

低成本 MEMS 陀螺频率特性测试方法

陈 阳

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要: 陀螺作为角速率测量元件,常应用在控制系统的反馈回路,其性能直接影响闭环系统的性能,因此需要对其频率特性进行测量。低成本 MEMS 陀螺带宽较高,这就给频率特性测试及相关的数据处理带来了困难。为了准确测定这类陀螺的频率特性,首先给出了直接利用离散测量结果计算频率特性的方法,相比于利用连续形式的相关分析法处理数据,所给出的计算方法避免了数值法计算积分;其次利用角振动台作为角运动激励源,配合可以实现多源数据同步的实时数据采集系统采集角振动台和陀螺输出,构建了角速率陀螺频率特性测试系统;最后对某型低成本 MEMS 陀螺进行了频率特性测试,并总结了测试流程和注意事项。给出的测试方案能够获得 MEMS 陀螺频率特性,为采用 MEMS 陀螺作为角速率测量元件的控制系统分析提供参考。

关键词: MEMS 陀螺;频率特性;离散形式相关分析;同步采样

中图分类号: TN710.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Test method for frequency characteristics of low cost MEMS gyro

Chen Yang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: As an angular rate measuring element, gyro is often used in the feedback loop of the control system. The performance of the MEMS gyroscope directly affects the performance of the closed-loop system, so its frequency characteristics need to be measured. Firstly, The high bandwidth of low cost MEMS gyro brings difficulties to frequency characteristic test and related data processing. In order to accurately measure the frequency characteristics of this type of gyro, a method of calculating the frequency characteristics directly by using the discrete measurement results is presented. Secondly, the angular rate gyro frequency characteristic testing system is constructed by using the angular rate gyro vibration table as the angular motion excitation source and combining with the real-time data acquisition system which can realize multi-source data synchronization. Finally, the frequency characteristic of a low cost MEMS gyroscope is tested, and the testing process and matters needing attention are summarized. The test scheme presented can obtain the frequency characteristics of MEMS gyroscope, which provides a reference for the analysis of the control system using MEMS gyroscope as the angular rate measuring element.

Keywords: MEMS gyroscope; frequency characteristics; discrete form correlation analysis; synchronous sampling

0 引 言

微机电系统(MEMS)加工工艺的不断发展使得采用 MEMS 技术制造的角速率陀螺成本大大降低,这就促进了这类器件在工业级产品和消费级产品的广泛应用。其典型的应用场景包括车载导航设备、无人驾驶车辆、多旋翼无人机、工业机械臂等。从技术原理来说,这类陀螺中的 MEMS 角速率传感器可以测量的信号频带较宽,但生产厂家为了提高这类低成本 MEMS 陀螺产品的测量精度,普遍在产品内部加入了滤波模块,这就可能导致陀螺的频率特

性达不到应用场景对指标的要求。特别是当将陀螺作为角速率传感器形成闭环控制系统时,较低的陀螺带宽可能导致闭环性能下降,甚至失去稳定性。另外,在一些被测量运载器处于高动态运动情况下,频率特性较差的陀螺也难以记录下运载器角运动的高频成分。因此,控制系统工程师需要在对陀螺选型时测量其频率特性,从而保证所设计的系统性能达到预期。

频率特性测试是控制系统设计方面的重要工作,许多学者对测试系统的搭建和数据处理方法进行了研究。文献[1]对某舵机操纵机构的频率特性进行了测试,并依据测

试结果找出了结构刚度薄弱位置。文献[2-8]分别基于多种测试平台,针对舵机和伺服平台设计了频率测试系统,并拟合得到了数学模型。但是对于舵机来说,频率特性测试一般只需要测试到 30 Hz 左右,而 MEMS 陀螺一般需要测试超过 70 Hz,测试频率的提高使得测试系统延时和数据处理误差对测试结果的影响变大。文献[9-10]利用单轴角振动台对惯性测量组件设计了频率特性测试系统,测试过程考虑了安装位置杆臂应对加速度计的影响,测试频率最高分别达到了 100 Hz 和 90 Hz。进行频率测试时,可以基于多种类型的输入信号,包括不同频率的正弦信号,Chirp 波^[11-12], Multitone 波^[13], 白噪声^[14]等。文献[15]提出了一种多谐差相信号测试法,以提高相关分析法的测试效率。但是,这些数据处理方法一般都考虑连续信号,随着数字电子技术的普及,大部分频率特性测试系统都是数字式的,而直接利用连续信号的相关分析法,就不可避免的需要进行数值积分运算,这样既增加了数据处理的难度,又引入了数字计算误差。

本文总结已有相关分析法的概念和原理^[16],给出了直接利用离散数据计算频率特性的方法,既避免了连续形式相关分析法产生的数值计算误差,也同时简化了数据处理过程;利用运行实时操作系统的工控机及配套软件完成了信号的同步测量,尽可能减小测量引起的误差;最后完成了某型低成本 MEMS 陀螺特定频率点的频率特性测试。本文可以为角速率陀螺频率特性测试及相关产品频率特性的计算提供参考。

1 频率特性测试方法

1.1 相关概念

频率特性测试的目的在于获得被测系统在有限个频率点上的频率特性,并获得幅值和相角随频率变化的曲线得到 Bode 图或 Nyquist 图。对于角速率陀螺来说,若将其应用在闭环运动控制系统中,则可以利用这些曲线完成控制系统设计,进而对系统性能和相对稳定裕度进行设计;若将其应用在角速率测量系统中,则可以利用这些曲线判断该系统是否与被测信号匹配。考虑被测系统输入输出关系为:

$$Y(s) = G(s)U(s) + H(s)W(s) \quad (1)$$

式中: Y 为系统输出; U 为已知的系统输入; W 为系统噪声; G 为系统传递函数; H 为未知的由噪声到系统输出的传递函数。若噪声为 0,系统输入为已知的正弦信号:

$$u(t) = A \sin(\omega_0 t) \quad (2)$$

输出为同频正弦信号:

$$y(t) = B \sin(\omega_0 t + \phi_0) \quad (3)$$

则频率特性测试需要确定的系统传递函数的幅频特性 $|G(s)|$ 和相频特性 $\angle G(s)$:

$$|G(s)| = B/A \quad (4)$$

$$\angle G(s) = \phi_0 \quad (5)$$

频率特性测试原理简单、物理概念清晰,但实际测试时需要注意需要计算的相频特性是利用时间差获得的,因此在记录输入输出信号时要进行同步采集。除此以外,数据处理方法会对非参数辨识结果造成很大影响。当被测系统带宽较低,或测试精度要求不高时,可以利用示波器同时显示输入输出波形,并利用过零时刻直接读出延时时间并计算相位差,利用读最大值的方法获得幅值比。直接测量法原理图如图 1 所示。

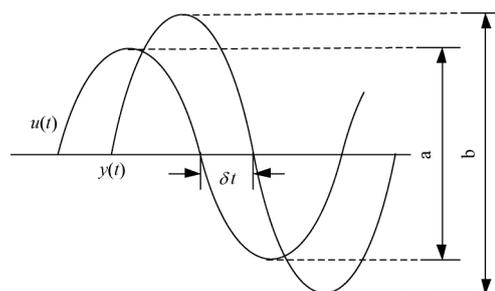


图 1 直接测量法原理

幅值比: $B/A = b/a$

相角差: $\phi_0 = \omega_0 \times \delta t$

这种方法的缺点如下:

- 1) 实际信号中存在噪声,这样就难以准确获得信号的过零时刻,造成得到的相位差不准;
- 2) 实际系统中均存在非线性因素,所以峰值并不是基波幅值,造成得到的幅值比不准;
- 3) 无法适应数字量输出的被测设备;
- 4) 当测试频率较高时,测试误差明显增大;
- 5) 测试结果受人为影响大,且无法定量分析测试误差。

1.2 相关分析法

为了避免直接测量法缺点,一般采用相关测量法进行数据处理,即将系统的输出信号和参考信号相乘并求平均,由于利用了全部测试数据,所以能够有效抑制前面提到的噪声和谐波问题,提高计算的相位差和幅值比。相关测量法的测试原理如图 2 所示。

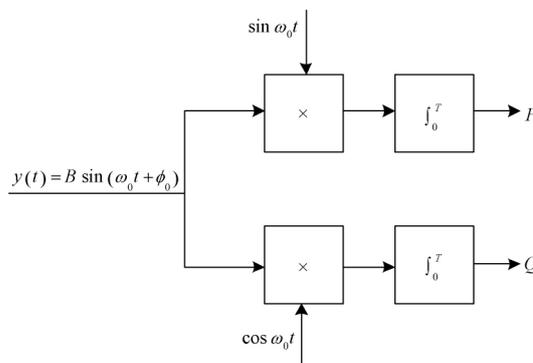


图 2 相关测量法测量原理

设被测元件在正弦作用下输出是 $y(t) = B \sin(\omega_0 t + \phi_0)$, 将该信号与同频率基准信号 $\sin \omega_0 t$ 相乘, 并计算定积分:

$$P = \int_0^T B \sin(\omega_0 t + \phi_0) \sin \omega_0 t dt = \frac{B}{2} \int_0^T [\cos \phi_0 - \cos(2\omega_0 t + \phi_0)] dt \quad (6)$$

在整周期内进行积分, 谐波项积分为 0, 输出只剩常数项, 即

$$P = \frac{BT}{2} \cos \phi_0 \quad (7)$$

当取同频率基准信号为 $\cos \omega_0 t$ 时, 同理可得:

$$Q = \frac{BT}{2} \sin \phi_0 \quad (8)$$

利用计算得到的积分结果 P 和 Q , 可以得到系统输出的幅值和相移

$$B = \frac{2}{T} \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (9)$$

$$\phi_0 = \arctan(Q/P) \quad (10)$$

但上述方法中需要计算定积分来得到 P 和 Q 。目前测试多采用数字系统完成, 若利用相关分析法还需要考虑如何将离散数据进行处理。

1.3 离散形式的相关分析法

为了避免进行数值积分计算, 这里直接利用采集到的数字信号进行分析, 离散形式的输入信号为:

$$u(kT) = A \sin(\omega_0 kT) \quad (11)$$

稳态下同步采样的输出信号为

$$y(kT) = B \sin(\omega_0 kT + \phi_0) \quad (12)$$

输入输出信号均记录 N 个采样点。在理想条件下考虑计算 B 和 ϕ_0 。定义理想条件下输出信号为

$$\hat{y}(kT) = B \sin(\omega_0 kT + \phi_0) = B_c \cos(\omega_0 kT) + B_s \sin(\omega_0 kT) \quad (13)$$

式中: $B_c = B \sin(\phi_0)$ 和 $B_s = B \cos(\phi_0)$ 。

为了从实际采集的输出信号 $y(kT)$ 中拟合得到最优的 $\hat{y}(kT)$, 计算 N 个采样点的误差二次型目标函数:

$$J = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (y(kT) - \hat{y}(kT))^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (y(kT) - B_c \cos(\omega_0 kT) - B_s \sin(\omega_0 kT))^2 \quad (14)$$

为了尽可能减小误差, 需要计算 B_c 和 B_s 使得 J 取极小值。为此, 求 J 对 B_c 和 B_s 的偏导数。首先考虑 B_c 。

$$\frac{\partial J}{\partial B_c} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (y(kT) - B_c \cos(\omega_0 kT) - B_s \sin(\omega_0 kT)) (-\cos(\omega_0 kT)) = 0 \quad (15)$$

利用三角变换并合并同类项, 得到等价表达式:

$$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(kT) \cos(\omega_0 kT) - \frac{B_c}{2} = 0$$

$$\frac{B_c}{2N} \sum_{k=0}^{N-1} \cos(2\omega_0 kT) - \frac{B_s}{2N} \sum_{k=0}^{N-1} \sin(2\omega_0 kT) = 0 \quad (16)$$

通过选择 N 可以使等式左侧后面两项为 0。考虑等比数列求和公式:

$$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} z^{-k} = \frac{1 - z^{-N}}{N(1 - z^{-1})} \quad (17)$$

令 $z = e^{j2\pi l/N}$, $l \in N^+$ 为正整数, 则有:

$$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} e^{-j2\pi l k/N} = \frac{1 - e^{-j2\pi l}}{1 - e^{-j2\pi l/N}} = \begin{cases} 1 & l = rN \\ 0 & l \neq rN \end{cases} \quad (18)$$

利用欧拉公式:

$$e^{-j2\pi l k/N} = \cos(2\pi l k/N) - j \sin(2\pi l k/N) \quad (19)$$

代入到上式, 得到实部和虚部分别为:

$$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \cos(2\pi l k/N) = \begin{cases} 1 & l = rN \\ 0 & l \neq rN \end{cases} \quad (20)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sin(2\pi l k/N) = 0 \quad (21)$$

若选择 $N = 2\pi l/\omega_0 T$, 则有:

$$B_c = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(kT) \cos(2\pi l k/N) \quad (22)$$

利用同样的方法, 求 $\frac{\partial J}{\partial B_s} = 0$, 选择 $N = 2\pi l/\omega_0 T$, 可以得到:

$$B_s = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(kT) \sin(2\pi l k/N) \quad (23)$$

根据 B_c 和 B_s 的定义, 可以得到:

$$B = \sqrt{B_c^2 + B_s^2} \quad (24)$$

$$\phi_0 = \arctan \frac{B_c}{B_s}$$

由于公式中都是离散量, 因此这种方法避免了数值积分过程, 不仅使用更加方便, 也避免了数值计算过程产生截断误差。

2 MEMS 陀螺频率特性测试系统设计

对某型 MEMS 陀螺的进行了频率特性测试。整个测试系统由被测陀螺、角振动台、通讯板卡、数据采集板卡、工控机及其上位机组成。其中被测陀螺采用 RS422 串口直接输出角速率信号, 采样频率为 1 kHz; 角振动台台面与被测陀螺刚性固联, 并且角振动台可以将台面实际角位置通过模拟量输出; 通讯板卡和数据采集板卡插在工控机的 PCI 插槽内, 为了能够精确同步采集陀螺角速率输出和角振动台台面实际角位置, 工控机运行在实时操作系统下, 由上位机完成工控机程序的编写、编译、下载, 并控制整个测试系统运行及读写数据。所建立的测试系统原理如图 3 所示。

进行对 MEMS 陀螺进行频率特性测试之前, 还需要解决以下几点问题:

1) 对被测系统进行原理建模, 确定被测频率点, 并利用预估的系统饱和限幅值确定输入信号幅值, 既避免信

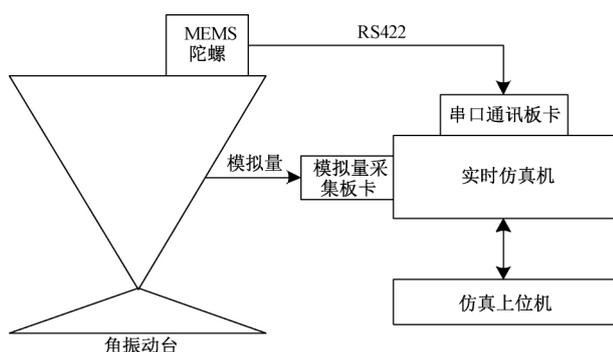


图 3 频率特性测试系统组成

号太小导致相对误差变大,又避免测试系统中出现饱和现象;

2) 若被测系统零漂或零位偏移很大,需要控制测试时间避免饱和;

3) 当采用数字系统测试时,需要根据被测系统的使用环境和测试设备性能确定采样周期,并预先估计采样造成的测试误差。

这里根据被测陀螺使用手册给出的参考特性选择频率点。由于角振动台最大角振动加速度能力有限,根据正弦信号幅值与其最大角加速度换算关系确定输入信号幅值。由于角振动台能力限制,输入频率最高 500 rad/s。

被测陀螺零漂和零位偏移产生的角速率偏移在测试时间内与输入角速率相比较小,可以忽略不计,但这部分偏移量需要在数据预处理时进行考虑。被测陀螺采用 1 kHz 数字量输出,因此测试系统采样周期选为 1 ms。

3 测试结果与数据分析

3.1 数据预处理

数据预处理包括剔除野值和去掉趋势项。由于干扰的存在,测试结果在某些点有可能严重偏离实际值,可以将采样输出用图形方式表示,利用目视检查,若有异常值则进行剔除或重新测量。

对于线性系统来说,系统对正弦输入信号的稳态响应应为同频率的正弦。但实验过程中可能采集到系统的瞬态响应分量,另外被测系统本身也会存在零漂和零位偏移,使得测试数据存在趋势项。可通过截取数据稳定段和去掉最优拟合直线的方法去掉数据趋势项。

3.2 幅值比和相位差计算

利用离散形式的相关测量法计算输入输出信号的幅值比和相位差,得到测试结果如表 1 和图 4 所示。需要注意的时所采集输入信号为角振动台实际角度,因此在计算幅值比时需要角度和角速度的换算,计算相位差时需要补偿 90°的相移。

从图中可以看出,陀螺在 450 rad/s 附近存在谐振峰,

表 1 被测频率点和测试结果(部分)

测试频率/ (rad/s)	输入幅值/ (°)	输入输出 幅值比/dB	相位差/ (°)
5	30.00	0.062	-0.60
30	5.56	-0.0044	-2.13
70	1.02	-0.0051	-5.77
150	0.22	0.0331	-12.00
275	0.07	0.0960	-24.63
350	0.04	0.6679	-27.39
450	0.02	1.0779	-40.58
500	0.02	-2.0626	-57.83

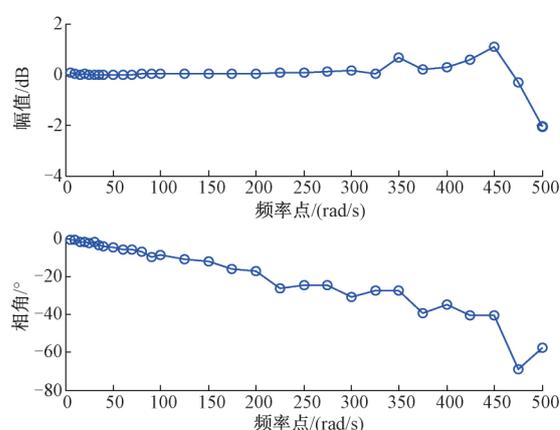


图 4 陀螺频率特性

但峰值较小约 1.07 dB;陀螺在 500 rad/s 频率范围以内相角滞后小于 90°,幅值比高于 -3 dB,带宽超过 500 rad/s;陀螺在 100 rad/s 频率下相角延迟 8.5°,对于穿越频率低于 100 rad/s 的闭环控制系统来说,可以在控制器设计过程中忽略陀螺动态特性,仅留出一定的相对稳定裕度即可。

4 结 论

本文针对低成本 MEMS 陀螺进行了频率特性测试,由于被测产品带宽较高,因此本文对相关分析法的离散形式进行了分析,得到了直接利用数字信号计算频率特性的方法,从而避免了进行数值积分运算。然后利用角振动台、通讯板卡、数据采集板卡、工控机等组成了针对 MEMS 陀螺的频率特性测试系统,该系统基于实时操作系统运行,可以实现输入输出信号的硬件同步,降低了由于测试系统产生的通讯延迟。在此基础上,对某低成本 MEMS 陀螺产品在该测试系统上进行了频率特性测试试验,测量得到了该产品在特定点上的频率特性,并绘制了 bode 图。测试结果表明,构建的频率特性测试系统和相应的数据处理方法能够满足此类低成本 MEMS 陀螺频率特性测试的需求。

参考文献

[1] 苏华昌,付玮,丁镇军,等.舵操纵机构角频率特性试验

- 技术[J].现代防御技术,2019,47(5):36-42.
- [2] 赵志俊,孟祥喆,郑浩.舵机带宽测试系统设计与试验方法研究[J].电子测量技术,2019,42(1):63-67.
- [3] 王丽,桂彩云.基于 LabVIEW 的实验数据处理方法研究[J].国外电子测量技术,2018,37(4):20-25.
- [4] 李魁,高鹏宇.混合式惯导系统自标定技术研究[J].仪器仪表学报,2019,40(4):9-17.
- [5] 薄志峰.基于 LabWindows/CVI 的电动舵机自动化测试系统设计[J].国外电子测量技术,2015,34(5):66-69.
- [6] 周江平,杨鹤.伺服机构动态特性测试系统设计[J].计算机测量与控制,2019,27(8):25-29.
- [7] 熊伟,付奎生.面向稳定平台伺服回路频率特性简易测试系统[J].国外电子测量技术,2012,31(7):38-40,44.
- [8] 陈连华,赵娜,王奕博,等.一种快速单步的频率特性测试方法[J].电子测量技术,2011,34(2):77-79,101.
- [9] 顾云涛.一种惯性传感器组件量程及频率特性测试系统设计[J].舰船电子工程,2019,39(6):159-163.
- [10] 陈远才,万彦辉,张朝飞.一种基于角振动台的 SINS 加速度计通道频率特性测试方法[J].中国惯性技术学报,2016,24(3):291-295.
- [11] 邓永停,李洪文,王建立,等.2 m 望远镜主轴交流伺服控制系统设计[J].光学精密工程,2017,25(1):163-171.
- [12] 王建华,岳瑞华,顾凡.基于 chirp 信号导弹伺服机构频率特性测试研究[J].现代防御技术,2017,45(4):180-185.
- [13] 张寅,侯文,李建民,等.基于 Multitone 信号的伺服系统频率特性测试方法研究[J].计算机测量与控制,2014,22(10):3129-3131.
- [14] 朱燕梅,侯文,郑浩鑫,等.系统辨识在伺服系统动态特性测试中的应用[J].现代雷达,2015,37(12):57-60.
- [15] 宿常鹏,王雪梅,许哲,等.多谐差相信号激励下的频率特性测试方法研究[J].现代防御技术,2019,47(5):143-150.
- [16] FRANKLIN G, DAVID P J, MICHAEL W. 动态系统的数字控制:第 3 版[M].北京:清华大学出版社,2001.

作者简介

陈阳,助理研究员,博士,主要研究方向为飞行器制导控制与仿真技术等。

E-mail:chenyang4688@163.com