

基于 MEMS 技术的在运弹药加速度记录仪设计

牛正一¹, 李良春¹, 高飞¹, 苏建彬²

(1. 军械技术研究所, 石家庄 050000; 2. 国防科技大学, 长沙 410073)

摘要: **目的** 实时、准确获取弹药在道路运输、装卸搬运等环节中的受力状态。**方法** 分析弹药在不同运输环节中的力学环境, 确定弹药受力方式与类别。在此基础上利用 MEMS 技术设计一种可以测量 3 个不同轴向加速度的电容式微加速度计, 通过理论分析和模拟仿真验证其工作原理, 推导出加速度与输出信号的关系。以微加速度计为核心进行元器件选型搭配与软件方案设计, 制作加速度记录仪, 搭建测试平台, 进行信号检测。**结果** 该加速度记录仪能够实时检测重力加速度变化。**结论** 利用 MEMS 技术制作的加速度记录仪可以实现对运弹药受力状态的实时监测。

关键词: 弹药; 运输; MEMS; 加速度记录

中图分类号: TB485.3; TH823

文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2014)09-0071-05

Design of Acceleration Record System for Ammunition in Transportation Process with MEMS Technology

NIU Zheng-yi¹, LI Liang-chun¹, GAO Fei¹, SU Jian-bin²

(1. Ordnance Technology Research Institute, Shijiazhuang 050000, China;

2. National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

ABSTRACT: **Objective** To obtain the accurate ammunition condition in mechanical environment in different processes during transportation in a timely and accurate manner. **Methods** The mechanical environment of ammunition in transportation was analyzed and the mechanical category and property were confirmed. An electric capacity micro-accelerometer which could measure acceleration of different directions was designed with MEMS technology. The confirmation was given by simulation and calculation. On basis of hardware and software design, an acceleration record system was produced and tested. **Results** The change of gravity acceleration could be measured in a timely manner by this system. **Conclusion** Real-time monitoring of the accurate mechanical condition of ammunition during transportation could be achieved by the acceleration record system designed with MEMS technology.

KEY WORDS: ammunition; transportation; MEMS; acceleration record

弹药是决定战争进程的关键装备, 弹药质量对作战效果有着直接影响。从生产出厂到交付部队, 从储存场所到前沿阵地, 从使用消耗到报废处理, 在弹药的整个寿命过程中, 运输是必不可少的一环。受操作人员、设施设备、作业环境等多种因素影响, 弹药在运输过程中会不可避免地受到冲击、振动和碰撞。这些作用超过一定阈值后, 会导致弹药结构松

动、元件损伤、装药性质变化等, 对弹药质量产生直接且明显的影响, 具有很大的安全隐患, 轻则给弹药的后续使用和处理带来不便, 重则导致人员、装备损失。由此, 掌握在运弹药的受力规律, 有助于采取针对性措施减少运输环节对弹药的损伤, 为进一步优化弹药结构与包装材料选择提供直接参考, 对降低弹药质量缺陷、保持弹药战术技术指标及延长弹药寿命具

有重大意义。

针对在运弹药的安全防护问题,有的研究人员从弹药包装的抗震、抗压、抗冲击等方面入手,对包装材料、结构等进行了分析和优化设计^[1-6];有的研究人员对不同运输方式下的影响因素和防护对策进行了探讨^[7-8],有的研究人员对运输过程中的装载决策等进行了辅助设计^[9]。由于受到测量仪器的体积、精度、功耗等因素的限制,弹药在运输过程中的受力状态不易获取,以往研究或通过建立模型的方法进行分析^[10-12],或对运输工具本身的振动情况进行测量^[13]。文中利用 MEMS 技术设计了一种加速度记录仪,可以实时记录在运弹药的力学状态,掌握弹药在运输过程中的实际受力规律。

1 在运弹药力学环境分析

弹药在运输过程中要经历堆码、装卸、搬运、长途运输等诸多环节。在这些环节中,由于会受到冲击、碰撞、振动等作用,因而弹药会出现多种受力状态。在堆码和装卸搬运作业中,弹药箱可能会发生撞击、倾倒或跌落等现象,此时弹药主要受到直线惯性力作用。道路运输过程中,运输工具的启动、变速、转向、制动等会使弹药受到冲击,此时弹药也会受到直线惯性力作用。此外,运输工具的震动和颠簸使弹药受到振动惯性力的频繁作用,当振动惯性力的频率与弹药结构的特征频率接近时,可能会产生谐振,进而引起零部件松动、移位或损坏。

空运空投作为一种快速准确的补给手段,在现代战争中发挥着不可或缺的作用,弹药在空投过程中开伞和着陆时均会受到较大的冲击惯性力作用,此冲击惯性力为直线惯性力。通过以上分析可知,弹药在运输过程中主要受到来自不同方向、不同大小和不同频率的直线惯性力作用。

2 基于 MEMS 技术的加速度记录仪设计

微加速度计是 MEMS(微机电系统)技术的典型产品,可实现对加速度的测量,具有体积小、集成度高、测量范围宽等特点,并逐渐向小型化、智能化、集成化的方向发展^[14]。由第1节分析可知,弹药在运输过程中主要受到不同方向、不同大小、不同频率的直线惯性力作用,由此文中采用加速度计测量在运

弹药的加速度,进而获取弹药受力状态。

2.1 结构组成

加速度记录仪主要由三轴微加速度计、电容检测单元、单片机、数据存储单元、PC 机通讯接口单元和电源等部分组成。

2.2 工作原理

弹药运输过程中,微加速度计在惯性力作用下产生电信号,利用电容检测芯片检测该信号,并通过单片机系统采集保存至存储单元。运输环节结束后,通过 USB 接口将数据传送至 PC 机,再利用配套软件读取分析,即可获得弹药在整个运输过程中的加速度情况,见图1。

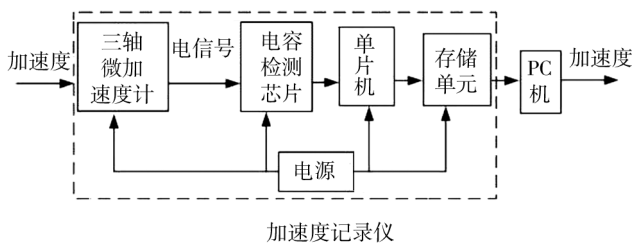


图1 加速度记录仪工作原理

Fig.1 Principle of the acceleration record system

2.3 系统硬件选型与设计

2.3.1 微加速度计设计

设计的微加速度计由硅结构和玻璃基板2部分组成^[15],见图2。硅结构包括4个完全一致的敏感质量块,每个质量块均由一对倾斜悬臂梁支撑。在玻璃基板上的凹坑内制作了铝电极。硅结构与玻璃基板组装后,4个质量块与各自下方的铝电极构成4对检测电容。

微加速度计的工作原理为:在惯性力作用下,质量块发生位移导致检测电容大小变化。通过测量电容信号的变化即可求出质量块的位移大小,进而根据力学推导获得加速度。利用 Ansys 对图2中的微加速度计进行仿真分析,各质量块在不同轴向惯性力作用下的位移情况见图3。从图3中可以看出,该加速度计可以敏感各轴向的加速度,可以用于惯性力测量。

微加速度计输出信号与加速度的关系分析如下所述。

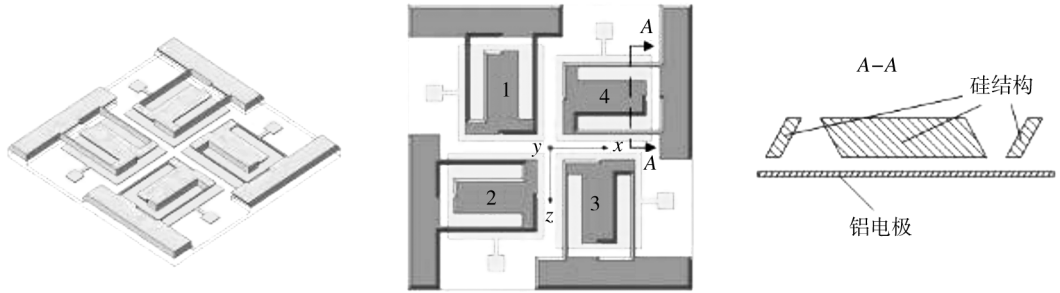


图 2 微加速度计结构
Fig. 2 Structure of the micro-accelerometer

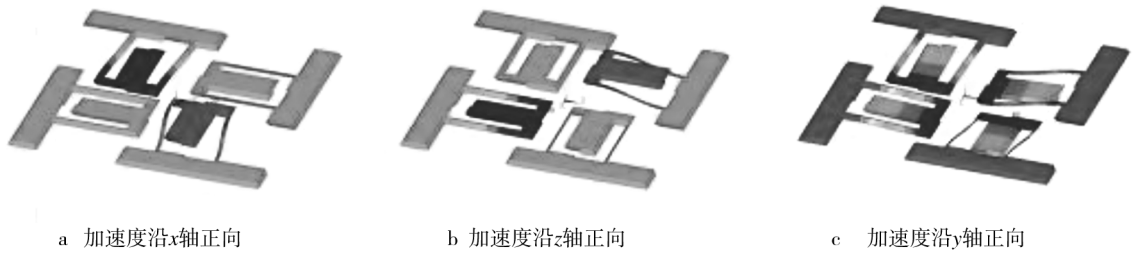


图 3 不同加速度下各质量块沿垂直表面方向的位移
Fig. 3 Mass displacement in vertical plane with different accelerations

设单个质量块面积为 A , 质量块和铝电极的初始间距为 d , 间距减小值为 Δd , 则电容变化量 ΔC 为:

$$\Delta C = C' - C_0 = \frac{\varepsilon A}{d - \Delta d} - \frac{\varepsilon A}{d} \approx \frac{\varepsilon A \Delta d}{d^2} \tag{1}$$

式中: ε 为空气介电常数; C_0, C' 分别为初始电容和极板间距变化后电容。

根据式(1)和不同轴向加速度下各质量块与对应铝电极间的距离变化值, 可得:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{\varepsilon A}{d^2} (S_x a_x + S_y a_y) + C_0 \\ C_2 &= \frac{\varepsilon A}{d^2} (S_z a_z + S_y a_y) + C_0 \\ C_3 &= \frac{\varepsilon A}{d^2} (-S_x a_x + S_y a_y) + C_0 \\ C_4 &= \frac{\varepsilon A}{d^2} (-S_z a_z + S_y a_y) + C_0 \end{aligned} \tag{2}$$

其中, S_x, S_y 和 S_z 分别为微加速度计在 3 个轴向上的灵敏度系数, 可由结构尺寸求出; $C_1 \sim C_4$ 分别代表 4 个质量块-铝电极对的电容。由式(2)推导出加速度与电容信号的关系为:

$$a_x = \frac{(C_1 - C_3) d^2}{2 \varepsilon A S_x}$$

$$a_z = \frac{(C_2 - C_4) d^2}{2 \varepsilon A S_z} \tag{3}$$

$$a_y = \frac{(C_1 + C_2 + C_3 + C_4 - 4C_0) d^2}{4 \varepsilon A S_y}$$

分析式(3)可知, C_0, A, d, S_x, S_y 和 S_z 均可根据微加速度计的结构参数计算得到, 只需测量 4 个输出电容的大小即可得到各轴向加速度值。同时, 微加速度计的灵敏度与模态频率大小均可通过改变结构尺寸进行调整, 这就大大增加了微加速度计的测量范围, 能满足不同精度和频率测量的需要。在获取加速度的大小后, 根据 $F = -ma$ 即可由弹药质量求出惯性力。

2.3.2 电容检测芯片选型

加速度计的输出信号为电容信号, 对微弱电容的检测方法是先将电容信号转化为电压信号, 再进行测试, 但这需要在电路中设计放大、解调和滤波等部分, 增加了电路的复杂程度。为减小电路元件间的干扰, 减少误差来源, 直接利用电容检测芯片 AD7745 检测电容信号。

AD7745 是高精度的电容-数字转换芯片, 在输出的 24 位数据中, 最高有效位达 21 位, 非线性度为 0.01%。芯片分辨率可达 4 fF, 正常检测量程为 -4.096 ~ 4.096

pF,并可通过设置内部偏置值增大测量范围。

2.3.3 单片机选型

单片机作为电路的核心部分,对整机性能有重要影响。经比较研究,拟选择美国 TI 公司的 MSP 430。该单片机采用低功耗技术,工作电压为 1.8~3.6 V,有正常工作模式和 4 种低功耗工作模式,可在各种工作模式之间切换,特别适合在电池供电、便携式设备中的应用。

该设计中,在微加速度计检测到较长时间的静止状态后,系统进入待机状态。开始运动后,加速度计输出发生变化,输出信号前端电路唤醒单片机工作。通过这种方式,可以大大降低非工作状态下的功耗,有效延长一次充电的持续工作时间。

2.3.4 USB 接口选型与设计

尽管单片机 MSP 430 具备功耗低的优点,但没有标准 USB 外设接口,因此需要设计一款专用的 USB 外设接口来完成数据的采集与传输。

CP2101 是一种高度集成的 USB 转 UART 桥接器,提供一个使用最小化元件和 PCB 空间实现 RS232 转 USB 的解决方案。该芯片包含一个 USB 2.0 全速功能控制器、USB 收发器、振荡器和带有全部的调制解调控制信号的异步串行数据总线(UART),全部功能集成在一个 5 mm×5 mm MLP-28 封装的 IC 中,无需其他外部 USB 元件。该系统采用该芯片来设计 USB 专用接口。

2.3.5 电源选型与设计

由于在弹药运输过程中,加速度记录仪一般无外接电缆,必须采用内置电源供电。目前多采用 5 V 充电锂电池,但耗电量较大。该设计拟采用 3.6 V 锂离子电池。当外围器件与电路的工作电压低于单片机工作电压下限或各部分电路的工作电压下限不尽相同时,可通过 DC-DC 变换器供电。DC-DC 变换器芯片供电方式灵活,转换效率高,体积小巧,使用方便。

2.3.6 外围电路与存储器设计

由于加速度记录仪需要在电池供电下长时间工作,系统元件的功耗成为制约加速度记录仪工作时间的因素,因此外围电路与存储器采用 CMOS 芯片以降低整机功耗。同时,对外围电路与存储器采取软件管理措施,使其不工作时进入维持状态以降低功耗。考虑到传统的硬件滤波电路本身耗电大,且不工作时难以实现不耗电,由此整机设计中拟采用软件滤波。此外,为保证加速度记录仪的工作可靠性和精度,整机采用屏蔽网以抵抗外界电磁信号的干扰。

2.4 系统软件设计

2.4.1 软件总体设计

加速度记录仪系统软件包括单片机控制软件 and 上位机处理软件,单片机控制软件主要完成信号接收、处理和存储等功能,上位机处理软件主要完成数据的加载、分析和显示,见图 4。

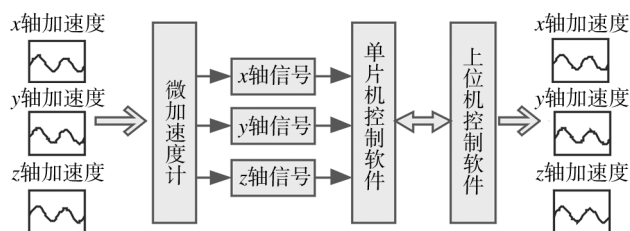


图4 系统总体软件方案

Fig. 4 Structure of the system software

2.4.2 系统启动方式设计

加速度记录仪采用查询法启动方式,即根据弹药本身承受能力在程序中设定阈值,当检测到的惯性力超过这个阈值时,主控芯片将数据采集和存储部分唤醒,开始数据的采集与存储。这种方式可以有效地避免冗余信息,降低系统功耗。

2.4.3 电源管理方案设计

为延长系统工作时间,必须尽可能地降低系统功耗,提高电源利用率。加速度记录仪采用以下电源管理方案:当系统采集数据结束停止工作时,关闭电源,此时为 A 模式;当系统开始工作但无加速度时,保持待机状态,此时系统为 B 模式;当系统开始正常工作时,数据采集与存储程序开启,此时系统为 C 模式。通过程序设计,管理电源在各模式下转变,从而降低功耗。

3 试验验证

根据上述设计方案,制作了加速度记录仪,并利用该加速度记录仪对重力加速度进行检测,见图 5。将加速度记录仪固定在分度台上,以 y 轴为轴、30°为间隔逆时针转动分度台,将检测到的信号实时传输至上位机进行解算,得到的检测结果见图 6。从图 6 可以看出,检测结果与实际情况相符,存在的误差可以通过提高工艺和电路设计水平来减小,这说明利用该加速度记录仪检测不同轴向加速度是可行的。

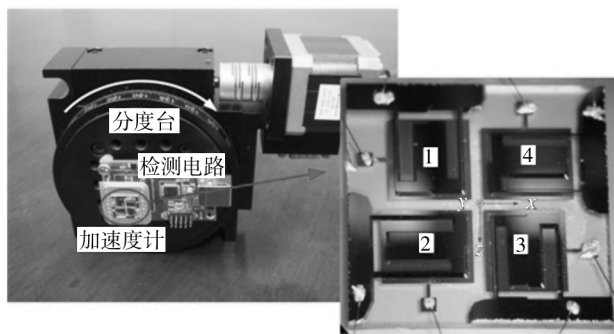


图5 加速度记录仪信号检测

Fig. 5 Signal test by the acceleration record system

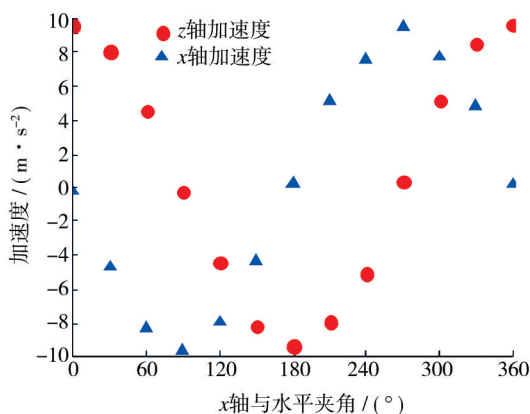


图6 加速度测量结果

Fig. 6 Result of the acceleration measurement

4 结语

文中设计的在运弹药加速度记录仪以微加速度计为核心,通过硬件搭配和软件设计,能够测量不同轴向加速度。由于MEMS技术的应用,使加速度记录仪的体积与功耗得到了有力控制,增强了设备的便携性。通过调整加速度计敏感结构的尺寸参数,可以改变微加速度计的灵敏度与模态频率大小,进而大大拓宽了设备的测量范围。利用该记录仪可以对弹药运输过程中的受力状态进行实时监测,对掌握在运弹药的受力规律、确保弹药的运输安全具有重要意义。

参考文献:

- [1] 潘文庚,柯先锋,王晓鸣,等. 基于减小弹药运输振动的包装研究[J]. 包装工程,2007,28(3):110—111.
PAN Wen-geng, KE Xian-feng, WANG Xiao-ming, et al. Packaging Research for Reducing Ammunition Transport Vibration[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(3): 110—111.
- [2] 高欣宝,王龙,姚凯. 弹药运输与弹药包装设计的关联性研究[J]. 包装工程,2003,24(1):79—80.
GAO Xin-bao, WANG Long, YAO Kai. Study of the Relativity of the Ammunition Transportation and Packaging Design[J]. Packaging Engineering, 2003, 24(1): 79—80.
- [3] 傅孝忠,高廷如,祁立雷,等. 弹药包装冲击强度试验方法的改进研究[J]. 包装工程,2002,23(2):36—37.
FU Xiao-zhong, GAO Ting-ru, QI Li-lei, et al. Improvement of Testing Methods for Ammunition Package Impact Strength[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(2): 36—37.
- [4] 李萧,左莉,陈显波,等. 火工品包装箱抗震性能的线性动力学分析[J]. 包装工程,2013,34(11):63—67.
LI Xiao, ZUO Li, CHEN Xian-bo, et al. Dynamics Analysis on Vibration Resistance of Packing Case of Initiating Explosive Device[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(11): 34—36.
- [5] 赵子东,张建礼,刘兴民,等. 基于有限元分析的某型弹药包装箱结构优化设计[J]. 包装工程,2013,34(11):59—62.
ZHAO Zi-dong, ZHANG Jian-li, LIU Xing-min, et al. Optimum Design of Certain Ammunition Packaging Box Structure Based on Finite Element Analysis[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(11): 59—62.
- [6] 何自芬,张印辉. 基于有限元的包装箱抗压性能研究[J]. 包装工程,2009,30(3):39—41.
HE Zi-fen, ZHANG Yin-hui. Compression Performance Investigation Based on Finite Element Analysis[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(3): 39—41.
- [7] 安振涛,李飞,李金明,等. 弹药公路运输安全影响因素分析及防护[J]. 工业安全与环保,2011,37(9):21—23.
AN Zhen-tao, LI Fei, LI Jin-ming, et al. The Effect Factor Analysis and Defence of the Ammunition Transportation Safety[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2011, 37(9): 21—23.
- [8] 胡建军,宁德伦,周飞飞,等. 通用弹药铁路运输安全影响因素分析及对策研究[J]. 物流科技,2010(11):99—100.
HU Jian-jun, NING De-lun, ZHOU Fei-fei, et al. Ammunition Railway Transport Safety Impacted Factors Analysis and Countermeasures Research[J]. Logistics Sci-Tech, 2010(11): 99—100.
- [9] 宣兆龙,易建政,段志强. 基于弹药安全性的运输装载决策系统研究[J]. 军械工程学院学报,2006,18(3):34—36.

- 射机制[J]. 中国印刷与包装研究, 2010, 2(1): 14—19.
- LIU Hao-xue, ZHU Ming-zheng, HUANG Min, et al. Inspecting ICC Output Device's Profiles and Analyzing the Color Gamut Mapping Mechanism[J]. China Printing and Packaging Study, 2010, 2(1): 14—19.
- [8] LIU Xin, WAN Xiao-xia. Display Color Management and Soft Proofing[C]//Proceedings International Conference on Computer Science and Software Engineering, 2008: 290—293.
- [9] 韦斯博格. Mac OS X 色彩管理标准教材[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- WEISBERG J. Color Management in Mac OS X[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2005.
- [10] 雷沪. 显示器色彩管理的研究与实践[J]. 包装工程, 2009, 30(7): 59—61.
- LEI Hu. Research and Practice of Color Management of Monitor[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(7): 59—61.
- [11] 谢芬艳. 基于不同 White Point 和 GAMMA 值的 LCD 显示器色彩管理研究[J]. 广东印刷, 2012(2): 14—16.
- XIE Fen-yan. Research on LCD Display Color Management Based on Different White Point and GAMMA Values[J]. Guangdong Printing, 2012(2): 14—16.
- [12] 刘霖, 黄岩. 显示器色彩管理前后的效果比较[J]. 数码印刷, 2008(10): 46—48.
- LIU Lin, HUANG Yan. The Result on the Color Management of CRT Monitor[J]. Digital Printing, 2008(10): 46—48.
- [13] 刘霖, 赵秀萍. CRT 显示器色彩管理效果分析[J]. 包装工程, 2008, 29(8): 61—63.
- LIU Lin, ZHAO Xiu-ping. Analysis of CRT Monitor Color Management Effect[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(8): 61—63.
- [14] 郭凌华. 色彩管理之 CRT 显色特征的探讨[J]. 包装工程, 2006, 27(3): 70—71.
- GUO Ling-hua. Displaying Color of CRT in Color Management System and Study of Correcting Gray Balance[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(3): 70—71.
- [15] 姚军财. 阴极射线管显示器颜色精确控制方法研究[J]. 包装工程, 2012, 33(15): 75—79.
- YAO Jun-cai. Study of Color Precision Control Method for Cathode Ray Tube Display[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(15): 75—79.
- [16] KATO H N, DEGUCHI T, BERNS R S. An Accurate Characterization of CRT Monitor (I) Verifications of Past Studies and Clarifications of Gamma[J]. Optical Review, 2001, 8(5): 305—314.
- [17] 刘武辉, 胡更生, 王琪. 印刷色彩学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- LIU Wu-hui, HU Geng-sheng, WANG Qi. Printing Color Science[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.

(上接第 75 页)

- XUAN Zhao-long, YI Jian-zheng, DUAN Zhi-qiang. Research on Loading Decision-making System Based on the Security of Ammunition[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2006, 18(3): 34—36.
- [10] 周彬, 安振涛, 甄建伟, 等. 跌落条件下箱装弹药安全性的数值评估[J]. 装备环境工程, 2009, 6(5): 50—53.
- ZHOU Bin, AN Zhen-tao, ZHEN Jian-wei, et al. Numerical Evaluation of Packaged Ammunition Security under Condition of Dropping[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(5): 50—53.
- [11] 杨会军, 田润良, 赵世宜, 等. 汽车装运弹药的振动特性与安全可靠研究[J]. 装备环境工程, 2009, 6(6): 24—27.
- YANG Hui-jun, TIAN Run-liang, ZHAO Shi-yi, et al. Study on Vibration Features, Safety and Reliability of Auto Loaded and Transported Ammunition[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(6): 24—27.
- [12] 李金明, 安振涛, 丁玉奎. 弹药运输环境振动特性研究[J]. 包装工程, 2005, 26(3): 105—107.
- LI Jin-ming, AN Zhen-tao, DING Yu-kui. The Study of Vibration Characteristic in Ammunition Transportation Environment[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(3): 105—107.
- [13] 姚国年, 张卫东, 赵辉. 弹药公路运输随机振动特性研究[J]. 测控技术, 2004, 23(7): 67—69.
- YAO Guo-nian, ZHANG Wei-dong, ZHAO Hui. Random Vibration Characteristic Analysis of the Ammunition During Road Transportation[J]. Measurement & Control Technology, 2004, 23(7): 67—69.
- [14] 李圣怡, 刘宗林, 吴学忠. 微加速度计研究的进展[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(6): 34—37.
- LI Sheng-yi, LIU Zong-lin, WU Xue-zhong. Developments of Microaccelerometer Research[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2004, 26(6): 34—37.
- [15] 牛正一. 单片集成三轴微加速度计关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.
- NIU Zheng-yi. Study on Key Technologies of Monolithic Integrated Triaxial Micro-accelerometer[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.