

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2019.02.014

# 航空/海洋重力仪用加速度计现状与优化方法

陈展<sup>1</sup>, 于湘涛<sup>2</sup>, 魏超<sup>2</sup>, 杨杏敏<sup>2</sup>, 彭福英<sup>2</sup>

(1. 海军驻航天三院军事代表室, 北京 100074; 2. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

**摘要:**采用石英挠性加速度计作为重力敏感器的航空/海洋重力仪是典型的重力信息采集仪器, 要求石英挠性加速度计具有通电稳定性高、高分辨率、低噪声的特点。为了满足航空/海洋重力仪需求, 首先, 分析了石英挠性加速度计一次通电稳定性机理, 确定了关键影响因素, 并给出了优化方向; 其次, 建立了加速度计分辨率模型, 给出了测试方法和后续优化方向; 最后, 通过试验确定了噪声水平, 根据关键影响因素给出了优化方向。通过上述研究的开展, 为石英挠性加速度计在重力测量领域中的应用奠定了基础。

**关键词:**重力仪; 石英挠性加速度计; 稳定性; 分辨率; 噪声

中图分类号: U666.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2019)02-0092-06

## Current Status and Improvement of Accelerometers for Airborne/Marine Gravimeter

CHEN Zhan<sup>1</sup>, YU Xiang-tao<sup>2</sup>, WEI Chao<sup>2</sup>, YANG Xing-min<sup>2</sup>, PENG Fu-ying<sup>2</sup>

(1. The Navy Military Representative Office Stationed in the Third Institute of CASIC, Beijing 100074, China ;

2. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

**Abstract:** Airborne/marine gravimeter with quartz flexure accelerometer as the gravity sensor is a typical gravity information measuring instrument. To measure the gravity signal, the high stability, high resolution, and low noise are needed for quartz flexure accelerometer. To meet the needs of the instrument, the following three aspects are studied. Firstly, the stability mechanism is analyzed, and the stability improvement design is presented. Secondly, the resolution model is built, the resolution level is evaluated and the optimization design of improving resolution is advanced. Finally, the noise level is evaluated and the optimization design of noise reduction is provided. Based on the mentioned research, the foundation to carry out the application of accelerometer in the gravity measurement is laid.

**Key words:** Gravimeter; Quartz flexure accelerometer; Stability; Resolution; Noise

### 0 引言

通过地球重力分布的测量, 可揭示地球内部物

质的分布、运动与变化状态, 了解地球附近空间物理事件产生、发展的规律与机理。因此, 开展重力测量仪器<sup>[1-3]</sup>的研制, 对国防、资源勘探、空间科学、

收稿日期: 2018-10-09; 修订日期: 2019-01-25

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(41527803)

作者简介: 陈展(1985-), 男, 工程师, 主要从事惯性导航方面的研究。

通信作者: 于湘涛(1979-), 男, 博士, 研究员, 主要从事惯性仪表、控制系统等方面研究。E-mail: yuxiangtao@163.com

海洋科学、地球物理学等前沿科学研究具有重要的意义<sup>[4-5]</sup>。重力信息测量方法主要研究模型的现实转化,是实现地球重力信息高精度快速测量的关键环节,高精度高稳定重力传感器主要用于实现对于惯性空间载体所受比力的精确测量,为最终获取地球重力信息提供基础信息。目前,航空/海洋重力仪普遍采用石英挠性加速度计作为重力传感器,石英挠性加速度计(以下简称加速度计),是一种采用石英材料作为检测质量支撑的加速度计,具有测量精度高、长期稳定性好的优点<sup>[6-8]</sup>。

针对航空/海洋重力仪对加速度计的需求,分别从加速度计分辨率、稳定性和噪声等方面进行了研究。通过理论推导、机理分析和试验研究,确定了关键因素、试验方法和改进方向,为提高加速度计综合性能、更好地满足航空/海洋重力仪应用奠定了基础。

## 1 一次通电稳定性现状与优化

加速度计一次通电稳定性通常是指:在要求的连续工作时间内,0g/1g 恒定加速度输入,采集加速度计输出值,计算其偏离平均值的标准偏差,反映了加速度计在工作过程中的能力。

### 1.1 一次通电稳定性影响因素

影响加速度计一次通电稳定性的因素,主要包括加速度计自身稳定性变化引起的因素和环境温度变化引起的因素等。

根据长期的试验统计和机理研究,影响加速度计参数稳定性变化的因素包括以下几个方面。

1)磁钢与磁极片、摆片与动圈、磁钢与激励环等连接位置通过胶粘剂连接,使用过程中,温度变化增强胶粘剂分子链运动能力,造成连接形状变形,蠕变和松弛的速度变快,处于新的平衡,连接位置和强度发生变化,经历温度循环后胶粘剂微观形貌如图 1 所示,导致连接稳定性变化。

2)内部磁路性能参数变化。加速度计采用稳定性相对较好的永磁材料,环境温度的升高会引起磁畴自发矢量的反转或壁移,其作用相当于对合金施加一个反向磁场的退磁,反过来温度降低磁场性能高增强,永磁材料剩余磁化强度随温度变化曲线如图 2 所示,温度不断波动,磁性能不能恢复到初始位置,使得标度因数稳定性变化。

3)加速度计构件加工过程中会产生加工应力、摆组件及预负载装配过程中会产生装配应力、焊接

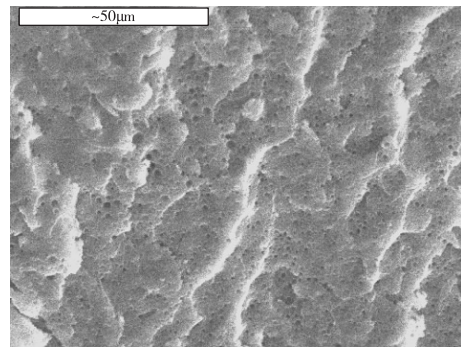


图 1 经历温度循环后胶粘剂微观形貌

Fig. 1 Microstructure of adhesive after temperature cycle

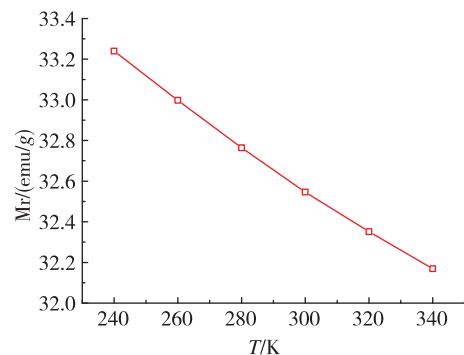


图 2 永磁材料剩余磁化强度随温度变化曲线

Fig. 2 Temperature curve of residual magnetization of permanent magnet material

过程中会产生热应力,这些残余应力随着时间等环境载荷的影响释放,使得加速度计参数稳定性变差。

环境温度对加速度计一次稳定性的影响主要表现在温度波动时,偏值和标度因数具有温度系数,引起稳定性变化。根据加速度计内部组成确定出影响温度系数的主要原因如下:

1)铝制骨架热膨胀系数比石英摆片大近 2 个数量级<sup>[8]</sup>,温度变化时,异质材料连接之间会产生热应力积累。为了缓冲热应力,采用胶粘剂连接以减少热应力,热应力使得挠性平桥上的应力发生变化,使得偏值发生变化。

2)摆组件固定在上下力矩器中间,施加预紧力后,通过预负载环把上下力矩器连接在一起,温度变化时,异质材料温度系数不同,预紧力处于新的平衡位置,影响了敏感结构的应力状态。

3)环境温度的变化和伺服电路发热都会使永磁体温度发生变化,对于结构稳定的永磁材料,环境温度的升高将会使磁性下降。

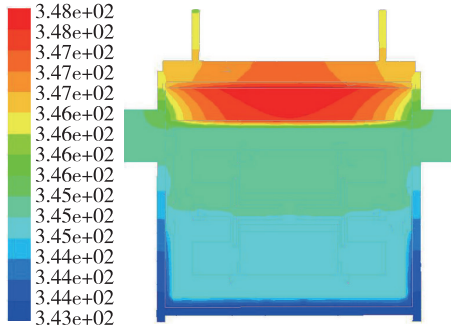


图3 加速度计热场仿真云图

Fig. 3 Finite element simulation nephogram of thermal field

### 1.2 一次通电稳定性测试方法

温控条件下,通过安装夹具使加速度计输入轴处于水平/垂直状态(0g/1g),某加速度计在温控精度优于0.05℃环境下,待测试设备充分预热稳定后,即加速度计通电1h左右开始测试,按照固定周期进行8h,1g稳定性测试,测试曲线如图4所示,稳定性可以达到 $10^{-7}$ 量级。

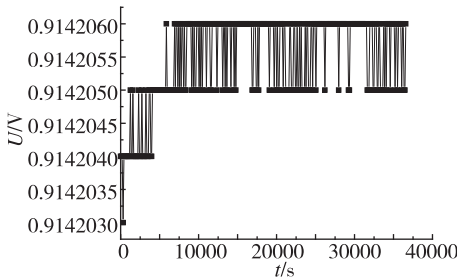


图4 加速度计稳定性测试曲线

Fig. 4 Test curve of accelerometer stability

### 1.3 提高一次通电稳定性优化方法

为了进一步提高加速度计一次通电稳定性,在加速度计设计方面需开展以下工作:

- 1) 提高稳定化处理措施,通过温度循环、温度冲击、振动等措施加速残余应力的释放,使得短期通电过程中加速度计内部应力保持恒定。
- 2) 研制新型高稳定性磁性材料、高稳定性胶粘剂材料,降低温度对性能的影响。
- 3) 进行磁路补偿研究,通过软磁材料补偿结构的设计,降低工作气隙磁通的温度系数。

针对环境温度波动问题,在测试方法方面需开展以下工作:

- 1) 温度补偿方法<sup>[9-10]</sup>研究:研究长期测试过程中温度梯度、温变速率等因素与温度模型之间的关系,并进行实时的温度补偿。

2) 精密温度控制方法研究<sup>[11]</sup>:开发精密温控设备、研究温度控制算法等,降低加速度计测试过程中的温度波动度。

## 2 分辨率现状与优化

### 2.1 加速度计分辨率影响因素

加速度计闭环方框图设计原理如图5所示。

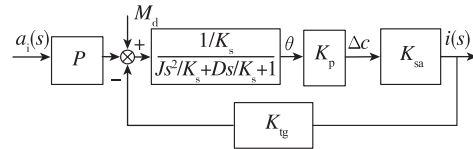


图5 加速度计闭环方框图

Fig. 5 Closed loop diagram of accelerometer

根据图5可以计算出激励加速度 $a_i$ 与敏感结构差动电容变化 $\Delta c$ 之间的关系:

$$a_i = \frac{K_c + K_p K_{sa} K_{tg}}{K_p P} \Delta c \quad (1)$$

其中, $a_i$ 为沿输入轴作用的加速度, $P$ 为摆性, $K_{tg}$ 为力矩器系数; $K_p$ 为差动电容检测器增益; $K_{sa}$ 为伺服放大器增益,为差动电容检测器、积分器、跨导补偿放大器增益的乘积。

根据式(1),加速度计敏感的最小输入加速度(即加速度计的分辨率)由表头结构参数和伺服电路决定,可以得出加速度计的分辨率为:

$$a_i = \frac{K_c + K}{K_p P} \cdot \Delta c_{min} \quad (2)$$

其中, $K = K_p K_{sa} K_{tg}$ 为伺服回路系统的刚度; $\Delta c_{min}$ 为可检测最小电容差;由式(2)可知,影响加速度计分辨率的主要因素为加速度计摆性、机械刚度、电路增益和电容传感器系数等。

### 2.2 高分辨率测试方法

目前,加速度计分辨率一般采用重力场倾角法来进行测试,应用分度装置细分重力加速度的分量作为加速度计的输入,根据GJB1037A-2004<sup>[12]</sup>和IEEE-1293<sup>[13]</sup>,在小于0.5g时,通过将分度头反向旋转最小刻度或其整数倍 $\Delta\theta$ ,正负方向各不少于3次,计算加速度增量 $\Delta a_i$ :

$$\Delta a_i = g \cdot [\sin(\theta_0 + \Delta\theta) - \sin\theta_0] \quad (3)$$

其中, $\Delta a_i$ 为加速度增量 $g$ ; $\theta_0$ 为分度头的起始转角; $\Delta\theta$ 为相对于起始转角 $\theta_0$ 的角度增量 $\Delta\theta$ ,单位为rad。比较实际输出增量的平均值 $\Delta E_p$ 和理想

输出增量  $\Delta E$ , 满足分辨率时, 应符合式(4)。

$$\frac{\Delta E_p}{\Delta E} \times 100\% \geq 50\% \quad (4)$$

当分度头在  $30^\circ$  位置时即输入  $0.5g$ , 普通分度装置精度在  $1''$ , 理论上可测  $4.2\mu g$ ; 高精度光学分度头标称可达到  $0.2''$ , 理论上可测  $0.8\mu g$ , 实际大于  $1\mu g$ , 不满足重力仪优于  $0.5\mu g$  的要求。因此, 提出了将分辨率位置优化为  $90^\circ$  位置, 根据式(3)可以计算出, 在  $90^\circ$  位置左右分别转动  $190''$ 、 $280''$  和  $350''$  时, 理论变化量约为  $0.4\mu g$ 、 $0.9\mu g$  和  $1.4\mu g$ 。开展了加速度计  $90^\circ$  位置分辨率试验, 试验结果如表 1 所示, 满足  $0.5\mu g$  的分辨率。

表 1 加速度计分辨率测试结果

Tab. 1 Test result of accelerometer resolution

序号	分度位置	实测变化值/ $\mu g$	理论变化值/ $\mu g$	变化比值
1	$90^\circ 5' 50''$	1.25	1.44	87%
2	$90^\circ 4' 40''$	0.80	0.92	87%
3	$90^\circ 3' 10''$	0.32	0.42	77%
4	$90^\circ 5' 50''$	0	—	—
5	$89^\circ 56' 50''$	0.31	0.42	75%
6	$89^\circ 55' 20''$	0.83	0.92	90%
7	$89^\circ 54' 10''$	1.3	1.44	91%

### 2.3 提高加速度计分辨率优化方法

为了进一步提高加速度计分辨率, 在设计方面需开展以下工作:

1) 降低挠性平桥的刚度, 主要是通过减小挠性平桥厚度。

2) 增大摆性, 增加动圈质量, 通过改变骨架的材质提高骨架的质量。

3) 增大电容传感器系数, 根据电容公式可以通过增大电容面积的措施即增大摆片镀金面积增大电容。

4) 增大电容传感器系数, 根据电容公式可以通过减小极板距离即减小摆组件与力矩器极板之间的距离增大电容。

在提高加速度计分辨率测试方法方面, 需开展以下工作:

1) 研究双轴转台进行分辨率的方法<sup>[14]</sup>, 通过旋转提供微小加速度, 可以提供  $0.1\mu g$  的加速度。

2) 研究基于数学摆台<sup>[15]</sup>的分辨率测试方法,

数学摆台运动导轨为圆弧形气浮导轨, 采用接近零温度系数的微晶玻璃材料, 工作服从摆运动原理, 可以提供  $0.05\mu g$  的加速度。

## 3 噪声抑制技术现状与优化

### 3.1 加速度计噪声影响因素

加速度计由表头和伺服电路组成, 与表头相关的主要为机械噪声、热噪声, 与伺服电路相关的主要为信号噪声、电源噪声、热噪声、散粒噪声等。

#### (1) 加速度计表头噪声

加速度计表头可以等价为一个质量—阻尼—刚度的弹簧系统, 其内部要求密封一定压力的气体, 使内部敏感结构和组件处于相对稳定的环境中。由于存在温度梯度, 惰性气体分子的布朗运动使得敏感结构发生微小位移, 会引起噪声, 加速度计的噪声力谱密度和加速度谱密度分别为<sup>[16]</sup>:

$$F_n = \sqrt{4k_B T f_z B} \quad (5)$$

$$a_n^2 = 4k_B T f_z B / m^2 \quad (6)$$

其中,  $F_n$  为挠动力,  $m$  为敏感结构的质量,  $f_z$  为阻尼,  $T$  为绝对温度,  $B$  为带宽,  $k_B$  为玻尔兹曼常数  $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ;  $T$  为绝对温度 K。

#### (2) 加速度计电路噪声

加速度计伺服电路的制造应用了微型电子封装并结合了分立元件、混合电路和单片封装技术, 电路中的噪声源主要包括热噪声、散粒噪声等。为了降低电路噪声进行优化设计, 采用少量、阻值更低的电阻来降低热噪声。

### 3.2 加速度计噪声测试

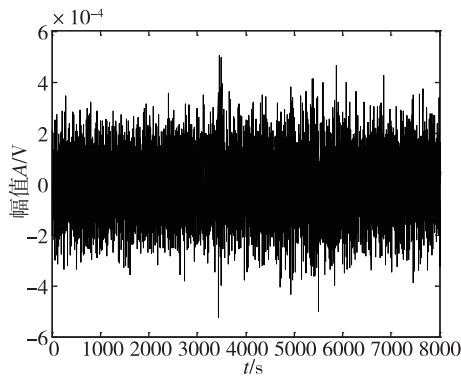
加速度计噪声测试通常选择在外界扰动较小的环境, 加速度计充分通电预热, 高速采集装置采集加速度计输出, 分析加速度计的功率谱密度和噪声。开展了加速度计噪声水平测试试验, 加速度计置于地基分度装置上处于  $0g$  状态, 加速度计通电预热 60min, 输出稳定后, 连续采集加速度计输出, 采样频率 1kHz, 采集时间约 10min, 采用 Welch 方法分析得到噪声功率谱如图 6 所示。

噪声水平通常以分贝数来表示, 通常定义为:

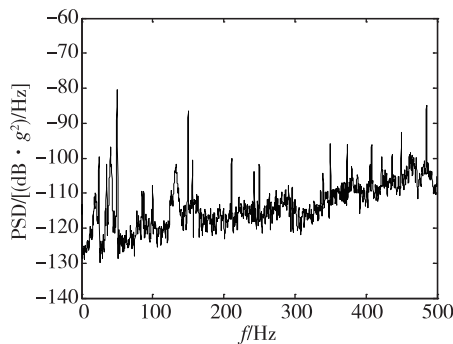
$$\text{噪声水平} = 10 \lg[S_x(f)] \quad (7)$$

由图 6(b) 可以看出, 噪声水平在 500Hz 以内约为  $-120\text{dB}$ , 由式(5)计算可得, 其噪声功率谱密度约为  $10^{-6} g/\sqrt{\text{Hz}}$ , 在 10Hz 范围内的噪声水平约为  $-130\text{dB}$ , 折合噪声功率谱密度约为  $3 \times 10^{-7} g/\sqrt{\text{Hz}}$ 。





(a) 0g 位置数据采集信号图



(b) 数据 PSD 的对数曲线

图 6 加速度计输出及功率谱曲线

Fig. 6 Outputs and power spectral density curve of accelerometer

### 3.3 加速度计噪声抑制技术

为了进一步抑制加速度计噪声水平,在加速度计设计方面,需要开展以下工作:

1)为了降低表头的噪声影响,降低气体密度和摆片增加通孔,减小阻尼,增加敏感结构质量。

2)对于热噪声,进行精密温度控制设计,减小加速度计内部的温度梯度。

3)对于电路噪声,进行电路结构参数调整来降低热噪声。

在加速度计噪声测试方面,需要开展以下工作:

1)构建低扰动环境,具有隔振基础、恒温条件。

2)研究加速度计噪声测试及数据处理方法。

## 4 结论

为了缩短与发达国家航空/海洋重力仪的差距,满足日益发展的航空/海洋重力仪需要,对现有加速度计设计、测试环境开展大量的研究工作,主要结论如下:

1)通过稳定化处理、研制新型高稳定性磁性材

料、磁路补偿、研制精密温控系统等措施,提高加速度计一次通电稳定性。

2)通过降低挠性平桥刚度、提高骨架质量、增大极板面积、减小极板间距等措施,提高加速度计分辨率,并开展新的测试方法研究。

3)通过减小阻尼、增加敏感结构质量、电路参数调整、构建测试环境等措施,抑制加速度计噪声。

## 参考文献

- [1] Dransfield M H, Christensen A N. Performance of airborne gravity gradiometers[J]. The Leading Edge, 2013, 32(8): 908-922.
- [2] Krasnov A A, Sokolov A V, Rzhavskiy N N. First airborne gravity measurements aboard a dirigible[J]. Seismic Instruments, 2015, 51(3): 252-255.
- [3] Jekeli C, Kwon J H. Results of airborne vector(3-D) gravimetry[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(23): 3533-3536.
- [4] Christensen A N, Dransfield M H, Galder C V. Noise and repeatability of airborne gradiometry[J]. First Break, 2015, 33(4): 55-63.
- [5] 胡平华, 赵明, 黄鹤, 等. 航空、海洋重力测量仪器发展综述[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(4): 10-19. Hu Pinghua, Zhao Ming, Huang He, et al. Review on the development of airborne/marine gravimetry instruments[J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(4): 10-19(in Chinese).
- [6] Foote S A, Grideland D B. Model QA-3000 Q-Flex accelerometer high performance test results [C]// IEEE PLANS 92 Position Location and Navigation Symposium Record. Monterey, CA, 1992: 534-543.
- [7] Monajemi P, Ayazi F. Design optimization and implementation of a microgravity capacitive HARPSS accelerometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(1): 39-46.
- [8] 于湘涛, 张菁华, 杜祖良. 石英挠性加速度计参数长期重复性技术研究[J]. 导航定位与授时, 2014, 1(1): 58-62. Yu Xiangtao, Zhang Jinghua, Du Zuliang. Research on long-term repeatability of quartz flexure accelerometer parameters[J]. Navigation Positioning and Timing, 2014, 1(1): 58-62(in Chinese).
- [9] Yu X T, Zhang L, Guo L R, et al. Identification for temperature model of accelerometer based on proximal SVR and particle swarm optimization algorithms[J]. Journal of Control Theory and Applications, 2012, 10(3): 349-353.

- [10] 于湘涛, 张兰, 郭琳瑞, 等. 基于小波最小二乘支持向量机的加速度计温度建模和补偿[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(1): 95-98.  
Yu Xiangtao, Zhang Lan, Guo Linrui, et al. Temperature modeling and compensation of accelerometer based on least squares wavelet support vector machine[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(1): 95-98(in Chinese).
- [11] 刘东斌, 胡平华, 宋毅龙, 等. 平台式航空、海洋重力仪精密温度控制研究[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(4): 30-35.  
Liu Dongbin, Hu Pinghua, Song Yilong, et al. Research on high-accuracy temperature control for airborne/marine gravimeter based on inertial stabilized platform[J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(4): 30-35(in Chinese).
- [12] GJB 1037A-2004. 单轴摆式伺服线加速度计试验方法[S].  
GJB 1037A-2004. Test methods for single-axis pendulous servo linear accelerometers[S]. (in Chinese)
- [13] IEEE standard specification format guide and test procedure for linear single-axis, nongyroscopic accelerometers[S]. IEEE STD 1293-1998, Sponsor by Gyro and Accelerometer Panel of the IEEE Aerospace and Electronic Systems Society.
- [14] 李海兵, 朱志刚, 魏宗康, 等. 高精度加速度计分辨率的动态估算方法[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(4): 496-500.  
Li Haibing, Zhu Zhigang, Wei Zongkang, et al. Dynamic estimation method for resolution of high precision accelerometer[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012, 20(4): 496-500(in Chinese).
- [15] 何懿才, 廖建平, 赵君轶. 数学摆台法的超低频加速度校准[J]. 计量学报, 2017, 38(4): 424-428.  
He Yicai, Liao Jianping, Zhao Junzhe. Calibrate of ultra-low frequency acceleration by mathematical pendulum-vibration generator method[J]. Acta Metrological Sinica, 2017, 38(4): 424-428(in Chinese).
- [16] Gabrielson T B. Mechanical-thermal noise in micromachined acoustic and vibration sensors[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1993, 40(5): 903-909.