

doi: 10.7690/bgzdh.2020.10.011

高精度倾角传感器工艺改进设计及验证

黄川红, 高跃民, 李 杨

(中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为解决基于石英材料研制的电容型倾角传感器生产过程中部分产品在振动情况下, 出现明显的零位偏移现象, 从而造成产品不合格的问题, 对其工艺进行改进设计。分析传感器原理, 建立故障树模型, 确定产生倾角传感器零位偏移的原因, 定位使敏感组件的相对位置在振动条件下出现位移的工艺流程环节, 重新设计装配夹具, 引入数字化压力监测系统, 优化和完善装配工艺流程。生产及实验结果表明: 该设计能消除零位偏移现象, 故障定位准确, 工艺改进设计合理。

关键词: 倾角传感器; 零位偏移; 工艺设计; 压力传感器; 振动筛选

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A

Process Improvement Design and Verification of High Precision Angle Sensor

Huang Chuanhong, Gao Yuemin, Li Yang

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The angle-sensor is a capacitive sensor based on quartz material. In the production process, some products appear obvious zero offset phenomenon under vibration condition. It causes the product to be unqualified, therefore carries out the improvement design to its process. By analyzing the working principle of the sensor, the fault tree model was established, and the cause of zero offset of angle-sensor was determined. The displacement of the sensitive component inside the sensor occurs after vibration, which results in the change of the detection capacitance and leads to the deviation of the zero position output of the sensor. The product assembly fixture has been redesigned, the digital pressure monitoring system has been introduced, and the assembly process has been optimized. After sensor production and test verification, the zero offset fault of the product disappeared, verified that the fault location is accurate, the new process improvement design is reasonable.

Keywords: angle-sensor; zero offset; process design; pressure sensor; vibration screening

0 引言

基于石英材料研制的电容型倾角传感器精度和稳定性高, 重复精度可达到 0.01%, 分辨率优于 0.01°, 在军用、民用领域被广泛应用, 如机器人、车辆控制、船舶运输、航空测量、平台测试、农业机械和建筑机械等方面^[1-2]。目前, 该类倾角传感器在多个高精度测控项目中都得到了较好应用, 其适用环境越来越复杂, 对稳定性和环境适应性提出更为严苛的要求。针对用户的使用要求及应用环境, 对生产的倾角传感器增加了振动条件(PSD0=0.04 g²/Hz)下的筛选, 发现有部分产品出现了明显的零位偏移, 达到 10⁻⁴ 的量级, 影响倾角传感器性能, 导致产品的合格率下降, 成本上升。笔者基于电容式倾角传感器的结构功能特性, 定位故障原因, 对传感器原有装配工艺进行改进和优化设计, 并设计了可实时监测的装配工艺流程, 从而实现了传感器输出高精度、高稳定性与抗过载特性的动态平衡。

1 工作原理及问题分析

1.1 石英倾角传感器组成及工作原理

石英倾角传感器主要由敏感结构和伺服控制电路 2 部分组成^[1], 包括上轭铁组件、下轭铁组件、磁钢组件(构成磁路)、敏感组件(有挠性支承的石英摆片和骨架绕组)、伺服电路板组件和连接电缆组成, 其结构组成如图 1。工作原理如图 2 所示。

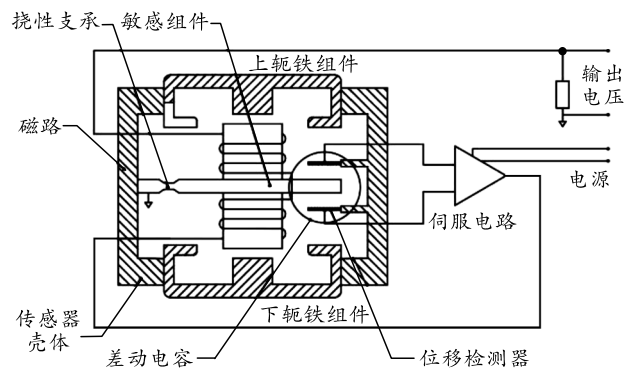


图 1 石英倾角传感器结构

收稿日期: 2020-05-15; 修回日期: 2020-06-09

作者简介: 黄川红(1973—), 女, 河南人, 本科, 中级技师, 从事高精度倾角传感器装配及调试工艺技术研究。E-mail: 3220618131@qq.com。

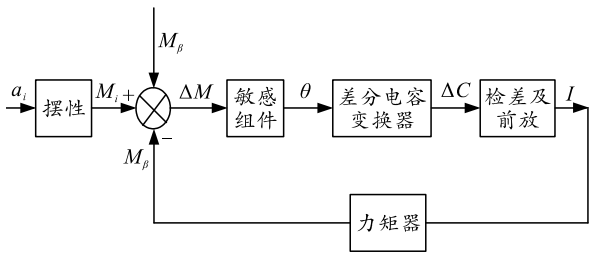


图 2 石英倾角传感器工作原理

当外界重力加速度 a_i 作用时，石英倾角传感器的敏感组件(由石英挠性摆片和力矩线圈所构成)产生惯性力矩 M_i ，惯性力矩 M_i 与反馈电磁力矩 M_β 之差 ΔM 使敏感组件产生角位移 θ 。通过差分电容变换器，产生电容差 ΔC ，差分检测电路检测电容差并转换成电信号再放大，通过校补电路输出电流 I ，经过力矩器产生反馈电磁力矩 M_β ，此电磁力矩与惯性力矩 M_i 相平衡，构成了闭环伺服回路。当电磁力矩与摆的惯性力矩相平衡时，输出电流 I 与输入的加速度大小成比例，即可通过在输出后端加入采样电阻，将加速度转换为电压输出。该输出电压与石英倾角传感器的角度位置成三角函数对应关系，计算变换后，可得到对应的倾角角度^[3-5]。其中，差动电容检测器输出流 I 与电容 C_1 和 C_2 的电容差 ΔC 成正比，与加在电容器极板两端电压的变化率 du/dt 成正比，参见下式：

$$I = (C_1 - C_2) \frac{du}{dt} = \Delta C \frac{du}{dt} \quad (1)$$

1.2 问题分析

倾角传感器经过振动筛选后部分产品表现出零位偏移现象，故障现象稳定，可以重复再现，笔者根据传感器的工作原理建立故障树，对故障现象进行分析，定位故障原因。如图 3 所示，通过故障树分析，可以得到引起零位偏移的 5 个底事件。参照产品故障树分析结果，开展了原理分析、仿真测试、问题复现等一系列验证实验，排除了其他事件引发零位偏移的可能，问题定位在事件 2 上。分析结果为：表芯敏感组件有一定质量 m ，在振动过程中，会因振动加速度 a 产生偏离中心位置的作用力 F ，如式(2)所示，当这个作用力大于表芯敏感组件与上下轭铁之间的摩擦阻力 F' ，则会产生一定的微位移，导致传感器敏感检测差动电容发生改变，即电容差 ΔC 发生变化，并在振动消失后无法复原，从而引起倾角传感器输出电流 I 发生变化，如式(1)所示，产生零位输出偏移。

$$F = ma > F' \quad (2)$$

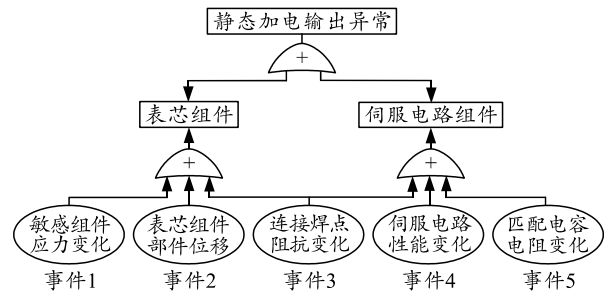


图 3 倾角传感器问题分析故障树

摩擦阻力的大小与敏感组件及上下轭铁之间的压力大小成正比，即与表芯组件装配时施加的装配预紧力成正比^[6-8]，可以判断出现零位偏移的倾角传感器装配预紧力未达到设计要求；因此，应对原有的表芯组件装配工艺流程进行分析并改进设计。

2 工艺现状分析

表芯组件的上下轭铁组件为磁性材料制成，经过充磁后，上下轭铁组件的磁性相向，按图 4 所示进行装配时，有约 1.5 kg 的斥力通过 V 形铁。如图 5 所示，在夹具上对中装配，将上轭铁组件、敏感组件、下轭铁组件和密封圈装配在一起，通过装配夹具在上下轭铁组件上施加一定的预紧力进行胶接，待胶固化后，通过激光焊接密封圈的 8 个点，固化结构状态。

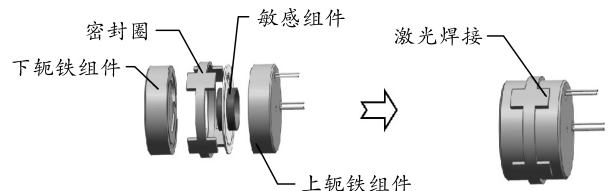


图 4 上下轭铁、敏感组件和密封圈配合

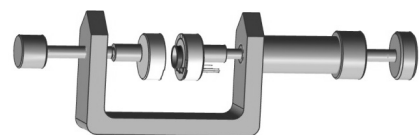


图 5 倾角传感器表芯组件装配

其原装配工艺流程如图 6 所示。



图 6 表芯组件原装配工艺流程

通过分析发现，原工艺方法存在问题：

- 1) 如图 5 所示，上下轭铁组件与敏感组件进行配合时，需施加一定的预紧力，原工艺是通过转动装配夹具上的旋杆完成，主要依靠装配人员的经验，施加的预紧力分散性大，预紧力范围不易控制；
- 2) 在完成胶接后进行高温固化，进行激光焊接

时,需先卸掉装配夹具,由于上下轭铁仅通过特种胶连接,尽管胶已完全固化,但轭铁之间有较强的斥力存在,易造成胶的蠕变,使施加的预紧力减弱,存在低于工艺设计要求的风险;

3) 在激光焊接过程中,预紧力状态是否发生变化没有监测,激光焊接后预紧力是否达到设计要求也无法检测。

3 工艺改进设计

针对原有工艺设计所暴露出的问题,主要从 2 方面进行改进设计:

1) 如图 7 所示,改进了装配夹具,采用微压力传感器测量技术,将微压力传感器嵌入装配夹具中,可实时监测装配表芯组件过程中施加的预紧力。同时,实现了预紧力的定量加载及数字化测量与监测,避免了因人为偏差造成的装配不确定性。

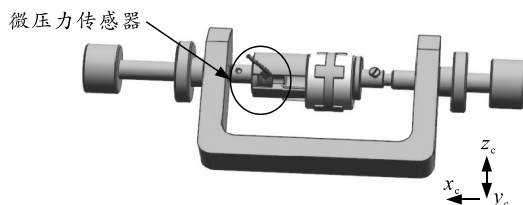


图 7 改进的装配夹具

2) 优化了表芯组件的工艺流程,如图 8 所示,虚线标出部分为主要改进环节。在新装配工艺流程中,增加了预紧力的监测点,同时在进行高温固化过程中,不卸夹具,对预紧力进行全过程实时监测与修正。在完成激光焊接后再将夹具卸掉,在夹具卸掉前,始终对预紧力进行过程监测,从而保证表芯组件在装配过程中预紧力状态一致。

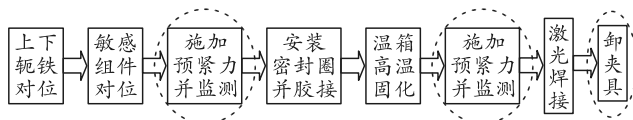
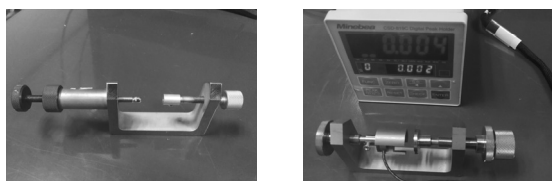


图 8 表芯组件优化后装配工艺流程

4 验证结果及分析

根据以上分析及工艺设计,完成最终夹具设计图样,生产了改进后的传感器装配夹具如图 9 所示,并采用新夹具按新工艺流程进行相关实验。



(a) 原装配夹具 (b) 新装配夹具

图 9 原装配夹具与新夹具实物对比

通过表芯装配新工艺流程及新夹具在产品生产中的应用,验证了装配、焊接过程的可操作性、适用性和实际操作效率。通过对比分析可知:该夹具能有效控制装配过程中装配、焊接的预紧力并保证一致性,减少装配、粘接和焊接过程因预紧力变化对表芯组件的影响。焊接后表芯合格率和参数稳定性得到提高。利用新装配夹具进行了 2 个批次 24 只倾角传感器的生产及装调,按相同的振动条件进行了振动筛选测试。实验结果表明:通过采用新工艺流程及新夹具,可有效消除倾角传感器的零位偏移现象。工艺设计改进前后的实验结果如表 1 所示。

表 1 原工艺和新工艺流程的振动筛选测试结果

工艺	数量/ 只	零位偏移量		稳定性 ($<4 \times 10^{-5}$)	线性度 ($<4 \times 10^{-5}$)
		$\geq 4 \times 10^{-5}$	$< 4 \times 10^{-5}$		
原工艺流程	17	4	13	√	√
新流程第 1 批	14	0	14	√	√
新流程第 2 批	10	0	14	√	√

5 结束语

笔者对高精度倾角传感器在振动筛选过程中出现零位偏移的问题进行分析,通过复现及工艺分析对出现的问题定位,制定解决方案,引入数字化微压力传感器技术,完成了对原装配工艺的优化改进。通过工艺分析、夹具设计及实验验证,证明了采用改进后工艺方法及流程的可行性,达到了工艺改进设计的预期效果,解决了倾角传感器因振动产生的零位偏移问题,提高了加工效率。

参考文献:

- [1] 张维胜. 倾角传感器原理和发展[J]. 传感器世界, 2002, 8(4): 18-21.
- [2] Development of a 125 g Quartz Flexure Accelerometer for the RIMU Program[C]//IEEE 1998 Position and Navigation Symposium, Augusta: Rex B Peters, Damon R Stoddard, Kimberly Meredith, 1998: 17-24.
- [3] 左策. 石英压力传感器的结构设计和制造工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003: 8-41.
- [4] 李安. 石英挠性加速度计关键技术研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2010: 8-32.
- [5] 任建军, 石云波, 唐军. 电容式加速度传感器设计及工艺加工[J]. 微纳电子技术, 2017, 54(7): 472-278.
- [6] 袁峰, 张威, 张士彬. 摆式电容倾角传感器的设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1994, 26(5): 25-29.
- [7] 冯建斌. 电容式加速度传感器的优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [8] 刘沁, 陈信琦, 叶挺. 力敏传感器专用工艺装备研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 304-306.