

石英加速度计失准角超差分析及解决方案^①

张 阳*, 党建军, 冯东棉, 李军朔

(中国航天科技集团第十六研究所, 西安 710100)

摘 要:针对石英挠性加速度计输入轴失准角容易超差的问题,提出了一种新型加速度计失准角调平系统。首先,通过分析加速度计调平原理,从材料、结构等方面对失准角超差的原因进行了研究;然后,通过有限元仿真分析及环境试验验证,定位了失准角超差的主要原因。研究表明:失准角调平时,由于调平带来了表芯与表壳之间的调平应力,环境试验加速了表壳屈服,造成表芯空间位置发生变化,进而造成失准角超差。针对失准角超差的原因,颠覆性设计了一种非限制自由度的加速度计输出轴失准角调平系统,调平系统在满足微小装配间隙的情况下,表芯可以随着表芯进行随动,避免了挠性吊装螺杆因为变形而带来的应力。该系统可以进行任意方向的失准角调平,从根本上避免了输入轴失准角的超差问题。这种新型调平系统可以将加速度计失准角控制在极小范围内,而且表芯和表壳之间不存在任何调平应力。试验数据表明:新型调平系统可以使失准角趋近于零,且长期稳定性优于5"。

关键词:石英加速度计;失准角;新型调平系统

中图分类号:U666.1

文献标识码:A

文章编号:1674-7135(2019)05-0045-05

D O I:10.3969/j.issn.1674-7135.2019.05.008

Analysis and Solution on Dissatisfied Misalignment Angle of Quartz Accelerometer

ZHANG Yang*, DANG Jianjun, FENG Dongmian, LI Junshuo

(The 16th Research Institute, China Aerospace Science and Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: Aiming at the problem of dissatisfied misalignment angle of quartz accelerometer, a original leveling system is proposed. First, analysis the mechanism that make the level misalignment become unqualified, according to mechanism of level misalignment angle, then, the multiple solution is located by FEA and environment testing. The study show that transformation of shell structure leading level misalignment to over-proof field after environment testing. In allusion to the main reasons, an original leveling system is designed used to level any universal misalignment angle, which can avoid the problem from principle. With the help of the leveling system, misalignment angle not only can be get command of a minimum rang, but also there is no any stress between shell and core structure. Experiment data show that misalignment angle approach zero and its long-term stability is better than five second.

Key words: Quartz; Accelerometer; Misalignment angle; Original leveling system

0 引言

加速度计是利用牛顿第二定律(惯性定律)测量加速度的惯性导航器件,被广泛应用于导弹、潜艇、飞船等武器系统,是武器导航系统的核心部件之

一^[1,2]。影响失准角的主要因素为加速度计内部敏感部件(石英摆片),相对于加速度计外壳的几何安装面的平行程度。失准角越小,稳定性越高,加速度计获取的外界加速度就越准确,导航精度越高^[3]。

① 收稿日期:2019-04-24;修回日期:2019-06-27。

基金项目:国家自然科学基金(61075030)。

作者简介:张阳(1989—),男,工程师,主要从事惯性器件结构设计相关工作。E-mail:18292466134@163.com

但是目前国内失准角由于调平工艺的限制,一直存在失准角较大,且稳定性差的问题。

1 失准角的调平原理

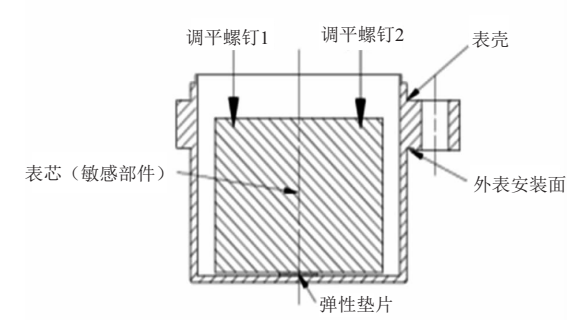


图 1 失准角调平系统的结构示意图
Fig.1 Structure Diagram of the Leveling System

加速度计输入轴失准角(以下简称失准角)为加速度计输入轴相对于输出基准轴的对准误差角。目前加速度计失准角的调平原理如图 1 所示,在表壳底部放置小片弹性垫片(玻璃布板),表芯(敏感部件)通过弹性垫片放置在表壳底部之上。通过调节三个均匀分布的调平螺钉,观察敏感部件处于 0 g 状态下的输出,通过输出来调节表芯相对于表壳安装面的空间位置(类似跳跳板原理)。当表芯与表

壳之间的空间相对位置满足指标后,可认为失准角小于技术指标,然后在表芯与表壳之间涂胶,烘干固化,最后移除三个调平螺钉。至此,加速度计失准角调平过程完成。

2 失准角超差机理分析

如图 2 的结构示意图,加速度计失准角超差,一定是摆片相对安装面的空间位置发生了变化,即就是两者平行度变差^[4],如表 1 所示。分析失准角超差的原因有如下两点;

- a. 表芯相对于表壳的空间位置(间接因素);
- b. 摆片相对于表壳的空间位置(直接因素)。

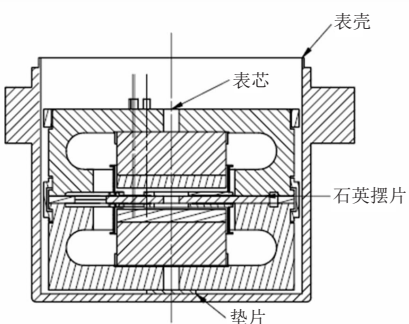


图 2 失准角结构示意图
Fig.2 Structure Diagram of the Misalignment Angle

表 1 失准角超差原因分析
Tab.1 Analysis on Dissatisfied Misalignment Angle

误差角变化的 直接原因	原理	原因分析
表芯位置相对表壳 发生变化	调平用力过大,表芯通过玻璃布板对顶表壳底部,温循加剧外壳蠕变;	石英加速度计表壳与表芯之间的间隙极小,在调平过程中,若调平螺钉只进不退,可能造成表芯、玻璃布板、表壳底部,三者之间形成斥力,等于认为给表壳施加预斥力,在高低温循环后,会造成金属材料蠕变加速屈服。严重时,表壳底部会明显凸起。
	高低温使得表壳应力释放,而微观变形;	表壳在齐套之时,已经做过高低温循环处理。循环带来影响排除。
	高低温循环后环氧胶发生膨胀,使得表芯空间位置变化 ^[4-6]	涂胶固化时,胶量因人而异,如若表壳和表芯之间涂胶量过大,高低温后环氧胶膨胀会造成表芯相对与表壳径向位移。但是吊表封胶后烘干,失准角未有明显变化。所以环氧胶膨胀对失准角超差的影响较小。
摆片位置相对表壳 发生变化	应力释放,摆片位置发生变化	表芯吊装之前,已经进行了大量的温循、低温储存以及高温贮存试验,所以应力释放完全,此原因排除。

3 失准角超差试验验证

3.1 失准角计算分析

加速度计门态测试各个基准轴加速度计的输入

与分度头转角 θ 的关系为^[7]:

$$\begin{cases} a_i = g \sin \theta \\ a_p = g \sin \theta \\ a_o = 0 \end{cases} \quad (1)$$

加速度计摆态测试各个基准轴加速度计的输入与分度头转角 θ 的关系为:

$$\begin{cases} a_i = g \sin \theta \\ a_o = -g \sin \theta \\ a_p = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, a_i 、 a_p 、 a_o 分别为沿 IP、PA 和 OA 轴作用的加速度, 单位为 g。

为了更加准确的获得加速度计静态测试结果, 采用傅里叶分析法进行数据处理。失准角的测试主要为重力场四位置翻滚测试法, 利用四位置进行静态翻滚试验时, 分度头转角取 $\theta_4 = 90^\circ$, 带入上述公式可按照谐波分析法傅里叶展开得^[8]:

$$E_k = A_o + A_1 \sin k\theta_4 + A_2 \sin 2k\theta_4 + A_3 \sin 3k\theta_4 + B_1 \cos k\theta_4 + B_2 \cos 2k\theta_4 \quad (3)$$

E_k 为分度头转角 $\theta = k\theta_3$ 时加速度计的输出期望值, 单位为 g。其中分度台转角 $\theta_3 = 90^\circ$, $0 \leq k \leq 3$, 各个傅里叶系数为:

$$\begin{cases} A_0 = \frac{1}{4} \sum_{k=0}^3 E_k \\ A_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^3 E_k \sin k\theta_4 \\ A_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^3 E_k \sin 2k\theta_4 \\ A_3 = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^3 E_k \sin 3k\theta_4 \\ B_1 = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^3 E_k \cos k\theta_4 \\ B_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^3 E_k \cos 2k\theta_4 \end{cases} \quad (4)$$

进而得到摆态测试的模型各个参数的最佳估值为:

$$\begin{cases} K_1 = A_1 + 3A_3 \\ K_0 = (A_1 + B_2)/K_1 \\ K_2 = -2B_2/K_1 \\ K_3 = -4A_3/K_1 \\ K_{io} = -2A_2/K_1 \\ \delta_o = -B_1/K_1 \end{cases} \quad (5)$$

进而得到门态测试的模型各个参数的最佳估值为:

$$\begin{cases} K_1 = A_1 + 3A_3 \\ K_0 = (A_1 + B_2)/K_1 \\ K_2 = -2B_2/K_1 \\ K_3 = -4A_3/K_1 \\ K_{io} = -2A_2/K_1 \\ \delta_p = -B_1/K_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中, K_0 为加速度计偏值, 单位为 g、v 以及 m/s^2 等; K_1 加速度计标度因数, 单位为 v/g、mA/g 等; K_2 加速度计二阶非线性系数, 单位为 g/g^2 ; K_3 加速度计三阶非线性系数, 单位为 g/g^3 ; K_{io} 加速度计输入轴与输出轴交叉耦合系数, 单位为 g/g^2 ; K_{ip} 加速度计输入轴与摆轴交叉耦合系数, 单位为 g/g^2 ; δ_o 为摆态输入轴失准角, 单位为弧度 (rad); δ_p 为门态输入轴失准角, 单位为弧度 (rad); E_0 、 E_{90} 、 E_{180} 、 E_{270} 分别为分度头处于 0° 、 90° 、 180° 、 270° 时加速度计的输出。

3.2 失准角超差试验验证

加速度计失准角在表头阶段调平完成之后, 灌胶密封。最后进行温循、高低温储存、振动以及冲击相关的一系列环境力学试验, 最后测试部分加速度计失准角超差。为了分析原因, 对某型号表头状态下的 20 只加速度计, 失准角调平完成之后进行 3 次高低温稳定处理, 利用公式 (5) 和公式 (6) 进行门态失准角和摆态失准角计算。结果表明, 经过高低温循环之后, 7 块加速度计失准角超差。具体超差情况如表 2 所示。

由表 2 所示, 7 块加速度计经过 3 次温循之后, 门态与摆态状态下的失准角明显增大而超差, 特别是 1[#]、2[#]、4[#] 加速度计严重超差, 可见温循加速了失准角超差的进程。

4 失准角超差定位

为了分析表芯调平之后, 表芯和表壳之间的应力情况, 采用表头状态进行有限元仿真分析, 建立如图 3 所示的有限元分析模型, 经过之前的测力系统估计, 在调平完成之后, 通过调平螺钉施加在表芯上端面之间的压力大概为 15 N ~ 30 N 之间。

表 2 温循后加速度计失准角超差情况

Tab.2 Data of Dissatisfied Misalignment Angle after Temperature Cycle

表号	试验	门 0/mv	摆 0/ mv	门 180/mv	摆 180/mv	门态失准角/°	摆态失准角/°
1 [#]	温循前	-0.49	-0.29	-0.36	-0.51	-26.8	45.4
	温循后	-0.10	-1.15	-0.92	0.04	169.1	-245.4
2 [#]	温循前	1.11	1.28	1.35	1.21	-49.5	14.4
	温循后	0.80	0.89	1.48	1.30	-140.2	-84.5
3 [#]	温循前	-1.60	-1.52	-1.54	-1.63	-12.4	22.8
	温循后	0.35	-0.12	-0.14	0.21	101.4	-68.3
4 [#]	温循前	-1.32	-1.22	-1.18	-1.33	-29.0	22.8
	温循后	-1.92	-1.43	-1.15	-1.59	-159.5	33.1
5 [#]	温循前	0.25	0.09	0.04	0.14	43.2	-10.3
	温循后	-0.49	-0.25	-0.12	-0.38	-76.1	26.7
6 [#]	温循前	-0.14	-0.15	-0.19	-0.19	10.0	8.0
	温循后	-1.38	-1.46	-1.87	-1.73	98.2	54.1
7 [#]	温循前	-0.63	-0.69	-0.63	-0.64	10.0	-10.1
	温循后	-0.43	-0.23	-0.57	-0.79	28.2	112.9

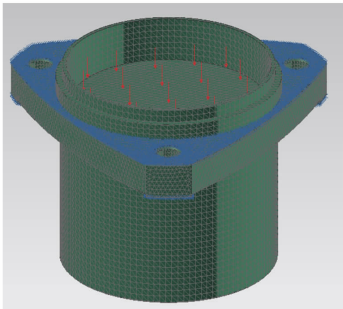


图 3 表头结构示意图

Fig.3 Structure Diagram of Quartz Accelerometer

有限元仿真计算如图 4 所示,当调平完成之后,表壳底部的位移最大,大概为 0.04 mm。由于表壳材料的屈服,造成表芯相对于表壳安装面的空间位置发生了变化,造成加速度计输入轴失准角发生变化。只是高低温循环加速了表壳本体的蠕变。

根据前面分析,考虑高低温循环后,表壳可能发生蠕变。对现场的 20 块加速度计底部变形情况观察,重点对超差的 7 块加速度计底部进行“观察”与“触摸”,情况如下;

1)7 块失准角超差加速度计底部均有不同程度的凸起,特别是 1[#]与 4[#]最为严重,手指能感觉到明显的凸起;

2)其他 13 块加速度计未有凸起现在,底部平

整度较好。

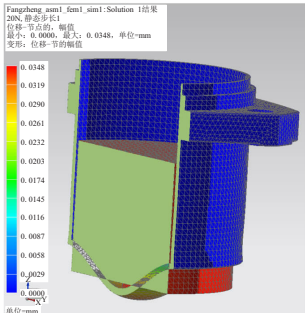


图 4 表头有限元分析位移云图

Fig.4 Displacement Nephogram of Quartz Accelerometer Based on FEA

5 失准角超差解决措施

5.1 调平方法提升

通过对失准角超差加速度计的统计,发现失准角超差的加速度计,因人而异比较基本集中,没有随机性与离散性。所以失准角超差受操作人员吊装具体习惯影响较大,具体表现为调平方式不科学,比如螺钉只进不退,造成表壳底部预斥力过大。

目前的失准角调平方法,由于表芯与表壳之间存在弹性垫片,失准角理论上几乎不可能调节为零,只能无限逼近^[8-9],而且调平效率低下,对装配人员

的技能水平要求极高。其次,表芯与表壳之间,通过弹性垫片的过渡而存在相互斥力,环境试验后,这种相互斥力容易造成表壳底部蠕变而变形,严重时表壳底部凸起;另一方面,相互斥力容易造成表芯空间位置随时间推移发生变化,进而造成失准角长期稳定性较差^[9]。

5.2 新型调平原理

目前加速度计失准角采用的调平方式,由于表壳与表芯之间存在对抗斥力,容易造成外壳底“凸出”变形以及较差的失准角稳定性。采用表芯“悬空”的无限自由度吊装工装,为了消除挠性接头带来的吊装问题,采用如图5所示吊装方式,此种方式采用吊杆非限制性接触,仅仅限制吊装螺杆竖直方向的位移,非限制接触支撑保证了表芯在调平的过程方位的任意性,只要接触摩擦系数足够小,可以认为吊装螺杆在调平过程中不会产生挠曲,不会有弹性恢复力产生,更方便吊装螺杆后期拆卸。

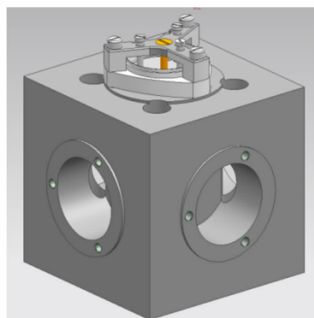


图5 新型调平系统三维结构图

Fig.5 Structure Diagram of the Original Leveling System

采用悬空万向调平系统进行失准角调平,有如下优点:

a. 只要接触摩擦系数足够下,调平工装可随表芯一起转动,不会产生弹性恢复力,进而从根本上消除了失准角稳定性影响因素;

b. 采用悬空的吊装方式,消除了表芯与表壳之间的对抗斥力,从而避免的表壳变形的隐患;

c. 非限制接触不会发生挠性变形,方便后期拆卸吊装螺杆;

d. 对于非限制接触的润滑,可采用固体润滑脂,或者简易铅粉润滑的方式,从而减小摩擦系数,润滑方式简单易行。

6 结论

失准角超差是生产实际中经常面临的问题^[10],通过机理分析与试验定位了失准角超差的原因。传统工艺的不可避免的调平应力是造成失准角稳定性容易超差的根本原因,而新型失准角调平系统通过创新型的结构设计,从根本上避免此类问题的发生,可以使敏感部件处于自然姿态而不会引入任何应力,从而提升石英加速度计失准角的稳定性,最终提高武器型号的打击精度^[11]。

参考文献:

- [1] 陆元九. 惯性器件[M]. 北京:宇航出版社,2009:20-36.
- [2] 杨立溪. 惯性技术手册[M]. 北京:宇航出版社,2013. 55-70.
- [3] Foote S A, Grindeland D B. Model QA3000 Q-FLEX Accelerometer High Performance Test Results[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2015, 7(6):59-67.
- [4] 殷正和. 新近研制的石英挠性加速度计[J]. 惯导与仪表,1994,11(1):36-41.
- [5] 朱红生,王巍. 大量程石英挠性加速度计结构设计与研究[J]. 导航与控制,2005,4(2):40-46.
- [6] 李安. 石英挠性加速度计关键技术研究[D]. [硕士学位论文]. 杭州电子科技大学,2011.
- [7] Peters R, Stoddard D, Meredith K. Development of a 125g quartz flexure accelerometer for the RIMU program [A]. Position Location and Navigation Symposium, IEEE 1998[A]. Palm Springs, CA, USA: IEEE Piscataway NJ United States,1998.
- [8] 孙霖,郭嵩,王磊等. 高精度石英挠性加速度计测量装置的结构设计与研究[J]. 舰船科学技术,2017,39(9):191-193.
- [9] HU Kun, DING Feng-lei. Simulated research of submarine ballistic missile launching movement modeling and manoeuvre controll [J]. Ship Science and Technology, 2013,35(7):109-114.
- [10] 许永飞,张士峰. 惯导平台自标定中安装误差可观性分析[J]. 中国惯性技术学报,2015,23(4):575-579.
- [11] Lobanov V S, Tarsenko N V, Shulga D N et al. Fiber-optic gyros and quartz accelerometers for motion control [J]. IEEE Sensors Journal,2006,6(1):39-46.