https://doi.org/10.1051/jnwpu/20254351022

离心惯性机构动态位移监测

程宝林, 聂伟荣, 陆海宁, 杨沫, 席占稳

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘　要:为了实时监测引信惯性机构的运动状态,采用光学图像采集和电测相结合的方法对惯性机构运动状态进行实时监测。理论上分析了单自由度弹簧质量块的工作原理。确定了惯性机构组成,提出了光学图像采集与霍尔传感器电学检测模块工作原理,同时建立了离心试验装置平台与霍尔传感器位移标定平台。通过对采集图像的旋转变换、灰度处理、高斯滤波与图像识别等处理,实现了旋转状态下惯性机构位移的自动提取;通过对霍尔传感器电压数据进行插值、滤波等,得到了转速曲线与滑块位移曲线。将试验与仿真位移曲线进行对比,结果表明光学图像采集与电测所得位移曲线与仿真位移曲线趋势一致。光学图像采集与霍尔传感器电测在加速离心状态下能够精确监测惯性机构在离心状态下的实时位移变化。

关　键　词:惯性机构;位移监测;光学图像采集;霍尔传感器;图像识别

中图分类号:TJ430　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000-2758(2025)05-1022-07

弹药从生产装配、运输、储存到发射并引爆战斗部为止,要受到多种复杂环境条件的影响(包括高/低温、潮湿、冲击、震动、旋转等),在弹药发射和飞行过程中,会受到以惯性力为主的复杂力学环境下的后坐力和离心力[1-3]。引信安全系统是保证引信在达到延期解除保险之前,防止引信意外解除保险从而导致战斗部提前爆炸的安全保障系统[4]。

在引信安全系统中,典型的惯性机构有后坐和离心保险机构,其保险元件为质量块,约束元件为弹簧,在惯性力或离心力的作用下,保险元件克服约束元件的作用产生移动,释放隔爆件或解除对点火机构的约束,从而解除保险[5]。为了研究惯性机构在离心条件下的运动过程,传统的位移测量与电测量无法满足安保器件在时间与空间的运动过程研究。南京理工大学郑灿、裴向前等[6-7]通过高速摄影记录冲击 MEMS 闭锁机构闭锁时锁头、锁钩的变形过程,但其摄影视场较小且某些关键部位图像模糊,无法对整个闭锁过程进行检测。Li 等[8]通过离心机平台进行引信安全机构的安全释放观察,试验中仅能看到机构在离心结束后的静态状态,无法观察运动状态。Liu 等[9]通过棱镜将图像呈现到中央并用高速摄影拍摄观察延时机构实现了对动态过程的捕捉,但其离心加速度较低。对于惯性机构的离心过程研究,以往的研究大多根据电路通断判断其始末状态,无法监测动态加速离心位移过程。

本文针对上述问题,提出一种在加速离心环境下对惯性机构的位移状态进行监测的技术。采用霍尔传感器(电测量)与光学图像采集系统同时进行监测,进一步通过 Matlab 软件对所采集的图像进行旋转、灰度处理、高斯滤波与特征识别处理,对霍尔传感器电压数据进行插值、滤波处理,实现在加速离心环境下惯性机构运动过程测量。

1　惯性机构原理分析

弹药在发射、飞行过程中经受后坐、离心等力学惯性环境,引信离心安全保险机构利用高速旋转产生的离心力环境解除保险机构,也有的利用离心力驱动隔爆滑块的移动等[10-11]。

惯性离心保险机构主要有离心子保险机构、离心板保险机构以及离心爪保险机构等,各种离心保险机构其简化模型多为弹簧-质量块系统[12],将质量块系统简化,系统受力状况如图 1 所示。

收稿日期:2024-11-14

作者简介:程宝林(2000—),硕士研究生

通信作者:聂伟荣(1969—),教授　e-mail:njniewr@ njust.edu.cn

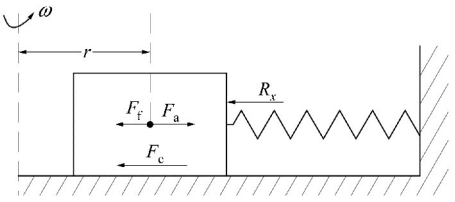


图 1　弹簧质量块系统受力图

假定在离心过程中弹簧的阻抗力与变形是线性关系,按照质量块离心运动条件可得质量块运动方程为:

$$m\ddot{x}(t) = R_x + F_f + F_c - F_a \tag{1}$$

$$F_a = m\omega^2 r \tag{2}$$

式中:m 为质量块质量;R_x 为弹簧的阻抗力;F_f 为质量块受到的摩擦阻力;F_c 为系统受到的阻尼力;F_a 为质量块所受的离心力;r 为质量块质心与旋转轴的初始偏心距;ω 为旋转角速度。

由(1)~(2)式得质量块运动方程展开式为

$$m\ddot{x}(t) = K[X - x(t)] + F_f + \gamma\dot{x}(t) - m\omega^2(t)[r + x(t)] \tag{3}$$

式中:K 为弹簧弹性系数;X 为弹簧初始长度;γ 为阻尼系数。

由图 1 可知,当质量块质心偏离旋转轴时,质量块所受到的离心力与弹簧的阻抗力方向相反,在加速离心过程中,只有当离心力克服弹簧阻抗力与摩擦阻力时,质量块开始运动。具体满足

$$F_a > R_x + F_f \tag{4}$$

根据(4)式原理,进行弹簧-质量块系统在加速离心状态下的动态离心试验。

2　离心试验

为了研究惯性机构在离心状态下的动态位移响应情况,本试验采用磁性霍尔传感器与光学图像采集对离心过程中惯性机构滑块位移状态进行检测,惯性机构由永磁体与弹簧构成,如图 2 所示。

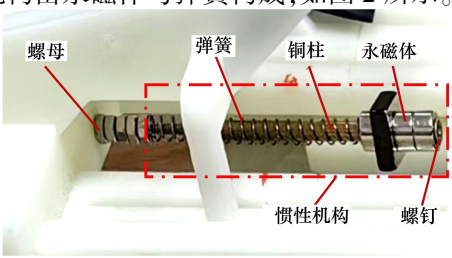
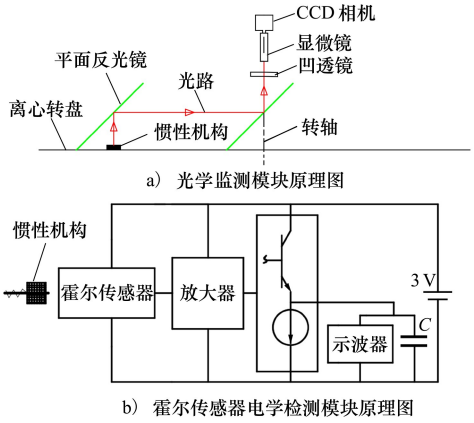


图 2　惯性机构实物图

2.1　系统工作原理

监测单元由光学监测模块与霍尔传感器电学检测模块构成,如图 3 所示。光学监测模块中,平行布置在离心转盘径向和转轴中心的平面镜和平行于显微镜放置的焦距为 10 cm 的凹透镜将滑块成像到显微镜和 CCD 相机,确保滑块图像在离心时任意时刻位移状态的监测,如图 3a)所示。电学检测模块由全极霍尔磁性传感器对磁性滑块位移进行检测,其原理如图 3b)所示,在离心运动过程中,滑块与霍尔传感器之间的距离变化,使得霍尔传感器的输出电压发生相应改变。



a)　光学监测模块原理图

b)　霍尔传感器电学检测模块原理图

图 3　监测单元原理图

2.2　试验装置

试验装置由直流无刷电机、导电滑环、转盘、光学图像采集装置、转速测量和位移测量部分组成,如图 4 所示。

弹簧和磁性滑块通过螺杆、螺母和铜柱固定在装有平面反光镜的镜架上,安装时确保滑块的运动方向与离心转盘的半径方向始终保持一致,为了在低转速状态下获得较大离心力,初始状态下滑块偏离转轴一段距离。检测位移的霍尔传感器与滑块间留有一定的距离,为模拟惯性机构离心运动中所需克服的摩擦力等阻力,安装滑块时对弹簧进行压缩。试验时,通过数显转速计实时观察电机转速变化,逐步提升电机转速,使转速达到 600 r/min。试验器件参数(型号)如表 1 所示。

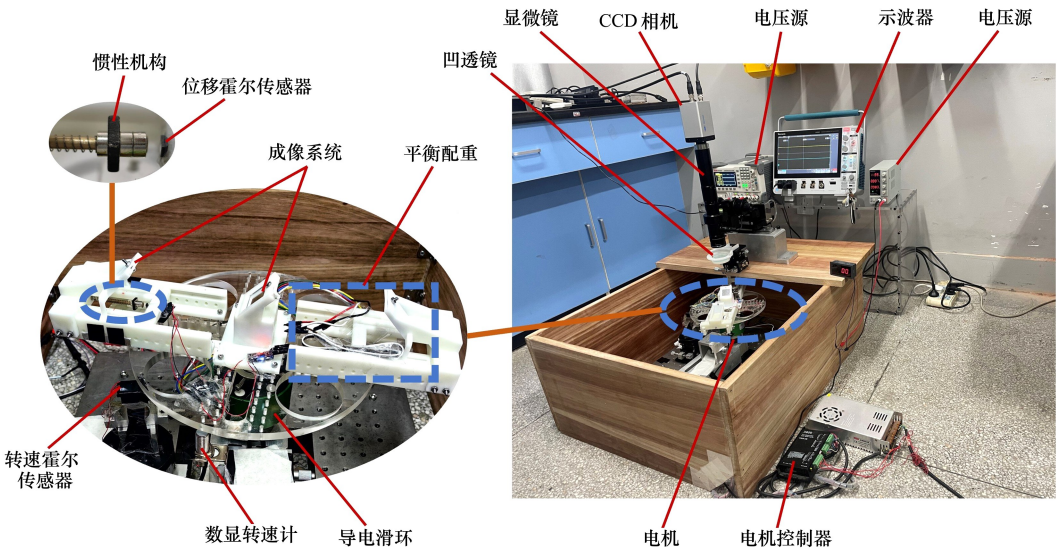


图 4　试验装置结构图

表 1　试验器件参数(型号)

名称	参数(型号)
滑块质量 M/g	2.764
弹簧弹性系数 K/(N · m^{-1})	84
弹簧规格/mm	0.3×4×35
弹簧预压长度 a/mm	4
滑块距转轴距离 L/mm	11.5
转速霍尔传感器电压/V	3
位移霍尔传感器电压/V	3
CCD 相机	Baumer VLXT-50C.I
拍摄帧率/(frame · s^{-1})	150
拍摄时长/s	10

2.3　霍尔传感器电压标定

霍尔传感器是一种基于霍尔效应的磁场传感器[13],可以根据磁场变化输出相应的电压信号。为了准确处理试验中霍尔传感器检测到的滑块位移状态,需对试验中用到的磁性滑块与霍尔传感器间由于距离变化而导致的电压变化关系进行标定。

霍尔传感器与滑块位移标定平台主要由电动滑台、示波器、电压源和离心试验中相同的滑块、霍尔传感器组成,如图 5 所示。滑块固定,霍尔传感器固定于电动滑台一端并跟随滑台移动,设置霍尔传感器工作电压与离心试验中电压一致,皆为 3 V。为保证位移标定的准确性,标定试验时滑台每次移动 0.5 mm,记录此时示波器相对应的电压数值,滑台移动 21 mm 为 1 次标定,重复 3 次,取 3 次电压平均值进行拟合,拟合后带有误差棒的位移-电压曲线如图 6 所示。

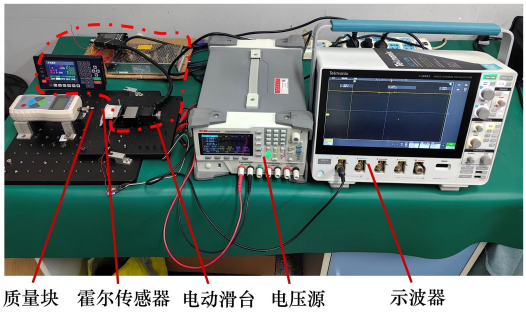


图 5　位移标定装置

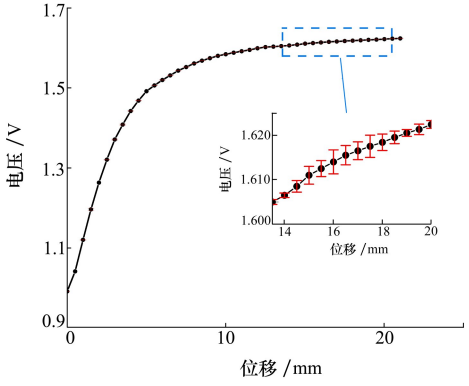


图 6　霍尔位移-电压标定曲线

3　试验数据与图像处理

离心转盘转动时,转盘上的平面反光镜成像装置与滑块、弹簧跟随转盘做圆周运动,而 CCD 相机固定不动,造成试验所拍摄到的图像为旋转态,如图 7 所示。为了更好地观察质量块的运动状态,需利用 Matlab 对试验所拍摄的图像进行旋转变换、灰度处理、图像增强和图像识别处理。

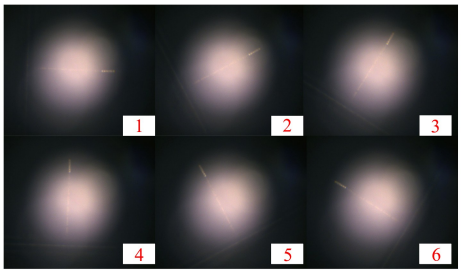


图 7　惯性机构动态图像

3.1　图像初步旋转变化处理

在进行图像的旋转变化前,需对霍尔传感器获得的转速数据进行处理,转速处理步骤为:

1) 进行初步信号处理,提取示波器时间与电压数据,先对信号滤除杂波并取反;

2) 移动平均过滤,去除信号毛刺;

3) 以高、低阈值水平线截取电压信号,转为方波信号;

4) 找到上升沿起点和下降沿终点,两点间的中间位置为峰值时刻,记录峰值时刻,每 2 个峰值表示旋转了一圈,时间间隔为每圈所用时间;

5) 信号在时域上进行差分处理,处理得到转速曲线如图 8a)所示;

6) 对转速曲线进行二次处理,得到每秒钟转速曲线,将转速曲线转化为角度累积量曲线并计算角度增量曲线,如图 8b)所示。

在转速数据处理的基础上进行图像旋转处理,从而将高速摄影采集到的图像中的机构方向转为一致,具体处理步骤为:

1) 查找拍摄初始时间在转速曲线时间轴的对应时刻,查看高速摄影所拍摄的图像最后一转所用的帧数,计算最后一转的每帧平均转角。在角度增量曲线上找到此平均转角对应时刻,由于高速摄影拍摄时长为 10 s,因此倒推 10 s 即为拍摄初始时刻在转速时间轴大致位置;

2) 在大致位置附近进行初始时间桩搜寻,搜寻间隔为 1 ms;

3) 在旋转状态图片序列中等间隔选取 4 张图片,每次搜寻观察这 4 张图片中惯性机构的方向,所有图片中惯性机构方向一致,如图 9 所示,则对应搜寻时刻为摄影初始时刻。

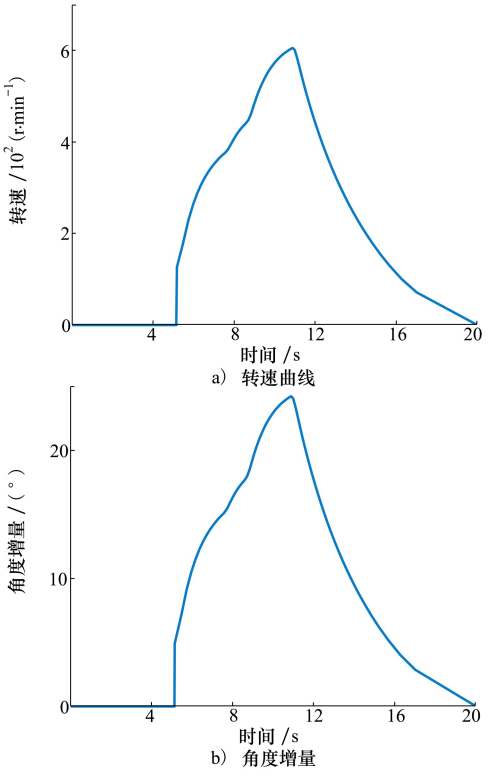


图 8　转速数据曲线图

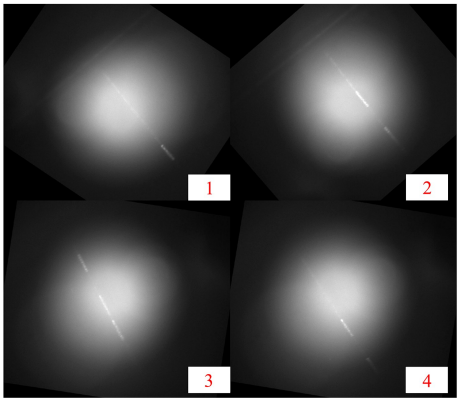


图 9　惯性机构方向对比

3.2　图像采集监测滑块位移获取

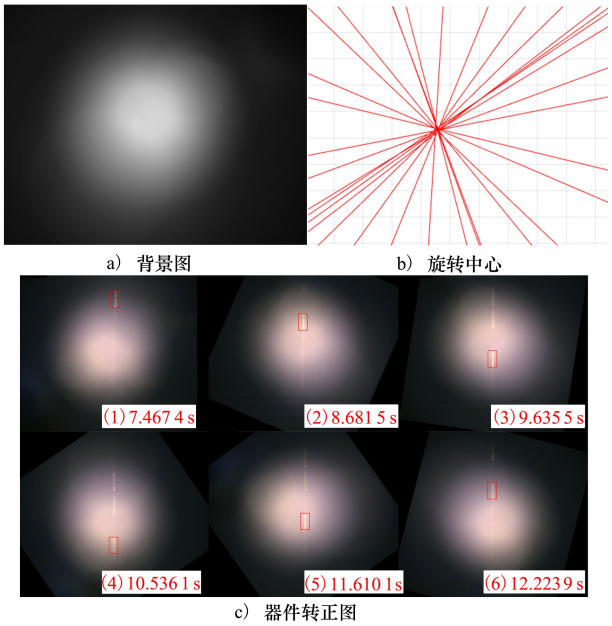
为了获得所采集图像中滑块的位移信息,需对图像中滑块特征进行图像特征识别与自动提取位移处理,从而获得连续的位移变化信息,光学监测下的

滑块位移获取步骤为：

1）制作图片的平均背景信息

（1）任意选取某个时间点后的所有旋转状态下的图片转为灰度矩阵信息，将所有图片相加；

（2）将相加结果除以图片总数，得到采集到的图像的平均背景信息，如图 10a）所示。



a） 背景图　　b） 旋转中心

c） 器件转正图

图 10　光学监测位移获取

2）寻找拍摄图像的实际旋转中心

（1）取任意数量旋转状态下图片，转为灰度矩阵，减去背景矩阵；

（2）将平均直方图增强，去除高斯噪声，阈值过滤并高斯滤波，得到仅显示滑块的黑白二值图像，拟合直线，用最合适的直线穿过滑块所在区域，即铜柱所在直线；

（3）多条直线交于一点即为旋转中心点，如图 10b）所示。

3）惯性机构图像识别转正

（1）导入初步旋转变化处理得到的转速数据、角度累积量、拍摄初始时刻和旋转中心坐标；

（2）循环导入原始图片进行图像中惯性机构垂直转正：将原始图片进行灰度化处理，减去背景信息；将旋转中心平移至图片中心，空白像素补 0；先按照转速曲线旋转，进行图像处理，根据拟合的直线确定直线与水平线的角度，进行二次转正；记录二次转正角度，存储转正后的二值图像；

（3）获取动态特征点坐标：读取转正后的二值图像，此时滑块应该位于图片中线位置，找到滑块的最低点或最高点，作为动态特征点；记录每一帧动态特征点的位置；将像素变化转为位移变化，会存在一些异常点，偏离位移曲线，用平滑函数估算曲线（仅 y 方向），用平滑后的位移数据替代原始位移数据，得到滑块位移。

图像处理完成后，任意时刻铜柱与滑块皆为竖直状态，如图 10c）所示。

4　结果分析与讨论

4.1　惯性机构位移曲线

将已标定完成的位移数据导入 Matlab 中，采用插值法对位移霍尔传感器采集到的电压数据进行插值处理，得到动态离心状态下的滑块位移曲线。将升速阶段光学图像采集监测到的位移曲线与霍尔传感器所测得的位移曲线进行对比，如图 11 所示。

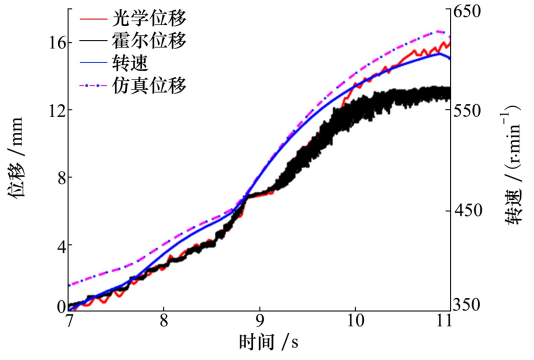


图 11　转速与位移曲线

从图 11 可以看出，由于弹簧的预压缩，在转速低于 350 r/min 时，磁性滑块没有发生位移变化；在升速过程中，滑块克服弹簧阻抗力及摩擦阻力做加速离心运动，霍尔传感器所检测到的位移曲线与光学图像采集所得到的位移曲线变化趋势基本一致；当转速超过 550 r/min 后，磁性滑块位移变大，霍尔传感器所在位置磁通量减小，输出电压信号产生较大波动，导致霍尔传感器所检测到的位移曲线失真。磁性滑块从初始运动时刻至 9.3 s 间，两位移曲线几乎重合，其位移误差平均值约为 0.18 mm，相对误差约为 10.8%。

4.2　仿真分析与试验结果对比

为验证试验所得位移结果的合理性，采用有限元分析软件 Workbench 建立惯性机构的有限元模型，将试验中采集到的转速数据施加给惯性机构进

行仿真,将仿真得到的位移曲线与试验所得到的位移曲线进行对比,结果如图 11 所示。仿真结果表明滑块位移的试验所测曲线与仿真曲线趋势基本一致。

在仿真结果中,仿真所得到的滑块位移曲线与试验所得位移曲线未能重合,其原因主要是仿真中无法完全确定试验中惯性机构的摩擦与阻尼系数。因试验平台在试验时产生轻微震动,导致滑块在离心移动过程中所测得的位移曲线产生波动。

试验结果表明:在滑块位移较小时,光学图像采集位移监测与霍尔传感器位移检测 2 种方法都能够精确地对惯性机构在加速离心运动过程中的动态位移进行实时监测;在滑块位移较大时,光学图像采集位移监测比霍尔传感器位移检测更为准确可靠。其中霍尔传感器电检测位移分辨率可达 4 μm;光学位移监测位移分辨率为 20 μm,但光学监测分辨率其决定性因素为拍摄帧率,若采用更先进的高速摄影装置,提高拍摄帧率,可进一步提升图像采集所得到的位移分辨率。

5　结　论

本文提出了一种应用于引信惯性机构在离心环境下的动态位移监测技术。通过高速摄影拍摄了滑块的运动状态图像,运用 Matlab 对图像进行灰度、滤波、旋转与识别等处理,实现了器件特征垂直转正与运动状态观察,得到了基于光学图像采集的滑块位移曲线。同时利用霍尔传感器对滑块位移进行检测,通过对霍尔传感器输出电压数据的处理得到了基于霍尔传感器检测的滑块位移曲线。将试验结果与仿真结果进行对比,结果表明:试验与仿真一致性较好,该位移检测方法可对惯性机构在加速离心状态下的位移状态进行有效检测。本文研究表明,光学图像采集监测与霍尔传感器电学测量适用于加速离心状态下惯性机构运动状态的观察与检测,为引信惯性机构运动状态的监测提供了理论和试验指导。

参考文献:

[1] 李豪杰, 张河. 引信安全系统及其功能范畴探讨[J]. 探测与控制学报, 2006(5): 4-7
LI Haojie, ZHANG He. Discussion on fuze safety system and its function category[J]. Journal of Detection & Control, 2006(5): 4-7 (in Chinese)

[2] 宋荣昌, 申跃跃, 许恩德, 等. 引信安全系统动态特性及膛内安全性研究[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(8): 796-799
SONG Rongchang, SHEN Yueyue, XU Ende, et al. Research on dynamic characteristics and in-bore safety of fuze safety system[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(8): 796-799 (in Chinese)

[3] 王旭建, 王新杰, 李峰. 引信用双工形压电驱动器的设计及其驱动特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(8): 135-144
WANG Xujian, WANG Xinjie, LI Feng. Design and driving characteristics of duplex piezoelectric actuator for fuze[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(8): 135-144 (in Chinese)

[4] 张合, 李豪杰. 引信机构学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014
ZHANG He, LI Haojie. Fuze institutional[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014 (in Chinese)

[5] 吴越, 王宏伟, 史长虹, 等. 引信安全系统惯性保险技术研究[J]. 中北大学学报, 2012, 33(3): 257-261
WU Yue, WANG Hongwei, SHI Changhong, et al. Design of inertial insurance of fuze[J]. Journal of North University of China, 2012, 33(3): 257-261 (in Chinese)

[6] 郑灿. 引信微机电安全和解除保险机构动态特性分析与测试[D]. 南京: 南京理工大学, 2019
ZHENG Can. Analysis and test of dynamic characteristics of MEMS safety and disarming mechanism of fuze[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019 (in Chinese)

[7] 裴向前, 曹云, 席占稳, 等. 引信 MEMS 闭锁机构高 g 值冲击实验与仿真[J]. 探测与控制学报, 2021, 43(5): 29-36
PEI Xiangqian, CAO Yun, XI Zhanwen, et al. High-g impact and simulation of fuze MEMS latching mechanism[J]. Journal of Detection & Control, 2021, 43(5): 29-36 (in Chinese)

[8] LI H, LUO J J, XU X, et a1. Dual-environment-driven MEMS pyrotechnic actuators[J]. Journal of Physics, 2023, 2478

(10): 102017

[9] LIU J, FAN L, DEVOE D L. Microfabricated sequential-leaf time-delay mechanisms[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2005, 14(5): 1051-1060

[10] 徐娜, 聂伟荣, 席占稳, 等. MEMS 离心隔爆滑块闭锁机构[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(4): 15-19
XU Na, NIE Weirong, XI Zhanwen, et al. MEMS centrifugal flameproof slider locking mechanism[J]. Journal of Detection and Control, 2019, 41(4): 15-19 (in Chinese)

[11] 谢仕钦, 赵艳军, 许志秋, 等. 双环境力复合下的硅基 MEMS 安全系统芯片设计[J]. 机械设计, 2024, 41(增刊 1): 13-19
XIE Shiqin, ZHAO Yanjun, XU Zhiqiu, et al. Design of silicon-based MEMS security system-on-chip with dual environmental force compounding[J]. Journal of Machine Design, 2024, 41(suppl.1): 13-19 (in Chinese)

[12] 韩晶, 秦栋泽, 焦国太. 变质量滑块延期解除保险机构虚拟离心试验研究[J]. 弹箭与制导学报,2008(2): 115-116
HAN Jing, QIN Dongze, JIAO Guotai. Research on virtual centrifugal experiment of variable slider mechanism on delay arming fuze[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008(2): 115-116 (in Chinese)

[13] 黄明, 尚群立, 余善恩. 线性霍尔传感器在直线位移中的应用[J].自动化仪表, 2010, 31(3): 66-68
HUANG Ming, SHANG Qunli, YU Shanen. Application of linear hall sensor in linear displacement measurement[J]. Process Automation Instrumentation, 2010, 31(3): 66-68 (in Chinese)

Monitoring dynamic displacement of centrifugal inertia mechanism

CHENG Baolin, NIE Weirong, LU Haining, YANG Mo, XI Zhanwen

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To monitor the motion state of the inertial mechanism of a fuze in real-time, this paper combines optical image acquisition and electrical measurement. The working principles of a single-degree-of-freedom spring-mass block is analyzed theoretically. The composition of the inertial mechanism is determined, and the working principles of the optical image acquisition and the electrical detection module of the Hall sensor are proposed. At the same time, the centrifugal test platform and the Hall sensor displacement calibration platform are established. Through the rotation transformation, gray processing, Gaussian filtering and image recognition of the collected images, the automatic extraction of the displacement of the inertial mechanism in its rotational state is realized. By interpolating and filtering the voltage data of the Hall sensor, the speed curve and the slide block displacement curve are obtained. The experimental and simulated displacement curves are compared. The results show that the displacement curves obtained by optical image acquisition and electrical measurement are consistent with the trend of the simulated displacement curve. Optical image acquisition and the Hall sensor's electrical measurement can accurately monitor the real-time displacement change of the inertial mechanism in an accelerated centrifugal state.

Keywords: inertial mechanism; displacement monitoring; optical image acquisition; Hall sensor; image recognition

引用格式: *程宝林, 聂伟荣, 陆海宁, 等. 离心惯性机构动态位移监测[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(5): 1022-1028*
CHENG Baolin, NIE Weirong, LU Haining, et al. Monitoring dynamic displacement of centrifugal inertia mechanism[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2025, 43(5): 1022-1028 (in Chinese)