

Vibration analysis of flexible joints under variable rotation condition based on synchronous sampling

He Guo^{1,2} Qingying Chen^{2*} Yuncai Zhao¹ Weijun Wang² Huike Lu³

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi, 341000, China

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Robotics and Intelligent Manufacturing Equipment Technology, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo, Zhejiang, 315201, China

3. Ningbo Haitian Seiko Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315800, China

Abstract

The tooth slot torque of the permanent magnet synchronous motor (PMSM), and the engaged transmission between the flexible wheel and the steel wheel in the harmonic reducer, will cause the vibration of the joint during operation. However, when the flexible joint operates at variable speed, the time-frequency analysis based on timing sampling cannot accurately reproduce its vibration, which is not conducive to control the accuracy of joint motion. In order to solve this problem, this paper adopts a method of sampling the equal angle of the torque sensor and analyzing the vibration characteristics using the order spectrum, which can stably detect the tooth groove torque and the engagement order characteristics of the motor harmonic reducer, and finally verifies the practicability of the method through experiments.

Keywords

integrated flexible joint; equal Angle sampling; vibration recognition

基于同步采样的变转数工况下柔性关节的振动分析

郭贺^{1,2} 陈庆盈^{2*} 赵运才¹ 王慰军² 鲁慧科³

1. 江西理工大学机电工程学院, 中国·江西赣州 341000

2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所浙江省机器人与智能制造装备技术重点实验室, 中国·浙江宁波 315201

3. 宁波海天精工股份有限公司, 中国·浙江宁波 315800

摘要

永磁同步电机(PMSM)存在齿槽转矩,以及谐波减速器中柔性轮与钢轮之间的啮合传动,都会导致关节在运行时产生振动。然而,当柔性关节在变速条件下运行时,基于定时采样的时频分析法无法准确地复现其振动情况,这不利于控制关节运动的精度。为解决这一问题,本文采用了一种利用增量式编码器触发扭矩传感器的等角度采样和利用阶次谱分析振动特征的方法,该方法可以稳定地检测电机端齿槽转矩和谐波减速器的啮合阶次特征,最后通过实验验证了该方法的实用性。

关键词

一体化柔性关节;等角度采样;振动识别

1 引言

一体化关节部件是集电机、谐波减速器和力位传感器

于一身的模块化部件^[1],一体化关节是机械臂的重要组成部分,其性能的好坏直接影响机器人的运行精度^[2]。

谐波减速器是由波发生器、柔轮和钢轮构成一种柔性机械构件。因其具有质量轻、传动比大、承载能力高、传动效率高、传动平稳无噪音以及体积小等优点^[3],在一体化关节领域得到了广泛应用。通常情况下,波发生器为主动件带动从动件柔轮运动,钢轮一般固定,柔轮末端与关节输出端直接相连。永磁同步电机因为具有高转矩密度、高功率密度、易于控制和体积小重量轻等特点,广泛应用于各类机械臂关节中。永磁同步电机主要由定子和转子组成。转子是永磁体,铝或铜线绕制在定子铁芯槽内构成定子。当定子绕组通交流电时,根据电磁感应定律,在定子内部产生旋转电磁场,该

【基金项目】浙江省自然科学基金(项目编号:LD24E050005);宁波市重点研发计划项目(项目编号:2024Z175)。

【作者简介】郭贺(1992-),男,中国黑龙江齐齐哈尔人,在读硕士,从事协作机器人关节研究。

【通讯作者】陈庆盈(1976-),男,中国台湾人,博士,从事机电一体化技术、先进机器人及智能制造装备技术研究。

磁场带动转子旋转。但是在转子旋转的过程中，由于定子铁心开槽，转子永磁体与定子铁芯槽之间磁场相互作用。由于电机内部磁路不对称，定子转子不同轴等原因导致出现齿槽转矩^[4]，齿槽转矩取决于转子位置和定子槽的数量^[5]，由于不均匀磁场和其他因素，即使在相同型号的电机中，位置和大小也会有轻微变化。

永磁同步电机和谐波减速器是引起柔性关节系统输出扭矩波动的主要来源。两者输出力矩的波动情况将直接决定关节的性能好坏。为满足当下对一体化关节高精度、高稳定性的性能要求，有必要研究电机齿槽转矩和谐波减速器在旋转中的波动情况。

目前，对于关节振动的辨识主要有以下几种方法：在关键部位安装单一传感器（如力矩传感器），基于动力学模型的控制算法等^{[6][7][8]}。以及基于各类传感器的广泛应用，为准确了解柔性关节复杂工况下的运行情况，而日趋流行的多传感器监测技术^[9]。

对于信号采集技术，通常是利用传感器基于定时采样原理进行，该原理可以很好地了解采集信号在时域的变化情况。但是对于转轴结构，特别是处于变转速或是频繁启停的工况时，该原理无法保证采集的数据均匀平稳，不利于后续对原始信号的重建。这是因为在相同时间间隔内，低转速转过的角度小而高转速转过的角度大，所以在高转速区间采集的数据点数少于低转速区间，导致高转速区间采集的信号失真。因此转轴结构采用等角度采样原理更适合。等角度采样原理也称为同步采样原理，是转轴机械故障诊断中常用的采样原理，该原理不受被测轴转数变化的影响。非常适合变转速条件下的转轴数据采集。

等角度采样技术是阶次跟踪技术的重要组成部分。阶次跟踪可以根据转速变化而同步改变采样率以获得等角度采样数据^{[10][11]}。主要方法有硬件阶次跟踪法和依靠转数计

的计算阶次跟踪法，以及针对一些特殊齿轮系统的无转速计的阶次跟踪算法。其中计算阶次跟踪法的精度依赖于角域插值重采样算法的准确度，硬件阶次跟踪法的算法简单，实时性好。

为了实现对关节运动状态的精准检测和控制，多数一体化柔性关节都会在电机端安装编码器，所以硬件阶次跟踪法更适用柔性关节机构。本文通过增量式编码器控制力矩传感器实现等角度采样。实验结果表明，该方法可以在变转速工况下稳定地提取电机和谐波减速器输出扭矩在角域的阶次波动情况。

2 原理和方法

2.1 阶次和等角度采样

旋转机械的振动情况与转速密切相关，在频域中代表振动的频率表现为参考轴转频的倍数，由此科学家们提出了阶次的概念。阶次与参考轴转数和振动频率的关系为^[12]：

$$f = \frac{n}{60} \times O \quad (1)$$

式中， f 为转动频率， O 为阶次， n 是转数（rpm）。

阶次跟踪的主要目的是将时域采样的非稳定信号转化为角域采样的稳定信号，然后根据傅里叶变换，求得振动信号在阶次域变化情况。在阶次分析中，重要的一步就是要获得等角度振动信号，根据一体化柔性关节组成元件特点，本文选择硬件阶次跟踪法。该方法具有算法简单、实时性好的优点。本文利用增量式编码器实现扭矩信号等角度采样，原理如下：增量式编码器内部设有均匀的光栅的码盘，当码盘跟随轴转动时，透光扇区和不透光扇区交替经过光源，产生TTL方波脉冲信号，该信号个数同码盘位移量成正比的特点，通过NI数据采集系统捕捉A相脉冲信号的上升沿并利用此信号触发计数器计数和力矩传感器采样，即可实现关节系统振动信号等角度采样，如图1所示。

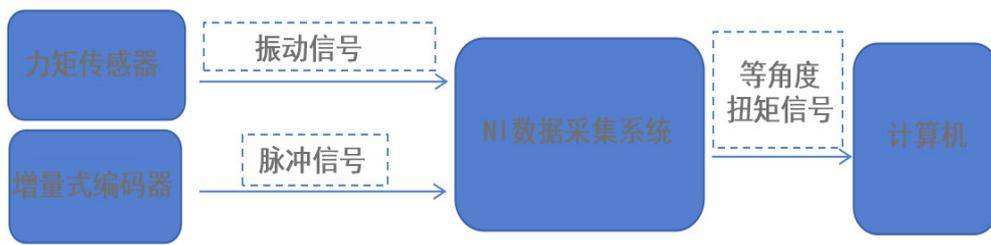


图1 采样程序示意图

2.2 基于短时傅里叶变换（STFT）的角域信号阶次跟踪

将时域信号利用傅里叶变换转换为频域是研究机械振动的常用方法，由于计算机采集的振动信号为离散信号，时域离散信号序列 $x(t)$ 频域表示为：

$$H(k) = \sum_{t=0}^{N-1} x(t) e^{-j\frac{2\pi}{N}kt} \quad (2)$$

角域信号的阶次换算理论直接来源于时域信号傅里叶变换理论，类比时域对角域振动信号做傅里叶变换可以得到阶次，角域离散信号 $x(\theta)$ 的阶次表示^[12]：

$$X(O) = \sum_{\theta=0}^{N-1} x(\theta) e^{-j\frac{2\pi}{N}O\theta} \quad (3)$$

式中， $X(O)$ 、 $H(k)$ 为傅里叶变换的阶次、频率幅值响应。

根据奈奎斯特定理，在不引起混叠的前提下当每转采集点数为 M 时，可分析的最高阶次为^[10]：

$$O_{\max} = \frac{M}{2} \quad (4)$$

谐波减速器柔轮 - 钢轮特征啮合频率 f_r ：

$$f_r = Z \cdot f_n \quad (5)$$

式中， Z 柔轮齿数， f_n 输入轴转速。

3 实验方案

3.1 实验装置

实验平台由柔性关节减速器测试平台组成，如图 2 所示，部分组件名称在表 1 中。该平台由配备增量编码器的永磁同步电机驱动。谐波减速器经柔轮末端将动力传输到负载侧，输出扭矩由 HBM 扭矩传感器测量。电机输出的扭矩由 FUTEK 扭矩传感器测量。绝对编码器实验系统提供参考零点。本实验台的电机定子有 18 个槽，转子每旋转 20° 就有一个扭矩波动点。另外，该实验台所用谐波减速器型号为 LHSg-25-100-C-III，柔轮齿数为 200 齿，减速比为 100。

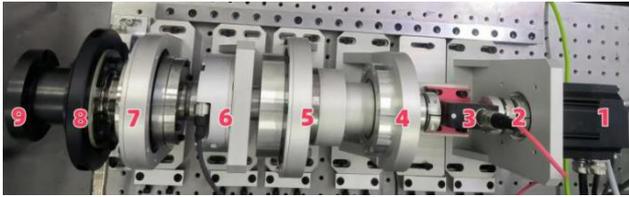


图 2 减速器测试平台示意图

表 1 测试平台部分组件名称

编号	名称
1	永磁同步电机
3	FUTEK 扭矩传感器
5	谐波减速器
6	绝对编码器
8	HBM 扭矩传感器

3.2 采样方案

采样方案如表 2 所示：

表 2 采样方案

电机转速 (rpm)	类型	数据来源	采样方案
12	匀速	FUTEK	等角度采样
100	匀速	FUTEK	等角度采样
600	匀速	FUTEK+HBM	等角度 + 定时采样
1000	匀速	HBM	等角度采样
600-800	变速	HBM	等角度采样
500-700	变速	HBM	定时采样

4 实验结果分析

图 3 比较了不同电机速度下定时采样和等角度采样的结果，定时采样的采样率为 1 kHz，其中 A 代表等角度采样，T 代表定时采样。齿槽转矩波动点出现在 244.8。在电机转速为 12rpm、100rpm 和 600rpm 时，等角度采样可有效捕捉该点的波动。相比之下，定时采样无法记录该点的力矩情况。

由于齿槽转矩与谐波减速器振动在柔轮输出端产生耦合现象，直接采集扭矩信息无法区分属于减速器特有的振动信息，需要对减速器输出端的振动信号进行阶次分析，以区分谐波减速器产生的振动和永磁同步电机产生的振动。

图 4 显示了电机匀速转动下减速器钢轮振动的阶次分析结果。可见在匀速转动时，谐波减速器在 200 阶处出现明显振动，根据式 (1) 和式 (5) 该阶次为谐波减速器啮合阶次特征。

图 5 是电机处于 600-800rpm 变转速关节减速器输出端阶次特征谱，可以看到与匀速运行时一样，仍然可以准确检测到减速器特征啮合阶次 200 阶。

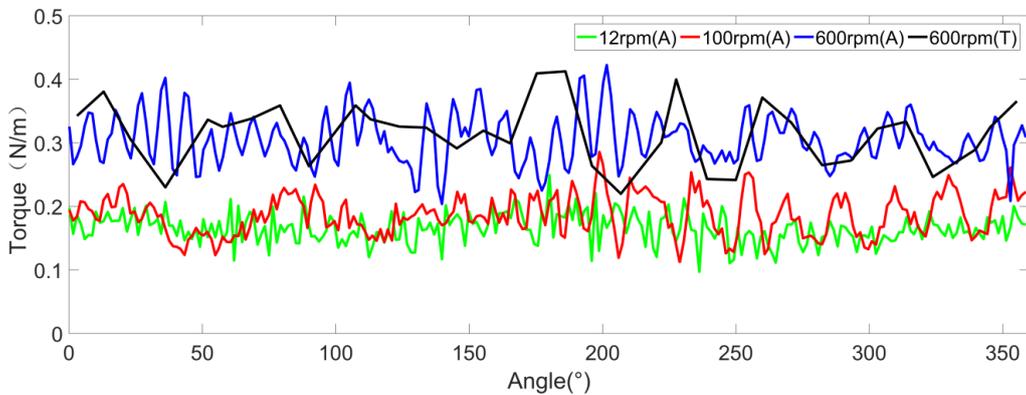


图 3 不同电机速度下定时采样和等角度采样的比较

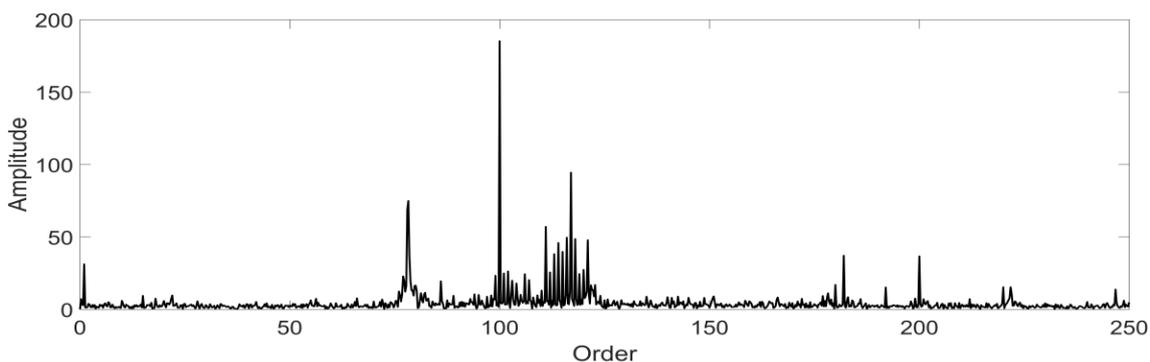


图 4. 600rpm 电机匀速运行谐波减速器柔轮输出端阶次谱

图 6 是定时采样柔轮输出端变速采样频谱图，定时采样率为 6 kHz，根据 (5) 和减速器的减速比可知，当电机转速在 500 ~ 700rpm 时，减速器的特征啮合频率为 1.667 ~ 2.333(KHZ)，但是在图 6 中，频率幅值凸峰漂移至 1.5(KHZ)。结合图 3 即可解释该现象：对比式 (2) 和式 (3) 可以发现：①傅里叶变换的幅值响应 $X(O), H(k)$ 是采样信号的 $x(\theta)$ 与 $x(t)$ 的函数。②傅里叶变换是全局变换。即采样

信号质量直接决定傅里叶变换结果是否正确，并且采样信号必须是稳定的。

而由图 3 可知，相较于定时采样方法，等角度采样法可以保证在每个旋转周期内的采样点数目和采样间隔恒定，即实现被测信号的角度域稳定采样，另外，根据图 4 和图 5 可以证明等角度采样方法不受旋转机械转速变化的影响，均可反映减速器的振动特征阶次。

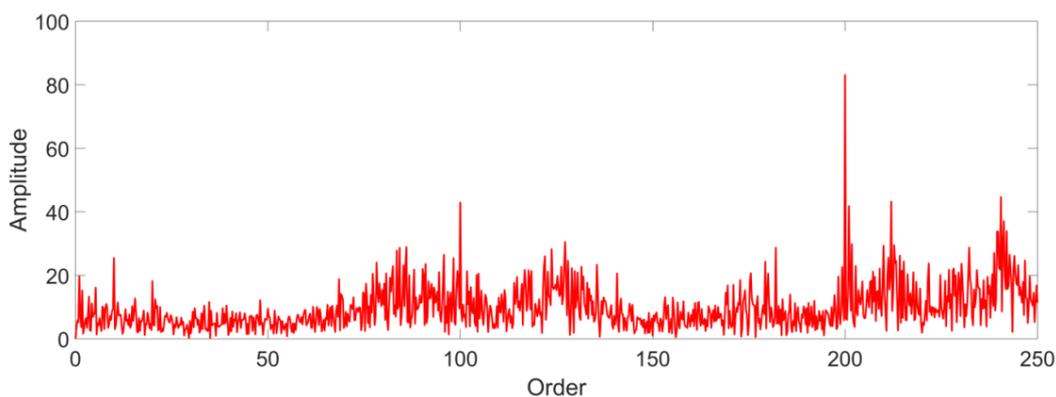


图 5 600rpm 至 800rpm 电机变速运行下的柔轮输出端阶次谱

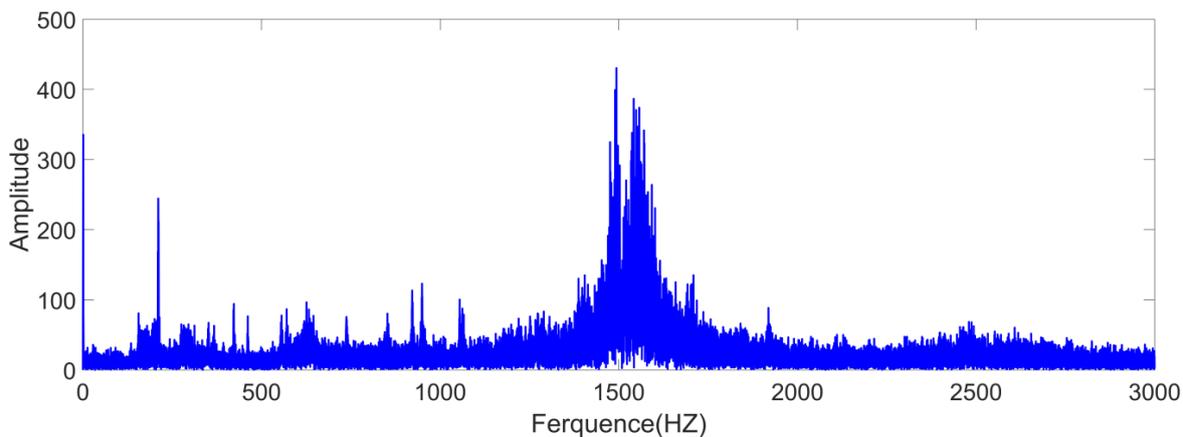


图 6. 500rpm 至 700rpm 定时采样电机变速运行下的柔轮输出端频率

5 总结

永磁同步电机中存在齿槽转矩和谐波减速器的振动,会影响关节运行的精度。在变转速工况下,传统的基于定时采样方法无法在时域中稳定地检测其振动情况。相比之下,等角度采样可确保在角度域内稳定地采集其振动情况,可以更精确、更全面地反映电机输出转矩和谐波减速器振动的变化。实验结果证实了等角采样技术在检测柔性关节系统振动方面更为有效。利用 NI 数据采集系统捕捉增量编码器产生等角度间距脉冲信号脉冲的上升沿并利用该脉冲信号触发扭矩传感器采样和计数器计数。即可实现振动信号等角度采样。

参考文献

- [1] 金力, 陈浣, 夏科睿, 等. 基于一体化关节的模块化六轴机器人技术研究. 机床与液压 (23), 67-72.
- [2] 黄庆会. (2019). 空间机械臂机电一体化关节控制设计探究. 科技风 (25), 155. doi:10.19392/j.cnki.1671-7341.201925139.
- [3] 张猛, 熊宇聪, 祝晓丽, 等. (2023). 谐波减速器动力学特性与建模研究进展. 空间控制技术与应用 (06), 1-16.
- [4] 张超, 郭辉, 袁涛, 等. (2023). 永磁同步电机转矩脉动抑制方法研究. 轻工机械 (03), 49-54.
- [5] 向芷漫. (2022). 基于谐波转矩抵消的永磁同步电机齿槽转矩动态削弱策略研究. 硕士(学位论文, 湖南大学).
- [6] 祝寒友, 吴松, 陈必发, 等. (2022). 柔性机械臂关节作动的振动抑制方法和原理性验证. 上海航天(中英文) (06), 37-42+74.
- [7] 郭新兰 & 姚利娜. (2023). 二连杆柔性关节机械臂轨迹跟踪控制方法. 机械设计与制造 (12), 249-253.
- [8] 陈剑波. (2023). 工业机器人带传动柔性关节动力学特性与控制策略研究. 硕士(学位论文, 安徽工程大学).
- [9] 陈仁祥, 张勇, 胡小林, 等. (2022). 多传感器信息深度融合的谐波减速器健康状态评估. 振动与冲击 (07), 139-144+152.
- [10] 谭祥军, 2018. 什么是等角度采样(同步采样). https://mp.weixin.qq.com/s/03vslfZDIhz_UGiLTG1Kyg.
- [11] 谭祥军, 2018. 什么是阶次跟踪. https://mp.weixin.qq.com/s/hb6FD_y0H8UgMAwXVhj9vw.
- [12] 宋宝玉, 解志杰, 张锋, 等. (2015). 基于角度域同步平均和阶次分析的低速斜齿轮故障诊断. 吉林大学学报(工学版)(02), 454-459.