DOI: 10.13382/j.jemi.B2206046

基于 IAS 精确估计的太阳轮齿面剥落检测方法研究*

邹 翔 郭 瑜
(昆明理工大学机电工程学院 昆明 650500)

摘 要:瞬时角速度(instantaneous angular speed, IAS)信号的估计精度易受编码器自身误差影响,影响其故障检测结果。针对上述问题提出了一种局部多项式微分估计方法对 IAS 信号进行估计。首先通过局部多项式微分抑制编码器细分误差产生的锯齿状噪声和估计误差导致的信号不连续问题,实现了 IAS 信号的高精度获取,然后使用精确估计的 IAS 信号通过局部同步拟合技术提取太阳轮故障特征。通过实验和仿真说明,本文提出的局部多项式微分估计能较好地抑制编码器误差导致的 IAS 信号噪声,提高 IAS 信号的信号比,结合局部同步拟合能够有效地提取太阳轮齿面剥落故障特征。

关键词: 故障检测;行星齿轮传动;瞬时角速度信号;多项式微分估计;高阶 Hermite 插值;局部同步拟合
中图分类号: TH132.46;TN762 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 470.40

Research on the tooth surface spalling diagnosis method of sun gear based on instantaneous angle signal accuracy estimation

Zou Xiang Guo Yu
(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The estimation accuracy of the instantaneous angular speed (IAS) signal is easily affected by the encoder's error, which affects its fault detection results. Because of such problems, a local polynomial differential estimation method was proposed to estimate the IAS signal. First, the local polynomial differential was used to suppress the sawtooth noise generated by the encoder subdivision errors and the signal discontinuity caused by the estimation errors, so high-precision acquisition of the IAS signal was achieved, and finally, the accurately estimated IAS signal was used to extract the sun gear fault characteristics by local synchronous fitting technique. Through experiments and simulations, it is shown that the local polynomial differential estimation proposed in this paper can effectively suppress the IAS signal noise caused by encoder errors, improve the signal to noise ratio of the IAS signal, and combine local synchronous fitting to effectively extract the features of the sun gear tooth surface spalling fault.

Keywords: fault detection; epicyclic gear transmission; instantaneous angle signal; polynomial differential estimation; high order Hermite interpolation; local synchronous fitting

0 引 言

基于编码器信号处理获得的瞬时角速度(instantaneous angular speed,IAS)信号的行星齿轮传动箱故障检测方法研究近年来受到广泛关注[1],其检测效果受到 IAS 信号估计精度的影响,如何获得高精度的 IAS 信号是实现星齿轮传动箱故障检测的关键步骤之一。编码器不可避免地存在细分误差问题,会在后续估计获得的 IAS 信号中产生高频噪声;而现有 IAS 估计方法在估计时会引入估计误差,使得真实信号与估计信号存在偏差,导致基于 IAS 信号的故障检测结果不可靠。

基于编码器信号的 IAS 计算方法主要是经过时间法,其中 T 法采集作为等角度采样[2],较时间采样更具优势,因此本文主要对 T 法进行研究。现有针对 T 法采集的估计方法较少,有限差分算法是基于经过时间法估计 IAS 信号的主要方法[3],但该方法为低阶近似估计,会导致计算所得的 IAS 信号不连续[3-5]。Bonnardot 等[4]分析

收稿日期: 2022-11-25 Received Date: 2022-11-25
*基金项目:国家自然科学基金(52165067)、云南省重点领域科技计划项目(202002AC080001)资助

了光栅编码器的混叠和量化效应,引入了通信领域的超外差法对编码器信号进行估计;Zhao 等[5]利用 Savitzky-Golay 滤波器对 M 法采集获得的角位置序列进行拟合求取 IAS 信号,虽然在一定程度上解决了信号不连续的问题,但是忽略了细分误差的影响,使得估计后仍然存在部分噪声。Feng 等[6]提出了直接取脉冲信号上下过零点的间隔取倒作为新的 IAS 信号进行故障检测,但未对估计误差和编码器自身误差进行考虑;André 等[7]用 sinc 函数近似编码器的低通滤波效应,修正了频域衰减,但同时也会增强安装误差等带来的影响;曾强[8]对相位差分编码器的误差机理和 IAS 信号测量的误差问题进行了研究,提出了一种相位差分编码器自校准算法,并与传统方法进行了对比,其所获 IAS 信号的信噪比要高于传统方法,但在校正过程中也会抑制部分信号成分;Diamond 等[9]提出了一种自校准算法,假设角间隔的拟合多项式参数服从高斯分布,通过贝叶斯回归后获得估计的角间隔实现误差自校准。目前对 IAS 信号精确估计方法的研究大多仅从估计误差上出发,而忽略了编码器自身误差的影响。

编码器自身存在细分误差,此类误差会导致 IAS 信号信噪比下降,直接掩盖故障特征信息,因此,消除此类误差对提高 IAS 信号信噪比,保障故障检测的准确性有重要意义,而偏心和倾斜误差等主要反映为波形调制,已有文献进行了研究[10-11],目前考虑细分误差对 IAS 估计精度影响的研究较少,因此本文主要针对细分误差和估计误差抑制进行研究。张玉皓等[12]建立了瞬时角速度计算扭振的模型,发现了细分误差导致的锯齿效应并运用平均滤波进行抑制;刘鑫等[13]使用过零点插值方法估计 IAS 信号,但未对细分误差进行研究,导致信号中存在较强背景噪声。

综上所述,对细分误差和估计误差同时进行抑制对基于 IAS 信号的故障检测有实际意义。研究中通过分析 IAS 信号的估计误差和编码器光栅的细分误差,提出了一种结合高阶 Hermite 插值的多项式微分估计方法抑制估计误差和细分误差,获取了精度较高的 IAS 信号。最后通过局部同步拟合技术对太阳轮故障周期分量进行提取,实验和仿真验证了所提方法的有效性。

1　时间计数法 IAS 测量方法

1.1　增量式光学编码器信号获取

研究中使用编码器为增量式光栅编码器,编码器安装于输出轴端,含两个栅道,采集时产生 A、B 两相电压脉冲信号。对于 T 法采集,当编码器开始工作时,通过高速计数器产生如图 1 中的时钟脉冲,记录下编码器脉冲每个电平变化位置(上升沿或下降沿)的时间戳(图 1 中 φ_{i-1}、φ_i、φ_{i+1} 所示的位置),若同时使用 A、B 相脉冲信号的上升沿和下降沿可提高采样率,根据前后电平变换位置之间时间脉冲个数,可获取角度位置变化时的时间信息,进而计算得 IAS[14]。

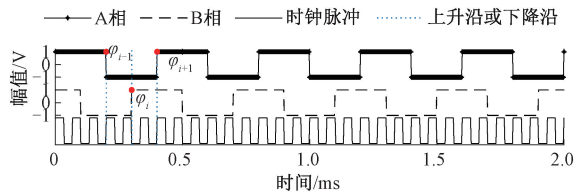

图 1　编码器信号原理

Fig. 1　Encoder signal theory

基于编码器信号的故障检测基本原理是通过编码器信号精确估计由故障引起的接触位置啮合刚度变化导致的规律性 IAS 的波动,再提取隐含在 IAS 波动中的故障信息特征。

1.2　T 法估计 IAS 的不足

通过测量相邻光栅的经过时间,在角度上对时间进行微分进而获得 IAS 信号,微分常被等价于离散化的差分比值,IAS 可为[15]:

$$v_n = \frac{\varphi_n - \varphi_{n-1}}{\Delta t_n} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t_n} = \frac{2\pi}{Mq\Delta t_n} \tag{1}$$

式中:v_n 为 IAS;φ_n 为角位置;Δt_n 为相邻编码器脉冲的时间间隔;$\Delta\varphi$ 为编码器相邻光栅盘的角度间隔;M 为编码器线数;q 为所用的上升沿或下降沿数,提高 q 的数值可以提高编码器分辨率但同时也会引入细分误差,当 q 取 4 时又会存在正交误差,因此为规避正交误差的干扰,本研究中仅使用单相信号的上升沿和下降沿,故 q 取 2。假设在含 n_0 的开区间(a,b)内具有 m+1 阶导数,对编码器的位置信号进行泰勒展开,可得:

$$\varphi_n = \frac{\varphi_n}{0!} + \frac{\varphi'_n}{1!}(t_n - t_{n_0}) + \frac{\varphi''_n}{2!}(t_n - t_{n_0})^2 + a \tag{2}$$

式中:t_n 为时间序列;a 为高阶残余项。将式(2)代入式(1)可获得差分形式的 IAS 信号:

$$v(\varphi_{n_1}) = \frac{\Delta\varphi_n}{\Delta t_n} + \frac{\varphi'_{n_2}(\Delta t_{n_2}) - \varphi'_{n_1}(\Delta t_{n_1})}{\Delta t_n} + \Delta a \tag{3}$$

式中:Δa 为高阶残余项的差值。对比式(2),直接对采集到的角位置和时间位置进行差分所得 IAS 信号仅含有式(3)右边第 1 项,其各阶导数项被忽略,这样计算得到的速度为该段的平均速度,仅在匀速时才等于瞬时速度,因此会产生平均效应导致信号不连续。

1.3　细分误差对 IAS 的影响

因刻蚀不均等制造精度问题,编码器栅格存在细分误差[16],栅格间占空比不恒定为 0.5,如图 2(a)所示,导致 IAS 信号出现周期性虚假成分。

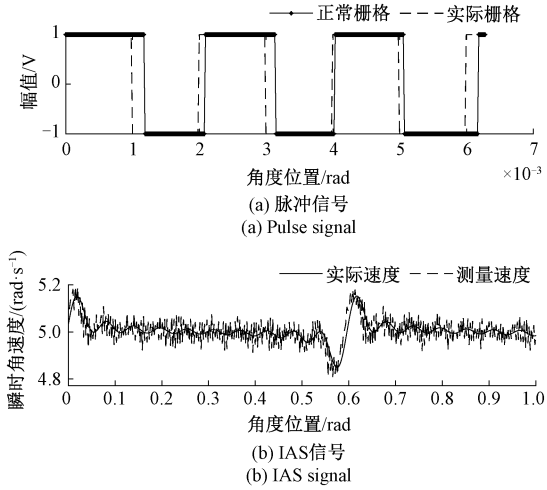

图 2　细分误差

Fig. 2　Subdivision error

假设一 IAS 正弦叠加信号为实际的 IAS 信号,如图 2(b)中实线,其公式为:

$$X = \sum_{m=1}^{M} A_n \sin(m\pi f n) \tag{4}$$

式中:A_n 为转速波动幅值;f 为旋转阶次;m 为谐波次数;n 为位置序列。假设栅格细分误差 θ_ξ 为满足[-2×10^{-6}, 2×10^{-6}]区间上的均匀分布,则测量信号对应的上升沿和下降沿角度为:

$$\varphi_n = \frac{n\pi}{M} + \theta_\xi \tag{5}$$

若存在细分误差,原 IAS 信号上将叠加较大的噪声(图 2(b)中虚线),淹没故障特征信息,由于这些噪声来源于上升沿和下降沿的位置偏移,并具有周期性,常规的齿轮故障特征提取方法易失效。

2　IAS 精确估计技术

2.1　多项式微分

针对上述问题,根据局部多项式拟合原理,对原始编码器信号中获取的时间进行多项式微分,可得到 IAS 等信号。拟合可在一定程度抑制估计误差和细分误差,但整体拟合会造成信号中的局部信息丢失,而局部故障信息常常隐含在局部信息当中,需保留局部信息。为解决上述问题,研究中对信号进行分段拟合以保留其故障特征,公式如下:

$$\varphi_{ni} = \sum_{i=1}^{P} \sum_{k=0}^{N} a_{ki} {t_n}^k \tag{6}$$

式中:φ_{ni} 为第 i 段的编码器角位置;P 为分段数;k 为多项式最高阶次;a_{ki} 为第 i 段数据点的多项式系数 a_k;l 为每个分段内的数据量。式(6)对时间求导可得各阶瞬时角参量信号:

$$\frac{\mathrm{d}^s \varphi_n}{\mathrm{d}t_n^s} = \sum_{i=1}^{P} \sum_{k=s}^{N} \prod_{\kappa=0}^{s-1} (k-\kappa) a_{ki} {t_n}^{k-s} \tag{7}$$

式中:s 为求导次数;κ 为求导系数变量。当 $s=1$ 时,所获得的信号即为 IAS 信号,其抑制了差分法带来的估计误差,提高了估计精度。

2.2　分段拟合平滑

分段多项式拟合可以较好地保留信号中蕴含的故障信息,但其会使相邻段间在衔接点处不连续,并在末端产生一个与信号成分无关的偏离趋势,使两段拟合数据点无法正常衔接,并导致其导数在分段点处成一个冲击,导致 IAS 信号在衔接点处出现间断,产生背景噪声。

为解决分段拟合存在的数据段不连续问题,提出了高阶插值拟合,在两段拟合数据之间加入滑移量求取两端之间延长线交点的平滑方式[17],保证拟合段末端不发生突变,以此实现分段点处的平滑。根据式(8)可得求取交点的方程:

$$\begin{cases} \varphi_{n1} = a_0 t_{n1}^0 + \cdots + a_N t_{n1}^k, t_{n1} \in [t_{(i-1)*l}, t_{i*1+N}] \\ \varphi_{n2} = b_0 t_{n2}^0 + \cdots + b_N t_{n2}^k, t_{n2} \in [t_{i*l-N}, t_{(i+1)*l}] \end{cases} \tag{8}$$

式中:[a_0,a_N]、[b_0,b_N]为第 i 段和第 i+1 段的多项式系数;t_{n1}、t_{n2} 为两段时间序列;l 为数据段长度;N 为滑移重叠量;φ_{n1}、φ_{n2} 为两段的角位置序列。获取两段序列的交点后,引入高阶 Hermite 插值,即保证衔接点处前后两个位置的高阶导数不发生变化,又对交点处进行平滑。第 i 段的 Hermite 多项式为[18]:

$$\boldsymbol{A}_i = \boldsymbol{q}_i \times \boldsymbol{H}_{ij} \tag{9}$$

式中:$\boldsymbol{A}_i$ 为所求的拟合多项式;$\boldsymbol{q}_i$ 为控制点矩阵;$\boldsymbol{H}_{ij}$ 为系数矩阵,对式(10)在时间上求导得平滑段的 IAS 信号平滑插值多项式:

$$\varphi_n' = \boldsymbol{A}_i' = \boldsymbol{q}_i \times \boldsymbol{H}_{ij}' \tag{10}$$

因计算 IAS 信号为一阶导数,需要保证角位置上的二阶导数连续,因此需要给定节点上的一阶、二阶导数。Hermite 插值多项式控制点如下:

$$q_i = \sum_{i=0}^{1} \sum_{j=0}^{\gamma_i - 1} \varphi^{(j)}(t_i) \tag{11}$$

式中:$\varphi^{(j)}$ 为 j 阶导数;γ_i 为低 i 个控制点的求导系数。令其路径上的权函数为:

$$l_i = ((t_n - t_{i-1}) \div (t_i - t_{i-1}))^{\gamma_i} = l_i^{\gamma_i} \tag{12}$$

式中:t_i 为前后两段的终止点或起始点。由式(12)根据金字塔路径分支上的系数乘积可得高阶 Hermite 基函数[14]:

$$H_{ij}(t_n) = \sum_{n=j}^{\gamma_i - 1} \frac{1}{n!} \binom{n}{j} C_{i,n-j}(t_n - t_i)^n l(t_n) \tag{13}$$

其中,$C_{i,n-j}$ 为高阶 Hermite 系数:

$$C_{i,n-j} = \frac{d^{n-j}}{dx^{n-j}} \frac{1}{l_i(x)} \Big|_{x=x_i} \tag{14}$$

对两段拟合数据,以交点附近$(N-1)/2$处的点为控制点,获取控制点处的导数,计算系数矩阵,得到高阶平滑段,其平滑效果与原始分段拟合效果对比如图3所示。

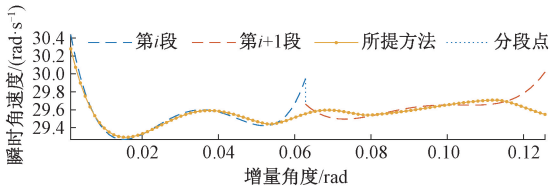

图3　高阶拟合平滑

Fig. 3　High order fitting smooth

2.3　方法复杂性讨论

从拟合次数考虑,对于长度为L的原始信号,本文所提方法分段拟合次数为$N_l=\text{floor}[(L-N)/(l-N)]$,floor[·]为向下取整,插值次数为$N_l$,且,插值的参数均来自于前一步的拟合,而S-G滤波方法类似于平均滤波,其拟合次数为$(L-l)$,因此本文所提方法的拟合次数要少于S-G微分法,复杂度更小。

2.4　局部同步拟合技术简介

局部同步拟合技术是基于最小二乘拟合的同步分量提取方法,基于最小均方误差的多项式系数计算如下:

$$\hat{b}^{(q)}(\tilde{t})=\min\|\boldsymbol{J}b^{(q)}(\tilde{t})-v^{(q)}(\tilde{t})\|^2 \tag{15}$$

式中:q为旋转周期数;M为每段的拟合长度;P为拟合阶数;$\tilde{t}=1,\cdots,R$为每个周期的数据点数;$b^{(q)}(\tilde{t})$为第q个旋转周期数据序列的$P+1$阶多项式系数;$\boldsymbol{J}$为长度为M的q段$P+1$阶矩阵;$v^{(q)}(\tilde{t})$为q周期的数据序列;$\min\|\cdot\|^2$为代表均方最小;当拟合误差最小时,可得长度M的q周期拟合序列[19]:

$$\hat{s}(p)_M(\tilde{t})=\boldsymbol{J}b^{(q)}(\tilde{t})=\sum_{p=0}^{P}b_p^{(q)}(\tilde{t})\,m^p \tag{16}$$

式中:m为长度M的滑动窗。通过矩阵$\boldsymbol{J}$可构建辅助矩阵$\boldsymbol{U}=(\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J})^{-1}\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}$,与滑窗$m$中的数据相乘即可获取最小均方误差的多项式系数如下:

$$\hat{b}(q)(\tilde{t})=\boldsymbol{U}v^{(q)}(\tilde{t}) \tag{17}$$

辅助矩阵$\boldsymbol{U}$的M维上的第1行即为所求的滤波器系数u^{T},对数据进行滤波:

$$\hat{d}(\bar{t})=u^{\mathrm{T}}v^{(q)}(\tilde{t}) \tag{18}$$

式中:$\bar{t}=\bar{t}+(q-1)R$,同步拟合为滤波器系数与信号的卷积,估计获得的周期分量如下:

$$\hat{d}(\bar{t})=\sum_{i=-MR/2}^{MR/2}\tilde{u}_i v(\bar{t}-i) \tag{19}$$

式中:$\tilde{u}=(\tilde{u}_{-MR},\cdots,\tilde{u}_{MR})$。经过局部同步拟合后,提取了周期分量。

3　齿面剥落故障检测流程

提出的故障检测方法主要技术路线如图4所示。

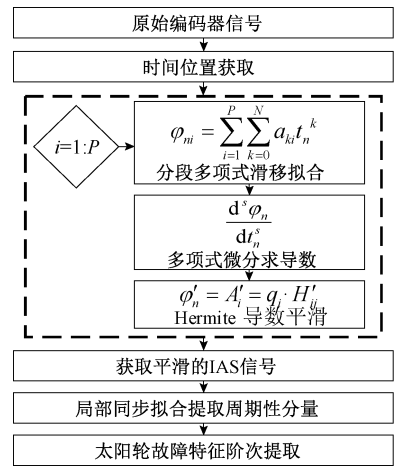

图4　所提方法流程

Fig. 4　Block diagram of proposed approach

主要步骤包括:

1)信号滑移多项式微分:拾取编码器信号后,根据滑移拟合公式对时间位置进行分段滑移拟合求取交点,并进行多项式微分获取分段IAS信号,抑制估计误差和细分误差,提高估计精度;

2)平滑处理:在步骤1)求取的交点附近根据式(11)进行Hermite插值,以抑制导数上的突变,获取在衔接点处较为平滑的IAS信号;

3)周期分量提取:运用局部同步拟合对估计的IAS信号提取同步周期分量,抑制非同步干扰,增强故障产生的IAS波动。

4　仿真分析

为验证本文所提方法的有效性,根据Zeng等[20]建立的IAS信号行星齿轮传动动力学模型对IAS信号进行仿真。不考虑平移振动,仅考虑扭转部分,以NGW型行星齿轮系为对象,齿圈固定,行星架为输出轴,通过拉格朗日方程得出模型的动力学微分方程:

太阳轮:

$$(J_s/r_s^2)\ddot{\theta}_s+\sum_1^n c_{spi}(\dot{\theta}_s r_s+\dot{\theta}_{pi}r_p)+\sum_1^n k_{spi}(\theta_s r_s+\theta_{pi}r_p)=T_{in}/r_s$$

行星轮:

$$(J_p/r_p^2)\ddot{\theta}_{pi}-k_{rpi}(\theta_r r_r-\theta_{pi}r_p)-c_{rpi}(\dot{\theta}_r r_r-\dot{\theta}_{pi}r_p)+k_{spi}(\theta_{pi}r_p+\theta_s r_s)+c_{spi}(\dot{\theta}_{pi}r_p+\dot{\theta}_s r_s)=T_p/r_p$$

齿圈：

$$(J_r/r_r^2)\ddot{\theta}_r = 0$$

行星架：

$$(J_c/r_c^2)\ddot{\theta}_c + \sum_1^n k_{spi}(\theta_s r_s + \theta_{pi} r_b) + \sum_1^n c_{spi}(\dot{\theta}_s r_s + \dot{\theta}_{pi} r_b) - \sum_1^n k_{rpi}(\theta_{pi} r_p - \theta_r r_r) - \sum_1^n c_{rpi}(\dot{\theta}_{pi} r_p - \dot{\theta}_r r_r) + k_p\theta_c + c_p\dot{\theta}_c = T_{out}/r_c \quad (20)$$

式中：J_s、J_p、J_r、J_c 分别为太阳轮、行星轮、齿圈、行星架的惯性矩；θ_s、θ_p、θ_r、θ_c 为各零件旋转位移；T_{in} 为太阳轮施加扭矩，T_p 为行星轮负载扭矩，T_{out} 为行星架输出扭矩，假设齿圈不产生位移，则齿圈施加扭矩为 0；c_{spi}、c_{rpi} 为太阳轮、齿圈时变阻尼；k_{spi}、k_{rpi} 为太阳轮、齿圈时变啮合刚度。

实验和仿真中，行星轮系的行星架为参考轴和输出轴。太阳轮、行星轮、齿圈齿数分别为 21、31、84，行星轮数量为 3 个，计算可得行星轮系的特征阶次[21]，其中行星架旋转阶次 $O_c = 1\times$，太阳轮相对旋转阶次 $O_{rs} = 5\times$，太阳轮绝对旋转阶次 $O_r = 4\times$，太阳轮故障阶次 $O_s = 12\times$，啮合阶次 $O_m = 84\times$。根据动力学模型获得的太阳轮故障仿真 IAS 加噪信号如图 5 所示，从角域上无法辨认故障特征。

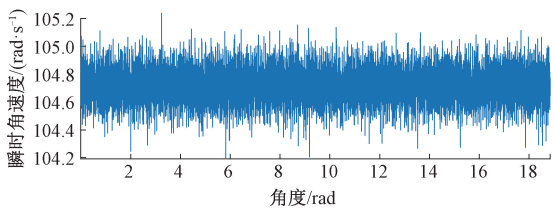

图 5　动力学仿真：加噪太阳轮故障信号

Fig. 5　Dynamics simulation: Noisy sun gear fault signal

通过求解动力学微分方程得到瞬时角速度，将仿真 IAS 信号积分后获取时间位置信号，再按本文所提方法（见图 4）和差分方法将增量时间信号进行计算，分别获得的 IAS 信号，对比如图 6，可以看出本文所提方法抑制噪声效果更好，而差分法因平均效应产生虚假速度波动点。随后运用局部同步拟合对获取的 IAS 信号进行故障特征提取，可以看出本文所提方法在成功保留齿轮运行的速度波动的同时又消除了编码器误差和估计误差造成的背景噪声。

分别运用差分法、S-G 滤波微分法、本文所提估计方法对图 5 所示的仿真太阳轮故障信号进行 IAS 信号估计，并对前两种方法获得的 IAS 信号进行同步平均周期成分提取，其结果如图 7（a）、（b）所示，再利用局部同步拟合对本文所提估计方法进行周期分量提取，结果如图 7（c）所示。传统差分方法估计获得的 IAS（图 7（a））出

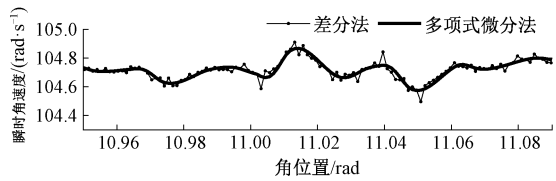

图 6　方法对比

Fig. 6　Method comparison

现大量噪声掩盖故障冲击，同步平均后噪声无法消除；而经过 S-G 微分后的 IAS 信号（图 7（b））细分误差成分并未完全消除，通过传统的同步平均技术增强周期分量后，噪声仍然存在，干扰了对故障冲击周期性的判断；使用本文所提方法估计获得的 IAS 信号（图 7（c））噪声被大量抑制，且故障冲击特征和正常啮合特征明显，通过局部同步拟合技术成功提取了故障特征（理论故障阶次 12×，对应周期约为 0.523 弧度），仿真分析验证了所提方法可以有效提取信号中的周期性故障速度抖动。

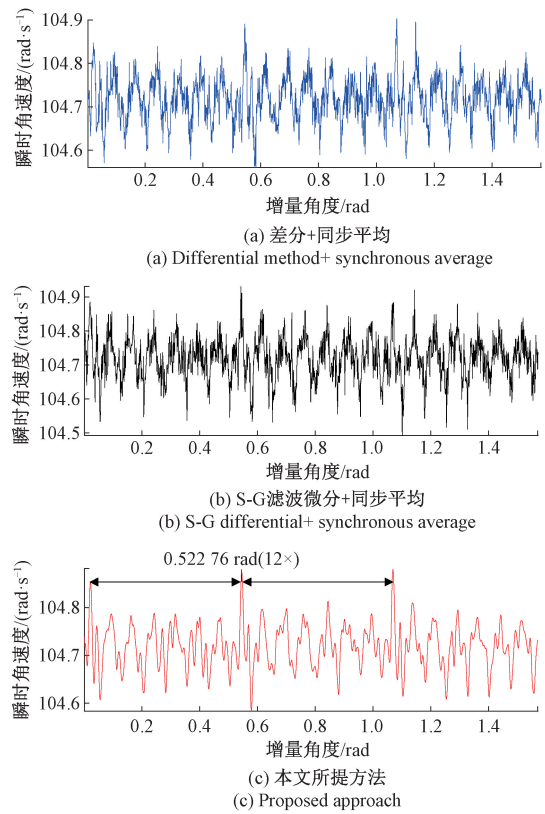

图 7　仿真信号对比

Fig. 7　Simulation signal comparison

5　实验分析

5.1　实验说明

以图 8 所示行星齿轮箱故障实验台进行实际数据验证。实验台由 PTF160 型一级行星减速器、伺服电机、编

码器、负载组成。行星减速器减速比5,行星轮个数为3。采用德国ReSatron生产光栅式编码器,线数为2 500线,安装于输出轴端,以q=2倍频采样,行星架为输出轴,电机转速为300转/min。

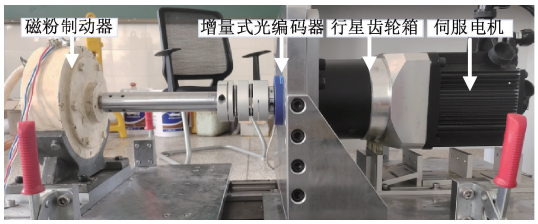

图8　行星齿轮箱综合实验台

Fig. 8　Planetary gearbox comprehensive test platform

实验以行星齿轮箱太阳轮为研究对象,在太阳轮齿面处磨削加工模拟剥落故障,齿面法向上厚度约0.5 mm,如图9所示。实验中从行星架采集编码器脉冲后,读取脉冲的上升沿和下降沿,获取时间位置序列,以图4所示流程处理时间位置获取高精度IAS信号(图10中实线所示),最后使用局部同步拟合提取故障特征。

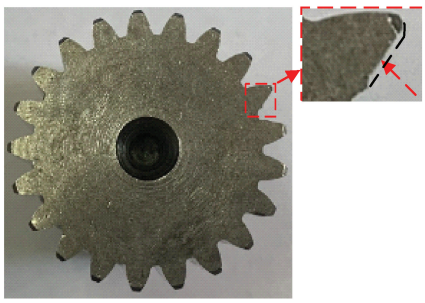

图9　太阳轮齿面剥落

Fig. 9　Sun gear tooth surface wear

5.2　实验数据分析

通过编码器拾取编码器信号,多项式微分法和差分方法估计获得IAS信号对比如图10所示,可看出,与仿真分析结果相对应,差分法获取的IAS信号(点划线)中存在细分误差及估计误差导致的噪声,而所提方法获取的IAS信号(粗实线)中噪声受到了较好抑制,又很好保留与机械结构相关的速度抖动。

使用3种估计方法对实验信号进行前处理获取IAS信号后,为进行对比,根据太阳轮旋转周期,运用同步平均技术分别对差分法和S-G微分法获取的IAS信号进行周期分量提取,并运用局部同步拟合技术对本文所提估计方法获取的IAS信号进行周期分量提取。可以看出,实际实验信号中存在大量噪声,细分误差导致了信号中存在锯齿状波形,使得差分获取的IAS信号(如图11(a)所示)中感兴趣信息几乎完全被噪声掩盖,经同步平均后

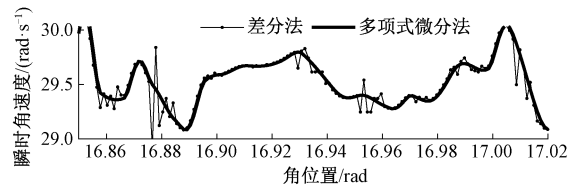

图10　实验信号方法对比

Fig. 10　Experiment signal method comparison

无法消除;而S-G滤波微分(如图11(b)所示)虽然可以辨认出故障冲击特性,但仍存在较多噪声,经同步平均后无法消除;使用本文所提方法获取的IAS信号(如图11(c)所示)很好地抑制了细分误差和估计误差,信号连续性较好,并且较好地保留了旋转机械信号的各种特征,经过局部同步拟合提取周期性分量后,可以清晰看出因故障造成的周期性速度波动(理论故障阶次12×,对应周期约为0.523 6弧度),故障检测实验验证了本文所提方法的有效性。

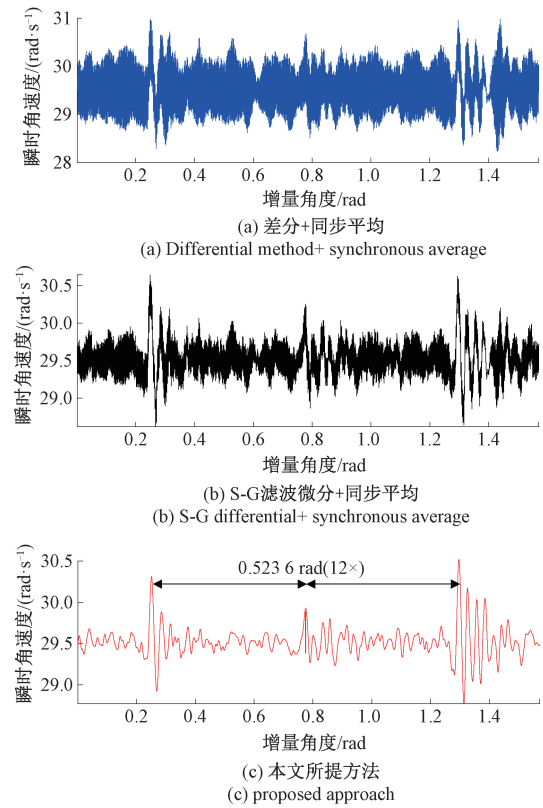

图11　实验信号对比

Fig. 11　Experiment signal comparison

6　结　论

针对IAS信号极易受编码器误差和估计误差干扰的

缺点,本文提出一种局部多项式微分 IAS 信号估计方法,克服了传统估计方法造成的信号不连续及无法有效抑制噪声的缺陷,有效实现对编码器误差和信号估计误差的抑制,提高 IAS 信号的估计精度,并结合局部同步拟合方法提取了信号中故障成分的准周期性分量,实现了太阳轮故障特征的提取。实验和仿真结果验证了本文所提方法可有效抑制噪声、平滑信号,并能有效提取故障特征。研究中局部多项式微分参数的设定对信号成分抑制效果存在影响,后续将结合指标对各参数产生的影响进行量化,进一步提高估计精度。此外本方法对误差具有较好的抑制作用,可应用于低成本编码器 IAS 信号估计中。

参考文献

[1] 欧曙东,赵明,周涛,等. 基于编码器信号的低转速行星齿轮箱故障诊断技术[J]. 中国电机工程学报,2021,41(5):1885-1894.
OU SH D, ZHAO M, ZHOU T, et al. Fault diagnosis technology for low-speed planetary gearbox based on encoder signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5):1885-1894.

[2] 徐张旗. 基于卡尔曼滤波的增量式光电编码器测速方法的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2018.
XU ZH Q. Research on the velocity measurement method of incremental encoder based on Kalman filter[D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2018.

[3] MOUSTAFA W, COUSINARD O, BOLAERS F, et al. Low speed bearings fault detection and size estimation using instantaneous angular speed[J]. Journal of Vibration & Control, 2016, 22(15):3413-3425.

[4] BONNARDOT F, LIZOUL K, ERRAFIK S, et al. High frequency demodulation technique for instantaneous angular speed estimation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021,159:107745.

[5] ZHAO M, JIA X, 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.

[6] FENG Z, GAO A, LI K, et al. Planetary gearbox fault diagnosis via rotary encoder signal analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 149:107325.

[7] ANDRÉ H, GIRARDIN F, BOURDON A, et al. Precision of the IAS monitoring system based on the elapsed time method in the spectral domain[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 44(1-2):14-30.

[8] 曾强. 相位差分编码器原理及其行星轮系故障诊断应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2020.
ZENG Q. Phase differential encoder theory and its application on planetary gear set fault diagnosis[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.

[9] DIAMOND D H, HEYNS P S, OBERHOLSTER A J. Online shaft encoder geometry compensation for arbitrary shaft speed profiles using Bayesian regression[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016(81): 402-418.

[10] 李尕丽, 薛梓, 黄垚,等. 圆光栅测角系统示值误差分析与补偿[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5):59-65.
LI G L, XUE Z, HUANG Y. Indication error analysis and compensation of circular grating angle measurement system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5):59-65.

[11] 冯超鹏, 祝连庆, 潘志康, 等. 一种新的圆光栅偏心参数自标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2016,37(11): 2459-2464.
FENG CH P, ZHU L Q, PAN ZH K, et al. New self-calibration method of circular grating eccentric parameters[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(11): 2459-2464.

[12] 张玉皓, 顾煜炯, 马晓腾, 等. 广义增量编码器瞬时角速度计算的扭振在线测量[J]. 仪器仪表学报, 2020,41(10):187-195.
ZHANG Y H, GU Y T, MA X T, et al. On line torsional vibration measurement based on generalized incremental encoder instantaneous angular speed calculation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020,41(10): 187-195.

[13] 刘鑫. 基于瞬时转速的船用多缸柴油机故障诊断技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
LIU X. Research on fault diagnosis technology of the marine multi-cylinder diesel engine based on the instantaneous speed[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[14] 文晓燕, 郑琼林, 韦克康, 等. 增量式编码器测速的典型问题分析及应对策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2):185-189,209.
WEN X Y, ZHENG Q L, WEI K K, et al. Typical issues analysis and corresponding strategy for incremental encoder speed measurement[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 21(2):185-189,209.

[15] LI B, ZHANG X, WU J. New procedure for gear fault detection and diagnosis using instantaneous angular speed[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017 (85): 415-428.

[16] 刘兵, 卢歆. 高精度编码器细分误差修正方法的研究[J].

电子测量与仪器学报, 2019,33(3):15-20.
LIU B, LU X. Interpolation error analysis of photoelectric encoder based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(3):15-20.

[17] 彭丹, 杨磊, 杨家强. 热膜式气流量传感器指数过渡分段拟合方法[J]. 浙江大学学报:工学版, 2015(10):1990-1998.
PENG D, YANG L, YANG J Q. Curve piecewise fitting method with exponential-curve-transition of hot-film gas flow sensors [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015(10):1990-1998.

[18] 常锦才, 齐雅静, 祝弘扬. 高阶 Hermite 插值的金字塔算法[J]. 河北联合大学学报(自然科学版),2015, 37(4):40-44.
CHANG J C, QI Y J, ZHU H Y. Pyramid algorithm of higher-order Hermite interpolation[J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015,37(4):40-44.

[19] ABBOUD D, MARNISSI Y, ASSOUMANE A, et al. Synchronous analysis of cyclo-non-stationary signals: A comprehensive study with aeronautic applications [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022(168): 108600.

[20] ZENG Q, FENG G, SHAO Y, et al. Planetary gear fault diagnosis based on an instantaneous angular speed measurement system with a dual detector setup[J]. IEEE Access, 2020(8):66228-66242.

[21] 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 S F, FENG ZH P, LIANG M. 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.

作者简介

邹翔,2019 年于中北大学获得学士学位,现为昆明理工大学硕士研究生,主要研究方向为旋转机械故障特征提取。
E-mail: zxkmust@163.com

Zou Xiang received his B. Sc. degree from North University of China in 2019. He is currently a M. Sc. candidate at Kunming University of Science and Technology. His main research interest includes fault feature extraction of rotary machine.

郭瑜(通信作者),2003 年于重庆大学获得博士学位,现为昆明理工大学机电工程学院教授,主要研究方向为机械动态测试技术、振动分析等领域。
E-mail:kmgary@163.com

Guo Yu(Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2003 from Chongqing University. Now he is a professor in Kunming University of Science and Technology. His main research interests include mechanical dynamic testing technology, vibration analysis and other fields.