

基于 LabVIEW 的冲击力检测系统设计

王玉华, 黄凯明

(中国计量大学 机电工程学院, 杭州 310018)

摘要: 在进行装甲防护材料的研究与制造过程中, 需要对所设计的装甲防护材料进行冲击试验, 从而检测产品的防护性能; 现有的装甲防护材料测试手段存在只能进行定性分析, 不能进行定量分析的不足; 针对当前传统的冲击力检测系统操作复杂, 数据处理繁琐, 成本高的问题, 设计了一种基于 LabVIEW 的冲击力检测系统; 系统实现了对数据进行实时采集、实时显示、自动存储、回放, 完整的记录碰撞实验中冲击力的的大小及其变化过程; 系统运行稳定, 精度高, 成本低, 适应现代化测试的要求。

关键词: 冲击力; 检测系统; 数据采集; LabVIEW

Design of Impact Detection System Based on LabVIEW

Wang Yuhua, Huang Kaiming

(College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In the armor protection materials research and manufacturing process, the need for the design of the armor protective material impact test, so as to detect the product's protective performance. The existing methods of armored protective material can only be qualitative analysis, can not be quantitative analysis. Aiming at the problem that the traditional impact detection system is complicated, the data processing is cumbersome and the cost is high, an impact detection system based on LabVIEW is designed. The system realizes real-time data acquisition, real-time display, automatic storage, playback and completely records the size of the impact and its changes in the process. The system is stable, high precision, low cost, to meet the requirements of modern testing.

Keywords: impact; detection system; data acquisition; LabVIEW

0 引言

装甲防护材料在受到子弹冲击后产生裂纹和形变并且防护性能下降的原因是在极短的时间内受到很大的冲击力, 冲击点上的温度骤然升高破坏了装甲材料的结构。产生裂纹和形变的过程与冲击力大小及其变化过程息息相关。因此, 测量冲击力大小及其变化过程是分析材料防护性能最直接的办法。霍普金森杆是研究材料动态力学性能的主要实验方法。但是, 霍普金森杆操作复杂, 数据处理繁琐, 需要轻气炮、应变仪等造价昂贵的装置, 所以应用范围受限, 并没有推广到实际的靶场^[1-2]。实际靶场的检测方法是: 对装甲防护材料进行枪击试验, 按照装甲防护材料的国家标准, 对发生穿透的材料不做进一步计量, 对未穿透的材料测量其正面裂纹、弹孔直径、弹孔深度和背面的鼓包高度; 对材料背面有、无飞溅物和损伤情况进行定性评价。没有对子弹冲击材料时冲击力的动力学过程进行计量测试。在实际测量中, 同一个裂纹不同的人测量的数值不尽相同, 这样就带来了测量误差。而这种人工测量裂纹、弹孔直径、弹孔深度、背面的鼓包高度、背面有无飞溅物等指标的测试方法只能进行定性分析, 不能进行定量分析^[3-4]。现有的测试手段还比较粗糙, 测试结果也不够精确。这些检测手段还不能满足科学研究和实际开发产品的需要。因此, 开发一种

更加轻便, 能够实弹射击, 能同时满足科学研究和实际需要的检测手段, 具有非常重要的现实意义。

本文基于 LabVIEW 设计了一套冲击力检测系统。以 LabVIEW 为平台编写了系统的界面显示程序实现了数据采集, 数据的分析与存储, 冲击力一时间曲线的显示。从而非常直观的反映冲击实验中冲击力的的大小及其变化过程。

1 系统原理

本文设计的冲击力检测系统主要应用在实际靶场的实弹射击试验中。系统主要由压力传感器、信号调理电路、数据采集卡、LabVIEW 软件平台和电源等部分组成, 系统框图如图 1 所示。其中, 压力传感器、信号调理电路、数据采集卡都属于硬件部分, 实现数据采集、滤波和数字化^[5-6]。由于系统用于实际靶场的子弹冲击力检测, 在试验的时候, 压力传感器受冲击产生的信号幅值大, 频率高, 必须把采集的信号进行处理才能送入数据采集卡, 经转换后送入计算机。

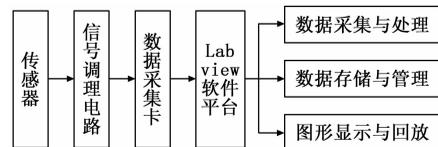


图 1 检测系统框图

收稿日期: 2017-08-11; 修回日期: 2017-09-03。

作者简介: 王玉华(1964-), 女, 吉林通化人, 博士, 教授, 主要从事机电传动及自动化、电力系统检测与控制技术及电力变换技术方向的研究。

软件部分包括, 采集卡驱动程序、信号处理程序、系统界面设计。采集卡驱动程序为计算机和数据采集卡提供了软件接口。数据采集卡通过并口与计算机进行数据传输。采集的数据

经过信号处理程序调整后在计算机上实时显示冲击力的大小及其变化过程。

2 硬件设计

2.1 关键参数计算

由参考文献[7-8]可知,子弹在撞击靶板时产生的冲击波形可以用升余弦函数来近似。升余弦函数:

$$f(t) = \frac{E}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) \right], 0 \leq |t| \leq \tau \quad (1)$$

升余弦函数对应的频域函数:

$$F(\omega) = \frac{E\tau Sa(\omega\tau)}{1 - \left(\frac{\omega\tau}{\pi}\right)^2} \quad (2)$$

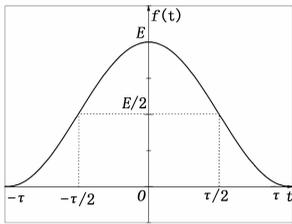


图 2 升余弦函数时域图像

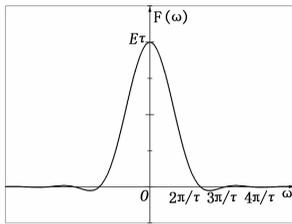


图 3 升余弦函数频域图像

升余弦函数图像如图 2 所示,频域函数图像如图 3 所示。由升余弦函数的时域和频域函数图像可知,升余弦函数的频域函数振幅逐渐衰减并呈现收敛状态,频域函数的能量主要集中在第一个零点之内。当脉冲宽度为 2τ 时,对应频域函数的第一零点 $\omega_1 = \frac{2\pi}{\tau}$, 则频率:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{\tau} \quad (3)$$

即对于子弹在撞击靶板时产生冲击波形的脉冲宽度为 2τ 时,所选取的传感器频率需要大于 $\frac{1}{\tau}$ 。也有文献[8-9]指出,在进行子弹在撞击靶板实验的时候,选取的传感器频率需要满足:

$$f = \frac{1.5}{2\tau} \quad (4)$$

其中: 2τ 为冲击波形的脉冲宽度。

2.2 ANSYS/LS-DYNA 仿真实验

ANSYS/LS-DYNA 软件是著名的通用有限元分析软件,具有强大的数值模拟功能,能够对真实世界的各种复杂几何非线性、材料非线性和接触非线性进行模拟。在求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等非线性动力冲击问题上取得了令人满意的结果,因而在民用和国防工业领域有广泛的应用^[10-11]。本文采用了 ANSYS/LS-DYNA 建立子弹和靶板有限元模型,并生成关键字输入文件,再由 LS-DYNA 程序进行分析,最后由 LS-PREPOST 进行后处理,从而实现子弹对防护复合材料的碰撞和侵入过程的数值模拟。

由于子弹对靶板的侵入问题是一个高度非线性的动力学问题,在对这类问题进行数值模拟的时候,选取合理的材料分析模型是能否得到准确结果的关键。在 ANSYS/LS-DYNA 中可以选取带有断裂失效的 Johnson-Cook 本构模型来描述侵入

过程的力学性能^[12-13]。Johnson-Cook 本构模型在大应变情况下的本构关系为:

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}_p^n)(1 + C\ln\dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (5)$$

式中, A, B, C, D 为材料常数; $\bar{\epsilon}_p$ 为材料等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$ 为材料塑性应变率; $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$ 为相对温度,其中: T_r 为当前室温, T_m 为材料的熔点温度。

子弹和靶板有限元模型中,弹头形状设置为头部为半球形的圆柱金属弹丸,半径 1.5 cm,长度 4.5 mm。靶板尺寸为 24 cm×24 cm×0.9 cm,弹头垂直侵入靶板,初速度设置为 800 m/s。考虑到弹丸和靶板都是对称结构,为了提高仿真的效率,因此在使用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行数值模拟时可以利用模型的对称性,把对整个模型的仿真简化为对四分之一模型进行仿真计算。仿真模型选用三维 Lagrangian 网格计算,网格类型选用三维实体显式单元 3D Solid164 单元进行网格划分。子弹与靶板撞击时,弹靶直接接触的区域具有应力较大且应力集中的特点,所以在子弹与靶板撞击的附近区域采用更加细致的网格划分,在远离子弹与靶板撞击的区域网格划分相对粗糙。从而在考虑仿真效率的基础上提高仿真精度。子弹与靶板的接触算法采用 *CONTACT-ERODING-SURFACE-TO-SURFACE 接触算法。为了节省 CPU 的资源,在进行单元的处理时采用单点积分。同时要避免出现沙漏模态,即在材料大变形分析中结果无效的问题,需要引入人工体积粘性项来调整弹靶材料模型的体积粘性,来确保整个分析过程的正确性。这里设置人工体积粘性项的线性系数为 0.06,二次项系数为 1.0,从而增大弹靶模型的体积粘性。设置子弹垂直撞击靶板(-Z 方向),并且约束了子弹其他 5 个自由度。仿真模型单位采用 g-cm- μ s 单位制。图 4 为子弹对防护复合材料的碰撞和侵入过程中选取了 4 个不同时间的 VonMises 应力云图,通过应力云图可以清楚直观的了解撞击过程。

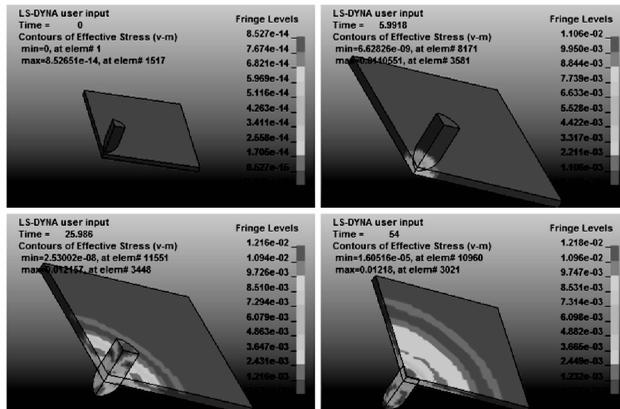


图 4 不同时间应力云图

设置计算时间为 400 μ s,每 2 μ s 输出一个数据结果文件。计算结束后,利用 LS-DYNA 提供的后处理器 LS-PREPOST 对之前产生二进制结果文件进行后处理,在 LS-PREPOST 中导入结果文件 d3plot 可以得到子弹侵入过程的加速度时间如图 5 所示。

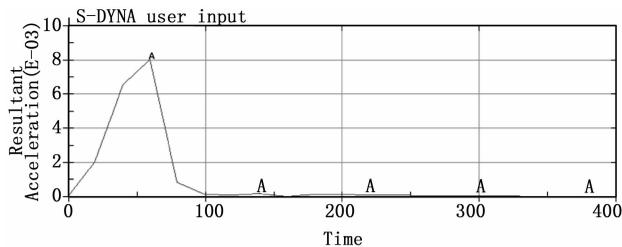


图 5 子弹的加速度曲线

通过有限元仿真得到的子弹加速度曲线可以得到子弹在撞击靶板时产生的冲击波形脉冲宽度为 $100\mu\text{s}$, 结合公式 (3) 和公式 (4) 以及图 5 可以大致推算出压力传感器的频率需要满足固有频率大于 20 kHz, 从而为压力传感器的选取提供有效的参考。

2.3 数据采集系统

数据采集系统由压力传感器、放大电路、数据采集卡、计算机等组成。

本系统采用型号为 JLBS-1 的 S 型压力传感器, 是一种压阻式压力传感器, 灵敏度为 2 mV/V , 激励电压为 12 V。传感器采用了箔式应变片贴在合金钢弹性体上, 具有测量精度高、稳定性好、温度漂移小、输出对称性好、结构紧凑的特点。压阻式压力传感器主要是基于单晶硅的压阻效应, 在硅膜片特定方向上扩散 4 个等值的半导体电阻, 并连接成惠斯通电桥。当外力加载在膜片上时, 电桥失去平衡。若对电桥加恒压源时, 便可得到与被测压力成正比的输出电压, 从而达到测量压力的目的。原理如图 6 所示。

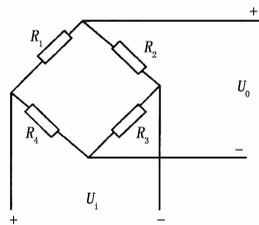


图 6 压力传感器原理图

可以推出:

$$U_0 = \frac{(R_2 R_1 - R_1 R_3)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_1)} U_i \quad (6)$$

其中: R_1, R_2, R_3, R_4 为应变片电阻, U_i 为传感器的输入电压, U_0 为传感器的输出电压。

当时 $R_1 R_3 = R_2 R_4$, 电桥达到平衡条件, 这时候传感器的输出电压 $U_0 = 0\text{ mV}$ 。

传感器在外力作用下产生弹性形变, 同时电阻应变片也发生形变, 电阻应变片形变后, 它的阻值发生变化。假设各桥臂阻值变化相同, 变化量为 ΔR , 由于 R_1, R_3 处于正应力区, 电阻值增加 ΔR ; R_2, R_4 处于负应力区, 电阻值减小 ΔR , 电桥失去平衡, 而 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, 可以推出传感器输出电压为:

$$U_0 = \Delta R / R \cdot U_i \quad (7)$$

公式 (7) 说明压力传感器输出电压与传感器所受压力成

正比。

放大电路是整个数据采集系统的重点。系统采用三运放构成的仪表放大器作为压力信号的放大电路。这里选用高速精密运算放大器 OPA602 构成仪表放大电路。OPA602 具有高输入阻抗、高共模抑制比、低温漂等优良特性, 采用 LM7812 和 LM7912 双电源供电。仪表放大电路如图 7 所示, 第一级由 A1 和 A2 构成同相输入, 提高了输入阻抗。第二级由 A3 构成差分放大电路, 具有很高的输入阻抗和共模抑制比。电阻 $R_1 = R_3, R_2 = R_4, R_5 = R_6$, 则输出电压:

$$U_0 = (U_1 - U_2) \left(1 + \frac{2R_5}{R_C}\right) \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (8)$$

由公式 (8) 可知, 仪表放大电路的增益可由调节 R_1, R_2, R_3, R_C 进行设置。电阻选择精度高, 性能稳定的金属膜电阻。这里选取 $R_1 = R_3 = 1\text{ K}, R_2 = R_4 = 20\text{ K}, R_5 = R_6 = 2\text{ K}, R_C = 1\text{ K}$, 使得放大电路的输出满足数据采集卡的要求。

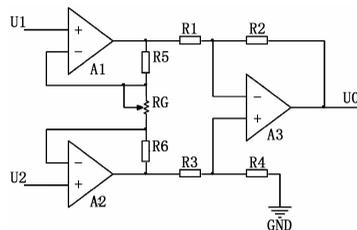


图 7 仪表放大电路

由奈奎斯特采样定理可知: 在进行模拟/数字信号的转换过程中, 当采样频率大于模拟信号中最高频率的 2 倍时, 采样之后的数字信号完整地保留了原始信号中的信息, 实际应用中需要保证采样频率为信号最高频率的 3~5 倍。因此, 这里选择 spectrum 公司的 m3i.41 高速数据数据采集卡, 分辨率 14bit, 采样率为 100 MS/s。采集卡的软件平台支持 LabVIEW、LabWindows/CVI、VC++ 等。

2.4 机械结构

硬件系统主要由数据采集系统和打靶机架两大部分构成。打靶机架结构如图 8 所示, 靶板 1 用夹具固定在内框架 2 上, 内框架 2 和外框架 3 由滑轮装配在一起。外框架 3 再由底座固定好。传感器 4 安装在内框架 2 和外框架 3 中间。传感器通过屏蔽线连接数据采集系统。所设计的打靶机架操作简单, 完整的记录了子弹在撞击靶板时和子弹穿透靶板后的冲击力曲线。

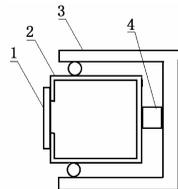


图 8 机架机械结构图

3 软件设计

检测系统的软件部分设计采用 LabVIEW 编程语言作为开发工具, 使用图形化的语言, 界面操作简单直观, 交互界面友好。其主要功能包括传感器参数数据采集、实时显示、存储、回放、分析、运动控制、报警、错误显示, 对测试系统自动化

控制^[14-15]。在数据采集系统中,从传感器采集的信号经过上位机程序处理后实现了直观的显示。

检测系统的软件设计流程图如图 9 所示。包括用户操作界面设计,调用驱动程序实现系统初始化,设置系统参数,比如设置输入范围、触发值、触发方式、耦合方式,还有数据采集与存储以及图形显示与回放。具体步骤为:



图 9 软件设计流程

1) 设计操作界面。操作界面设计尽量简洁直观,要考虑用户使用习惯,把重要的参数设置用不同的颜色加以区分。

2) 系统初始化。进入测试系统后,首先需要对系统各个模块进行初始化,并对异常情况进行报警,为系统的正常运行做准备。

3) 系统参数设置。主要根据传感器类型以及电荷放大器的输出信号的特征来设置输入范围、触发值、触发方式、耦合方式。根据实际的采集需求和本地硬盘容量设置采样率。

4) 数据处理与存储。对采集信号的最大值,周期进行分析处理,将原始信号或者处理后的信号以电子表格格式存储在本地硬盘上,便于查阅历史数据。任意设置数据的存储格式、保存路径以增加系统的灵活性。同时需要合理设置缓存区的大小、扫描率和扫描数,实现高速采集并保存数据。

5) 图形显示与回放。在测试过程中需要读取缓存区数据对冲击力信号进行实时显示。测试完毕后,在测试过程中可能会出现异常情况或者信号引入了一些干扰,导致测试结果与实际情况不一致,需要用户将保存在本地硬盘的数据进行回放,从而对系统进行改进。

4 测试结果

所设计的冲击力检测系统对 9 靶板进行了 6 次冲击试验,图 10 为 6 次冲击试验的冲击力曲线图。在 0~0.002 内,冲击力的大小迅速上升。在 0.002 时,冲击力达到最大值。在 0.002 后,冲击力开始减小。整个冲击过程持续时间约 0.006。从图中可以得出在冲击试验中,靶板受到的最大冲击力范围是 0.5~0.6,对应时间为 0.002。结果显示设计的检测系统测试精度高,测试结果稳定,具有很好的动态重复性,较好地验证了基于 LabVIEW 的冲击力检测系统设计的可行性。同时,实验结果得出的最大冲击力、冲击过程持续时间和冲击力大小变化曲线可以为装甲防护材料的设计和测试提供参考。

5 结论

本文设计的 LabVIEW 冲击力检测系统运行稳定,大大提高了工作效率,满足了现代化测试的要求。优点如下:

1) 测试过程自动化。用户界面操作简单,减少了人工操作的时间,大大提升了测试效率;

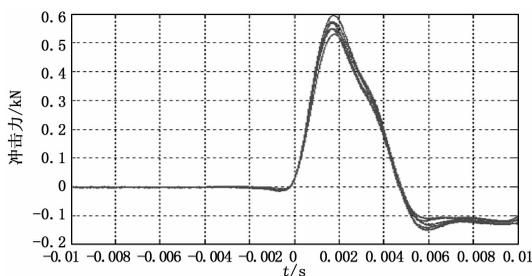


图 10 冲击力曲线

2) 实时显示测试图形和回放历史数据。自动记录数据并保存在本地硬盘,便于查询之前的测试过程,从而进行系统的改进与优化;

3) 系统稳定可靠。测试精度高,减少了人工因素的干扰。对测试图形的关键量进行统计分析对比,有助于找出测试产品的不足;

参考文献:

- [1] Guo Y Z, Li Y L. A novel approach to testing the dynamic shear response of Ti-6Al-4V [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2012, 25 (3): 299-311.
- [2] 许全东. 霍普金森杆实验数据处理程序设计 [D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [3] 绍兴明透装甲材料有限责任公司; 中国计量学院. 子弹冲击力在线检测仪: 中国, CN104237032A [P], 2014-12-24.
- [4] 张元豪, 陈长海, 朱锡. 钢/玻璃钢组合结构对高速弹丸的抗侵彻特性 [J]. 中国舰船研究, 2017, 12 (1): 93-100.
- [5] 张伟, 张跃. 基于 LabVIEW 的瞬态冲击力信号数据采集程序设计 [J]. 中国计量, 2011, 183 (2): 93-94+98.
- [6] 李忠奎. 虚拟仪器测试技术在爆炸应力波测试中的应用 [J]. 工程爆破, 2012, 18 (1): 75-77.
- [7] 范彪彪, 李婉蓉, 祖静, 等. 高 g 值加速度计宽脉冲冲击校准准则 [J]. 振动与冲击, 2014, 33 (03): 140-144.
- [8] 范彪彪, 王燕, 徐鹏, 等. 高 g 值加速度传感器的窄脉冲校准理论与方法 [J]. 传感技术学报, 2012, 25 (09): 1242-1245.
- [9] 吴三灵, 李科杰, 张振海, 等. 强冲击试验与测试技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [10] 张志飞, 范彪彪, 王燕. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的弹体侵彻钢板研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (02): 418-420.
- [11] Guo Y Z, Li Y L. A novel approach to testing the dynamic shear response of Ti-6Al-4V [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2012, 25 (3): 299-311.
- [12] Dey S, Borvik T, Teng X, et al. On the ballistic resistance of double-layered steel plates: An experimental and numerical investigation [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44 (20): 6701-6723.
- [13] 刘兵, 陈小伟. 平头弹穿透间隙式双层靶的穿甲模式 [J]. 爆炸与冲击, 2016, 36 (01): 24-30.
- [14] 朱明, 赵桂范, 张亮. 基于 LabVIEW 的落锤式冲击试验台设计 [J]. 机械设计, 2010, 27 (2): 93-96.
- [15] 田锦明, 龚成龙, 陈瑞, 等. 基于 LabVIEW 的 LED 自动化测试 [J]. 仪表技术与传感器, 2013, 369 (10): 94-96