

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2024.03.015

# 面向电容式微机电加速度计的接口 噪声分析和数字闭环技术研究

郭子涵<sup>1</sup>, 胡终须<sup>1</sup>, 武心怡<sup>2</sup>, 刘飞<sup>1</sup>, 刘伟鹏<sup>3</sup>, 申燕超<sup>1</sup>

- (1. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074;  
2. 陆军装备部驻北京地区第一军事代表室, 北京 100070;  
3. 上海机电工程研究所, 上海 201109)

**摘要:** 优化电容检测接口并采用力反馈控制方案能够在不影响表头敏感结构的情况下, 通过改变环路参数提高加速度计的信噪比, 改善加速度计性能。基于一款阵列式差分电容的加速度计敏感结构, 在等效电容模型的基础上, 通过电容检测接口电路的搭建与输出信号的频谱分析, 验证了单载波电容检测电路具有更出色的输出信噪比。后级采用 STM32H743VIT6 微处理器实现调幅信号的数字解调, 经 PI 控制算法调节后作为反馈电压施加于可动极板, 实现了加速度计的数字闭环控制。实测结果显示, 闭环状态下加速度计的速度随机游走 (VRW) 为  $57 \mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$ , 与开环状态相当, 而零偏稳定性则从开环状态的  $184 \mu\text{g}$  改善至  $58 \mu\text{g}$ , 验证了单载波调制型电容检测接口和力反馈控制技术对提升加速度计静态性能的具体效果。

**关键词:** 电容式微机电加速度计; 单载波调制; 力反馈控制; 阵列式结构

中图分类号: V241.4<sup>+</sup>5 文献标志码: A 文章编号: 2095-8110(2024)03-0148-09

## Interface noise detection and digital closed-loop control based on capacitive MEMS accelerometer

GUO Zihan<sup>1</sup>, HU Zhongxu<sup>1</sup>, WU Xinyi<sup>2</sup>, LIU Fei<sup>1</sup>, LIU Weipeng<sup>3</sup>, SHEN Yanchao<sup>1</sup>

- (1. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China;  
2. The First Military Representative Office of the Army Equipment Department in Beijing Area, Beijing 100070, China;  
3. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Optimizing detection interface and adopting force feedback control scheme can improve the signal-to-noise ratio (SNR) and the performance of MEMS accelerometer by changing the circuit parameters without affecting the sensitive structure of the MEMS sensor. Based on an array differential capacitance sensitive structure, the capacitance detection interface circuit is constructed and the output signal spectrum is analyzed on the basis of the equivalent capacitance model. It is proved that the single carrier capacitance detection has better output SNR. The STM32H743VIT6 processor is used for digital demodulation of the amplitude-modulated signals. It is applied to the movable pad as a feedback voltage, after the demodulation value is adjusted by PI control algorithm, and the digital closed-loop control of the accelerometer is realized. Experimental results has demonstrated that the velocity random walk (VRW) of the closed-loop accelerometer is  $57 \mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$ , which is

收稿日期: 2023-10-12; 修订日期: 2024-01-27

作者简介: 郭子涵(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事信号与信息处理方面的研究。

通信作者: 胡终须(1968—), 男, 研究员, 主要从事 MEMS 测控电路方面的研究。

equivalent to that of the open-loop state. However, the bias stability of the accelerometer is improve from  $184 \mu\text{g}$  in the open-loop state to  $58 \mu\text{g}$ , which verifies the effect of the single-carrier modulated capacitance detection interface circuit and the force feedback control technology on improving the static performance of the accelerometer.

**Key words:** Capacitive MEMS accelerometer; Single carrier modulation; Force feedback control; Array structure

## 0 引言

基于电容变化原理的电容式微机电加速度计,是一种以微电子和微纳制造工艺为基础的惯性传感器,以其成本低、体积小、集成度高等优点而成为备受关注的新一代惯性传感器,广泛应用于单兵导航和微小型长航时无人机等<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着电容式微机电加速度计敏感结构从单一式向阵列式迈进,以及微加工/封装工艺能力的不断提升,优化电容检测接口方案和系统控制方案成为进一步提升电容式微机电加速度计性能的重要突破口<sup>[3]</sup>。

电容检测接口通过检测表头敏感结构的等效电容变化量反映输入加速度,其信噪比决定了整个测控电路输出信号的噪声性能,是电容式微机电加速度计实现功能的关键环节<sup>[4]</sup>。系统控制方案根据电路结构可以分为开环和闭环两种控制方式<sup>[5]</sup>。开环控制的测控电路结构简单,但是其性能被敏感结构参数所限制,难以解决动态响应速度与噪声之间的矛盾。而闭环控制方案虽然结构上较为复杂,但通过调节电路参数可以改善表头加工误差对加速度计性能造成的影响。

近年来,大量国内外研究机构 and 高校也聚焦于通过对微小差分电容的低噪声检测和系统控制方案的优化提升加速度计的整体性能。国外方面, Honeywell 公司采用调制解调技术提取电容变化量,并结合力平衡原理实现整个系统的闭环控制<sup>[6-7]</sup>; Colibrys 公司采用开关电容积分方案将电容值转换为电压信号,后期基于 FPGA 实现数字信号处理以及环路的闭环力反馈控制<sup>[8]</sup>。国内方面,北京大学采用开关电容检测接口方案,结合相关双采样技术削减  $1/f$  噪声,并搭建了模拟 PI 控制器实现伺服闭环控制<sup>[9]</sup>; 浙江大学则对电容检测接口采用调制解调方案,然后基于 FPGA 实现后续的数字解调和 PI 闭环控制<sup>[10]</sup>。

本文基于一款阵列式梳齿电容敏感结构的微机电加速度计,重点围绕载波调制型电容检测方案

和力平衡控制方案进行研究和分析,通过对两种调制解调型电容检测方法原理的介绍和对比,提炼出一种在电路设计中信噪比更为出色的方法,后基于由意法半导体公司开发的 32 位微控制器芯片 STM32H743VIT6 设计出数字闭环力反馈测控电路,并做出样机验证其静态测试中的噪声和稳定性指标。

## 1 理论分析

电容式微机电加速度计的力学模型可采用下列二阶微分方程进行表示

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + b \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = ma(t) \quad (1)$$

其中,  $m$  为敏感质量块的质量;  $b$  为系统的阻尼系数;  $k$  为弹簧梁的弹性系数;  $t$  为系统的响应时间。对式(1)进行拉普拉斯变换可得到以加速度  $A(s)$  为输入, 相对位移  $X(s)$  为输出的传递函数

$$\frac{X(s)}{A(s)} = \frac{1}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

由式(2)可知,当加速度计的壳体固定在载体上时,若能顺利检测出敏感轴向上敏感质量相对于壳体的位移  $x$ ,就能测出加速度  $a$ 。

本文在加速度计测控电路的设计中采用了一款高灵敏度的阵列式差分电容敏感结构,其结构形式如图 1 所示。

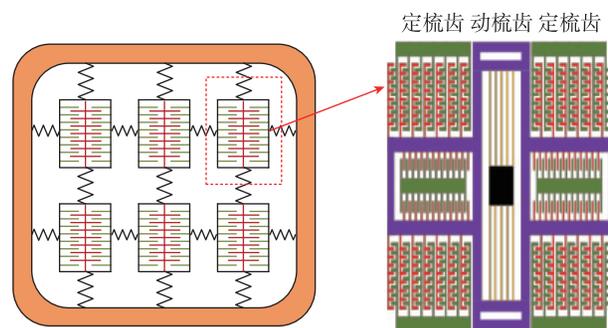


图 1 电容式微机电加速度计结构模型

Fig. 1 Structure model of capacitive MEMS

子结构中,紫色部分作为敏感质量框架带动红色动梳齿与绿色定梳齿等效为一对差分电容<sup>[11]</sup>。阵列式敏感结构通过子器件的耦合布置,能够在保证大初始电容和高灵敏度的同时,有效降低应力的影响。但阵列式敏感结构内部复杂的引线会导致寄生电容倍数级地增大,对接口电路的设计提出了挑战。

为便于分析,阵列式加速度计表头整体结构能够简化为一对差分电容,如图2所示。

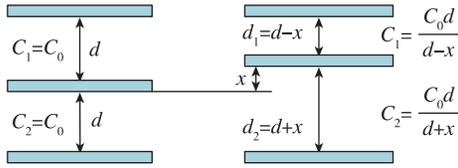


图2 电容式微机电加速度计简化模型

Fig. 2 Simplified model of capacitive MEMS

分析简化模型可知,当加速度输入时,可动极板受到惯性力的作用产生位移 $x$ ,使得差分电容不相等,根据平行极板电容公式可得

$$C_1 = C_0 - \Delta C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d+x} \quad (3)$$

$$C_2 = C_0 + \Delta C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d-x} \quad (4)$$

对式(3)、式(4)进行泰勒展开

$$C_0 \frac{d}{d+x} = C_0 \left(1 - \frac{x}{d} + \frac{x^2}{d^2} - \frac{x^3}{d^3} + \dots\right) \quad (5)$$

$$C_0 \frac{d}{d-x} = C_0 \left(1 + \frac{x}{d} + \frac{x^2}{d^2} + \frac{x^3}{d^3} + \dots\right) \quad (6)$$

若可动极板的位移远小于极板间距,取一次项并进行差分运算得到

$$\Delta C = \frac{1}{2}(C_2 - C_1) \approx \frac{\epsilon_0 \epsilon S x}{d} \quad (7)$$

可见,当极板位移 $x$ 远小于极板间距 $d$ 时,电容变化量 $\Delta C$ 与位移 $x$ 呈线性关系,因此在电路中测量得到电容的变化量即可表征加速度大小。

## 2 电容检测方案及电路实现

常用的电容检测方案主要有调制解调型和开关电容检测型电路<sup>[12]</sup>。开关电容检测型方案通过控制开关通断,利用电容的充、放电将电容变化量转换为电压输出,由于其需要复杂的控制时序,难以采用分立器件电路实现。而调制解调型电容检测方案则是通过高频载波将电容变化量调制于高频段,经滤波、解调即可得到待测的电容变化量,这

种方案能够抑制低频段噪声的引入,更适合采用分立电路实现。因此,针对调制解调型电容检测方案的两种电路结构进行深入研究和对比。

### 2.1 差分载波调制型电容检测方案

差分载波调制型检测方案具体结构如图3所示<sup>[13]</sup>。其中 $C_1$ 和 $C_2$ 为敏感结构等效的一对差分电容, $C_f$ 和 $R_f$ 分别为电荷放大器的反馈电容和反馈电阻。

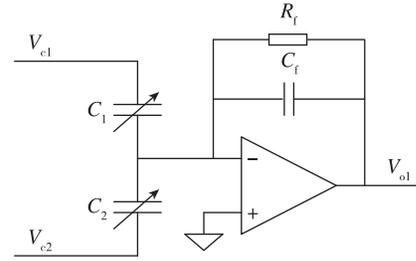


图3 差分载波电容检测接口原理图

Fig. 3 Schematic diagram of differential-carrier capacitance detection interface

将幅值、频率相等,相位相反的两路正弦载波 $V_{c1} = V \cos \omega t$ 和 $V_{c2} = -V \cos \omega t$ 分别施加于 $C_1, C_2$ 的两端,可计算得到电压输出为

$$V_{oi}(t) = \frac{C_1/C_f - C_2/C_f}{1 + 1/sC_f R_f} V_c(t) \quad (8)$$

$$\approx -\frac{2\Delta C}{C_f} V \cos \omega t$$

可见,差分载波调制型电容检测电路的输出信号是幅度与电容变化量 $\Delta C$ 成正比的调幅信号。

这种电容检测方案虽然电路结构较为简单,但由于电路设计中两路载波相位的一致性难以保证,设载波存在 $\varphi$ 的相位误差,可计算得到此时的输出电压为

$$V'_{oi}(t) \approx \frac{V(C_0 \sin \omega t \sin \varphi - 2\Delta C \cos \omega t)}{C_f}$$

$$= \frac{V}{C_f} \sqrt{C_0^2 \sin^2 \varphi + 4\Delta C^2} \sin(\omega t + \xi) \quad (9)$$

其中, $\xi = -\arcsin\left(\frac{4\Delta C^2}{\sqrt{C_0^2 \sin^2 \varphi + 4\Delta C^2}}\right)$ 。

分析式(9)可知,相位误差 $\varphi$ 引起输出端产生与敏感信号同频的正交干扰,导致输出信号的幅值和相位产生与其相关的变化。对此,采用MATLAB中的Electronics模块搭建出差分载波调制型接口仿真模型,如图4所示。

结合敏感结构具体参数将 $C_1, C_2$ 和 $C_f$ 设置为

6 pF,  $R_f$  设置为 10 M $\Omega$ , 假设外界加速度引起的电容变化量为 0.05 pF, 分别取相位误差为  $0^\circ$  和  $0.5^\circ$ , 得到图 5 所示的仿真结果。可见, 相位误差为  $0.5^\circ$

时, 电容检测接口的输出信号的相位与有效信号之间产生了接近  $90^\circ$  的偏移, 此时有效信号相比正交误差信号较为微弱, 电路信噪比被大幅削弱。

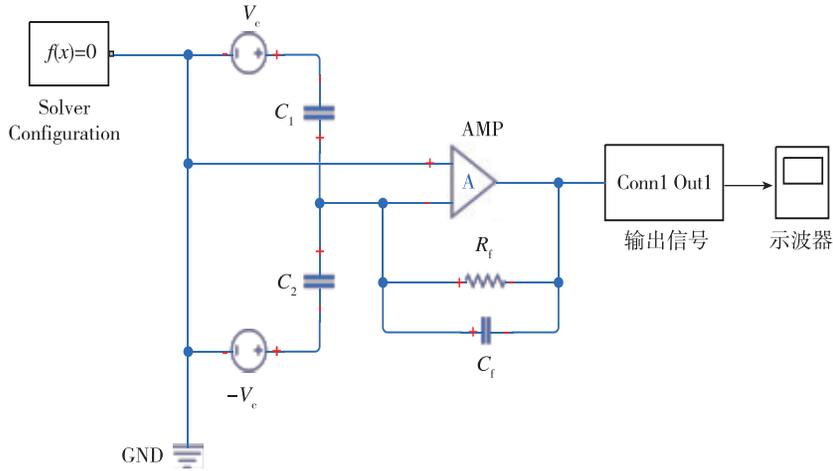


图 4 差分载波电容检测接口仿真模型

Fig. 4 Simulation model of differential-carrier capacitance detection interface

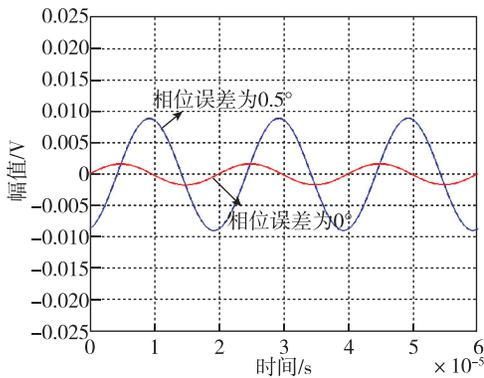


图 5 相位存在误差时的仿真结果

Fig. 5 Diagram of the simulation result with phase error

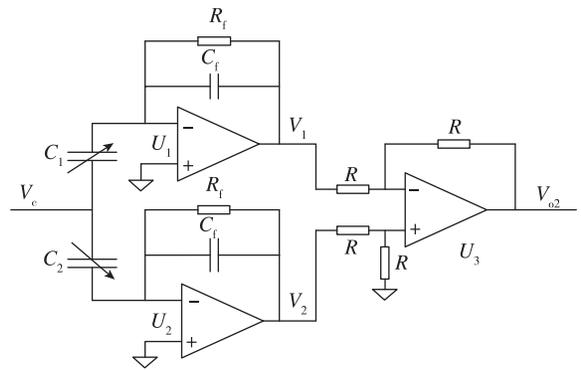


图 6 单路载波调制电容检测接口原理图

Fig. 6 Schematic diagram of single-carrier capacitance detection circuit

### 2.2 单载波调制型电容检测方案

单载波调制型电容检测方法则是采用一路载波进行调制, 图 6 给出了其接口部分电路结构, 由两路高匹配度的电荷放大器和差分放大器构成<sup>[14]</sup>。

将单路正弦载波  $V_c(t) = V_c \cos \omega t$  输入差分电容的中间极板, 计算得到两路电荷放大器的输出为

$$V_1(t) = \frac{C_1/C_f}{1 + 1/sR_fC_f} V_c(t) \approx \frac{C_0 + \Delta C}{C_f} V_c \cos \omega t \quad (10)$$

$$V_2(t) = \frac{-C_2/C_f}{1 + 1/sR_fC_f} V_c(t) \approx \frac{C_0 - \Delta C}{C_f} V_c \cos \omega t \quad (11)$$

为得到电容变化量, 通常采用减法电路对式 (10) 和式 (11) 中的两路信号做差

$$V_{o2}(t) = V_2(t) - V_1(t) = -\frac{2\Delta C}{C_f} V_c \cos \omega t \quad (12)$$

可见, 输出信号是一个幅值与电容变化量成正比的调幅信号。

### 2.3 调制解调型检测电路信噪比对比

结合图 3 和图 6 所示的原理图设计出两种电容检测方案对应的小型化电路, 并分别进行频谱分析。载波信号由 STM32 微处理器生成, 经数模转换后采用标准测量仪器 PXI-1031 测出其信噪比为 137 dB, 如图 7 所示。

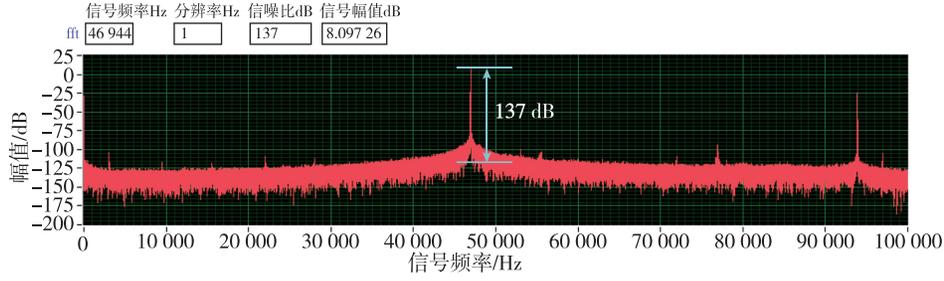


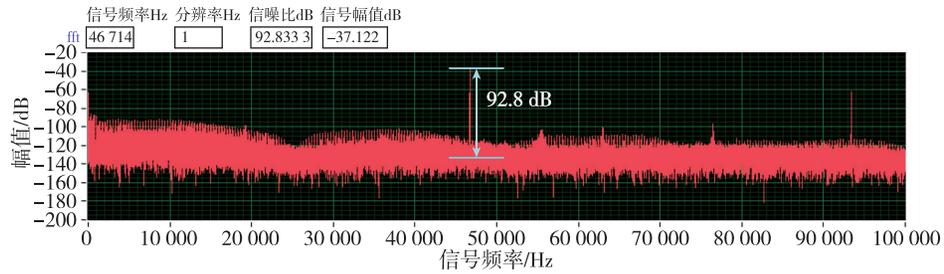
图7 载波信号的频谱图

Fig. 7 The spectrogram of carrier signal

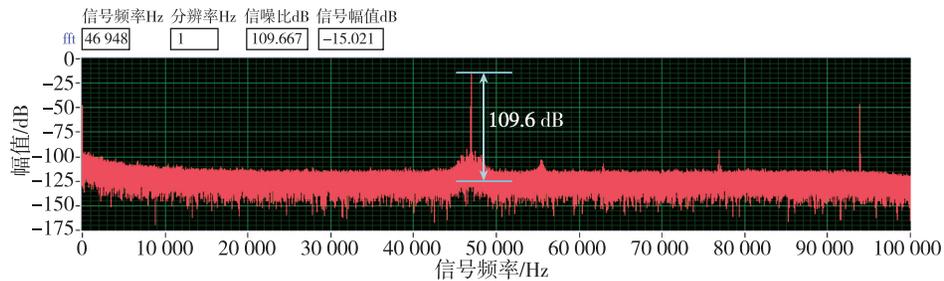
电容检测接口中非理想因素引入的噪声会导致信号信噪比下降,设载波的信噪比固定不变,对比两种电容检测接口电路输出信号的信噪比即可评价其性能。

分别对差分载波和单载波电容检测接口的输出信号进行频谱分析可得其信噪比分别为92.8 dB

和109.6 dB,如图8所示。由于采用锁相放大器测得差分载波之间存在超过 $0.5^\circ$ 的相位误差,结合式(9)分析,差分载波间的相位误差导致有用信号被淹没在正交误差中,是差分载波电容检测接口信噪比下降的主要原因。因此,在整体测控电路的设计中采用单载波电容检测方法。



(a) 差分载波电容检测接口



(b) 单载波电容检测接口

图8 电容检测接口输出信号的频谱图

Fig. 8 The spectrogram of the interface circuit for capacitance detection

## 2.4 正交解调

正交解调的原理框图由图9给出<sup>[15]</sup>。

设单载波电容检测接口输出的调幅信号为 $V_{\text{sen}}(t) = A_1 \cos(\omega t + \varphi_s)$ ,解调采用的载波信号为 $V_{\text{ref}}(t) = A_2 \cos(\omega t + \varphi_c)$ ,分别采用同频正交信号和同相信号相乘并滤波后得到

$$I_{\text{ref}} = \text{LPF}[V_{\text{ref}}(t) \cos \omega t] = -\frac{1}{2} A_1 \cos \varphi_r$$

$$Q_{\text{ref}} = \text{LPF}[V_{\text{ref}}(t) \sin \omega t] = -\frac{1}{2} A_1 \sin \varphi_r \quad (13)$$

$$I_{\text{sen}} = \text{LPF}[V_{\text{sen}}(t) \cos \omega t] = -\frac{1}{2} A_2 \cos \varphi_s$$

$$Q_{\text{sen}} = \text{LPF}[V_{\text{sen}}(t) \sin \omega t] = -\frac{1}{2} A_2 \sin \varphi_s \quad (14)$$

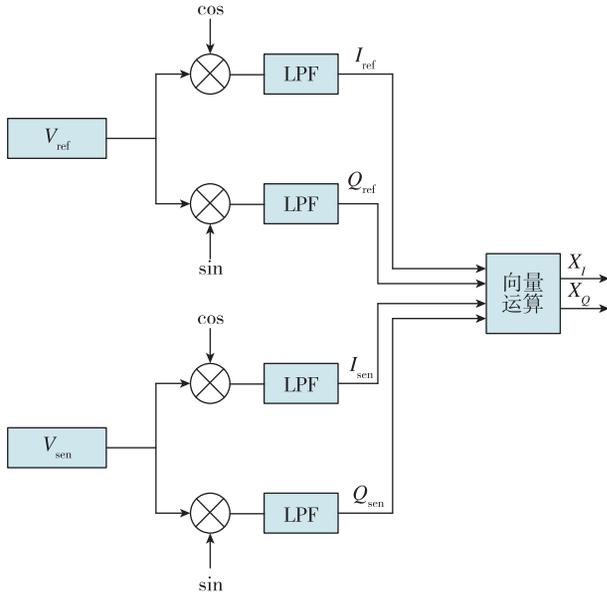


图 9 正交解调原理图

Fig. 9 Schematic diagram of quadrature demodulation

在以同相信号为横坐标,正交信号为纵坐标的虚拟数字坐标系中,采用向量的形式表示调幅信号和载波信号,如图 10 所示。

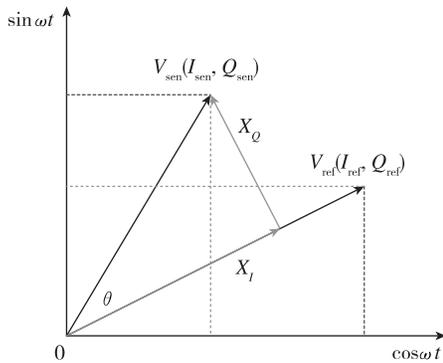


图 10 虚拟数字坐标系示意图

Fig. 10 Virtual digital axis diagram

其中,  $\theta$  代表调幅信号与载波信号之间的相位差,此时  $V_{sen}$  在  $V_{ref}$  方向上的同相分量  $X_I$  和正交分量  $X_Q$  分别为

$$X_I = |V_{sen}| \cos\theta = \frac{A_2 \cos(\varphi_r - \varphi_s)}{2} \quad (15)$$

$$X_Q = |V_{sen}| \sin\theta = \frac{A_2 \sin(\varphi_r - \varphi_s)}{2} \quad (16)$$

其中,同相分量  $X_I$  是通过调制解调型电容检测方法得到的加速度理论值,不仅能够表示加速度值的大小,还可以反映出输入加速度的方向;正交分量  $X_Q$  反映出调幅信号与载波信号之间的相位差,应当通过电路优化进行修正。

### 3 控制方案设计

电容式微机电加速度计测控电路一般具有开环和闭环两种控制方法<sup>[16]</sup>。开环系统结构简单,易于实现,具体工作原理可描述如下:敏感结构能够将输入加速度转化为电容变化量,通过电容检测电路将其转化为幅值与加速度值成正比的调幅信号。对调幅信号进行解调滤波就可以得到直流输出电压。

闭环控制方案通常采用力平衡控制,闭环系统模型由图 11 给出。闭环系统的正向通路 with 开环系统基本一致。在反馈之前,开环输出需要由 PI 控制器进行幅度和相位上的调整,才能作为系统的反馈电压施加于敏感结构的可动极板,并形成反馈力实现加速度计的闭环控制。

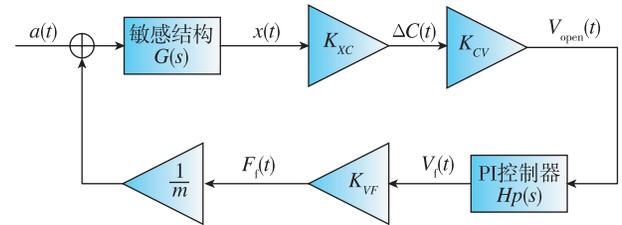


图 11 闭环测控电路原理图

Fig. 11 Schematic diagram of closed-loop measurement and control circuit

如果闭环控制系统设计的恰当,保证反馈力与加速度引起的惯性力完全抵消,则可动极板在敏感轴上所受到的合力为 0,其受力分析如图 12 所示。

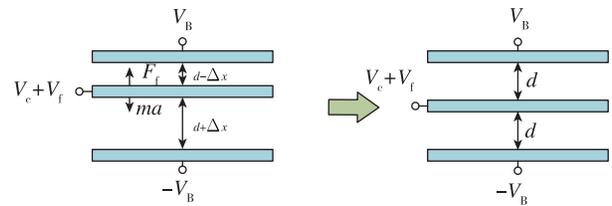


图 12 敏感结构简化模型受力分析图

Fig. 12 Stress analysis of simplified models of the sensor

设两固定极板的预置电压分别为  $V_B$  和  $-V_B$ ,可动极板加载的载波为  $V_c$ ,反馈电压为  $V_f$ 。根据静电力公式计算得到反馈力  $F_f$  为

$$F_f = \frac{C_0 [(V_B + V_f + V_c)^2 + (V_B - V_f - V_c)^2]}{2d} = 2 \frac{C_0}{d} V_B V_f + 2 \frac{C_0}{d} V_B V_c \quad (17)$$

由于敏感结构等效的二阶系统具有低通特性,忽略高频分量可得

$$F_f \approx 2 \frac{C_0}{d} V_B V_f \quad (18)$$

当闭环系统正常工作时,反馈力与加速度带来的惯性力平衡,结合牛顿第二定理可计算出反馈电压与输入加速度的关系为

$$a = \frac{F_f}{m} \approx \frac{2C_0 V_B V_f}{md} \quad (19)$$

此时,反馈电压  $V_f$  与输入加速度呈现线性关系,对该电压进行测量并计算就能够得到输入加速度值。

此外,由于反馈电压  $V_f$  只能在预设的驱动电压

$[-V_B, +V_B]$  之间变化,则反馈电压能够平衡的最大加速度为

$$a_{\max} = \pm \frac{2C_0 V_B^2}{md} \quad (20)$$

当敏感结构固定时,闭环加速度计的量程与驱动电压的平方成正比,提升驱动电压在理论上能够无限增大系统的量程<sup>[17]</sup>。但由于本文所采用的阵列式敏感结构中未设置专用的反馈电极,为防止检测通路的前端运算放大器被驱动电压击穿,因此在电路设计中应对驱动电压进行折中选择。

结合上述分析,采用 MATLAB 搭建了理想情况下加速度计测控电路的 Simulink 仿真模型,如图 13 所示。

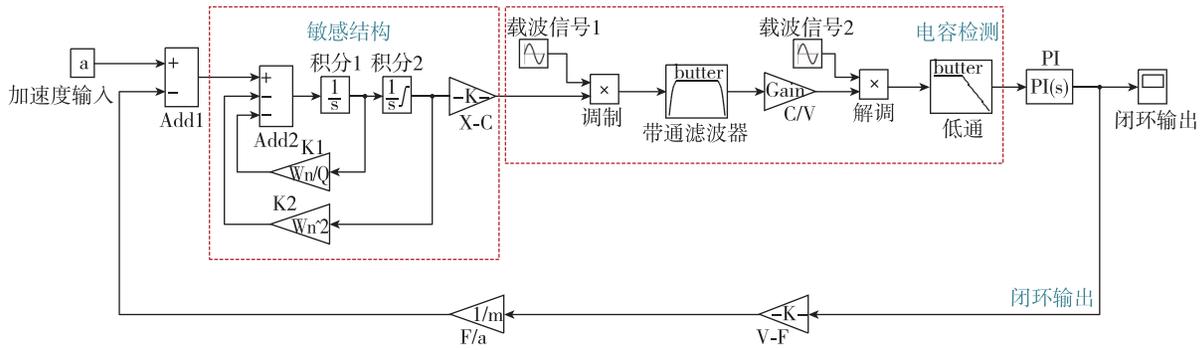


图 13 闭环测控电路 Simulink 模型

Fig. 13 Simulink model of closed-loop measurement and control circuit

将加速度计实际参数代入仿真模型,图 14 给出了系统在  $1g$  阶跃加速度信号输入下的 Simulink 仿真结果。可以看出,加速度计在  $0.05s$  内达到平衡状态,闭环加速度计的输出灵敏度为  $0.89V/g$ ,证明了闭环力反馈系统的可行性。

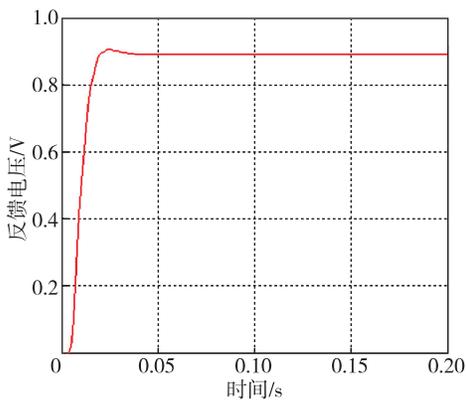


图 14 闭环加速度计仿真模型的  $1g$  阶跃响应

Fig. 14  $1g$  step response of closed-loop accelerometer simulation model

系统整体方案如图 15 所示。其中阵列式结构中,每一个子单元的动梳齿通过锚点与其他子单元中的动梳齿并联等效为差分电容的可动极板,并引出作为检测电极 AM;定梳齿按照同样的方式并联等效为差分电容的两个固定极板,引出作为载波输入电极 AP 和 AN。测控电路模块中,硬件部分采用单载波调制型电容检测接口,得到幅值与输入加速度成正比的调幅信号。数字部分以 STM32H743VIT6 微处理器为基础,对调幅信号进行数字正交解调,经 PI 控制算法处理后,作为反馈电压施加于敏感结构的 AM 电极,实现环路的力反馈控制。

#### 4 测试分析

针对上述测控方案,完成如图 16 所示的电容式微机电加速度计测控电路的样机设计,并对其进行整表的静态性能试验。

首先将加速度计敏感轴置于水平( $0g$ )状态下,并将测试样机设置为开环工作模式。测试前,先开机预热  $10min$ ,然后通过串口采集 STM32 的数字

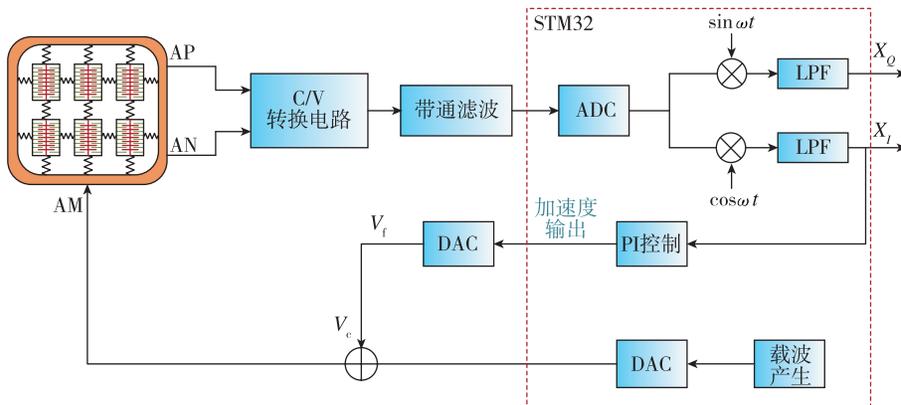


图 15 测控电路整体方案

Fig. 15 Overall scheme of measurement and control circuit

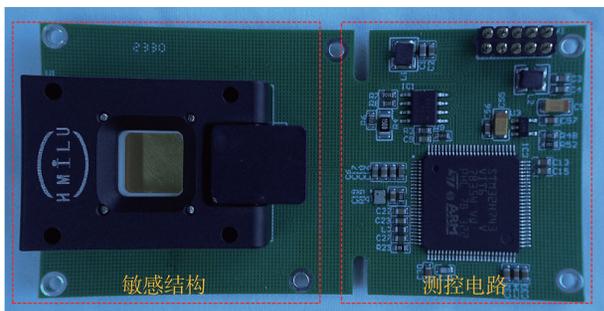
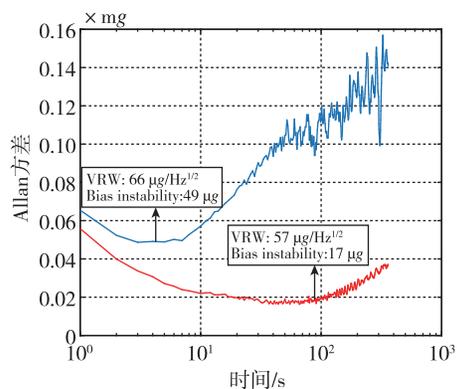


图 16 加速度计测试样机

Fig. 16 Prototype of the accelerometer

输出。调整算法将样机设置为闭环工作模式后,再次进行静态测试。采用 MATLAB 对两次测试数据进行处理分析得到样机闭环前后的零偏测试曲线和 Allan 方差曲线,如图 17 所示。

闭环模式下,加速度计测控电路的速度随机游走(velocity random walk, VRW)指标与开环模式相当,但是零偏稳定性从 184  $\mu\text{g}$  改善至 58  $\mu\text{g}$ 。可见,当控制回路中 PI 参数设置合理时,加速度计的输出零



(b) Allan 方差曲线

图 17 样机开/闭环状态静态测试结果

Fig. 17 Static test results of the prototype in open/closed loop state

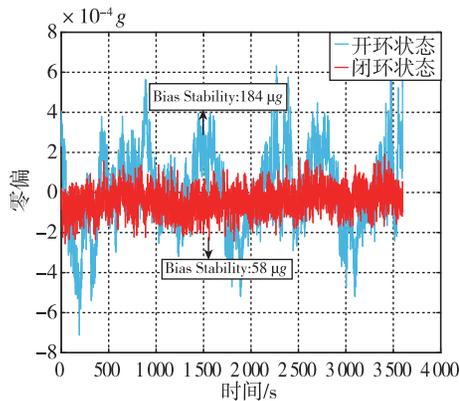
位波动被抑制,稳定性得到了明显的改善。

### 5 结论

本文基于一款高灵敏度阵列式差分电容敏感结构的微机电加速度计表头,设计了一款模数混合型加速度计闭环测控电路,主要研究结论如下:

1) 从工程应用角度,分析和比较了差分载波调制型和单载波调制型电容检测方案的原理和优缺点,并对两种方案分别进行了小型化电路实现和信噪比的对比测试。结果显示:载波信号通过单载波电容检测接口时,信噪比下降约 28 dB,而经过差分载波电容检测接口时,信噪比则下降了超过 40 dB。

2) 完成了模数混合型加速度计闭环测控电路的设计,并基于此测控方案对加速度计进行了性能测试。静态条件下,加速度计的零偏稳定性从开环状态时的 184  $\mu\text{g}$  改善到 58  $\mu\text{g}$ 。



(a) 1 h 零偏数据

## 参考文献

- [1] 尚克军, 刘飞, 孙刚, 等. 飞航导弹用小型高精度加速度计技术综述[J]. 飞航导弹, 2021(6): 133-138.  
SHANG Kejun, LIU Fei, SUN Gang, et al. Summary of small high precision accelerometers for airborne missiles[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021(6): 133-138 (in Chinese).
- [2] 郑辛, 刘飞, 雷明, 等. 微小型惯性仪表发展现状、趋势以及行业的影响[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(6): 701-708.  
ZHENG Xin, LIU Fei, LEI Ming, et al. Development and trend of micro inertial sensors and its impact on the industry[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021, 29(6): 701-708(in Chinese).
- [3] KRAFT M, LEWIS C P, HESKETH T G. Closed-loop silicon micromachined accelerometers[C]// Proceedings of Circuits, Devices and Systems. Stevenage: IEE, 1998, 145(5): 325-331.
- [4] KUEHNEL W, SHERMAN S. A surface micromachined silicon accelerometer with on-chip detection circuitry[J]. Sensor and Actuators A: Physical, 1994, 45(1): 7-16.
- [5] 储宜兴, 池保勇, 刘云峰, 等. 时分复用数字闭环电容式微加速度计接口电路[J]. 光学精密工程, 2015, 23(12): 3350-3356.  
CHU Yixing, CHI Baoyong, LIU Yunfeng, et al. Interface circuit for digital closed-loop capacitive MEMS accelerometer with time division multiplexing[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(12): 3350-3356(in Chinese).
- [6] KARNICK D, BALLAS G, KOLAND L, et al. Honeywell gun-hard inertial measurement unit (IMU) development[C]// Proceedings of 2004 IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium. Monterey: IEEE, 2004: 49-55.
- [7] FROYUM K, GOEPFERT S, HENRICKSON J, et al. Honeywell micro electro mechanical systems (MEMS) inertial measurement unit (IMU)[C]// Proceedings of 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. Myrtle Beach: IEEE, 2012: 831-836.
- [8] MARJOUX D, ULLAH P, RODRIGUEZ N, et al. Silicon MEMS by Safran-navigation grade accelerometer ready for mass production[C]// Proceedings of 2020 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS). Braunschweig: IEEE, 2020: 9-26.
- [9] ZHAO M, CHEN Z J, YANG Y X, et al. A low-noise closed-loop interface for high-G capacitive micro-accelerometer[C]// Proceedings of 2016 International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Montreal: IEEE, 2016: 2415-2418.
- [10] MA J M, JIN Z H, LIU Y D, et al. Noise behaviors of a closed-loop micro-electromechanical system capacitive accelerometer[J]. Journal of Central South University, 2015, 22: 4634-4644.
- [11] GONSETH S, BRISSON R, BALMAIN D, et al. Tactical grade MEMS accelerometer[C]// Proceedings of 2017 DGON Inertial Sensors and Systems. Karlsruhe: DGON, 2017: 1-11.
- [12] ROYO G, SÁNCHEZ-AZQUETA C, GIMENO C, et al. Programmable low-power low-noise capacitance to voltage converter for MEMS accelerometers[J]. Sensors, 2017, 1(17): 67.
- [13] FEDDER G K, GUNEY M G, LI X L, et al. High-g capacitive accelerometer arrays with low bias instability[C]// Proceedings of 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. Portland: IEEE, 2020: 9-15.
- [14] GRINBERG B, FEINGOLD A, FURMAN L, et al. High precision open-loop and closed-loop MEMS accelerometers with wide sensing range[C]// Proceedings of 2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. Savannah: IEEE, 2016: 924-931.
- [15] GHEMARI Z, SAAD S. Parameters improvement and suggestion of new design of capacitive accelerometer[J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2017, 92(3): 443-451.
- [16] CHEN H T, CHE L F. Design and implementation for the PWM closed-loop feedback interface circuit of a sandwich capacitive accelerometer based on ARM[J]. International Journal of Modern Physics B, 2021, 35(6): 2150094.
- [17] MARY E C S, NRAYANASWAMY M, DANIEL R J. Design and simulation studies on linearized MEMS capacitive accelerometer[C]// Proceedings of 2018 IEEE Conference on Emerging Devices and Smart Systems. Tiruchengode: IEEE, 2018: 231-234.

(编辑: 黄利华)