值所构建的多项式满足IAS信号拟合所需要的平滑要求,依据金字塔算法^[12],第 i 段5次Hermite多项式表示为

$$H_i(x) = A_i Q_i^T \quad (7)$$

其中: $H_i(x)$ 为第 i 段的5次Hermite多项式; A_i 为系数矩阵; Q_i 为构建多项式所需要的条件矩阵。

$$Q_i = \begin{bmatrix} q_i(X_{ai}) & q_i'(X_{ai}) & q_i''(X_{ai}) & q_{i+1}(X_{bi}) & q_{i+1}'(X_{bi}) \\ q_{i+1}(X_{bi}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中: $q_i(X_{ai})$ 为多项式 q_i 在 X_{ai} 处的函数值; $q_i'(X_{ai})$ 为多项式 q_i 在 X_{ai} 处的1阶导数; $q_i''(X_{ai})$ 为多项式 q_i 在 X_{ai} 处的2阶导数。

$$A_i = [h_{00} \ h_{01} \ h_{02} \ h_{10} \ h_{11} \ h_{12}] \quad (9)$$

其中: $h_{00}, h_{01}, h_{02}, h_{10}, h_{11}, h_{12}$ 为系数。

$$\begin{cases} h_{00} = l_0^3(1 + 3l_1 + 6l_1^2) \\ h_{01} = l_0^3(1 + 3l_1)(x - X_{ai}) \\ h_{02} = l_0^3(x - X_{ai})^2/2 \\ h_{10} = l_1^3(1 + 3l_0 + 6l_0^2) \\ h_{11} = l_1^3(1 + 3l_0)(x - X_{bi}) \\ h_{12} = l_1^3(x - X_{bi})^2/2 \end{cases} \quad (10)$$

其中: l_0, l_1 为权函数。

$$\begin{cases} l_0 = (X_{bi} - x)/(X_{bi} - X_{ai}) \\ l_1 = (x - X_{ai})/(X_{bi} - X_{ai}) \end{cases} \quad (11)$$

3) 通过分段最小二乘拟合并经过5次Hermite多项式平滑以后的角度信号 $\varphi(x)$ 可表示为

$$\varphi(x) = \begin{cases} q_i(x) & (x \in [X_{bi-1}, X_{ai}]) \\ H_i(x) & (x \in [X_{ai}, X_{bi}]) \end{cases} \quad (12)$$

其中: x 为时间变量; $q_i(x)$ 为最小二乘拟合多项式; $H_i(x)$ 为5次Hermite多项式; X_{ai}, X_{bi} 为第 i 个分段点平滑的起始与结束位置。

IAS信号 $v(x)$ 为 $\varphi(x)$ 的导数,即

$$v(x) = \varphi'(x) \quad (13)$$

在行星传动故障齿轮啮合过程中会引起IAS信号的波动,其包含丰富的齿轮故障信息。在匀速运转的机械设备中,IAS信号的趋势项可视为平均速度,去除平均速度后的IAS信号波动为

$$v_c(x) = v(x) - \bar{v} \quad (14)$$

其中: v_c 为去除直流分量后的IAS信号波动。

2.3 角域同步平均技术

角域同步平均^[13]是一种有效提取与选定参考轴转速同步信号、同时抑制噪声和其他非同步干扰的

方法,在齿轮故障诊断中可用于窄带解调的预处理步骤,在噪声环境中能提高齿轮信号的信噪比。

设需要提取与周期 T_{rsa} 相关的分量,则角域同步平均算法可表示为

$$v_{cr}(\varphi) = \frac{1}{p} \sum_{r=0}^{p-1} v_c(g(\varphi + rT_{\text{rsa}})) \quad (15)$$

其中: $v_{cr}(\varphi)$ 为角域同步平均之后得到的角域IAS转速波动信号; p 为平均段数; T_{rsa} 为被检测齿轮信号的周期; $g(\varphi + rT_{\text{rsa}})$ 为求解角度 $(\varphi + rT_{\text{rsa}})$ 在角度信号中所对应的时间,即式(16)的解。

$$\varphi(x) = \varphi + rT_{\text{rsa}} \quad (16)$$

2.4 窄带解调技术

窄带解调^[8,14-15]是齿轮故障诊断的经典技术,当齿轮出现故障时故障位置的局部刚度下降,在幅值解调信号中出现极小点,在相位解调信号中出现突变^[14]。在进行窄带解调分析之前需要排除相邻谐波及其边带的干扰,因此需要选择调制边带丰富的频带进行带通滤波,滤波后的信号记作 v_m 。根据文献[15],滤波带宽 W 最大可取啮合阶比 O_m ,即 $W \leq O_m$ 。假设选取第 n 阶谐波进行带通滤波,滤波频范围为 $\left(nO_m - \frac{W}{2}\right) \sim \left(nO_m + \frac{W}{2}\right)$ 。

窄带解调包括幅值解调与相位解调,其实现过程是对 v_m 进行 Hilbert 变换,获得其对应的解析信号

$$c_m = v_m + jH(v_m) \quad (17)$$

其中: $H(\cdot)$ 代表 Hilbert 变换。

由解析信号获得幅值解调函数为

$$a_m = |c_m|/A_m - E(|c_m|) \quad (18)$$

其中: A_m 为 n 阶啮合谐波幅值; $|\cdot|$ 为取绝对值; $E(\cdot)$ 为取数学期望即平均值。

由解析信号获得相位解调函数为

$$b_m(\varphi) = \arg[c_m(\varphi)] - (2\pi O_m \varphi + \phi_m) \quad (19)$$

其中: $\arg[c_m(\varphi)]$ 为 $c_m(\varphi)$ 的相位函数。

3 太阳轮故障检测

本研究结合以上方法,提出一种基于磁编码器 IAS 估计与窄带解调的太阳轮故障检测方法,其流程如图7所示。具体步骤如下:

1) 使用绝对式磁编码器对角度信号 φ 进行采集,根据式(3)估计其平均转速,再按式(4)、式(5)对角度信号进行分段最小二乘拟合得到多项式 q_i ,然后按式(6)求解相邻多项式的自然交点,在自然交点的前、后有效数据位置计算其函数值、1阶及2阶导

数值并代入式(8)计算得到条件矩阵 Q_i ,最后按照式(9)~(11)计算系数矩阵 A_i ,将条件矩阵与系数矩阵代入式(7)得到用于分段点平滑的5次 Hermite 多项式 H_i ,将 q_i 与 H_i 代入式(12)得到绝对式磁编码器角度信号的拟合函数 $\varphi(x)$;

2) 利用式(13)求解 $\varphi(x)$ 的1阶导数可得到 IAS 信号,代入式(14)去除趋势项得到瞬时转速波动 v_c ;

3) 计算太阳轮故障阶比 O'_i ,并计算其对应周期 T_{rsa} ,按式(15)、式(16)对 IAS 信号进行角域同步平均得到信号 v_{cr} ;

4) 对信号 v_{cr} 进行阶比分析,选择调制边带最为丰富的频带进行带通滤波,其带通滤波器的中心阶比为 nO_m ,带宽为 W ,滤波后的信号记作 v_p ;

5) 利用式(17)对信号 v_p 进行 Hilbert 变换得到解析信号 c_m ,再利用式(18)、式(19)得到幅值解调函数 a_m 与相位解调函数 b_m 。

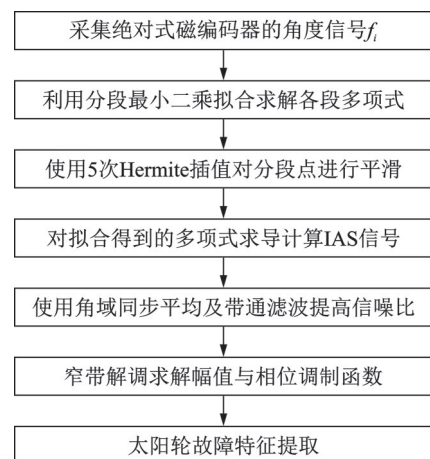


图7 基于磁编码器IAS估计与窄带解调的太阳轮故障检测流程
Fig.7 Fault detection flow of sun gear based on magnetic encoder IAS estimation and narrowband demodulation

4 试验研究

4.1 试验简介

为验证方法的有效性,在图8所示的行星齿轮故障试验台上进行试验研究。磁编码器如图9所示,由伺服电机、行星齿轮减速器、磁粉制动器及磁编码器等组成。行星齿轮箱参数如表1所示。

试验时先用绝对式磁编码器(型号为AS5048,

表1 行星齿轮箱参数

Tab.1 Parameters of planetary gearbox

齿轮	太阳轮	行星轮(3个)	齿圈
齿数	21	31	84
变位系数	0.18	0.1	0.12

分辨率 $M=14$ bits)对无故障的行星齿轮减速器进行角度信号的采集,永磁体固定于磁粉制动器传动轴端面上,磁编码器安装于轴承端盖上。使用电火花在太阳轮齿根处加工1条长为3 mm、宽为0.3 mm

的裂纹来模拟故障裂纹,太阳轮齿根裂纹如图10所示。试验时伺服电机转速约为150 r/min,减速器输出端转速约为30 r/min,以采样频率 $f_s=10$ kHz对编码器角度信号进行采集。

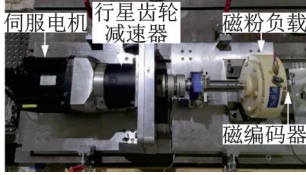


图8 行星齿轮传动试验台
Fig.8 Test rig of the planetary gearbox transmission

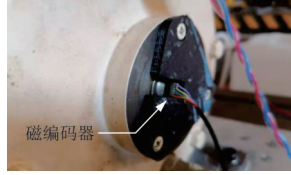


图9 磁编码器
Fig.9 Magnetic encoder

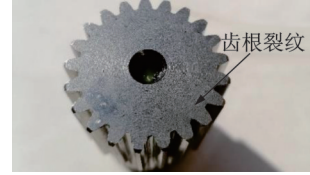


图10 太阳轮齿根裂纹
Fig.10 Sun gear with tooth root crack

根据差动轮系传动理论^[16]和表1中行星齿轮箱参数计算出各理论特征阶次,如表2所示。其中:太阳轮故障阶次为 $4\times$;齿轮啮合阶次为 $84\times$ 。

表2 行星齿轮箱特征阶次

Tab.2 Characteristics order of planetary gearbox

行星架旋转阶次 O_c	太阳轮旋转阶次 O_s	太阳轮故障阶次 O'_s	啮合阶次 O_m
$1\times$	$5\times$	$4\times$	$84\times$

4.2 试验结果分析

绝对式磁编码器角度信号如图11所示,其中太阳轮正常与太阳轮存在裂纹的角度信号分别见图11(a,b)。ISA信号拟合如图12所示。将测量得到的编码器角度信号转化为增量角度信号,由式(3)可计算得到太阳轮正常与故障时平均速度均为 3.14 rad/s。在多项式拟合过程中若使用的拟合数据过多,则相当于构建一个低通滤波器会滤除高频信息。考虑到后续会使用角域同步平均(rotational domain synchronous averaging,简称RSA)对周期信号进行提取,故笔者在拟合阶段尽可能保留有用的信息。研究发现,拟合有效数据个数 k 取6、过渡区所使用的有效数据个数 e 取2可以获得较好的平滑效果并保留大多数信息。依据式(4)、式(5)构建分段最小二乘拟合多项式,依据式(13)计算其1阶导数得到IAS信号及其频谱,利用式(6)求解自然交点,并在自然交点前后的有效数据处利用式(8)进行5次 Hermite 多项式条件矩阵 Q 的构建,再利用式(7)、式(9)~(11)对用于分段点平滑的5次 Hermite 多项式进行构造,最后利用式(12)构建完整的拟合函数对磁编码器角度进行拟合,以确保IAS信号的连续与平滑。

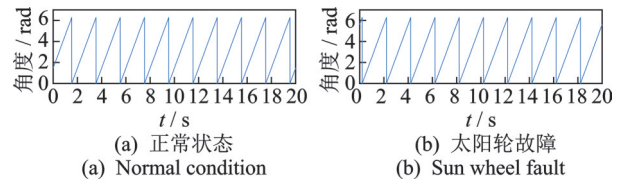


图11 绝对式磁编码器角度信号

Fig.11 Absolute magnetic encoder Angle signal

在IAS信号频谱图12(c, f, i)中均存在输出轴转频 0.5 Hz ($1\times$)、太阳轮转频 2.5 Hz ($5\times$)及啮合频率 42 Hz ($84\times$),但是在图12(c, f)频谱中包含大量噪声。图12(c)为原始角度信号对应的IAS信号频谱,其含有大量噪声的原因是在 30 r/min的低速工况下,测量误差与重复数据的存在引起了较高的噪声。图12(f)为使用传统分段最小二乘拟合时对应的IAS信号频谱,由于传统的分段最小二乘拟合在分段点处会出现不连续的现象,并在IAS信号中引起虚假冲击,从而导致频谱噪声的增加,使行星齿轮箱的特征频率淹没在噪声中。由图12(h)可以看出,经过5次 Hermite 多项式插值平滑后的IAS信号光滑且连续,在IAS信号频谱中行星齿轮箱的特征频率也较为清晰。由于太阳轮故障频率 2 Hz ($4\times$)与转频的4倍频 2 Hz ($4\times$)相重合,无法直接从频谱中对太阳轮故障进行判别,需要进一步对故障特征进行提取。

由表2可知,太阳轮故障阶次 O'_s 为 $4\times$,对太阳轮进行角域同步平均时 T_{rsa} 取 $\pi/2$,根据式(14)对太阳轮存在裂纹的IAS信号去除直流分量,按式(16)对IAS信号进行角域重采样,并依据式(15)进行角域同步平均,如图13所示。IAS经过角域同步平均之后,其周期性明显增强,在阶比谱中可以看出其太阳轮故障频率 $4\times$ 与啮合频率 $84\times$ 较为突出。

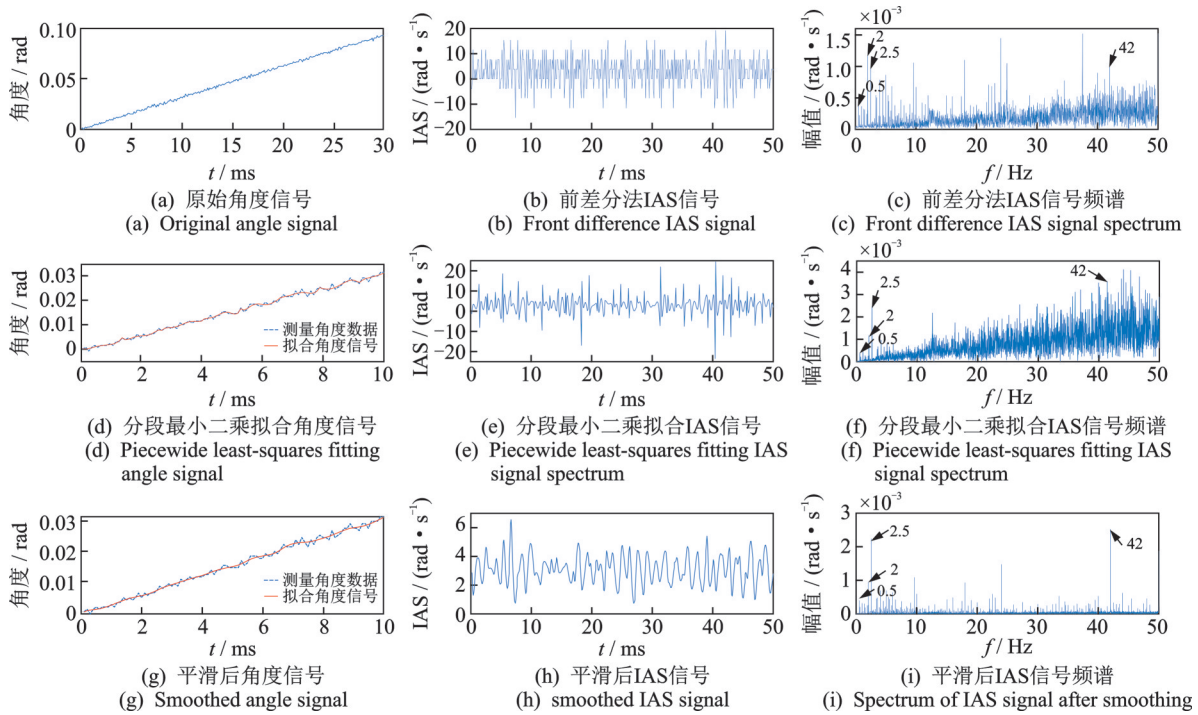


图12 IAS信号拟合

Fig.12 IAS signal fitting

对角域同步平均之后的信号进行带通滤波,带通滤波器的宽度 $W \leq O_m^{[16]}$ 。根据式(17)确定带通滤波范围,本研究带通滤波器的宽度 W 取 84,显示的前6阶谐波带通滤波范围如图14所示。

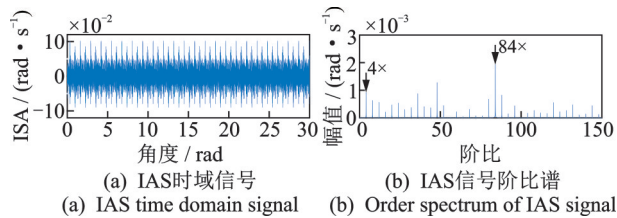


图13 角域同步平均

Fig.13 Angular domain synchronization averaging

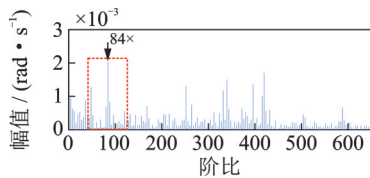


图14 前6阶谐波带通滤波范围

Fig.14 First 6 harmonic band pass filtering range

在图14中选取边带较为丰富的1×谐波为中心进行带通滤波,滤波后的IAS信号依据式(17)进行Hilbert变换并得到解析信号,再根据式(18)、式(19)计算幅值解调函数与相位解调函数。

由表2可知,参考轴为输出轴时太阳轮故障阶次为4×,即太阳轮故障特征出现频率为参考轴转频的4倍,太阳轮故障周期为 $\pi/2$ 。文献[14]指出,当齿轮存在局部故障时,故障所在位置处幅值解调

函数会出现极小值,同时相位解调函数会出现突变,相位解调函数可以作为早期齿轮故障的评判依据。窄带解调后的幅值解调信号与相位解调信号如图15所示。可以看出,太阳轮正常时相位解调函数未发生周期性的相位突变,而当太阳轮存在齿根裂纹时幅值解调函数出现极小点的位置处相位解调函数发生相位突变,且相位突变的周期为 $\pi/2$,与太阳轮故障周期一致。

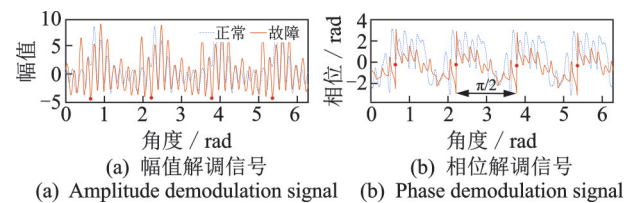


图15 窄带解调后的幅值解调信号与相位解调信号

Fig.15 Amplitude demodulation signal and phase demodulation signal after narrowband demodulation

5 结论

- 1) 使用5次 Hermite 多项式对绝对式磁编码器角度信号进行平滑,可有效避免 IAS 估计的虚假冲击。
- 2) 通过窄带解调对所提方法处理后的磁编码器 IAS 信号进行分析,可以对太阳轮故障进行有效检测。

参 考 文 献

[1] 赵磊, 郭瑜, 伍星. 基于包络加窗同步平均的行星齿

- 轮箱特征提取[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(2): 320-326.
- ZHAO Lei, GUO Yu, WU Xing. Fault feature extraction of planetary gearboxes based on angle domain windowed synchronous average of the envelope signal[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(2): 320-326.(in Chinese)
- [2] 隆勇, 郭瑜, 伍星, 等. 基于振动信号分离的行星轴承故障特征提取[J]. 振动与冲击, 2020, 39(13): 78-83, 109.
- LONG Yong, GUO Yu, WU Xing, et al. Fault feature extraction of planet bearings based on vibration signal separation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(13): 78-83, 109.(in Chinese)
- [3] 张建辉, 陈震林, 张帆. 绝对式光电编码器的编码理论研究进展[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(1): 1-12.
- ZHANG Jianhui, CHEN Zhenlin, ZHANG Fan. Advances in coding theory of absolute optical encoders[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(1): 1-12.(in Chinese)
- [4] 吴忠, 吕绪明. 基于磁编码器的伺服电机速度及位置观测器设计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(9): 82-87.
- WU Zhong, LYU Xuming. Design of angular velocity and position observer for servo motors with magnetic encoders[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(9): 82-87.(in Chinese)
- [5] 彭丹, 杨磊, 杨家强. 热膜式气流量传感器指数过拟合分段拟合方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(10): 1990-1998.
- PENG Dan, YANG Lei, YANG Jiaqiang. Curve piecewise fitting method with exponential-curve-transition of hot-film gas flow sensors[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(10): 1990-1998. (in Chinese)
- [6] 王志乐, 郭瑜, 曹永立, 等. 基于角域加窗同步平均的太阳轮故障检测方法[J]. 振动与冲击, 2017, 36(13): 74-79.
- WANG Zhile, GUO Yu, CAO Yongli, et al. Fault detection method of a sun gear based on windowed synchronous average in angle domain[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(13): 74-79.(in Chinese)
- [7] 赵磊, 郭瑜, 伍星. 基于窄带解调的行星齿轮箱故障特征提取[J]. 振动与冲击, 2018, 37(10): 123-128.
- ZHAO Lei, GUO Yu, WU Xing. Fault feature extraction of planetary gear-box based on the narrowband demodulation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(10): 123-128.(in Chinese)
- [8] GUO Y, ZHAO L, WU X, et al. Vibration separation technique based localized tooth fault detection of planetary gear sets: a tutorial[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 129: 130-147.
- [9] 郝双晖, 刘勇, 郝明晖. 绝对式多极磁电轴角编码器的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 863-871.
- HAO Shuanghui, LIU Yong, HAO Minghui. Design of absolute multi-pole shaft encoders[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 863-871.(in Chinese)
- [10] 王磊, 吴殿昊, 韩继超, 等. 有限角磁电编码器极值扇区间差值判断细分方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7): 9-18.
- WANG Lei, WU Dianhao, HAN Jichao, et al. A subdivision method for judging the difference between extreme values of the finite angle magneto-electric encoder[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 9-18.(in Chinese)
- [11] ZHAO M, JIA X D, LIN J, et al. Instantaneous speed jitter detection via encoder signal and its application for the diagnosis of planetary gearbox[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 98: 16-31.
- [12] GOLDMAN R. Pyramid algorithms: a dynamic programming approach to curves and surfaces for geometric modeling[M]. Amsterdam: Morgan Kaufmann, 2003: 119-154.
- [13] 代士超, 郭瑜, 伍星. 基于同步平均与倒频谱编辑的齿轮箱滚动轴承故障特征量提取[J]. 振动与冲击, 2015, 34(21): 205-209.
- DAI Shichao, GUO Yu, WU Xing. Gear-box rolling bearings' fault features extraction based on cepstrum editing and time domain synchronous average[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(21): 205-209. (in Chinese)
- [14] MCFADDEN P D. Detecting fatigue cracks in gears by amplitude and phase demodulation of the meshing vibration[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1986, 108(2): 165-170.
- [15] 刘倩楠, 郭瑜, 伍星. 基于频移及谱线编辑的齿轮故障窄带解调分析方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(16): 38-42.
- LIU Qiannan, GUO Yu, WU Xing. Gear fault analysis based on narrowband demodulation with frequency shift and spectrum edit[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(16): 38-42.(in Chinese)
- [16] 秦嗣峰, 冯志鹏, LIANG M. Vold-Kalman滤波和高阶能量分离在时变工况行星齿轮箱故障诊断中的应用研究[J]. 振动工程学报, 2015, 28(5): 839-845.
- QIN Sifeng, FENG Zhipeng, LIANG Ming. Application of Vold-Kalman filter and higher order energy separation to fault diagnosis of planetary gearbox under time-varying conditions [J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28(5): 839-845.(in Chinese)
- [17] LI Y H, GU F S, HARRIS G, et al. The measurement of instantaneous angular speed[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(4): 786-805.



第一作者简介:尹兴超,男,1996年5月生,博士。主要研究方向为IAS信号高精度获取、旋转机械故障诊断。
E-mail:1925417080@qq.com

通信作者简介:郭瑜,男,1971年12月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为机械动态测试技术及振动分析。
E-mail:kmgary@163.com