

文章编号 1004-924X(2015)02-0415-08

静电悬浮加速度计轴间耦合误差角的在线测量

刘 爽, 刘云峰, 董景新*

(清华大学 精密仪器系 高精度导航技术教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 静电悬浮加速度计轴间耦合误差角与悬浮质量块的平行度误差有关, 而常规方法很难测量其大小和方向, 故本文提出了一种变预载轴间耦合误差角在线测量方法。通过分析悬浮质量块平行度误差、耦合误差角、姿态角与静电力耦合的关系, 推导了变预载法进行在线耦合误差角精确测量的原理和公式。设计了静电悬浮加速度计原理样机, 并利用该样机对提出的测量方法进行了实验验证。实验测得 X 向对 Y/Z 向耦合误差角分别为 -5.10×10^{-4} rad 和 2.36×10^{-5} rad, 与理论分析相符。该方法同样适用于 Y 向对 X/Z 及 Z 向对 X/Y 的耦合误差角的在线测量。上述结果表明该方法可以有效、精确地完成静电悬浮加速度计不同轴之间耦合误差角的在线测量。

关键词: 静电悬浮加速度计; 耦合误差角; 姿态角; 变预载; 在线测量

中图分类号: TH824.4; U666.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152302.0415

Online measurement of coupled error angle between different axes of electrostatically suspended accelerometer

LIU Shuang, LIU Yun-feng, DONG Jing-xin*

(Key Laboratory for High-precision Navigation Technology of the Ministry of Education,
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: dongjx@mail.tsinghua.edu.cn

Abstract: The coupled angles between different axes of an Electrostatically Suspended Accelerometer (ESA) are related to the parallelism error of a sensor head, and it is hardly measured accurately by using classical methods. Therefore, a novel online measurement method for the coupling angles was proposed by a varying preload voltage. By modeling the relationship of the parallelism error, coupled angle, attitude angle and the electrostatic force coupled angle, the mechanism and equation of the varying preload voltage method for online measurement of the coupled angles were given. A ESA prototype was designed and then it was used to verify the proposed method. Experiment results show that the coupling angles of X/Y and X/Z are -5.10×10^{-4} rad and 2.36×10^{-5} rad, respectively, which are consistent with that of theoretical analysis. The method is also suitable for online measurement of the coupling angles for Y/X, Y/Z and Z/X, Z/Y. The result shows that this novel varying preload method can online identify the coupled angles of different axes of ESA effectively and accurately.

Key words: electrostatically suspended accelerometer; coupled error angle; attitude angle; varying preload; online measurement

收稿日期: 2014-07-07; 修订日期: 2014-08-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61374207)

1 引言

精确地测定地球重力场或重力梯度,对地震预报、地质资源勘探、导弹的精确定轨、全球气候变化以及海洋环境监测等领域具有重要经济意义和战略意义^[1]。其核心是高精度的静电悬浮加速度计,其原理与微机电系统(MEMS)差动电容式加速度计工作原理相同,是通过检测悬浮质量块的位移变化并施加静电反馈力来反映输入加速度的变化^[2, 3]。所不同的是静电悬浮加速度计没有机械梁结构,依靠可控的静电力将质量块悬浮在电极框中,具有可 3 轴检测、分辨率高、量程小、频带窄等特点,适合测量缓变的微弱加速度,在 0.1 mHz~0.1 Hz 带宽内,噪声水平可达 $10^{-7} \sim 10^{-13} \text{ g/Hz}^{1/2}$ ^[4]。法国宇航局(ONERA)早在 20 世纪 60 年代便开始静电悬浮加速度计的研制,目前已成功研制出 STAR、Super-STAR 以及 GRADIO 等加速度计^[4-6]。在国内,兰州空间技术物理研究所最早开始相关研究工作,完成了静电悬浮加速度计理论建模^[7]及地面标定方法等^[8];华中科技大学借助悬丝模拟加速度计悬浮状态完成了检测电路和控制系统的测试^[9],最近实现了地面稳定静电悬浮^[10];国防科技大学开展了敏感组件加工工艺的探索^[11]。以上研究均未见对敏感组件加工误差引入噪声的分析,而事实上国内敏感结构加工水平有限,对由于敏感结构加工误差带来的耦合噪声的分析很有必要。

敏感组件是静电悬浮加速度计的核心器件,主要由电极框和悬浮质量块构成,其中悬浮质量块相互平行表面间的平行度误差会造成不同轴之间存在耦合误差角,从而带来轴间加速度噪声耦合。地面实验时,为了克服重力,加大了竖直方向静电悬浮电压,使竖直方向噪声较大,并通过悬浮质量块的轴间误差角耦合到水平方向,从而限制了水平敏感方向的分辨率^[1, 8];空间应用时,较大的轴间的耦合误差角会带来加速度耦合误差,限制了测量精度。因此,有必要对轴间耦合误差角度进行测量,为定量分析轴间噪声耦合,分离系统电路噪声和敏感组件机械噪声提供理论依据。

敏感组件组装前可通过三坐标测量机或光学

测量^[11, 12]等手段对悬浮质量块平行度误差进行测量,并换算成角度误差,但根据平行度误差只能求出角度误差范围,不能确定具体大小和方向,悬浮质量块加工误差与轴间耦合误差角度对应关系不明确。因此本文提出了一种基于变预载的轴间耦合误差角在线测量方法,实现了敏感组件装配后实际工况下的轴间耦合误差角精确测量。

2 静电悬浮加速度计工作原理

2.1 闭环工作原理

单轴静电悬浮加速度计工作原理如图 1 所示。当有外界加速度 Δa 输入时,悬浮质量块偏离平衡位置,引起差动电容变化 ΔC ,经检测电路幅值调制、放大、解调、滤波得到直流电压 ΔU ,再通过 PID 校正后形成反馈控制电压 $\pm V_b$,分别加到上、下定极板上,与预载电压叠加形成静电力 F_e 将悬浮质量块拉回平衡位置,反馈电压经过换算便可得到外界输入加速度的大小和方向。

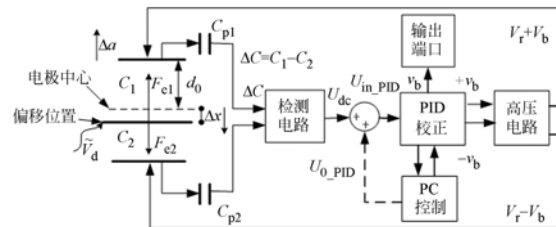


图 1 静电悬浮加速度计工作原理图

Fig. 1 Schematic diagram of ESA

悬浮质量块与单侧电极板之间静电力表达式为:

$$F_{e1} = \frac{1}{2} \epsilon_r \epsilon_0 A \frac{(V_r + V_b + V_d)^2}{(d_0 + \Delta x)^2}, \quad (1)$$

$$F_{e2} = \frac{1}{2} \epsilon_r \epsilon_0 A \frac{(V_r - V_b + V_d)^2}{(d_0 - \Delta x)^2}, \quad (2)$$

式中: ϵ_r 为相对介电常数, ϵ_0 为真空介电常数, A 为电极板面积, V_r 为预载电压, V_b 为反馈电压, V_d 为高频激励电压, d_0 为极板与悬浮质量块之间的标称间距, Δx 为悬浮质量块偏离对称中心的距离。静态平衡时,且闭环点位置接近对称中心 ($\Delta x \approx 0$),忽略高频分量,上、下极板产生的静电力 F_e 与外界加速度 a 的关系为:

$$ma = F_{e1} - F_{e2} = 2\epsilon_r \epsilon_0 A \frac{V_r V_b}{d_0^2}, \quad (3)$$

其中: m 为悬浮质量块的质量。

静电悬浮加速度计敏感组件结构如图 2 所示,均采用微晶玻璃材料,经超声机床加工后,表面镀金形成电极结构。

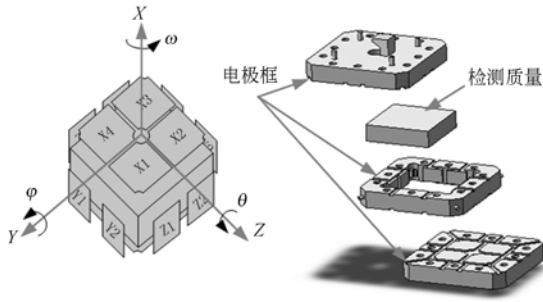


图 2 敏感组件结构

Fig. 2 Structure of sensor head

悬浮质量块和电极框构成 6 对差动电容: $X_1, X_2, X_3, Y, Z_1, Z_2$ (X_1 与 X_4 连接构成 X_1 , Y_1 与 Y_2 连接构成 Y), 进行适当组合便可实现检验质量沿 3 轴平动和 3 轴转动的 6 自由度悬浮控制与加速度测量。

2.2 悬浮质量块平行度误差与耦合误差角的关系

以竖直 X 向对水平 Y, Z 向耦合为例, 由于加工误差, 悬浮质量块上、下表面存在一定的平行度误差, 从而形成对水平方向耦合误差角。设 θ 和 φ 分别为 X 向对 Y 和 X 对 Z 向耦合误差角, δ_m 为悬浮质量块上、下表面平行度误差, L_m 为边长, 平行度误差与耦合误差角关系可表示为:

$$|\theta| \leq \frac{\delta_m}{L_m}, |\varphi| \leq \frac{\delta_m}{L_m}. \quad (4)$$

即根据平行度误差只能确定耦合角范围, 不能确定耦合误差角度大小和方向。若悬浮质量块上、下表面均与 Z 轴平行, 则平行度误差造成角度误差均体现在相对 Y 向上, 即:

$$|\theta| = \frac{\delta_m}{L_m}, |\varphi| = 0. \quad (5)$$

代入实测参数 $L_m = 39.99 \text{ mm}$, $\delta_m = 18.8 \mu\text{m}$, 得: $\delta_m/L_m = 4.70 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 。

再以竖直 X 向对水平 Y 向耦合为例, 悬浮质量块装配在电极框中结构如图 3 所示。

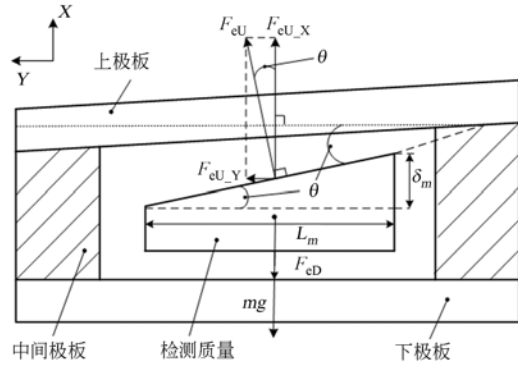


图 3 耦合误差角与静电力关系

Fig. 3 Relationship between coupled angle and associated electrostatic force

设悬浮质量块下表面(水平面)与电极框下表面平行, 则悬浮质量块上表面相对下表面角度 θ , 静电力方向均垂直悬浮质量块各表面^[13], 因此静电力方向与悬浮质量块上、下表面平行度误差有关。可见由于悬浮质量块加工不理想使得实际静电力方向与理想静电力方向存在误差角度 θ 。当 X 向存在较大加速度噪声时, 会引起静电力 F_{eU} 变化, 通过 θ 耦合到 Y 向, 造成轴间噪声耦合, 因此有必要定量分析轴间耦合误差角的大小。由于通过常规测量方法难以精确测量轴间耦合误差角的大小和方向, 因此本文提出了基于变预载的轴间耦合误差角在线测量方法。

3 变预载测耦合误差角原理

由前面分析可知, 一旦敏感组件装配好之后, 耦合角度和为定值, 因此可尝试在质量块悬浮工作状态下, 在某轴上施加已知的静电力变化量, 测量垂直该轴方向的静电力变化, 其比值可反映轴间耦合误差角。仍然以 X 对 Y 向耦合为例分析, 该原理同样适用 X 对 Z 向、 Y 对 X/Z 及 Z 对 X/Y 情形。

3.1 敏感组件力学模型

悬浮质量块在电极框内的姿态如图 4 所示, 其下表面与下极板有可能不平行, 存在小的角度。将图 3 中悬浮质量块顺时针转过 θ_0 角, 则悬浮质量块上、下表面与下电极(水平面)形成角度分别

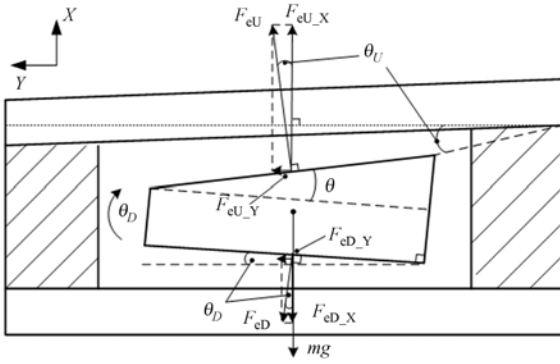


图 4 敏感组件姿态及误差角模型

Fig. 4 Attitude and error angle model of sensor head

$$\begin{aligned} dF_{eX \rightarrow Y} &= dF_{eU}\theta_U + F_{eU}d\theta_U + dF_{eD}\theta_D + F_{eD}d\theta_D = \\ &= dF_{eU}\theta_U + F_{eU}d\theta_U + dF_{eD}\theta_D + F_{eD}d\theta_D + dF_{eU}\theta_D - dF_{eU}\theta_D + F_{eD}d\theta_U - F_{eD}d\theta_U = \\ &= dF_{eU}(\theta_U + \theta_D) + (F_{eU} - F_{eD})d\theta_U + (dF_{eD} - dF_{eU})\theta_D + F_{eD}(d\theta_D + d\theta_U). \end{aligned} \quad (10)$$

注意到:

$$\theta_U + \theta_D = \theta, \quad (11)$$

式中: θ 为定值, 因此有:

$$d\theta_U + d\theta_D = 0, \quad (12)$$

对式(8)两端取微分得:

$$dF_{eU} - dF_{eD} = mdg, \quad (13)$$

式中: dg 为由于地脉动等噪声引起竖直方向加速度噪声。将式(8)、(11)、(12)、(13)代入式(10)得:

$$dF_{eX \rightarrow Y} = dF_{eU}\theta + mgd\theta_U - mdg\theta_D, \quad (14)$$

式中: $dF_{eU}\theta$ 为耦合力主要来源; θ 为悬浮质量块平行度误差引起耦合误差角, 且为定值; dF_{eU} 为上电极板静电力变化, 可根据实测参数计算。 $mgd\theta_U$ 为姿态角变化引入耦合, $d\theta_U$ 为悬浮质量块姿态角的变化, 与闭环点位置稳定性有关, 可通过测定闭环点位置估算。若闭环控制稳定, 且闭环点无漂移, 此项为定值, 且远小于第一项。 $mdg\theta_D$ 是由于地脉动引起的振动噪声通过姿态角 θ_D 产生的耦合力, 通过闭环点调节方法^[15], 可将 θ_D 调节到很小范围内, 小于加工误差形成耦合误差角 (10^{-4} rad 量级); 而采用隔振的测试平台时, 平台地脉动加速度噪声约为 $10^{-9} g$ ^[9], 因此可忽略。

由式(10)可知, 如果能得到竖直 X 向静电力变化 dF_{eU} 和耦合到水平 Y 向静电力变化 $dF_{eX \rightarrow Y}$,

为 θ_U 和 θ_D , 二者均可描述悬浮质量块在电极框中姿态, 因此可称为姿态角, 且有 $\theta_U = \theta - \theta_D$ 。

由 X 向受力平衡可得^[14]:

$$F_{eU} \cos \theta_U - F_{eD} \cos \theta_D = mg. \quad (6)$$

对水平方向耦合力表达式为:

$$F_{eX \rightarrow Y} = F_{eU} \sin \theta_U + F_{eD} \sin \theta_D, \quad (7)$$

式中: θ_U 和 θ_D 较小, 因此有 $\cos \theta_U \approx 1, \cos \theta_D \approx 1, \sin \theta_U \approx \theta_U, \sin \theta_D \approx \theta_D$, 式(6)和(7)简化为:

$$F_{eU} - F_{eD} = mg, \quad (8)$$

$$F_{eX \rightarrow Y} = F_{eU} \theta_U + F_{eD} \theta_D. \quad (9)$$

对(9)式两端求全微分并化简得:

便可以计算耦合误差角 θ 。同理可获得竖直 X 向相对水平 Z 向耦合误差角 φ 。

3.2 变预载法获得耦合力

可通过增大(减少)预载电压值获得 dF_{eU} 。由(3)式可知, 为保持 X 向受力平衡, 增大预载电压会引起反馈电压 V_b 减小, 从而保持 $V_r V_b$ 乘积不变。但由于 V_r 远大于 V_b , 由式(1)、(2)可知, 增大预载会使得单侧静电力增大, 而上、下极板静电力合力在 X 向分量不变, 即增大预载电压不会打破 X 向力平衡, 因此可通过增大预载电压的方式获得 dF_{eU} 。

改变一次预载电压前后可得 V_{r1}, V_{b1} 和 V_{r2}, V_{b2} , 则 dF_{eU} 表达式为:

$$\begin{aligned} dF_{eU} &= \frac{1}{2} \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A (V_{r2} + V_{b2} + V_s)^2}{d_0^2} - \\ &= \frac{1}{2} \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A (V_{r1} + V_{b1} + V_s)^2}{d_0^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

略去 V_s 引入的高频分量, 式(15)可简化为:

$$dF_{eU} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d_0^2} [(V_{r2} + V_{b2})^2 - (V_{r1} + V_{b1})^2]. \quad (16)$$

为求 $dF_{eX \rightarrow Y}$, 可测量 X 向改变预载前后, 水平 Y 向反馈电压的变化 $\Delta V_{b,Y}$, 则:

$$dF_{eX \rightarrow Y} = mg \frac{\Delta V_{b,Y}}{K_{scal,Y}}, \quad (17)$$

其中: $K_{scal,Y}$ 为 Y 向标度因数, 可通过实验测量。

实际实验中可多次变化预载电压,按式(10)进行线性拟合,则拟合直线斜率即为耦合误差角 θ ,拟合截距为姿态角变化及平台振动引入耦合力。

3.3 几何参数确定

由静电力表达式可知, V_r 和 V_b 可通过实验测量,而电极面积 A 和电极间距 d_0 需要事先给定。电极面积可依靠加工保证,超声机床加工精度为 $5 \mu\text{m}$,则电极面积相对误差近似为:

$$\delta \approx \frac{(a+5 \times 10^{-3})(b+5 \times 10^{-3})-ab}{ab}, \quad (18)$$

式中: a 和 b 为电极边长,单位为 mm 。对于 X_1 向可求得 $\delta_{X_1} \approx 5.88 \times 10^{-4}$,可见电极面积取值相对准确。

电极设计间隙 $d_{0_X} = 60 \mu\text{m}$,受加工和装配误差影响,真实间隙会有较大误差,需要根据实验参数确定。竖直 X 方向可根据静电力与重力关系进行反算:

$$d_{0_X} = \sqrt{\frac{2\epsilon_r \epsilon_0 A V_r V_b}{mg}}. \quad (19)$$

4 实验验证

采用静电悬浮加速度计原理样机对上述方法进行验证,原理如图 1 所示,通过基于 DSP 的控制软件改变输出参数,经过反馈通道的高压运放放大后施加到敏感组件上、下电极实现变预载。通过 D/A 测试端口读取控制电压 v_b , v_b 乘以高压运放增益(等于 40)得到实际施加的反馈电压 V_b 。

4.1 闭环点调节

若要准确测量出间隙 d_0 ,减小姿态角影响,并保持反馈电压与外界加速度的线性度,需要对系统进行闭环点位置调节,使悬浮质量块工作在电极框对称中心。采用变预载闭环点调节方法^[14, 15],可以计算出悬浮质量块相对电极框几何中心的相对位移 x/d_0 值,进一步可求出悬浮质量块在几何中心位置时应有的反馈电压值 V_{b0} ,通过调节 PID 控制电路工作闭环点电压 U_{0_PID} 可调节悬浮质量块在电极框中位置,使得实测反馈电压值与 V_{b0} 相等,即认为悬浮质量块调节到电极框几何中心。各路闭环点调节结果如图 5、图 6

所示,其中横坐标为调节次数,纵坐标为悬浮质量块闭环点位置相对偏移量。可见,调节后悬浮质量块接近电极框中心。

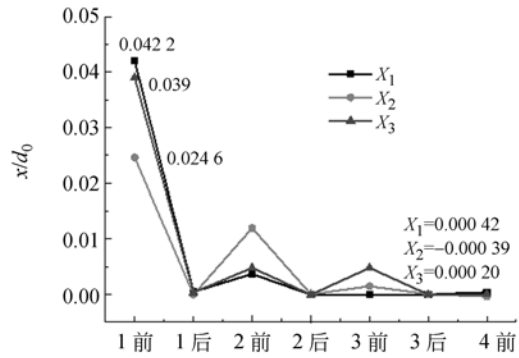


图 5 X 向闭环点调节

Fig. 5 Adjustment of closed-loop positions in X direction

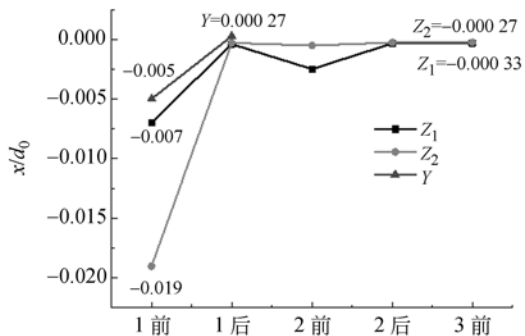


图 6 Y/Z 方向闭环点调节

Fig. 6 Adjustment of closed-loop positions in Y and Z directions

4.2 电极间隙测定

按照式(19)进行电极间隙实验法测定,测量出悬浮质量块正常悬浮时 X_1 、 X_2 和 X_3 3 个通道反馈电压值,代入其他已知参数可得 X 向 3 对电极的电极间隙分别为: $d_{0_{X1}} = 59.65 \mu\text{m}$ 、 $d_{0_{X2}} = 53.10 \mu\text{m}$ 、 $d_{0_{X3}} = 53.09 \mu\text{m}$ 。

间隙 d_0 计算误差可根据闭环点位置估算,定义 δ_{d_0} 为计算误差, d_0 为实际间隙, d_{0_X} 为计算得到间隙,则有:

$$\delta_{d_0} = \frac{d_0 - d_{0_X}}{d_0} \times 100\% = \frac{x}{d_0}. \quad (20)$$

即间隙计算误差等于闭环点调节的相对精

度,由图 5 得 $\delta_{d0_X1} = 4.2 \times 10^{-4}$ 、 $\delta_{d0_X2} = -3.9 \times 10^{-4}$ 、 $\delta_{d0_X3} = 2.0 \times 10^{-4}$ 。

4.3 水平方向标度因数测定

采用重力倾角法调整测试平台倾角,以重力加速度水平分量作为输入加速度,记录水平轴向反馈电压值,二者关系曲线如图 7 所示,并进行线性拟合,拟合直线斜率即为 Y 或 Z 向标度因数。

由拟合数据可知, Z_1 、 Z_2 和 Y 向标度因数分别为 2.03×10^4 、 2.04×10^4 和 2.11×10^4 V/g。

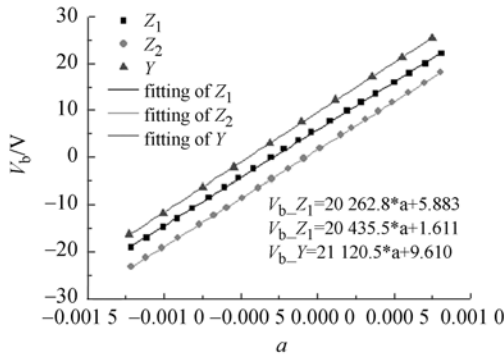
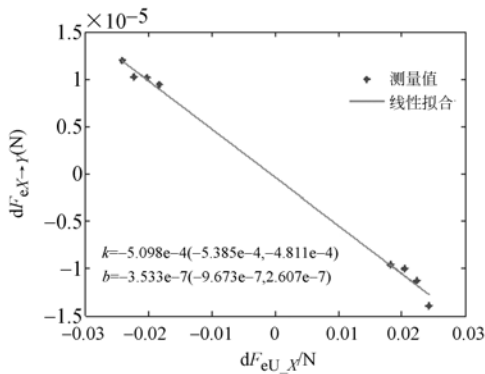


图 7 水平方向 V_b 与 a 关系

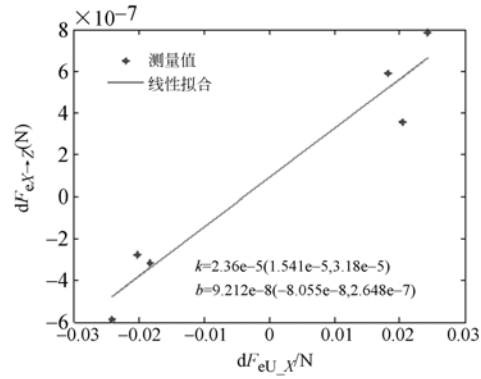
Fig. 7 Relationship between V_b and a in horizontal directions

4.4 变预载法测定耦合误差角

竖直 X 向初始预载电压 $V_{r_X} = 350$ V,水平预载电压为 $V_{r_Y/Z} = 55$ V,逐渐改变 X 向预载电压值,记录变预载前后各通道反馈电压值,并根据式(16)计算 dF_{eU_X} ,根据式(17)计算 $dF_{eX \rightarrow Y}$ 和 $dF_{eX \rightarrow Z}$,作出 dF_{eU_X} 和 $dF_{eX \rightarrow Y}$ 以及 dF_{eU_X} 和 $dF_{eX \rightarrow Z}$ 数据点,并进行线性拟合,结果如图 8 所示。



(a) X→Y



(b) X→Z

图 8 X 对 Y/Z 向耦合实验数据及线性拟合结果

Fig. 8 Experimental and linear fitting coupled results between X and Y or Z

4.5 实验结果与讨论

由拟合结果可知, X 向对 Y 向耦合误差角 $\theta = k_{X_Y} = -5.10 \times 10^{-4}$ (1 ± 0.056) rad,负号说明角度与图 2 定义方向相反。 θ 与由悬浮质量块平行度误差计算得到的角度相当,即 $|\theta| \approx \delta_m/L_m$,说明采用变预载法求得的 X 对 Y 向耦合误差角合理。X 对 Z 向耦合误差角 $\varphi = k_{X_Z} = 2.36 \times 10^{-5}$ (1 ± 0.347) rad,同时 $\varphi < \delta_m/L_m$,说明加工造成的误差角主要体现在 Y 向。此外采用变预载法测得的 X 向对 Z 向耦合误差角拟合误差比 X 向对比 Y 向误差大,需要通过截距进一步解释。

由之前分析可知,由线性拟合得到截距是姿态角变化而引入的大小为 $mgd\theta_U$ 的耦合力,而姿态角变化是由竖直方向变预载过程中闭环点位置波动引起。对于 Y 向截距 $b_{X_Y} = -3.53 \times 10^{-7}$ (1 ± 1.73) N,其波动 Δb_{X_Y} 也在同一量级,而 θ 本身较大,通过 θ 耦合过来的静电力也较大 ($\Delta dF_{eX \rightarrow Y} \approx -1 \times 10^{-5}$ N),远大于 b_{X_Y} 及其波动 Δb_{X_Y} ,因此变预载带来的闭环点位置波动影响对求解耦合角度 θ 可忽略;对于 Z 向,截距 $b_{X_Z} = 9.21 \times 10^{-8}$ (1 ± 1.87) N,而 φ 较小,耦合过来的静电力也较小 ($\Delta dF_{eX \rightarrow Z} \approx 6 \times 10^{-7}$ N),与 b_{X_Z} 及其波动 Δb_{X_Z} 大小相当,因此变预载带来的闭环点位置波动对求解 φ 的影响不可忽略,会带来一定误差。

此外电极间隙计算的准确程度、高压反馈电路间公共阻抗耦合等都会给最终计算结果带来误差,但误差均不会大于 6% (Y 向为 3.3%、Z 向为 5.1%)。在误差允许范围内,对于较大轴间耦合角可以实现较精确的在线测量,而对于较小耦合

角可以通过改善电路性能,降低变预载过程中带来的闭环点位置波动来实现精确测量。另一方面,对于更小的轴间耦合误差角对轴间耦合力的影响可以忽略。

5 结 论

本文通过建立不同轴间静电力耦合模型,给出了变预载法进行轴间耦合误差角精确测量的原理

和公式,利用静电悬浮加速度计原理样机进行了实验验证。实验测得 X 向对 Y/Z 向耦合误差角分别为 -5.10×10^{-4} 和 2.36×10^{-5} rad,与理论分析相符。实验结果表明本文提出的变预载测量耦合误差角方法可以有效、精确地实现静电悬浮加速度计轴间耦合误差角在线测量。同理,Y 对 X/Z 及 Z 对 X/Y 的耦合误差角可采用同样的方法进行在线测量。该方法同样适用于 MEMS 电容式加速度计轴间耦合误差角的分析。

参考文献:

- [1] TOUBOUL P. *Space Accelerometers: Present Status* [M]. Springer, 2001: 273-291.
- [2] 陶永康,刘云峰,董景新. 电容式高过载微机械加速度计的设计与实验[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 918-925.
- TAO Y K, LIU Y F, DONG J X. Design and experiment of high-overload capacitive micromachined accelerometers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 918-925.
- [3] 李童杰,刘云峰,董景新,等. 力反馈式微机械加速度计刚度的自适应调整[J]. 光学精密工程, 2010, 18(11): 2430-2436.
- LI T J, LIU Y F, DONG J X, *et al.*. Adapting adjustment of stiffness for force feedback micro accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2430-2436.
- [4] TOUBOUL P, FOULON B, CHRISTOPHE B, *et al.*. CHAMP, GRACE, GOCE Instruments and Beyond [J]. *Geodesy for Planet Earth*, 2012, 136: 215-221.
- [5] MUZI D, ALLASIO A. GOCE: the first core Earth explorer of ESA's Earth observation programme [J]. *Acta Astronautica*, 2004, 54(3): 167-175.
- [6] CHEN J, WILSON C, FAMIGLIETTI J, *et al.*. Spatial sensitivity of the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) time-variable gravity observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110(B8): 1978-2012.
- [7] 唐富荣,薛大同. 静电悬浮式三轴加速度传感器的初步设计[J]. 传感器技术, 2001, 20(7): 30-32.
- TANG F R, XUE D T. A Preliminary design of an electrostatically suspended triaxial accelerometer [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2001, 20(7): 30-32.
- [8] 薛大同. 静电悬浮加速度计的地面重力倾角标定方法[J]. 宇航学报, 2011, 32(3): 688-696.
- XUE D T. On-ground calibration methods of electrostatically suspended accelerometers with gravity inclination [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(3): 688-696.
- [9] ZHOU Z B, LIU L, TU H B, *et al.*. Seismic noise limit for ground-based performance measurements of an inertial sensor using a torsion balance [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2010, 27(17): 175012-1-9.
- [10] LI G, WU S, ZHOU Z, *et al.*. Design and validation of a high-voltage levitation circuit for electrostatic accelerometers [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(12): 125004.
- [11] 郑子文,翁雷,陈善勇,等. 高精度六面体垂直度误差测量的一种新方法[J]. 光学技术, 2008, 34(3): 391-394.
- ZHENG Z W, WENG L, CHENG SH Y, *et al.*. A novel method for perpendicularity measurement of high precision hexahedron [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(3): 391-394.
- [12] 张磊,郭劲. 分体式激光扩束系统平行度测量装置的设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 789-795.
- ZHANG L, GUO J. Design of parallelism measuring equipment for laser beams from independent laser expanding beam system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 789-795.
- [13] TA Y F, JUN X, LIANG Y, *et al.*. The effects of non-parallel plates in a differential capacitive microaccelerometer [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1999, 9(4): 283-293.
- [14] 范达. 星载静电悬浮加速度计的设计与地面实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.

FAN D. *Design and Ground Experimental Study of a Spaceborne Electrostatic Levitated Accelerometer* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.

[15] FAN D, LIU Y F, HAN F T, *et al.*. Identifica-

tion and adjustment of the position and attitude for the electrostatic accelerometer's proof mass [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 187: 190-193.

作者简介:



刘 爽(1985—),男,黑龙江佳木斯人,博士研究生,2008年于吉林大学获得学士学位,主要从事空间静电悬浮加速度计相关技术研究。E-mail: s-liu08@mails. tsinghua. edu. cn

导师简介:



董景新(1948—),男,上海人,教授,博士生导师,1981年于清华大学获得硕士学位,主要从事 MEMS 惯性仪表技术和导航系统研究。E-mail: dongjx@mail. tsinghua. edu. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)