

在冲击作用下捷联惯性系统结构的设计方法

张占伟¹, 陆玉姣², 刘聚川³

(1. 中国电子科技集团公司第26研究所, 重庆 400060; 2. 机械工业第三设计研究院, 重庆 400039;
3. 中国人民解放军空军驻重庆地区军事代表室, 重庆 400060)

摘 要:针对捷联惯性系统对冲击环境敏感,在冲击条件下动态精度差的特点,分别分析了微机电系统(MEMS)陀螺仪、石英加速度计及安装框架的冲击适应性。提出了在冲击载荷作用下捷联惯性系统结构设计的方法:首先,从结构设计上保证传感器的正交布局;其次,设计了一种简单实用的隔冲结构方式,通过有限元仿真和实物试验,结果表明,此方法可靠有效。

关键词:捷联惯性系统;陀螺仪;加速度计;冲击载荷

中图分类号:V241

文献标识码:A

Structures Design Method of the Strapped down Inertial System under Shock Loads

ZHANG Zhanwei¹, LU Yujiao², LIU Juchuan³

(1. 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;
2. Ctdi Engineering Corporation, Chongqing 400039, China;
3. Military Delegate Office of Air Force in Chongqing Area, Chongqing 400060, China)

Abstract: Aiming at the problems of the sensitivity to the shock circumstances and poor dynamic accuracy under shock loads of the strap-down inertial system, the impact capacity of MEMS gyroscope, quartz accelerometer and the framework has been analyzed in this paper. The structure design method of the strap-down inertial system under the shock loads has been proposed. First of all, the sensor orthogonal distribution has been guaranteed by the structural design. Second, a simple and practical way to isolate the impact of the structure has been designed. The finite element simulation and the physical test show that this method is reliable and effective.

Key words: strapped down inertia system; gyroscope accelerometers; shock loads

0 引言

惯性导航技术的应用曾需依靠稳定平台技术,惯性传感器安装在稳定平台上,在机械上隔离了运载体的旋转运动。目前平台式导航系统常应用在对导航数据精度要求较高的场合。近来一些导航系统中将惯性传感器刚性固定或“捷联(strapped down)”在载体上,从而降低了平台系统的结构复杂性^[1]。相对于平台系统,这种方法成本低,体积小,可靠性高,捷联技术需承担很大的计算量和使用能测量较高运动速率的惯性传感器。近年来,多种惯性传感器和计算机技术都有进步,微机电系统(MEMS)装置的性能已接近惯性级。由微机械陀螺和石英加速度计等元器件组成的捷联系统因精度适中,可靠性高,成本低等特点而广泛应用于航空、航天及航海等领域。近年来,随着微机械陀螺和石英加速度计精度的提高,其捷联惯性系统的精度也

得到提高。捷联惯性系统是将惯性元器件(陀螺仪和加速度计)通过刚性构件(简称“框架”)直接安装在载体上,它们将直接承受载体的线振动和角振动,所以惯性元件将承受较大的振动冲击,产生相应的动态误差。如何提高捷联惯性系统的动态性能,优化结构形式,提高结构的抗振动、冲击性能是捷联惯性系统满足精度要求的关键。

本文从捷联惯性系统的组成及结构特性等方面,对捷联惯性系统的冲击适应性进行分析,并通过仿真分析和惯性系统的冲击试验的对比,确立仿真科学的科学性,可通过有限元仿真分析的手段,减少一些试验,从而可节约成本和研制时间。该文提出了提高捷联惯性系统冲击适应性的方法。

1 捷联惯性系统冲击适应性分析

捷联惯性系统基本上是由一套惯性仪表和一台计算机构成。仪表组件通常包括分别提供角速率和

收稿日期:2012-01-22

作者简介:张占伟(1979-),男,青海互助人,工程师,硕士,主要研究方向为惯性控制系统结构优化。

比力测量值的陀螺仪和加速度计,这些元件安装于框架上,直接或通过抗震基座安装在主运载体上。这里的计算机是一个解算姿态方程的处理器,通常被称为“导航计算机”。导航计算机是一个电子线路模块,对于目前的许多载体的振动冲击环境能很好的适应,对惯性系统的精度不会产生影响。陀螺仪和加速度计是惯性系统的核心组件,在冲击条件下,陀螺仪和加速度计产生附加漂移,是惯性系统精度降低的主要原因。用于安装陀螺仪和加速度计的框架本身的冲击适应性很好,但如果框架设计不合理,就会将外部环境的冲击放大并传递到陀螺仪和加速度计上,使惯性系统的精度降低。相反,如果合理的设计框架,为陀螺仪和加速度计提供良好的环境,就会将外部环境的冲击减小。

1.1 MEMS 陀螺仪冲击适应性

陀螺仪安装在惯性系统框架的 3 个相互正交轴上,测量载体在单位时间内的角增量。以压电石英材料作为敏感元件基材的 MEMS 陀螺仪,结构简单可靠耐用,同时温度和时间稳定性也较高。基于 MEMS 技术的石英角速率传感器已批量生产,可承受高重力加速度作用。图 1 为较常用的一种基于 MEMS 技术的石英角速率传感器的模型图。陀螺仪的 4 个角都安装了缓冲垫,缓冲垫为橡胶材质,以机载环境作为试验条件,安装缓冲垫和没有加装缓冲垫相比在 X、Y、Z 3 个方向上减振效果分别能提高 2.4、3.6、4.6 倍^[1]。可见,有缓冲垫的保护,

MEMS 陀螺仪冲击适应性较好。

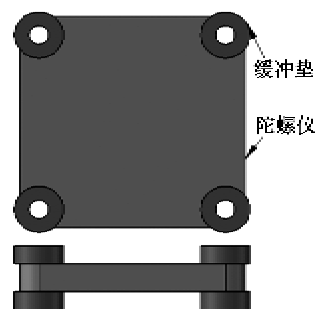


图 1 某型号石英角速率传感器模型图

1.2 石英加速度计冲击适应性

加速度计是惯性系统的基本测量元件之一,其性能和精度直接影响导航和制导系统的精度。捷联惯性系统中 3 个石英加速度计正交安装在系统框架的 3 个测量轴上,测量运载体的运动加速度,并通过积分,求得其速度和位置。

本文描述的加速度计是石英振梁加速度计(VBA),目前国内研制 VBA 的单位约有 5 家,其性能指标:量程为 $-500 \sim +500 \text{ m/s}^2$,冲击适应性在 2500 m/s^2 内^[2]。表 1 为一些运载工具冲击的部分参数^[3]。由表可看出, 2500 m/s^2 的冲击适应性能适应大部分的运载体的冲击条件,对于不能满足的运载体,可采用选用能承受高重力加速度的其他加速度计或在安装加速度计的框架上做隔冲处理。

表 1 各种运载工具冲击参数

参数	火车	汽车	坦克	飞机	舰船		导弹	火箭飞船
					潜艇	水面舰艇		
加速度极值/ (m/s^2)	250~300	500	2 000	150~200 特殊时 300~600	70~2 000	70~800	80~500	2 000~10 000
持续时间/ms	6~11	11~20	11~25	6~11			25~100	0.1~0.2

1.3 框架冲击适应性

图 2 为安装好陀螺仪和加速度计的框架结构模型。图 3 为框架网格划分模型。分别对其进行频率分析和施加冲击载荷分析,频率分析的结果得到其自身固有频率达 5 233.7 Hz。图 4 为框架在冲击载荷下的位移云图。加载条件和实际试验条件一致,发生的最大位移为 0.114 9 mm,这将对传感器的精度产生很大影响。而对已装配了惯性器件的框架进行了实物冲击试验,试验条件为半正弦波, 1000 m/s^2 , 11 ms; 产品与冲击台面刚性接触; X、Y、Z 3 方向,每方向 3 次,共 9 次冲击;试验中加工作电压,能正常工作,但是过程中精度有较明显的下降。说明冲击载荷对于产品的性能影响很大,需对

框架做冲击隔离处理。

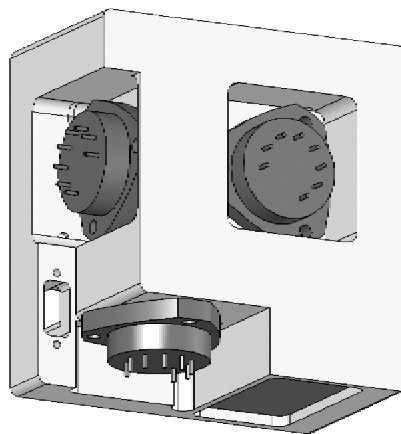


图 2 框架结构模型

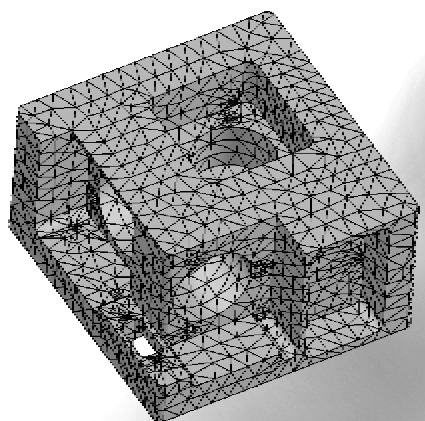


图3 框架结构网格划分

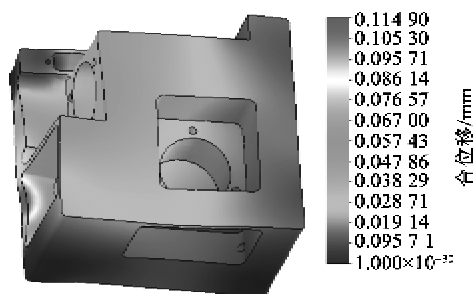


图4 框架冲击载荷下位移云图

2 冲击载荷作用下捷联惯性系统结构设计

2.1 传感器正交布局的结构保证

目前,在捷联惯性系统,传感器的正交布局方式用得较多,也较成熟,通常将3个单轴陀螺仪及3个单轴加速度计两两正交安装到其框架上,这样的布局可直接测得角速率和比力在3个正交轴上的分量,为系统提供所需信息。

框架是结构加工件,存在加工误差,所以,需适当提高加工精度和减少装配带来误差。虽然,对于加工和装配误差通过标定的方式予以解决,但经冲击载荷作用后,原来标定的初始位置在下次开机使

用时可能就已发生了位移。

对于加工误差,设计时明确合理的形位公差及排布好加工工艺。对于装配误差,采用专用的工装夹具以保证其精度和批量的同一性。

2.2 框架的隔冲设计

框架的冲击适应性,在和冲击台面刚性接触的情况下,惯性系统的精度明显下降,因此,考虑将框架用弹性材料将其与刚性安装面隔离开来。图5为框架隔冲设计示意图。将框架通过两块橡胶板紧固在压盖和基座间,框架相当于“悬空”状态,与安装面刚性连接的是基座。

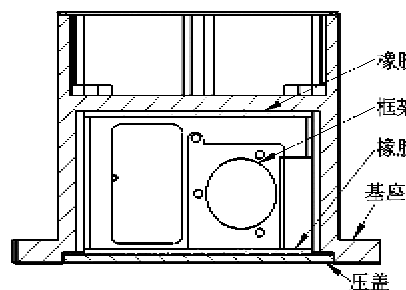


图5 框架隔冲设计示意图

隔冲材料的选用对于隔离冲击的效果影响很大,表2为作为隔冲材料的橡胶的材料属性。

表2 选用橡胶的材料属性

弹性模量/ (N/m ²)	泊松比	质量密度/ (kg/m ³)	屈服强度/ (N/m ²)
6.1×10^6	0.49	1 000	$9.237 4 \times 10^6$

对于此模型进行有限元分析和实物冲击试验对比。表3为模型冲击后有限元分析结果(加载条件为半正弦波,1 000 m/s²,11 ms,Z方向)。冲击载荷后发生最大位移为78.994 μ m,满足产品的形变要求,且位置在基座上,安装传感器的框架处发生的位移要小于78.994 μ m,更能满足形变要求。

表3 框架隔冲模型有限元分析结果

类 型	最 小	位 置/mm
von Mises 应力	79.901 4 N/m ² 节: 55 432	(-29.247 7, -12.964 6, 53.5)
URES 合位移	0 m 节: 58 172	(50.398 7, -54.862 8, -1)
ESTRN 对等应变	$1.118 89 \times 10^{-7}$ 单元: 83 676	(14.565 3, -64.112 8, 91.6)
类 型	最 大	位 置/mm
von Mises 应力	$2.747 36 \times 10^7$ N/m ² 节: 134 282	(43.898 7, -54.862 8, -1)
URES 合位移	$7.899 34 \times 10^{-5}$ m 节: 52 351	(26.005 6, 23.222 1, 53.5)
ESTRN 对等应变	0.028 269 4 单元: 34 699	(21.953 4, -43.032 9, 54)

根据第1.3节中描述的试验条件,进行实物冲击试验验证,发现此种结构的隔冲效果明显,与第

1.3节中的结构相比,在冲击载荷作用下惯性系统的精度得到提高。

(下转第371页)