

基于 MEMS 传感器的超声电机启动特性测试系统*

官廉杰, 李华峰, 杨 淋

(南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室 南京, 210016)

摘要 针对超声电机启动过程中角速度和角加速度难以直接准确测量的问题,搭建了一种基于微机电系统(micro electromechanical system,简称 MEMS)传感器的新型超声电机启动特性测试平台,设计了包括驱动模块、信号采集模块在内的测试系统。首先,设计了基于直接数字式频率合成器(direct digital synthesis,简称 DDS)的信号发生模块、线性功率放大模块、匹配及升压模块和基于 MEMS 的电机角速度及线加速度采集模块;其次,对采集模块进行 Allan 方差分析,证明随机误差对数据采集产生的影响;然后,采集不同温度下的传感器数据,利用最小二乘拟合温度漂移曲线消除传感器静态误差,利用快速傅里叶变换(fast Fourier transform,简称 FFT)对时域信号进行频谱分析,选择合适的滤波器消除系统噪声及动态误差,获得准确的角速度和线加速度数据;最后,采用中心差分法对角加速度求微分,得到角加速度及超声电机启动过程角加速度瞬态响应曲线。结果表明,该方法可用于寻找超声电机柔顺启动的驱动条件,为超声电机柔顺启动提供理论依据。

关键词 超声电机;测试系统;角加速度;柔顺启动

中图分类号 TH89;TM359.9

0 引言

超声电机因其响应速度快、体积小、扭矩大以及断电自锁等优点^[1],已在航空航天^[2]、精密定位平台^[3]、机器人^[4]及相机镜头等领域得到广泛应用。由于超声电机启动过程中存在非线性问题且启动响应过于迅速,因此会产生冲击,限制了其在超稳卫星平台以及高精度数控加工领域的应用。目前,超声电机的控制算法以比例-积分-微分(proportional integral derivative,简称 PID)控制与各种智能算法相结合为主。Alrijadjis 等^[5]使用粒子群优化算法对 PID 算法的参数进行寻优,可在一定程度上克服超声电机的非线性因素影响。郑亮亮等^[6]将模糊算法与 PID 算法相结合,实现了目标视觉跟踪系统的变速跟踪。本研究参考了高精密切床中 S 型加速度曲线的应用^[7-8],在保证有较快响应速度的同时减少超声电机因启动而产生的冲击,根据启动过程中角加速度曲线满足超声电机启动阶段的驱动要求,通过改变超声电机驱动信号的频率、幅值及相位差获得连续的角加速度曲线,实现柔顺启动。

目前,国内外对于超声电机启动特性的研究多集中于搭建测试系统以测量启动特性。张狄^[9]利用

DDS 芯片搭建了超声电机驱动系统,采用光电编码器测试并分析了降频启动和升压启动时 TRUM-60 电机的角速度曲线。万骏龙^[10]通过搭建 TRUM 驱动电源、测试台及 PXI 平台,利用光电编码器测量不同驱动条件下启动和关断瞬间的电机转速及其机械特性。潘艳^[11]设计了基于 LabVIEW 和 NI-DAQ 板卡的直线超声电机测试系统,对超声电机启动过程中的机械特性和瞬态特性进行了测试实验。武威等^[12]使用虚拟仪器技术构建了超声电机测试与分析系统,用于测试直线超声电机在不同负载下启动与关断的速度响应曲线。Juang 等^[13]搭建了超声电机的测试实验平台,测量了超声电机启动过程中的阶跃响应曲线,并利用激光振动仪测出了超声电机定子的电压及相位响应图。Moal 等^[14]通过测量超声电机定子和框架之间的电压值,得到定子和框架之间的间歇接触特性,并通过超声电机负载特性测试平台,测量了超声电机定子的振动幅值、预紧力和动态摩擦因数等参数。Leinvuo 等^[15]设计了一个基于 LabVIEW 软件的超声电机测试系统,使用编码器测量了超声电机启动过程中的转速,并利用高速照相机测出了超声电机启动瞬时加速度。

以上方法未对电机的角加速度进行测量,而

* 国家自然科学基金面上资助项目(52277055,52375058)

收稿日期:2024-06-16;修回日期:2024-10-15

且大多使用了光电编码器进行转角测量,如需获得角加速度,还需进行3次微分,必然带来较大误差。本研究提出了一种基于MEMS传感器的超声电机启动特性测试系统。首先,利用MEMS姿态传感器直接采集启动过程中角速度和切向线加速度数据,得到的数据更加准确;其次,设计的驱动模块可以实现驱动信号的频率、幅值及相位差近似无极调节,且驱动波形失真度小,为测得角加速度创造条件;然后,通过Matlab软件将采集到的角速度和切向线加速度数据转化为角加速度数据,从而得到超声电机启动时角速度、角加速度和角加速度随驱动信号频率、幅值和相位差变化的响应曲线,并通过绘制不同驱动信号下超声电机角加速度的响应曲线,揭示驱动信号变化对于超声电机启动过程的影响;最后,通过总结驱动信号的频率、幅值和相位变化对于启动过程中角加速度的变化规律,有助于解决超声电机启动响应过快造成冲击的问题,实现超声电机的柔顺启动。

1 硬件系统设计

1.1 系统总体设计

超声电机启动特性测试系统如图1所示。该系统主要由上位机、微控制器单元(microcontroller)

unit,简称MCU)、驱动模块和信号采集模块组成。图中USART表示通用同步异步串口通讯。在测试超声电机启动特性时,上位机向MCU发送指令,MCU进一步将指令分别通过串口发送至驱动模块,通过蓝牙通讯模块发送至信号采集模块,从而实现两部分协调工作。其中,驱动模块可以同时产生频率、幅值和相位差可无极调节的2个正弦信号,并将驱动信号输出至超声电机。与此同时,信号采集模块开始采集超声电机启动过程中的角速度和线加速度数据,并将数据通过蓝牙通讯模块传输给MCU,经MCU将数据传输至上位机进行数据处理。

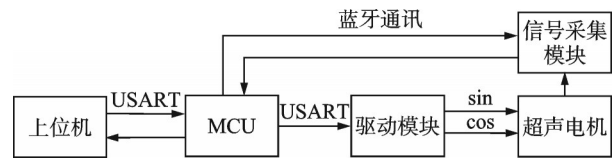


图1 超声电机启动特性测试系统

Fig.1 Starting characteristic test system of ultrasonic motor

1.2 驱动模块设计

本研究设计的驱动模块如图2所示,主要由信号发生模块、线性功率放大模块、升压及匹配模块组成。其能够实现超声电机驱动信号的频率、幅值和相位差的无级调节,并满足驱动超声电机所需的电压和功率要求。

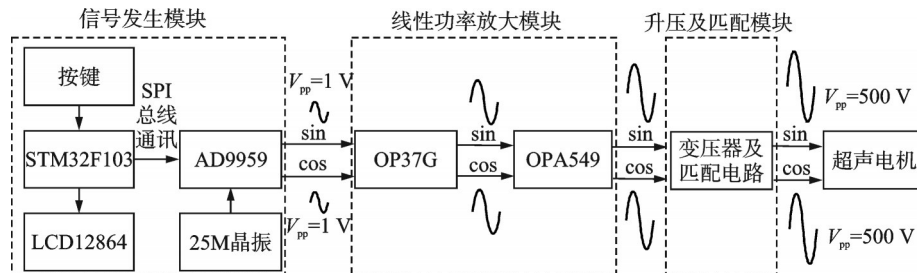


图2 驱动模块

Fig.2 The driving module

1.2.1 信号发生模块

信号发生模块负责输出两路任意频率、任意幅值和相位差的正弦信号,通过向DDS芯片的寄存器写入参数,实现对DDS芯片输出信号波形的控制。DDS芯片选择ADI公司的AD9959芯片,该芯片内部有4个DDS通道,每个通道都有对应的控制寄存器用以存储频率、幅值和相位参数。4个通道共用1个时钟信号,以确保其相位的同步性,故本研究选择此芯片作为信号发生模块。

通过设置频率、幅值及相位扫描模式并配置相

应初始化参数,可以实现驱动信号的频率、幅值和相位近似无级调节。AD9959芯片接入25MHz晶振,其频率、幅值及相位步长公式分别为

$$\Delta f = \left(\frac{1}{2^{32}} \right) f_{\text{SYSCLK}} \quad (1)$$

$$\Delta a = \left(\frac{1}{2^{10}} \right) \times 1 \quad (2)$$

$$\Delta \Phi = \left(\frac{1}{2^{14}} \right) \times 360 \quad (3)$$

根据AD9959芯片手册可知: f_{SYSCLK} 为25MHz;最小的频率步长为0.00582Hz;最小的幅值步长为

0.000 976 V(峰峰值);最小相位步长为 $0.021\ 9^\circ$;输出电压峰峰值的最大值为1 V。

1.2.2 线性功率放大模块、升压及匹配模块

线性功率放大模块负责将DDS输出信号的功率提升至驱动超声电机所需水平。升压及匹配模块负责对线性功率放大模块的输出信号进行电压放大,并消除超声电机容性阻抗带来的无功功率,提高线性功率放大模块输出效率。线性功率放大模块及升压匹配模块如图3所示。

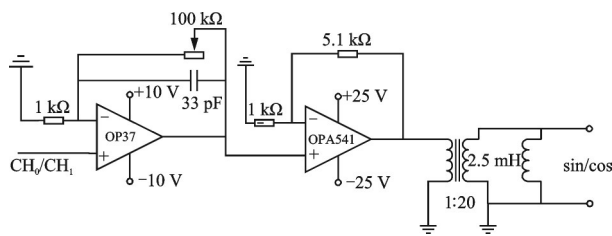


图3 线性功率放大模块及升压匹配模块

Fig.3 Power amplifier module and booster matching module

线性功率放大模块主要由前级放大单元和后级放大单元组成。

前级放大单元的主要功能是对AD9959的输出信号进行预放大处理,该模块选用ADI公司生产的OP37运算放大器,其具有低噪声、高精度、高共模抑制比和高开环增益等优点,非常适合用作小信号的前级放大。通过稳压源提供 $\pm 10\text{ V}$ 的供电电压,采用同相比例放大电路,由滑动变阻器改变正向输入端与输出端之间的阻值,可调节放大倍数。

后级放大单元的主要功能是进一步放大前级放大单元的输出功率,以满足驱动超声电机的功率要求。该模块选用TI公司生产的OPA549运算放大器,其连续输出电流可达8 A,峰值电流可达10 A,增益带宽积为0.9 MHz,压摆率为 $9\text{ V}/\mu\text{s}$,输出功率可达100 W以上,满足驱动超声电机的需求。通过稳压源提供 $\pm 25\text{ V}$ 的供电电压,采用同相比例放大电路,放大倍数为固定的6倍。

本研究针对升压及匹配模块,设计了一个匝比为1:20的升压变压器,采用并联电感方式进行电路匹配。电感值大小通过实验确定,利用可调电感进行调试匹配,以获得最佳电源效率为准则选取匹配电感,最终选择的并联电感值为2.5 mH。

1.3 信号采集模块设计

本研究设计的信号采集模块如图4所示,主要由供电模块、蓝牙模块、静态随机存取存储器(static random-access memory,简称SRAM)模块和传感器

模块组成。超声电机启动过程中,传感器模块采集 z 轴角速度数据、 x 轴线加速度数据和温度数据,并将其保存至SRAM模块中,当采集结束后将采集到的数据通过蓝牙通讯模块传输至MCU。

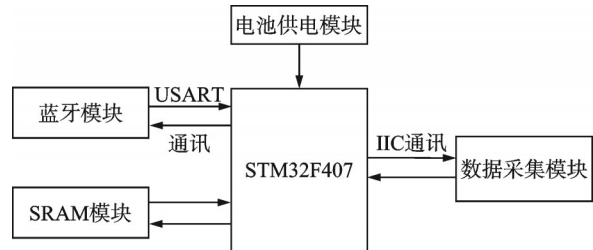


图4 信号采集模块

Fig.4 Data acquisition section module

本研究选择InvenSense公司的MPU 6050芯片作为传感器模块,其内部集成了3轴陀螺仪、3轴加速度计和温度计。配置陀螺仪量程为 $\pm 2\ 000\ (^\circ)/\text{s}$ 、加速度计量程为 $\pm 2g\text{ m}/\text{s}^2$ 、陀螺仪和加速度计的采样率均为1 kHz,满足启动过程中对数据采集的要求。MPU6050芯片采集 z 轴角速度、 x 轴线加速度和温度数据,并通过软件模拟集成电路总线与STM32F407通讯,将数据暂时存储在SRAM模块中。芯片的 z 轴正对转轴中心, x 轴测量转动时的切向线加速度。

信号采集模块使用3.7 V锂电池供电,选用PW2224芯片为整个信号采集模块提供3.3 V电压。其输入电压的范围为2.8~5.5 V,输出电压为3.3 V,最大输出电流为3 A,可以满足整个信号采集模块的供电需求。

蓝牙通讯模块选择HC-05蓝牙模块,其具有功耗低、通讯稳定、误码率低等优势,可以满足信号采集模块数据传输需求。

选择ISSI公司的IS62WV51216 BLL芯片作为SRAM模块,其存储空间大小为 $512\text{ K}\times 16\text{ bits}$ 。由于 z 轴角速度、 x 轴线加速度和温度数据大小均为16 bits,当采样率为1 kHz时该芯片可存储170 s左右的数据信息,其数据写入所需极短时间为40 ns,可以满足数据暂时存储要求。

2 数据处理方法

2.1 静态误差的分析与处理

MEMS陀螺仪和加速度计的静态误差主要来源于系统误差和随机噪声。系统误差的产生原因为温度漂移^[16]和传感器自身所带的机械误差。温度漂移产生的误差为线性误差,通过测量平面上一段时

间内陀螺仪和加速度计各个轴随温度变化的离散数据,利用最小二乘法进行拟合得到温度补偿函数,从而对温度漂移进行补偿。机械误差是固定的,可以通过减去某一个固定值来进行补偿。

随机误差的产生原因具有复杂性和随机性,目前常用的随机误差估算方法主要有功率谱密度法、自相关分析法和 Allan 方差分析法等^[17]。由于 MEMS 传感器随机误差不服从高斯分布,而功率谱密度法和自相关分析法主要适用于线性系统,对于高度非线性系统,其效果不如 Allan 方差分析法,因此笔者使用 Allan 方差分析法对陀螺仪的随机误差进行分析^[17-21]。

设采样时间为 t_0 ,总采样数据为 N ,把 m 个连续数据作为一个数组,总共分为 k 组,则每一组的持续时间为

$$\tau(m)=mt_0 \quad (4)$$

每一组测量数值的平均值为

$$\Omega_k(\tau)=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^m\Omega_i^k \quad (5)$$

其中: $\Omega_k(\tau)$ 为第 k 组数据的平均值; Ω_i^k 为第 k 组数据的第 i 个数据。

Allan 方差的计算公式为

$$\sigma^2(\tau)=\frac{1}{2}E[\Omega_{k+1}(\tau)-\Omega_k(\tau)]^2 \quad (6)$$

其中: $\sigma^2(\tau)$ 为相关时间 τ 对应的方差; E 为所有采集数据的平均值。

Allan 方差的平方根 $\sigma(\tau)$ 被称为 Allan 标准差。Allan 方差估计的精度取决于独立数组数量,Allan 方差的估计误差为

$$\delta=1/\sqrt{2(N/m-1)} \quad (7)$$

MEMS 陀螺仪和加速度计的随机噪声主要分为量化噪声 Q 、速度随机游走 N (对于陀螺仪则为角度随机游走)、零偏不稳定性系数 B 、加速度随机游走 K (对于陀螺仪为角速度随机游走)和速率斜坡 R 。各误差项与 Allan 标准差的对应关系为

$$Q=\sigma(t)\tau/\sqrt{3} \quad (8)$$

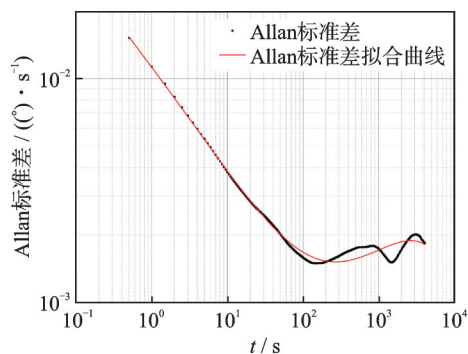
$$N=\sigma(t)\tau \quad (9)$$

$$B=3\sigma(\tau)/2 \quad (10)$$

$$K=\sigma(\tau)/\sqrt{\tau/3} \quad (11)$$

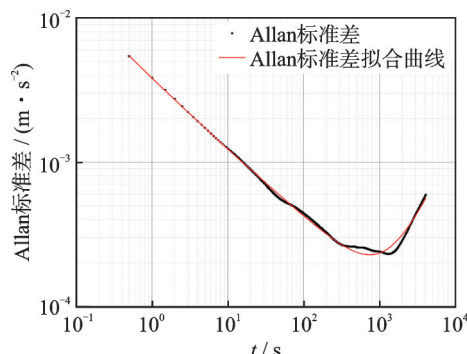
$$R=\sqrt{2}\sigma(\tau)/\tau \quad (12)$$

本研究采集了 24 100 个数据点并将数据点分为 400 组,采样间隔为 0.5 s。根据 Allan 方差分析法原理,编写 Matlab 程序对陀螺仪和加速度计测试数据进行处理,得到的 Allan 标准差双对数曲线见图 5。



(a) 陀螺仪 Allan 标准差曲线

(a) Allan standard deviation curve of gyroscope



(b) 加速度计 Allan 标准差曲线

(b) Allan standard deviation curve of accelerometer

图 5 Allan 标准差双对数曲线

Fig.5 Allan standard deviation log-log curve

通过计算 Allan 方差,得到陀螺仪和加速度计的 Allan 噪声分别如表 1、2 所示。

表 1 陀螺仪的 Allan 噪声

Tab.1 Allan noise of gyroscope

噪声系数	陀螺仪 z 轴
$Q/((^\circ)\cdot s^{-1})$	$5.985\ 0\times 10^{-4}$
$N/((^\circ)\cdot \sqrt{s^{-1}})$	$2.058\ 7\times 10^{-4}$
$B/((^\circ)\cdot s^{-1})$	$1.990\ 7\times 10^{-4}$
$K/((^\circ)\cdot s^{-1}\cdot \sqrt{s^{-1}})$	$1.112\ 8\times 10^{-4}$
$R/((^\circ)\cdot s^{-1}\cdot \sqrt{s^{-1}})$	$8.150\ 8\times 10^{-4}$

表 2 加速度计的 Allan 噪声

Tab.2 Allan noise of accelerometer

噪声系数	加速度计 x 轴
$Q/(m\cdot s^{-2})$	$7.486\ 3\times 10^{-4}$
$N/(m\cdot s^{-1}\cdot \sqrt{s^{-1}})$	$6.037\ 4\times 10^{-4}$
$B/(m\cdot s^{-2})$	$1.354\ 2\times 10^{-4}$
$K/(m\cdot s^{-2}\cdot \sqrt{s^{-1}})$	$7.846\ 5\times 10^{-4}$
$R/(m\cdot s^{-2}\cdot \sqrt{s^{-1}})$	$2.441\ 7\times 10^{-4}$

由式(7)计算可知,Allan 方差估计误差为 9.186%。由于数据采集的极短时间为 10 s 左右,所以速度随机游走 N 和加速度随机游走 K 对于系统

的影响极小,可忽略不计。量化噪声 Q 、速率斜坡 R 和零偏不稳定性 B 的数值很小,也可以忽略不计。

温度漂移拟合曲线及补偿结果如图6所示。为消除系统误差,笔者采集了 x 轴加速度和 z 轴角速度

随温度变化趋势及其拟合曲线,如图6(a)、(b)所示。

图6(c)、(d)为消除系统误差后陀螺仪和加速度计随温度变化的散点图像。 x 轴的加速度、 z 轴角速度均在 $-0.05\sim 0.05$ 之间上下浮动。产生浮动的原因:①传感器本身的电子噪声;②传感器在将连续信号转化为离散信号时,由于有限分辨率而引起的量化误差,可以通过数字滤波器进行消除。

2.2 动态误差的分析与处理

为了验证MEMS陀螺仪采样的准确性,使用步进电机对采样系统进行标定实验。角速度标定结果如图7所示。

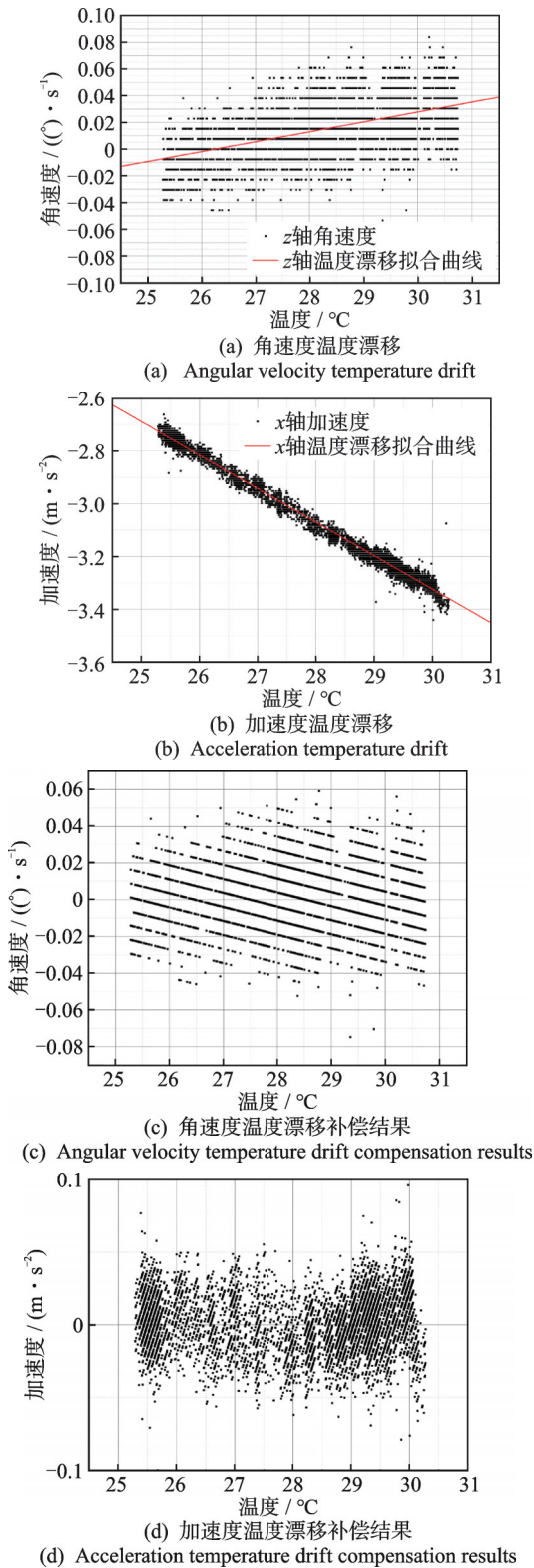


图6 温度漂移拟合曲线及补偿结果
Fig.6 Temperature drift fitting curve and compensation results

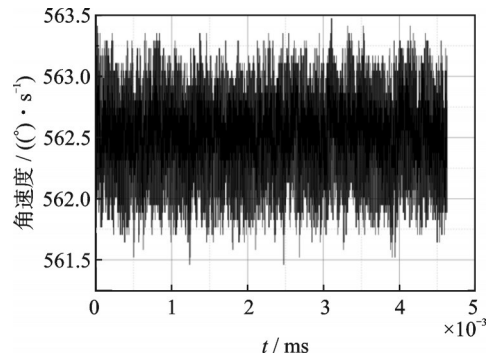


图7 角速度标定结果
Fig.7 The result of angular velocity calibration

本研究使用基于MEMS传感器的超声电机启动特性测试系统对步进电机进行采样,可以看出角速度的值在 $562\sim 563$ ($^{\circ}$)/s附近波动,并利用示波器测得步进电机驱动器的输出方波频率为10 kHz。通过对驱动器细分设置,得到步进电机的角速度为 562.5 ($^{\circ}$)/s,可以证明利用MEMS传感器测量电机旋转的角速度较为准确。

MEMS陀螺仪和加速度计在采集数据过程中,角速度与加速度数据随时间变化较为复杂,会受到电机振动、零部件装配和环境的影响,测量过程中还存在动态误差,因此需要通过频谱分析技术对陀螺仪和加速度计采集的动态数据进行分析。动态数据采集结果如图8所示。由图可见,角速度和线加速度曲线并非标准的常数信号,除了基频分量和噪声信号外,加速度数据还包含了一个正弦噪声。该信号产生的主要原因是在装配过程中不能保证整个数据采集平面绝对垂直于重力加速度,在 x 轴产生了一个重力加速度分量。为此,需对加速度数据和角速度数据进行频谱分析。

单边频谱曲线如图9所示。由图可见,信号中除了直流和基频分量外,角速度数据还存在23和

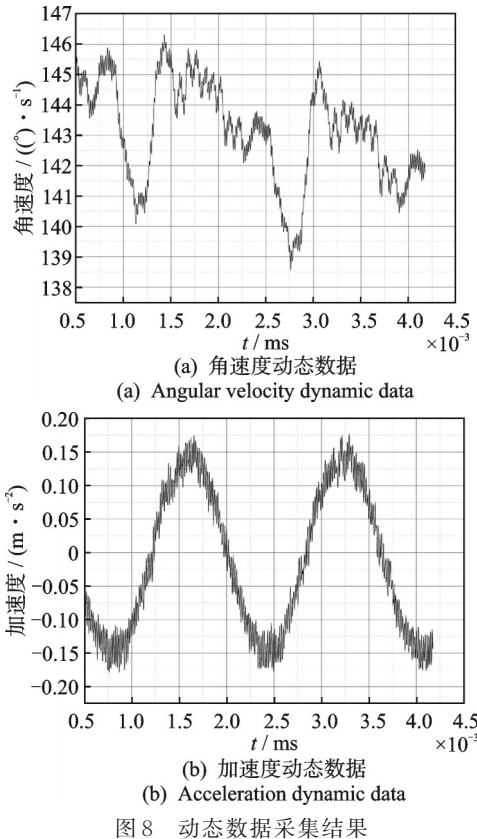


图8 动态数据采集结果

Fig.8 The result of dynamic data acquisition

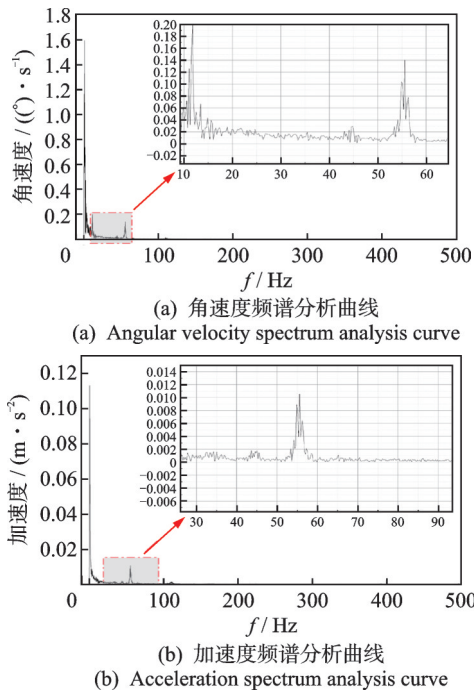


图9 单边频谱曲线

Fig.9 Unilateral spectral curve

120 Hz的高频噪声;加速度数据还存在120 Hz的高频噪声。单边频谱分析反映整个采样区间内不同频率信号的幅值大小,其在分析低频噪声时有一定局限性。由图8(b)可知,采集的加速度数据中还包含了一

个0.667 Hz的低频正弦噪声。综上所述,对于角速度数据采用巴特沃斯低通滤波以过滤高频噪声,对加速度数据采用巴特沃斯带通滤波以过滤低频正弦噪声和高频噪声。滤波效果对比如图10所示。

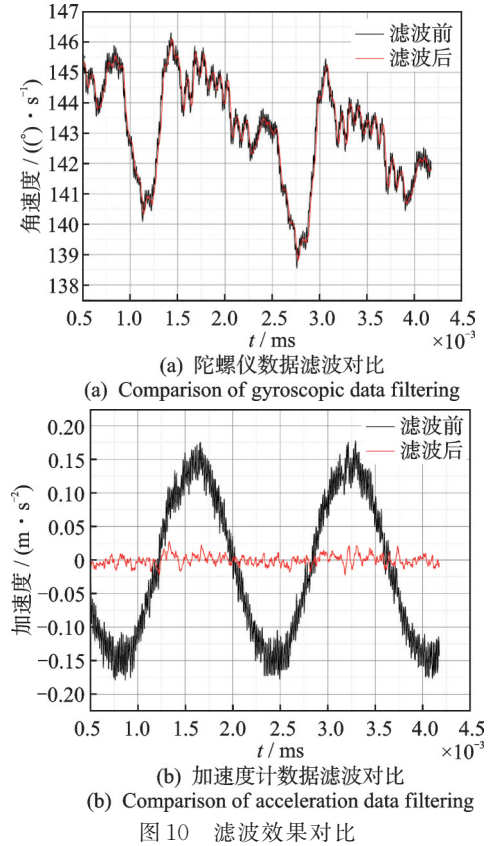


图10 滤波效果对比

Fig.10 Comparison of filtering effect

线加速度与角加速度关系为

$$\alpha = \frac{a}{r} \frac{180}{\pi} \quad (13)$$

其中: α 为角加速度; a 为线加速度; r 为转动半径。

通过式(13)可将采集到的线加速度转化为角加速度,再通过对角加速度数据进行中心差分法求微分,可以得到角加加速度数据。

3 实验结果及分析

利用搭建的超声电机启动测试系统对TRUM-60型超声电机进行测试。超声电机启动测试平台如图11所示。

实验中分别采用频率、幅值和相位扫描模式3种启动方式采集超声电机启动时的角速度、角加速度和角加加速度。不同驱动条件下角速度、角加速度及角加加速度曲线如图12所示。

图12(a)为超声电机频率扫描模式下的曲线,实验中的起始频率为45 kHz,终止频率为40 kHz,步进

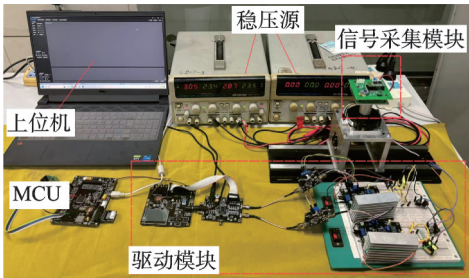


图 11 超声电机启动测试平台

Fig.11 Physical diagram of ultrasonic motor start-stop test system

频率为 25 Hz,步进时间为 1 ms。图 12(b)为超声电

机幅值扫描模式下的曲线,实验中的起始幅值为 0 V,终止幅值为 500 V,步进幅值为 4.87 V,步进时间为 10 ms。图 12(c)为超声电机相位扫描模式下的曲线,实验中的起始相位为 0°,终止相位为 90°,步进相位为 0.33°,步进时间为 1 ms。通过实验得到不同启动方式下角速度、角加速度和角加加速度数据见表 3。其中:幅值扫描模式下最大角加速度值较大,仍会对启动过程产生冲击;相位扫描模式下启动过程的角加速度及角加加速度波动明显,并且存在驱动信号相位差为 0 时仍可启动的情况。综上所述,频率扫描模式是最适合超声电机柔顺启动的方式。

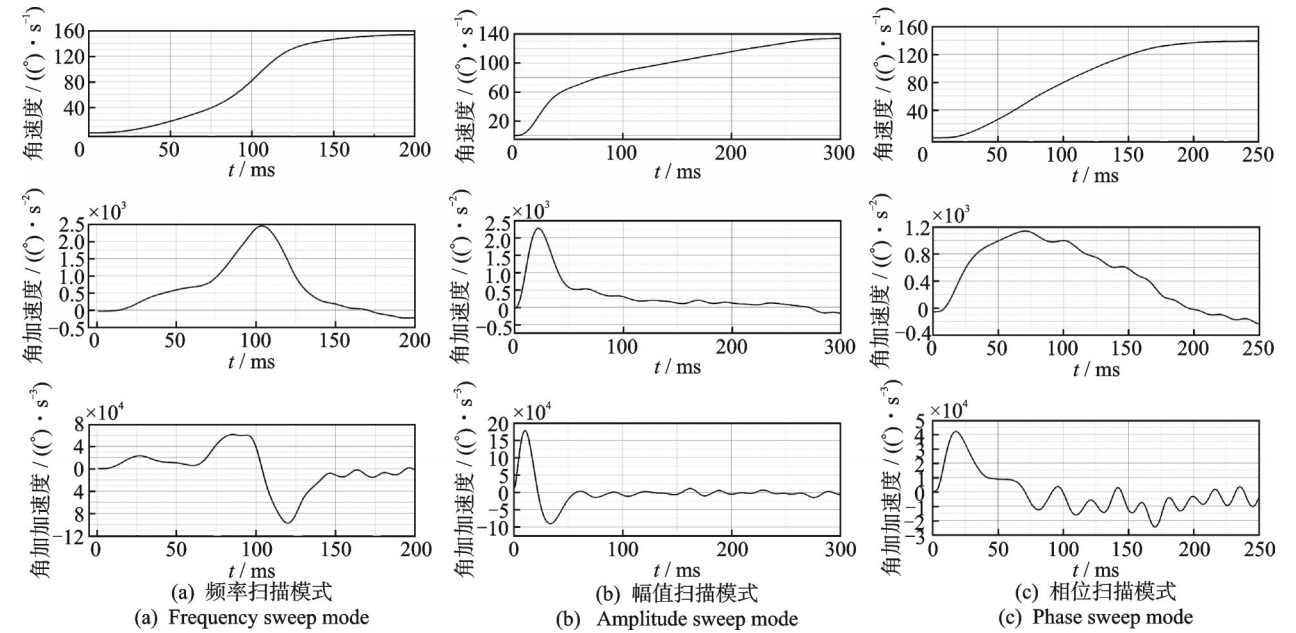


图 12 不同驱动条件下角速度、角加速度及角加加速度曲线

Fig.12 Angular velocity, angular acceleration and angular plus acceleration curves under different driving conditions

表 3 不同启动方式下角速度、角加速度和角加加速度数据				
Tab.3 Angular velocity, angular acceleration and angular jerk data under different starting modes				
启动方式	最大角速度 / ((°)·s ⁻¹)	最大角加速度 / ((°)·s ⁻²)	最大角加加速度 / ((°)·s ⁻³)	最小角加加速度 / ((°)·s ⁻³)
频率扫描	153.37	2 453	61 511	-97 393
幅值扫描	136.84	2 283	178 491	-90 336
相位扫描	139.16	1 138	42 136	-24 550

4 结 论

1) 提出了一种基于 MEMS 陀螺仪传感器的新型超声电机启动特性测试方法,该方法较为真实地反映了超声电机启动过程中角速度和线加速度变化,可进一步将其转化为角加速度并得到角加加速度,能够用于分析超声电机启动瞬态的响应特性。

2) 搭建了超声电机启动瞬态测试平台,对 TRUM-60 型电机进行测量的结果表明,通过改变电机启动时的驱动信号可以使超声电机的响应速度发生改变,有望实现超声电机的柔顺启动。

参 考 文 献

[1] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1-19.

[2] 芦小龙, 魏莹, 欧欢, 等. 声操控型微流控芯片的加工与测试技术[J]. 振动、测试与诊断, 2023, 43(2): 209-214.

LU Xiaolong, WEI Ying, OU Huan, et al. Manufacture and testing of acoustic microfluidic chip[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2023, 43(2): 209-214.(in Chinese)

[3] VYSHNEVSKYY O, KOVALEV S, WISCH-

- NEWSKIY W. A novel, single-mode piezoceramic plate actuator for ultrasonic linear motors[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(11): 2047-2053.
- [4] ZHANG Y H, FU Y H, HUA X J, et al. Wear debris of friction materials for linear standing-wave ultrasonic motors: theory and experiments[J]. Wear, 2020(448/449): 203216.
- [5] ALRIJADJIS D, TANAKA K Y, NAKASHIMA S. Hybrid strategy for improving PSO and its application for self-tuning PID controller on position control of ultrasonic motor[C]//2013 International Conference of Information and Communication Technology (ICoICT). Bandung, Indonesia: IEEE, 2013: 99-104.
- [6] 郑亮亮, 黄卫清, 赵淳生. 超声电机驱动的目标视觉跟踪系统设计与实现[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(12): 77-79.
ZHENG Liangliang, HUANG Weiqing, ZHAO Chunsheng. Design and implement of visual object tracking system driven by ultrasonic motors[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(12): 77-79.(in Chinese)
- [7] 许光彬, 余道洋. 高速平滑S曲线加减速速度控制算法研究[J]. 控制工程, 2017, 24(10): 2053-2058.
XU Guangbin, YU Daoyang. Research on acceleration/deceleration feedrate control algorithm for high-speed smooth S-curve[J]. Control Engineering of China, 2017, 24(10): 2053-2058.(in Chinese)
- [8] 徐弘毅, 徐骏善, 黄俊朋, 等. 面向摄影机器人的S型加减速控制算法研究[J]. 机械设计与制造工程, 2022, 51(12): 78-83.
XU Hongyi, XU Junshan, HUANG Junpeng, et al. Research on S-type acceleration and deceleration control algorithm for photographic robot[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2022, 51(12): 78-83.(in Chinese)
- [9] 张狄. 高性能超声电机驱动测试系统[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [10] 万俊龙. 用于行波型旋转超声电机性能测试的系统设计与开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [11] 潘艳. 基于LabVIEW和NI-DAQ板卡的直线超声电机测试系统设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [12] 武威, 张铁民. 超声电机测试分析系统[J]. 微电机, 2012, 45(12): 59-62, 83.
WU Wei, ZHANG Tiemin. Test and analyze system for ultrasonic motor[J]. Micromotors, 2012, 45(12): 59-62, 83.(in Chinese)
- [13] JUANG P A, BRENNER W. The transfer function of a new disc-type ultrasonic motor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2002, 100(2/3): 272-280.
- [14] MOAL P L, JOSEPH E, FERNIOT J C. Mechanical energy transductions in standing wave ultrasonic motors: analytical modelling and experimental investigations[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2000, 19(5): 849-871.
- [15] LEINVUO J T, WILSON S A, WHATMORE R W, et al. A new flexensional piezoelectric ultrasonic motor: design, fabrication and characterisation[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 133(1): 141-151.
- [16] 孙伟, 丁伟, 闫慧芳. MEMS惯性传感器误差简易标定方法[J]. 导航定位学报, 2007, 133(1): 141-151.
SUN Wei, DING Wei, YAN Huifang. A simple calibration method of MEMS inertial sensor error[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2007, 133(1): 141-151.(in Chinese)
- [17] 宋海宾, 杨平, 徐立波. MEMS传感器随机误差分析及处理[J]. 传感技术学报, 2013, 26(12): 1719-1723.
SONG Haibin, YANG Ping, XU Libo. Analysis and processing on stochastic error of MEMS sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(12): 1719-1723.(in Chinese)
- [18] DE-MARCHI F, PLUMARIS M K, BURT E A, et al. An algorithm to estimate the power spectral density from allan deviation[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2024, 71(4): 506-515.
- [19] 陈鹏光, 杜少林, 陈书钊, 等. MEMS加速度计随机误差分析及建模方法研究[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2017, 30(4): 31-35, 41.
CHEN Pengguang, DU Shaolin, CHEN Shuzhao, et al. Research on random error analysis and modeling method of MEMS accelerometer[J]. Journal of Qingdao University (Natural Science Edition), 2017, 30(4): 31-35, 41.(in Chinese)
- [20] 樊子懿, 王甫红, 祝浩祈. 运动状态下MEMS IMU随机误差的Allan方差分析方法[J]. 测绘地理信息, 2024, 49(1): 50-55.
FAN Ziyi, WANG Fuhong, ZHU Haoqi. Stochastic error analysis of MEMS IMU in dynamic condition based on Allan variance[J]. Journal of Geomatics, 2024, 49(1): 50-55.(in Chinese)
- [21] MA L, CHEN W W, LI B, et al. Thermal modeling and compensation of MEMS accelerometer[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3590 (668/669): 1015-1018.



第一作者简介:官廉杰,男,2000年3月生,硕士生。主要研究方向为测试计量技术及仪器。

E-mail:1052467123@qq.com

通信作者简介:李华峰,男,1974年9月生,教授、博士生导师。主要研究方向为超声电机及其驱动控制系统研究。

E-mail:lihuaf@nuaa.edu.cn