

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.04.016

用于加速度传感器的气动活塞式冲击校准装置研究

陈志龙¹, 侯海鹏¹, 杨建¹, 罗仕挺², 王汝苗¹, 杨东方¹, 严豪杰²

(1. 杭州集普科技有限公司, 浙江 杭州 311106; 2. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310032)

摘要: 基于比较校准法, 研制了用于加速度传感器、包含机械冲击模块、冲击信号生成模块和测量控制模块的气动活塞式冲击校准装置。在关键参数分析计算和重要数学模型建立的基础上, 对比不同种类波形发生器产生的冲击曲线结果, 确定直径 20 mm、厚度 5 mm 的羊毛毡为优选的波形发生器, 其冲击峰值幅度和脉冲持续时间的重复性均不超过 3%, 达到国外同类产品的技术水平。同时, 相对扩展不确定度符合 ISO 16063—22 规定的小于 5% ($k=2$) 的要求。

关键词: 加速度传感器; 气动活塞; 校准装置; 冲击峰值幅度; 脉冲持续时间; 不确定度

中图分类号: TP212.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2024)04-0087-06

Research of Pneumatically Operated Piston Shock Calibration Device for Acceleration Sensors

CHEN Zhilong¹, HOU Haipeng¹, YANG Jian¹, LUO Shiting², WANG Rumiao¹, YANG Dongfang¹, YAN Haojie²

(1. Hangzhou Jebool Technology Co., Ltd., Hangzhou 311106, China;

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: A pneumatically operated piston shock calibration device for acceleration sensors including the modules of mechanical shock, shock signal generation and measurement control is designed based on the comparative calibration method. On the basis of analysis and calculation of key parameters and establishment of important mathematical models, the comparison of shock curve results of different waveform generators is carried out, and the wool felt with diameter of 20 mm and thickness of 5 mm is selected as the optimal waveform generator. The repeatability of shock peak amplitude and pulse duration are no more than 3%, which reaches the same level of similar foreign products. Meanwhile, the calibration uncertainty meets the ISO 16063—22 requirement of less than 5% ($k=2$).

Keywords: acceleration sensor; pneumatic piston; calibration device; shock peak amplitude; pulse duration; uncertainty

0 引言

加速度传感器以其体积小、质量轻、成本低、可靠性好、功耗低、测量范围大等优点, 有着广泛应用^[1-2]。其中, 冲击加速度传感器有良好的动态特性, 主要用于瞬态冲击动态信号的测量, 在汽车碰撞测试领域发挥着重要作用。在加速度传感器出厂前及用户使用一定时间后, 需对其冲击灵敏度等参数进行校准, 确保测量数据有效可靠。用于加速度传感器的冲击校准装置主要针对加速度传感器的冲击灵敏度、幅值线性度等参数进行校准。

现有加速度传感器的冲击校准方式分为绝对校准法和比较校准法, 其中绝对校准法需要使用激光干涉仪进行高精度校准^[3], 其校准装置精密且昂贵, 安装精度要求高, 校准周期长。当然, 通

过绝对校准法校准的加速度传感器, 可作为比较校准法中的参考传感器。常见的比较校准法校准装置有摆锤式、跌落式、霍普金森杆式和气动活塞式^[4]。摆锤式冲击校准装置最大冲击峰值幅度受尺寸结构限制, 最大冲击幅值较小^[5-6]。跌落式冲击校准装置结构较大。霍普金森杆式冲击校准装置虽然有较高校准精度, 但成本较高、设备尺寸较大。气动活塞式校准装置体积小、操作简便、价格合理, 更适合应用于冲击加速度传感器的使用环境当中。

现阶段对用于加速度传感器的冲击校准装置的研究大多侧重于实验室使用^[7-8]。同时, 针对基于比较校准法用于加速度传感器的气动活塞式冲击校准装置的研究较少, 且侧重点不在装置设计, 而在于相关材料的选取^[9-10]。本文基于 ISO 16063—22 国际标准, 并根据汽车碰撞试验中加

第一作者简介: 陈志龙 (1988—), 男, 浙江绍兴人, 工程师, 硕士, 研究方向为传感器技术及系统集成, zhilong.chen@jebool.com。

推荐值相对应;2)对于不同冲击峰值幅度的测试,校准装置应能方便调节;3)校准测试中相同条件下冲击峰值幅度和脉冲持续时间的重复性优选小于3%,校准不确定度小于5%($k=2$);4)通过控制程序完成校准装置的控制、传感器信号的采集、冲击曲线的生成、加速度冲击峰值幅度与脉冲持续时间的确定以及被测传感器灵敏度的计算。

2 校准装置设计

用于加速度传感器的气动活塞式冲击校准装置主要包括:1)产生半正弦加速度冲击波形的机械冲击模块;2)参考传感器和被测传感器等组成的冲击信号生成模块;3)基于 NI 数据采集卡和 PC 的测量控制模块。

校准装置工作过程如下:①PC 通过基于 LabVIEW 的测量控制程序设定气路中常闭式快速开关阀导通时间;②阀口打开后弹体在驱动气压作用下沿着气缸筒撞击铁砧末端缓冲垫,待背靠背安装于铁砧上的参考传感器和被测传感器经过电荷电压转换器以及信号放大器产生冲击信号后,由数据采集卡对冲击信号采集送至 PC 端;③在测量控制程序中完成冲击波形的生成和灵敏度计算,获得对被测传感器的校准计算结果。

$$S_{\text{DUT}} = \frac{U_{\text{DUT}}}{U_{\text{REF}}} S_{\text{REF}} \quad (1)$$

2.1 机械冲击模块

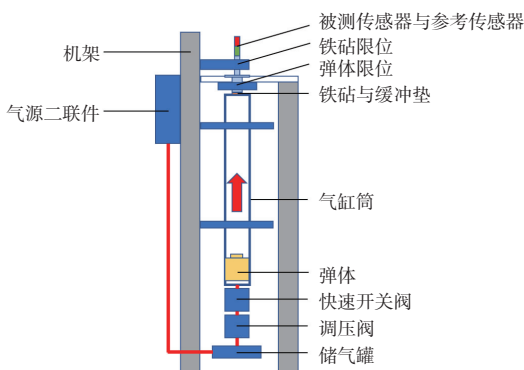


图 1 气动活塞式冲击校准装置工作原理图

为保证铁砧被撞击后能够产生理想的冲击波形,需要抑制铁砧的非轴向运动。本文选用MAGER公司的空气轴套对铁砧的运动方向进行抑制。空气轴套一方面可大幅减少摩擦力,另一方面对铁砧提供对称支撑力,避免在测试过程中由于非对称支撑力使得被撞铁砧产生旋转或横向运动。

被撞铁砧模块分为上方导向轴部分、中部限位凸台部分以及末端缓冲垫(波形发生器)部分。导向轴部分安装于空气轴套内部,顶端安装参考传感器和被测传感器;限位凸台部分上下表面,分别用于限定铁砧被撞击后运动的初始和最终位置。

弹体模块包括铝合金制成的弹体芯和两端耐磨环,发射前放置于气动弹射模块的气缸筒末端。气动弹射模块的核心可视为一个开口气缸,其上方开口直接与大气联通。弹射过程中的耗气量与

根据加速度传感器在汽车碰撞试验中的应用实际,用于加速度传感器的气动活塞式冲击校准装置需满足以下技术要求:1)能产生近似半正弦脉冲,并测试 $25\text{g} \sim 2\,000\text{g}$ 的冲击峰值幅度,每个冲击峰值幅度的脉冲持续时间尽可能与标准中的

气缸筒内径、弹体行程(气缸筒长度)以及弹射驱动压力有关,具体如式(2)所示。

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 L \times 10^3 \times \frac{p_h + 0.1013}{0.1013} \quad (2)$$

式中: Q 为弹射过程耗气量; D 为气缸筒缸径; L 为行程; p_h 为弹射驱动压力。

本次设计中 $D = 0.032 \text{ m}$, $L = 0.4 \text{ m}$, 测试中弹射气压最大值为 0.40 MPa , 代入式(2)可得 $Q = 1.592 \text{ L}$ 。另外, 通过计算弹射过程中气缸筒内 q_T 最大值来确定所需要的快速开关阀的标称流量, 如式(3)所示。

$$q_T = 0.113\alpha \frac{\pi}{4} d^2 p_h \sqrt{\frac{273}{T_0}} \quad (3)$$

式中: q_T 为温度为 T_0 时通过气缸筒末端小孔的流量; α 为小孔流量系数; d 为小孔直径。

ISO 16023—22 法规手册中规定冲击校准要求环境温度为 $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$, 取环境温度为 20°C , 则 $T = 293.15 \text{ K}$ 。测试中弹射气压最大值为 0.40 MPa , 小孔直径为气管内径 4 mm , 取 $\alpha = 0.7$, 代入式(3)可得 $q_T = 384 \text{ L/min}$ 。最终选择一款流量为 400 L/min 的快速开关电磁阀用于控制弹体的发射。

2.2 信号生成模块

信号生成模块中使用的参考传感器是 Endecvo 公司的可将冲击力转化为电荷信号的 2270 型压电式加速度传感器, 配套用于传输数据的高柔性低噪声同轴电缆、将电荷信号转化为电压信号的电荷电压转换器以及 B&K 公司的经过初步降噪后将加速度信号传输至 NI 数据采集卡的 1704-A 型放大器。

2.3 测量控制模块

以 NI PCIe-6374 数据采集卡为硬件基础, 配合 LabVIEW 语言, 开发校准装置的测量控制程序, 实现传感器信号采集和数据处理。为了得到灵敏度计算式(1)里的 2 个冲击电压峰值和毫秒级的脉冲持续时间, 需要高采样频率和采样精度的采集卡, 以防止信号失真。由于技术指标中最大冲击峰值幅度为 $2000g$, 脉冲持续时间为 0.1 ms , 2270 标准加速度传感器灵敏度为 $2.073 (\text{mV/g})$, 则最大电压信号输出为 4146 mV 。因此, 选用最大采样频率 3.571 MHz , 输出电压范围可在 $\pm 1 \text{ V}$ 、 $\pm 2 \text{ V}$ 、 $\pm 5 \text{ V}$ 、 $\pm 10 \text{ V}$ 档位中选择的采集卡可保证装置需求。

校准过程中, 先设置测试参数, 包括数据采样

频率、标准传感器灵敏度、采样通道等。接着, 设定弹射气压和快速开关电磁阀导通时间, 通过设置不同的弹射气压和电磁阀时间的组合完成不同加速度峰值的测试。开始测试后, 对标准传感器和被测传感器进行数据采集, 生成对应的加速度冲击波形曲线。根据法规标准, 对被测加速度传感器的冲击灵敏度、脉冲持续时间误差以及加速度峰值误差进行计算。最后, 生成报表并保存对应测试数据。软件操作界面如图 2 所示, 包含通道设置栏、定时设置栏、记录设置栏、采集数据栏等。

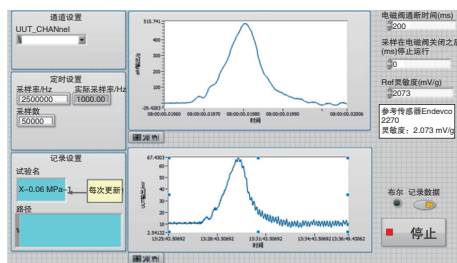


图2 测试系统软件操作界面

3 冲击校准过程数学模型建立

为了预测并指导冲击校准实验的进行, 需完成对冲击校准过程的数学模型建立: 主要分为弹体在气缸筒内运动的气动弹射过程和弹体与波形发生器碰撞后的冲击缓冲过程。气动弹射模型的主要目的是确定弹体与铁砧末端缓冲垫碰撞时的速度 v_{i0} 。由于设计的校准装置气动弹射部分可视为一个开口气缸弹射装置, 可通过联立高压气体的能量方程、质量方程和弹体模块的运动方程, 利用数值计算方法求解微分方程组, 即可得出气动弹射各参数的瞬时值, 从而确定 v_{i0} [11-12]。根据弹性变形理论, 推导冲击缓冲过程的数学模型。弹体在碰撞时产生的冲击力 F 如式(4)所示。

$$F = E \cdot \varepsilon_z \cdot S = E \frac{w}{h} \pi r^2 \quad (4)$$

式中: E 为缓冲垫弹性模量; ε_z 为缓冲垫应变; w 为缓冲垫受冲击后压缩量; h 为缓冲垫初始厚度; r 为缓冲垫半径。

根据牛顿第二定律可得

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = -F \quad (5)$$

$$m_2 \frac{dv_2}{dt} = F \quad (6)$$

式中: m_1 为弹体模块质量; v_1 为弹体模块速度; m_2

为被撞铁砧模块质量; v_2 为被撞铁砧模块速度。

弹体与缓冲垫间的相对速度 v_r 和缓冲垫在轴向的压缩变形速率相同,则有

$$\frac{dv_r}{dt} = -\frac{F}{m_1} - \frac{F}{m_2} = -F \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} = -\frac{F}{M} \quad (7)$$

式中 M 为弹体模块和被撞铁砧模块冲击缓冲过程中的等效质量。

结合式(4)和式(7)可以得到

$$\frac{1}{2} d \left[\left(\frac{dw}{dt} \right)^2 \right] = -\frac{E w \pi r^2}{M h} \cdot \frac{dw}{dt} \quad (8)$$

通过式(8)可以求得缓冲垫最大压缩量:

$$w_{\max} = v_{r0} \sqrt{\frac{M h}{E \pi r^2}} \quad (9)$$

冲击校准过程中,加速度冲击峰值幅度的计算如式(10)所示。

$$a_{\max} = \frac{F_{\max}}{m_2} = \sqrt{\frac{E M \pi}{h}} \cdot \frac{r v_{r0}}{m_2} \quad (10)$$

4 实验与分析

4.1 波形发生器分析

为了产生符合要求的半正弦冲击信号,需对铁砧缓冲垫(波形发生器)、弹射驱动气压 P 以及快速开关阀导通时间 t 进行调整。其中,波形发生器的作用尤为重要,若弹体和铁砧直接接触会产生较大的谐振,在铁砧末端增加缓冲垫用作波形发生器,可以滤除不必要的高频信号,获得较为理想的冲击加速度波形。

工业用毛毡采用天然羊毛,经过缩绒或者其他特殊工艺加工粘合而成,富有弹性,可作为防震、密封、衬垫材料。根据测试经验,较厚的毛毡适用于冲击峰值幅度较低,脉冲持续时间较长的半正弦冲击波形。因此,本装置优选直径 20 mm,厚度分别为 10 mm 和 5 mm 的毛毡作为波形发生器。

硅胶材料具有弹性与黏性,受外力作用会产生变形,但外力消除后立刻恢复原状,且由于弹性模量较低,故重复性较好。另外,硅胶具有抗腐蚀及物理性能较稳定的特点。本装置尝试采用直径 20 mm,厚度分别为 10 mm 和 5 mm 两种尺寸,35HA 和 48HA 两种不同硬度的硅胶缓冲垫进行对比实验。

弹簧阻尼器是准弹性脉冲形成装置,通常用于产生半正弦脉冲波形。本装置选用亚德客 ACJ1007 阻尼可调式弹簧阻尼器,压缩行程为 7 mm,通过调节阻尼档位来形成不同的半正弦冲

击脉冲。不同波形发生器如图 3 所示。

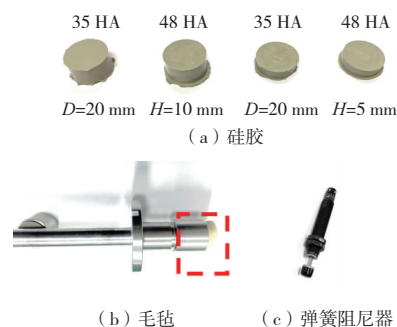


图 3 不同波形发生器

实验时设定快速开关阀导通时间为 200 ms,以 0.05 MPa 为间隔,测试各缓冲垫在 0.05 MPa ~ 0.4 MPa 中的冲击曲线,再尝试满足 25g、50g、100g、200g、500g、1 000g、2 000g 的冲击设定参数(调整驱动气压和快速开关阀打开时间)。测试得到的标准传感器采集的冲击信号如图 4 和图 5 所示。根据实验结果证实,使用 10 mm 厚羊毛毡垫得到的冲击曲线抖动较大,5 mm 厚羊毛毡垫时得到的冲击曲线抖动较小,基本只存在于冲击曲线上上升阶段,而使用硅橡胶和弹簧阻尼器得到的冲击曲线抖动最大。标准中对脉冲持续时间的定义为:在冲击峰值幅度 10% 处进行测量。因此,5 mm 厚羊毛毡垫基本可避免对测试曲线的抖动影响。

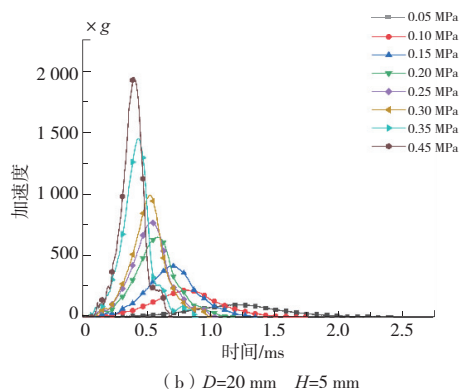
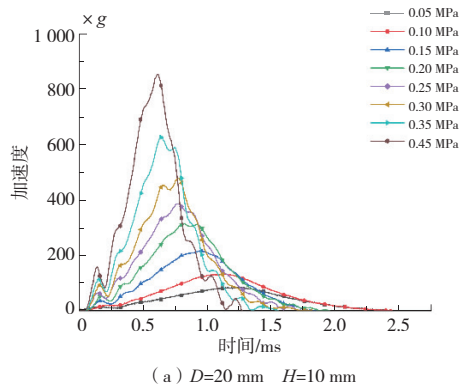


图 4 羊毛毡垫冲击信号曲线

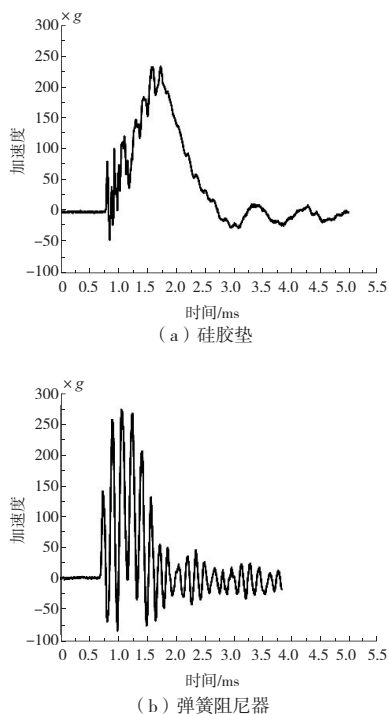


图5 硅胶垫和弹簧阻尼器典型冲击曲线

使用5 mm厚羊毛毡垫完成标准冲击值的曲线($25g \sim 2\,000g$ 不更换缓冲垫)。由于测试中存在噪声信号的影响,较低加速度峰值的测试可能会受到影响而无法准确判断加速度峰值和脉冲持续时间,如表1所示。

表1 5 mm厚羊毛毡形发生器试验数据

序号	电磁阀 时间/ms	弹射驱动 气压/MPa	冲击峰值 幅度 $\times g$	脉冲持续 时间/ms
B25	198	0.050	24.710	2.900
B50	190	0.055	49.855	2.336
B100	185	0.060	102.046	1.648
B200	200	0.095	205.160	1.176
B500	200	0.170	507.266	0.824
B1 000	200	0.300	1 034.747	0.556
B2 000	200	0.405	2 108.855	0.328

4.2 数值计算与实验测量结果对比

为了验证所建数学模型的正确性,需要在波形发生器选定的基础上,将数值计算所得结果与实验测量得到的加速度冲击峰值幅度进行对比。首先,明确实验中所用羊毛毡缓冲垫的压缩弹性模量,如图6所示。羊毛毡垫经缩绒或其他特殊工艺粘合而成,存在间隙,因此可以看出当冲击力较小时,缓冲垫压缩量较大,其对应的压缩弹性模量较小。随冲击力的增加,缓冲垫层与层之间的

间隙减小,压缩应力显著增大,对应的压缩弹性模量也随之增大。接着,将实验中测得的弹性模量,结合气动弹射过程微分方程组计算得到的 v_{t0} ,代入加速度冲击峰值幅度的式(10)中,得到数值计算加速度冲击峰值幅度和实验测量结果对比如图7所示。

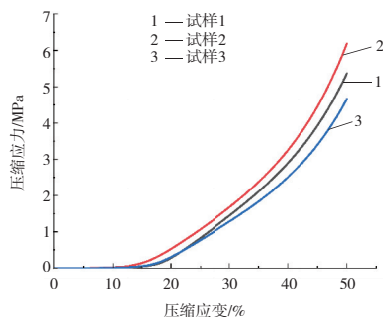


图6 5 mm羊毛毡垫压缩特性曲线

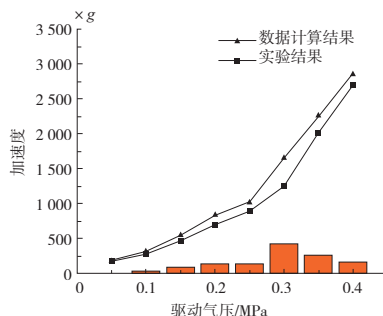


图7 数值计算和实验测量结果对比

图7中,灰色柱状图为数值计算结果和实验结果的差值。除了驱动气压为0.3 MPa时实验值和计算值有较大差距,其余实验结果与数值计算结果差距都较小,误差基本在10%左右。其原因可能为在气动弹射过程中所建立的假设条件在实际实验过程中无法达到,比如弹体与铁砧末端缓冲垫碰撞过程中不可能完全弹性碰撞,必然存在能量损失。

4.3 重复性计算

为了检测冲击校准装置的重复性,在指定的加速度冲击峰值幅度和脉冲持续时间组合下,采用相同的设定参数,短时间内重复进行5次冲击测试,记录标准传感器的冲击峰值幅度。利用测试数据进行冲击峰值幅度和脉冲持续时间的重复性计算,得到设定加速度在 $25g$ 下冲击峰值幅度重复性和脉冲持续时间重复性误差最大,分别为1.241 44%和1.692 47%。如图8所示,将测试数据以脉冲持续时间为 x 轴,加速度冲击峰值幅度为 y 轴,可较为直观地判断校准装置重复性。

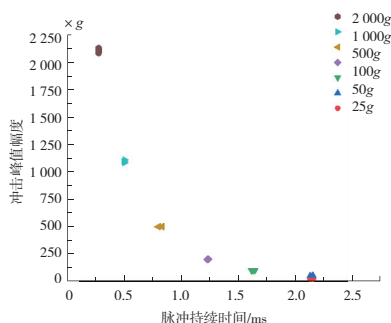


图8 规定峰值幅度和冲击脉冲持续时间下产生的冲击分布

4.4 扩展不确定度计算

参考 GB/T 20485.22—2008/ISO 16063—22《振动与冲击传感器校准方法第22部分:冲击比较法》标准,对此装置的冲击灵敏度校准的扩展不确定度进行计算。其中,冲击校准装置横向运动、数据采集卡采集电压信号测量误差、标准传感器灵敏度幅值线性度和年稳定性、标准传感器温度因素、测量重复性、加速度传感器安装、电荷电压转换器引入的不确定度分量分别为 0.120 0%、0.001 5%、0.200 0%、0.077 9%、1.240 0%、0.038 5%、0.010 0%,合成标准不确定度为 1.280 0%,相对扩展不确定度($k=2$)为 2.560 0%。

4.5 灵敏度计算

在上述实验数据基础上,进行冲击灵敏度校准测试。采用 EGCS-6000 作为被测传感器,在 100g~2 000g 的冲击峰值幅度中进行测试,每个冲击峰值幅度测试 3 次,测量结果如图 9 所示。可以看到,被测传感器不同冲击峰值幅度时灵敏度基本接近,计算后灵敏度重复性为 0.94%。

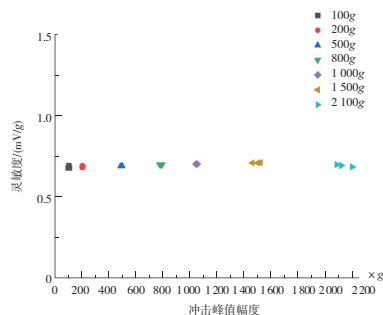


图9 冲击灵敏度测量结果

5 结语

本文设计了一种用于加速度传感器的气动活塞式冲击校准装置,对其进行了理论分析和实验研究。

1)通过设计空气轴套和被撞铁砧结构,抑制冲击时产生的非轴向运动,采用精密减压阀和快

速开关阀控制弹体的气动弹射。

2)通过基于 NI 数据采集卡的 LabVIEW 测量控制程序完成对装置的控制、传感器信号的采集、冲击曲线的生成、加速度冲击峰值幅度与脉冲持续时间的确定,以及被测传感器灵敏度的计算。

3)通过冲击校准过程数学模型的建立,为预测和指导冲击校准实验奠定了重要理论基础,并通过实验研究验证了所建数学模型的正确性。

4)通过对比不同种类波形发生器的冲击信号曲线结果,选择直径 20 mm、厚度 5 mm 的羊毛毡垫作为波形发生器,并完成 20g~2 000g 冲击峰值幅度的测试。校准装置的冲击峰值幅度和脉冲持续时间的重复性均不超过 3%,达到国外同类产品的技术水平,冲击灵敏度的扩展不确定度也低于 ISO 16063—22(小于 5%, $k=2$)的要求。使用校准装置检测 EGCS-6000 被测传感器的灵敏度,并通过计算得到灵敏度重复性为 0.94%。

参考文献:

- [1] 任立海,张国庆,董立强,等.车体正面碰撞加速度波形优化设计研究[J].汽车技术,2019(9):49-53.
- [2] 潘兆马,王殉,袁焦,等. MEMS 加速度传感器的工程振动监测系统[J].传感器与微系统,2021,40(4):86-89.
- [3] 孙浩琳,张大治.高精度低冲击加速度校准装置研究[J].计测技术,2021,41(2):172-177.
- [4] 毕文辉.振动冲击传感器的瞬态校准装置和方法[J].传感器世界,2020,26(6):26-30.
- [5] 闫瑞,骆昕,赵强,等.基于 LabVIEW 的冲击法动态力传感器校准装置[J].计量科学与技术,2021(10):54-57,62.
- [6] BILGIC E. Determination of pulse width and pulse amplitude characteristics of materials used in pendulum type shock calibration device[J]. Acta Physica Polonica A,2017,132(3-II):857-860.
- [7] 胡红波,孙桥,黄宇中.不同冲击激励系统绝对法冲击校准对比可行性的研究[J].振动与冲击,2012,31(20):27-31.
- [8] NOZATO H, SHIMIZU M, NAKAO S, et al. A comparison of low-shock and centrifuge calibrations using piezoresistive accelerometers[J]. Metrologia, 2018, 55(1): S13-S22.
- [9] 尹钊,余抗,赵波.不同材料安装底座对冲击传感器灵敏度影响试验研究[J].航天器环境工程,2021,38(1):50-54.
- [10] 高鹏,郭涛,夏烈芳.不同安装基座下冲击信号的冲击响应谱研究[J].通信技术,2010,43(4):211-213.
- [11] 李博平,李国庆,张笈玮,等.压缩空气弹射系统内弹道特性[J].兵工学报,2021,42(12):2606-2616.
- [12] 璩金超,张士卫,景凤理,等.元件参数对气动弹射性能影响分析[J].机床与液压,2019,47(9):171-174.

收稿日期:2023-02-21