

MEMS 航姿系统振动环境适应性研究^{*}

常 健 李荣冰 刘建业 刘 浩

(南京航空航天大学导航研究中心 南京 210016)

摘 要: 针对 MEMS(微机械)航姿系统的性能受振动环境的影响,提出了 MEMS 航姿系统减振设计方案。根据 MEMS 航姿系统的工作原理,分析了振动环境对 MEMS 航姿系统的性能影响;基于被动减振设计的原理,设计了航姿系统减振结构,基于振动环境中 MEMS 惯性传感器的数据特征,设计了一种自适应变步长平滑滤波器用于平滑振动加速度,应用平滑后的加速度信息与 MEMS 陀螺测得的角速度信息进行融合,实现了振动环境下的姿态解算。MEMS 航姿系统的振动环境试验验证了论文提出的减振方案与振动环境下数据处理算法的有效性。

关键词: MEMS 航姿系统;减振设计;平滑滤波器

中图分类号: TP202⁺.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

The research of vibration environmental adaptability of MEMS AHRS

Chang Jian Li Rongbing Liu Jianye Liu Hao

(Navigation Research Center, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A vibration damping design of MEMS AHRS has been proposed to reduce the effect of vibration environment. The effect of vibration environment on the MEMS AHRS performance has been analyzed based on the working principle of the MEMS inertial sensors. A damping structure of MEMS AHRS has been designed. And a variable step size adaptive smoothing filter used to smooth the vibration acceleration has been designed based on the characteristics of MEMS inertial sensors under the vibration environment. Then, the smoothed acceleration and the gyroscopes' information were fused to realize the attitude estimation under the vibration environment. The damping design and the data processing algorithm of MEMS AHRS under the vibration environment has been proved by the vibration test.

Keywords: MEMS AHRS; damping design; smoothing filter

1 引 言

微型航姿系统具有成本低、体积小、重力轻、自主性强等特点,在制导武器、无人机等航空飞行器以及其他运动载体中具有重要应用^[1]。基于哥氏力效应敏感角速度的 MEMS 陀螺仪和弹性结构与质量块敏感加速度的 MEMS 加速度计在振动环境下的误差显著增大,因此,基于 MEMS 惯性传感器的 MEMS 航姿系统易受振动环境的影响^[2-5]。

本文针对 MEMS 航姿系统的振动环境适应性需求,分析振动环境对 MEMS 航姿系统的影响^[6-10],从硬件结构和

软件算法上研究适合于 MEMS 航姿系统的减振方式,试验结果表明该减振方式能够很好地消除振动环境对 MEMS 航姿系统输出性能的影响。

2 MEMS 航姿系统及其振动环境适应性要素分析

MEMS 航姿系统主要由 3 轴 MEMS 加速度计、3 轴 MEMS 陀螺仪、磁传感器、导航计算机、输入输出接口构成,如图 1 所示。

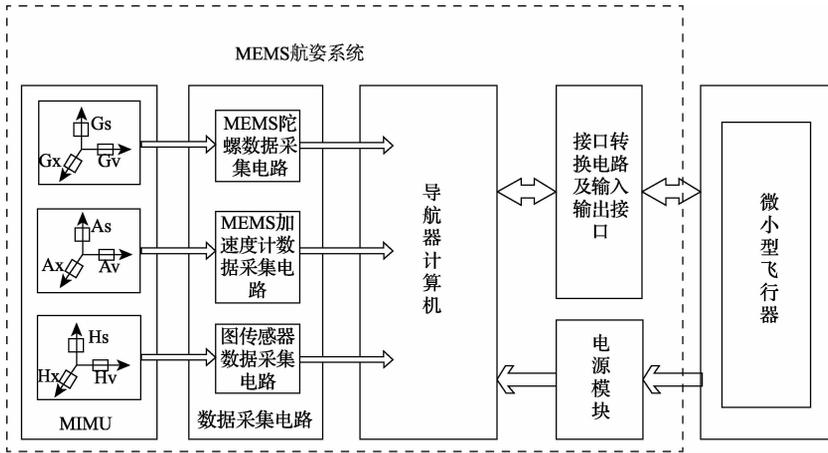


图 1 MEMS 航姿系统结构

MEMS 航姿系统中微惯性传感器的工作原理导致 MEMS 惯性传感器易受振动环境因素影响。MEMS 加速度计主要目的是测量载体的运动加速度，在载体运动和振动环境下，振动加速度与运动加速度同时作用于 MEMS 加速度计的敏感质量块，振动加速度与运动加速度耦合。

MEMS 陀螺仪主要目的测量载体的运动角速度，在振动环境下虽然其激励模态与检测模态的频率远高于载体的振动频率，但其敏感结构在振动环境激励下发生形变，进而影响 MEMS 陀螺仪的激励和检测模态，导致 MEMS 陀螺仪在测量角速度的同时，也能敏感环境振动的激励作用。

作为航空电子产品，通常随机振动试验中所要求的振动功率谱密度如图 2 所示，图 2 中的随机振动功率谱密度曲线的面积即为振动加速度的均方差值，在时域内，20~2 000 Hz 功率谱密度曲线对应的振动加速度均方差约为 6.4g ($g=9.8\text{m/s}^2$)，下图为随机振动试验中 MEMS 惯性传感器输出的原始数据。

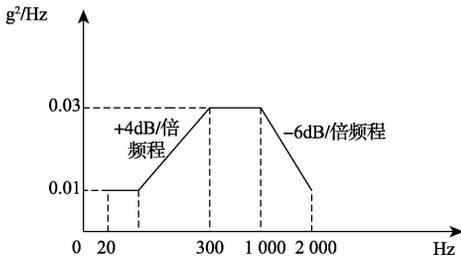


图 2 MEMS 惯性传感器振动功率谱密度图

图 3 中前 100 s 为静止阶段，此阶段 MEMS 惯性传感器输出正常；100~1 200 s 为随机振动阶段，此时 MEMS 加速度计和 MEMS 陀螺仪输出噪声急剧增大。MEMS 加速度计的带宽约为 300 Hz (图 2 中该频带对应的振动加速度均方差值为 2.1g)，图 3(a) 中的 MEMS 加速度计输出加速度的均方差为 1.9g，该曲线反映了随机振动在其带宽范

围以内激励的影响；MEMS 陀螺仪的抗振量为 8.8g，图 3(b) 中 MEMS 陀螺仪输出在其量程范围内，其输出角速度的均方差为 6.5°/s，MEMS 陀螺仪在随机振动环境下的输出性能下降。

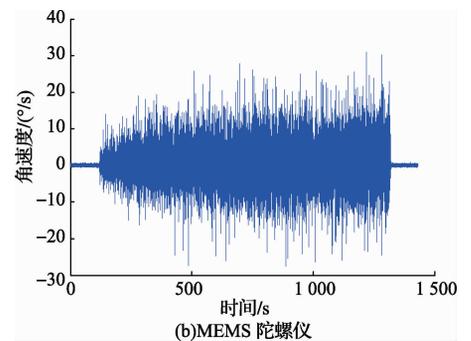
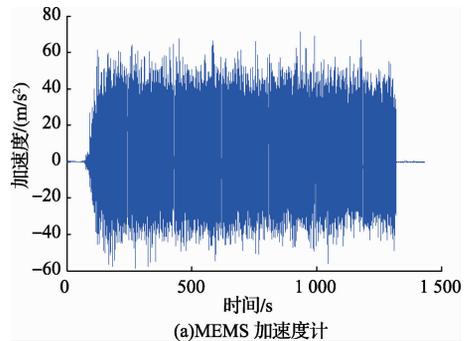


图 3 随机振动环境下 MEMS 惯性传感器输出原始数据图

3 MEMS 航姿系统的减振设计

3.1 MEMS 航姿系统减振结构设计

从结构上来说，减振是指在振源和被保护系统之间安装减振器，使得设备与振源之间的刚性连接转变为弹性连接，本文利用有限元仿真的方式进行减振结构特性的优化

与筛选,建立 MEMS 航姿系统的 Pro/E 模型和橡胶夹持式减振结构的 Pro/E 模型,如图 4 所示。

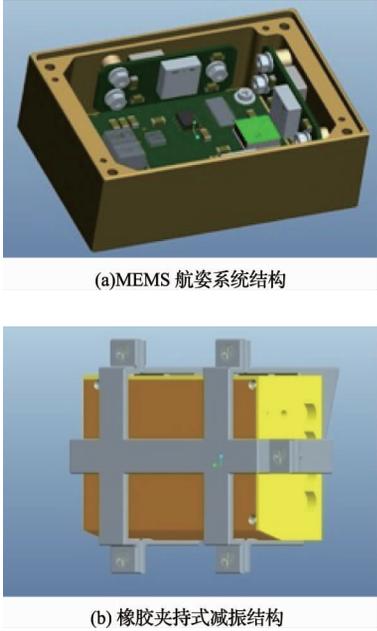


图 4 MEMS 航姿系统减振设计结构

图 4(b)中框架和系统间安装用于隔振的橡胶垫,且框架和系统的空隙可调,这样橡胶垫的种类和厚度均可调。利用 ANSYS 对图 4 中两种 Pro/E 模型结构进行模态分析,设置橡胶属性并通过仿真分析,寻找最优频率比和阻尼比的橡胶垫种类,得到两种模型的前四阶固有频率如表 1 所示。

表 1 MEMS 航姿系统减振结构固有频率表

阶数	减振前频率/Hz	减振后频率/Hz
1	566.27	17.409
2	604.39	17.447
3	980.99	52.022
4	1 179.9	64.424

由表 1 可知,MEMS 航姿系统的固有频率较高,因此系统受高频振动的影响较大。经过减振设计后,系统的截止频率大大降低,高频振动对系统的影响可以忽略不计。对 MEMS 加速度计而言,由于低频段振动与载体的运动频带重叠,在减振结构截止频率及以下的振动仍会被 MEMS 加速度计敏感。

3.2 基于模糊控制的自适应变步长平滑滤波器设计

减振结构设计用于改善 MEMS 惯性传感器的工作环境,但是在该环境下 MEMS 加速度计的输出还无法满足姿态解算的要求。然而,不同的振动环境下其振动的频率、方向以及量级未知,若滤波步长过小,则会影响平滑滤波的效果,若滤波步长过大,则会产生延迟影响姿态解算

的实时性。

本文基于 MEMS 加速度计在随机振动环境下测量信号的统计规律,从软件算法上对 MEMS 加速度计输出信息进行处理。设计了一种模糊推理规则,在线监测一定时间段内的三轴 MEMS 加速度计输出的均方差,作为模糊推理系统(FIS)的输入,在线得到平滑滤波的步长。模糊控制系统包括输入输出模糊化、模糊推理以及去模糊化 3 个部分。

1) 输入输出模糊化

设输入变量的区域 $V = \{0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14\}$, 对应载体的稳定程度,输出变量的区域 $N = \{8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40\}$, 表示平滑滤波的步长。设输入变量的语言值为 $V \in \{big, medium, small\}$, 输出变量的语言值为 $N \in \{big, medium, small\}$ 。输入输出隶属度如图 5 所示。

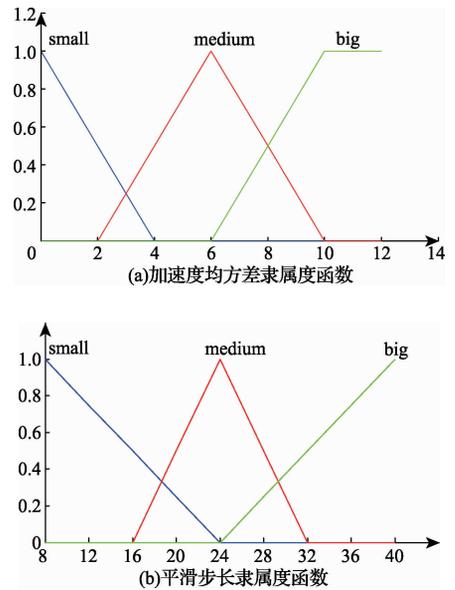


图 5 输入输出隶属度函数

2) 控制率设计及模糊逻辑推理

模糊控制器由以下三条控制率构成:

$$R_1: if V = small then N = small$$

$$R_2: if V = medium then N = medium \quad (1)$$

$$R_3: if V = big then N = big$$

该控制率主要体现了当三轴 MEMS 加速度计输出的合加速度增大时,平滑滤波器的步长也相应增加。

则上述规则 R_1 、 R_2 、 R_3 的隶属度函数如下所示:

$$\mu_{R_1}(N, V) = \min[\mu_{small}(V)^T \cdot \mu_{small}(N)];$$

$$\mu_{R_2}(N, V) = \min[\mu_{medium}(V)^T \cdot \mu_{medium}(N)]; \quad (2)$$

$$\mu_{R_3}(N, V) = \min[\mu_{big}(V)^T \cdot \mu_{big}(N)]$$

由于规则 R_1 、 R_2 、 R_3 是用“或”算子连接的,故总的隶属度函数为 3 个规则隶属度函数的最大值,即:

$$\mu_R(N, V) = \max_{N, U} [\mu_{R_1}(N, V), \mu_{R_2}(N, V), \mu_{R_3}(N, V)] \quad (3)$$

3) 去模糊化

采用数字积分近似替代面积法进行去模糊化, 数字积分的形式如式(3)所示:

$$CV_* = \frac{\sum_{i=1}^n CV_i \mu_{CV}(CV_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{CV}(CV_i)} \quad (4)$$

计算所有的输入均方差, 经模糊控制器, 得到输出的平滑滤波器窗口的宽度表如表 2 所示。

表 2 经模糊控制器处理后的输入输出

V	0	2	4	6	8	10	12
N	13	15	26	26	40	40	40

4 试验结果及分析

加入减振设计前后 MEMS 惯性传感器在随机振动环境下输出的原始数据均方差图 6 和表 3 所示。

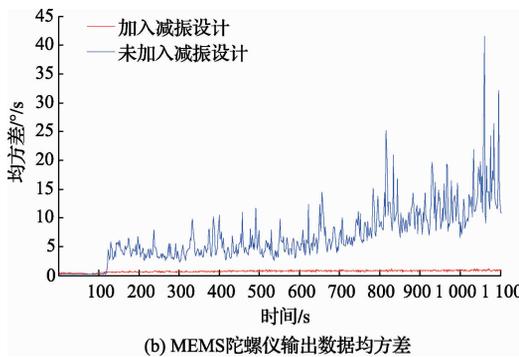
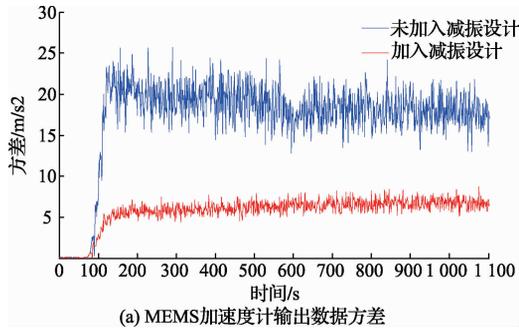


图 6 加入减振设计前后 MEMS 惯性传感器输出原始数据均方差

表 3 MEMS 惯性传感器随机振动下输出原始数据均方差

均方差项	MEMS 加速度计	MEMS
	/m · s ⁻²	陀螺仪/(°/s)
静态	0.083	0.28
无减振结构	18.56	9.31
橡胶垫减振结构	6.37	0.76

设计前后输出的姿态角对比曲线如图 7 所示。

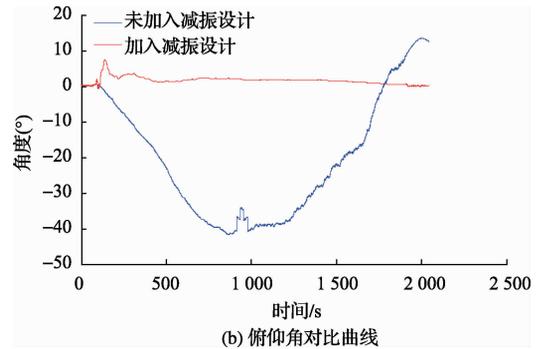
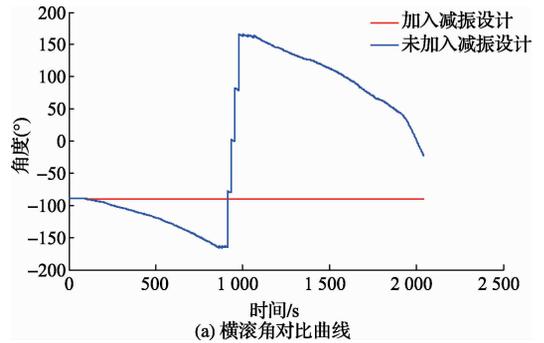


图 7 MEMS 航姿系统加入减振设计前后试验对比

分析上述图表可得: 橡胶垫减振结构几乎消除了振动对 MEMS 陀螺仪的影响, 在该减振方式下, 振动对 MEMS 加速度计的影响显著减小; 在未加入减振设计的情况下, MEMS 航姿系统在振动环境下输出姿态完全偏离真实基准, 姿态角误差发散。加入减振结构后, MEMS 惯性传感器的工作环境得到显著改善, 模糊平滑滤波器进一步提高了测量精度。综合减振结构与姿态算法两方面的改进措施, MEMS 航姿系统在振动环境下输出的横滚角误差为 1.23° (1σ), 俯仰角误差为 2.13° (1σ), 有效地提高了 MEMS 航姿系统对振动环境的适应性和振动环境下的测量性能。

5 结 论

研究了 MEMS 加速度计和陀螺仪的随机振动响应特性, 通过振动环境试验验证了随机振动环境对 MEMS 航姿系统的性能影响。

在硬件结构上设计了橡胶夹持式减振结构, 从软件算法上设计了基于模糊控制的自适应变步长平滑滤波器。经过振动试验, 验证了上述减振设计能有效消除振动对 MEMS 航姿系统的影响, 这对 MEMS 航姿系统满足随机振动环境下输出性能具有实际的意义。

参考文献

[1] 秦国庆, 赖际舟, 陈阻, 等. 捷联航姿系统加速度计振动噪声平滑技术[J]. 电子测量技术, 2013, 36(4):

MEMS 航姿系统在振动台随机振动环境下, 加入减振

- 87-91.
- [2] 郭兴军,李鹏伟,张文栋,等. 基于电容式 MEMS 器件的静电斥力驱动研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1738-1743.
- [3] BARBOUR N M. Inertial navigation sensors[R]. Charles Stark Draper Lab Inc Cambridge Ma, 2010.
- [4] 王平,刘家燕,李永刚,等. 机载光电平台外框架结构优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 84-91.
- [5] 姜昊,姜金辉. 航空结构连接件细节内力分析方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(9): 22-24.
- [6] ROHAC J, REINSTEIN M, DRAXLER K. Data processing of inertial sensors in strong-vibration environment[C]//2011 IEEE 6th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing System: Technology and Applications, 2011: 71-75.
- [7] 汪少初,刘昱,郝文飞,等. 基于惯性传感器的人员行进动作识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(6): 630-636.
- [8] LAI Y C, JAN S S. Attitude estimation based on fusion of gyroscopes and single antenna GPS for small UAVs under the influence of vibration [J]. GPS Solution, 2010, 15(1): 67-77.
- [9] LOPES H D, KAMPEN E, CHU Q P. Attitude determination of highly dynamic fixed-wing uavs with gps/mems-ahrs integration [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2012: 4460.
- [10] 周成刚,毛亮,张煜昕. 基于 MEMS 传感器的船载天线振动检测系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(5): 59-62.
- [11] 杨文芳,魏强,朱兰琴. 基于有限元分析的机载电子设备减振设计[J]. 振动与冲击, 2010, 29(5): 230-234.
- [12] 刘建业,杭义军,李荣冰,等. MEMS 微惯性姿态系统的环境适应性优化设计技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(5): 669-676.

作者简介

常健, 1990 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为微型惯性导航技术。

E-mail: changjian@nuaa.edu.cn

李荣冰, 1977 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为卫星导航与组合导航技术。

E-mail: lrbing@nuaa.edu.cn

(上接第 88 页)

- [5] 邓芳明,何怡刚,张朝龙,等. 低功耗全数字电容式传感器接口电路设计[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 36-40.
- [6] YANG W Q, STOTT A L, BECK M S. High frequency and high resolution capacitance measuring circuit for process tomography [J]. IEEE Proceedings-Circuits, Devices and Systems, 1994, 141(3): 215-219.
- [7] 邢本凤. 高精度微弱电容检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [8] 冯佳,李佩玥,徐立松,等. 基于反馈的交流激励式电容测量电路设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(11): 44-48.
- [9] 李颖,朱伯立,张威. Simulink 动态系统建模与仿真基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [10] 徐小俊,谢克明,闫高伟. DDS 在 SIMULINK 中的仿真设计[J]. 太原: 太原理工大学学报, 2006, 3.
- [11] 李强,王名钢,杨尧. 快速原型中 Simulink 模型的代码自动生成[J]. 电子测量技术, 2009, 32(2): 33-36.
- [12] 张占强,孟克其劳. 基于 Proteus 的多波形信号发生器仿真设计[J]. 电子测量技术, 2013, 36(3): 21-25.

作者简介

邓浩, 硕士研究生。主要研究方向为地学仪器的研发与测试技术等。

E-mail: denghaodh@126.com

(上接第 92 页)

- [6] 郭辉. 基于 IrDA 红外通信协议的单片机控制电路[J]. 仪表技术, 2013(6): 29-30.
- [7] 谢秀颖,彭伟,张桂青,等. 基于电力载波技术的建筑设备物联网节点研制[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(5): 1651-1656.
- [8] 周旭坤,杨冠鲁. 基于 ZigBee 和 PLC 技术的智能家居系统的研究[J]. 微型机与应用, 2013, 32(9): 38-41.
- [9] 焦尚彬,宋丹,张青,等. 基于 ZigBee 无线传感器网络的煤矿检测系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(5): 436-442.
- [10] 刘雍. 基于 S3C6410 的嵌入式 Web 视频仿真门禁系统设计[J]. 软件, 2013, 34(2): 4-6.

作者简介

李冠君, 云南大学信息学院 2012 级电子信息科学与技术专业本科生。

E-mail: sdqdlgj@126.com

王威廉(通讯作者)教授。主要研究方向为信号与信息处理。

E-mail: wlwang_47@126.com