

基于小波变换的惯测装置角振动频率特性研究

刘兴虎¹ 郝春朝¹ 王亚凯¹
LIU Xinghu HAO Chunzhao WANG Yakai

摘要

频率特性是惯性测量与导航装置测量通道的重要指标之一。为了更准确地对惯测装置角速度通道频率特性进行研究,保证惯测装置测量的准确性与可靠性,提高测试效率,设计了一种基于正弦扫频方案的惯测装置角速度通道频率特性测试方案与数据处理方法,分析了惯测装置闭环光纤陀螺模型,并设计了仿真试验,验证试验方案的可行性。MATLAB 仿真结果表明,通过基于 Morlet 小波的连续小波分析,计算惯测装置角速度通道 -3 dB 带宽相对误差小于 3%, -3 dB 处相位计算误差小于 6%,验证了所提出的方法的有效性。

关键词

小波变换; 惯性测量装置; 角振动; 频率特性; 正弦扫频

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.07.024

0 引言

现代飞行器的高机动性对惯测设备的动态性能提出了更高的要求,惯测装置角速度测量通道的频率特性是衡量惯测装置角速度动态性能的重要指标。为了能够准确获得该通道动态性能,保证惯测装置能够提供足够快的响应速度,输出准确无偏的测量数据,针对角速度通道频率特性测试成为惯测装置研究的一项重要内容。传统频率特性测试方法通过对各轴逐频率点测试,即角振动法,获得试验数据,通过最小二乘法拟合或短时傅里叶变换对各频率点试验数据进行处理,提取幅度与相位信息,从而绘制出完整的幅频特性曲线。文献[1]使用FFT对光纤陀螺角振动数据进行处理,在低频段有较低的振动幅值解算误差,但受陀螺带宽的约束,70~90 Hz频段范围内振动幅值解算误差在15%左右。文献[2]基于角振动法测试低成本MEMS陀螺频率特性,对比直接测量法,提出了一种离散形式的相关分析法,处理定频试验数据以获得频率特性,但仍局限于角振动法的逐点测试。小波分析法是一种具有时间-频率局部化的多尺度分析方法,被广泛应用于信号处理、特征提取等领域。文献[3]使用高斯小波实现宽频带振动信号分析。小波分析在惯性技术领域主要用于信号去噪^[4-5]、故障检测^[6-7]等。针对传统频率特性试验方法的弊端,本文重点研究了基于小波变换理论的频率特性试验方案和数据处理方法,在保证测试精度的前提下有效地提高了测试效率,对惯测装置角速度通道动态特性测试有一定的指导意义。

1 数字闭环光纤陀螺工作原理

光纤陀螺仪(fiber optic gyro, FOG)是依据萨格纳克效应(sagnac effect)来测量角速度的一种设备。其基本组成包括光源、光纤环、分束器和光电探测器以及数模、模数转换器等。在光纤陀螺中,光源发出的光通过分束器被分为两束,这两束光沿着光纤环的两个相反方向传播。当光纤陀螺相对惯性空间旋转时,其光路中的干涉光束之间会产生与转速成正比的相位差。光纤陀螺电路实时检测干涉光束之间的相位差,根据检测到的相位差产生补偿值,并将补偿值转换为电压信号施加到Y波导上,Y波导在电压信号的作用下使干涉光束之间产生补偿相位。当光纤陀螺闭环系统稳定时,补偿相位与转速产生的相位差大小相等,补偿值与补偿相位成正比,故补偿值与转速成正比,光纤陀螺产生的补偿值即光纤陀螺输出的转速信号。数字闭环光纤陀螺工作原理如图1所示。

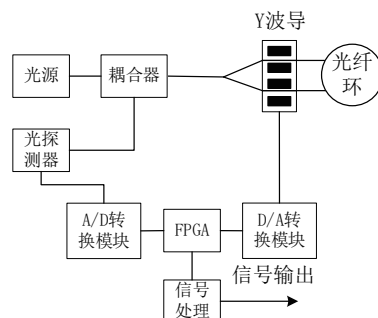


图1 数字闭环光纤陀螺工作原理框图

将光纤陀螺工作原理进行简化可得到光纤陀螺动态模型图^[8],如图2所示。

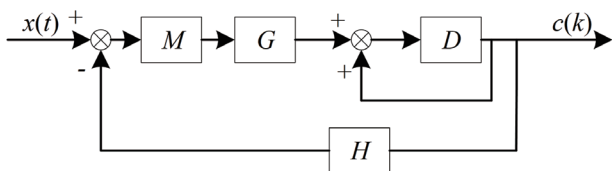


图2 闭环光纤陀螺动态模型图

式中： G 为前向通道增益，由光电转换、A/D转换模块增益等决定。 H 为反馈增益，由FPGA控制电路增益、D/A转换电路增益等决定。 D 为延迟单位时间的算子符号。 M 为sagnac效应传感系数。根据图2进行理论推导，得出闭环光纤陀螺简化模型传递函数为：

$$G(s) = \frac{GM}{Ts + GH} \quad (1)$$

可见，光纤陀螺系统为典型一阶环节。然而，光纤陀螺在惯性测量装置中使用时，由于附加的硬件组件（如惯测装置橡胶减振器）、信号处理步骤（如滤波和数据融合）、动态响应的综合影响、系统内部噪声水平以及校准和误差补偿机制等因素，惯测装置实际传递函数与单独光纤陀螺有很大差异。这些因素共同作用，不仅改变了系统的频率响应，引入了额外的延迟和相位偏移，而且可能增加噪声水平，影响信号的清晰度和精确度。实际的惯测装置角速度通道的机理建模较为复杂且研究较少，本文选用某型号惯测装置实测数据拟合辨识的传递函数作为仿真试验研究与理论分析模型。

频率特性通常指设备对不同频率信号的响应能力，包括幅度响应和相位响应。惯性测量装置中角速度通道的频率特性测试对于提高导航精度和设备稳定性极其重要。这种测试帮助分析确定设备测量转动速率的实时性与准确性，尤其是在面对快速动态变化的环境时惯测装置的动态精度表现。频率特性可以通过传递函数来分析。通过求解角速度通道传递函数，对特定形式不同频率的输入信号的幅度和相位响应评估惯组角速度通道在实际应用中的表现。也可以通过角振动试验给惯测装置施加特定形式的振动输入信号，通过分析外部传感器或装置输出信号绘制幅相特性曲线，得出装置角速度通道大致频率特性走向。

对数幅相特性曲线计算公式为：

$$|G(j\omega)| = \left| \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \right| = \sqrt{\text{Re}[G(j\omega)]^2 + \text{Im}[G(j\omega)]^2} \quad (2)$$

$$|G(j\omega)|_{\text{dB}} = 20 \cdot \log_{10} \left| \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \right| \quad (3)$$

$$\angle G(j\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[G(j\omega)]}{\text{Re}[G(j\omega)]} \right) = \angle Y(j\omega) - \angle X(j\omega) \quad (4)$$

式中： $Y(j\omega)$ 是输出信号的拉普拉斯变换， $X(j\omega)$ 是输入信号的拉普拉斯变换， $|G(j\omega)|_{\text{dB}}$ 为传递函数的对数幅度， $\angle G(j\omega)$

为相位。

光纤陀螺的频率特性测试主要采用角振动法^[9]、脉冲响应测试和阶跃响应测试、基于Faraday效应法、正弦调制法^[10]等几种方法。其中，正弦调制法是陀螺设计和装配阶段光纤环上引入特定原件模拟正弦信号得到光纤陀螺幅频特性曲线。基于Faraday效应法通过在反馈阶梯波上叠加数字正弦波等效外部输入。这两种方法对于已经将光纤陀螺组件封装在装置内部且并没有预留专用测试接口的惯测装置来说并不适用。脉冲响应和阶跃响应测试则是通过向陀螺施加突然的旋转变换（脉冲或阶跃），并分析其时间响应来间接获得频率响应信息。但实际情况下，考虑到实际工况下内部信息处理能力、功耗控制以及外部通信带宽限制等因素，惯测装置的工作频率远低于光纤陀螺能达到的工作频率，这会导致本身脉宽就非常窄的脉冲信号以及阶跃信号的上升沿跳变此类快速变化的输入信号在惯测装置的输出信号中只能体现为有限的几个甚至几十个数据点。这种情况下，捕捉到的动态响应可能不够精细，难以准确分析系统的真实动态特性，不利于分析。角振动法通过设定的一系列频率点，单次测试施加单频正弦波并同步记录待测装置输出数据，对每个频率点数据进行分析逐点绘制幅相特性曲线。通过采集每个频率点一定时长稳定信号，利用快速傅里叶变化或相关分析法等，逐点识别幅频响应与相频响应数据，在缺乏自动化测试设备时，对三个轴向角速度通道依次需要频繁设置试验参数，测试效率低。

2 正弦扫频试验

正弦扫频试验是一种主要用于分析系统对频率变化的响应特性的动态测试方法，常被应用于振动分析、电子系统动态性能测试等场景。在正弦扫频试验中，输入信号的频率会按照一定的规律逐渐变化，而系统的响应（如振动、电信号等）随之被记录和分析。正弦扫频试验的基本原理是：将一个频率逐渐变化的正弦波信号作为输入，施加到被测系统上。通过记录系统对不同频率输入信号的响应，可以获得系统的频率响应特性。

按照输入信号频率变换策略，正弦扫频试验通常分为以下三种。

（1）线性扫频：频率以线性方式随时间增加或减少。这种扫频方式简单直观，适用于对系统整体频率响应有初步了解的情况。

（2）对数扫频：频率以对数方式变化，即每个频率段的持续时间与其频率成正比。这种方式对频响范围广、对高频敏感的测试更为有效。

（3）分段扫频：将整个频率范围分为若干段，每段采用不同的扫频策略。这种方法结合了线性和对数扫频的优点，

可以在特定频段进行详细分析。

变频信号使得正弦扫频方法能够全面评估系统在整个测试频率范围内的动态响应特性，可以揭示系统在不同频率下的动态性能，如共振频率、阻尼比等关键参数。同时，通过调整扫频起止范围、速率和模式，可以灵活适应不同的测试需求。

此外，与逐一测试单个频率点相比，正弦扫频试验可以更高效地获得待测系统的频率响应信息。使用正弦扫频试验测试惯测装置加速度通道频率特性非常好地解决了测试效率低的问题。但传统试验方法中的数据处理技术，如快速傅里叶变换与相关分析方法，并不能直接用来分析扫频试验数据，理由如下。

傅里叶变换提供的是整个信号的平均频谱信息，适用于分析平稳信号。扫频信号频率随时间变换的非平稳信号使得傅里叶变换无法跟踪扫频信号连续变换的频率、相位信息。

相关分析法是一种线性度量，它主要在整个分析窗口内测量平均相似度，无法提供关于信号在具体时间点上的频率或相位信息。变频信号的频率和相位随时间变化的特性涉及非线性变化，这超出了相关分析法的直接测量范围。

因此，采用正弦扫频方案需要一种能够捕捉信号瞬时特性，具有良好时间 - 频率分辨率的方法。

3 Morlet 小波变换原理

小波变换 (wavelet transform, WT) 通过在多分辨率分析空间中处理信号，利用其独特的比例带宽滤波器机制，允许根据中心频率的变化调整带宽。小波变换主要分为两种形式：连续小波变换 (continuous wavelet transform, CWT) 和离散小波变换 (discrete wavelet transform, DWT)。离散小波变换通过选取特定的尺度和位置的小波函数对信号进行分析，采用二进制尺度和位置的步进方式简化计算过程，使 DWT 适合于信号压缩和噪声去除等应用，DWT 的离散特性也促使其能够被实现为快速算法。

连续小波变换是通过将信号与一系列连续变化尺度和位置的小波函数进行卷积来分析信号的时间 - 频率特性的一种方式。小波函数在 CWT 中的连续平移和缩放，允许对信号进行细致分析，特别适用于信号细节的精确分析，如特征提取、瞬时频率分析等。

小波分析的多分辨率特性在捕捉信号的时域与频域局部特征方面表现出色，尤其是在分析含有非稳定能量瞬态特征的复杂信号时，展现了显著优势。通过对小波函数进行平移和伸缩操作，小波分析以自适应的时频信号分析方法逐渐细化信号，依赖于将信号分解成一系列由母小波函数经变换得到的小波基函数。这些函数能够精确逼近信号中的尖锐变化

和离散不连续的局部特性，准确反映信号时间轴上的动态变化，使得小波分析成为分析非稳态和断续时间序列的有效工具，为信号处理提供了新的视角和方法。

对信号 $x(t)$ 进行连续小波变换^[1]：

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5)$$

式中： $x(t)$ 为待分析信号序列， $\psi(t)$ 为小波函数， a 为尺度因子， b 为位移因子， $*$ 表示复共轭， $CWT(a, b)$ 为小波变换系数矩阵，是一个二维函数。矩阵尺寸由尺度因子 a 的个数以及待分析信号 $x(t)$ 长度决定，它反映了信号在不同尺度（频率）和时间位置的局部特性。

小波函数分为实数小波和复数小波两大类。实数小波主要用于信号的时间 - 尺度（频率）分析，提供信号在不同尺度下的时间局部化信息，广泛应用于信号的多分辨率分析、特征提取等方面。而复数小波不仅能提供信号的幅度信息，还能捕捉到信号的相位信息，这一点是实数小波做不到的。因此，复数小波在需要考虑信号相位的应用中显得尤为重要，如信号分析、图像处理等领域。其优点在于能够同时提供信号的幅值和相位谱，使分析结果更加全面和直观。

复 Morlet 小波是一种通过复合高斯函数和余弦波形成的具有特定的固定频率特性。复 Morlet 小波不但具有非正交性，还是由 Gaussian 调节的指数复值小波，时域表达式为：

$$\psi(t) = e^{j\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (6)$$

频域表达式为：

$$\psi(\omega) = \sqrt{2\pi} e^{-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2}} \quad (7)$$

式中： ω_0 为余弦波的中心频率，通常取值为 5，以确保小波满足可逆条件。通过对复 Morlet 小波进行平移和缩放，可以生成一系列的基函数，通过小波基构成的函数空间以适应不同尺度和时间位置的分析需求。小波基函数与母小波的关系式为：

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (8)$$

根据傅里叶变换尺度变换特性及时移特性可得，复 Morlet 小波基函数频域表达式可写为：

$$\psi_{a,b}(\omega) = a^{-\frac{3}{2}} \sqrt{2\pi} e^{-(a\omega-\omega_0)^2} e^{j\omega_0 b} \quad (9)$$

尺度因子 a 用于控制小波函数的伸缩，从而对应于信号的不同频率成分；位移因子 b 用于控制小波函数在时间上的位置，以分析信号的局部特性。这样，复 Morlet 小波通过不同的 a 和 b 可以生成一系列小波基函数，构成一个完备的函数空间，使其能够对信号进行有效的时频局部化分析。不同尺度因子与平移因子对母小波的作用如图 3 所示。

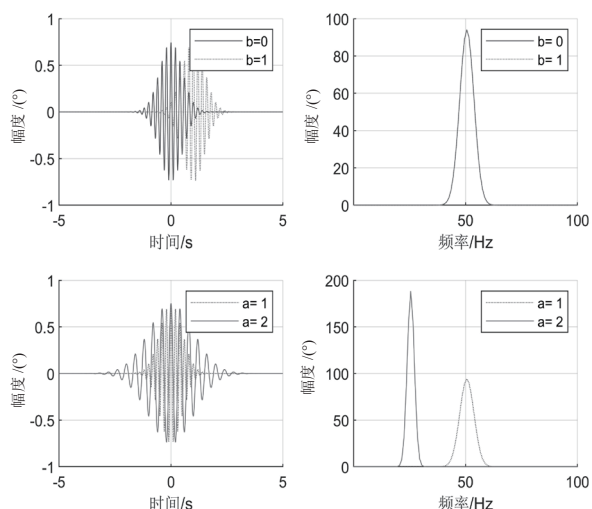


图3 不同尺度因子与平移因子对小波作用效果

从图3中可以观察到,尺度因子增大,小波函数被压缩,频率变高。在频率谱中观察到,频宽增大,频率分辨率下降,但是小波函数在时间上的宽度被压缩,拥有更好的局部化特性。这使得更容易在时间上定位,即时间分辨率提高。而平移因子使具有紧支撑性的部分在时间轴上平移,只要选择充分的平移因子,可以利用小波函数对被分析信号的每一部分进行分析,一般情况下选择平移因子的个数等于数据点个数,以对每个数据点进行分析。实际计算时,CWT表达式由式(10)给出:

$$CWT_x(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}\sqrt{\pi}} \sum_{n=1}^N (x(nT_s) e^{-\frac{1}{2}(\frac{(b-n)T_s}{a})^2 + j\omega_0(\frac{(b-n)T_s}{a})}) \quad (10)$$

$$f = \frac{F_s}{a} \cdot f_c \quad (11)$$

式中: f 是信号的频率, F_s 是信号采样频率, f_c 是小波基函数中心频率。这样就建立起信号中频率成分与不同尺度的对应关系。

在连续小波变换中,尺度因子 a 通常使用指数变换对母小波进行缩放,这样做的优点有以下几点。

(1) 频率分辨率的优化。海森堡不确定性原理在连续小波变换中体现为时间与频率分辨率之间的权衡,尺度因子与信号中的频率成反比关系。该原理表明,无法同时精确获得信号的时间位置和频率信息。使用指数变换的尺度因子可以使得在低频部分获得更高的频率分辨率,而在高频部分则获得更高的时间分辨率,这对于从试验数据确定带宽更为有利。

(2) 对数尺度下的线性处理。在对数尺度下,本文所使用的对数扫频方式频率的乘法关系转换为加法关系,这使得原本在线性尺度下复杂的频率变化在对数尺度下变得线性

化^[12],简化了分析过程。

(3) 数据压缩。通过变步长的尺度缩放对数据进行有效的压缩,在处理大规模数据时尤为重要,可以减少计算资源的消耗,提高处理效率。

小波系数矩阵 $CWT_x(a,b)$ 每一列的最大幅值表示在该时间点,信号在哪个尺度(频率)上具有最大的能量或强度。这可以视为该时间点信号的主导频率成分,即在此刻,信号的能量主要集中在哪个频率上。

4 试验方案与参数解算

4.1 试验准备与测试方法

试验设备连接关系如图4所示,包括:一台惯性测量与导航装置作为受试设备;一台精密角振动台以及附属控制机柜,控制机柜可通过模拟量形式输出角振动台实时角度位置信息;一台专用测试台以及内置的数据采集板卡,用来同步采集惯测装置输出信号和角振动台输出的模拟量反馈信号;一台恒压电源;一套专用测试电缆,用于连接测试台与惯测装置、电源、控制机柜,实现数据对惯测装置的供电与数据采集。

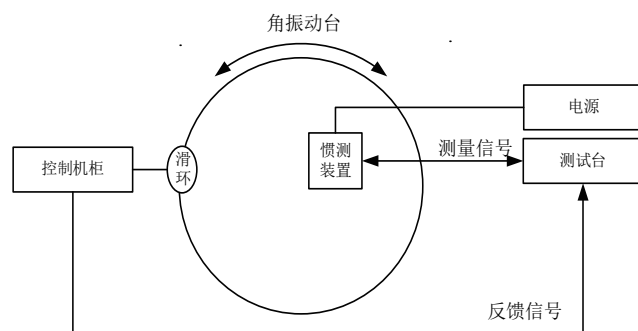


图4 试验设备连接关系

将各部分按照图4所示连接关系连接后,准备开始试验。试验步骤如下。

- (1) 通过减振器将产品安装在特制角振动测试工装上,将工装固定在角振动台转盘上靠近转动轴处。
- (2) 产品加电,设置角振动台以 10° 的幅度,从1 Hz为起始,180 Hz为结束进行扫频测试,扫频时长为4 min。测试软件同步采集角振动台的模拟量输出信号。
- (3) 关闭电源,关闭角振动台,结束测试。
- (4) 以角振动台模拟量输出信号为基准,分别计算三轴角速度通道的幅频特性、相频特性。

4.2 参数解算

假设角振动台以扫频方式运行,则角振动台输出角速度可以表示为:

$$x(t) = A \cdot \sin(2\pi f(t) + \varphi_0) \quad (12)$$

式中: A 为振动幅度, φ_0 为角振动台输出初始相位, $f(t)$ 为实时频率, 表示式为:

$$f(t) = 2^{\lambda t} \cdot f_0 \quad \text{其中, } \lambda = \frac{\log_2 \frac{f_1}{f_0}}{T} \quad (13)$$

式中: λ 为扫频速率 (oct/s), f_0 与 f_1 分别为扫频起始频率与终止频率。在振动作用下, 惯测装置角速度通道输出也为正弦形式, 表示为:

$$\Omega_f(t) = \Omega_g \cdot \sin(2\pi f(t - t_d) + b_0) \quad (14)$$

式中: Ω_g 为角速度通道输出信号幅值, t_d 为延迟时间。

令 $\Omega_f(t) = x(t)$, 则:

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} \Omega_f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (15)$$

即:

$$CWT_{\Omega_f}(a, b) = \frac{\Omega_g}{\sqrt{a\sqrt{\pi}}} \sum_{n=1}^N (\sin(2\pi f(nT_s - t_d) + b_0) e^{\frac{1}{2}(\frac{(b-n)T_s}{a})^2 + jn_0(\frac{(b-n)T_s}{a})}) \quad (16)$$

可得, 小波变换系数幅值为:

$$|CWT_{\Omega_f}(a, b)| = \frac{\Omega_g}{\sqrt{a\sqrt{\pi}}} \sum_{n=1}^N \sin(2\pi f(nT_s - t_d) + b_0) e^{\frac{1}{2}(\frac{(b-n)T_s}{a})^2} \quad (17)$$

针对某一频率 (尺度) 处, 即当尺度因子 a 取定时, 小波系数幅值在 $b=n$ 时取得最大值。此时, 可根据所计算小波系数矩阵计算对应幅值与相位, 角振动台振动信号 $x(t)$ 作相同处理, 便可得到包含振动幅值、相位的信息。

$$|CWT_{\Omega_f}(a, n)| = \frac{\Omega_g}{\sqrt{a\sqrt{\pi}}} \sum_{n=1}^N \sin(2\pi f(nT_s - t_d) + b_0) \quad (18)$$

整体数据处理流程如图 5 所示。

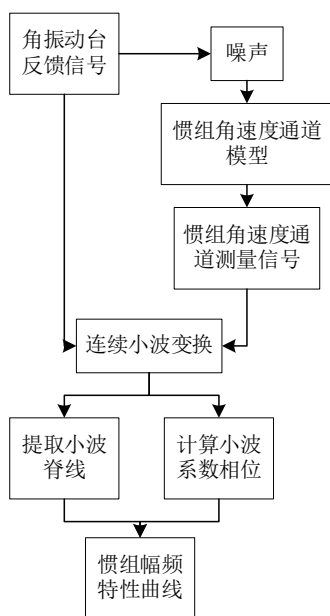


图 5 数据处理流程

5 仿真结果与误差分析

通过在 MATLAB 中搭建仿真环境, 并在陀螺输出仿真中加入两个噪声干扰以模拟实际工况, 分别是量级为 $2 \times 10^{-4} (^{\circ})/s$ 的角振动台输出误差干扰, 以及包含随机游走、温度漂移噪声、白噪声, 零均值、量级为 $1 \times 10^{-4} (^{\circ})/s$ 的惯组角速度通道输出噪声, 如图 6 所示。

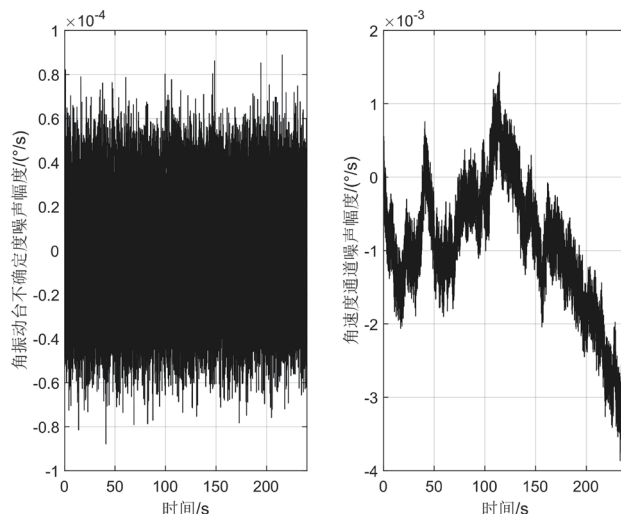


图 6 角振动台噪声与角速度通道输出噪声

设置惯测装置采样率 $F_s=2000$ Hz, 并对 0.5 ms 输出信号进行 2.5 ms 平滑作为惯组角速度通道输出信号序列, 实际输出信号采样率为 $F_s=400$ Hz。设计角振动信号起始频率 $f_0=1$ Hz, 终止频率 $f_1=180$ Hz, 扫频时长设置为 240 s, 设置角振动台振动幅值为 $10 (^{\circ})/s$ 。对试验数据进行小波变换分析的方法和步骤, 仿真模型的建立和参数设置, 分析和比较试验结果和仿真结果。对信号进行时频分析, 结果如图 7 所示。

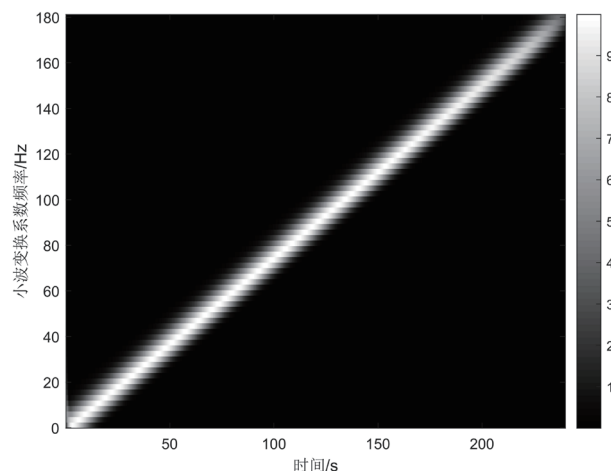


图 7 CWT 时频图

根据小波系数计算惯测装置对数幅相特性曲线如图 8 所示。

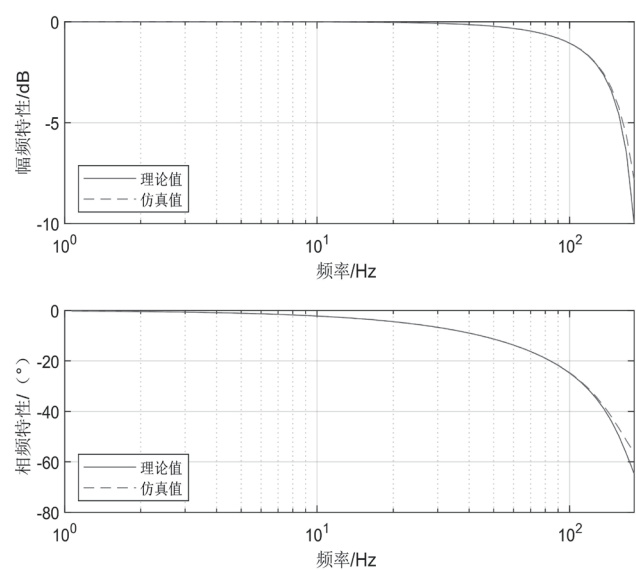


图 8 对数幅相特性曲线对照图

仿真实验中，不同频率点模型对应理论值与仿真实验计算值结果对比如表 1 所示。

表 1 仿真结果与相对误差

频率 /Hz	理论值 /dB	仿真值 /dB	相对误差 /%
1.1	0.000 2	0.000 2	0.056 5
10.5	-0.009 3	-0.009 3	0.000 9
29.7	-0.077 1	-0.077 1	-0.026 5
51.7	-0.241 4	-0.241 2	-0.097 0
73.1	-0.508 2	-0.507 1	-0.234 4
103.4	-1.156 7	-1.148 2	-0.731 3
127.3	-2.093 7	-2.052 8	-1.950 2
136.4	-2.640 9	-2.563 4	-2.933 0
146.2	-3.422 5	-3.264 2	-4.624 1
167.9	-6.509 1	-5.657 9	-13.076 9

经计算，所用惯测装置角度通道模型理论 -3 dB 带宽为 141.36 Hz（-3.000 9 dB），相位为 -41.300 2°。仿真试验计算出惯组角速度通道带宽为 142.81 Hz（-3.000 1 dB），相位为 -40.544°。带宽与理论值仅相差 2.701%，相位误差 5.929%，说明该方法能够通过角振动试验数据准确判读惯测装置角速度通道带宽与相位滞后信息，该测试方案适用于惯测装置角速度通道的频率特性测试。

6 结语

本文从理论分析与试验测试出发，提出了一种基于复 Morlet 小波的惯组角振动测试方案与参数解算方法，使用正弦扫频信号作为激励信号，并通过连续小波变换实现惯测装置角度速度通道对数幅相特性曲线。实验结果表明，仿真实验辨识带宽与理论值误差小于 3%，提高了测试效率，节约了测试成本，为惯性测量装置角速度通道频率特性分析提供

了一种新的分析测试手段。接下来，需要研究分析测试方法产生误差的原因以及如何消减测试误差，并进一步探究在靠近奈奎斯特采样频率附近幅频特性的识别技术。

参考文献：

[1] 边志强,曾擎,王皓,等. 光纤陀螺测量卫星结构角振动的地面试验验证 [J]. 航天器工程,2016,25(2):133-138.

[2] 陈阳. 低成本 MEMS 陀螺频率特性测试方法 [J]. 电子测量技术,2020,43(13):138-142.

[3] 吴凇,李艳荣,稻垣照美,等. 小型反馈射流振动器的动态特性研究 [J]. 机械科学与技术,2016,35(12):1894-1899.

[4] 陈磊,高迪雅. 基于改进小波分析的电弧故障高频信号识别 [J]. 电子设计工程,2024,32(6):122-126.

[5] 蔡文迹. 基于模型参数辨识与振动分析的动力调谐陀螺仪故障诊断 [D]. 天津: 天津大学,2023.

[6] 余国才,王虹,孙传波,等. 小波结合改进自适应卡尔曼滤波的 MEMS 陀螺降噪方法 [J]. 微波学报,2023,39(S1):414-417.

[7] 张学伟. 基于频域分析与多元滤波的磁悬浮陀螺数据处理研究 [D]. 西安: 长安大学,2020.

[8] 郭文杰,柴天建,颜建伟,等. 基于高斯小波函数和线性表达法的开口板自由振动特性研究 [J]. 振动与冲击,2024,43(6):29-37.

[9] 国防科学技术工业委员会. 光纤陀螺仪测试方法:GJB 2426A-2015[S]. 北京:总装备部军用标准出版发行部,2015.

[10] 盛立昊,汪立新,吴双磊,等. 半球谐振陀螺线振动试验分析 [J]. 四川兵工学报,2013,34(11):33-36.

[11] 万乔乔,张俊然,龚晓峰. 基于 CMOR 的跳频信号参数盲估计算法 [J]. 计算机工程与设计,2015,36(1):37-41.

[12] 梁仲明,滕宪斌,杨期江,等. 基于 CEEMD- 参数优化 Morlet 小波变换的柴油机振动信号冲击特征提取方法 [J]. 船舶工程,2020,42(5):90-96.

【作者简介】

刘兴虎（1998—），男，山西忻州人，硕士，研究方向：控制科学与工程。

郝春朝（1972—），女，河北石家庄人，硕士，研究员，研究方向：惯性导航技术。

王亚凯（1984—），男，河北保定人，硕士，研究员，研究方向：惯性导航技术。

（收稿日期：2024-04-22）