文章编号 2095-1531(2019)03-0455-08

电极不对称性对惯性传感器性能损失的研究

王少鑫[1,2],齐克奇[1*],王玉坤[1],王 智[1],陈立恒[1]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:惯性传感器被广泛应用于地球重力场反演、等效原理验证等科学实验中,用来测量空间非保守力作用引起的微小加速度扰动以实现航天器的无拖曳控制。目前国内外正在大力开展的空间引力波探测计划中,惯性传感器作为核心测量载荷主要用于屏蔽外界噪声扰动,并通过静电控制和微推进器的测量及补偿实现测试质量在空间敏感轴方向自由漂浮运动。本文以静电悬浮式惯性传感器电容结构为基础,结合系统静电力驱动控制的工作原理,并以实际的加工条件为依据,对电极不对称性这一系统自身的误差来源展开分析,通过对各种不对称情况的系统性能影响比较分析,得到电极不对称性对于系统性能,特别是量程损失的影响显著。在此基础上结合实际加工条件得出将加工线度尺寸误差控制在 10 μm 以内,面积不对称性控制在 1% ~2% 之间的基本要求,以降低其对系统测量范围的限制,进而提高科学目标。

关 键 词:惯性传感器;敏感结构;电极不对称;量程
中图分类号:TH73; TH762 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20191203.0455

Study on loss of performance in inertial sensors due to electrode asymmetry

WANG Shao-xin[1,2], QI Ke-qi[1*], WANG Yu-kun[1], WANG Zhi[1], CHEN Li-heng[1]
(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;)
* *Corresponding author, E-mail: qikeqi*1985@126.*com*

Abstract: Inertial sensors are widely used to measure small disturbances in acceleration caused by non-conservative forces in space and to realize the drag-free control of spacecrafts in scientific experiments, such as earth gravity field inversion and equivalent principle verification. In the space gravitational wave detection research being carried out at home and abroad, the inertial sensor is used as the core measurement load to shield external noise and achieve free-fall motion of the Test Mass in the direction of the space sensitive axis through electrostatic control. In this paper, on the basis of the electrostatic suspension inertial sensor capacitor structures,

收稿日期:2019-04-10;**修订日期**:2019-04-25
基金项目:中国科学院“空间科学(二期)”战略性先导科技专项“空间科学背景型号项目”(No. XDA15020704)
Supported by Leading Special Project of Chinese Academy of Sciences(No. XDA15020704)

with consideration to the working principle of the electrostatic force driving control system and based on actual processing conditions, the source of error in the system asymmetry is analyzed. Through comparative analysis of the system's performance effects on various asymmetry conditions, the asymmetry of the electrods is obtained, especially in the range of high loss in performance. On this basis, combined with the actual processing conditions, the basic requirements to control the dimensional error of the machining line within 10 μm and the area asymmetry between 1% and 2% are obtained, so as to reduce the measurement range limitation of the system and improve its scientific goal.

Key words: inertial sensor; sensitive structure; electrode asymmetry; measuring range

1 引 言

惯性传感器(Inertial Sensor)是一种用于检测和测量加速度的传感器,通常把测量线加速度的惯性传感器称为加速度计。

惯性传感器根据测量原理不同又分为电容传感器[1]、光能量传感器[2]、磁感应传感器[3]、光学干涉传感器[4]等多种方式。其中电容式传感器在对外界缓变微弱加速度测量方面有着高灵敏度优势,能够实现超高分辨率的测量。所以空间科学实验中大多数采用的都是电容式的惯性传感器。电容式惯性传感器通过测量测试质量与电极间的电容变化,并通过施加静电力的方法将测试质量控制在电极笼的平衡位置处,施加的静电力与测试质量的商正好反映出外界扰动加速度的大小,从而得出传感器所受外界扰动加速度的大小,因此电容式惯性传感器通常也称为静电悬浮加速度计。

近年来随着科技水平的不断进步,惯性传感技术被越来越多地应用在航天领域的基础科学实验研究中。特别是在高精度地球重力场测量[5]、等效原理验证[6]、空间引力波探测[7]等前沿科学领域。欧美国家先后发射了CHAMP[8]、GRACE[9]、GOCE[10]、MICROSCOPE[11]、LISAPathfinder[12]和GRACE follow-on[13]等科学卫星,搭载的都是静电惯性传感器,取得了显著效果,在0.1 mHz~1 Hz的测量频段内,噪声水平能够达到$10^{-9}\sim10^{-14}$ m/s^2/Hz$^{-1/2}$。

惯性传感器[14]主要由测试质量(Test Mass, TM)、电极笼(Electrodes Housing, EH)和前端电子学(Front and End-Electronics, FEE)组成。TM是测量参考基准,电极笼是电极载体,TM被放置在电极笼的中央,前端电子学的主要作用是通过电容传感的方式读取测试质量与电极笼的相对位置关系并进行静电力反馈控制。

电极笼需要经过超精密加工[15]、抛光、镀膜及刻蚀等一系列工艺流程形成电极,由于加工误差的存在,使得电极面的尺寸大小及相互位置关系与理想情况存在偏差,而这种偏差会直接影响到惯性传感器的性能。为此,本文从空间惯性传感器基本工作原理出发,以物理模型为基础对惯性传感器的测量原理、电极的划分方式进行阐述,再根据电极不对称性几何关系对系统测量的影响进行分析,并以此为依据评价其对惯性传感器性能损失的影响,为后续的该类型传感器器件的设计加工提供参考。

2 惯性传感器的测量原理及电极划分方式

一般来说,惯性传感器是以TM在电极笼中所受静电力为基础的。通过μm级金丝引线为TM同时加载有效值为V_d的高频交流调制检测信号电压和直流偏置电压V_p。其工作原理如图1所示,当外界有加速度a输入时,TM相对于电极笼产生了位移,引起了差分电容变化。惯性传感器的FEE通过电容检测、PID控制、伺服放大反馈等过程,将TM的位置变化引起的电容变化转化为反馈电压V_f加载到电极上,使得TM稳定悬浮在电极笼中心,并以此时反馈电压大小来解算出当前加速度大小。

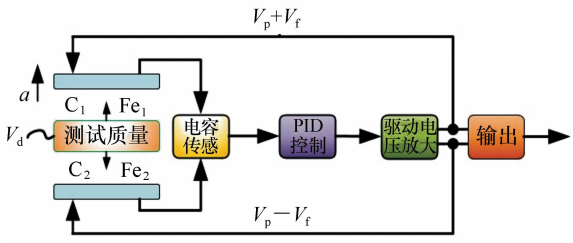

图 1　加速度测量原理示意图(单自由度)

Fig. 1　Schematic diagram of acceleration measurement (single degree of freedom)

2.1　差分电容传感器检测原理

对于变间距电容传感器[16-20]来说,当极板间距发生微小变化时,会引起自身电容值的变化。为了进一步提高传感器的灵敏度,通常还会将传感器设计成差分式结构,如图 2 所示。

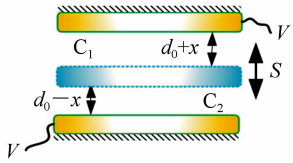

图 2　差分式电容传感原理(单自由度)

Fig. 2　Principle of differential capacitance sensing measurement (single degree of freedom)

图 2 中,上电极板为可动极板,下电极板为定极板,电极板面积为 A,当 TM 处在中心位置时上下两部分电容为 C_0,当上极板移动时,初始间距从 d_0 变成 d_1,ε_r 为相对介电常数,在真空环境中约为 1,ε_0 为真空中介电常数,$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m,根据平行平板电容器计算公式有:

$$C_1 - C_2 = \varepsilon_0\varepsilon_1 \frac{A}{d_0 + x} - \varepsilon_0\varepsilon_r \frac{A}{d_0 - x}, \quad (1)$$

$$\Delta C = -2\varepsilon\varepsilon_0\varepsilon_r A \frac{x}{d_0^2 - x^2}, \quad (2)$$

由于 $x^2 \ll d_0$,则有:

$$\Delta C \approx -2C_0 \frac{x}{d_0}. \quad (3)$$

由此可见差分式测量的分辨率高,同时非线性误差也降低了一个数量级。

2.2　电容传感器伺服控制原理

TM 与电极笼无机械连接,需要对 TM 进行 6 个自由度的控制。对于平动控制过程来说,惯性传感器 TM 的加载控制方式(单通道)如图 3 所示。

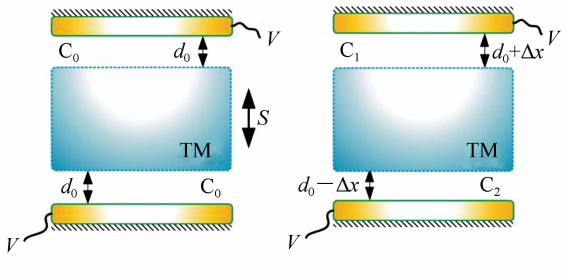

图 3　TM 平动静电力控制原理

Fig. 3　Principle of TM translation electrostatic control

由于 d_0 << TM 边长,忽略边缘效应,根据平行平板电容器静电力计算公式:

$$F = \frac{1}{2}\varepsilon_0\varepsilon_r A\left(\frac{V_p}{d_0^2}\right), \quad (4)$$

可知,当 TM 相对于中心位置有位移 x 时,忽略高频项,假设 F_1 为上电极板对 TM 的静电力,F_2 为下电极板对 TM 的静电力,m 为 TM 质量,a 为需要平衡的加速度大小。在闭环状态下,静电力与 TM 受到的外力平衡,得[17]:

$$F = F_1 - F_2 = ma = 2\varepsilon_0\varepsilon_r A \frac{V_p V_f x^2 + (V_p^2 + V_f^2) d_0 x + V_p V_f d_0^2}{(d_0^2 - x^2)^2}. \quad (5)$$

可见当 x 在零点附近时,反馈电压与输入加速度成正比。

$$a \approx \frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r A V_p}{m d_0^2} V_f. \quad (6)$$

对于转动控制的情况,若 TM 相对于电极笼有大小为 θ 的角度转动时,如图 4 所示。

左右侧上下极板电容发生变化,前端电子学设备读出该电容值变化并在相邻和相对的上电极施加大小相等、方向相反的反馈电压,并产生与外界扰动相反的转矩使之保持在平衡位置。

此时,TM 所受到的转矩可以表示为:

$$T = T_1 + T_r = F_1 \cdot l + F_r \cdot l = \varepsilon_0\varepsilon_r A l\left[\left(\frac{V_p - V_f}{d_0 - x}\right)^2 - \left(\frac{V_p + V_f}{d_0 + x}\right)^2\right]. \quad (7)$$

此时,惯性传感器将同时获得线加速度和角加速度值。当有外界线加速度输入时会引起 TM

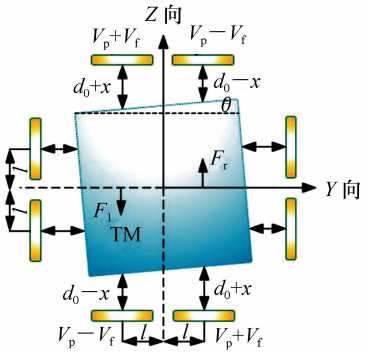

图 4 TM 转动静电力控制原理

Fig. 4 Principle of TM rotation electrostatic control

平动,当外界存在角加速度时会引起 TM 转动,通常惯性传感器主要测量 TM 受到的线加速度,因此在控制过程中会先将角加速度产生的力和力矩平衡掉,然后读取线加速度值。

2.3 电极划分及电压配置

一般来说,为了实现对惯性传感器多自由度控制,需要对电极面进行合理分块,并对分块进行相应的组合来完成,如图 5 所示。

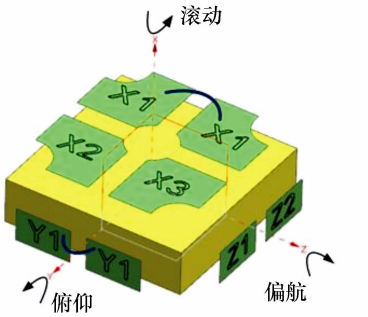

图 5 惯性传感器电极分布

Fig. 5 Inertial sensor electrode distribution

本文采取的方式是将 X 向电极划分为 4 块,将其中两个电极互连,三组电极用于控制 X 轴向平动及 Y、Z 轴转动,共 3 个自由度,检测 X 方向的线加速度。同理将 Y 和 Z 向电极划分为两块,Y 向电极互连控制 Y 向移动单自由度,Z 向控制 Z 平动和绕 X 转动两个自由度,检测 Y、Z 方向线加速度。这种划分方式一方面能够降低加工难度,另一方面降低敏感轴的控制复杂程度,提高了系统测量精度。

电极划分完毕后,在 TM 上同时加载高频激励电压,在电极面上加载直流偏置电压和反馈电压,同时进行测量和控制。采用通道控制的方法实现对 6 个自由度的控制。平动控制时,在相邻两电极上施加同性的反馈电压,在相对电极上施加相应的异性反馈电压。进行转动控制时,相邻的电极上施加大小相等符号相反的异性电压。

3 电极不对称性的影响分析

由于电极不对称性会在 TM 平动控制过程中产生转动力矩,以及在转动控制过程中产生额外的控制力矩,这两部分分量都需要通过在电极面上加载除了本身控制反馈电压以外的额外电压来平衡,这就占用了部分反馈电压,从而导致系统测量量程的损失,对系统性能产生影响。

电极不对称性通常表现在两个方面:电极面积的不对称和电极相对于中心位置的位置不对称,如图 6 所示。由于 Z 轴方向既有转动控制,也有平动控制,既能够代表 X 向的多自由度控制,也能够代表 Y 向的平动控制,因此以 Z 轴为例来分析电极不对称性对于系统性能的影响。

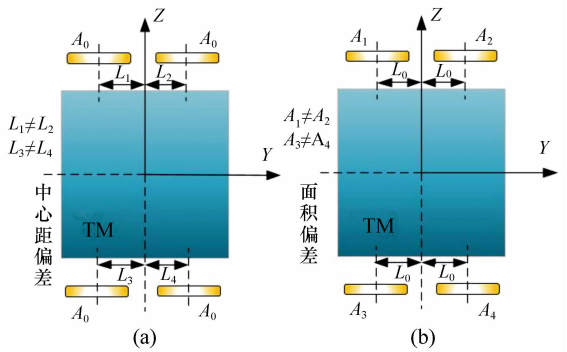

图 6 电极不对称性结构位置形式

Fig. 6 Electrode asymmetry structure arrangement form

为了能够充分考虑电极不对称性对系统性能的影响,忽略电极面以及 TM 表面间的几何公差,并假设电极面积相对于中心轴是轴对称的,且相邻相对面积间相对于电极笼以及极板之间是轴对称的。在此基础上,设理想电极面面积为 A,实际电极面的面积为 A_i($i=1,2,3,4$),电极面中心距电极笼中心的理想距离为 L,中心距变化量为 L_i

($i=1,2,3,4$)。

3.1　电极面积不对称的影响

对面积不对称来说,当同侧电极出现不对称时,上下两极板的平衡电容为:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 A_1}{d_1} = \frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 A_2}{d_2} = C_2, \tag{8}$$

则有:

$$d_2 = \frac{A_2}{A_1}d_1, \tag{9}$$

此时,在平衡位置出现位移后产生的差分电容为:

$$\Delta C = \frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 A_1}{d_1 - x} - \frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 A_2}{d_2 + x} = \frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 A_1(d_1 + d_2)}{d_1}\cdot\frac{x}{(d_1 - x)(d_2 + x)}. \tag{10}$$

对式(10)进行泰勒展开并略去高阶小量,并将式(9)带入得:

$$\Delta C \approx \frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 A_1(d_1 + d_2)}{d_1^2 d_2}x = \frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 A_2(d_1 + d_2)}{d_1 d_2^2}x. \tag{11}$$

由式(11)可以看出,尽管由于上下电极板的面积不同导致平衡电容位置出现偏离,但在平衡位置处的小范围内,差分电容依然与位置偏差具有线性关系。

此时,平衡位置处的静电力为:

$$F_e = F_{e1} - F_{e2} = \frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 A_1}{2}\left(\frac{V_b + V_p}{d_1}\right)^2 - \frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 A}{2}\left(\frac{-V_b + V_p}{d_2}\right)^2 = \frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 A_1}{2d_1^2 d_2}[2V_b V_p(d_1 + d_2) + (d_2 - d_1)(V_b^2 + V_p^2)], \tag{12}$$

正常情况下,平衡位置处的静电力为零,则有:

$$2V_b V_p(d_1 + d_2) + (d_2 - d_1)(V_b^2 + V_p^2) = 0, \tag{13}$$

求解式(13)中的反馈电压 V_b 有:

$$V_{b1} = \frac{(\sqrt{d_1} + \sqrt{d_2})^2}{d_1 - d_2}V_p, \quad V_{b2} = \frac{(\sqrt{d_1} - \sqrt{d_2})^2}{d_1 - d_2}V_p, \tag{14}$$

其中,由于 V_{b1} 不大于偏置电压 V_p,可以认定为假根。根据式(13)可以得出电极面积不对称会导致反馈电压出现一个偏值,且该偏值与偏置电压 V_p 和平衡位置与上下两个电极板的间隙有关,而该反馈电压偏值所占偏置电压的比例即为偏值系数。由式(9)可以看出,平衡位置与上下两个电极板的间隙与两极板的面积比有关,则可以知道平衡位置反馈电压的偏值与偏置电压和两极板的面积比有关。将 V_{b2} 进行整理有:

$$V_{b2} = \left(\frac{1 - \sqrt{d_2/d_1}}{\sqrt{1 - d_2/d_1}}\right)^2 V_p, \tag{15}$$

令 $H = d_2/d_1 = A_2/A_1$,则有:

$$V_{b2} = \left(\frac{1 - \sqrt{H}}{\sqrt{1 - H}}\right)^2 V_p = B\cdot V_p, \tag{16}$$

其中,B 为反馈电压的偏值系数,由于 V_p 为一常数,B 与电极面积比 H 的关系如图 7 所示。

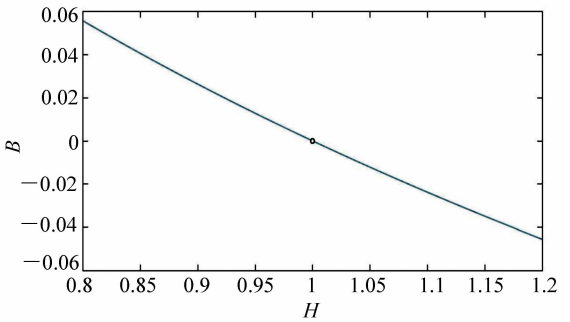

图 7　反馈电压偏值系数与电极面积比值关系

Fig. 7　Relation between feedback voltage offset coefficient and electrode area ratio

由图 7 可以看出,反馈电压的偏值系数 B 与电极面积比 H 之间近似为线性关系。惯性传感器正常工作时的反馈电压 V_{b1} 小于等于偏置电压 V_p,因此偏置电压直接决定了惯性传感器的量程。而当测试质量处于平衡位置时,由于电极面积不对称引入的反馈电压偏值将对惯性传感器的量程造成损失。

3.2　电极中心距位置不对称的影响

通常情况下,加工完成的电极中心距都各不相同,由式(7)可知在平衡位置处平动和转动控制过程中均产生额外的转矩,转矩大小分别为:

$$T_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A V_p^2}{d_0^2} \cdot (L_4 + L_3 - L_1 - L_2), \tag{17}$$

$$T_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A V_p^2}{d_0^2} \cdot (L_1 + L_4 - L_2 - L_3). \tag{18}$$

综合考虑平动和转动控制过程中产生的转矩,得到总的额外转矩为:

$$T = T_1 + T_2 = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A V_p^2}{d_0^2} \cdot (L_4 - L_2). \tag{19}$$

设 $L_4 - L_2 = HL$ 为同侧电极中心距不对称度,由公式(7)(19)得反馈电压偏值系数 B 与中心距的位置比值 H 之间的关系为线性关系:

$$V_b = HV_p. \tag{20}$$

结合现有的加工条件水平,得到中心距误差与系统量程损耗量之间的关系,如图 8 所示。

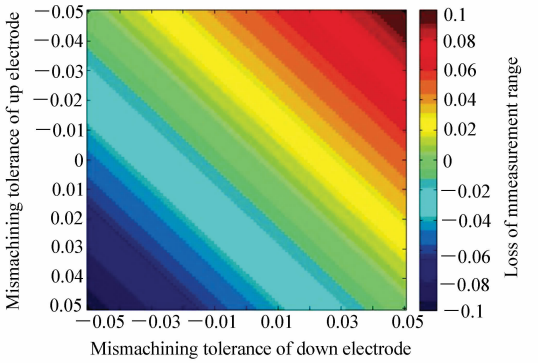

图 8 中心距误差与反馈电压偏值系数关系

Fig. 8 Relation between feedback voltage coefficient and centre distance error

由以上分析可见,当电极相对于中心完全对称时,即使上下相对电极中心距不相等,也不会对惯性传感器的测量和控制造成影响。除此之外都会产生额外转矩,而这部分转矩需要在同侧电极施加反馈电压来平衡,从而会占用部分系统反馈电压,导致系统量程损失。

由于加工过程中误差不可避免,从而电极间必然存在不对称情况。根据上述分析可知,电极不对称性对于系统量程的损耗有直接的影响。由于测量调整过程是一个相互耦合的过程,因此,在考虑占用量程的问题上将综合考虑图 6(a)、6(b)情况。利用平方根分配误差估计占用量程的

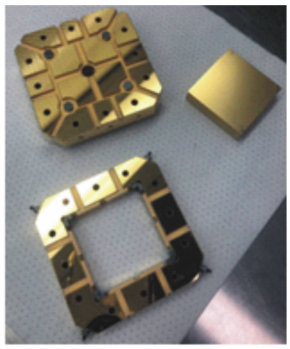

图 9 加工完成后的电极件和 TM

Fig. 9 Finished electrode and TM

最大比例约为 11.7%,影响相当大。所以在加工制造过程中对于面积的不对称性要进一步严格控制。根据该类惯性传感器的设计特点,再结合现阶段的加工水平,应将尺寸精度控制在 10 μm 内,面积不对称性控制在 1% ~2% 内,以减少面积不对称性对惯性传感器性能的影响,使其满足当前该类型传感器的测量需求。

4 结 论

惯性传感器作为空间弱力测量的核心器件,传感器自身的系统性能直接影响其测量精度,这部分影响主要来源就是电路噪声和敏感结构耦合噪声,敏感结构耦合噪声又主要体现为敏感结构的加工误差,这种加工误差又分为两类,一类是由于尺寸误差导致的电极面积的不对称性造成的误差,另一类是由于几何误差电极面间相互的几何位置关系误差。

本文主要针对现有的传感器设计结构对前一种误差进行详细分析,得出由于电极不对称性在控制过程中会产生额外的加速度(或转矩),这就使得系统首先通过施加反馈电压去平衡这部分影响,从而会直接导致系统量程大幅损失,而量程是系统性能的一项重要指标,一旦量程变化量超出一定范围,系统的测量性能将会大打折扣。

因此,需要结合超精密的加工手段,优化加工工艺,提高加工精度,将电极的线度不对称性控制在 10 μm 内,面积不对称性控制在 1% ~2% 内,同时提高电极面以及 TM 的几何精度,这样将很

大程度上降低传感器自身结构对于系统性能的影响。针对未来更高精度的惯性传感器来说,电极不对称性还需要达到更高的精度,而这同时也增加了加工难度、加工成本,需要根据实际情况综合考虑。

参考文献:

[1] LAUBEN D,ALLEN G,BENCZE W,*et al*.. Electrostatic sensing and forcing electronics performance for the LISA Pathfinder gravitational reference sensor[J]. *AIP Conference Proceedings*,2006,873:576-582.

[2] ZOELLNER A,HULTGREN E,SUN K X. Integrated differential optical shadow sensor for modular gravitational reference sensor[C]. Proceedings of the 8th International LISA Symposium,Stanford University,USA,2013.

[3] SUMNER T J. The STEP and GAUGE missions[J]. *Space Science Reviews*,2009,148(1-4):475-487.

[4] SPEAKE C C,ASTON S M. An interferometric sensor for satellite drag-free control[J]. *Classical and Quantum Gravity*,2005,22(10):S269-S277.

[5] 罗子人,钟敏,边星,等. 地球重力场空间探测: 回顾与展望[J]. 力学进展,2014,44:201408.
LUO Z R,ZHONG M,BIAN X,*et al*.. Mapping earth′s gravity in space:review and future perspective[J]. *Advances in Mechanics*,2014,44: 201408. (in Chinese)

[6] NOBILI A M,ANSELMI A. Relevance of the weak equivalence principle and experiments to test it:lessons from the past and improvements expected in space[J]. *Physics Letters A*,2018,382(33):2205-2218.

[7] 王智,马军,李静秋. 空间引力波探测计划-LISA 系统设计要点[J]. 中国光学,2015,8(6):980-987.
WANG ZH,MA J,LI J Q. Space-based gravitational wave detection mission:design highlights of LISA system[J]. *Chinese Optics*,2015,8(6):980-987. (in Chinese)

[8] HUANG T,LÜHR H,WANG H,*et al*.. The relationship of high-latitude thermospheric wind with ionospheric horizontal current, as observed by CHAMP satellite[J]. *Journal of Geophysical Research:Space Physics*,2017,122(12):12378-12392.

[9] SIEMES C. Improving GOCE cross-track gravity gradients[J]. *Journal of Geodesy*,2018,92(1-2):33-45.

[10] FRAPPART F,RAMILLIEN G. Monitoring groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment(GRACE) satellite mission:a review[J]. *Remote Sensing*,2018,10(6):829.

[11] TOUBOUL P,MÉTRIS G,RODRIGUES M,*et al*.. MICROSCOPE mission:first results of a space test of the equivalence principle[J]. *Physical Review Letters*,2017,119(23):231101.

[12] ARMANO M,AUDLEY H,AUGER G,*et al*.. Sub-femto-g free fall for space-based gravitational wave observatories:LISA pathfinder results[J]. *Physical Review Letters*,2016,116(23):231101.

[13] FLECHTNER F,DAHLE C,LANDERER F,*et al*.. GRACE follow-on: current mission status and next steps[C]. Proceedings of EGU General Assembly Conference Abstracts,2018:8990.

[14] ANDERSON G,ANDERSON J,ANDERSON M,*et al*.. Experimental results from the ST7 mission on LISA Pathfinder [J]. *Physical Review D*,2018,98(10):102005.

[15] 彭利荣,马占龙,王高文,等. 超薄光学元件精密加工关键技术[J]. 中国光学,2015,8(6):964-970.
PENG L R,MA ZH L,WANG G W,*et al*.. Key technology of ultra-thin optical element precision manufacture[J]. *Chinese Optics*,2015,8(6):964-970. (in Chinese)

[16] JOSSELIN V,TOUBOUL P,KIELBASA R. Capacitive detection scheme for space accelerometers applications[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*,1999,78(2-3):92-98.

[17] FAN D,LIU Y F,HAN F T,*et al*.. Identification and adjustment of the position and attitude for the electrostatic accelerometer′s proof mass[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*,2012,187:190-193.

[18] LISA Pathfinder Collaboration. LISA pathfinder:first steps to observing gravitational waves from space[C]. Proceedings of 11th International LISA Symposium,IOP Publishing,2017.

[19] BORTOLUZZI D,FOULON B,MARIRRODRIGA C G,*et al*.. Object injection in geodesic conditions:in-flight and on-ground testing issues[J]. *Advances in Space Research*,2010,45(11):1358-1379.

[20] LI G, WU S C, ZHOU Z B, *et al*.. Design and validation of a high-voltage levitation circuit for electrostatic accelerometers [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(12): 125004.

作者简介:

王少鑫(1985—),男,内蒙古巴彦淖尔人,博士研究生,助理研究员,2009 年于西南交通大学获得学士学位,2013 年于浙江大学获得硕士学位,主要从事空间惯性传感器相关设计方面的研究。E-mail: wangshaoxin@ ciomp. ac. cn

齐克奇(1985—),男,内蒙古锡林郭勒人,博士研究生,助理研究员,2007 年、2009 年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间惯性传感器相关设计方面的研究。E-mail: qikeqi1985 @ 126. com

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国液晶学科和显示技术领域的综合性专业学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊、中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等 20 余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》以材料物理和化学、器件制备技术及器件物理、器件驱动与控制、成像技术与图像处理等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域中最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。其内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业学术期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》征集有关液晶聚合物、胶体等软物质材料和各类显示材料及制备方法、液晶物理、液晶非线性光学、生物液晶;液晶显示、等离子体显示、发光二极管显示、电致发光显示、场发射显示、3D 显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他新型显示等各类显示器件物理和制作技术;各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用;显示材料和器件的测试方法与技术;各类显示器件的应用;与显示相关的成像技术与图像处理等研究论文。

《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

地 址:长春市东南湖大路 3888 号
《液晶与显示》编辑部
邮 编:130033
电 话:(0431)6176059
E-mail: yjyxs@ 126. com

国内统一刊号:CN 22-1259/O4
国际标准刊号:ISSN 1007-2780
国内邮发代号:12-203
国内定价:50 元/期
网 址:www. yjyxs. com