

利用伺服电机自带编码器的齿轮局部故障检测

樊家伟, 郭瑜, 尹兴超, 邹翔, 王红伟

(昆明理工大学机电工程学院, 云南昆明 650550)

摘要: 提出一种使用伺服电机自带的编码器进行齿轮局部故障检测的方法, 无需安装外置传感器, 直接对自带编码器的信号进行数据处理实现齿轮局部故障的特征提取。从伺服电机自带编码器中引出信号采集接线, 使用高速计数器记录旋转编码器角度位置脉冲上升沿之间的时间间隔; 通过编码器信号计算瞬时角速度 (instantaneous angular speed, IAS) 信号, 并在角域和阶次域对 IAS 信号进行分析和特征提取, 实现齿轮局部故障的检测。以行星齿轮箱齿轮局部故障检测为例, 通过试验对所提方法进行验证, 结果表明, 使用伺服电机自带编码器可有效实现低转速、变转速工况下的齿轮局部故障检测。

关键词: 故障检测; 齿轮; 伺服电机自带编码器; 变转速工况; 瞬时角速度信号

中图分类号: TH165+.3; TH132.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2025)04-0869-08

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2025.04.022

Localized fault detection of gear with servo motor built-in encoder

FAN Jiawei, GUO Yu, YIN Xingchao, ZOU Xiang, WANG Hongwei

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650550, China)

Abstract: Currently, gear fault detection based on vibration, acoustic emission, and other signals requires the installation of additional sensors. This approach faces limitations in terms of sensor placement, high sensor cost, and difficulties in analyzing signals due to modulation effects in gear systems with variable transmission paths, such as planetary gearboxes. A method for diagnosing local gear faults using the built-in encoder of the servo motor is proposed in this paper. Using the output signal of the built-in encoder to extract the feature related to local gear faults. The encoder signal acquisition wiring is drawn from the built-in encoder of the servo motor, and a high-speed counter is used to record the time interval between the rising edges of the angular position pulses of the rotary encoder. The instantaneous angular speed (IAS) signal is calculated, and the IAS signal is analyzed and feature extracted in the angular and order domains to achieve local gear fault detection. Taking the planetary gearbox gear localized fault detection as an example, the proposed method is validated through experiments. Results show that using the built-in encoder of the servo motor can effectively achieve the detection of gear partial faults under low and variable speed conditions. This provides a new approach to fault detection of transmission units such as gearboxes in applications driven by servo motors.

Keywords: fault detection; gear; servo motor built-in encoder; variable speed condition; instantaneous angular speed

齿轮传动作为机械传动中最重要的传动形式之一, 也是故障检测与诊断领域的重要研究对象^[1-2]。目前针对齿轮的故障检测和诊断大都基于振动^[3]或者声发射^[4]等信号。然而使用此类信号进行故障检测时通常需安装外置传感器及信号采集设备, 存在传感器安装位置受限、成本较高, 以及在周转轮系中易受信号时变传递路径影响等问题, 在低速、变转速工况下进行信号处理和分析也存在一定的局限^[5-6]。因此, 研究不受传感器安装位置影响、成本较低的故障检测途径对工程应用有重要价值。

近年来, 基于旋转编码器信号的故障检测由于特有的优势引起了国内外学者的关注和研究。旋转编码器与轴系直接相连, 由编码器获得的信号计算而来的瞬时角速度 (instantaneous angular speed, IAS) 信号中包含丰富的故障信息, 可以作为故障诊断的有效数据, 例如: BOURDON 等^[7]通过采集安装在输出轴上的编码器的数据, 分析轴承 IAS 信号中的扭振信息, 实现了轴承的故障诊断; ZHAO 等^[8]将编码器外置安装在行星齿轮箱的传动轴上并获取其信号, 然后使用峭度引导的局部多项式微分器

收稿日期: 2023-06-15; 修订日期: 2023-10-17

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

(KLPD)得到行星齿轮箱的IAS信号,实现了齿根故障的检测;欧曙东等^[9]在行星齿轮箱的输入轴和输出轴上安装编码器,基于编码器信号使用快速主成分追踪(fast principal component pursuit, FPCP)算法实现低转速工况下行星齿轮箱的故障诊断;尹兴超等^[10]结合编码器信号的优势,提出一种基于编码器信号窄带解调技术的太阳轮故障检测方法,在齿轮箱输出端安装外置编码器,实现低转速下行星齿轮箱的局部故障检测。编码器还具有以下优势:编码器与行星齿轮箱的输入轴同轴安装,可以避免基于振动信号的故障诊断方法中由于信号时变传递路径所导致的问题^[11-12];编码器采集的是轴系的转速、转角信号,受外界噪声干扰较小;编码器在低转速工况下仍能采集到故障导致的转速波动信息,而振动传感器低频响应的截止频率受限、低转速下故障激起的振动能量较弱,难以采集到高信噪比的信号;编码器采集的信号与角度严格对应,无需进行阶次跟踪,即可直接用于变转速工况下的分析,因此由编码器信号获得的IAS信号更易分析处理。研究中注意到,伺服电机在工业机器人、数控机床等高端装备中大量使用^[13-14],其自带用于精确控制角度、转速的旋转编码器,若能使用伺服电机自带的编码器获取信号进行机械系统的故障检测,则可以有效解决外置传感器安装受限和成本高等问题,但目前基于伺服电机自带编码器进行故障检测的相关研究尚未开展。

综上所述,本文提出一种基于伺服电机自带编码器信号的齿轮故障检测方法。首先从自带编码器中获得记录旋转编码器角度位置的脉冲信号,由此计算得到IAS信号,然后在角域和阶次域分别对IAS信号进行分析和故障特征提取,实现齿轮局部故障的检测。最后以行星齿轮箱齿轮局部故障为例,在试验台上对所提方法进行试验,验证了本文所提方法的有效性。

1 伺服电机自带编码器信号采集

1.1 增量式光电编码器

增量式光电编码器是伺服电机中最常用的编码器^[15],其主要功能是检测电机运动的角度和速度,结构如图1所示,由光栅编码盘、光源及其对应的感光元器件组成。编码器中光栅盘的刻线间隔均等,每转过一个分辨率区间,编码器输出一个增量脉冲方波。

光源与感光元器件位于编码盘的两侧,光源A和光源B用于生成A、B相的正交编码信号。在编

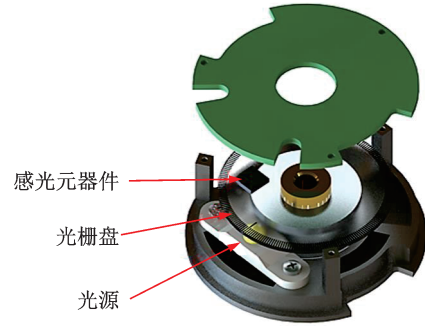


图1 增量式光电编码器结构

Fig. 1 Structure of incremental photoelectric encoder

码盘的内圈零位处刻有一个光栅,用于产生零位信号,即Z相。当编码盘旋转,其光栅经过光源时感光元器件便会接收到透过光栅的光学信号并将其转化为电信号以高低电平的方式输出,两个上升沿之间的时间对应一个光栅转过的角度,光栅编码器A、B、Z三个相位的波形如图2所示,图中M表示编码器的分辨率(线数),即每转的脉冲数。A、B相的信号在制造时严格保证这两个信号的相位差为 90° ,根据A、B相信号的超前和滞后可以判断电机的旋转方向。

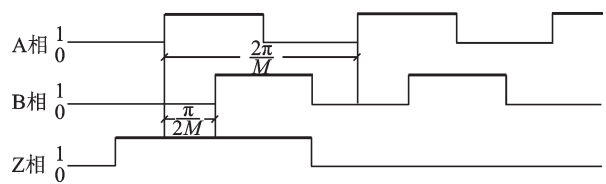


图2 A、B、Z相位波形示意图

Fig. 2 Schematic diagram of waveforms of phases A, B and Z

1.2 信号获取

伺服电机自带的增量式光电编码器输出信号包括A、B、Z三相位置信号和U、V、W三相互差 120° 的霍尔信号。这些输出信号中,输出的A、B、Z相信号用于反映转子在运动中的位置变化和速度,U、V、W相信号按照一定的时间顺序输出脉冲构成一低压三相电源用于控制电机的旋转^[16]。A、B和Z相信号包含转子旋转的角度位置和转速信息,可用作旋转机械故障检测的信号来源。

伺服电机驱动器以固定时间间隔通过计数器获取编码器信号,从而测得当前角度位置和旋转速度,实现对电机旋转速度和角度的反馈控制。然而电机驱动器访问计数器的时间间隔相对于故障检测所需的采样频率较低,不适合故障检测。研究中在编码器信号接入电机驱动器之前直接对A、B、Z三相信号进行采集,用于IAS信号的精确估计。将自带编码器的A、B、Z三相信号分别分为两路,其中一路输入伺服电机驱动器用来反馈编码器的旋转角度、调

整电机旋转位置,另外一路连接一个高速计数器,该高速计数器用于记录旋转编码器角度位置脉冲之间的时间间隔。用于控制伺服电机运动和采集伺服电机自带编码器信号的编码器接线如图3所示,图中VCC和GND分别为电源和接地连线,用于为电路提供工作电压。

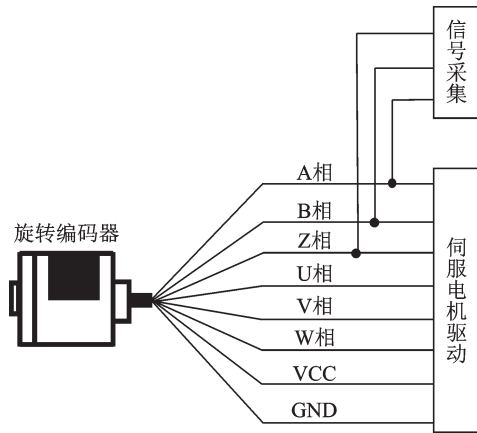


图3 伺服电机自带编码器接线示意图

Fig. 3 Wiring diagram of servo motor built-in encoder

2 基于自带编码器信号的故障检测

2.1 IAS 信号估计方法

使用伺服电机自带编码器信号对齿轮进行故障检测,首先需要获取编码器信号并将编码器脉冲信号转换为IAS信号。研究中使用T法^[17]对被采集伺服电机自带编码器的相邻编码脉冲上升沿之间的时间间隔 Δt_i 进行记录。设高速计数器获取的第*i*个($i=1,2,3,\dots$)编码器脉冲上升沿的角度为 φ_i ,编码器的线数为*M*,则两编码器脉冲信号之间的相邻光栅间隔角度 $\Delta\varphi=2\pi/M$ 。通过向前差分法^[18]将采集到的编码器信号转换为IAS信号,即

$$v(\varphi_i) = \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{\Delta t_i} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t_i} \quad (1)$$

式中, $v(\varphi_i)$ 为在编码器角度 φ_i 处的IAS信号。

2.2 齿轮局部故障检测

基于自带编码器信号的齿轮局部故障检测方法的流程图如图4所示,具体步骤如下:

(1)从伺服电机自带编码器中引出A、B、Z三相角度位置信号接线,通过高速计数器使用T法采集脉冲信号,并记录角度位置脉冲信号中相邻脉冲上升沿之间的时间间隔 Δt_i 。

(2)使用向前差分算法将采集到的编码器脉冲信号转换为IAS信号。

(3)使用S-G(Savitzky-Golay)滤波器进行误差

抑制,S-G滤波是基于局域多项式最小二乘法拟合的滤波方法,根据编码器的线数确定合适的滤波窗长和拟合阶次,对获得的IAS信号进行滤波可以降低信号中的随机误差及编码器刻线位置等误差的干扰^[19]。

(4)在角域和阶次域对IAS信号进行数据处理及故障特征提取,实现齿轮局部故障的检测和诊断。

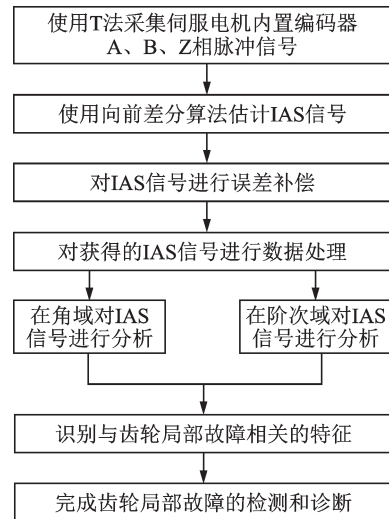


图4 本文方法流程图

Fig. 4 Flow chart of proposed method

3 试验研究

3.1 试验简介

在如图5所示的行星齿轮箱传动试验台上进行试验,该传动试验台由一个伺服电机、一个NGW型行星齿轮箱和一个磁粉制动器及电机驱动器组成,伺服电机自带编码器为2500线的增量式光电编码器,行星齿轮箱的输入轴为太阳轮,输出轴为行星架。为验证本文方法的有效性,从试验台中伺服电机自带编码器引出接线采集自带编码器信号,另外在行星齿轮箱输出轴安装一个用来对比的2500线的外置编码器。

研究中,为使伺服电机自带编码器同时用于反馈调整电机转速及角度位置和输出用于故障检测的

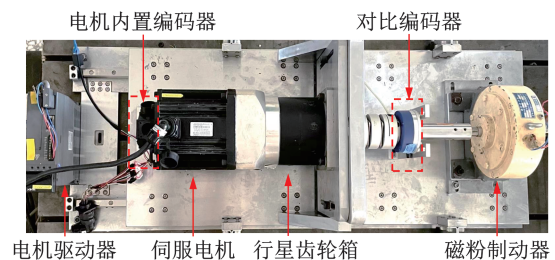


图5 行星齿轮箱传动试验台

Fig. 5 Planetary gearbox transmission test bench

信号,按照 1.2 节接线方式将自带编码器接线中 A、B、Z 三相信号分为两路,引出接线如图 6 所示。将伺服电机自带编码器及用于对比的外置编码器连接至由微处理器芯片、高速时钟芯片和数据传输接口组成的高速计数器。所用高速计数器的时钟频率为 40 MHz,采集方式为等角度采样,即每个光栅通过感光元器件时,在 TTL 输出信号的上升沿触发采样。通过高速计数器记录编码脉冲上升沿的时间点,通过微处理器得到相邻编码脉冲上升沿之间的时间间隔,然后通过传输接口传输至 PC 保存。试验中同时采集自带编码器及外置编码器的信号。

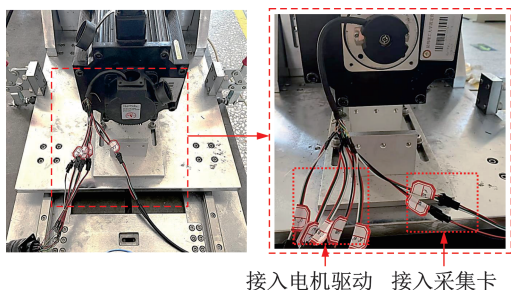


图 6 伺服电机自带编码器及引出的接线
Fig. 6 Servo motor built-in encoder and wiring

试验台中所用的 NGW 行星齿轮箱相关参数如表 1 所示。为模拟太阳轮局部故障,在太阳轮的一个齿上采用电火花加工一个深度约为 0.4 mm 的齿面剥落故障,如图 7 所示。

表 1 行星齿轮箱参数

Tab. 1 Planetary gearbox parameters

齿轮	齿数
太阳轮	$N_s = 21$
行星轮	$N_p = 31$
齿圈	$N_r = 84$

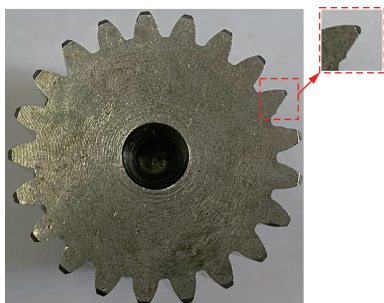


图 7 人造故障太阳轮
Fig. 7 Artificial fault of sun gear

根据行星齿轮箱传动理论^[20]可知,行星齿轮箱的传动比 n 为:

$$n = \frac{N_r}{N_s} + 1 \quad (2)$$

啮合阶次 O_m 计算公式如下式所示:

$$O_m = N_r O_c = N_p (O_p + O_c) = N_s (O_s - O_c) \quad (3)$$

式中, O_s 为太阳轮旋转阶次; O_p 为行星轮旋转阶次; O_c 为行星架旋转阶次。

则太阳轮相对于行星架的相对旋转阶次为:

$$O_s - O_c = O_c \frac{N_r}{N_s} \quad (4)$$

太阳轮旋转一圈,故障轮齿与 3 个行星轮分别啮合一次,故太阳轮故障阶次为 $O_{rs} = 3(O_s - O_c)$ 。

根据研究中使用行星齿轮箱的齿数,分别计算得到以太阳轮旋转频率为参考和以行星架旋转频率为参考的特征阶次,如表 2 所示。

表 2 行星齿轮箱特征阶次

Tab. 2 Characteristic orders of planetary gearbox

参考方式	啮合阶次	行星架 旋转阶次	太阳轮 旋转阶次	太阳轮 故障阶次
以太阳轮 为参考	16.8	0.2	1.0	2.4
以行星架 为参考	84	1	5	12

3.2 恒定转速工况

在恒定转速工况下采集伺服电机自带编码器和输出端外置编码器的信号,转换为 IAS 信号后在角域和阶次域进行分析,验证基于伺服电机自带编码器信号的故障检测方法。试验中,设置伺服电机的输入转速为 200 r/min,磁粉制动器的电压设置为 10 V,采样时长设为 180 s。

首先在正常状态下,对行星齿轮箱传动试验台中两个编码器信号进行采集,计算得到自带编码器的 IAS 信号如图 8(a)所示,外置编码器的 IAS 信号如图 8(b)所示,可以观察到自带编码器采集到的转速为 200 r/min,外置编码器采集到的转速为 40 r/min,与研究用行星齿轮箱的传动比 $n=5$ 相对应。

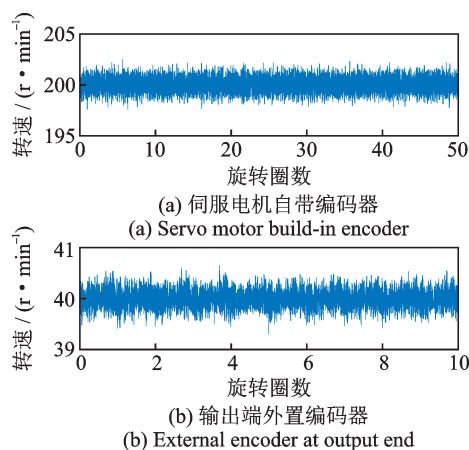


图 8 正常状态下的 IAS 信号

Fig. 8 IAS signals in normal condition

之后对太阳轮故障状态下行星齿轮箱传动试验台的两个编码器信号进行采集,计算得到自带编码器的IAS信号如图9(a)所示,外置编码器的IAS信号如图9(b)所示,从图中可以观察到输入和输出的转速与正常状态大体一致。在角域中对正常状态和太阳轮局部故障状态下两编码器获得的IAS信号进行对比分析。正常与故障状态下自带编码器获得的IAS信号对比如图10(a)所示,正常与故障状态下外置编码器采集的转速信号对比如图10(b)所示。从图中可以看出,与正常状态相比,太阳轮故障状态下两编码器采集的转速信号中均出现了由故障引起的转速周期性波动。

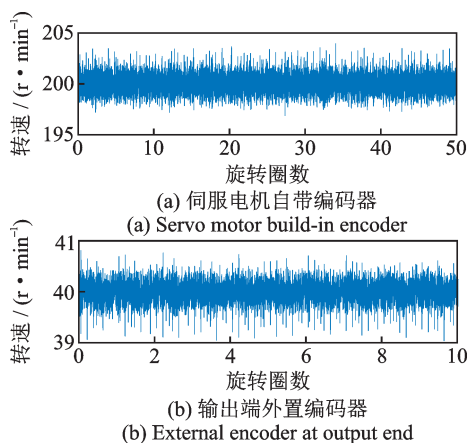


图9 太阳轮故障状态下的IAS信号

Fig. 9 IAS signals under sun gear fault condition

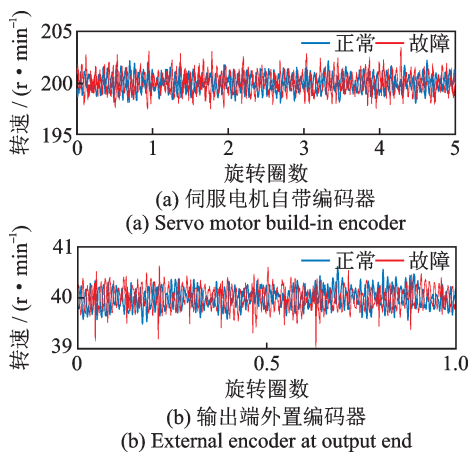


图10 正常与故障状态下的IAS信号对比

Fig. 10 Comparison of IAS signals under normal and fault conditions

在阶次域中对正常状态和太阳轮局部故障状态下自带编码器获得的IAS信号进行对比分析。对两组不同状态下的自带编码器IAS信号作傅里叶变换,分别得到正常状态下和太阳轮局部故障状态下自带编码器IAS信号的阶次谱,如图11(a)和(b)所示。可以看出,正常状态下自带编码器的IAS信号阶次谱中与故障阶次 O_s 相关的谱线及边带均不明

显,太阳轮故障状态下自带编码器的IAS信号阶次谱中出现了较为明显的与故障阶次 O_s 相关的谱线及边带,啮合阶次的边带中出现与故障阶次相关的边带可以说明故障的存在^[21],因此证明太阳轮存在局部故障。由于在电机运行过程中,电机轴转速信号中会出现与电机磁极对数相对应的频率分量^[22],研究中使用的电机磁极对数为5,因此在正常和故障信号的阶次谱中均出现了与5阶及其倍数相关的阶次谱线。

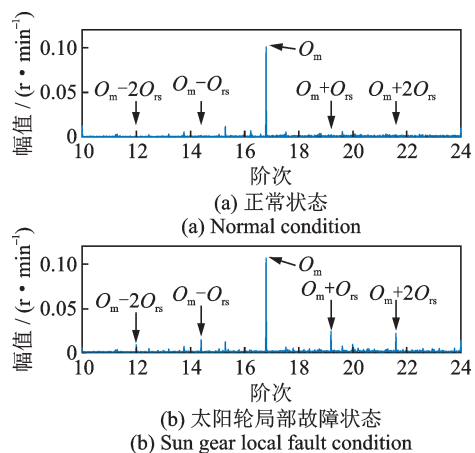


图11 伺服电机自带编码器IAS信号阶次谱

Fig. 11 Order spectrum of IAS signals in servo motor built-in encoder

对正常和太阳轮局部故障状态下的外置编码器IAS信号作傅里叶变换,得到阶次谱分别如图12(a)和(b)所示。可以看出,正常状态下的IAS信号阶次谱中与故障阶次 O_s 相关的谱线及边带均不明显,太阳轮故障状态下的IAS信号阶次谱中出现了较为明显的与故障阶次 O_s 相关的谱线及边带。这与文献[9-10]在行星齿轮箱输出轴安装编码器获得的结果一致。

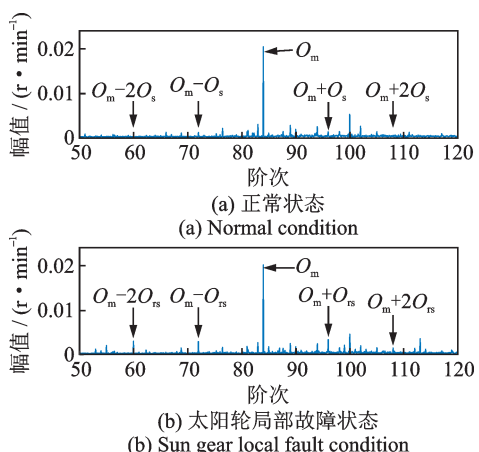


图12 输出端外置编码器IAS信号阶次谱

Fig. 12 Order spectrum of IAS signals in external encoder at output end

与外置编码器获得的 IAS 信号相比,使用自带编码器获得的 IAS 信号同样可以提取到行星齿轮箱的故障特征,并且无需外置设备,验证了使用自带编码器信号进行故障检测的优势。在研究所使用的试验台中,自带编码器与行星齿轮箱轴系刚性连接,而外置编码器与行星齿轮箱轴系通过联轴器连接且外接负载,因此外置编码器获得的 IAS 信号受到的干扰更为严重,在自带编码器 IAS 信号的阶次谱中故障谱线更加清晰。

3.3 低转速工况

为证明低转速工况下采用伺服电机自带编码器信号进行故障特征提取的可行性,分别以自带编码器采集正常状态下行星齿轮箱和太阳轮故障状态下行星齿轮箱的信号,计算得到 IAS 信号,并在角域和阶次域进行分析。设置伺服电机转速为 30 r/min,磁粉制动器的电压设置为 10 V,采样时长设为 180 s。

正常状态和太阳轮故障状态下自带编码器获得的 IAS 信号分别如图 13(a)和(b)所示,从图中可以看出,两种状态下编码器的转速大体一致,但故障状态下 IAS 信号中存在大量的速度波动。

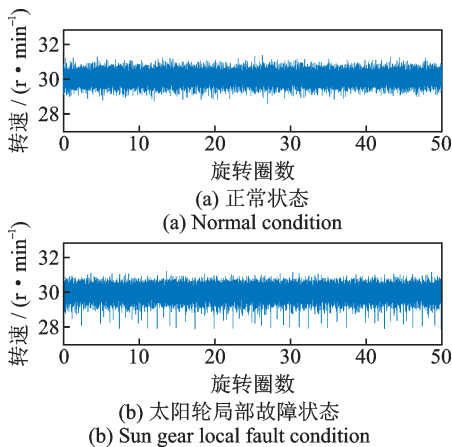


图 13 伺服电机自带编码器获得的 IAS 信号
Fig. 13 IAS signals obtained by servo motor built-in encoder

在角域信号中对两种状态下自带编码器获得的 IAS 信号进行对比分析,如图 14 所示。从图 14 中可以看出,与正常状态相比,太阳轮局部故障引起了周期性的转速波动。

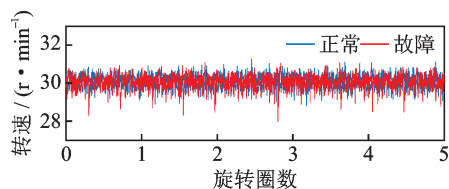


图 14 正常与故障状态下伺服电机自带编码器获得的 IAS 信号对比

Fig. 14 Comparison of IAS signals obtained by servo motor built-in encoder under normal and fault conditions

在阶次域中对两种状态下自带编码器获得的 IAS 信号进行对比分析,IAS 信号阶次谱分别如图 15(a)和(b)所示。可以看出,在正常状态下自带编码器获得的 IAS 信号阶次谱中,与故障阶次 O_{rs} 相关的谱线及边带不明显;在太阳轮局部故障状态下自带编码器获得的 IAS 信号的阶次谱中,与故障阶次 O_{rs} 相关的谱线边带明显增高。验证了低转速工况下采用自带编码器信号进行故障检测方法的有效性。

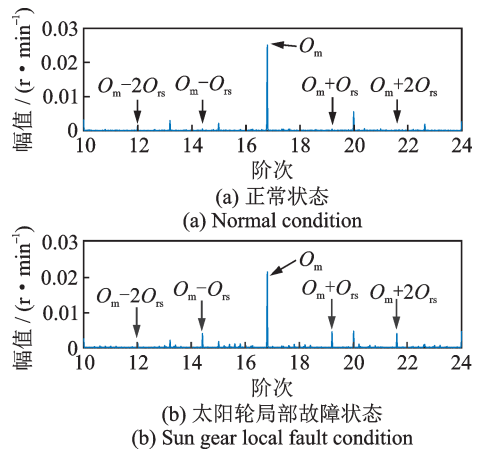


图 15 伺服电机自带编码器获得的 IAS 信号的阶次谱
Fig. 15 Order spectrum of IAS signals obtained by servo motor built-in encoder

3.4 变转速工况

为证明变转速工况下采用伺服电机自带编码器信号进行故障特征提取的可行性,分别以自带编码器采集正常状态和太阳轮故障状态下行星齿轮箱的信号,计算得到 IAS 信号,并分别在角域和阶次域进行分析。

研究中,设置伺服电机的转速从 20 r/min 升至 100 r/min。两种状态下伺服电机自带编码器获得的 IAS 信号分别如图 16(a)和(b)所示,可以看出两种状态下太阳轮的转速大体一致。

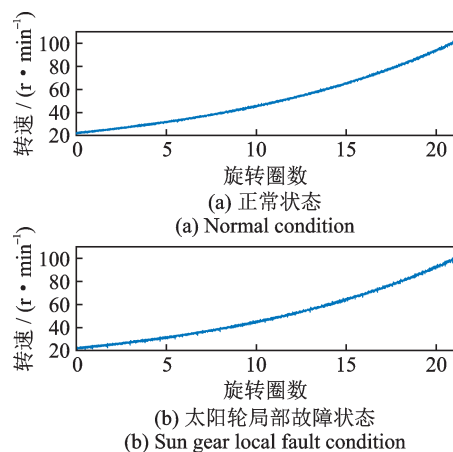


图 16 伺服电机自带编码器获得的 IAS 信号
Fig. 16 IAS signals obtained by servo motor built-in encoder

在角域信号中对两种状态下自带编码器获得的IAS信号进行对比分析,如图17所示,从图中可以看出太阳轮故障引起了转速的周期性波动。

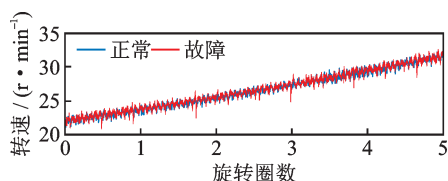


图17 正常与故障状态下伺服电机自带编码器获得的IAS信号对比

Fig. 17 Comparison of IAS signals obtained by servo motor built-in encoder under normal and fault conditions

在阶次域中对两种状态下自带编码器获得的IAS信号进行对比分析,IAS信号阶次谱分别如图18(a)和(b)所示。可以看出,正常状态下自带编码器获得的IAS信号阶次谱中与故障阶次 O_s 相关的谱线及边带不明显;太阳轮局部故障状态下IAS信号的阶次谱中出现了与故障阶次 O_s 相关的谱线边带。验证了变转速工况下,采用自带编码器信号进行故障检测的有效性。

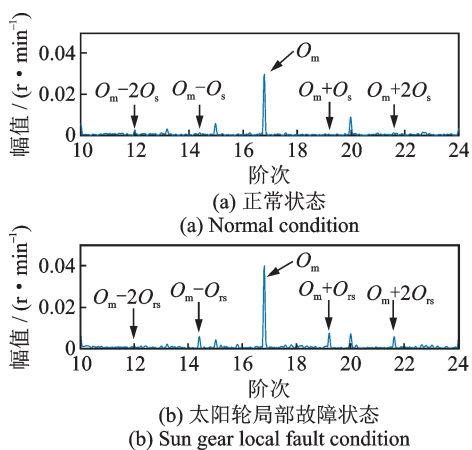


图18 伺服电机自带编码器获得的IAS信号的阶次谱
Fig. 18 Order spectrum of IAS signals obtained by servo motor built-in encoder

4 结论

本文针对现有齿轮局部故障检测方法均需要安装外置传感器的不足,提出一种基于伺服电机自带编码器信号的故障检测方法。得出如下结论:

(1) 利用伺服电机自带编码器的信号,可实现齿轮的局部故障检测,该检测方式无需安装外置传感器。

(2) 伺服电机自带编码器信号转换的IAS信号包含丰富的故障转速信息,可以有效克服固定位置

安装传感器采集到的信号受时变传递路径影响严重和变转速工况下信号处理复杂的缺点。

参考文献:

- [1] MOHAMMED O D, RANTATALO M. Gear fault models and dynamics-based modelling for gear fault detection—a review[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 117: 104798.
- [2] 冯志鹏, 赵镭镭, 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.
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.
- [3] 王朝阁, 李宏坤, 曹顺心, 等. 改进VMD和非凸重叠组收缩降噪的行星齿轮箱早期故障特征提取[J]. *振动工程学报*, 2021, 34(6): 1293-1304.
WANG Chaoge, LI Hongkun, CAO Shunxin, et al. Incipient of fault feature extraction of planetary gearbox based on modified VMD and non-convex overlap group shrinkage denoising[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2021, 34(6): 1293-1304.
- [4] SINGH A, PAREY A. Gearbox fault diagnosis under non-stationary conditions with independent angular resampling technique applied to vibration and sound emission signals[J]. *Applied Acoustics*, 2019, 144: 11-22.
- [5] 王友仁, 王俊, 黄海安. 基于非线性短时傅里叶变换阶次跟踪的变速行星齿轮箱故障诊断[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(14): 1688-1695.
WANG Youren, WANG Jun, HUANG Haian. Fault diagnosis of planetary gearboxes based on NLSTFT order tracking under variable speed conditions[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(14): 1688-1695.
- [6] 李宏坤, 侯梦凡, 唐道龙, 等. 基于POVMD和CAF的低转速齿轮箱故障诊断[J]. *振动、测试与诊断*, 2020, 40(1): 35-42.
LI Hongkun, HOU Mengfan, TANG Daolong, et al. Low speed gearbox fault diagnosis based on POVMD and CAF[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2020, 40(1): 35-42.
- [7] BOURDON A, CHESNÉ S, ANDRÉ H, et al. Reconstruction of angular speed variations in the angular domain to diagnose and quantify taper roller bearing outer race fault[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 120: 1-15.
- [8] 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.

- [9] 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): 1885-1893.
OU Shudong, ZHAO Ming, ZHOU Tao, et al. Fault diagnosis technology for low-speed planetary gearbox based on encoder signals[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1885-1893.
- [10] 尹兴超, 郭瑜, 李震焘, 等. 基于瞬时角速度信号窄带解调的太阳轮故障检测[J]. 振动与冲击, 2023, 42(5): 263-268.
YIN Xingchao, GUO Yu, LI Zhentao, et al. Fault detection of sun gear based on narrowband demodulation of IAS signals[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(5): 263-268.
- [11] 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.
- [12] FENG Z P, GAO A R, LI K Q, et al. Planetary gearbox fault diagnosis via rotary encoder signal analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 149: 107325.
- [13] INCZE I I, SZABÓ C, IMECS M. Incremental encoder in electrical drives: modeling and simulation[J]. Computational Intelligence in Engineering, 2010, 313: 287-300.
- [14] YE G Y, LIU H Z, BAN Y W, et al. Development of a reflective optical encoder with submicron accuracy [J]. Optics Communications, 2018, 411: 126-132.
- [15] 蔡敬鹏, 杨向萍, 周宇, 等. 伺服电机编码器自动校装系统开发[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(5): 78-80.
CAI Jingpeng, YANG Xiangping, ZHOU Yu, et al. Development of automatic calibration system for servomotor encoder[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(5): 78-80.
- [16] 寇丽萍, 夏超英. 基于 TLE5012 可编程磁编码器的设计[J]. 电源学报, 2016, 14(1): 35-42.
KOU Liping, XIA Chaoying. Design of programmable magnetic encoder based on TLE5012[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(1): 35-42.
- [17] LI B, ZHANG X N, WU T T. Measurement of instantaneous angular displacement fluctuation and its applications on gearbox fault detection[J]. ISA Transactions, 2018, 74: 245-260.
- [18] WANG B X, DING C C. Transient feature identification from internal encoder signal for fault detection of planetary gearboxes under variable speed conditions[J]. Measurement, 2021, 171: 108761.
- [19] 尹兴超, 郭瑜, 樊家伟, 等. 增量式光学编码器 IAS 信号误差建模及补偿[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2): 50-58.
YIN Xingchao, GUO Yu, FAN Jiawei, et al. Error modeling and compensation of IAS signal for incremental optical encoders[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2): 50-58.
- [20] LEWICKI D G, SAMUEL P D, CONROY J K, et al. Planetary transmission diagnostics: NASA/CR-2004-213068[R]. Washington, D.C., USA: NASA, 2004.
- [21] 樊家伟, 郭瑜, 伍星, 等. 含行星轮局部故障的行星齿轮箱振动仿真及实验研究[J]. 振动工程学报, 2022, 35(5): 1270-1277.
FAN Jiawei, GUO Yu, WU Xing, et al. Vibration simulation and experiment of planetary gearbox with planetary gear local fault[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(5): 1270-1277.
- [22] 方瑞明, 郑力新, 马宏忠, 等. 基于 MCSA 和 SVM 的异步电机转子故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(2): 252-257.
FANG Ruiming, ZHENG Lixin, MA Hongzhong, et al. Fault diagnosis for rotor of induction machine based on MCSA and SVM[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(2): 252-257.

第一作者: 樊家伟(1994—), 男, 博士研究生。

E-mail: 342774912@qq.com

通信作者: 郭瑜(1971—), 男, 博士, 教授。

E-mail: kmgary@163.com