

# 谐振式加速度计自激振荡电路性能评价方法的研究

陈冲冲, 曾 凡, 王毅飞, 樊 虎, 张 进  
(中国人民解放军 93160 部队 北京 100076)

**摘要:** 针对谐振式加速度计成品率不高、精度低等问题, 以石英振梁加速度计为例, 采用引进标准信号, 将谐振电路作为“黑盒子”, 对其开展独立的评价。通过评价电路的驱动电压幅值稳定性、移相稳定性、全温幅值/相位对称性等指标, 与加速度计实际指标建立了一一对应的关系, 为加速度计研制与性能提升提供了有效依据。实际运用表明, 电路噪声性能、温度性能大幅提升, 产品成品率从 70% 提高到了约 90%。

**关键词:** 幅值稳定性; 相位稳定性; 标准信号; 全温对称性; 重复性

中图分类号: TN751.2 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2021)04-0013-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210421001

**引用格式:** 陈冲冲, 曾凡, 王毅飞, 等. 谐振式加速度计自激振荡电路性能评价方法的研究[J/OL]. 遥测遥控, 2021, 42(4): 112-118[20XX-XX-XX]. <http://ycyk.brit.com.cn/ycyk/article/abstract/20210421001>.

## Research on performance evaluation method of self excited oscillation circuit of resonant accelerometer

CHEN Chongchong, ZENG Fan, WANG Yifei, FAN Hu, ZHANG Jin  
(PLA 93160, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low yield and low precision of resonant accelerometer, this paper takes quartz vibrating beam accelerometer as an example, adopts the introduction of standard signal, takes the resonant circuit as "black box", and carries out independent evaluation on it. By evaluating the driving voltage amplitude stability, phase shift stability, full temperature amplitude/phase symmetry and other indicators of the circuit, a one-to-one correspondence relationship is established with the actual indicators of the accelerometer, which provides an effective basis for the development and performance improvement of the accelerometer. Through practical application, the noise performance and temperature performance of the circuit are greatly improved, and the product yield has been increased from 70% to 90%.

**Key words:** Amplitude stability; Phase stability; Standard signal; Total temperature symmetry; Repeatability

**DOI:** 10.12347/j.ycyk.20210421001

**Citation:** CHEN Chongchong, ZENG Fan, WANG Yifei, et al. Research on performance evaluation method of self excited oscillation circuit of resonant accelerometer[J/OL]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(4): 112-118[20XX-XX-XX]. <http://ycyk.brit.com.cn/ycyk/article/abstract/20210421001>.

## 引 言

谐振式加速度计是 MEMS(Micro Electro Mechanical System)传感器中的一种, 具有成本低、体积小、易批产、功耗低、准数字化输出等特点, 很好地满足了惯性导航系统对加速度计的要求。

石英振梁加速度计是谐振式加速度计中发展较为成熟的一种, 它在检测质量的输入轴方向上安装一对以推挽方式加载的力敏感石英振梁, 当有加速度输入时, 检测质量产生力效应, 使得一个石英振梁受到拉力作用频率升高, 另一个石英振梁受到压力作用频率降低, 这两个频率之差与输入的加速度成正比, 通过测频电路检测出频率差值, 根据两者之间的数学模型, 就可以计算出输入加速度值<sup>[1,2]</sup>。

美国 Honeywell 公司的 RBA500 谐振型加速度计已广泛应用于战术级导航系统。该公司具备年产 10 万只的能力。目前, 限制国内石英振梁加速度计在惯性导航系统中广泛应用的主要因素是精度不高、成

品率低。如何有效解决石英振梁加速度计精度问题与成品率问题已迫在眉睫<sup>[3]</sup>。

谐振电路是影响石英振梁加速度计精度和成品率的重要因素，谐振电路噪声性能将对加速度计最终的稳定性指标、阈值/分辨率等产生直接影响，谐振电路的驱动电压幅值全温变化量、移相值的全温变化量将对加速度计全温特性产生影响。加速度计两个振梁对应谐振电路的参数一致性，尤其是电参数全温变化量的一致性，对输出结果取差模的加速度计稳定性和温度特性将产生重要影响。谐振电路参数与敏感结构参数如果不匹配，振梁等效品质因数将大打折扣。

本文阐述了谐振电路标准信号激励评价的方法，对谐振电路的噪声特性、参数匹配性、驱动电压幅值稳定性及全温变化量、移相值相位稳定性及全温变化量、两路谐振电路参数对称性、相位/幅值重复性等测试方式进行了论述，并将这些指标与加速度计指标进行了对接。

## 1 石英振梁加速度计电路模型

### 1.1 石英振梁的电路等效模型

石英振梁的等效电路模型如图 1 所示<sup>[4]</sup>， $C_0$  为寄生电容，它与晶片的几何尺寸和电极面积有关，一般为 pF 量级。当振梁发生振动时，其机械振动惯性质量可用电感  $L$  来模拟， $L$  值一般为 kHz 量级。振梁振动时的弹性可用电容  $C$  来模拟，其值一般为 fF 量级。振梁在振动时因摩擦而造成的损耗用串联支路电阻  $R$  来等效。振梁等效电参数可以通过阻抗分析仪测试，典型值如图 2 所示。

### 1.2 谐振电路振荡原理与评价依据

谐振电路工作模式为自激振荡。自激振荡利用电路的正反馈来起振。正反馈放大器形成自激振荡的原理如图 3 所示<sup>[4]</sup>。

图 3 中， $X_i$  为基本放大器输入端的信号源， $X'_i$  是基本放大器输入端的输入信号， $X_f$  为反馈信号， $X_o$  为基本放大器输出端的输出信号。放大器的输入信号与信号源及反馈信号存在以下关系：

$$X'_i = X_i + X_f \quad (1)$$

反馈放大器的传输系数  $F$  和基本放大器的放大倍数  $A$  分别定义为：

$$F = X_f / X_o, \quad A = X_o / X'_i \quad (2)$$

回路的闭环增益放大倍数  $A_f$  定义为：

$$A_f = X_o / X_i = A / (1 - AF) \quad (3)$$

在公式 (3) 中，如果满足：

$$A \cdot F = 1 \quad (4)$$

此时，闭环放大倍数  $A_f$  将趋向于无穷大，说明在闭环条件下，只要存在微弱噪声，谐振电路将会自激振荡，如图 3 所示。

对于一个自激振荡电路来说，要维持等幅稳定振荡，需要满足如下两个条件：①  $X_o$  具有稳幅机制，如果幅值无法稳定，振荡器将无法稳定工作；② 信号经过放大器与反馈环路后，相位变化应为  $2\pi$  的整

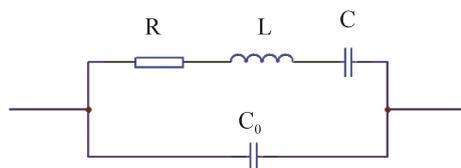


图 1 石英振梁等效电路模型  
Fig. 1 Equivalent circuit model of quartz vibrating beam

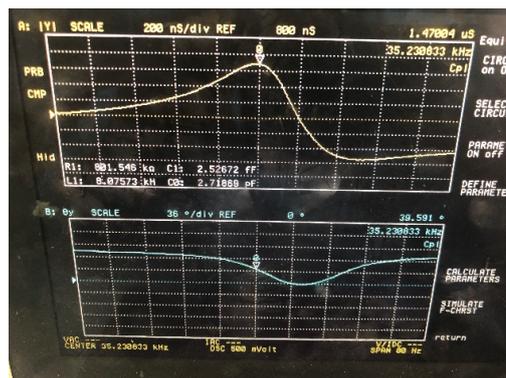


图 2 石英振梁典型等效电路参数  
Fig. 2 Typical equivalent circuit parameters of quartz vibrating beam

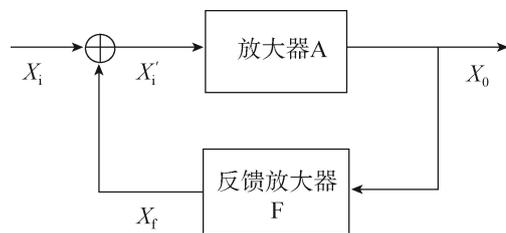


图 3 自激振荡原理框图  
Fig. 3 Principle block diagram of self-excited oscillation

数倍。这两个条件是谐振电路能够稳定可靠工作的前提, 也是对谐振电路性能进行评价的根本出发点。

本文实验使用的自激振荡电路采用混合集成电路工艺, 如图 4 所示。

## 2 谐振电路标准信号激励评价方式与谐振子自激振荡评价方式对比

### 2.1 谐振子自激振荡评价方式的原理及优缺点

谐振子自激振荡评价方法是通过谐振电路两个连接敏感结构(表头)的端子外接晶振, 使电路处于闭环谐振状态下进行测试, 通过测试晶振输出频率的稳定性来间接反应电路性能的好坏。这种方法的优点是测试方法简单, 但由于引进晶振这个因素, 也存在一些问题:

① 电路温度性能和噪声性能无法反映。比如对全温性能的测试, 实际测试的是全温环境下谐振子的全温频率变化量, 而不是电路的全温温度性能。接同一频率的晶振, 容易造成拍频现象, 使测试结果失真。

② 谐振子(晶振)与振梁相比, 无代表性。谐振子(晶振)品质因数在 60 000 以上(一般真空封装, 振动阻尼小), 而石英振梁品质因数一般在 4 000 以下(封装环境一般为一个大气压)。品质因数越高, 选频能力越强, 抗干扰能力越强, 同样的幅值波动或相位变化, 对晶振频率的影响要比振梁低一个数量级<sup>[5]</sup>, 这对电路性能测试和筛选产生不利影响, 甚至无法有效筛选。

③ 只能宏观测试功能, 无法微观测试性能。闭环条件下, 无法具体测试移相值、幅值和相位全温变化量等具体指标, 无法评价两路谐振电路参数的对称性, 无法评价谐振电路参数与振梁参数的匹配性。电路测试结果与加速度计测试结果关联性不强。

④ 测试数据缺乏说服力。受谐振子(晶振)个体差异性影响, 即使出现频率不稳定现象, 也不能排除是谐振子的原因。

⑤ 由于是闭环测试, 无法单独测试电路的移相值, 而电路移相值与振梁的移相值是抵消关系(满足  $2\pi$  的振荡相位条件)。由于国内振梁生产工艺水平与国外有一定差距, 振梁参数个体间存在一定差异, 电路之间也存在移相值的差异性, 故这种方法无法反映出所用电路参数和振梁的匹配性。

### 2.2 标准信号激励评价方式的原理及优缺点

标准信号激励评价方式是将驱动环路断开, 即谐振电路两个连接敏感结构(表头)的端子不接谐振子, 通过对连接表头的输入信号端子施加激励信号, 对谐振电路进行独立评价。由信号发生器提供标准信号, 通过一个电阻  $R_i$  (数值等于振梁等效电阻  $R$ , 一般取 350 k $\Omega$  左右, 谐振时  $L$  与  $C$  作用相互抵消, 故不接), 将标准信号接入谐振电路信号输入端, 通过比较标准信号与驱动电压输出端信号之间的相位差, 计算出移相值, 并对驱动电压幅值进行测试。如果输出驱动电压为方波, 计算相位值时取方波的基波进行计算。通过板卡连续采集相位和幅值数据, 计算方差, 即可获得相位稳定性(相位噪声)与幅值稳定性数值。由于驱动电压输出端带负载能力较弱, 可以以谐振电路最终频率输出端口测试代替驱动电压输出端测试。以目前比较常见的石英振梁加速度计谐振电路为例<sup>[6,7]</sup>, 具体接法如图 5 所示。

谐振电路主要由电源模块, 振荡模块(即图 5 中虚线内部分)和温度传感器模块组成。温度传感器模块主要为后期加速度数据温度补偿提供参考, 电源模块的性能优劣将反映在振荡模块工作的稳定性上, 故本文集中论述谐振电路振荡模块。如图 5 所示, 振荡模块主要由 6 个反相器(实际使用集成电路 CD4069)和外围电路组成。其中,  $N_1$  和  $R_1$  的作用为反向放大。 $N_2$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 、 $C$  的作用主要为放大、移相和调整驱动电压幅值。 $N_3$ 、 $N_4$ 、 $N_5$ 、 $N_6$  主要功能为方波整形和增大输出驱动能力。

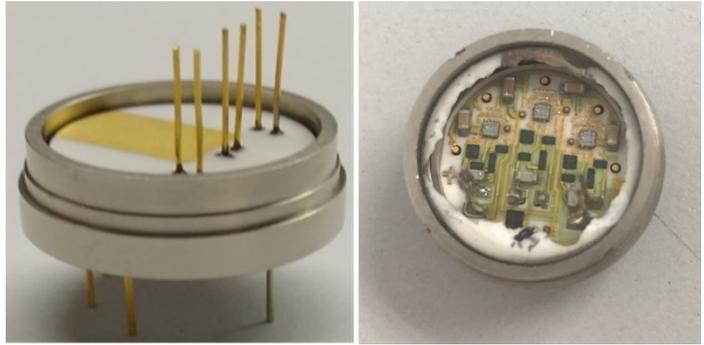


图 4 激振电路实物图

Fig. 4 The physical diagram of excitation circuit

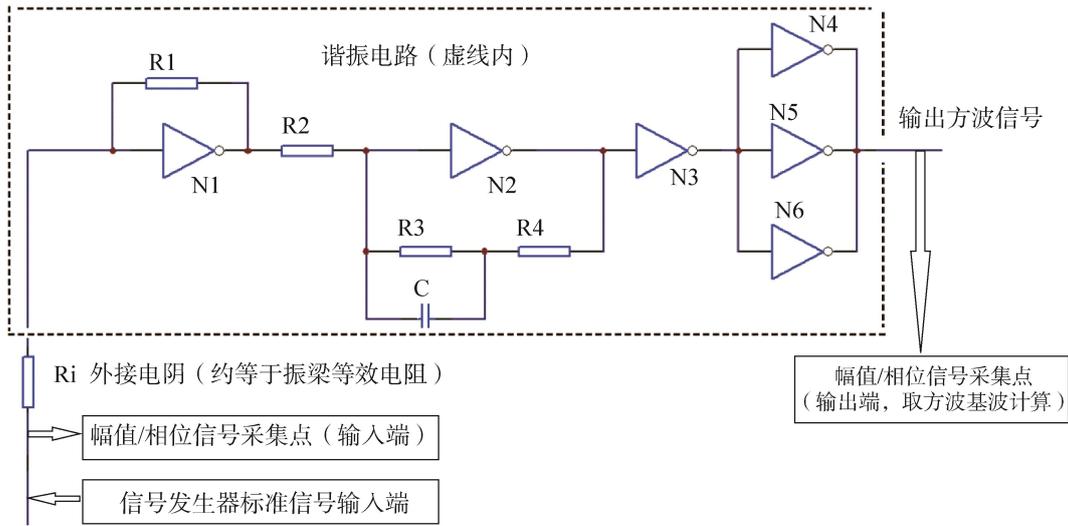


图5 标准信号激励评价方法线路接法示意图  
 Fig. 5 Line connection diagram of standard signal excitation evaluation method

为还原石英振梁加速度计真实工作状态，借鉴振梁自身谐振点多在 33 kHz 附近的特点，为振梁 1 提供的标准信号设为频率为 33 kHz 的正弦波，幅值为 2.5 V、直流偏置为 2.5 V，为振梁 2 提供的标准信号设为频率为 33.1 kHz 的正弦波，幅值为 2.5 V、直流偏置为 2.5 V，频率错开 100 Hz，以体现两路之间真实干扰状态。

数据采集板卡选用美国 NI 公司的 PCI4462 板卡，自带 24 位 AD，采样率为 200 kHz。控制软件采用 LabVIEW 软件。利用 FFT 算法中的实部值与虚部值计算幅值（基波幅值）与相位值<sup>[8]</sup>，具体可表示为

$$Y = a + bi \quad (5)$$

则幅值为

$$U_m = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (6)$$

相位为

$$\theta = \arctan \frac{b}{a} \quad (7)$$

由于标准输入信号与最终频率输出信号同时采集，实时做差，即为移相值，如图 6 所示。

标准信号激励评价的优点主要有：

- ① 以信号发生器标准信号代替谐振子，克服了谐振子个体差异带来的影响，实现了输入信号的标准化；克服了因谐振子品质因数比振梁高一个数量级，而无法有效体现噪声以及稳定性能的问题；克服了由于谐振子自身频率随温度变化而导致无法体现谐振电路温度特性的问题。

② 通过信号发生器将 F1 路、F2 路标准信号频率错开 100 Hz，复原了两路信号间噪声干扰状态，为有效评价谐振电路噪声性能提供了前提。

③ 通过对 F1/F2 两路开环情况下参数单独测试，用具体测试值，如移相值、相位全温变化、相位稳定性、幅值全温变化、幅值稳定性、F1/F2 参数全温变化一致性、相位/幅值重复性等替代闭环条件下，只能单一测试的频率值，可有效评价电路参数与振梁参数的匹配性，电路性能与整表性能的关联性。

标准信号激励评价的缺点主要有：接线更复杂、测试板卡成本较高、一个四通道的板卡只能测试一

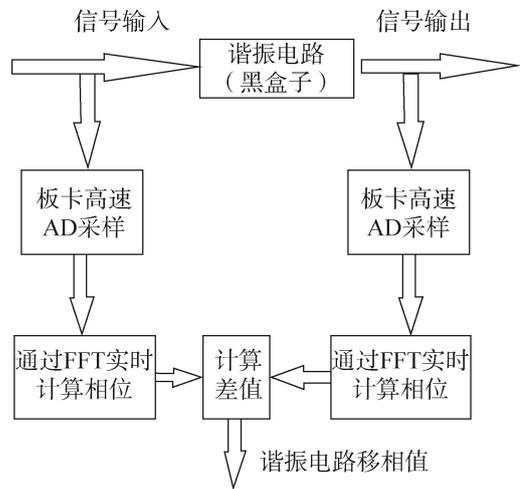


图6 F1路相位测试框图（同F2路）  
 Fig. 6 F1 Phase test block diagram (same as F2)

个电路, 但可以通过程序控制数字矩阵开关的方式实现通道复用, 实现测试效率的提升。

### 3 标准信号激励评价方式下谐振电路指标体系的建立

#### 3.1 谐振电路参数与振梁参数匹配性测试

通过标准信号激励测试法, 测试标准信号在通过谐振电路时产生的移相值, 并与标准信号通过振梁参数模型(阻抗分析仪测得)时的移相值作比较, 差值应接近 0。参数匹配情况下, 石英振梁正好谐振在自身固有谐振点上, 性能得到最大发挥。

#### 3.2 谐振电路噪声性能测试

在标准信号激励条件下对噪声性能测试, 需 F1/F2 同时工作, 且输入标准信号频率分别为 33 kHz, 33.1 kHz, 错开 100 Hz。如果加速度计存在测温电路, 必须同时处于工作状态, 使其尽可能接近真实工作状态。

测试方法有两种。第一种是测试最终频率输出的下降沿晃动时间, 该值越大, 输出频率噪声越大。这种方法优点是测试方法简单、指导意义强, 缺点是难以与频率稳定性、阈值/分辨率等指标建立对等关系。第二种是通过测频电路<sup>[9,10]</sup>直接对最终输出频率测频、存储数据并计算方差。该方差除以理论标度因数, 即为加速度计在理想情况下(振梁频率不存在漂移)的频率稳定性。按照阈值/分辨率计算方式, 取 10 s 数据计算方差, 除以理论标度因数, 再考虑±50%偏差, 可计算出该加速度计能达到的最大理论阈值/分辨率。

#### 3.3 相位稳定性与驱动电压幅值稳定性

由于频率是相位的微分, 相位稳定性直接决定频率稳定性。由于石英振梁模型存在非线性因素<sup>[11]</sup>, 驱动电压幅值抖动将引起谐振频率的变化, 且驱动电压值越高, 对谐振频率的影响越大<sup>[5]</sup>。

实际测试中, 谐振电路相位与幅值不稳定的情况较多, 主要表现为驱动电压幅值不稳定、噪声急剧变大并引起相位不稳定。该类问题多在高温(50℃以上)时出现, 部分全温环境下也不稳定。如图 7 所示, 蓝色曲线代表 F1 路全温幅值曲线, 红色曲线代表 F2 路全温幅值曲线, 横坐标为时间(s), 纵坐标为幅值(V), 温度变化曲线为从常温降到零下 40℃保温 1h 后, 然后升温到 85℃保温 1h。可以看出 F2 路在高温阶段, 幅值不稳定, F1 路全温环境下幅值曲线光滑稳定。如果驱动电压幅值不稳定, 振梁谐振点将不稳定, 最终影响加速度计性能<sup>[5]</sup>。通过筛除此类电路, 加速度计综合成品率从 70%提高到了约 90%。

#### 3.4 相位/幅值参数全温变化的对称性

标准信号激励条件下, 测试谐振电路 F1/F2 路移相值全温变化量和驱动电压幅值全温变化量, 并做差值, 差值越小, F1 路和 F2 路电路参数对称性越好。该参数对加速度计差频输出的温度特性有一定影响, 可以根据驱动电压幅值与谐振频率之间的影响关系<sup>[5]</sup>、相位变化与谐振频率之间的关系, 结合理论标度因数, 计算出与加速度计整表测试指标的对应关系。

图 8、图 9 横坐标为时间(s), 纵坐标为幅值(V), 温度变化曲线为从常温降到零下 40℃保温 1 h, 然后升温到 85℃, 保温 1 h。图 8 为全温幅值变化对称性较好的电路, 图 9 为全温幅值变化对称性一般的电路。F1 与 F2 路曲线重合度较差, 差值较大, 同样的振梁, 温漂将不一致<sup>[5]</sup>, 造成 F1 路、F2 路输出取差模时温度性能变差。图 10、图 11 横坐标为时间(s), 纵坐标为相位(°), 温度变化曲线为从常温降到零下 40℃保温 1 小时, 然后升温到 85℃, 保温 1 h。图 10 为相位全温变化一致性较好的电路, 图 11 为相位全温变化一般的电路。F1 路与 F2 路曲线重合度较差, 差值较大, 同样的振梁, 将谐

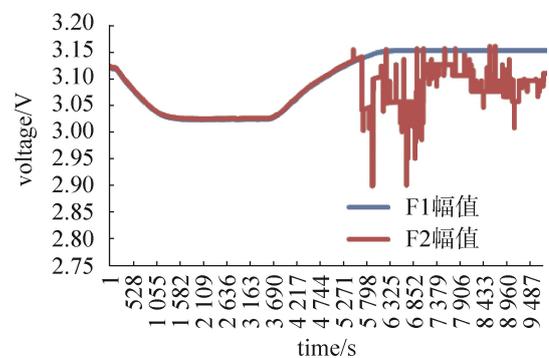


图 7 谐振电路高温幅值不稳定情况

Fig. 7 The high temperature amplitude unstable situation of the resonant circuit

振在不同位置，全温温漂变化不一致，造成 F1 路、F2 路输出取差模时温度性能变差。

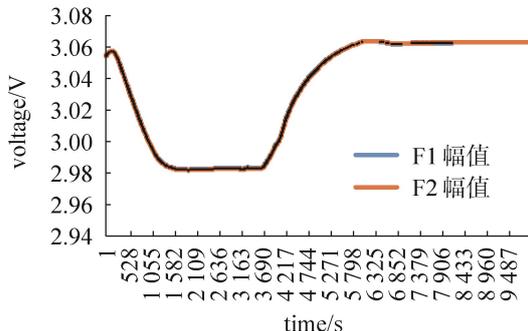


图 8 编号 1901452 电路 F1/F2 全温幅值变化曲线图

Fig. 8 Circuit No.1901452 of the F1/F2 full temperature amplitude change graph

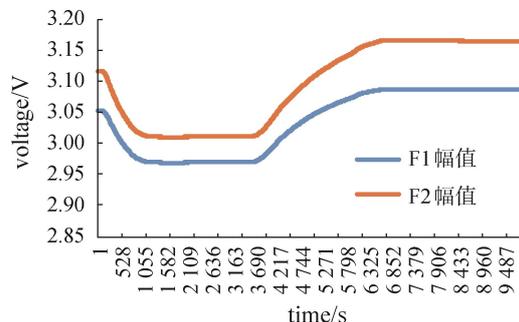


图 9 编号 1901017 电路 F1/F2 全温幅值变化曲线图

Fig. 9 Circuit No. 1901017 of the F1/F2 full temperature amplitude change graph

### 3.5 相位/幅值的重复性

与加速度计重复性测试类似，标准信号激励条件下，恒温保温一段时间后，测试移项值与驱动电压幅值，根据多次测试结果，除以理论标度因数，即可计算出谐振电路性能对加速度计重复性指标的影响程度。

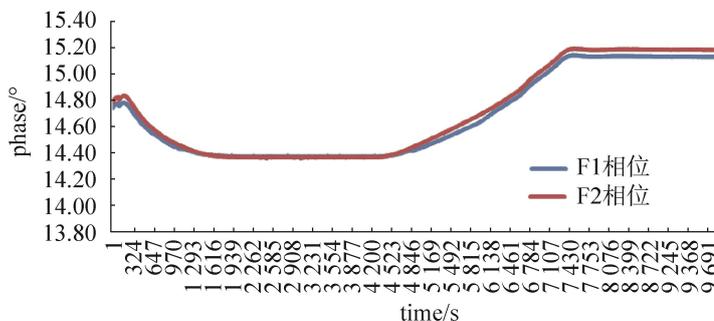


图 10 编号 1901452 电路 F1/F2 全温相位变化曲线图  
Fig. 10 Circuit No.1901452 of the F1/F2 full temperature amplitude change graph

## 4 结束语

本文以石英振梁加速度计为例，对 MEMS 谐振式加速度计谐振电路的性能评价方法和筛选方法进行了研究与实践。通过客观分析可知，标准信号激励评价方法对谐振电路性能可以进行更具体、更有指导性的评价，可以有效筛选出不合格电路，提高产品成品率。本文建立了在标准信号激励评价方式下电路性能评价的指标体系，并与加速度计整表指标的关联性进行了阐述。通过实践可知，以该系统测试电路性能结果为参考，可有效指导谐振电路版图优化和元器件参数优化，进而提高加速度计精度。2019 年该测试系统测试谐振电路 2 000 个，共筛选出 400 个幅值/相位不稳定电路，加速度计综合成品率从 70%提高到了约 90%。

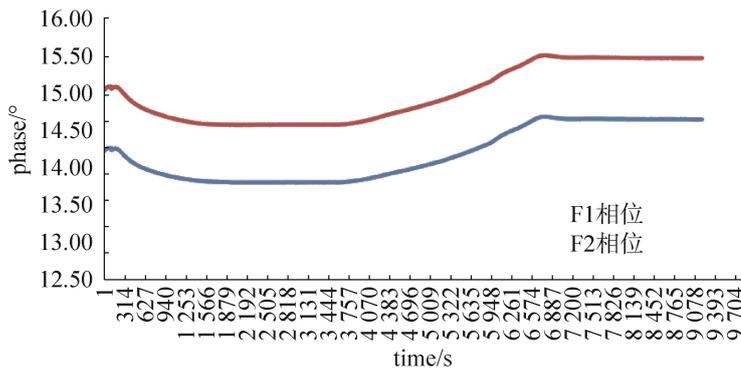


图 11 编号 1901012 电路 F1/F2 全温相位变化曲线图  
Fig. 11 Circuit No. 1901012 of the F1/F2 full temperature amplitude change graph

### 参考文献

[1] 刘俊, 石云波, 李杰, 等. 微惯性技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.  
 [2] 董景新. 微惯性仪表—微机械加速度计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
 [3] 毕小伟, 杜伟, 马跃飞, 等. 石英振梁加速度计研究现状及发展趋势[J]. 导航与控制, 2019, 18(4): 19-24.

- BI Xiaowei, DU Wei, MA Yuefei, et al. Research status and development trend of quartz vibrating beam accelerometer[J]. Navigation and Control, 2019, 18(4): 19–24.
- [4] 段九州. 振荡电路实用设计手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002.
- [5] 陈冲冲, 罗列, 崔健, 等. 石英振梁加速度计驱动电压幅值对谐振频率影响研究[J]. 战术导弹控制技术, 2013(1): 38–41. CHEN Chongchong, LUO Lie, CUI Jian, et al. The study of the relationship between the amplitude of the driving signal and the stability of the VBAs[J]. Control Technology of Tactical Missile, 2013(1): 38–41.
- [6] 王金婵. 一种自激振荡电路[J]. 电子科技, 2013, 26(8): 83–85. WANG Jinchan. An elementary analysis of the self-oscillation circuit[J]. Electronic Science and Technology, 2013, 26(8): 83–85.
- [7] 毕小伟, 廖波勇, 严小军. 一种石英振梁加速度计驱动电路的仿真分析[J]. 导航与控制, 2011, 10(4): 38–42. BI Xiaowei, LIAO Boyong, YAN Xiaojun. Drive circuit simulation of quartz vibrating beam accelerometer[J]. Navigation and Control, 2011, 10(4): 38–42.
- [8] MORIAT ALAIN. System and method for estimating tones in an input signal: US2002120354[P]. 2002-8-29.
- [9] 孙登强, 赵玉龙, 李波, 等. 高精度石英振梁谐振式传感器测试系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2018(6): 5–10. SUN Dengqiang, ZHAO Yulong, LI Bo, et al. Design of test system for high-precision quartz vibrating beam sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(6): 5–10.
- [10] 高延滨, 詹俊妮, 何昆鹏, 等. 高精度石英振梁加速度计频率采样系统设计[J]. 应用科技, 2012, 39(3): 61–65. GAO Yanbin, ZHAN Junni, HE Kunpeng, et al. Design of a high-precision VBA frequency sampling system [J]. Applied Science and Technology, 2012, 39(3): 61–65.
- [11] HE LIN, XU YONG PING, PALANIAPAN MOORTHI. A state-space phase noise model for nonlinear MEMS oscillators employing automatic amplitude control[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I:2010, 57(1): 189–199.
- [12] 何春华, 崔健, 闫俊杰, 等. 基于 LabVIEW 的微机械陀螺自动测试系统开发[J]. 传感技术学报, 2011, 24(2): 170–174. HE Chunhua, CUI Jian, YAN Junjie, et al. Development of automatic test system for micromachined gyroscope based on LabVIEW[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(2): 170–174.

#### [作者简介]

陈冲冲 1987 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天装备质量管理。

曾凡 1977 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天装备质量管理。

王毅飞 1982 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天装备质量管理。

樊虎 1974 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天装备质量管理。

张进 1974 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为航天装备质量管理。

(本文编辑: 傅杰)