

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005456

基于三轴数字加速度计的尾翼振动测试系统研究

张泽宇^{1,2} 鲍爱达^{1,2} 马游春^{1,2} 杜壮波^{1,2}

(1.中北大学 电子测试技术国家重点实验室 太原 030051; 2.中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: 针对导弹发射过程中尾翼身处高温、高压、高过载等恶劣环境时的振动信号难获取和实测信号失效等问题,利用动态存储测试技术和三轴数字加速度计,设计了一种基于 ADXL345 三轴数字加速度计的尾翼振动测试系统。具体通过选择适宜的尾翼振动测试加速度传感器,构建抗冲击力强的多重缓冲外层结构,成功实现了对导弹尾翼振动信号的真实采集,并通过分析采集得到的尾翼振动数据,得到了有效的振动加速度曲线和振动频谱图,为尾翼结构的改进提供了重要的依据,对今后采集尾翼振动信号的研究有着重要的意义。

关键词: 动态存储测试技术;三轴数字加速度计;加速度;ADXL345

中图分类号: TP306 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Research on tail wing vibration test based on three-axis digital accelerometer

Zhang Zeyu^{1,2} Bao Aida^{1,2} Ma Youchun^{1,2} Du Zhuangbo^{1,2}

(1.National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051,China;

2.Key Laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051,China)

Abstract: Aiming at the problems of difficulty in obtaining vibration signals and failure of measured signals in the harsh environment of high temperature, high pressure, high overload, etc. of missile tail during launch, we design a three-axis based on ADXL345 using dynamic storage test technology and three-axis digital accelerometer in this paper. Specifically, by selecting a suitable empennage vibration test acceleration sensor and constructing a multi-buffer outer structure with strong shock resistance, the real acquisition of the vibration signal of the missile empennage was successfully realized. And the effective acceleration curve and the vibration spectrogram were obtained by analyzing and collecting the vibration data of the empennage, which provide an important basis for the improvement of the tail structure, and are of great significance to collect the tail vibration signal in the future.

Keywords: dynamic memory testing technology; three-axis digital accelerometer; acceleration; ADXL345

0 引言

目前大多战术导弹采用箱式发射,导弹尾翼一般采用折叠式翼面^[1],在发射箱中处于折叠状态。当导弹飞离发射箱时,尾翼自动展开到正常位置^[2]。由于展开过程的时间短、冲击大,尾翼会出现明显振动。考虑到尾翼的振动过大会对导弹姿态的调整产生不利影响,进而降低导弹在发射过程中的可靠性和制导精度,因此测试导弹尾翼在展开过程时的振动是研究弹体结构振动的一项重要内容,也是尾翼结构优化、故障分析的重要试验依据^[3]。目前由于导弹尾翼在发射过程中所处环境恶劣(高温、高压、高过载),存在加速度信息获取困难及实测信号失效等问题,使得导

弹尾翼振动参数的测量成为研究导弹飞行过程中的一个测试难题^[4-5]。目前,李庆会等^[6]提出一种基于 ADXL50 单片集成加速度传感器的振动加速度测量方法,这种测试方法具有信噪比高、结构简单、可靠性高的优点,但是测得的加速度准确性较差;李洪才提出应用美国 ADI 公司生产的数字输出双轴加速度传感器 ADXL210E 检测导弹振动加速度,该传感器具有高 g 值、低功耗、小体积等特点,但是由于较高的封装要求和制造成本,阻碍了它的应用发展。针对以上问题,本文利用低功耗、分辨率高、低成本的 ADXL345 三轴数字加速度计^[7-8],设计了一种尾翼振动测试系统,该系统具有结构简单、抗冲击能力强、可靠性高等优点,实现了对尾翼振动信号的采集存储。

收稿日期:2020-11-29

1 测试系统原理

弹载尾翼振动测试系统在试验导弹中的位置如图 1 所示。将本系统安装在弹体中心轴线上,并通过螺纹与钢槽进行加固稳定,防止其在导弹的飞行过程中脱落。其中,三轴数字加速度计安装在弹载尾翼测试系统底部,并与尾翼测试系统紧密粘合,以便充分吸收尾翼的振动信号。

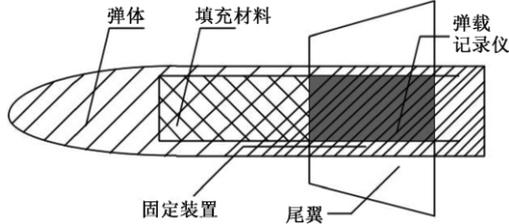


图 1 弹载尾翼振动测试系统

弹载尾翼振动测试系统是由三轴数字加速度计、Flash 存储模块、USB 读数模块、电源管理模块及 FPGA 主控模块组成^[9]。图 2 所示为本测试系统的原理。在工作状态下,三轴数字加速度计首先将采集到的尾翼振动模拟信号转换成数字信号输出;然后当输出信号满足内触发的条件时,FPGA 通过 4 线 SPI 接口对三轴数字加速度计内寄存器存储的数据进行读取^[10];最后在试验结束后回收弹载尾翼振动测试系统,并利用上位机软件通过 USB 读数模块读取 Flash 内存储的尾翼加速度值。将处理后的数据用于分析研究导弹尾翼在实际飞行过程中的振动情况。

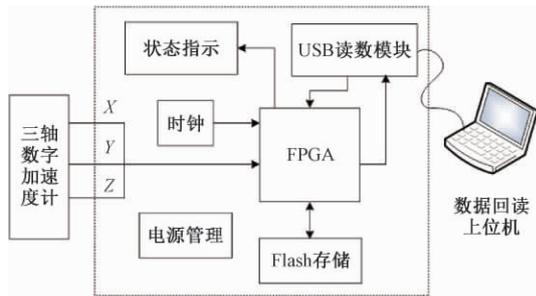


图 2 弹载尾翼记录仪测试系统原理

2 加速度传感器的选择

弹丸在靶场的动态测试中,传统测试传感器无法满足在高温、高压、高过载等复杂环境中进行长时间、高功耗的工作。ADXL345 三轴数字加速度传感器由于抗干扰能力强、功耗低、量程可变、分辨率高、中断方式灵活等优点受到广泛关注,而且可在复杂多变的环境下进行多种运动状态检测,能够满足弹丸动态加速度的精准测量。因此,本文选择了 ADXL345 三轴数字加速度计来测量导弹尾翼振动信号。

ADXL345 是一款基于 MEMS 技术低功耗的三轴数字

加速度传感器。传感器内部集成了一个 32 级 FIFO 缓冲器可用于数据存储。可对高达 ±16 g 的加速度值进行 13 位的高分辨率测量,输出 16 位二进制补码格式的数字数据。ADXL345 三轴数字加速度计的加速度灵敏度轴如图 3 所示。用振动台对 ADXL345 三轴数字加速度计进行了标定实验,实验现场如图 4 所示。

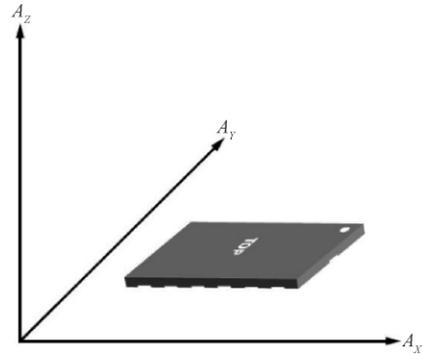


图 3 加速度灵敏度轴



图 4 传感器的标定实验

导弹在飞行过程中振动环境的频率范围在 20~2 000 Hz 之间,所以选取这个范围内的频率作为标定传感器的频率区间。设置振动台以恒定的 10 g 加速度稳定振动,标定的结果如表 1 所示,实验误差均在传感器 ±1% 精度范围内。

表 1 传感器标定

频率/ Hz	加速度/ g	灵敏度/ (LSB·g ⁻¹)	误差/ %
20	9.43	31.82	0.56
100	9.43	31.82	0.56
500	9.43	31.82	0.56
1 000	9.24	31.74	0.81
1 500	9.24	31.74	0.81
2 000	9.24	31.74	0.81

3 结构设计

在导弹发射过程中,由于系统易受高温、高压、高冲击

等恶劣的环境因素影响,可能导致内部电路损坏无法获得可靠数据。为解决此问题,本文设计了一种具有较高抗冲击能力的小型弹载尾翼振动测试系统结构。

如图5所示,尾翼记录仪的外壳是尺寸内径为68 mm,外径为85.5 mm的圆弧,内有半径为5.5 mm的圆形安装孔。其结构小巧轻便,适合用于内部空间狭小的导弹使用。该结构使用高强度的45号钢作为机械外壳结构的主体部分。相较于普通钢材,45号钢具有更高的强度和抗变形能力^[11]。内层构造使用泡沫铝作为缓冲材料,环氧树脂作为灌封材料,并使用橡胶将除了USB读数接口以外的其它钢体结构胶装密封固定^[12]。因此形成了橡胶缓冲、环氧树脂灌封、泡沫铝和45号高强度钢的多重缓冲结构,这种结构不仅极大提升了测试系统抗冲击的能力,还保护了内部核心电路,提高了试验的可靠性。

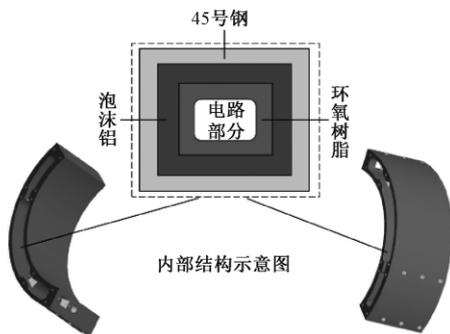


图5 弹载尾翼记录仪封装结构

4 系统设计

4.1 硬件设计

该尾翼振动测试系统的硬件电路主要由主控模块、ADXL345 外围电路、电源模块以及外部接口组成。其中主控模块包括 Flash 存储模块、USB 读数模块和 FPGA 模块^[13]。它可以实现了记录仪的初始化、信号处理、数据的采集和存储等多种功能^[14]。其中 FPGA 模块控制其他模块的工作及数据的写入与读取。考虑到项目需求和芯片开发成熟度,本文选择了 Xilinx 公司推出的 Spartan3 系列 XC3S400 芯片。该芯片内部有 5 个可编程单元,74 880 个逻辑单元,可以调配庞大的逻辑资源,具有强大的仿真编程能力;且体积小巧,满足了弹载尾翼振动测试系统小型化的需求。存储模块选用的是镁光公司的 MT29F64G08AJABA 系列 Flash 闪存芯片,数据写入的时钟速度 8 MHz。与一般 Flash 芯片的逻辑设计相同,该存储模块的逻辑设计包括 Flash 的初始化、数据擦除、数据写入、数据读取等。测试系统读数模块选用的是 USB 转 UART 芯片 FT232H,它可支持 USB2.0,数据传输速度可达 480 Mb/s。在 USB 读数模块的设计中,使用的是 USB 转异步 245 FIFO 的模式,在该模式下,其数据传输速率最高可达 8 Mb/s,满足系统对

数据传输的要求。

在本设计中,ADXL345 三轴加速度传感器采用 4 线 SPI 接口与 FPGA 主控模块相连,如图 6 所示。 \overline{CS} 为串行端口使能线,由主控制器 FPGA 控制,工作状态为低电平,空闲状态为高电平;SCLK 是由 FPGA 提供的串行时钟,在无数据传输时为高电平;SDI 为串行数据输入,SDO 为串行数据输出;在 SCLK 下降沿时,传感器通过 SDI 采集加速度值;在 SCLK 为上升沿时,传感器通过 SDO 将寄存器内存储的数据发送给 FPGA 模块。VDD I/O 和 VS 接 3.3 V 的电压,在电源与地之间并联两个 1 和 0.1 μ F 电容。ADXL345 为驱动中断提供两个输出引脚:INT1 和 INT2,默认为高电平有效。

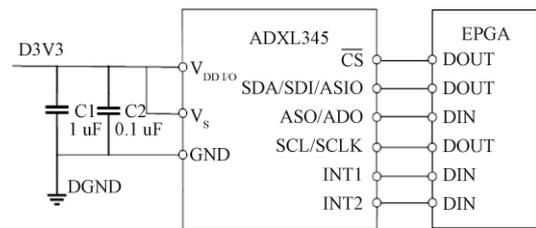


图6 ADXL345 采用 SPI 接口与 FPGA 相连

FPGA 通过 SPI 接口协议读取三轴数字传感器 X/Y/Z 3 个方向的加速度值。试验结束后,FPGA 主控模块将 flash 模块内存储的加速度的数据通过 RS232 标准协议接口以 5 Mb/s 的速率发送给上位机进行数据的分析处理^[15]。

4.2 软件设计

为了满足导弹尾翼振动测试的实际情况,我们将测试系统安装在导弹上 2 h 后发射,在此期间 ADXL345 传感器保持在一种低功耗的电源模式状态下。在经过 2 h 的等待之后,记录仪上电启动;经 5 s 的短暂复位延时后,采集装置正式进入了工作状态。软件设计流程如图 7 所示。

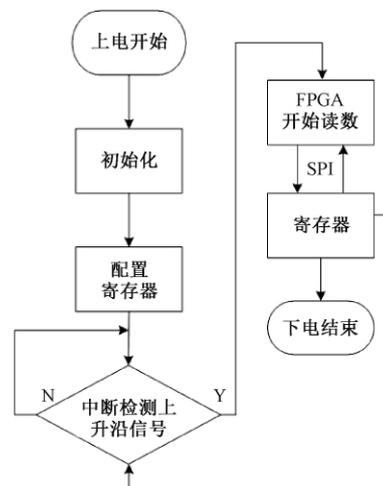


图7 软件设计流程

上电之后等待 1.1 ms,开始发送初始化序列,初始化完成后,ADXL345 开始正常工作。FPGA 通过 SDI 对传感器的 3 个寄存器进行配置。第 1 个寄存器名称为 DATE_FORMAT,地址为 0X31,具有 13 位分辨率,16 g 的量程,3 200 Hz 的数据更新率;第 2 个寄存器名称为 POWER_CTL,地址为 0X2D,具有测量功能;第 3 个寄存器名称为 INT_ENABLE,地址为 0X2E,具有使能中断功能。3 个寄存器配置完成后,三轴数字加速度传感器采集连续较强的尾翼振动信号,当中断检测有效时,FPGA 通过 SPI 接口协议读取传感器采集的 3 个方向振动加速度值。

该软件系统的工作流程可以总结为:FPGA 先通过 SDI 把地址位发送给三轴传感器,并按写入的地址位通过 SDO 读取三轴传感器 X/Y/Z 3 个方向的加速度值。其中 X 轴输出数据保存在寄存器 0x32 和 0x33 中,Y 轴输出数据保存在寄存器 0x34 和 0x35 中,Z 轴输出数据保存在寄存器 0x36 和 0x37 中。在读取完第一个寄存器的数据后,ADXL345 会自动将地址指向下一个寄存器,直至寄存器内所有的数据被全部读取。读取后的数据将存储在 flash 模块中。待导弹落地后,将记录仪下电,再通过上位机读取记录仪 flash 内存储的尾翼振动数据。

5 靶场实测实验数据分析

在实弹试验前,导弹尾翼振动测试系统需与导弹进行联调试验,检测测试系统是否能正常采集存储尾翼的振动加速度信号。联调试验顺利完成后,上位机对联调试验过程中尾翼振动测试系统采集的无效数据进行复位、擦除。当导弹进入预发射状态,测试系统上电启动,经过 5 s 的复位延时后,测试系统正式进入了工作状态,开始对导弹尾翼振动数据进行采集存储。

在靶场实弹试验后,使用上位机对回收的弹体进行读数,得到了如图 8 所示的尾翼振动加速度曲线。从图 8 中可以看出在测试系统上电后 550~580 s 之间弹体在出炮口时三轴加速度传感器采集到较强的振动加速度信号。利用 MATLAB 将此时间段读取的尾翼振动加速度信号进行 150 Hz 的低通滤波处理,得到了如图 9 所示的尾翼振动滤波曲线。从图 9 中可以看到,振动加速度值高达 10.79 g,脉宽为 3.1 s。接着利用 MATLAB 对振动信号进行 Fourier 变换,得到了振动信号的频谱,如图 10 所示。

根据尾翼振动滤波曲线以及频谱分析数据可知,第一频谱峰值为 102.3 Hz,尾翼振动信号的主频集中在 100 Hz 附近。因此根据该频率可针对性的进行尾翼模态分析以及结构改进,或者采取其他的必要措施,减小系统共振带来的影响,从而提升尾翼的整体性能。

在本次的炮弹发射试验中,利用 ADXL345 三轴数字加速度传感器采集有效的尾翼振动信号,并通过弹载尾翼记录仪完成对数据的采集与存储。当弹体回收后利用上位机通过记录仪的外接读数接口完整地读取了数据,并用

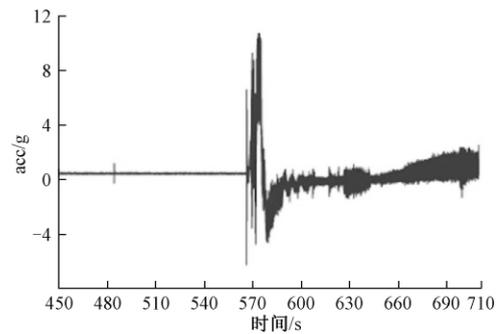


图 8 尾翼振动加速度曲线

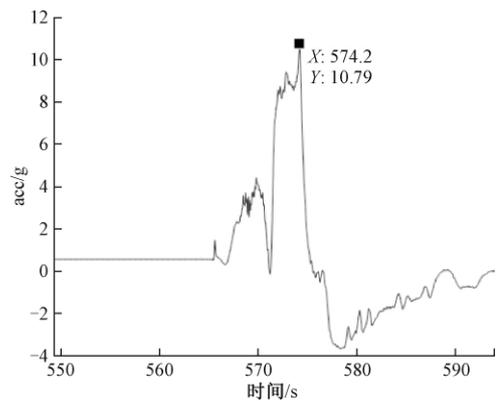


图 9 尾翼振动滤波加速度曲线

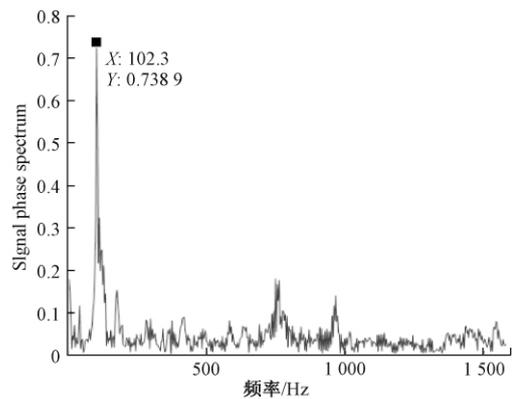


图 10 频谱

MATLAB 对数据进行处理和滤波后,得到了真实有效的尾翼振动加速度曲线和频谱分析图,用于分析研究尾翼在炮弹发射过程中的振动情况。

6 结 论

本文将 ADXL345 三轴数字加速度传感器、FPGA 模块、USB 读数模块,Flash 存储模块等结合在一起,设计一种尾翼振动测试系统。该系统能对导弹尾翼振动信号进行采集存储,并在靶场实弹试验中验证了该系统的可行性,

成功获取尾翼振动的有效数据。之后对获取的数据进行处理得到振动信号频谱图,为减小共振造成的影响提供数据支撑。同时针对导弹尾翼在发射过程中受到高温、高压、高过载等恶劣环境因素影响,导致尾翼振动加速度信号获取困难等问题,该振动测试系统设计了多重缓冲结构,在实际应用中具有耐高温、抗震能力强、缓冲性能好等优点,使采集的数据具有更高的可靠性。本测试系统不仅满足了实际的测试需求,也为今后弹体尾翼振动信号的采集处理提供了开阔的思路,对尾翼振动的研究有着重要的实际意义。但是,受研究时间和项目测试环境的局限,本文的尾翼振动测试系统控制模块并不能实现远程无线数据实时传输的功能,如何将导弹尾翼振动的加速度信号通过无线串口模块实现数据的实时传输将是未来要解决的难题。

参考文献

- [1] 周新鹏,魏国华,吴嗣亮,等.具有尾翼的复杂导弹模型超宽带散射特性分析[J].电子与信息学报,2015,37(8):1868-1873.
- [2] 曾清香.飞行器折叠翼设计及其运动动态性能分析与试验研究[D].上海:东华大学,2016.
- [3] 刘波,杨黎明,李东杰,等.侵彻弹体结构纵向振动频率特性分析[J].爆炸与冲击,2018,38(3):677-682.
- [4] 任先贞,殷帅,裴东兴,等.基于三轴磁传感器的弹丸加速度测试研究[J].弹箭与制导学报,2017,37(2):162-164,169.
- [5] 林辉,吕帅帅,陈晓雷,等.导弹尾翼电动负载模拟器快速终端滑模控制[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(3):22-28.
- [6] 李庆会,王德鹏,张红云,等.加速度传感器 ADXL50 在导弹行军中的应用[J].现代电子技术,2010,33(12):147-149.
- [7] 彭亚平,贺乾格,柯希垚,等.一种基于加速度传感器的摔倒检测腰带[J].电子测量技术,2018,41(11):117-120.
- [8] 王天豪,张志杰.基于 FPGA 的地下气体爆炸定位测试系统设计[J].电子测量技术,2019,42(21):1-4.
- [9] 纳杰斯,岳雷,马雪,等.基于 FPGA 的串行多节点数据采集传输系统的应用研究[J].计算机测量与控制,2020,28(6):125-128,139.
- [10] 刘梦影,傅建军,刘云晶.一种改进的 SPI 接口设计与实现[J].电子与封装,2019,19(12):17-22.
- [11] 姜雪.高强度钢材焊接圆钢管轴心受压整体稳定性性能研究[D].北京:北京交通大学,2013.
- [12] 王艳,郭靖,张会新,等.弹载记录仪存储模块防护结构设计及优化[J].兵器装备工程学报,2020,41(2):166-169,220.
- [13] 何雯,董威,苟辉.基于 FPGA 的高速视频采集系统的设计[J].国外电子测量技术,2016,35(5):83-87.
- [14] 宋鹏飞,王厚军,曾浩.高速深存储数据采集系统研究与设计[J].仪器仪表学报,2011,32(4):903-912.
- [15] 张松,李筠.FPGA 的模块化设计方法[J].电子测量与仪器学报,2014,28(5):560-565.

作者简介

张泽宇,在读硕士研究生,主要研究方向为动态测试、电路系统、微系统集成等。
E-mail:365006202@qq.com