

文章编号: 1000-8055(2023)12-3000-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220012

基于局部同步拟合和窄带解调的行星传动齿根裂纹故障检测

华健翔, 郭 瑜, 陈 鑫, 樊家伟, 尹兴超

(昆明理工大学 机电工程学院, 昆明 650500)

摘 要: 为实现较少旋转圈数工况下的行星传动齿轮故障检测, 本文提出一种基于局部同步拟合和窄带解调的行星传动齿根裂纹故障检测方法。该方法首先对行星齿轮箱振动信号进行角域重采样, 再采用局部同步拟合方法估计出确定性分量; 随后, 由研究中提出的啮合谐波能量比最大准则自动选择包含齿轮故障信息最丰富的滤波阶次频带, 并进行窄带解调; 最后, 通过幅值解调和相位解调揭示齿轮故障特征。实验和对比结果表明: 该方法可以有效检测出齿根裂纹引起的周期性幅值和相位突变, 且所需数据量较传统的加窗同步平均方法更少, 在少转数工况下的齿根裂纹故障检测具有一定的优势。

关 键 词: 行星减速器; 行星传动; 局部同步拟合; 啮合谐波能量比; 窄带解调

中图分类号: V240.2; TH17

文献标志码: A

Tooth root crack fault detection of planetary transmission based on local synchronous fitting and narrowband demodulation

HUA Jianxiang, GUO Yu, CHEN Xin, FAN Jiawei, YIN Xingchao

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering,

Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to realize the fault detection of planetary transmission gear under the condition of less rotation cycles, a fault detection method for tooth root crack of planetary transmission based on local synchronous fitting and narrowband demodulation was presented. Firstly, the angular domain resampling of the vibration signal was carried out, and then the local synchronous fitting was used to estimate the deterministic component; according to the maximum meshing harmonic energy ratio criterion proposed in the research, the filter order frequency band with the most abundant gear fault information was selected automatically and demodulated; finally, the gear fault characteristics were revealed by amplitude demodulation and phase demodulation. The experimental and comparative results showed that this method can effectively detect the periodic amplitude and phase mutation caused by the root crack, and the amount of data required was less than the traditional windowed synchronous average method. The root crack fault detection under the condition of few revolutions had certain advantages.

Keywords: planetary gearbox; planetary transmission; local synchronization fitting; meshing harmonic energy ratio; narrowband demodulation

收稿日期: 2022-01-10

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)

作者简介: 华健翔(1995—), 男, 硕士生, 主要研究方向为旋转机械故障特征提取。E-mail: 2512111319@qq.com

通信作者: 郭瑜(1971—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要研究方向为振动信号分析、旋转机械故障特征提取。E-mail: kmgary@163.com

引用格式: 华健翔, 郭瑜, 陈鑫, 等. 基于局部同步拟合和窄带解调的行星传动齿根裂纹故障检测[J]. 航空动力学报, 2023, 38(12): 3000-3008.

HUA Jianxiang, GUO Yu, CHEN Xin, et al. Tooth root crack fault detection of planetary transmission based on local synchronous fitting and narrowband demodulation[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(12): 3000-3008.

行星齿轮传动广泛应用于工业机器人旋转矢量(rotary vector, RV)减速器等工业装备中。其齿轮作为关键传动零件, 齿根由于受最大弯曲应力和应力集中, 在长期运行后易出现齿根裂纹^[1]。因此, 其检测成为故障诊断领域的研究热点之一。

行星齿轮传动存在时变传递路径、多源耦合等问题^[2], 且传输路径的变化会导致振动信号的相位发生变化^[3], 因此, 传统的角域同步平均^[4]方法无法有效消除噪声和非同步分量的干扰。为消除时变传递路径的影响, McFadden^[5]提出了加窗同步平均法; Lewicki 等^[6]在此基础上发展了加窗振动分离同步平均技术; 本课题组^[7-9]对加窗振动分离进行了深入研究, 并提出了新的改进方案, 成功用于行星传动齿轮故障特征检测。然而, 加窗振动分离技术需要行星架旋转多圈才能重构出一圈故障齿轮的振动数据, 实现齿轮故障检测需要大量的数据, 不适合工业机器人 RV 减速器等在机械臂一个工作周期内其行星轮级只有较少旋转圈数的场合, 在工程应用中存在一定的局限性。

近来, 国外学者 Abboud 等^[10]提出了局部同步拟合方法, 其能在变速工况下准确估计振动信号的确定性分量, 解决由行星传动时变传递路径引起的相位变化问题, 保留局部特征并抑制噪声。另一方面, 齿轮故障特征频率表现为转频及其倍频, 与转轴频率特征重合^[11], 因此, 仅用频谱分析法通常无法有效确认齿轮是否发生故障。窄带解调技术是检测齿轮故障特征的有效工具, 当齿轮出现局部故障后, 轮齿的刚度会发生变化, 由解调获得的幅值和相位函数可解释齿轮啮合刚度的变化, 并准确判断是否存在齿根裂纹故障。

为解决工业机器人 RV 减速器等只有较少旋转圈数条件下行星传动齿轮故障特征提取难题, 本文提出了一种基于局部同步拟合和窄带解调相结合的行星传动齿根裂纹故障检测方法。该方法运用局部同步拟合技术提取信号的确定性分量, 可解决传递路径导致相位变化而角域同步平均无法运用的问题, 且局部同步拟合所需数据量较少, 在旋转圈数较少工况下的故障特征检测中具有一定的优势。此外, 针对窄带解调需要人为选取滤波阶次的不足, 本文提出运用啮合谐波能量比(meshing harmonic energy ratio, MHER)来自适应选择故障信息较丰富的啮合谐波进行窄带解调, 可减少人为主观因素对故障检测结果的影响, 具有一定的工程意义。

1 局部同步拟合及窄带解调简介

1.1 局部同步拟合

局部同步拟合源于 Savitzky-Golay(S-G)滤波器, 是一种基于局部多项式最小二乘拟合的滤波方法^[10]。其可表示为寻找最小均方误差曲线的过程, 即:

$$\hat{\mathbf{b}}^{(q)}[\tilde{n}] = \arg \min \|\mathbf{J} \mathbf{b}^{(q)}[\tilde{n}] - \mathbf{x}^{(q)}[\tilde{n}]\|^2 \quad (1)$$

式中参考轴旋转周期数 $q=1, \dots, Q$ (Q 为总周期数), $\mathbf{x}^{(q)}[\tilde{n}] = [x_{q-M}[\tilde{n}], \dots, x_{q+M}[\tilde{n}]]^T$ 表示第 q 个周期数据序列, $[\cdot]^T$ 表示转置操作, $\tilde{n} = \text{mod}[(n-1)/N] + 1$ 为周期 N 内的采样点, $\text{mod}(\cdot)$ 表示取余数操作, $x_q[\tilde{n}]$ 表示第 q 个周期中第 $\tilde{n}$ 点, 即 $x[\tilde{n} + (q-1)N]$, $\mathbf{b}^{(q)}[\tilde{n}] = [b_0^{(q)}[\tilde{n}], \dots, b_P^{(q)}[\tilde{n}]]^T$ 表示第 q 个周期数据序列相关的 $P+1$ 阶多项式系数, $\mathbf{J}$ 为 $(2M+1) \times (P+1)$ 维度的矩阵, $\mathbf{J}_{m,p}$ 表示 $\mathbf{J}$ 的元素 (m, p) , $\mathbf{J}_{m,p} = (m-M+1)^{p-1}$, $m \in \{1, \dots, 2M+1\}$, $p \in \{1, \dots, P+1\}$, $\arg \min \|\cdot\|^2$ 表示所求二范数最小。则长度为 $2M+1$ 的第 q 个周期数据序列的最佳拟合数据可表示为^[10]

$$s_m^{(q)}[\tilde{n}] = \mathbf{J} \mathbf{b}^{(q)}[\tilde{n}] = \sum_{p=0}^P b_p^{(q)}[\tilde{n}] \cdot x[n]^p \quad (2)$$

S-G 滤波器是通过卷积操作获得确定性分量, 其计算式可表示为^[10]

$$\hat{d}[\tilde{n} + (q-1)N] = \hat{s}_{M+1}^{(q)}[\tilde{n}] = \mathbf{b}_{M+1}^{(q)}[\tilde{n}] = \mathbf{h}^T \mathbf{x}^{(q)}[\tilde{n}] \quad (3)$$

式中滤波系数 $\mathbf{h}^T = [h_{-M}, \dots, h_M]$, 估计的确定性分量可表示为^[10]

$$\hat{d}[n] = \sum_{i=-MN}^{MN} x[n-i] \tilde{h}_i \quad (4)$$

式中 $n = \tilde{n} + (q-1)N$, $\tilde{\mathbf{h}} = [\tilde{h}_{-MN}, \dots, \tilde{h}_{MN}]$ 。S-G 滤波器在应用中需要设置两个关键参数窗宽 M 和拟合阶次 P , 研究中参考文献^[10]的参数设置, 窗宽取 1001, 拟合阶次取 3。该方法的详细讨论见文献^[10]。

1.2 窄带解调技术简介

含齿根裂纹的齿与其他正常齿啮合时, 由于啮合刚度的突变, 会引起啮合振动幅值和相位的突变, 并由此产生了可揭示该突变的窄带解调技术^[12]。其原理可简述为: 设带通滤波后的角域信号为 $x_m(\theta)$, 经 Hilbert 变换后得到的解析信号 $\tilde{x}_m(\theta)$ 可表示为^[13]:

$$\tilde{x}_m(\theta) = x_m(\theta) + jH[x_m(\theta)] \quad (5)$$

式中 θ 为参考轴转角, $H[\cdot]$ 为 Hilbert 变换。 $x_m(\theta)$ 的幅值解调信号 $\tilde{a}_m(\theta)$ 可表示为^[13]:

$$\tilde{a}_m(\theta) = \frac{|\tilde{x}_m(\theta)|}{A_k} - E[|\tilde{x}_m(\theta)|] \quad (6)$$

式中 $|\cdot|$ 为绝对值运算, A_k 为第 k 阶啮合谐波阶次的幅值, $E[\cdot]$ 为均值运算。 $x_m(\theta)$ 的相位解调信号 $\tilde{b}_m(\theta)$ 可表示为^[13]:

$$\tilde{b}_m(\theta) = \arg[\tilde{x}_m(\theta)] - (2\pi O_k \theta + \phi_m) \quad (7)$$

式中 $\arg[\cdot]$ 为相位函数, O_k 表示第 k 阶啮合谐波阶次, ϕ_m 为初相位。通过幅值解调信号和相位解调信号在相同角度位置的突变检测出齿根裂纹故障。

1.3 基于啮合谐波能量比的滤波频带选择

窄带解调在应用中首先应确定包含故障信息丰富的啮合频带进行带通滤波^[14]。传统上通常由有经验的专家通过观察啮合阶次的边带进行滤波频带选择, 但该方式显然不适合自动检测的需求。为此, 本文提出一种啮合谐波能量比指标来表征每一阶啮合谐波故障信息的丰富程度, 文中用 I_{MHER} 来表示啮合谐波能量比的值。

对于每一阶啮合谐波, 其 I_{MHER} 可表示为

$$I_{\text{MHER}} = \frac{1}{2f_b} (A_m + A_r) \bigg/ \frac{1}{6f_t} B_k \quad (8)$$

式中 f_t 为故障调制频率, f_b 为容差频率, $A_m = \sum_{k f_m - f_b}^{k f_m + f_b} X(f)$ 为考虑容差频率后的啮合频率幅值, $A_r = \sum_{k f_m - i f_t - f_b}^{k f_m - i f_t + f_b} X(f) + \sum_{k f_m + i f_t - f_b}^{k f_m + i f_t + f_b} X(f)$ 为考虑容差频率后的调制频率幅值, $B_k = \sum_{k f_m - 3 f_t}^{k f_m + 3 f_t} X(f)$ 表示第 k 阶啮合谐波的背景噪声, f_m 为齿轮啮合频率, $X(f)$ 为各频率幅值, k 为啮合谐波阶次 ($k = 1, 2, \dots, K$), i 为故障调制频率阶比 ($i = 1, 2, \dots, I$)。

为进一步提高信号的信噪比, 引入绝对中位偏差 (median absolute deviation, MAD) 作为阈值, 文中用 T_{MAD} 表示。频谱中高于阈值的部分被认为具有统计相关性, 而低于阈值的部分可看作背景噪声^[15]。 T_{MAD} 的计算公式可表示为^[15]

$$T_{\text{MAD}} = 1.4826m[X(f) - m[X(f)]] \quad (9)$$

式中 $m[\cdot]$ 为中值运算, $f = [k f_m - 3 f_t, k f_m + 3 f_t]$ 。研究中取频谱中高于 T_{MAD} 的部分进行计算, 当 $X(f) > T_{\text{MAD}}$, $X(f) = X(f) - T_{\text{MAD}}$; 当 $X(f) \leq T_{\text{MAD}}$, $X(f) = 0$ 。需要指出的是, 当信号的信噪比较低时, T_{MAD} 将失去作用。本文在前处理步骤中通过局部同步

拟合技术抑制了背景噪声, 运用 T_{MAD} 可进一步提高信号的信噪比, 更容易检测出齿根裂纹故障。

式(8)可解释为计算各啮合谐波的能量与噪声的比值, 能量比越高, 表示所含故障信息越丰富, 由此, 最优的滤波参数可表示为

$$[f_c, b_w] = \arg \max (I_{\text{MHER}}) \quad (10)$$

式中 $\arg \max (I_{\text{MHER}})$ 表示 I_{MHER} 最大时对应的频带参数, f_c 表示中心频率, b_w 表示频带带宽。研究中 f_c 取 I_{MHER} 最大时对应的 f_m , b_w 取 $6f_t$ 。

由式(8)计算 I_{MHER} 需要设置 4 个关键参数, 即: 齿轮啮合频率 f_m , 最大谐波阶次 K , 频率容差 f_b 和最大调制频率阶比 I 。其中 f_m 可通过传动结构参数计算; 由于啮合阶次随阶数的增大而逐渐衰减, 本文 K 取前 10 阶进行计算; 此外, 由于离散采样的问题, 可能无法准确拾取感兴趣谐波阶次, $(1/5)f_t < f_b \leq (1/3)f_t$ 可有效评估谐波阶次的能量; 故障频率阶比参照文献^[16]取 3 阶。

2 齿根裂纹故障检测

提出的局部同步拟合和窄带解调相结合的齿根裂纹故障检测方法技术路线如图 1。

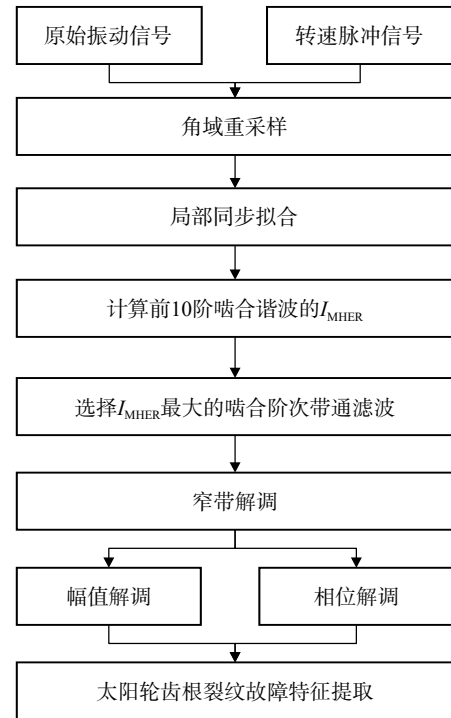


图 1 基于局部同步拟合和窄带解调的行星传动齿根裂纹故障检测流程图

Fig. 1 Flowchart of tooth root crack fault detection of planetary transmission based on local synchronous fitting and narrowband demodulation

主要步骤包括:

1) 原始振动信号角域重采样: 对时域振动信号角域重采样, 将时域非平稳信号转换为角域准平稳信号, 以解决变转速工况下频率模糊问题^[17]。

2) 角域振动信号局部同步拟合: 通过局部同步拟合技术对角域振动信号进行拟合, 有效估计出与转频相关的确定性分量, 保留齿轮故障局部特征。此外, 基于 S-G 滤波器的平滑消噪特性, 局部同步拟合可抑制背景噪声的干扰, 提高信号的信噪比。

3) 根据 I_{MHER} 确定包含齿轮故障信息最丰富的带通滤波阶次: 分别计算频带内各阶啮合谐波的 I_{MHER} 并进行归一化处理, 选择 I_{MHER} 最大时对应的啮合谐波进行带通滤波。值得注意的是, I_{MHER} 为各啮合谐波故障能量同背景噪声的比值, 表示故障信息的丰富程度, I_{MHER} 越大, 则表示故障信息越丰富。

4) 通过窄带解调检测齿根裂纹故障: 对带通滤波信号进行窄带解调, 通过幅值解调和相位解调结果的突变情况可揭示齿根裂纹故障特征。若齿轮存在齿根裂纹故障, 则幅值解调信号会周期性出现幅值局部最小。同样的, 相位解调信号会在相同位置周期性出现相位突变。

3 实验验证

3.1 仿真验证

为验证所提方法的有效性, 分别仿真得到太阳轮和行星轮故障角域振动信号, 其计算式如下^[18]:

$$r(\theta) = \frac{F}{\sqrt{K(\theta)}} \left(\frac{1}{m_{e1}} + \frac{1}{m_{e2}} \right) e^{-\zeta\omega\theta} \sin(\omega\theta) \quad (11)$$

式中 F 表示冲量, $K(\theta)$ 为轮齿啮合刚度, ζ 为阻尼系数, m_{e1} 、 m_{e2} 分别为主、被动齿轮的当量质量, ω 为线性固有频率。研究中 F 设为 0.139, ζ 为 -0.08, m_{e1} 、 m_{e2} 分别为 2 和 0.5, ω 为 1.4 kHz。考虑时变传递路径的太阳轮或行星轮故障仿真信号可表示为^[18]

$$\begin{aligned} X(\theta) &= x_{\text{gr}}(\theta) + x_{\text{gs}}(\theta) \\ x_{\text{gr}} &= W_{\text{nr}}(\theta) r_{\text{gr}}(\theta) \\ x_{\text{gs}} &= W_{\text{ns}}(\theta) r_{\text{gs}}(\theta) \end{aligned} \quad (12)$$

式中 $x_{\text{gr}}(\theta)$ 为行星轮与齿圈啮合的振动信号, $W_{\text{nr}}(\theta)$ 为行星轮和齿圈啮合的时变传递路径, $r_{\text{gr}}(\theta)$ 为行星轮与齿圈啮合整周期的啮合冲击响应, $x_{\text{gs}}(\theta)$ 为太阳轮与行星轮啮合的振动信号, $W_{\text{ns}}(\theta)$ 为

太阳轮和行星轮啮合的时变传递路径, $r_{\text{gs}}(\theta)$ 为太阳轮与行星轮啮合整周期的啮合冲击响应。研究中增大故障齿轮相应啮合点的冲击即可得到太阳轮或行星轮故障仿真信号模型, 详细讨论见文献^[18]。

仿真信号相关参数如下: 设每转采样点数为 2048 点, 太阳轮齿数为 33, 行星轮齿数为 19, 齿圈齿数为 72, 齿轮啮合阶比为 72 阶, 太阳轮故障阶比为 2.18 阶, 行星轮故障阶比为 3.79 阶。

3.1.1 太阳轮仿真分析

获得的太阳轮故障仿真信号如图 2 所示。首先对太阳轮故障仿真信号进行局部同步拟合, 所得局部同步拟合信号及其阶比谱如图 3(a)、图 3(b) 所示, 可清楚看出局部同步拟合后信号的背景噪声和非同步分量明显受到抑制。然后, 计算前 10 阶啮合谐波的归一化 I_{MHER} 见图 3(c), 可看出第 3 阶啮合谐波的 I_{MHER} 最大, 对其进行带通滤波(f_c 为 216 阶, b_w 为 14 阶)后窄带解调, 窄带解调结果如图 3(d)、图 3(e) 所示。从图中可看出随着太阳轮旋转一圈, 幅值解调信号会出现幅值局部最小, 相位解调信号在相同位置出现相位突变, 且两种变化均随着太阳轮的旋转周期性出现, 该变化揭示了太阳轮齿根裂纹故障的存在。

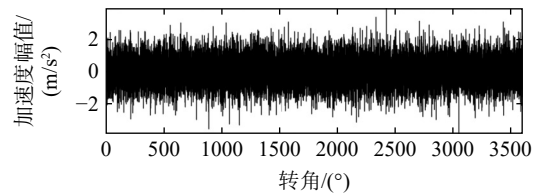


图 2 太阳轮故障仿真信号

Fig. 2 Simulated signal of sun gear fault

3.1.2 行星轮仿真分析

同理, 获得行星轮故障仿真信号如图 4 所示。所得局部同步拟合信号及其阶比谱如图 5(a)、图 5(b) 所示, 可清楚看出局部同步拟合后信号的背景噪声和非同步分量明显受到抑制。然后, 计算前 10 阶啮合谐波的归一化 I_{MHER} 见图 5(c), 可看出第 5 阶啮合谐波的 I_{MHER} 最大, 对其进行带通滤波(f_c 为 360 阶, b_w 为 23 阶)后窄带解调, 窄带解调结果如图 5(d)、图 5(e) 所示。从图中可看出随着行星轮旋转一圈, 幅值解调信号会出现幅值局部最小, 相位解调信号在相同位置出现相位突变, 且两种变化均随着行星轮的旋转周期性出现, 该变化揭示了行星轮齿根裂纹故障的存在。

3.2 测试实验

研究中使用 75 kW 的行星齿轮箱传动实验台

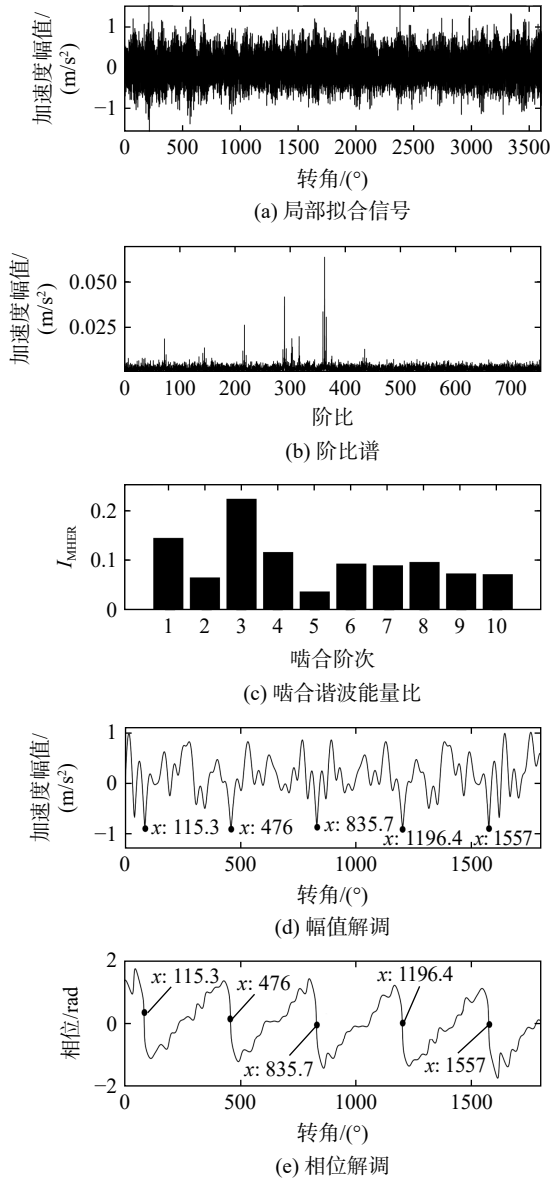


图 3 太阳轮故障仿真信号特征提取

Fig. 3 Feature extraction of simulated sun gear fault

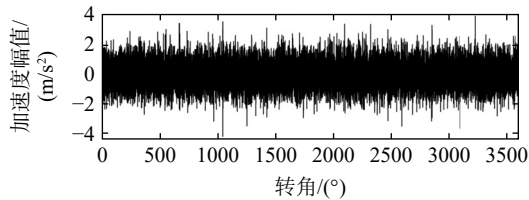


图 4 行星轮故障仿真信号

Fig. 4 Simulated signal of plant gear fault

对所提方案进行验证。单级行星减速器实验台如图 6 所示,其减速器参数见表 1,传感器安装位置如图 7。为模拟齿根裂纹故障,采用线切割的方式在齿轮齿根处加工一条裂纹,太阳轮及行星轮齿根裂纹故障如图 8 所示。实验过程中,使用的采集卡型号为 NI 9234,采样频率为 51.2 kHz。

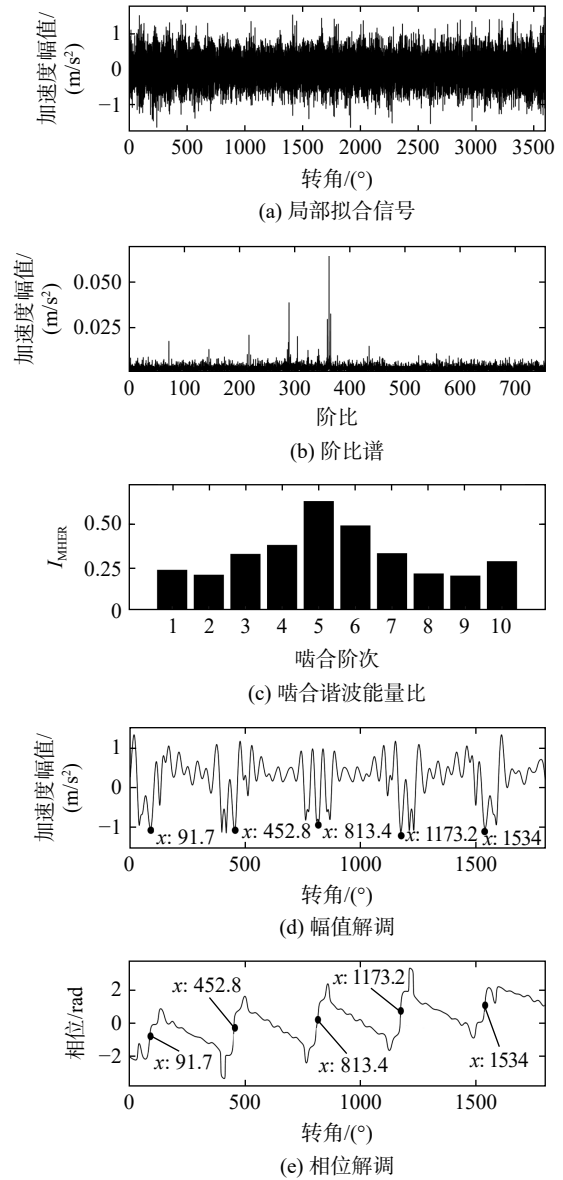


图 5 行星轮故障仿真信号特征提取

Fig. 5 Feature extraction of simulated planet gear fault

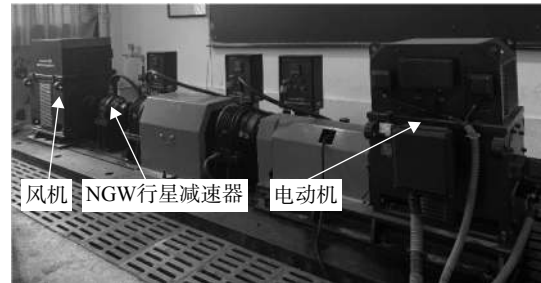


图 6 行星减速器实验台

Fig. 6 Planetary gearbox experiment rig

根据行星传动理论和行星减速器参数计算出行星传动相关阶比见表 2。

3.2.1 太阳轮故障分析

通过加速度传感器采集的太阳轮故障原始振

表 1 行星减速器参数

Table 1 Parameters of example planetary reducer

齿轮	齿数	径向变位系数
行星轮 N_p (3 个)	20	0.754
太阳轮 N_s	28	0.529
齿圈 N_r	71	0.162

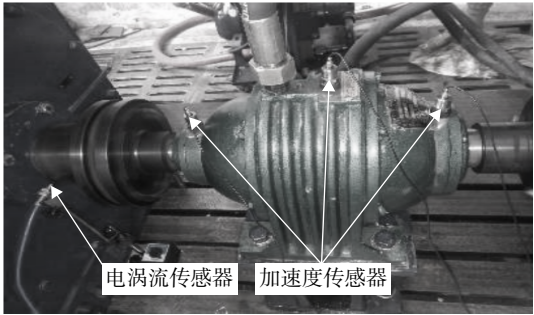


图 7 单级行星减速器

Fig. 7 Single stage planetary reducer

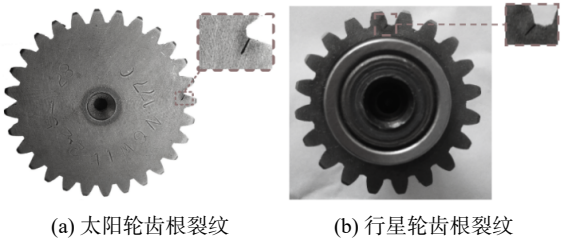


图 8 齿轮故障

Fig. 8 Gear fault

表 2 行星传动相关阶比

Table 2 Related orders of planetary transmission

特征阶比	阶比
行星架旋转阶比 O_c	1
啮合阶比 O_m	71
太阳轮故障阶比 O_s	2.53
行星轮故障阶比 O_p	3.55

动信号的时域波形如图 9 所示。首先对振动信号等角度重采样,再对角域信号进行局部同步拟合,所得确定性分量的角域信号见图 10(a),对应的阶比谱见图 10(b)(显示前 10 个啮合阶次)。计算前 10 阶啮合谐波归一化的 I_{MHER} ,其结果见图 10(c)。可以发现,第 3 啮合阶次的 I_{MHER} 最大,对第 3 啮合阶次进行带通滤波(f_c 为 213 阶, b_w 为 16 阶)以及窄带解调分析,其结果见图 10(d)、图 10(e)。可见,通过幅值解调和相位解调可看到太阳轮每转一圈,均在相同的角度位置分别出现幅值局部

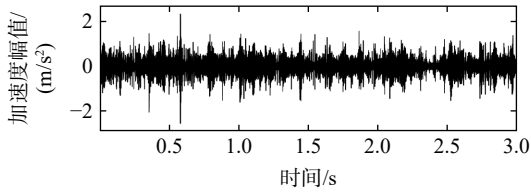
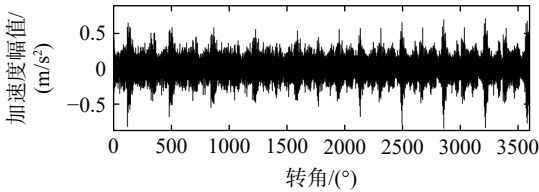
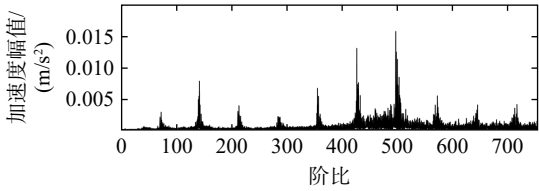


图 9 太阳轮故障时域信号

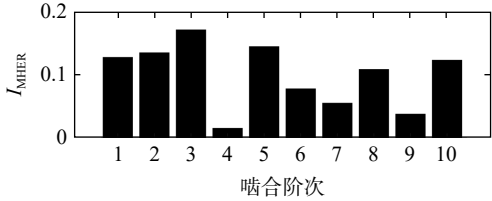
Fig. 9 Time domain signal of Sun gear fault



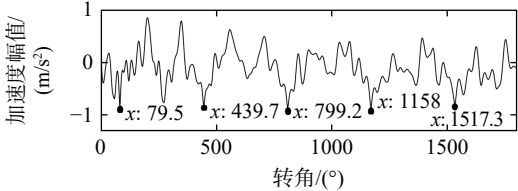
(a) 局部拟合信号



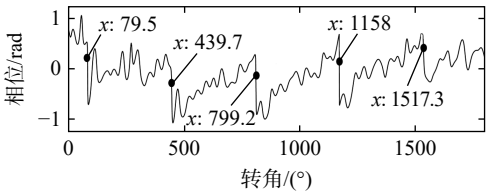
(b) 阶比谱



(c) 啮合谐波能量比



(d) 幅值解调



(e) 相位解调

图 10 太阳轮故障信号特征提取

Fig. 10 Feature extraction of sun gear fault

最小和相位突变,该变化对应太阳轮齿根裂纹的故障特征。

另一方面,为证明本文方法所用数据量较少,在旋转圈数较少工况下齿根裂纹故障检测下的优势,与传统加窗振动分离同步平均方法进行了对比。根据文献 [3],取长度为 15 圈的拼接太阳轮

振动数据为一段进行平均,每次平移一圈拼接太阳轮振动数据的距离进行截取,则平均 10 次需要的拼接太阳轮振动数据为 25 圈。由于行星架每旋转一圈仅能截取 1 个齿的数据,则拼接一圈太阳轮振动数据需要的行星架旋转圈数为 28,因此,拼接 25 圈太阳轮振动数据需要行星架旋转 $28 \times 25 = 700$ 圈对应的振动数据。对同步平均信号进行窄带解调,其解调结果见图 11。需说明的是,加窗振动分离信号是由离传感器最近处对信号进行截取的数据块拼接而成,而局部同步拟合信号通过是对振动信号中的确定性分离进行拟合获得,由于传递路径的影响导致信号幅值相对较低,两者信号结构和幅值均存在差异,导致两种方法窄带解调结果的波形不同。但两种方法的窄带解调结果均在相同的角度位置分别出现幅值局部最小和相位突变,对应太阳轮齿根裂纹的故障特征。证明了本文方法能有效实现太阳轮齿根裂纹故障特征检测。

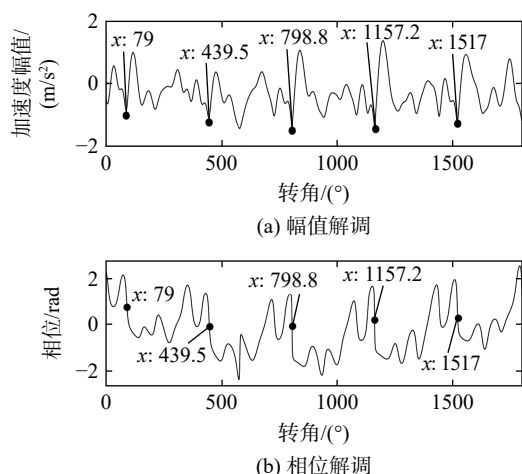


图 11 太阳轮故障信号加窗同步平均窄带解调结果

Fig. 11 Narrowband demodulation results of windowed vibration separation of sun gear fault

3.2.2 行星轮故障分析

通过加速度传感器采集的行星轮故障原始振动信号的时域波形见图 12。同理,对振动信号等角度重采样,再对角域信号进行局部同步拟合,所得信号及对应的阶比谱分别见图 13(a)、图 13(b)。计算前 10 阶啮合谐波归一化的 I_{MHER} , 其结果见图 13(c)。选择 I_{MHER} 最大的第 3 啮合阶次进行带通滤波(f_c 为 213 阶, b_w 为 22 阶)及窄带解调分析,其结果见图 13(d)、图 13(e)。可见,由幅值解调和相位解调信号可看到行星轮每转一圈,均在相同的角度位置分别出现幅值局部最小和相位突变,

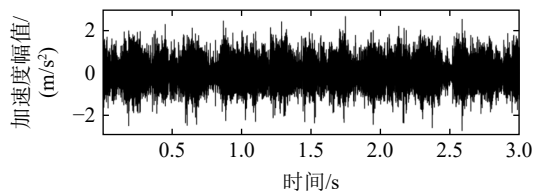
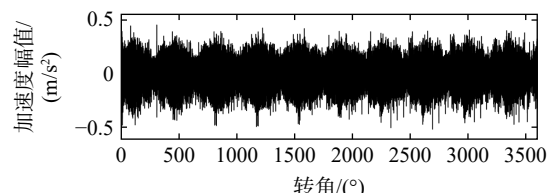
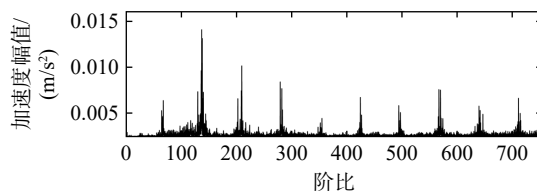


图 12 行星轮故障时域信号

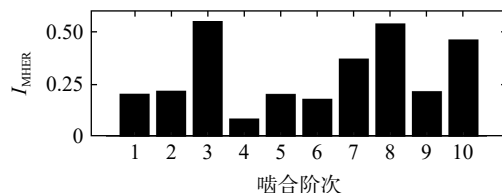
Fig. 12 Time domain signal of plant gear fault



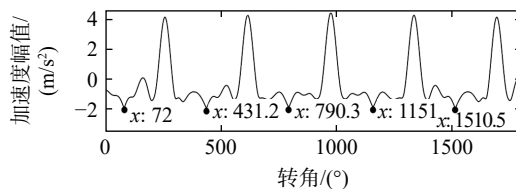
(a) 局部拟合信号



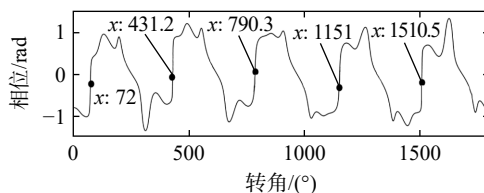
(b) 阶比谱



(c) 啮合谐波能量比



(d) 幅值解调



(e) 相位解调

图 13 行星轮故障信号特征提取

Fig. 13 Feature extraction of plant gear fault

该变化对应行星轮齿根裂纹的故障特征。

同理,用传统的加窗振动分离同步平均方法进行对比。平均 10 次需要的拼接行星轮振动数据为 25 圈,拼接一圈行星轮振动数据需要的行星架旋转圈数为 20,因此,拼接 25 圈行星轮振动数据需要行星架旋转 $20 \times 25 = 500$ 圈对应的振

动数据。对同步平均信号进行窄带解调,其解调结果见图 14。两种方法所得结果均在相同的角度位置分别出现幅值局部最小和相位突变,该变化对应行星轮齿根裂纹的故障特征。证明了本文方法能有效检测出行星轮齿根裂纹故障特征。

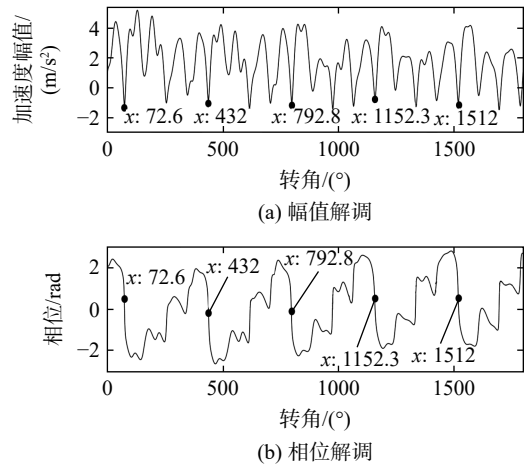


图 14 行星轮故障信号加窗同步平均信号的窄带解调结果
Fig. 14 Narrowband demodulation results of windowed vibration separation of plant gear fault

本文分别通过仿真信号和实验信号对所提方法进行了验证,对比两者的故障检测结果,由于仿真信号对齿轮箱振动进行了一定简化,而实测信号所受干扰较大,虽然窄带解调结果波形存在一定区别,但其在相同位置周期性出现幅值局部最小值和相位突变结果基本一致,证明了本文方法对行星传动齿根裂纹故障特征检测的有效性。

3.3 不同方法所需行星架旋转圈数比较

本文所提方法和加窗振动分离同步平均法所需行星架旋转圈数对比见表 3。需要指出的是,研究中太阳轮旋转 10 圈时行星架的旋转圈数为 2.83,行星轮旋转 10 圈时行星架的旋转圈数为 3.92。从表中可看出,本文所提方法需要的行星架旋转圈数远小于传统方法。因此,本文所提方法在工业机器人 RV 减速器等机械臂一个工作周期内旋转圈数较少等场景下具有较好的优势。

表 3 行星架旋转圈数比较

Table 3 Required cycles of planet carrier

方法	行星架旋转圈	
	太阳轮	行星轮
局部同步拟合	2.83	3.92
加窗振动分离同步平均	700	500

4 结 论

本文提出了一种基于局部同步拟合和窄带解调的行星传动齿根裂纹故障特征检测方法。该方法具有以下优势:

1) 将局部同步拟合和窄带解调相结合,适合工业机器人等旋转圈数较少工况的行星传动齿根裂纹故障检测;

2) 提出运用 I_{MHER} 指标自适应选择包含故障信息丰富的啮合阶次,克服了传统窄带解调根据经验选取带通滤波阶次的缺陷。

参考文献:

[1] 包文杰,涂晓彤,李富才,等.参数化的短时傅里叶变换及齿轮箱故障诊断[J].振动、测试与诊断,2020,40(2): 272-277, 417.
BAO Wenjie, TU Xiaotong, LI Fucui, et al. The adaptive short-time Fourier transform method based on fast path optimization and its application for fault diagnosis of planetary gearbox[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(2): 272-277, 417. (in Chinese)

[2] 冯志鹏,赵锦镭,褚福磊.行星齿轮箱齿轮局部故障振动频谱特征[J].中国电机工程学报,2013,33(5): 119-127, 19.
FENG Zhipeng, ZHAO Leilei, CHU Fulei. Vibration spectral characteristics of localized gear fault of planetary gearboxes[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(5): 119-127, 19. (in Chinese)

[3] 王波,王志乐.变工况下太阳轮故障的非平稳振动信号分析[J].太阳能学报,2020,41(7): 298-303.
WANG Bo, WANG Zhile. Analysis of sun gear fault non-stationary vibration signals under variable working conditions[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(7): 298-303. (in Chinese)

[4] GUO Yu, WU Xing, NA Jing, et al. Envelope synchronous average scheme for multi-axis gear faults detection[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 365: 276-286.

[5] MCFADDEN P D. A technique for calculating the time do main averages of the vibration of the individual planet gears and the Sun gear in an epicyclic gearbox[J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 144(1): 163-172.

[6] LEWICKI D, SAMUEL P, CONROY J, et al. Planetary transmission diagnostics[R]. NASA CR 213068, 2004.

[7] GUO Yu, ZHAO Lei, WU Xing, 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.

[8] GUO Yu, ZHAO Lei, WU Xing, et al. Tooth root crack detection of planet and Sun gears based on resonance demodulation and vibration separation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(1): 65-75.

[9] 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, 444.
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, 444. (in Chinese)

[10] ABBOUD D, MARNISSI Y, ASSOUMANE A, et al. Syn-

- chronous analysis of cyclo-non-stationary signals: a comprehensive study with aeronautic applications[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 168: 108-114.
- [11] 陈伟, 王友仁, 孙灿飞, 等. 行星齿轮箱耦合调制振动信号分离与故障诊断[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(5): 1112-1120.
CHEN Wei, WANG Youren, SUN Canfei, et al. Coupled modulated vibration signal component separation and fault diagnosis of planetary gearbox[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(5): 1112-1120. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] 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)
- [14] 王丹凤, 郭瑜, 伍星. 幅值和相位解调的行星架裂纹故障特征提取[J]. *振动工程学报*, 2021, 34(5): 1085-1091.
WANG Danfeng, GUO Yu, WU Xing. Fault feature extraction of planetary carrier crack by amplitude and phase demodulation[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2021, 34(5): 1085-1091. (in Chinese)
- [15] MAURICIO A, SMITH W A, RANDALL R B, et al. Improved Envelope Spectrum via Feature Optimisation-gram (IESFOgram): a novel tool for rolling element bearing diagnostics under non-stationary operating conditions[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 144: 106891.
- [16] 王平, 廖明夫. 滚动轴承故障诊断的自适应共振解调技术[J]. *航空动力学报*, 2005, 20(4): 606-612.
WANG Ping, LIAO Mingfu. Adaptive demodulated resonance technique for the rolling bearing fault diagnosis[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2005, 20(4): 606-612. (in Chinese)
- [17] 郭瑜, 秦树人. 无转速计旋转机械升降速振动信号零相位阶比跟踪滤波[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(3): 50-54.
GUO Yu, QIN Shuren. Tacholeless order tracking filtering for Run-up or coast down vibration signal of rotating machinery based on zero-phase distortion digital filtering[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(3): 50-54. (in Chinese)
- [18] 樊家伟. 行星齿轮箱智能故障诊断及其齿轮振动仿真[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021: 33-45.
FAN Jiawei. Intelligent fault diagnosis and vibration simulation of gear in planetary gearbox[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021: 33-45. (in Chinese)

(编辑: 王碧琚)