

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210719

基于阵列式传感器侵彻信号采集与计层算法研究^{*}

郑德智^{1,2}, 乔孟添^{2,3}, 李中翔^{1,2}, 胡 纯^{1,2}, 张成俊⁴

(1. 北京理工大学前沿交叉科学研究院 北京 100081; 2. 北京理工大学长三角研究院(嘉兴) 嘉兴 314003;
3. 北京理工大学信息与电子学院 北京 100081; 4. 赋同量子科技(浙江)有限公司 嘉兴 314003)

摘 要:侵彻武器能够有效毁伤敌方地下工事等多层结构目标,为了实现侵彻武器对炸点的精准控制,以达到最佳的毁伤效果,多层侵彻引信侵彻信号采集与识别至关重要。本文围绕硬目标侵彻引信中侵彻信号的获取、计层算法等关键技术,提出一种基于阵列式传感器的侵彻模拟实验方法,通过设计间距,控制三次撞击时间的间隔分别为 9.15 和 5.41 ms,对比有限元仿真结果,验证了多通道信号采集电路的可靠性与模拟实验方法的可行性。同时,为提高计层识别的准确性,分别采用短时傅里叶变换、小波变换、Winger-Vile 分布对实验数据进行计层分析。分析结果表明,Winger-Vie 算法可从时间、频率、能量多维度综合分析,具有较高的识别率和直观性,但在信息提取方面还需要改进时频分析进行优化。本文研究内容为下一步实现高精度侵彻信号计层以及解决信号黏连问题提供了重要依据。

关键词: 引信;阵列式加速度传感器;FPGA;时频分析;计层识别

中图分类号: TN911. 7 TH113. 1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510. 40

Research on overload signal acquisition and layer identification algorithm based on array sensor penetration

Zheng Dezhi^{1,2}, Qiao Mengtian^{2,3}, Li Zhongxiang^{1,2}, Hu Chun^{1,2}, Zhang Chengjun⁴

(1. Advanced Research Institute of Multidisciplinary Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Yangtze River Delta Research Institute (Jiaxing), Beijing Institute of Technology, Jiaxing 314003, China;
3. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
4. Photon Technology (Zhejiang) Co., Ltd., Jiaxing 314100, China)

Abstract: The penetration weapons can effectively damage the enemy's underground works and other multi-layer structural targets. To achieve the precise control of the blast point and achieve the best damage effect, the acquisition and identification of the multi-layer penetration signal are crucial. In this paper, a penetration simulation experiment method based on array sensor is proposed about several key technologies such as acquisition of penetration signal and layer identification algorithm. The interval of three impact times is controlled to be 9.15 and 5.41 ms. Compared with the finite element simulation results, the reliability of the multi-channel signal acquisition circuit and the feasibility of the simulation experiment method are verified. Meanwhile, to improve the accuracy of layer identification, short-time Fourier transform, wavelet transform and Winger-Vile distribution were used to analyze the experimental data at meter layer. The analysis results show that Winger-Vie algorithm can be comprehensively analyzed from multiple dimensions of time, frequency and energy, with high recognition rate and intuitiveness. However, in terms of information extraction, it still needs to improve the time-frequency analysis for optimization. The research of this paper provides an important basis for realizing high-precision penetration signal meter layer and solving signal adhesion problem.

Keywords: fuse; array sensor; layer number recognition; FPGA; JTFA

收稿日期: 2022-11-16 Received Date: 2022-11-16

^{*} 基金项目: 科技部重点研发计划(2021YFB3201502)、国家自然科学基金(62203056, 62201056)、浙江省级重点研发计划(2021C01188)项目资助

0 引言

侵彻武器侵入攻击目标内部,在达到一定深度或者层数后进行引爆,以实现高价值目标破坏^[1]。引信是侵彻武器的“大脑”,它能够通过探测目标信息,实现精准起爆,从而达到最佳的毁伤效果。因此侵彻弹药及其引信的研究具有重大的战略价值。主流的引信的起爆控制方式由定时逐渐发展到调时、计层、介质识别等,并向智能化方向发展^[2]。计层引信通过获取并识别弹丸穿层信息,实现在预设层数的起爆控制,其过载信号特征明显且控制电路简洁,是目前控制起爆的主流方式^[3]。

传统计层引信控制起爆的原理是识别过载阈值,徐鹏等^[4]和张兵等^[5]分别在论文中论述了基于幅值的计层原理,但是由于弹丸侵彻过程中的力学机理十分复杂,传统阈值判定方法经常会产生误判,炸点位置识别失误将导致战斗部毁伤性能被严重削弱。

目前,侵彻引信计层的研究主要围绕信号处理方式展开。相较于传统的幅值识别算法,利用小波变换提取过载信号的小波系^[6-7]、匹配滤波提取过载信号的包络^[8]等方法进一步提高了计层的准确性,但中间过程复杂,并一定程度上依赖先验参数,需针对不同战斗部、不同靶板、不同工况设置不同阈值。焦聪^[9]采用短时傅里叶变换来对多层侵彻信号进行处理,通过对其频率成分的分析以及梯度的提取,获取层数信息。王燕等^[10]采用时频分析法研究弹体主轴方向加速度信号的 Choi-Williams 能量分布特征,提出以侵彻过程加速度信号的能量分布为依据的层识别方法。这些分析方法都利用了时频分析方法对复杂信号的识别,且计层结果较为准确,但是都仅以一种时频分析方法分析频率或能量。因此,如果可以使用多种时频方法,并利用各时频方法优越性和互补性,可以更全面地理解计层信号特征,提高计层算法的准确性。

硬目标侵彻引信的信号采集及计层信号识别是目前引信领域的重要研究方向之一。本文首先分析了多层硬目标侵彻过程中侵彻信号产生原理,并进行仿真分析;其次,提出一种基于硬目标侵彻模拟实验方法,通过自研的多通道同步信号采集系统实时采集阵列分布的传感器数据,阵列式传感器提高了系统的灵活性、准确性和有效性,更适应于战场环境的日益复杂和作战区域的不断扩大;最后,为解决传统计层方法计层不准的缺陷,使用多种时频分析方法,包括短时傅里叶变化变换、小波变化变换、Winger-Vile 分布以综合分析和处理计层信号。本文对不同频分析方法的研究将为下一步解决多层硬目标侵彻过程中侵彻过载粘连现象提供理论指导。

1 多层侵彻信号产生原理与仿真研究

1.1 侵彻加速度产生原理与特点

弹丸侵彻单层靶板的整个过程可分为三个阶段:侵彻、贯穿、自由飞行^[11]。在完成一次该过程后,弹丸将在侵彻下一层靶板的过程中重复这一过程^[12],过程如图1所示。

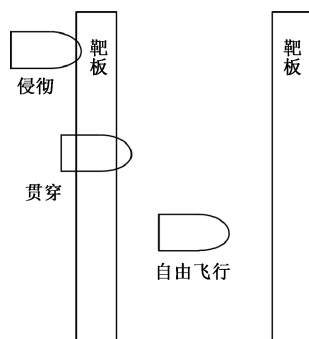


图1 弹丸侵彻多层靶板示意图

Fig. 1 Diagram of projectile penetrating a multilayer target plate

图2是一个典型的硬目标多层侵彻加速度信号示意图,其特征为具有较陡峭的下降沿,在穿层时加速度的数值快速攀升至最大,坡度越陡,加速度值升高越快,由于弹体振动以及传感器自身振动,会产生短暂的小幅度震荡后,之后会慢慢恢复至静态^[13]。

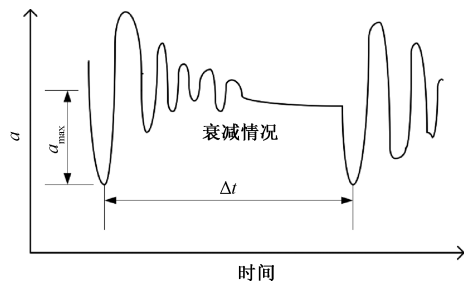


图2 硬目标多层侵彻典型加速度信号

Fig. 2 Typical acceleration signals through multiple layers

由于实际应用中,存在着靶板间距过近、弹体长度较长、结构噪声较大等噪声影响,因此会产生脉冲的粘连和振荡等情况,使得过载脉冲模糊不清,难以识别。

1.2 侵彻过程仿真分析

有限元软件仿真能够将侵彻过程表现可视化,增强对侵彻机理的理解。本文通过有限元仿真探讨侵彻过载信号的趋势特点,为模拟实验提供参考。本文运用 ANSYS/LS-DYNA 非线性显示动力分析软件建立模型对侵彻过程进行仿真^[14-15]。

1) 几何模型上,本模型建立半圆形头部、圆柱体弹丸,靶板模型为了实现多层侵彻效果,选择两层的长方体金属靶板。模型的参数如表 1 所示。

表 1 弹丸及靶板几何参数

Table 1 Geometric parameters of projectile and target plate				
				cm
弹丸半径	弹丸长	靶板长/宽	靶板厚度	靶间距
1.3	3.9	100	0.6	3

2) 网格划分与算法上,弹体以及靶板网格单元都采用三维拉格朗日算法。采用三维实体 solid164 单元进行网格分割。在划分时,为了方便计算且提高计算精度对弹体和靶板的接触区域进行了加密,加密后的图示如图 3 所示。

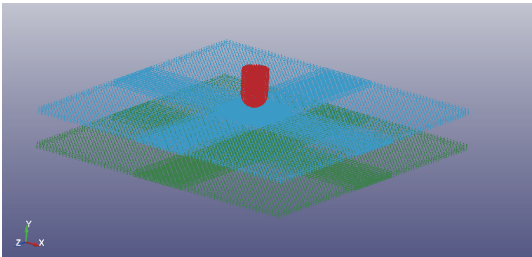


图 3 接触区域网格划分加密

Fig. 3 Contact area meshing and encryption

3) 约束以及边界设置上,在对称面上施加平动约束和转动约束,靶板边界定义为非反射边界。采用 * CONTACT_ERODING_TO-SURFACE * 算法来模拟弹丸和靶板关系,采用 cm-g- μ s 单位进行建模。

4) 由于实际弹丸的内部结构非常复杂,一般由壳体、战斗部及装药等多种元件组成。在不影响结论的情况下,仿真弹丸采用刚体弹性材料,且简化为实心弹体,具体材料参数如表 2 所示。

表 2 弹丸材料参数

Table 2 Material parameters of projectile		
密度	弹性模量 E	泊松比
7.83	2.2	0.3

两层金属靶具体参数如表 3,本构关系用 * MAT_JOHNSON-COOK 描述。

表 3 靶板材料参数

Table 3 Material parameters of target plat			
密度	弹性模量 E	剪切模量 G	泊松比
7.83	2.2	0.77	0.6

侵彻过程中弹丸的初速度被设定为 1 300 m/s,且弹丸垂直撞击靶板的中心。弹体侵彻双层靶板过程中仿真得到的速度曲线图和加速度曲线图 4 和 5 所示。

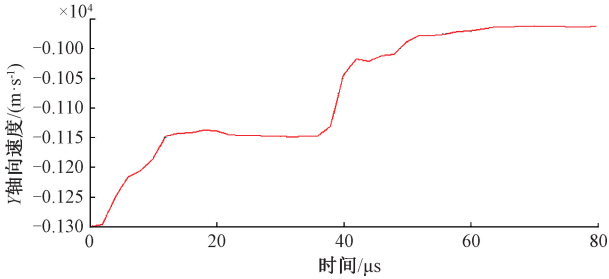


图 4 弹体侵彻双层金属靶板速度曲线

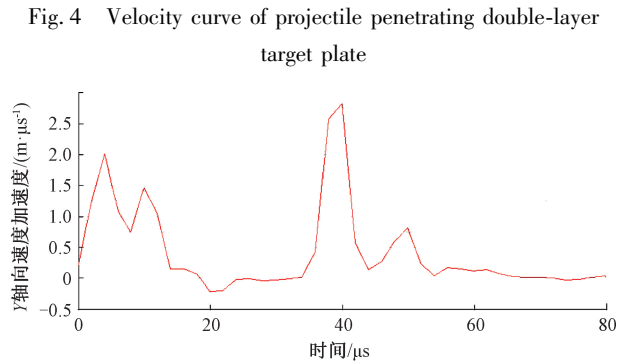


图 5 弹体侵彻双层金属靶板加速度曲线

Fig. 5 Acceleration curve of projectile penetrating double-layer target plate

从图 5 中观察到弹丸测得的加速度幅值并非完全正值,这种情况是由于弹体自身加速度沿纵向也会来回传播的影响,这种影响比较微弱,不会对加速度脉冲峰值产生较大影响,仅以最大加速度幅值作为参考^[16]。图 5 仿真结果与图 2 理论信号的特征相符,即二者加速度信号脉冲的趋势相同,穿层信号都表现为陡峭的脉冲信号,并且都存在弹体振动等噪声干扰脉冲,可以证明仿真结果的合理性。

硬目标多层侵彻仿真结果显示,多层侵彻信号存在弹体振动的噪声干扰,这种干扰在特定情况下会造成信号黏连,造成计层误差,这也是计层中的关键难点,本论文拟通过实验方法获得加速度信号,对信号进行计层算法的研究。

同时,通过仿真实验研究加速度信号硬目标侵彻过程信号的关键特征,可以指导设计侵彻引信的模拟实验,也为侵彻引信实验室模拟实验系统提供设计依据。

2 阵列式过载加速度信号采集系统

2.1 总体设计

整套信号采集系统由 3 个部分组成,主要包括内置

IC 压电(integrated circuit piezoelectric, ICP)传感器阵列模块,多通道信号采集电路(信号调理电路、ADC 电路、FPGA 控制电路、接口设计)、以及软件部分(上位机软件、下机位软件)。系统的主要结构图 6 所示。

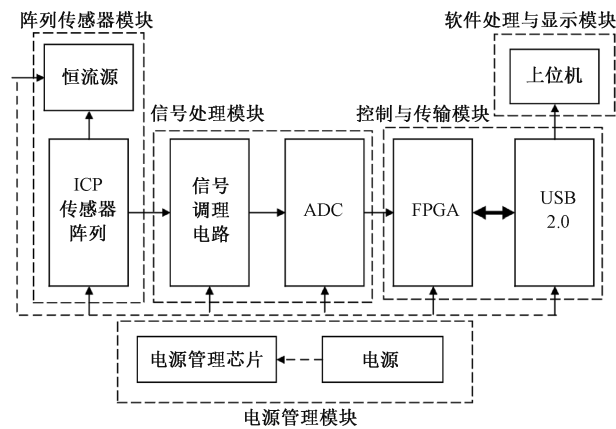


图 6 信号采集系统框图

Fig. 6 Diagram of the signal acquisition system

2.2 传感器的阵列设计

1) ICP 传感器选型

采样长度的选择应考虑冲击次数以及冲击间隔时间的长短,在第 3 节实际实验的冲击信号的过零宽度约为 20 ms,采样间隔在 5 ms 左右。对其进行采集时,为不丢失细节信息,采集间隔应控制在 0.2 ms 以内,以保证采集到足够多的细节数据,即采样频率应不低于 5 kHz。

本系统采用的 ICP 传感器型号为 INV9822 型,主要参数如表 4 所示,满足测试要求。

表 4 ICP 传感器主要参数

Table 4 Main parameters of the ICP sensor

电压灵敏度/ (mv/ms ⁻²)	最大横向灵敏度/ %	频率范围/ Hz	采样率/ kHz
9.982	<1%	0.5~8 000	2~100

2) 阵列式传感器的必要性

加速度传感器是信号采集系统的关键元件,其安全性和可靠性至关重要。复合传感与信息融合是未来侵彻信号处理的重要方向之一,阵列式传感器更适应于战场环境的日益复杂和作战区域的不断扩大。本设计采用由 4 个加速度传感器构成的传感器阵列,使得系统设计具有极大优势:

(1) 多通道传感器阵列可以提高数据的有效性。多通道传感器阵列通过各通道数据的对比,能够保证获取数据的有效性,使得实验结果更加可靠^[17]。

(2) 阵列式传感器能够提高信号获取的准确性。在多源数据中提取最佳通道,能够降低外界环境干扰,使得获取的加速度信号更利于识别,提高识别的准确性。

(3) 采用传感器阵列也能够提高系统的灵活性,广泛适用于复杂场合。提高对目标信息的感知能力是实现目标探测的前提,除了力学参数,侵彻过程中的温度^[18]、磁场^[19]参数等方面也已有初步研究。未来通过信息融合等技术方法,可以获得全面、可靠的参考数据。传感器阵列的设计,有利于为信号采集中使用多传感器信息融合相关技术铺垫,以提高系统信息采集的精度^[20-21]。

在可行性上,随着 MEMS 技术的发展,微机电系统中的结构尺寸可以设计的极为微小,有着较为成熟的工艺,可以在较小的空间制作多个结构相同的传感器,这就为传感器阵列的个性化设计提供了基本条件^[22-23]。未来可以通过调整传感器的大小、数目和排布,使得其具有更大的应用价值。

3) 设计方法

利用多个传感器组成的传感阵列与单个传感方式相比,多个传感元件的传感信息具有冗余性、互补性和相关性^[24]。并且,针对传感器数目的选择可以从以下 3 个方面考虑^[25]:

- (1) 系统可靠度和资源的合理分配
- (2) 系统成本和传感器精度
- (3) 系统有效度和系统代价。

2.3 电路设计

阵列式过载加速度信号采集系统由 3 个部分组成,主要包括 ICP 传感器阵列模块、自研的多通道信号采集电路(信号调理电路、ADC 电路、FPGA 控制电路、接口设计)以及设计的软件部分(上位机软件、下机位软件)。图 6 已经展示系统硬件部分,系统部分实物图如图 7 所示。

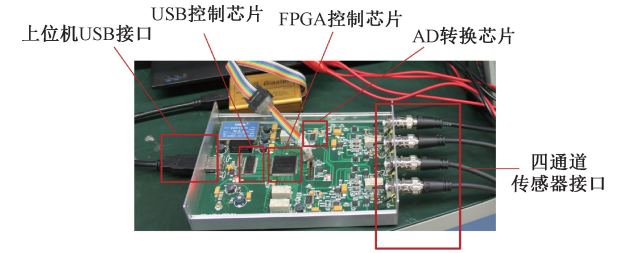


图 7 信号采集系统部分实物图

Fig. 7 Partial hardware image of the signal acquisition system

最后通过软件部分下达指令,对信号进行显示,并且可以进行数据导出,以便后续对信号进一步处理。

2.4 软件设计

合理的软件设计是系统正常运作的前提。本系统的下位机软件包括指令解析模块、时钟分频模块、A/D 数据

采集控制模块和 USB 通讯控制模块。上位机包括系统参数设置、数据采集与分析 and 系统参数校准 3 部分。上位机使用 LABVIEW 编写,4 个通道的工作模式均选择电压模式,放大倍数均设为 1,采样率为 10 000。

3 侵彻模拟实验

侵彻模拟实验是利用已有的实验手段来模拟现实环境的一种实验方式,虽然数据来源于其它物理过程,例如落锤冲击、碰撞过程等,但是它能够使被测引信真实地承受加速度冲击,因此能够用于检测引信的起爆策略^[26]。仿真实验的成本低,周期短,可重复性好,参数可随时调整和调整,灵活多变,既节省了实验成本,又大大缩短了实验周期,取得可靠的实验效果^[27-28]。

3.1 实验装置

侵彻多层硬目标模拟实验装置和实物如图 8 和 9 所示。本文使用该实验装置模拟多层侵彻过程,该装置由升降装置、三层落锤、垂直杆、模拟弹丸、底座构成。

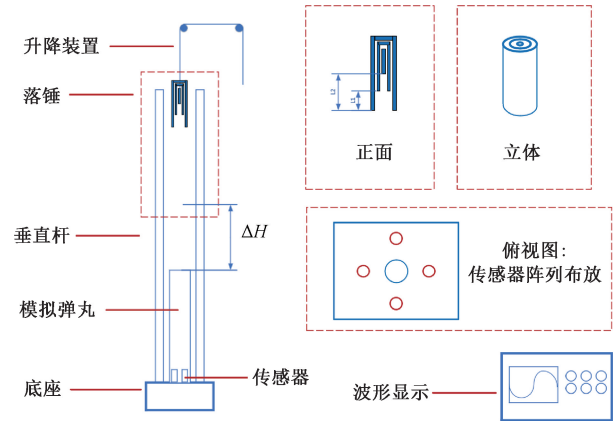


图 8 多层侵彻模拟装置原理

Fig. 8 Schematic diagram of the multi-layer penetration simulation device



图 9 多层侵彻模拟装置实物

Fig. 9 Image of the multi-layer penetration physical device

3.2 实验原理

多层落锤由 3 层金属管构成,金属管嵌套一起。落锤分为外锤、中锤、内锤,3 个落锤体的下端之间存在一定的间隔,从而使各锤能够依次击中模拟弹丸,形成 3 个持续的过载脉冲信号,实现对弹丸 3 次连续穿透靶板这一过程的仿真。撞击的时间间隔可以通过调整落锤的相对位置,即外锤和中锤、中锤和内锤的高度差来控制。

升降装置将 3 个落锤提升到一定的高度 $\Delta H = 1.5\text{ m}$,然后将落锤从提升装置上松开,落锤的外锤、中锤、内锤在垂直杆内自由下落,由于存在高度差距,会和模拟弹丸依次相撞。3 个落锤在自由下落过程中的时间和时间差分别为:

$$t_1 = \sqrt{2\Delta H/g}$$
$$t_2 = \sqrt{2(\Delta H + L_1)/g}$$
$$t_3 = \sqrt{2(\Delta H + L_2)/g}$$
(1)

$$\begin{cases} \Delta t_1 = \sqrt{2(\Delta H + L_1)/g} - \sqrt{2\Delta H/g} \\ \Delta t_2 = \sqrt{2(\Delta H + L_2)/g} - \sqrt{2(\Delta H + L_1)/g} \end{cases}$$
(2)

通过调节 L_1 和 L_2 的大小,可以间接控制撞击的时间,当 L_1 和 L_2 分别为 5 和 8 cm,将 $\Delta H = 1.5\text{ m}$, $L_1 = 5\text{ cm}$ 和 $L_2 = 8\text{ cm}$ 代入,计算可得间隔时间:

$$\begin{cases} \Delta t_1 = \sqrt{2 \times (1.5 + 0.050) \div 9.8} - \sqrt{2 \times 1.5 \div 9.8} = 9.15 \times 10^{-3}\text{ s} \\ \Delta t_2 = \sqrt{2 \times (1.5 + 0.080) \div 9.8} - \sqrt{2 \times (1.5 + 0.050) \div 9.8} = 5.41 \times 10^{-3}\text{ s} \end{cases}$$
(3)

所以理论上首次撞击和二次撞击间隔时间为 9.15 ms,二次撞击和三次撞击的间隔时间为 5.41 ms。为减少信号粘连,可适当调整间隔,计算方法相同。

3.3 实验结果验证与分析

1) 波形验证

使用上文设计的模拟侵彻实验装置,本文按照实验步骤进行了实验,侵彻多层模拟实验结果以通道 1 为例,如图 10 所示,ICP 传感器输出波形有部分杂波,但能够可以观察出 3 个脉冲的趋势和时间点。

工作模式: 通道12: 电压模式 通道34: 电流模式 滤波参数 (0~1): 0.5 通道三放大倍数: 1 通道四放大倍数: 1

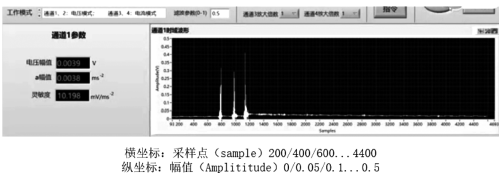


图 10 实验结果软件界面

Fig. 10 Software interface for experimental results

ICP 传感器输出波形虽然部分杂波,但能够可以观察到 3 个脉冲的趋势和时间点,且时间点与式(3)计算理论中相符合。

2) 实验结果分析与对比

首先,实验表明本文所设计的 ICP 传感器阵列信号采集电路能够准确获取侵彻多层过载加速度信号,即将该阵列式传感器应用于侵彻引信具有可行性。

其次,实验结果、仿真结果与理论信号 3 者相印证。将所得的实验数据与仿真结果比较,可以证明,加速度信号脉冲的趋势相同,能够反映一定的计层信息。

但是,实际信号与仿真信号也有一定的区别之处,对比图 10 与图 5 可得,图 10 明显有更多的杂波干扰。实际的情况下,侵彻过程非常复杂,传感器实际获取的信号曲线可能会产生脉冲的粘连和震荡,因此会产生类似图中的杂波^[16],影响计层信号的判定。

结合实验结果的分析为计层算法的设计和研究提供了思路,计层算法如果仅仅从时域信号角度研究可能会产生误判,因此需要研究更精确的计层算法。

3.4 提取最佳通道

本设计采用了传感器阵列对加速度信号进行采集,阵列式传感器的优势在于其安全性、灵活性和准确性。多组数据既保证了系统能够可靠地获取信号,也使得系统获取了更全面的加速度信息,有助于提高计层识别的准确性。因此,可以在四通道数据中,提取最佳通道,选取特征最为明显的通道数据作为目标通道,提高输出结果的准确性。

在提取最佳通道时,需要在时域对信号特征加以分析。在选取非平稳信号的时域特征时,人们常常选择采用均值、方差或标准差、能量、峰度、峰值等特征作为信号特征^[29-30]。

根据侵彻加速度信号的特点:穿层信号表现为脉冲信号,具有陡峭的下降沿,幅值较大;脉冲较尖、能量集中;有噪声干扰,可能影响主脉冲的识别。因此最佳通道信号的特征是:幅值能量超过阈值、峰度大信号明显、杂波少信号清晰。本文选用其中的幅值、能量和峰度作为侵彻信号最佳通道提取的特征。

1) 峰值:即信号最大值,它是传统阈值计层中的重要标准,如果信号中的峰值没有达到阈值,则可能有采样点的缺少。 X 为样本信号,峰值定义如下:

$$A = \text{MAX}(|X|) \quad (4)$$

2) 能量:有界信号的能量定义为序列各样点值的平方和。 X 为样本信号,能量定义如下:

$$E = \sum_{i=1}^N (X_i)^2 \quad (5)$$

3) 峰度:又称峰态系数,峰度反映了脉冲的陡缓情况。从图 2 的典型侵彻加速度信号图例可知侵彻信号一

般较为陡峭,几乎为尖峰状。 X 为样本均值, N 为样本数, σ 为样本差, f_i 为样本间隔,峰度定义式如下:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^4 f_i}{N\sigma^4} \quad (6)$$

根据 3.3 节提取的特征,本文选择能量、幅值较大且峰度超过阈值者为最佳信号。在本组实验中,根据计算结果,选取实验组 5 中的第 1 通道为样本信号。

4 计层识别方法研究

4.1 时频分析算法原理

傅里叶变对于非平稳信号(如计层信号)的研究来说,会使得信号的局部细节信息不够完备。为了同时获得频谱、时频信息,时频分析方法被引入信号分析的领域。

基于经典傅里叶方法的问题,短时傅里叶变换的思路是对信号分段加窗并使得窗足够窄,再对每一段窗内信号做傅里叶变换以同时获取频率和时间信息^[31]。由于短时傅里叶变换时间分辨率固定不变,使得它取得的效果仍然不够理想。因为非平稳信号的组成并不规律,比如含有高频的突变分量时,人们希望用更窄的时窗处理;而当一大段都为较为平缓的信号时,人们则希望采用较宽的时窗分析。

小波变换应运而生,它是一种广泛应用于信号分析的分析方法^[32]。小波变换是一种具有多分辨率特质的方法,其基本原理是通过合理选取小波变换的尺度系数(尺度因子和平移因子),对移动伸缩窗的相关性质进行相应的调节,从而使其在时频分析中更加灵活、精确。

时频表达方法分为线性时频表达和双线性时频表达,线性时频表示是不能用来描述时频能量分布(即瞬时功率谱密度),如短时傅里叶变换。而二次型时频表示法可以更加直观地表达出该信号,比如 Cohen 类和仿射类(affine),本文选用的是 Wigner-Vile 分布。

Wigner-Vile 分布是分析非平稳信号的一种重要变换方法,其物理意义明确,即可以被看作是信号能量的时频分布。其定义式中不含窗函数,这样一来巧妙规避了短时傅立叶变换牺牲时间分辨率来提高频率分辨率的情况。

4.2 小波变计层识别

根据信号的具体特征来选择和调整小波基,将有利于使小波分解和去噪取得更好的处理效果^[33-34]。时频分析中常用的小波基有 Haar 小波、sym 小波、Daubechies 小波等。

由于 sym 小波具有优良性质,且在对非平稳信号分析中获得了较好的效果,本文中也选择它来分析信号。利用 sym 小波分解的原理如图 11 所示,即 $s = a_3 + d_3 +$

$d_2 + d_1$ 。其中 a_3 为对原始信号 s 进行 3 次尺度分解后得到的信号, d_3 、 d_2 、 d_1 为分解过程中的高频噪声分量。

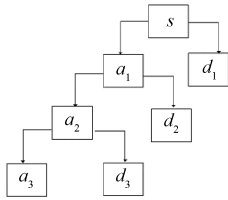


图 11 小波分解示意图

Fig. 11 Diagram of wavelet decomposition

导入实验计层信号数据,该模拟侵入信号的时域波形如图 12 所示。

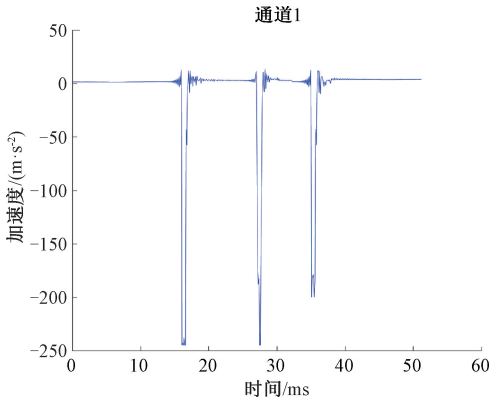


图 12 信号的时域波形图

Fig. 12 Time domain waveform of signal

根据之前阐述的原理,对实验获取的加速度信号用 sym 小波进行分析,分解结果如图 13 所示。从图 13 中可知,过载加速度信号除了本身的计层信号,还叠加有各种形式的振动噪声。其中 a_3 为利用 sym 小波 3 次尺度分解后得到的加速度信号,它反映了穿层的趋势分量,该信号波形较缓和。 d_3 、 d_2 、 d_1 均为弹体振动和传感器振动的噪声分量,在信号分析中可以将其滤除^[33]。利用小波去噪处理信号,这里选择了 Rigorous SURE (无偏风险估计阈值)消除高频噪声。并且为了使得获取的信号更为平滑,选择软阈值方法。依照以上设定所得到的去噪前后信号如图 14 所示。

借助小波分析的尺度分解,可以不同频率的分量提取出来,得到较为易于识别的频谱分量,尤其是穿层分量,可以清楚地反映出计层信号的层数信息。

并且,也可以探究其他频谱分量的特征以便更好地进行去噪的研究。但是小波分析仅仅能够将信号分解成各段,单独了解每个频段的幅度特征,而无法精确地同时计算出每个特定的频谱和振幅,因此可以借助时频谱图对其进行深入的分析。

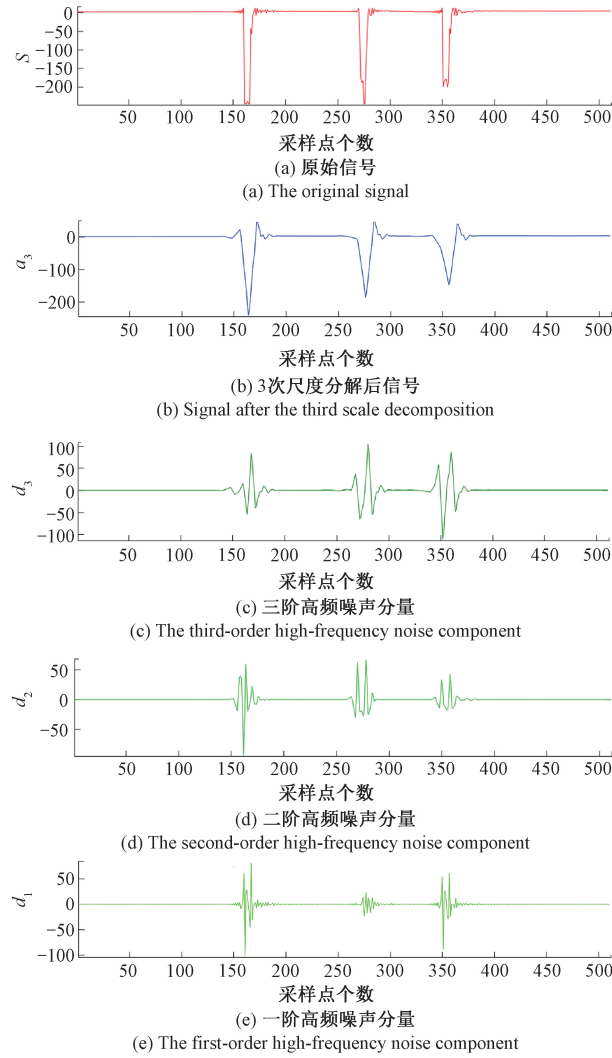


图 13 小波变换结果

Fig. 13 Wavelet transform results

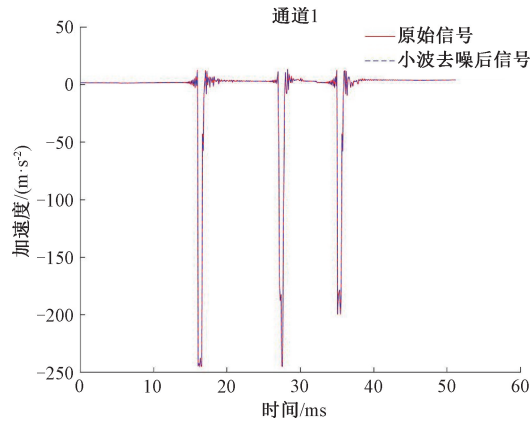


图 14 小波去噪前后对比

Fig. 14 Comparison before and after wavelet denoising

4.3 短时傅里叶变换计层识别

为了对信号进行短时傅里叶变换,本节将使用 MATLAB 时频分析工具箱中的函数对侵入加速度信号进

行时频分析。在分析过程中,本设计选用 `tfrstft` 对实测信号进行分析。

短时傅里叶变换的等高线图 and 色谱图分别如图 15 和 16 所示,可以清晰地观察到侵彻信号的层数。

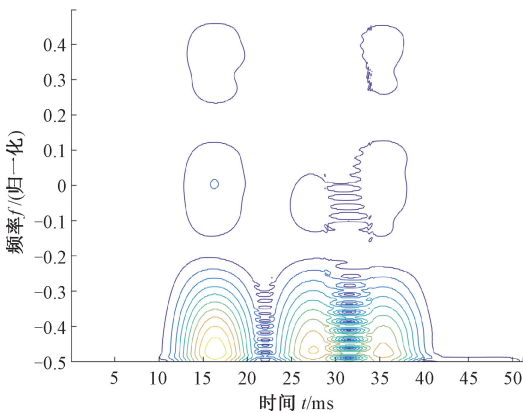


图 15 STFT 等高线图

Fig. 15 Contour plot of STFT

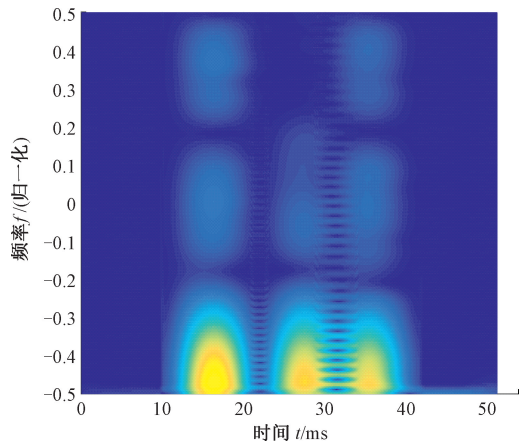


图 16 STFT 色谱图

Fig. 16 Chromatogram of STFT

传统统计层识别方法常常是基于幅值的识别,但是基于阈值识别的算法是基于时域波形的算法,由于一些杂波影响,可能会出现误判。短时傅里叶变换可以同时获得频率以及时间信息,通过时域和频域信息的结合,清晰地展示了信号的时频分布状况,也从图形上更加直观的反映了信号的计层信息。

4.4 Winger-Vile 分布

本节使用双线性时频表示再次分析信号。本节将使用 MATLAB 时频工具箱中的双线性时频分析函数,对获取的模拟侵彻信号进行时频分析。本节选用 `tfrsp`、`tfrspwv` 函数来绘制谱图,图 17、18 为两函数所绘制的三维时频谱图。

图 17、18 的三维谱图可以看出信号在每一点的时间、幅值、频率三者关系。下面将三维谱图转换为各个角度的二维谱图,方便用于观察计层信息。

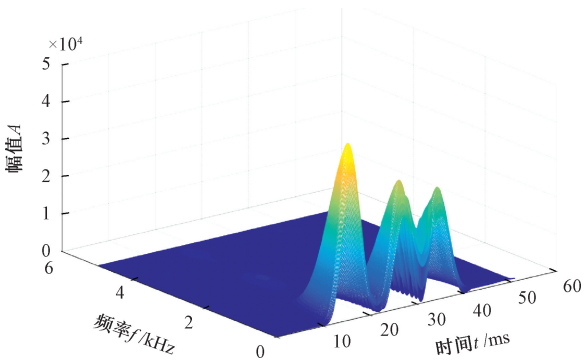


图 17 tfrsp 三维谱图

Fig. 17 3D spectrum of tfrsp

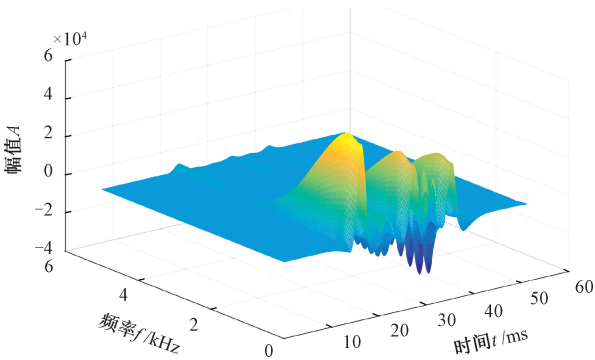


图 18 tfrspwv 三维谱图

Fig. 18 3D spectrum of tfrspwv

图 19、20 中,时间-频率分布图充分反映了很多时域、频率信息。在侵彻时间上,可以看出侵彻过程大约持续了 20 ms,三次冲击的时间点分别为 17、28、35 ms,与第 4 节的理论值相近。在频域信息的反应上,可以看出频率中夹杂一些高频成分。

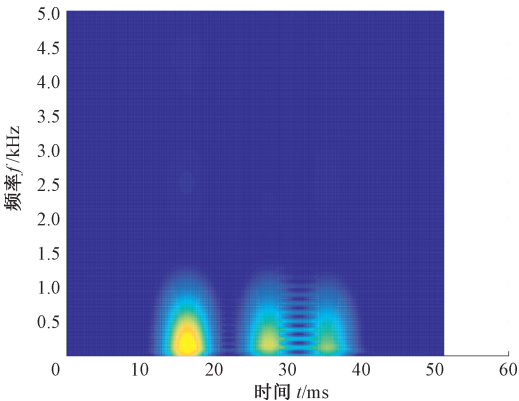


图 19 tfrsp 时-频分布

Fig. 19 Time-frequency distribution diagram of tfrsp

图 21、22 中,频率-幅值分布图则反映了时间上的能量分布信息。在能量幅值范围上,信号能量主要集中在

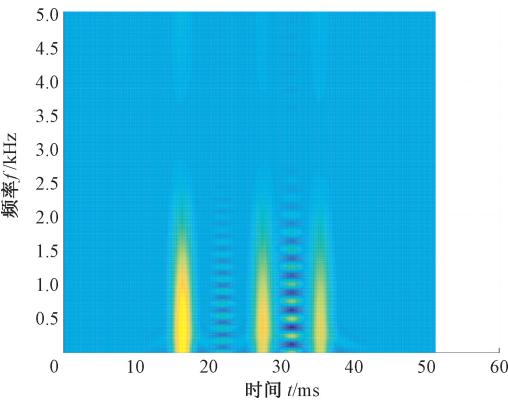


图 20 tfrspwv 时-频分布

Fig. 20 Time-frequency distribution diagram of tfrspwv

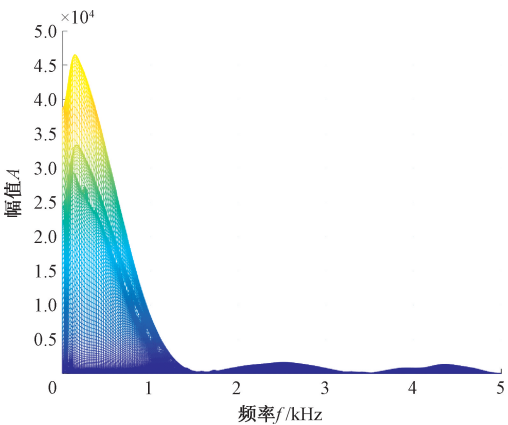


图 21 tfrsp 频率-幅值分布

Fig. 21 Frequency-amplitude distribution diagram of tfrsp

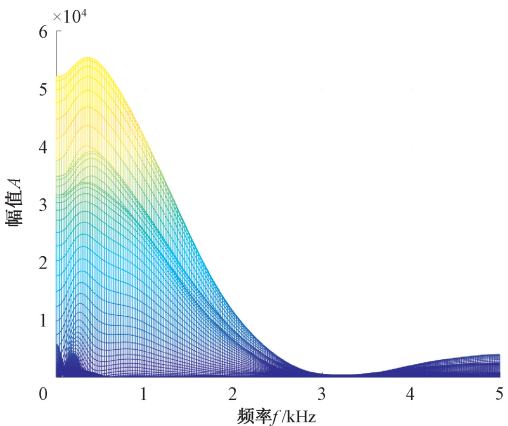


图 22 tfrspwv 频率-幅值分布

Fig. 22 Frequency-amplitude distribution diagram of tfrspwv

0~2 kHz 之内,侵彻过程中难以避免有许多高频成分,但是通过能量幅值的大小来看,它们所占据的能量很小,与计层信号的能量相比甚至可以忽略。

图 23、24 中,时间-幅值分布图反映出能量峰值即为穿层时间点,也可以准确反映计层信息。

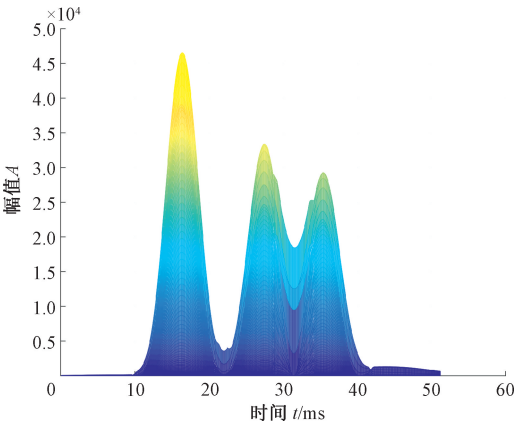


图 23 tfrsp & tfrspwv 时间-幅值分布

Fig. 23 Time-amplitude distribution diagram of tfrsp and tfrspwv

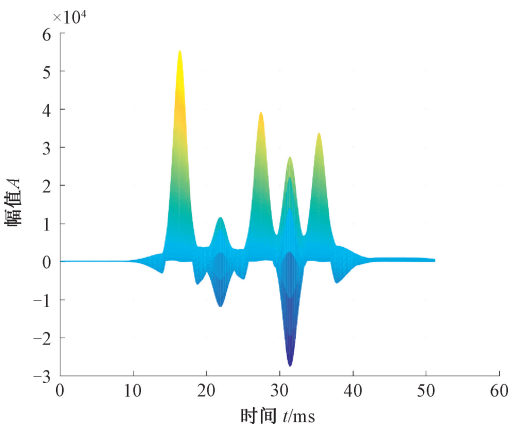


图 24 tfrsp & tfrspwv 时间-幅值分布

Fig. 24 Time-amplitude distribution diagram of tfrsp and tfrspwv

通过以上的数据,可以清楚地获取计层信息,通过色谱图准确地识别出信号中体现的穿层数,证明了该算法在计层识别中的效果。并且,算法从能量、频率、时间三方面的关系,获得更清晰的弹丸侵彻信号的相关参数,有利于之后对信号进一步的研究。

4.5 计层效果的分析与对比

基于傅里叶变换对于非平稳信号分析中的局限性,分别使用了 3 种时频分析的方法进行计层分析,3 种方法独立处理数据,下面分别总结 3 种计层方法的计层效果和它们各自的优势:

1) 小波变换可以对移动伸缩窗的相关性质进行相应的调节,从而使其在时频分析中更加灵活、精确。在图 13 中利用小波将信号分解成各段,单独了解每个频段

的幅度特征,特别是提取出低频穿层分量,滤波效果很好。但是要解决计层问题,单靠滤波和去噪等是不够的,滤波后的信号还是要进行阈值识别,仍然存在传统方法的误判问题。并且小波基的选择对信号分解和去噪的效果影响较大,使得该方法的针对性不强。

2) 短时傅里叶变换可以观测到信号的时频分布,它通过对信号分段加窗处理,再对窗内信号做傅里叶变换,同时获取信号的时频局部信息,因此通过图 15 可以观察到三段较为明亮的色段,即为三层侵彻识别效果。不过由于是线性变换,对能量信息的反映不够具体。

3) Winger-Vile 分布变换可以分析信号的时间、频率、能量分布三者之间的关系。从图 17 三维谱图分布以及

转换成图 17~19 不同角度的二维谱图,可以十分清晰地了解到信号在每个时刻的各类状态信息。尤其可以结合时间-幅值图,以及时间-频率图,可以有效地实现分层。转换为不同角度的二维谱图后,可以对信号的各种特性进行多维度、深层次的分析。

通过对 3 种算法分别处理信号效果研究可知,三者具有各自的优势,其中 Winger-Vie 算法可从时间、频率、能量多维度综合分析,具有较高的识别率和直观性,但在信息提取方面还需要改进时频分析进行优化。可设计结合三者优势的复合算法。设计和调整算法处理顺序以利用其互补性,综合获取的各类信息,实现更精准的计层。对比效果如表 5 所示。

表 5 计层效果分析与对比

Table 5 Effect analysis and comparison of the counting layer method

方法名称	优势	缺陷
小波变换	可将信号分解以了解每个频段的幅度特征,尤其是低频穿层分量,滤波效果好	不能确切的得到每一点对应的具体频率值和幅值,针对性不强
短时傅里叶变换	同时取得信号的时、频局部信息,实现计层	对能量信息的反映不够具体
Winger-Vile 分布	可以得到时间、频率、能量分布之间的关系,且时间-幅值图和时间-频率图可以有效地实现分层	信息维度较多,需要分层次分析

5 结 论

本文设计了一套计层引信采集与识别系统,通过搭建的实验平台,实现通过阵列式传感器有效且快速采集与识别计层信息。

在模拟仿真结果的指导下,本文首先搭建了一套阵列式加速度信号采集系统,阵列式传感器设计能够提升整个系统的安全性、灵活性和准确性;其次,本文设计了一套基于阵列式传感器的侵彻模拟实验方法,获取了实验数据并验证了采集系统的可靠性和准确性,模拟实验方法节省了实验成本,又大大缩短了实验周期;最后,由于传统计层算法容易产生误判,本文采用的一种新型的计层判别方法,即利用多种时频分析方法,包括短时傅里叶变换、小波变换、Winger-Vile 分布同时分析信号的时域、频域及能量信息,验证了算法计层的准确性,深入理解侵彻信号特点。并且对比各算法的计层效果并总结优势与互补性,以供未来设计三者配合的相关算法,综合获取的计层信息。

整套计层引信系统可通过阵列式传感器有效且快速探测穿层信息,并进行信号的综合分析与计层识别,具有重大现实意义。

参考文献

[1] WEI H, ZHANG X, LIU C, et al. Oblique penetration of ogive-nosed projectile into aluminum alloy targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 148: 103745.

[2] 胡晓东,熊伟,蒋学乔,等. 多种侵彻环境的弹药炸点控制研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(6): 79-83.

HU X D, XIONG W, JIANG X Q, et al. Study on ammunition detonation point control in multiple penetration environments [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(6):79-83.

[3] LIU H, LI S Z, LI J F. The void-identify method of penetration fuze based on timing control [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 427-429: 1223-1227.

[4] 徐鹏,祖静,范锦彪. 高 g 值加速度冲击试验技术研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30: 241-243,253.

XU P, ZU J, FAN J B. Research on high g-value acceleration impact test technology [J]. Journal of

- Vibration and Shock, 2011, 30: 241-243,253.
- [5] 张兵. 硬目标传感与识别技术[D]. 北京: 北京理工大学, 2010.
- ZHANG B. Hard Target sensing and recognition technology [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010.
- [6] 李仙, 陈荷娟, 冯琳娜. 小波基分解弹体振动信号的侵彻过载重构方法[J]. 中国科技纵横, 2011(14): 324-325.
- LI X, CHEN H J, FENG L N. Reconstruction method of penetration overload based on wavelet basis decomposition of projectile vibration signal [J]. China Science & Technology Review, 2011(14): 324-325.
- [7] MING L, LI M G. Analysis and processing of penetration acceleration signal from test base on wavelet analysis[D]. Chongqing: 8th International Symposium on Test and Measurement, 2009: 1-4.
- [8] 郭晓雪, 张亚, 李世中, 等. 基于伪自相关的侵彻数据处理方法[J]. 探测与控制学报, 2012, 34: 45-48.
- GUO X X, ZHANG Y, LI SH ZH, et al. Processing method of penetration data based on Pseudo-autocorrelation [J]. Journal of Detection and Control, 2012, 34: 45-48.
- [9] 焦聪. 多层侵彻引信过载信号获取及层数识别技术研究[D]. 山西: 中北大学, 2018.
- JIAO C. Research on overload signal acquisition and layer recognition technology of multi-layer penetration fuze [D]. Shanxi: North University of China, 2018.
- [10] 王燕, 马铁华, 徐鹏, 等. 基于 Choi-Williams 分布的侵彻层数识别方法[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35: 758-762.
- WANG Y, MA T H, XU P, et al. Identification of penetration layers based on choi-williams distribution [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35: 758-762.
- [11] DANCYGIER A N, YANKELEVSKY D Z. High strength concrete response to hard projectile impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 1996, 18: 583-599.
- [12] WU G, WANG X, JI C, et al. Numerical simulation analysis of PELE penetrating target plates with different thicknesses[J]. Vibroengineering Procedia, 2020, 33.
- [13] 满晓飞, 门士滢, 马少杰, 等. 空气击锤装置模拟硬目标侵彻实验方法[J]. 探测与控制学报, 2016, 38: 90-93.
- MAN X F, MEN SH Y, MA SH J, et al. Experimental method for simulating hard target penetration with air hammer device [J]. Journal of Detection and Control, 2016, 38: 90-93.
- [14] 余双勇, 衣文索, 陈昊玥, 等. 分布式声传感型特种光纤结构设计[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 59-69.
- YU SH Y, YI W S, CHENG H Y, et al. Distributed acoustic sensing type special optical fiber structure design[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3): 59-69.
- [15] SHAO R, WU C, SU Y, et al. Numerical analysis on impact response of ultra-high strength concrete protected with composite materials against steel ogive-nosed projectile penetration[J]. Composite Structures, 2019, 220: 861-874.
- [16] MAHDI A V, POONEH M, NAN W. Modelling the penetration of subsonic rigid projectile probes into granular materials using the cavity expansion theory[J]. Computers and Geotechnics, 2022, 141.
- [17] WEI G, ZHAO J, YU Z, et al. An effective gas sensor array optimization method based on random forest[J]. 2018 IEEE SENSORS, 2018.
- [18] 赵旭瑞. 弹丸侵彻过程温度场仿真分析[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- ZHAO X R. Simulation analysis of temperature field during projectile penetration [D]. Taiyuan: North University of China, 2020.
- [19] 陈仓. 侵彻角磁感知与辨识技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2021.
- CHEN C. Research on magnetic perception and identification technology of penetration angle[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021.
- [20] ZUBAIR K M, ARINDAM S, HAMZA G, et al. Information fusion in autonomous vehicle using artificial

- neural group key synchronization [J]. *Sensors*, 2022, 22(4): 1652.
- [21] SEN Q, HONGKAI Z, NAN J, et al. Multi-sensor information fusion based on machine learning for real applications in human activity recognition: State-of-the-art and research challenges [J]. *Information Fusion*, 2022, 80: 241-265.
- [22] REHAN M, MANSOOR M. Application of MEMS in safety and arming devices: An overview [J]. *Microsystem Technologies*, 2021, 27: 3599-3610.
- [23] QIN Y, CHEN L, HAO Y. Optimization of a fuze MEMS setback arming device based on the EDM process [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 84741-84752.
- [24] MARZULLO K. Tolerating failures of continuous-valued sensors [J]. *ACM Transactions on Computer Systems*, 1990, 8: 284-304.
- [25] 刘贵喜, 杨万海. 多传感器融合系统的优化冗余 [J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2000, 27: 9-12, 34.
- LIU G X, YANG W H. Optimal redundancy in multi-sensor fusion system [J]. *Journal of Xidian University (Natural Science Edition)*, 2000, 27: 9-12, 34.
- [26] GLÖBNER C, MOSER S, KÜLLS R, et al. Instrumented projectile penetration testing of granular materials [J]. *Experimental Mechanics*, 2017, 57: 261-272.
- [27] 满晓飞, 张合, 马少杰, 等. 侵彻引信土层起爆炸点控制实物模拟实验方法研究 [J]. *兵工学报*, 2014, 35(10): 1556-1561.
- MAN X F, ZHANG H, MA SH J, et al. Research on physical simulation experimental method of explosion initiation point control of penetration fuze gauge layer [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(10): 1556-1561.
- [28] TANG T, MA S, LI F, et al. Research on overload signal of new impact body based on air cannon test and simulation [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2029: 012008.
- [29] 李舜酩, 郭海东, 李殿荣. 振动信号处理方法综述 [J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(8): 1907-1915.
- LI SH M, GUO H D, LI D R. Review of vibration signal processing methods [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(8): 1907-1915.
- [30] 王立勇, 刘晓波, 唐长亮, 等. 多工况汇流行星排齿轮系统振动特性试验研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(7): 151-158.
- WANG L Y, LIU X B, TANG CH L, et al. Experimental study on vibration characteristics of planetary gear system with multiple working conditions [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(7): 151-158.
- [31] DEMETGUL M, ZHAO Y, GU M, et al. Motor current based misalignment diagnosis on linear axes with short-time fourier transform (STFT) [J]. *Procedia CIRP*, 2022, 106: 239-243.
- [32] 吴叶丽, 行鸿彦, 李瑾, 等. 改进阈值函数的小波去噪算法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(4): 9-16.
- WU Y L, XING H Y, LI J, et al. Wavelet denoising algorithm with improved threshold function [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(4): 9-16.
- [33] GU Y, XI R. Application of wavelet analysis in the vibration signal of the high dam drainage [C]. *AEMCME 2019*, 2019: 1997-2002.
- [34] TRIA D E, TRĘBIŃSKI R. Methodology for experimental verification of steel armour impact modelling [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 100: 102-116.

作者简介



郑德智, 分别在 2000 年和 2006 年于北京航空航天大学获得学士学位和博士学位, 现为北京理工大学研究员、博士生导师, 主要研究方向为传感器敏感机理、脑机接口、信号检测和处理。

E-mail: zhengdezhi@buaa.edu.cn

Zheng Dezhi received his B.Sc. degree and Ph.D. degree both from Beihang University in 2000 and 2006, respectively. He is currently a professor at Beijing Institute of Technology. His main research interests include sensor sensitivity mechanism, brain-computer interface, signal detection and processing.



乔孟添, 2018 年于江南大学获得学士学位, 现为北京理工大学信息与电子学院硕士, 主要研究方向为信号检测和处理。

E-mail: 3220222227@bit.edu.cn

Qiao Mengtian received her B. Sc. degree

from Jiangnan University in 2018. She is currently a master student in the Advanced Research Institute of Multidisciplinary Science at Beijing Institute of Technology. Her main research interest is signal detection and processing.



李中翔(通信作者), 2011 年于北京理工大学获得学士学位, 2014 年于北方工业大学获得硕士学位, 2021 于北京航空航天大学取得博士学位, 现为北京理工大学博士后, 主要研究方向传感器敏感机理。

E-mail: lingflybit@163.com

Li Zhongxiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2011, received his M. Sc. degree from North China University of Technology in 2014, and received his Ph. D. degree from Beihang University in 2021. He is currently a postdoctoral fellow at Beijing Institute of Technology. His main research interest is sensor sensitivity mechanism.



胡纯, 2009 年于中国地质大学(武汉)获得学士学位, 2015 年于北京航空航天大学获得博士学位, 现为北京理工大学副研究员, 主要研究方向为先进传感与智能仪器。

E-mail: huchun198@163.com

Hu Chun received his B. Sc. degree from China University of Geosciences, Wuhan in 2009, and received his Ph. D. degree from Beihang University in 2015. He is currently an associate researcher at Beijing Institute of Technology. His main research interests include advanced sensing and intelligent instruments.



张成俊, 2015 年于青岛大学获得学士学位, 2020 年于中科院上海微系统与信息技术研究所获得博士学位, 现为赋同量子科技有限公司研发总监, 主要研究方向为超导单光子探测。

E-mail: cjzhang@cnphotec.com

Zhang Chengjun received his B. Sc. degree from Qingdao University in 2015, and received his Ph. D. degree from Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology in 2020. He is currently the R&D director at Photon Technology Co. Ltd. His main research interest is superconducting nanowire single photon detection.