

石英挠性加速度计参数长期重复性技术研究

于湘涛, 张菁华, 杜祖良
(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要: 石英挠性加速度计作为敏感载体加速度的关键器件, 其参数的长期重复性直接决定着惯导系统的精度和性能。为了清楚石英挠性加速度计长期重复性机理, 从胶粘剂性能变化和焊接应力变化两个方面分析了石英挠性加速度计偏值长期重复性机理; 从胶粘剂性能变化和永磁材料稳定性两个方面分析了石英挠性加速度计标度因数重复性机理。在此基础上, 提出了从结构优化、新型材料研究、稳定化处理和加速试验四个方面提高石英挠性加速度计参数长期重复性的建议, 为开展高精度石英挠性加速度计的研制提供了支撑。

关键词: 石英挠性加速度计; 偏值; 标度因数; 长期重复性

中图分类号: U666. 1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095 - 8110 (2014) 01 - 0058 - 05

Research on Long - term Repeatability of Quartz Flexure Accelerometer Parameters

YU Xiang - tao, ZHANG Jing - hua, DU Zu - liang
(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: As one of the important inertial instruments, quartz flexure accelerometer is successfully used in measuring the state of motion of the vehicle. The precision and performance of inertial navigation system are directly affected by the repeatability of the quartz flexure accelerometer. The long - term repeatability mechanism of bias is researched from variation of the adhesive performance and welding stress. The long - term repeatability mechanism of scale factor is researched from variation of the adhesive performance and permanent magnetic materials stability. To improve the long - term repeatability of quartz flexure accelerometer, four aspects including the structure optimization, the development of new materials, stabilization treatment and accelerated tests are presented. The research and development method of high precision quartz flexure accelerometer is supported by the mentioned research.

Key words: Quartz flexure accelerometer; Bias; Scale factor; Long - term repeatability

0 引言

加速度计是最关键的惯性仪表之一, 与陀螺一起构成惯性技术的基础和核心内容, 其性能直接决定着惯性系统的精度^[1]。石英挠性加速度计(简称加速度计)作为惯性测量的重要仪表, 具有精度高、高长期重复性^[2], 适合微小加速度测量的优点^[3], 已在航天、航空、航海和石油等众多领域得到了广泛的应用^[4-6]。

加速度计设计技术涉及仪表、控制、机械、电子、材料等多个学科, 交叉学科广, 研究难度大。受温度、振动等环境载荷的影响以及加速度计内部组件材料的特性, 加速度计参数随时间会

发生非线性漂移, 长期重复性研究比较复杂, 国内外开展了大量的研究^[7-8], 目前, Honeywell 的 QA - 3000 加速度计代表石英挠性加速度计的最高技术水平, 其偏值和标度因数年重复性分别为 $40\mu\text{g}/80\text{ppm}$ (3σ), 国内加速度计的长期重复性与国外先进水平还存在一定差距, 为了保证惯导系统的使用性能, 系统需要不断的定期维护、标定工作, 系统的使用维护成本较高。

因此, 开展加速度计长期重复性技术研究具有重要的理论意义与工程价值, 本文以加速度计偏值和标度因数长期重复性为研究对象开展了研究, 以期为高精度石英挠性加速度计研制提供依据。

收稿日期: 2014 - 07 - 09; 修订日期: 2014 - 07 - 11。

基金项目: 国家安全重大基础项目 (61388010402)

作者简介: 于湘涛 (1979 -), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事惯性技术、故障诊断、复杂系统的建模与控制等方面的研究。E - mail: Yuxiangtao@163. com

1 偏值重复性机理研究

偏值是指没有加速度输入时加速度计的输出值。基于加速度计闭环推导出影响偏值的关键环节为干扰力矩、应力角和干扰电流三个环节，根据国内外资料调研以及生产工艺过程，确定出影响偏值长期重复性的关键因素为：胶粘剂性能变化、激光焊接应力释放、构件加工应力释放、组件装配应力变化等，本文对胶粘剂性能变化和激光焊接应力变化对偏值重复性的影响进行了研究。

1.1 胶粘剂性能变化对偏值重复性影响

摆组件由整体石英摆片和两个动圈组成，两个动圈对称连接在摆片中心盘两侧，敏感结构理论上只允许绕固定在传感器中的一个明确轴（即输入轴）有一个自由度。石英材料的热膨胀系数与骨架热膨胀系数相差约 50 倍，为了缓解温度载荷给异质材料带来的影响，动圈与摆片之间采用弹性胶连接。胶粘剂材料的分子链网络结构及其运动活性受内部影响因素（自身链结构和凝聚态结构）和外部影响因素（温度、应力和物理老化）的影响，会产生蠕变^[9]，蠕变是通过分子链段的逐渐伸展或相对滑移实现的，结果不仅会造成力学松弛，还会使得被粘接的构件发生相对位移，变形后不能回到原位，胶粘应力通过中心摆传递到挠性平桥，进而敏感结构产生偏转，使得偏值重复性发生变化。

影响加速度计胶粘材料蠕变性能的因素主要为温度和应力，开展了胶粘剂蠕变性能试验，蠕变量与时间的关系的试验结果如图 1 所示。

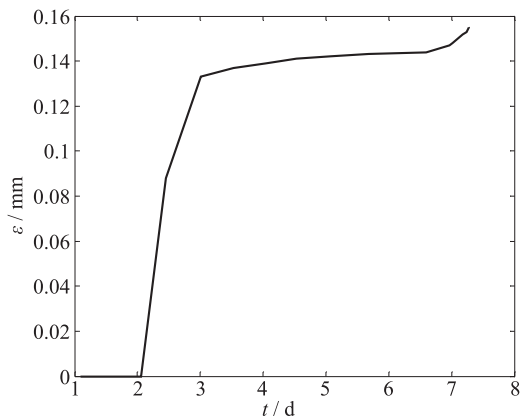


图 1 双组份胶粘剂蠕变特性示意图

Fig. 1 Creep characteristics of two-component adhesive

从图 1 可以看出胶粘剂的蠕变量随着时间延长而变大。此外，温度试验结果表明蠕变量随着温度升高而变大。

针对胶粘剂性能变化对敏感结构挠性平桥影响进行了仿真，边界条件固定约束凸台下端面，假设由于动圈的剪切力，使得当动圈沿着摆轴位移 $4\mu\text{m}$ ，摆组件平桥处应力如图 2 所示。

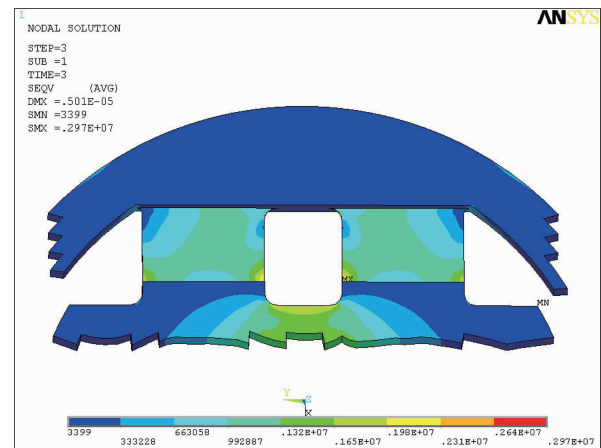


图 2 摆片挠性平桥应力云图

Fig. 2 The stress nephogram of flexures

从图 2 动力学仿真结果可知：动圈未移动时与移动 $4\mu\text{m}$ 时，会产生约 $70\mu\text{g}$ 偏值重复性的影响。

1.2 焊接应力变化对偏值重复性影响

激励环与预负载环是在预紧力作用下通过激光点焊装配的，激光焊接过程中，能量密度很高的激光束作用于工件上很窄的区域，使材料局部熔化、汽化，从而形成“小孔效应”^[10]，激光能量通过小孔效应实现焊缝的充分熔透。由于激光焊接温度高、梯度大，焊件受热不均匀，必然会产生焊接变形和残余应力，焊接应力随时间会发生释放，使得轴向预紧力发生变化、应力通过摆片外环传递到挠性平桥，进而敏感结构产生偏转，使得偏值长期重复性发生变化。

为了验证预紧力变化与偏值重复性之间的关系，进行了不同预紧力时的动力学仿真分析，在相同工况下，初始施加预紧力，由于应力释放使得预紧力降低 20N 时，摆组件挠性平桥应力云图如图 3 所示。

从图 3 动力学仿真结果可知：预紧力变化 20N 时，大约会产生 $100\mu\text{g}$ 偏值重复性变化。

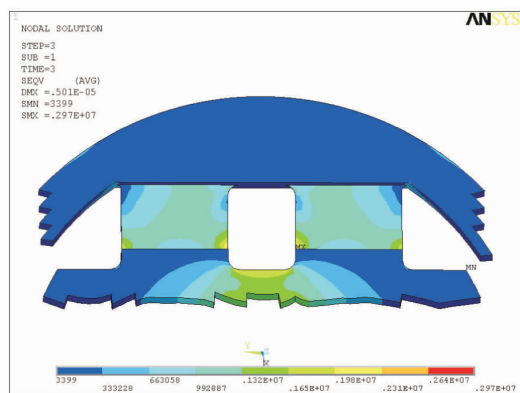


图3 摆片平桥应力云图

Fig. 3 The stress nephogram of flexures

2 标度因数重复性机理研究

标度因数是指单位重力加速度所对应电磁力矩电流的数值, 根据加速度计闭环静态输出模型, 可以得出标度因数的综合误差表达式为:

$$\frac{\Delta K_1}{K_1} = \frac{\Delta ml}{ml} - \frac{\Delta K_{lg}}{K_{lg}} \quad (1)$$

其中, K_1 为标度因数; m 为敏感组件的质量; l 为敏感组件的质心到摆片挠性枢轴的距离; K_{lg} 为力矩器系数。

根据式 (1) 得出: 标度因数的重复性由检测质量摆性的重复性和力矩器系数的重复性决定, 根据资料调研以及生产工艺过程研究, 确定出影响标度因数长期重复性的关键因素为: 永磁材料稳定性、胶粘剂的性能变化和敏感结构质量重复性等, 本文对永磁材料性能变化和胶粘剂性能变化对标度因数重复性的影响进行了研究。

2.1 永磁材料性能变化对标度因数重复性的影响

加速度计的力矩器采用永磁动圈式对顶结构, 两个磁路相互独立形成推挽结构。永磁材料的重复性直接影响着力矩器系数的重复性进而影响了加速度计标度因数的重复性, 许多科学家对磁性材料的稳定性机理进行了研究^[11], 如 Street R 和 Wooley J C 认为热能引起材料的微区发生不可逆旋转导致了磁性材料性能状态的改变, 对永磁材料的磁粘滞性开展了研究, 并建立了理论模型; Neel Louis 认为磁性材料的局部区域存在热扰动、机械振动、外磁场和地球磁场等产生的磁场影响了磁性材料的磁状态, 这些磁场随着时间会发生变化, 使磁体内部状态不断调整达到新的平衡。

为了研究磁性材料在温度载荷下的变化趋势, 开展了不同温度点下永磁材料磁性能测试试验, 测试结果如图 4 所示。

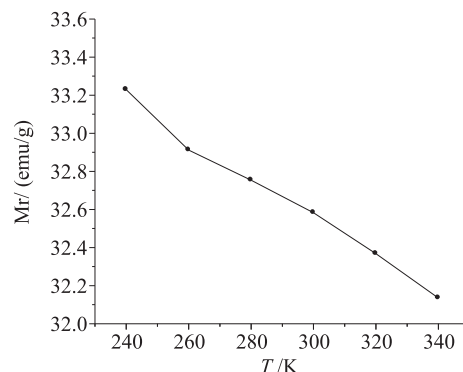


图4 磁钢剩余磁化强度随着温度变化趋势

Fig. 4 Magnetic remanent magnetization at temperature varied

从图 4 试验结果可以看出: 永磁材料的剩余磁化强度随着温度的升高发生降低。

为了研究永磁材料退磁与标度因数重复性之间的关系, 进行了精密磁路仿真, 磁路仿真矢量图如图 5 所示。

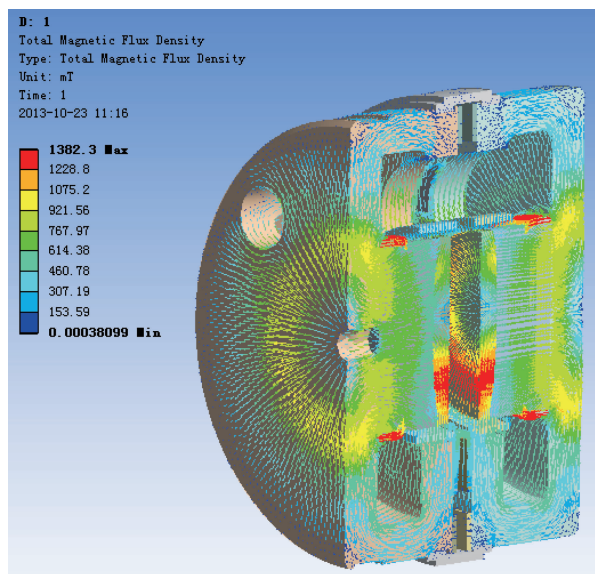


图5 精密磁路仿真的矢量图

Fig. 5 Vector diagram of magnetic circuit simulation

从图 5 磁路仿真结果可知: 加速度计力矩器磁钢的矫顽力和磁通密度同时减少 1% 时, 标度因数增大约为 0.8%。

2.2 胶粘剂性能变化对标度因数重复性的影响

加速度计磁路中, 磁钢与激励环、磁钢与磁

极片、动圈与摆片等多处采用胶粘剂连接,胶粘剂的重复性变化会使得敏感质量的质心和电磁力的力心变化,从而使得加速度计标度因数长期重复性发生变化。

(1) 动圈重复性对质心重复性的影响

假设由于动圈的剪切力,使得当动圈沿着摆轴移动时,敏感组件质心分布如图6所示。

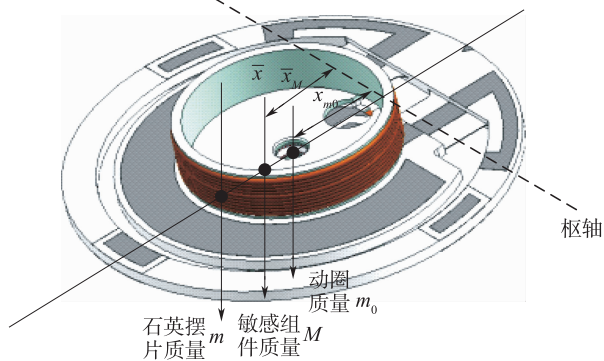


图6 摆组件质心分布图

Fig. 6 The pendulum construction center of mass distributions

根据转矩平衡,可以求得动圈移动时敏感组件质心变化为:

$$\Delta \bar{x}_M = \frac{m_0 \bar{x}_{m_01}}{M} \quad (2)$$

其中, m_0 为动圈质量; M 为敏感结构的质量; \bar{x}_{m_01} 为动圈沿着摆轴移动的位移。

假设标度因数的重复性仅由质心变化引起的,则标度因数变化为:

$$\frac{\Delta K_1}{K_1} = \frac{m_0 \bar{x}_{动}}{Ml} \quad (3)$$

计算结果表明当动圈沿着摆轴移动 $1\mu\text{m}$ 会导致约 7.5×10^{-5} 标度因数的变化。

(2) 动圈重复性对力心重复性的影响

由于连接敏感组件动圈与石英摆片的胶粘剂尺寸重复性发生变化,使得线圈所处磁通密度发生变化,最终感应电磁力的力心重复性发生变化,直接影响了标度因数重复性。

为了便于磁路仿真,假设:加速度计承受 40g 负载,进行了两动圈沿摆轴同向移动时电磁力仿真,仿真结果如图7所示。

图7有限元仿真结果表明:两个动圈同时沿摆

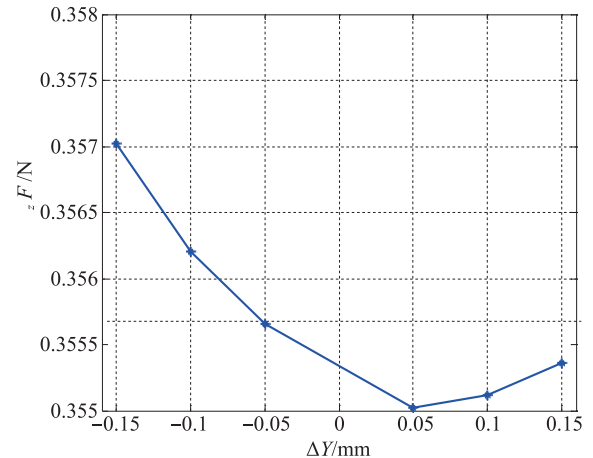


图7 电磁力变化曲线

Fig. 7 The variation curve of electromagnetic force

轴向移动 $5\mu\text{m}$ 时,标度因数重复性变化约 2×10^{-5} 。

3 提高参数重复性方法探讨

根据加速度计参数变化机理和生产过程中的经验,凝练了提高加速度计参数长期重复性的主要方法。

(1) 开展结构优化设计

通过开展结构-热耦合仿真分析,分析摆片成型过程的每道工序加工应力、热应力积累,以最低应力积累量为优化目标进行高稳定性敏感结构优化理论方法研究,形成提高偏值重复性的结构设计理论方法;以加速度计磁路单参量与耦合参量作为可调输入,以量化的标度因数变化误差作为控制结果输出,探索实现最低标度因数变化误差的加速度计优化参数设置,形成提高标度因数重复性的结构设计理论方法。

(2) 进行新型材料研制

在保证满足加速度计所用胶粘剂力学性能指标、热膨胀性能、热导率等参数的基础上,研制出高稳定性胶粘剂材料;研究高致密度高稳定性稀土永磁材料,在保证具有较高的磁性能指标下,永磁材料具有时间稳定性、温度稳定性、力学环境作用下的稳定性等性能;研制高稳定性熔融石英材料等。

(3) 开展稳定化处理方法研究

加速度计研制需经历摆片特种加工、激励环等构件机加、摆组件装配、力矩器装配、表芯装配和整表装配等生产过程,针对加工过程的残余应力和装配过程产生的装配应力,需开展整表和零部件加速稳定试验研究,形成提高偏值和标度因数重复性的加速稳定工艺方法。

(4) 进行加速试验研究

针对石英挠性加速度计长期重复性测试验证周期长的问题,需开展加速度计加速验证试验研究,实现性能的快速验证。研究加速退化试验中高应力水平和正常应力水平下退化机理保持一致的问题;研究加速试验方案设计,获取加速度计参数加速因子;建立综合加速度计性能参数漂移模型与加速变化机理模型的整体参数估计与稳定期评价方法,形成一套加速度计参数长期重复性快速验证的方法。

4 结论

本文针对影响加速度计偏值和标度因数长期重复性的机理进行了研究,在此基础上,给出了提高加速度计参数重复性的改进建议,主要结论如下:

- 1) 胶粘剂性能变化和预负载焊接应力变化等因素是影响偏值重复性的关键因素;
- 2) 胶粘剂性能变化和永磁材料稳定性等因素是影响标度因数重复性的关键因素;
- 3) 从结构优化、新型材料研究、稳定化处理和加速验证试验四个方面,开展提高偏值和标度因数长期重复性研究具有重要意义。

参考文献

- [1] 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 Xiang-tao, ZHANG Lan, GUO Lin-rui, 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.]
- [2] 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.
- [3] 于湘涛,董卫华,张兰等.基于灰色最小二乘支持向量机的加速度计参数预测[J].中国惯性技术学报,2013,21(6):813-816.[YU Xiang-tao, DONG Wei-hua, ZHANG Lan, et al. Prediction of accelerometer parameters based on grey least squares support vector machine [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2013, 21(6): 813-816.]
- [4] Lobanov V S, Tarsenko N V, Shulga D N et al. Fiber-optic gyros and quartz accelerometers for motion control [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2007, 4: 23-29.
- [5] Monajemi P, Ayazi F. Design optimization and implementation of a microgravity capacitive HARPS accelerometers [J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(1): 39-46.
- [6] 宗红,王淑一,韩冬,等.嫦娥一号卫星的地月转移变轨控制[J].空间控制技术与应用,2008,34(1):44-50.[ZONG Hong, WANG Shu-yi, HAN Dong, et al. Orbit maneuver control during cislunar-transfer phase for CE-1 spacecraft [J]. Aerospace Control and Application, 2008, 34(1): 44-50.]
- [7] Foote S A, Grindeland D B. Model QA3000 Q-Flex accelerometer high performance test results [C]. IEEE PLANS 1992: 534-543.
- [8] Peters R B, Stoddard D R, Meredith K. Development of a 125 g quartz flexure accelerometer for the RIMU program [C]. IEEE PLANS 1998: 17-24.
- [9] 张树宝,陈旭,高丽兰.各向异性导电胶蠕变-恢复力学行为研究[J].机械强度,2009,31(6):910-913.[ZHANG Shu-Bao, CHEN Xu, GAO Li-Lan. Experimental study of creep-recovery mechanical behavior of anisotropic conductive adhesives [J]. Journal of Mechanical Strength, 2009, 31(6): 910-913.]
- [10] 金湘中,李力钧.激光深熔焊接过程中小孔效应的试验研究[J].应用激光,1999,19(15):293-295.[JIN Xiang-zhong, LI Li-jun. An experimental study on keyhole effect in deep penetration laser welding [J]. Applied Laser, 1999, 19(15): 293-295.]
- [11] 刘国征,夏宁,赵明静等.永磁材料长期稳定性研究进展[J].稀土,2010,31(2):40-44.[LIU Guo-zheng, XIA Ning, ZHAO Ming-jing, et al. Development of the long-term stability of permanent magnetic materials [J]. Chinese Rare Earths, 2010, 31(2): 40-44.]