

光纤陀螺定位定向导航系统振动过程中性能分析

李星海¹, 刘 姝¹, 黄 勇¹, 李宝林¹, 陈述奇¹, 曾 辉¹, 朱 彤¹, 曾 凡²

(1. 中国电子科技集团公司第26研究所, 重庆 400060; 2. 空军驻京西地区军事代表室, 北京 100074)

摘 要: 光纤陀螺定位定向导航系统在某型车辆动态跑车试验过程中出现了共振现象, 引起导航误差大, 因此, 对系统结构进行优化、改进并采用合理的减振设计, 模拟试验和实际跑车试验结果表明, 系统精度得到改善, 达到了设计指标, 满足了总体要求, 该系统可应用于其他陆用车辆导航和火力控制。

关键词: 光纤陀螺; 卡尔曼滤波; 捷联惯导系统; 定位定向; 里程计; 组合导航系统

中图分类号: V241

文献标识码: A

Vibration Performance Analysis of Fiber Optic Gyro Position and Azimuth Determining Navigation System

LI Xinghai¹, LIU Shu¹, HUANG Yong¹, LI Baolin¹, CHEN Shuqi¹, ZENG Hui¹, ZHU Tong¹, ZENG Fan²

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

2. Military Representative Office of Air Force to West Beijing District, Beijing 100074)

Abstract: The resonance was emerged during the outdoor vehicle experiment of the fiber optic gyro position and azimuth determining system, thus brought about relatively great errors. The system structure has been optimized, improved and a reasonable vibration-dampening design has been employed in this work. The simulation results and the outdoor vehicle experiment show that the system accuracy has been improved and satisfied the overall requirements. The improved system can be used to other vehicles and the fire control system.

Key words: fiber optic gyro; Kalman filter; strapdown inertial navigation system; position and azimuth determining; odometer; combined navigation system

0 引言

定位定向导航系统在陆用各种车辆上有着广泛的需求, 特别是各种军用战车的导航、火力控制、稳定控制等都需定位定向系统。经过多年研究, 光纤陀螺定位定向导航系统已日趋成熟, 逐步进入工程应用, 同时也遇到一些实际的工程应用问题, 如行进过程中, 振动、冲击环境下精度如何保证问题。

1 定位定向系统概述

图1为光纤陀螺定位定向导航系统总体组成结构^[1]。图2为光纤陀螺定位定向导航系统工作原理。系统中陀螺和加速度计是特性敏感器件, 陀螺测得的载体角速度信息和加速度计测得的载体比力信息由数据采集器进行模/数转换后被送入导航计算机, 导航计算机将采样数据、GPS信息、高度计信息和里程计信息首先进行预处理和补偿, 得到载体相对于惯性空间的角速率和比力。

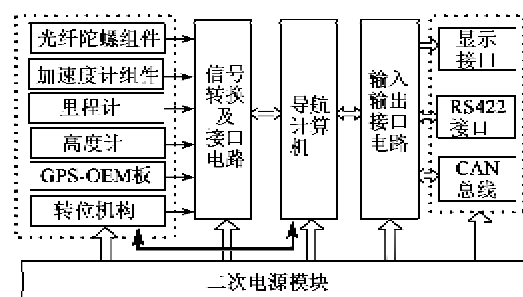


图1 定位定向系统组成框图

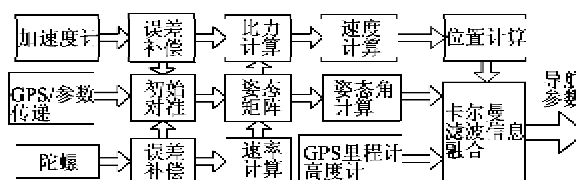


图2 定位定向系统工作原理

导航系统工作分初始对准和导航工作阶段两个

收稿日期: 2013-01-20

作者简介: 李星海(1973-), 男, 重庆人, 高级工程师, 工学硕士, 主要从事数字信号处理的应用、惯性导航系统、组合导航系统研究。Email: lixinghai@sipat.com。

阶段。初始对准分为粗对准和精对准。在粗对准期间,系统利用高精度光纤陀螺敏感地球自转角速度分量,加速度计敏感重力分量,测得系统初始方位角和水平姿态角,对惯性导航系统的初始姿态矩阵和四元数进行初始化。在这过程中,系统采用了转动机构,运用二位置方式对光纤陀螺的零次项漂移进行测定,提高了陀螺的精度,完成粗对准,转入精对准阶段。在精对准期间,导航计算机利用陀螺输出信息通过解四元素微分方程得到四元素向量,然后算出姿态矩阵和姿态角,通过解导航方程,得到载体的速度和位移,同时解出各项导航参数的误差方程,再加上 GPS、里程计及高度计等信息,进行 KALMAN 滤波,得到对载体初始导航参数及陀螺、加速度计误差系数的最优估计,完成初始对准。

初始对准完成后,系统输出地理系下的导航参数并进入导航状态。在导航状态下,导航解算流程与精对准计算过程类似,导航计算机通过解四元素微分方程、导航方程及误差方程,得到载体的速度和位置,结合 GPS、里程计及高度计等信息,采用 KALMAN 滤波信息融合,得到对载体偏航角 α 、俯仰角 θ 、滚动角 γ 、速度、位置等导航参数的最优估计。

光纤陀螺定位定向导航系统经过三轴转台测试、环境试验测试、导航试验车(8座小型客车改装)动态跑车测试,其测量范围及精度如表1、2所示。

表1 光纤陀螺定位定向导航系统的测量范围

方位测量范围/(°)	0~360
俯仰测量范围/(°)	±30(工作),±15(行车定位定向)
滚动测量范围/(°)	±30(工作),±15(行车定位定向)
角速率/[°/s]	±100
加速度/[m/s ²]	±50

表2 光纤陀螺定位定向导航系统的测量精度

定向(寻北)精度/(°)	≤0.06(1 σ ,静态)
姿态精度/(°)	≤0.015(1 σ)
方位保持精度/[°/h]	≤0.12
水平定位精度/m	≤10(CEP,GPS、北斗辅助)
水平定位精度	≤0.2%D(1 h, CEP, D 为行程,自主模式,与里程计组合)
高程中间差/m	≤10(1 σ)

2 车跑车试验分析

光纤陀螺定位定向导航系统研制完成后,装入

某型车辆上进行跑车动态精度试验。跑车过程中,惯性导航系统采集、记录数据,对跑车试验情况进行了分析。

图3~5分别为陀螺 x 、 y 、 z 的输出曲线。陀螺的比例系数分别为 99.893、100.285、293.686。图6~8分别为导航系统输出的航向、俯仰、滚动曲线,导航结束时的方位值为 61.72°,而方位真实值是 68.15°,导航误差为 -6.43°,误差较大。

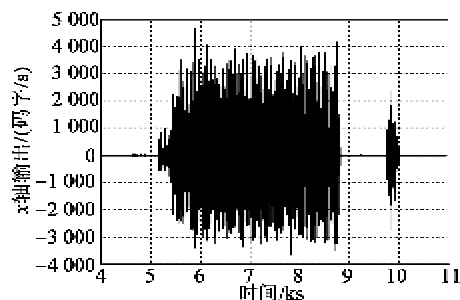


图3 陀螺 x 轴输出曲线

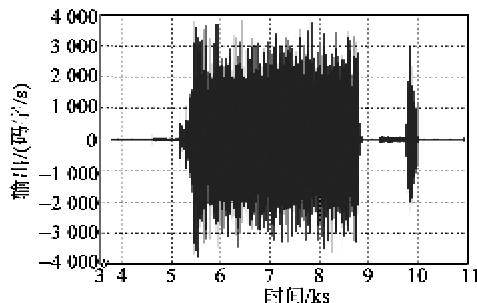


图4 陀螺 y 轴输出曲线

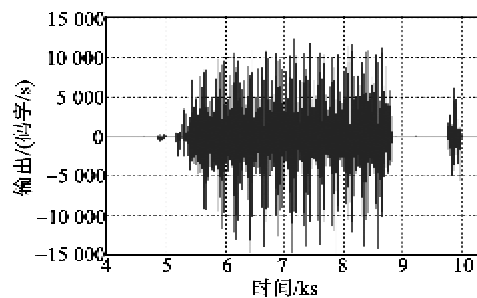


图5 陀螺 z 轴输出曲线

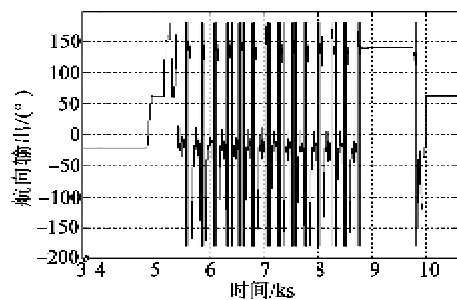


图6 航向输出曲线

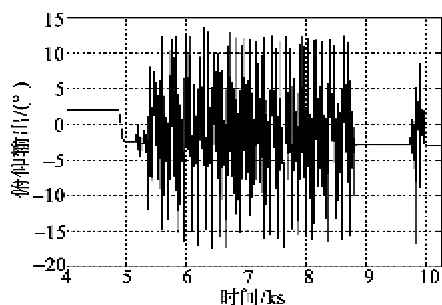


图7 俯仰输出曲线

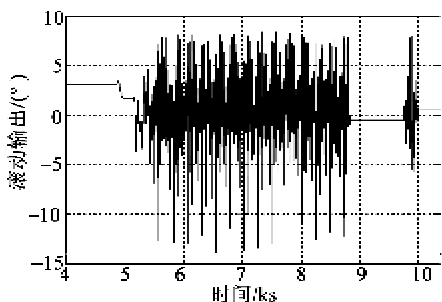


图8 滚动输出曲线

通过反复分析问题,最终确定误差是由于在高速行进过程中车体的振动和冲击对系统影响造成的。图9为对 z 轴陀螺的输出进行微分(差分)后输出曲线。在某一路段角加速度较大,且引起角振动。

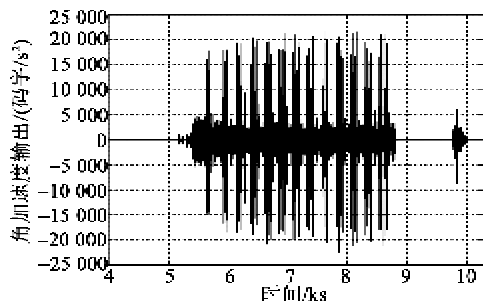


图9 角加速度输出曲线

3 减振分析

3.1 结构刚化法

用SOLIDWORKS软件对系统结构进行仿真分析发现,转台和IMU支撑架是影响整个系统固有频率的关键环节,因此修改了支架的结构形式,调节了转台的涡轮蜗杆间歇、轴承间距,通过反复修改,优化后系统固有频率为215 Hz,比以前系统固有频率增加了110 Hz。

3.2 阻尼减振法

3.2.1 系统减振原理分析

将安装了减振器的系统简化为单自由度物理模型,设备的刚度比减振器高几个数量级,设备做平动,近似将设备看成为刚体。图10为传递率随频率

比的变化曲线图。由图可看出,行程 $D=0.3$,频率比为0.9时,传递率为1.9,对减振器进行刚度设计和控制系统的放大率。

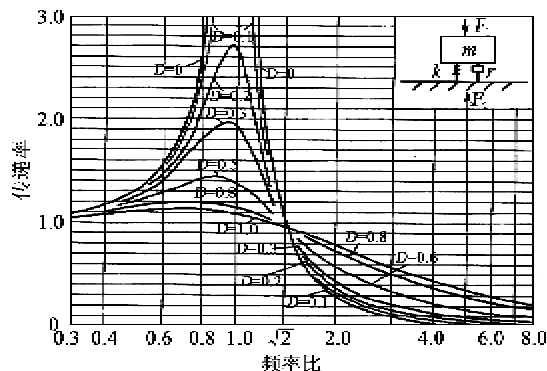


图10 传递率随频率比变化曲线

3.2.2 减振器的设计

产品安装减振器后,常温下3个方向的谐振频率不高于30 Hz,谐振点放大倍数小于1.96,在 $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,谐振频率变化不大于20%。减振器结构及其所使用的橡胶的性能是影响减振器的刚度和阻尼性能的2个主要因素。在减振器的结构尺寸确定后,考虑材料对于刚度和阻尼的影响。

减振器需在高低温下工作,故减振器的橡胶材料首选硅橡胶材料。项目对减振器的频率特性设计完成后,需根据减振器的频率来选择橡胶材料。

橡胶材料的模量和阻尼因子等性能,必须满足所确定的减振器刚度和阻尼系数要求。本课题采用有限元仿真设计法来确定减振器材料的性能;用MSC.NASTRAN有限元软件,对安装了减振器的系统进行频率响应分析,对减振器的减振效果进行仿真分析。经反复调整橡胶材料的剪切模量,最后得出,当橡胶材料的剪切模量为10 MPa,阻尼损耗系数为0.24时,系统各方向的频率响应及放大倍数分别为: x 向,谐振点35 Hz,传递率2.1; y 向,谐振点36 Hz,传递率2.2; z 向,谐振点37 Hz,传递率2.3。减振器的频率适中,各方向放大倍数均为0.7倍左右,基本满足设计要求。由此确定硅橡胶材料的技术条件为:邵氏硬度 $A=50$,拉伸强度7 MPa,扯断伸长率400%,扯断永久变形31%,弹性剪切模量(30 $^{\circ}\text{C}$ 、125 Hz)为10 MPa,损耗系数(30 $^{\circ}\text{C}$ 、125 Hz)为0.24。

4 结构改进后跑车试验

将改进后的定位定向系统安装到振动台上进行模拟振动试验,模拟车跑车中的振动、冲击条件,在振动过程中,系统航向、姿态保持精度高,符合技术

要求,没有以前的共振现象发生。

再次将产品装入某型车辆上进行跑车动态精度试验,在同一试验场进行了3次跑车精度测试,航向保持误差分别为 $+0.03^\circ$, $+0.01^\circ$, -0.02° 。

图11~13分别为陀螺 x 、 y 、 z 的输出曲线,陀螺的比例系数分别为99.893、100.285、293.686。图14~16分别为导航系统输出的航向、俯仰、滚动曲线,导航结束时的方位值为 -106.34° ,而真实方位值是 -106.353° ,导航误差是 $+0.01^\circ$,误差很小。

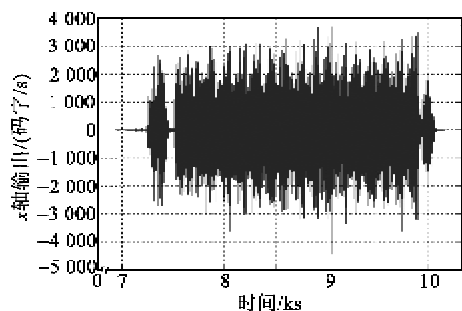


图11 陀螺 x 轴输出曲线

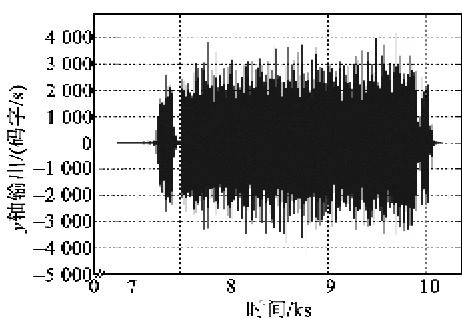


图12 陀螺 y 轴输出曲线

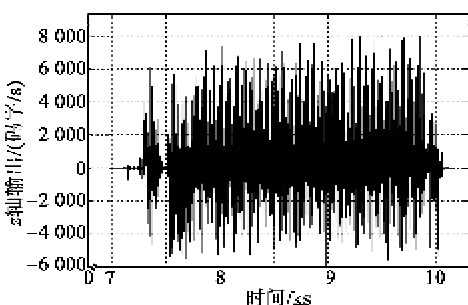


图13 陀螺 z 轴输出曲线

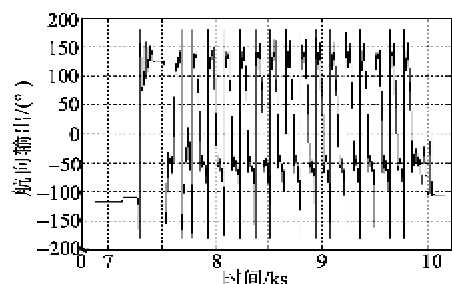


图14 航向输出曲线

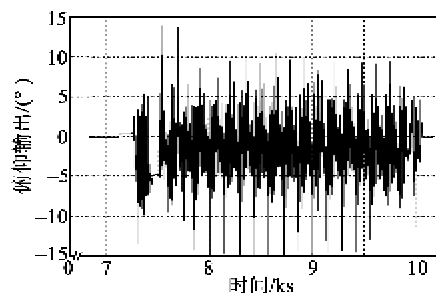


图15 俯仰输出曲线

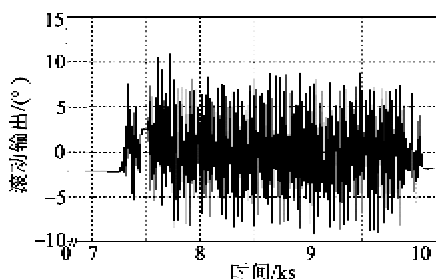


图16 滚动输出曲线

图17为对 z 轴陀螺的输出进行微分(差分)后输出曲线。由图可看出,没有明显的共振现象。

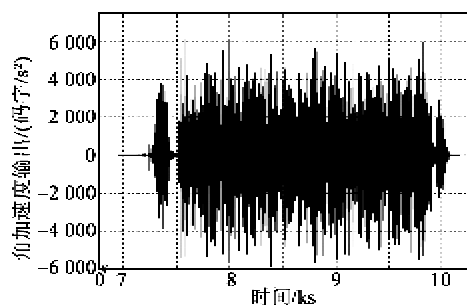


图17 角加速度输出曲线

5 结束语

通过对定位定向系统结构的优化和改进,消除了系统在动态跑车过程中的共振现象,系统满足了某型车火控系统要求。通过工程改进,定位定向系统可推广应用于其他各种陆用车辆。

参考文献:

- [1] 李星海,李勇建,蔡体管,等. 光纤陀螺定位定向导航系统研究[J]. 压电与声光,2010,32(6):953-956.
LI Xinghai, LI Yongjian, CAI Tijing, et al. Study on the fiber optic gyro position and azimuth determining navigation system[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2010,32(6): 953-956.
- [2] 付梦印,邓志红,张继伟. Kalman滤波理论及其在导航系统中的应用[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [3] 秦永元,张洪钺,汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,2004.