

石英挠性加速度计量程提高技术研究

彭志高^{1,2,3},王勇^{1,2,3},张占伟^{1,2,3},李晓爱^{1,2,3},汪胜琴^{1,2,3}

(1. 中国电子科技集团公司 第二十六研究所, 重庆 400060; 2. 重庆市固态惯性技术企业工程技术研究中心, 重庆 401332;

3. 重庆市固态惯性技术工程实验室, 重庆 401332)

摘要:为提高石英挠性加速度计的量程,分析了石英挠性加速度计量程受限机理,确认电磁反馈力与质量摆质心不重合是加速度计量程受限的主要原因。在此基础上,采用减小加工与装配误差和提高质量摆抗扭刚度的方法来提高石英挠性加速度计量程,并通过样机验证了该技术措施的有效性。

关键词:石英挠性加速度计;量程;质量摆;质心;电磁力作用中心

中图分类号:TN96;TB114 **文献标识码:**A

Technology for Improving the Range of Quartz-Flex Accelerometers

PENG Zhigao^{1,2,3}, WANG Yong^{1,2,3}, ZHANG Zhanwei^{1,2,3}, LI Xiao'ai^{1,2,3}, WANG Shengqin^{1,2,3}

(1. The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. Chongqing Solid Inertial Technology Enterprise Engineering Technology Research Center, Chongqing 401332, China;

3. Chongqing Solid Inertial Technology Engineering Laboratory, Chongqing 401332, China)

Abstract: To improve the range of quartz-flex accelerometers, this study analyzes the mechanism affecting this range and confirms that the primary reason for the restricted range is that the center of the electromagnetic feedback force is not superposed on the center of mass of the mass pendulum. Based on the analysis, methods for improving the range are presented by reducing the deviation of mechanical machining and assembly and increasing the torsion resistance of the mass pendulum, the efficiency of which is confirmed by prototypes.

Key words: quartz-flex accelerometer; range; mass pendulum; center of mass; center of electromagnetic force

0 引言

石英挠性加速度计具有体积小,响应快,稳定性好,灵敏度高,结构简单等特点,广泛应用于航空、航天、航海及陆用运动载体的导航、制导与控制系统中^[1-4]。石英挠性加速度计虽然是一类技术比较成熟的加速度计,但传统设计和工艺无法保证能测量的最大加速度超过 $\pm 25g$ ($g=9.8\text{ m/s}^2$),量程大于 $\pm 40g$ 的比例约50%^[4],这限制了石英挠性加速度计在一些大动态、高机动领域的应用(如再入段航天器等^[5-7])。对影响石英挠性加速度计量程的机理进行分析,提高加速度计量程和大量程加速度计成品率,对于降低生产成本、拓展其在大量程高机动领域的应用具有重要意义。

为了提高石英挠性加速度计的量程和大量程加速度计的成品率,许多研究进行了多方面探索:

减小质量摆的质量(如减薄石英摆片^[4]),线圈骨架采用铍材代替硬铝合金^[8],采用硅基线圈^[9]或无骨架线圈技术^[10];采用更大剩磁感应强度和磁能积的永磁材料来提高工作气隙的磁感应强度^[11-12];提高零部件加工精度,消除轭铁电极面碰伤、划痕及石英摆片金膜镀层的气泡与凸点,保证质量摆活动自由度和压膜阻尼平面及其边缘的完整性^[4]等。

本文通过分析石英挠性加速度计表头在加速度测量过程中的受力以及质量摆在受力过程中的运动,明确其量程受限的原因,有针对性地提出提高加速度计量程的技术措施,并制作样机进行试验,验证了措施的有效性。

1 石英挠性加速度计原理

石英挠性加速度计主要由表头和伺服电路两部分组成,其中表头部分包括3大组件(如图1所

收稿日期:2024-07-05

作者简介:彭志高(1965-),男,湖南省望城县人,工程师。

示):由石英摆片和粘接固连在石英摆片两面的力矩线圈构成的质量摆;由磁钢、导磁帽、补偿环和上、下轭铁构成的上轭铁组件和下轭铁组件。石英摆片表面通过真空镀膜沉积的金膜电极面和上、下轭铁的电极面共同构成加速度信号检测器,即差动电容传感器。

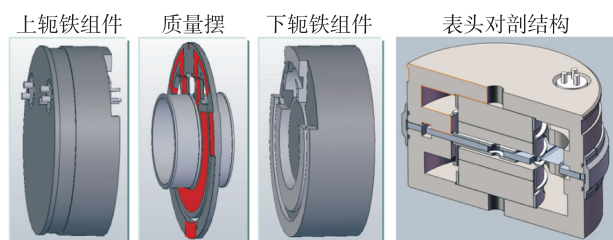


图 1 石英挠性加速度计表头结构

图 2 为石英挠性加速度计原理框图。当加速度计受到输入轴相对惯性空间的加速度作用时,质量摆产生偏转,从而使差动电容传感器的两个平板电容容值发生变化,其中一个增大另一个减小,由伺服电路检测该电容容差,经功率放大后输出相应电流。输出电流反馈到处于恒定磁场(由上、下轭铁组件的磁钢提供)的力矩线圈中,从而产生电磁反馈力,推动质量摆恢复到中心平衡位置。流过力矩线圈的反馈电流反映了输入加速度的大小。加速度计的输出电流 i 可表示为

$$i = K_1 \times a_i \quad (1)$$

式中: K_1 表示加速度计的电流标度因数; a_i 表示输入轴向加速度。

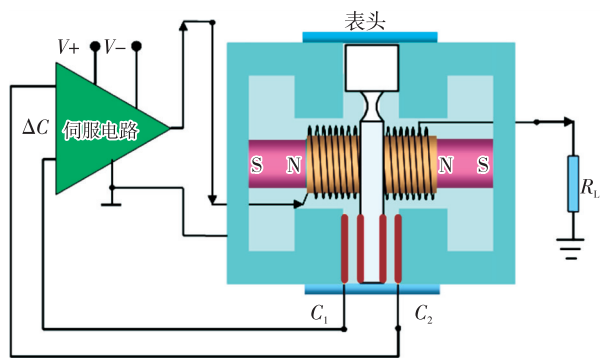


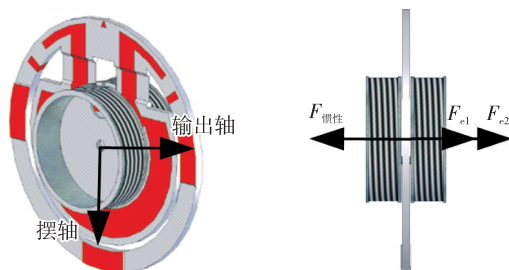
图 2 石英挠性加速度计结构原理图

2 石英挠性加速度计量程受限机理及仿真分析

2.1 加速度计量程受限机理

图 2 可知,在加速度测量过程中,两个力矩线圈

串联成推挽式工作状态,分别对质量摆施加电磁推力(F_{e1})和电磁拉力(F_{e2}),如图 3 所示,电磁反馈力为两者合力(F_e),合力的作用点为电磁反馈力作用中心。由加速度产生的惯性力($F_{惯性}$)作用于质量摆的质心。当电磁反馈力与惯性力作用点重合时,形成一对平衡力,将质量摆固定在中心平衡位置,从而完成加速度的测量。



(a) 质量摆结构 (b) 质量摆敏感方向受力示意图

图 3 质量摆结构及其敏感方向受力示意图

理想情况下,当质量摆质心和电磁反馈力作用中心完全重合,理论上质量摆等效为一个单自由度机构。加速度计正常工作时,质量摆始终处于中心平衡位置。此时限制加速度计量程的只有伺服电路所能提供的伺服能力极限,即其输出饱和电流。输出饱和电流除以加速度计的电流标度因数,即为加速度计的最大量程。目前大量程石英挠性加速度计伺服电路已达 $100g$ 的输出能力^[6],因此,伺服电路不再是限制加速度计量程的瓶颈。当然,当输出电流增大到力矩线圈上的电压接近伺服电路的工作电压时,会出现输出电压限幅。因此,伺服电路供电电压也是限制加速度计量程的因素,供电电压越高,越有利于提高量程。

当质量摆质心和电磁力作用中心不重合时,质量摆不再是理论上的单自由度机构。伺服电路的增益虽能有效地将质量摆固定在电容传感器中的一个固定点上,但由于电容传感器是一个平板电容传感器,只能确定在板的质心位置,即一个单点,质量摆会因为两个力的作用点不重合而产生扭转,即质量摆除发生平移外,还会发生转动。理论上,两个中心不重合产生的扭矩 T 可表示为

$$T = d_1 i B l - d_2 m a_i \quad (2)$$

式中: m 为质量摆的质量; i 为流过力矩线圈中的电流; B 为工作气隙的磁感应强度; l 为线圈导线的总

长度; d_1, d_2 分别为电磁反馈力 F_e 、惯性力 $F_{\text{惯性}}$ 与旋转轴的距离。考虑到挠性梁的双梁结构特点,扭矩 T 并非作用在单个挠性梁上,令实际扭矩 $T' = f(T)$,矩形截面梁的单位转角 θ 可表示为

$$\theta = \frac{T'}{\beta b h^3 G} \quad (3)$$

式中: b 为挠性梁的宽度; h 为挠性梁的厚度; G 为石英摆片材料石英玻璃的剪切弹性模量; β 与 b/h 有关,因挠性梁宽度远大于其厚度, β 可取 0.333。

在大 g 作用下,若挠性梁的约束力不足以抵抗扭转力矩,将发生质量摆对空气薄膜的角振荡^[13-14]。当质量摆发生角振荡时,加速度计噪声增大,输出稳定性降低,甚至使质量摆碰到上、下轭铁电极面,从而出现输出饱和或自激现象,此时加速度计已达到其量程极限。

由式(2)、(3)可知,通过提高石英摆片挠性梁的抗扭刚度可提高质量摆抗扭转力矩的能力。相比于挠性梁宽度 b ,增加厚度 h 能使梁的抗扭刚度得到更显著的提升,从而减小扭转角度。

结构设计上,石英挠性加速度计表头不是一个完全圆周对称结构,且零件机械加工和表头装配工艺存在误差,因此,实际生产的加速度计产品的质量摆质心和电磁反馈力作用中心难以保证绝对重合。综合分析,质量摆质心和电磁反馈力作用中心不重合是传统设计和工艺制作的石英挠性加速度计量程受限的主要原因。

2.2 质量摆扭转运动仿真分析

为进一步研究质量摆质心和电磁反馈力作用中心不重合引起质量摆的扭转运动及其对加速度计量程产生的影响,在两个中心不重合时,采用有限元分析软件 ANSYS,对石英摆片外边缘扭转位移进行仿真计算。仿真边界条件以石英摆片外环的 6 个安装凸台为固定点,其位移为 0。

2.2.1 质量摆不同轴向抗扭转能力仿真分析

首先,石英摆片挠性梁厚度为 0.02 mm,比较质量摆质心和电磁反馈力作用中心分别沿摆轴和输出轴不重合时质量摆抗扭转能力的差异,如图 4-5 所示。

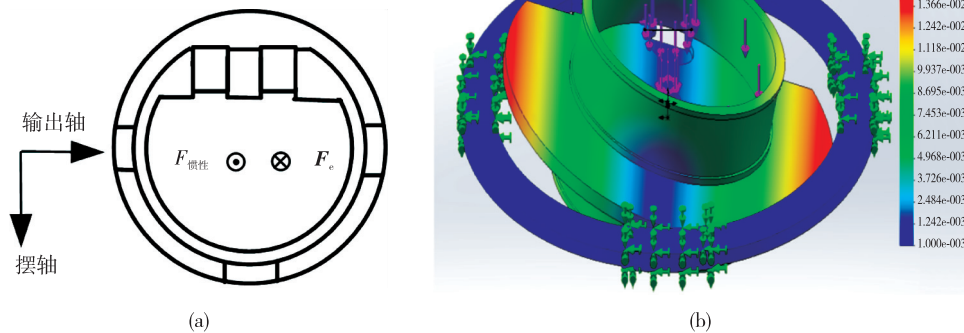


图4 两个中心沿输出轴不重合的仿真云图

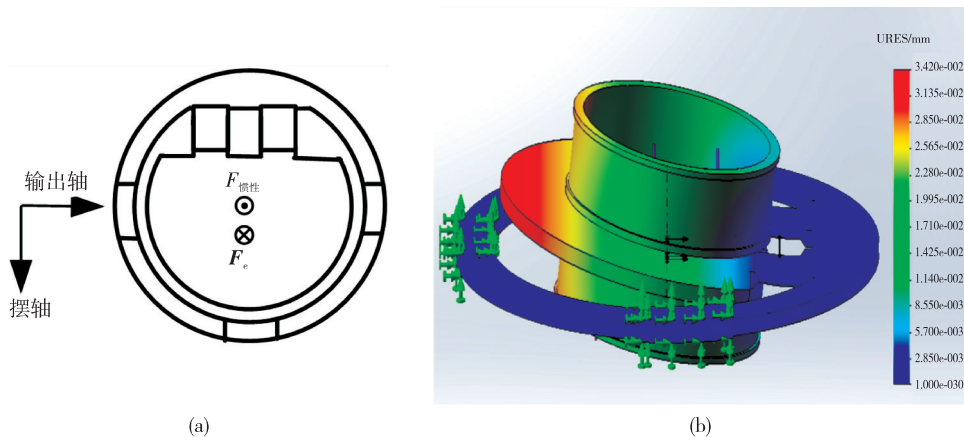


图5 两个中心沿摆轴不重合的仿真云图

仿真结果如下:

1) 两个中心沿输出轴不重合时,石英摆片绕摆轴发生扭转,当加载 $50g$ 加速度载荷且两个中心之间距离达 0.03 mm 时,质量摆扭转最大位移达到 $0.005\ 2\text{ mm}$ 。

2) 两个中心沿摆轴不重合时,石英摆片绕输出轴发生扭转,当加载 $50g$ 加速度载荷且两个中心之间距离达 0.03 mm 时,质量摆扭转最大位移达到 $0.088\ 2\text{ mm}$ 。

根据仿真结果结合质量摆挠性支承结构分析,由于石英摆片挠性梁在输入轴向具高度柔性,抗扭能力较弱,当两个中心沿摆轴不重合时,扭转位移较大,故极易碰到上、下轭铁电极面,使加速度量程达到极限;而石英摆片非输入轴向挠性梁刚度较大,抗扭转能力较强,当两个中心沿输出轴不重合时,扭转位移较小,即使在挠性梁厚度仅 0.02 mm 、两个中心距离达 0.03 mm 条件下,加载 $50g$ 加速度载荷,扭转最大位移仅 $0.005\ 2\text{ mm}$,小于质量摆工作间隙宽度设计值(0.019 mm)的 $1/3$ 。因此,两个中心沿输出轴不重合的情形对加速度计量程的影响较小。下面针对两个中心沿摆轴不重合的情况开展进一步仿真分析。

2.2.2 沿摆轴不重合度与扭转位移仿真分析

1) 两个中心之间距离与扭转位移仿真

在给定加速度载荷的条件(按加速度计量程设计值 $50g$ 施加加速度载荷)下,石英摆片挠性梁厚度分别取 0.020 mm 、 0.025 mm 和 0.030 mm 时,仿真计算两个中心之间的距离与石英摆片绕输出轴的最大扭转位移,结果如图 6 所示。

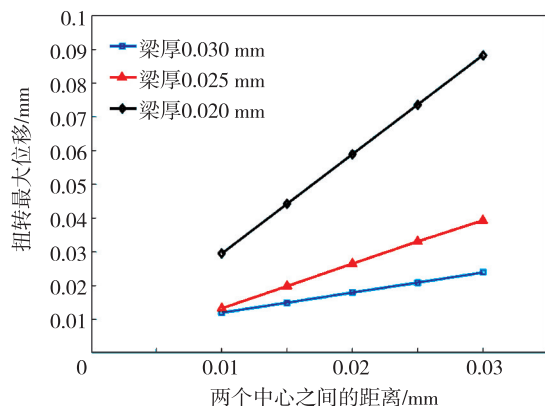


图6 沿摆轴两个中心距离与扭转位移

由图 6 可知,在石英摆片挠性梁厚度一定时,两

个中心重合度越低(即两个中心之间的距离越远),石英摆片扭转位移越大,加速度计的量程越小;当两个中心重合度相同时,石英摆片挠性梁越厚,挠性梁约束力抗扭转力矩的能力越强,扭转位移越小,则加速度计的量程越大。

2) 两个中心距离与输入加速度仿真

在给定绕输出轴扭转位移最大值条件下(取质量摆工作间隙宽度设计值 0.019 mm),石英摆片挠性梁厚度分别取 0.020 mm 、 0.025 mm 和 0.030 mm 时,仿真计算作用于质量摆质心的加速度载荷大小,结果如图 7 所示。

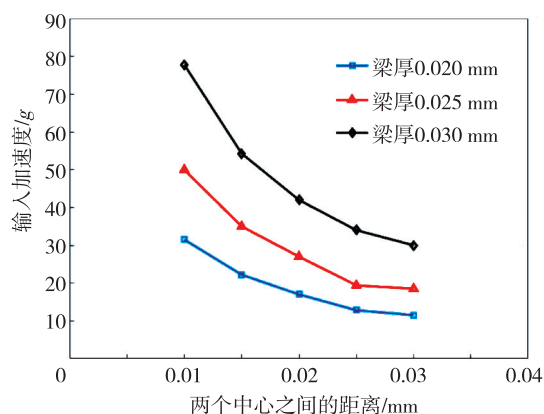


图7 沿摆轴两个中心距离与输入加速度

由图 7 可知,在绕输出轴扭转最大位移一定时,两个中心重合度越低(即两个中心之间的距离越远),质量摆承受的输入加速度越小,则加速度计的量程越小;当两个中心重合度相同时,石英摆片挠性梁越厚,质量摆承受的输入加速度越大,则加速度计的量程越大。

3 量程提高技术措施及验证试验

由第 2 节的机理分析及仿真计算结果可知,采取两项措施可提高石英挠性加速度计量程:

1) 提高加速度计表头的加工和装配精度,以减小质量摆质心和电磁反馈力作用中心之间的距离。

2) 增加石英摆片挠性梁的厚度,以提高质量摆抵抗因两个中心不重合带来的扭转力矩的能力。

为了验证这两项措施的有效性,采用两种方案制作了加速度计样机(10 只)并进行对比验证试验,如表 1 所示。两种方案将零件的关键尺寸误差控制在 0.01 mm 以内,并通过组件的同心度测量与筛选,以缩短质量摆质心和电磁反馈力作用中心之间

的距离,方案 2 在方案 1 的基础上将石英摆片挠性梁厚度增加 0.005 mm。

表 1 验证样机要求及数量

方案	方案 1	方案 2
样机 制作 控制 要求	零件尺寸/公差控制要求:	零件尺寸/公差控制要求:
	1) 石英摆片和轭铁配对,两者外径误差控制在±0.01 mm 范围内。	1) 石英摆片和轭铁配对,两者外径误差控制在±0.01 mm 范围内。
	2) 石英摆片挠性梁厚度(0.025±0.002)mm。	2) 石英摆片挠性梁厚度(0.030±0.002)mm。
	三大组件装配完成后,测量其同心度,要求控制精度:	三大组件装配完成后,测量其同心度,要求控制精度:
	1) 力矩线圈和石英摆片同心度≤0.01 mm。	1) 力矩线圈和石英摆片同心度≤0.01 mm。
	2) 磁钢和轭铁同心度≤0.01 mm。	2) 磁钢和轭铁同心度≤0.01 mm。

按上述要求制作加速度计样机 20 只,用于加速度计量程离心机试验。试验包括正、负两个方向,要求:

- 1) 在测量范围内,线性度不大于 0.1%。
- 2) 试验过程中通过示波器监测加速度计输出波形,应无尖峰毛刺,无振荡纹波。

不满足以上任一项时,即确认加速度计达到测量极限,取正、负方向输入加速度的较小值作为加速度计量程。离心机试验数据统计如表 2 所示。

表 2 量程离心机试验统计数据

方案 1			方案 2		
样机 编号	正向 量程/g	负向 量程/g	样机 编号	正向 量程/g	负向 量程/g
1-1	51	-53	2-1	63	-63
1-2	45	-48	2-2	65	-67
1-3	49	-46	2-3	57	-55
1-4	52	-52	2-4	60	-62
1-5	55	-53	2-5	68	-70
1-6	60	-58	2-6	62	-62
1-7	43	-45	2-7	56	-60
1-8	53	-52	2-8	61	-64
1-9	48	-46	2-9	53	-52
1-10	47	-48	2-10	69	-64

由表 2 可见,按方案 1 制作的 10 只加速度计,量程全部达到 40g,其中 5 只达到 50g;按方案 2 制作的 10 只加速度计,量程全部达到 50g,其中 7 只达到 60g。样机输入量程离心机试验结果表明,通过控制零部件的加工和装配误差来缩短质量摆

质心和电磁反馈力作用中心之间的距离,使两个中心尽可能重合,并适当增加石英摆片挠性梁的厚度,能够有效提高加速度计的量程,且大量程加速度计成品率远高于传统设计和工艺制作的加速度计。

4 结束语

通过分析石英挠性加速度计量程受限机理,确认传统设计和制作工艺生产的石英挠性加速度计量程受限的主要原因为质量摆质心和电磁力作用中心不重合。在此基础上,有针对性地采用了两项技术措施来提高加速度计的量程:

- 1) 提升加速度计表头零件加工和装配精度,控制质量摆质心和电磁反馈力作用中心之间的距离,使两个中心尽可能重合。
- 2) 适当增大石英摆片挠性梁的厚度,以提高质量摆抵抗扭转力矩的能力。

按照上述措施制作了加速度计验证样机,并进行了输入量程离心机试验,试验结果表明,这两项措施能够有效提高石英挠性加速度计的量程。

参考文献:

[1] 王晓东,付红坡,温云同.加速度计参数长期稳定性多尺度混合建模与预测[J].中国惯性技术学报,2020,28(1):9.

[2] 连德浩,李强,孙飞,等.挠性加速度计石英摆片的微运动仿真分析[J].传感器与微系统,2016,35(11):15-18.

[3] 刚煜,王永建,赵鹏,等.石英挠性加速度计表头力矩器噪声模型研究[J].传感器与微系统,2018,37(3):34-37.

[4] 张宁.石英挠性加速度计大量程实现技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.

- [5] 刘福朝,李存健,王桂奇.微惯性测量单元设计及抗高过载性能分析[J].压电与声光,2022,44(2):289-293.
LIU Fuchao, LI Cunjian, WANG Guiqi. Design of micro-inertial measurement unit and analysis of anti-high overload performance [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2022,44(2):289-293.
- [6] 张明,阮晓明,徐鑫,等.系列化混合集成石英挠性加速度计伺服电路的研制[C]//北京:中国航天电子技术研究院科学技术委员会 2020 年学术年会论文集,2020.
- [7] PETERS R B, STODDARD D R, MEREDITH K. Development of a 125 g quartz flexure accelerometer for the RIMU program[C]//CA, USA: IEEE 1998 Position Location and Navigation Symposium, 1998:17-24.
- [8] 王晓东,宋雪杰,章培成,等.铍材在高精度石英挠性加速度计上的应用[J].导弹与航天运载技术,2015(1):96-99.
- [9] 中国工程物理研究院电子工程研究所.基于微型力矩器的石英挠性加速度计及其制造方法:CN202110792227.4[P].2021-08-13.
- [10] 宋开臣,梁萌.基于平面线圈的石英挠性加速度计的初步设计[J].仪表技术与传感器,2008(3):12-13.
- [11] 杨峰,王勇,彭志高.石英挠性加速度计磁路参数研究[J].压电与声光,2020,42(1):123-126.
YANG Feng, WANG Yong, PENG Zhigao. Study on magnetic circuit parameters of quartz flexible accelerometer[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2020,42(1):123-126.
- [12] 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):5.
- [13] 殷正和.新近研制的石英挠性加速度计[J].惯导与仪表,1994(1):19-20.
- [14] 石进杰,郝一龙,曾昭君.一种弹用抗大过载加速度计的设计制造及分析[C]//深圳:全国半导体集成电路,硅材料学术会.中国电子学会,2003.