

文章编号:1004-2474(2012)05-0692-03

# 石英 MEMS 陀螺检测模块的测试方法研究

朱振忠,王清亮,李世国,张锐,苏永川,蒋昭兴

(中国电子科技集团公司第26研究所,重庆400060)

**摘要:**提出了一种石英微机械(MEMS)陀螺检测模块的测试方法和测试系统方案。该方法仅将检测模块的输入/输出端口接入测试系统,无需其他位置的信号注入和引出,即可实现增益、相位、频带、阻尼等电路特性的测试和标定,适用于生产过程对检测模块的快速测试及研制过程对检测模块的性能分析。

**关键词:**石英微机械(MEMS)陀螺;检测模块;锁定放大器;等效输入信号

**中图分类号:**TN384;V241 **文献标识码:**A

## Study on Testing Methods of Detection Module of the Quartz MEMS Gyroscope

ZHU Zhenzhong, WANG Qingliang, LI Shiguo, ZHANG Rui, SU Yongchuan, JIANG Zhaoxing

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** A testing method and a test system scheme for the detection module of quartz MEMS gyroscope is proposed in this paper. The test and calibration of the circuit parameters such as gain, phase, bandwidth and damping ratio can be carried out only by connecting the input/output port of the detection module with the test system and no need of input and output of other position signals. The methods is suitable for the fast testing of detection module of quartz MEMS gyroscope during the production process and the performance analysis of the detection module during the development of quartz MEMS gyroscope.

**Key words:** quartz MEMS gyroscope; detection module; lock-in amplifier; equivalent input signal

### 0 引言

石英微机械(MEMS)陀螺是一种微型的固态角速率传感器,能广泛应用于稳定系统、控制系统、制导系统及仪器设备等领域。鉴于该型陀螺具有可大批量生产的特性,其测试手段的研究将具有重要意义。石英MEMS陀螺由敏感器件、驱动模块、检测模块和结构件组成。其中检测模块包括微电流检测、电压放大、相敏解调、低通滤波和输出放大等单元电路。检测模块的测试和标定可采用分级方式进行,但操作过程繁琐,测试效率低。特别是对局部密封或集成化的检测模块,难以实现分级信号的注入和测试。因此,需研究一种利用检测模块的输入和输出端口直接获得模块性能的测试方法,完成检测模块的性能测试和参数标定,并大幅提高工作效率。

本文提出的测试方法,通过对石英MEMS陀螺检测模块的输入端注入特定的等效信号,测试其输出端的变化,从而获得增益、相位、带宽及阻尼等电路特性。这种测试方法适用于生产过程对检测模块

的快速测试,也适用于研制过程对检测模块的性能分析。

### 1 测试原理

图1为石英MEMS陀螺的组成框图。检测模块有2个输入端口和一个输出端口,其输入信号分别为驱动信号 $V_r$ 和敏感器件的检测电极 $V_{in}$ 信号。

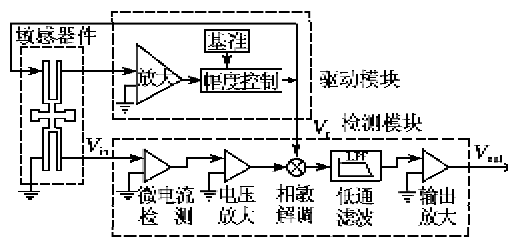


图1 石英MEMS陀螺的组成

$V_r$ 作为解调参考提供给检测模块的相敏解调单元。 $V_r$ 可利用外部信号源提供的方波信号。本文利用标准敏感器件与驱动模块组成驱动回路,产生实际工作状态下的方波信号,可避免注入信号对

收稿日期:2012-04-25

作者简介:朱振忠(1960-),男,江苏人,高级工程师,主要研究方向为微型惯性技术。

电路工作的影响,且可对驱动模块的工作状态进行同步测定。

在检测模块的测试中,需模拟检测电极的不同工作状态,产生等效的  $V_{in}$  信号输入检测模块,并测试对应的输出信号  $V_{out}$ , 获得所需的输入/输出特性。根据石英 MEMS 陀螺的工作原理,敏感器件检测电极的振动模式取决于驱动电极的振动状态与敏感方向上输入的角速率信号(只考虑正常工作状态)。体现在电信号上,  $V_{in}$  是一个与  $V_r$  频率完全相同的正弦信号,其相位和幅度决定了检测模块的最终输出<sup>[2]</sup>。因此实现检测模块的测试,关键是获得与  $V_r$  频率相同、相位和幅度可准确调节的等效输入信号  $V_{in}$ 。该信号将利用 SR830 锁相放大器经匹配网络后获得。

SR830 锁相放大器是常用的高精度测量仪器。该仪器利用数字锁相技术,能提供一个稳定的内部合成数字参考信号,可对被检测信号和同频参考信号进行数字互相关运算实现微弱信号的精确检测<sup>[3]</sup>。在检测模块的测试中,将  $V_r$  信号输入 SR830 的参考通道,通道 1 选择 X 输出, X 信号经匹配网络处理后作为  $V_{in}$ 。根据 SR830 的工作原理,其 X 输出为

$$X = V_{sig} \times \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

式中:  $V_{sig}$  为 SR830 的 A 通道输入信号(单端电压输入);  $\omega$  为参考通道输入信号的角频率;  $\theta$  为 SR830 上可调的相位角。因此 X 是锁定于  $V_r$  信号频率(即驱动频率),幅度与相位可调的正弦信号。由于 X 输出前经低通滤波器,一般石英 MEMS 陀螺敏感器件的驱动频率在 11 kHz 附近,需将 SR830 的时间常数设置成最小值(10  $\mu$ s),使正弦信号顺利输出。此时  $V_{in}$  的幅度取决于  $V_{sig}$ , 相位取决于  $\theta$ , 即

$$V_{in} = V_{sig} \times \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

用一台多功能信号源的输出作为  $V_{sig}$ , 选择不同的信号内容,可产生敏感器件的检测电极在不同工作状态下的等效输出信号:

1)  $V_{sig}$  为直流信号时,根据式(2)选取适当的幅度和相位,可分别模拟检测电极的静态输出、哥氏信号输出及混合输出,测试对应的  $V_{out}$  可获得检测模块的零位、增益及线性度等特性。

2)  $V_{sig}$  为带内正弦信号,  $\theta$  为  $\pi/2$  或  $-\pi/2$  时,  $V_{in}$  等效于敏感器件检测电极在输入周期性变化的角速度状态下的哥氏信号,检测模块将输出与  $V_{sig}$  频率相同的正弦信号,测试信号的延迟可获得检测模块的相位特性。

3)  $V_{sig}$  为一定范围的扫频信号,  $\theta$  为  $\pi/2$  或  $-\pi/2$

2 时,  $V_{in}$  等效于敏感器件检测电极在角振动扫描状态下的哥氏信号,检测模块的输出幅度体现了其幅频特性,3 dB 衰减点的频率即为检测模块的带宽。

4)  $V_{sig}$  为阶跃信号,  $\theta$  为  $\pi/2$  或  $-\pi/2$  时,  $V_{in}$  等效于敏感器件检测电极在角速度突变状态下的哥氏信号,检测模块输出幅度的变化体现了动态响应特性,测试幅度的变化量和超调量可获得检测模块的阻尼系数。

## 2 测试系统方案

图 2 为石英 MEMS 陀螺检测模块的测试系统方案。图中,多功能信号源要求可输出直流、正弦、扫频、方波等信号,幅度和偏移电平连续可调。检测仪表采用数字多用表和示波器,输入端并接,分别用于测试检测模块的输出值和观察输出波形。在上节的 2)~4) 测试过程中,应将信号源的同步输出接入示波器的触发通道,实现信号波形的同步。

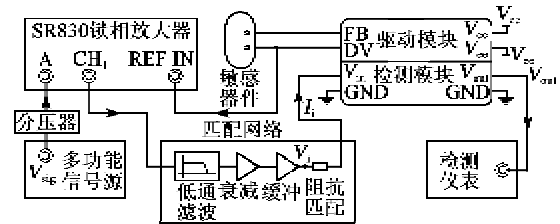


图 2 检测模块的测试系统

图 2 中接入了匹配网络和分压器。其中匹配网络包括低通滤波、衰减、缓冲和阻抗匹配电路。低通滤波用于滤除 SR830 输出的数字噪声,以获得平滑的正弦信号;由于测试分辨率的要求,SR830 的输出信号幅度范围取值较大,插入衰减电路可使输入电压  $V_i$  的幅度与敏感器件检测电极输出信号的幅度相当;衰减信号经缓冲后串联了 10 M $\Omega$  电阻,等效于信号源  $V_i$  的内阻为 10 M $\Omega$ ,与敏感器件输出阻抗接近,以实现阻抗匹配。分压器用于对多功能信号源的输出信号进行调整,使信号源的指示幅度值与  $V_i$  幅度值构成固定关系,便于从信号源的指示幅度直接获得  $V_i$  的幅度值。石英 MEMS 陀螺的检测模块输入电路为电流放大器结构,其增益系数为输出电压与输入电流  $I_i$  之比,  $I_i$  可通过  $V_i$  和匹配电阻值计算获得。

石英 MEMS 陀螺的驱动模块和检测模块(一般为一体结构)通过测试夹具接入测试系统。由于输入信号微弱,需采取有效的信号屏蔽和隔离措施,提高测试结果的准确性。

## 3 检测模块的实际测试

为验证检测模块测试系统的效果,选择了性能

已知的某型号石英 MEMS 陀螺电路板,电路板包含了驱动模块和检测模块。将其接入图 2 所示的系统,按 1 节中 1)~4)的内容进行实际测试。

1) 将多功能信号源的输出设为直流模式。接通电源后,SR830 上的 UNLOCK 灯熄灭,参考输入单元频率显示为 11.132 kHz,可以确认驱动模块工作正常。设定几种幅度的输入信号,测试相位为 0、 $\pm\pi/4$ 、 $\pm\pi/2$  时电路板的输出电压值(即检测模块的输出),如表 1 所示。

表 1 增益特性测试数据

$V_i$ mV	$I_i$ pA	输出电压 $V_{out}/mV$				
		$\theta=0$	$\theta=-\frac{\pi}{4}$	$\theta=\frac{\pi}{4}$	$\theta=-\frac{\pi}{2}$	$\theta=\frac{\pi}{2}$
3	300	1.7	-1.89	1.91	-1.693	1.694
6	600	1.6	-1.78	1.82	-1.386	1.388
9	900	1.5	-1.469	1.471	-2.080	2.081
12	1200	1.8	-2.080	1.963	-2.772	2.774

检测模块的输入信号中, $\theta=0$  时等效于零位信号; $\theta=\pm\pi/2$  时等效于哥氏信号; $-\pi/2 < \theta < \pi/2$  且不为 0 时等效于混合信号,混合信号为

$$V_i = V_m \times \sin(\omega t + \theta) = V_m \times \sin(\omega t) \times \cos \theta + V_m \times \cos(\omega t) \times \sin \theta \quad (3)$$

式中  $V_m$  为信号峰值,前项为零位信号,经同步解调 and 低通滤波后将消除。后项为哥氏信号,此时:

$$V_i = \sin \theta \times V_m \times \cos(\omega t) \quad (4)$$

表 1 中  $\theta=\pm\pi/4$  时的输入输出数据可用式(4)进行验证。将输入电流与输出电压进行拟合,计算出该检测模块的增益系数为 2.3 mV/pA,即每 1 pA 的输入电流(有效值)将使检测模块产生 2.3 mV 的输出电压增量,此结论与该电路的特性吻合。同时可计算出  $\pm 5 V$  输出时满量程线性度为  $160 \times 10^{-6}$ 。

2) 将多功能信号源的输出设为正弦模式,信号频率为 25 Hz,选取合适的幅度和偏移电平。在 SR830 上将  $\theta$  设为  $\pi/2$ 。检测模块输出信号和信号源同步信号的波形如图 3 所示。经测定  $V_{out}$  滞后于同步信号 5 ms,则该检测模块在 25 Hz 时相位延迟为  $\pi/4$ ,与该电路的特性吻合。

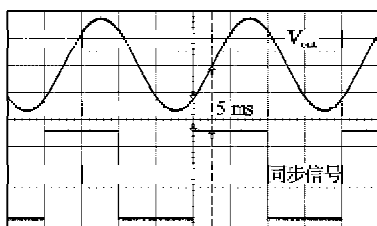


图 3 相位特性测试波形

3) 将多功能信号源的输出设为扫频模式,并

选取合适的幅度和偏移电平。图 4 上半部分为 1~100 Hz 扫频时检测模块的输出波形,下半部分为 20~70 Hz 区段的展开波形。输出波形的包络体现了检测模块的幅频特性。经测定 -3 dB 点的频率值为 52 Hz,即检测模块的带宽为 52 Hz。带宽和带内特性均与该电路的特性吻合。

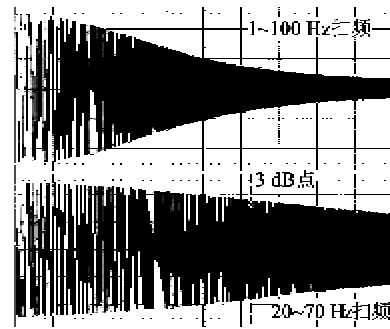


图 4 频率特性测试波形

4) 将多功能信号源的输出设为脉冲模式,并选取合适的幅度和偏移电平。图 5 左半部分是一个完整的响应脉冲波形,右半部分是超调点的放大波形。经测定上升时间 6.75 ms,幅度变化量 1 000 mV,超调量 30 mV。利用上升时间数据,根据相关公式可计算出检测模块的带宽为 51.85 Hz,与扫频测试结果吻合。利用幅度变化量和超调量,根据相关公式可计算出检测模块的阻尼比为 0.74,与该电路的特性吻合。

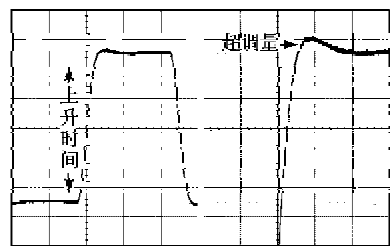


图 5 动态特性测试波形

#### 4 结束语

本文提出的石英 MEMS 陀螺检测模块的测试方法和所设计的测试系统,经实际的测试验证和分析,达到了预期效果。该方法避免了在电路模块中设置信号注入点和测试点所带来的不便,仅利用电路模块固有的端口进行测试,快速获得电路模块的增益、相位、频带、阻尼等特性参数,具有较高的实用价值。为进一步提高测试效率,可对测试系统进行升级,利用软件流程控制输入信号的模式和参数,采集检测模块的输出信号,分析、显示并生成测试结果,实现测试过程的全自动运行。

(下转第 698 页)