

光纤陀螺捷联惯导隔冲系统设计

汤霞清, 高军强, 武萌, 张环

中国人民解放军装甲兵工程学院控制工程系, 北京 100072

摘要 针对环境冲击、振动会对光纤陀螺捷联惯导系统结构及测量精度造成不良影响,进行了隔冲系统的设计与分析。利用改进的递归数字滤波算法和统计估计技术,根据冲击环境下测量得到的加速度时程,计算了冲击响应谱图,用于指导隔冲系统参数设计。为验证设计结果,利用冲击响应谱合成技术得到模拟实际冲击环境的加速度时程;在有限元软件 ABAQUS 中,以该加速度时程为基础运动激励进行瞬态动力学分析。根据分析结果,设计的隔冲系统可以使捷联惯导系统承受的冲击作用降低到所能承受范围内,表明所设计的隔冲系统在动力学特性角度可满足使用要求。

关键词 捷联惯导;隔冲系统;冲击响应谱;有限元分析

中图分类号 U666.1

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.30.002

Design of Shock Isolation System for Strap-down Inertial Navigation System Based on Fiber Optical Gyro

TANG Xiaqing, GAO Junqiang, WU Meng, ZHANG Huan

Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China

Abstract Aiming at the effect on FOG (fiber optical gyro) SINS (strap-down inertial navigation system) caused by shock and vibration in the environment, shock isolation system was designed and analysed. The shock response spectrum was calculated based on the acceleration time-history measured in the shock environment by improved recursive formula and statistical estimate. Then, it was used to guide the parameters design of the shock isolation system. In order to verify the design result, transient dynamic analysis was proposed in ABAQUS. To simulate the shock environment, acceleration time-history was acquired through time-history waveform synthesis and it was used as the base motion in transient dynamic analysis. The result indicates that the shock suffered by the SINS with the designed shock isolation system was declined to an acceptable range, which means the designed shock isolation system was successful in the view of dynamics characteristics. It is significant for the engineering application of FOG SINS.

Keywords SINS; shock isolation system; shock response spectrum; finite element analysis

0 引言

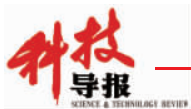
光纤陀螺捷联惯性导航技术已广泛应用于军事、民用等领域。在工程应用中,如何保证光纤陀螺捷联惯性导航系统在恶劣环境中工作的稳定性和精度至关重要。在环境对系统工作影响的不利因素中,温度和电磁干扰对惯性器件的输出稳定性、精度造成的影响较大,目前已有有效措施进行抑制、补偿或屏蔽;而环境的冲击、振动不仅有可能造成系统结构的破坏,还会降低惯性器件的输出精度,进而影响惯导系统的测量精度,成为了光纤陀螺捷联惯导工程实用阶段亟待解决的关键性问题^[1]。

如何保证捷联惯导系统在恶劣的冲击、振动环境下安全、稳定、高精度地工作,已经受到研究人员的广泛重视。研究重点主要集中在以下3个方面:①通过改进惯性器件结构提高其在振动、冲击环境下的稳定性。由于加速度计的技术指标已经能够满足目前需求,故研究工作主要集中在光纤陀螺结构的改进上^[2];②研究误差补偿、高动态姿态解算算法,提高动态环境下的测量精度^[3];③设计隔冲系统,在保护捷联惯导系统的同时,改善惯性器件的工作环境^[4]。改进惯性器件结构意味着需要更先进的生产技术,往往造成系统成本升高。而通过改进算法提高测量精度,在仿真过程中容易取得

收稿日期:2013-06-27;修回日期:2013-08-01

基金项目:军队科研计划项目

作者简介:汤霞清,教授,研究方向为惯性导航系统及相关技术,电子信箱:gjqxkl8990@163.com



很好的效果,但在硬件实现上存在较大的难度,且实际作用效果有限。当冲击、振动环境较为恶劣时,为保护系统结构,进行隔冲减振设计往往是必须的,虽然减振器弹性变形也会对系统测量精度造成不良影响,但只要设计合理,对惯性系统进行隔冲减振设计是利大于弊的。

本文以实际安装环境中测量得到的冲击加速度数据为基础,计算冲击响应谱,为隔冲系统参数设计提供指导。结合冲击响应谱时域合成技术,在有限元环境下,对系统动力学特性进行仿真分析,验证是否满足性能要求。

1 设计思路与关键技术

结合冲击响应谱和有限元方法进行隔冲系统设计,具体思路流程如图1所示。根据实测冲击加速度数据进行冲击响应谱计算,为惯导隔冲系统设计提供依据。利用冲击响应谱时域合成技术,在有限元环境下进行瞬态响应分析,从动力学特性的角度验证设计结果是否满足性能要求。

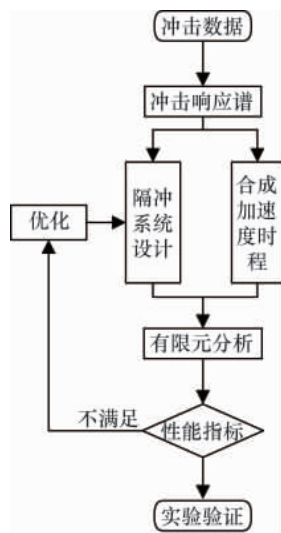


图1 设计流程
Fig. 1 Design flow chart

1.1 冲击响应谱计算

冲击响应谱是指一系列单自由度质量-弹簧-阻尼系统,当其公共基础受到冲击激励时,各单自由度系统产生的响应运动中的最大响应值作为单自由度系统固有频率的函数绘出的曲线。冲击响应谱以冲击对系统的作用效果为研究对象,不仅可以为抗冲击设计提供分析基础,还可以为冲击环境模拟实验提供基本参数,在单自由度系统的隔冲设计中发挥着重要作用,并已经在惯导防冲减振设计中取得了一定的应用^[9]。

根据同一冲击条件下测量得到的多组加速度时程样本计算冲击响应谱的过程为:①利用数值算法计算每一次冲击

实验的加速度时程对应的冲击响应谱;②考虑冲击环境的随机性和固有的可变性,使用适当的统计估计技术对计算得到的同一冲击条件下的所有冲击响应谱进行等效处理,确定可用于设备抗冲击设计及冲击实验的参考冲击响应谱,称之为参考谱。

计算单一加速度时程对应的冲击响应谱时,可选择的数值算法很多。目前应用较普遍的算法是由 Smallwood 于 1980 年提出的改进的递归数字滤波法^[6]。该算法不仅物理意义明确、而且简洁明了,具有速度快、精度高等优点。

进行统计估计时,参照国军标^[7]选用参数上限统计估计中的正态单边容差上限法。一组有 N 个预测或测量值 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, 进行对数变换,以使总测量集接近于正态分布样本,即

$$y_i = \log_{10}(x_i) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (1)$$

真实均值 μ_y 的估计值 m_y 为

$$m_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (2)$$

真实标准差 σ_y 的无偏估计 s_y 为

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - m_y)^2}{N-1}} \quad (3)$$

正态单边容差上限的 $NTL(N, \beta, \gamma)$ 为

$$NTL(N, \beta, \gamma) = 10^{m_y + s_y K_{N, \beta, \gamma}} \quad (4)$$

式中, $K_{N, \beta, \gamma}$ 为正态单边容差因子,可查表得到不同 N, β 和 γ 值对应的 $K_{N, \beta, \gamma}$ 值; NTL 为原始估计集的正态单边容差上限,表示 β 的估计值以置信度 γ 低于正态单边容差上限 $NTL(N, \beta, \gamma)$ 。对于经常使用的 $\beta=0.95$ 和 $\gamma=0.50$, 可称为 95/50 极限。

1.2 冲击响应谱时域合成

冲击响应谱时域合成是指在实验室环境下,采用波形综合法合成满足冲击响应谱条件的瞬态波形模拟实际复杂冲击环境。波形综合法就是用若干个频率不同、幅值不同、持续时间不同的简单脉冲作为基本波形,对这些脉冲延时求和,综合得出一个组合波形,该组合波形对应的冲击响应谱在一定精度范围内与要求的冲击响应谱相同,并且具有复杂的震荡特性。陈小慧等^[8]提出以合成小波中的正弦窗波作为基本波形进行合成,经验证该方法能够满足参考冲击响应谱的精度要求。

1.3 有限元瞬态响应分析方法

利用冲击响应谱方法,将捷联惯导系统看作单自由度系统进行隔冲系统相关参数的计算,而实际捷联惯导系统是多自由度系统。因此,在多自由度运动激励下,隔冲性能是否能够满足要求,还需要进一步的验证,采用有限元分析方法是较好的选择。

有限元分析是一种强有力的数值分析方法,此处运行的瞬态响应分析属于动力学分析范畴。捷联惯导系统承受的瞬

态冲击作用来源于基础的运动,假设惯导系统与基础的相对位移为 u ,施加的载体位移激励为 u_b ,惯导系统的总体位移响应 u_i 是载体位移及相对于载体位移之和,即

$$u_i = u + u_b \quad (5)$$

同样,对于速度和加速度有

$$\dot{u}_i = \dot{u} + \dot{u}_b \quad (6)$$

$$\ddot{u}_i = \ddot{u} + \ddot{u}_b \quad (7)$$

假定载体发生刚体运动,即刚体内的所有点同时被激发,因而有

$$C\dot{u}_b = 0 \quad (8)$$

$$Ku_b = 0 \quad (9)$$

由式(5)~式(9)可得到动力学平衡方程为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M\ddot{u}_b \quad (10)$$

式中, M 为质量矩阵, C 为阻尼矩阵, K 为刚度矩阵。

有限元软件 ABAQUS 中可以采用两种方法,即中心差分时间积分方法 (Central difference time integration)、Hilber+Hughes+Taylor 时间积分方法,求解该动力学平衡方程组。而 ABAQUS/Explicit 程序所采用的中心差分时间积分方法不仅更适用于求解冲击、穿透等高频非线性动力响应问题,而且需要的时间增量较少,可以达到更高的求解效率^[9]。

2 隔冲系统设计

利用 4 次冲击实验测量得到的加速度时程数据计算参考谱,进行统计包络时采用正态单边容差上限法的 95/50 极限,结果如图 2 所示。

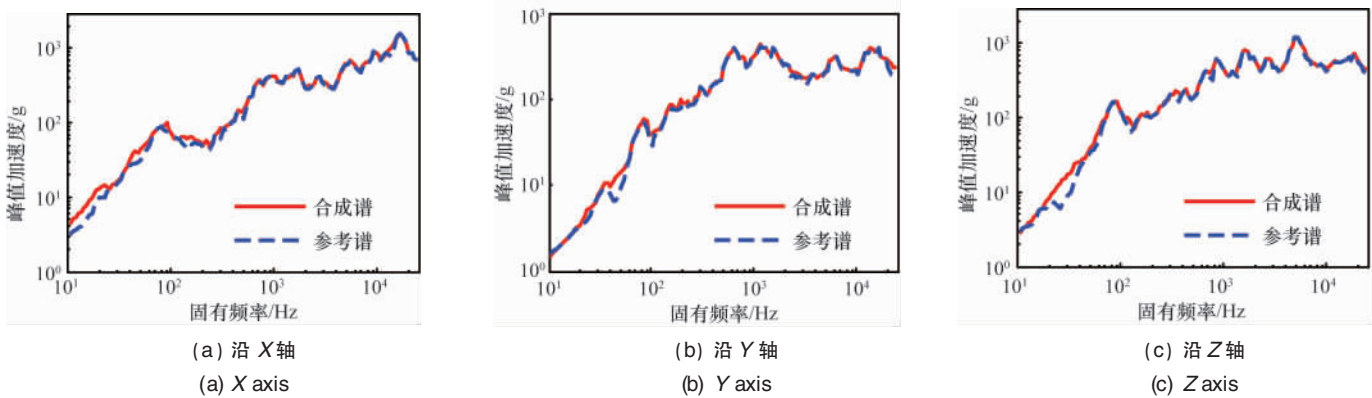


图 2 冲击响应谱

Fig. 2 Shock response spectrum

为了防止捷联惯性系统结构在冲击作用环境下遭到破坏,也为了防止过大的冲击过载造成惯性器件的测量精度降低,要求惯导系统在 3 个方向上承受的峰值冲击加速度均不超过 70g。根据冲击响应谱图,当 X、Y、Z 方向的固有频率分别不超过临界值 71.27Hz、142.50Hz、67.27Hz 时,对应方向上的响应峰值加速度不会超过 70g。为满足要求,应使各方向的固有频率不超过对应的频率段。同时,为了防止隔冲系统的固有频率太低,降低捷联惯导系统测量精度,甚至影响捷联惯导系统的正常使用,此处设计隔冲系统的固有频率为 $f=65\text{Hz}$,放大倍数 $Q=4$,则阻尼比 $\xi=1/(2Q)=0.125$ 。另外,已知捷联惯导系统的质量 $m=10.1\text{kg}$,选用 4 个三向等刚度橡胶减振器,并且通过对减振器进行合理布局保证各自由度振动解耦,则可以计算得到减振器基本参数

$$k=m(2\pi f)^2/4=421.16 \quad (11)$$

$$c=\xi \cdot c_c/4=\xi \cdot 2m(2\pi f)/4=0.258 \quad (12)$$

式中, k 为减振器弹性系数, N/mm ; c 为阻尼系数, c_c 为临界阻尼。

3 有限元分析过程及其结果

进行冲击响应谱合成,得到加速度时程如图 3 所示,对

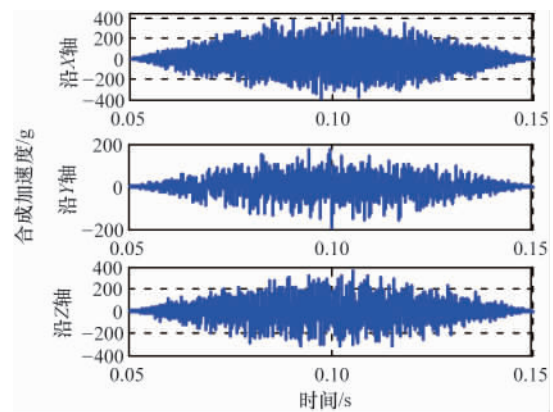
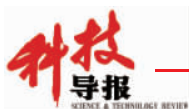


图 3 合成加速度时程

Fig. 3 Synthesis acceleration time-history

应的冲击响应谱(称为“合成谱”)见图 2。由图 2 可看出,合成谱与参考谱基本一致,说明合成的加速度时程在作用效果上与实际冲击环境高度一致,可用于模拟实际冲击环境。

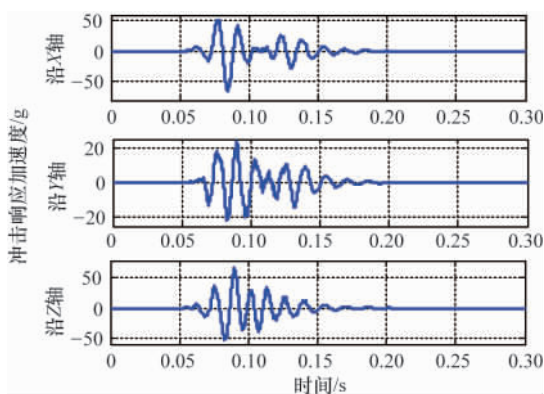
建立有限元模型时,将捷联惯导系统理想化为刚体,运动状态由位于质心的集中质量点决定。减振器用 ABAQUS 中



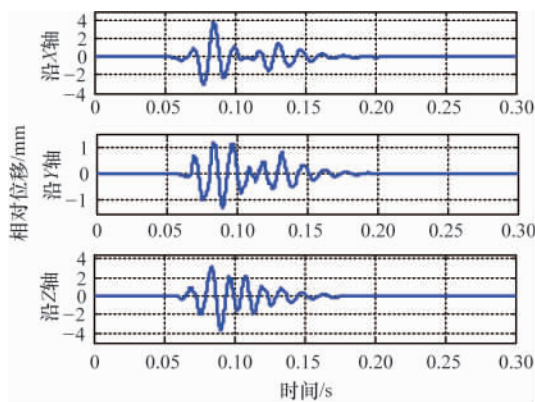
的 Bushing 连接器单元进行模拟,从而使惯导系统相对于基础可以在 6 个自由度上产生相对运动,其刚度和阻尼采用之前计算得到的参数。

之后,利用 ABAQUS/Explicit 模块,以合成加速度时程作为基础运动激励运行动力学分析任务,分析过程中直接指定固定时间增量为 10^{-5} ms,并按时间间隔进行加速度、位移历史变量输出,以用于后续分析处理。

有限元瞬态响应分析结果见图 4。图 4(a)显示的是在基础按照合成加速度时程运动过程中,捷联惯导系统的响应加速度时程。图 4(b)显示的是运动过程中,由于隔冲系统中减振器变形产生的捷联惯导系统与基础之间的相对位移。



(a) 冲击响应加速度
(a) Shock response acceleration



(b) 冲击过程中相对位移
(b) Relative displacement during shock

图 4 有限元瞬态响应分析结果

Fig. 4 Result of transient dynamic analysis

由图 4 可以得出:

(1) 捷联惯导系统在 X、Y、Z 方向上承受的最大冲击加速度(绝对值)均小于 70g,分别为 66.31g、23.40g、66.48g。

(2) 捷联惯导系统承受的最恶劣的冲击作用可以近似为,X 方向 70g、8ms,Y 方向 25g、8ms,Z 方向 70g、7ms 的半正弦波。按照目前进行结构设计的标准,该指标容易满足。

(3) 隔冲系统造成的捷联惯导系统与基础之间的最大相

对位移沿 3 个轴线的分量分别为 3.78mm、1.27mm、3.69mm,进行结构设计时,必须预留足够的相对运动空间。

4 结论

依据实测冲击加速度时程计算的冲击响应谱图,可以确定满足单自由度隔冲系统性能要求的减振器参数。利用冲击响应谱时域合成方法,得到冲击加速度时程,在有限元环境下进行动力学瞬态响应分析,验证减振器参数是否满足实际多自由度隔冲系统的性能要求。使用该方法进行光纤陀螺捷联惯导的隔冲系统设计,将冲击响应谱在单自由度系统隔冲设计方面的优势与有限元分析强大的数值分析功能相结合,取得了很好的设计效果,对于光纤陀螺捷联惯导的工程化应用具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] Li J L, Fang J C, Ge S S Z. Kinetics and design of a mechanically dithered ring laser gyroscope position and orientation system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(1): 210-220.
- [2] 吴磊,田军,程建华.基于光纤环安装方式的光纤陀螺振动误差抑制方法[J].中国惯性技术学报,2011,19(6):745-748.
Wu Lei, Tian Jun, Cheng Jianhua. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(6): 745-748.
- [3] 赵欣,王仕成,杨东方,等.一种改进的高动态捷联惯导解算算法[J].中国惯性技术学报,2011,19(2):163-169.
Zhao Xin, Wang Shicheng, Yang Dongfang, et al. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(2): 163-169.
- [4] 李俊峰,刘进江,唐献林.激光陀螺捷联惯性组合的系统结构抗振控制[J].中国惯性技术学报,2006,14(1):21-26.
Li Junfeng, Liu Jinjiang, Tang Xianlin. Journal of Chinese Inertial Technology, 2006, 14(1): 21-26.
- [5] 莫平,程晓果,余盛强,等.冲击响应谱在惯导减振缓冲设计中的应用[J].战术导弹控制技术,2008,25(1):60-63.
Mo Ping, Cheng Xiaoguo, Yu Shengqiang, et al. Control Technology of Tactical Missile, 2008, 25(1): 60-63.
- [6] Smallwood D O. Improved recursive formula for calculating shock response spectra[J]. Shock and Vibration Bulletin, 1980, 51(2): 211-217.
- [7] 中国人民解放军总装备部. GJB 150.18A-2009 军用装备实验室环境试验方法 第 18 部分:冲击试验[S].北京:总装备部军标出版发行部,2009.
The PLA General Armaments Department. GJB 150.18A-2009 Laboratory environmental test methods for military materiel Part18: Shock test[S]. Beijing: General Armaments Department Standard Publication Distribution Department, 2009.
- [8] 陈小慧,闫兵,李华超.冲击响应谱时域合成算法研究[J].包装工程,2007,28(2):23-26.
Chen Xiaohui, Yan Bing, Li Huachao. Packaging Engineering, 2007, 28(2): 23-26.
- [9] 张文元. ABAQUS 动力学有限元分析指南[M].香港:中国图书出版社,2005:129-152.
Zhang Wenyan. Handbook of ABAQUS kinetics finite element analysis [M]. Hong Kong: China Tushu Publishing Limited, 2005: 129-152.

(责任编辑 王媛媛)