



DOI: 10.12382/bgxb.2024.0027

侵彻弹体过载信号特性与处理技术研究进展

陈柏翰^{1,2}, 赵生伟², 邹慧辉², 王伟光², 戴湘晖², 王可慧^{2*}

(1. 清华大学 工程物理系, 北京 100084; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 侵彻弹体过载信号是反映侵彻物理过程的关键信号,可分为刚体减速度、弹体结构响应、连接结构响应和传感器噪声4种成分。介绍了4种成分的来源和各自特点,讨论了弹体结构响应和传感器相关信号各自的建模和评估方法。整理了针对过载信号进行分析处理的若干方法,比较了各种方法的精确性、自适应性、实时性和适用范围。对于过载信号处理实时性需求、重构手段、刚体减速度在复杂侵彻环境下的形式以及高速侵彻对过载信号分析处理带来的挑战展开了讨论。针对侵彻弹体过载信号研究现状,总结了存在的问题以及未来可能的研究方向。

关键词: 硬目标侵彻; 过载信号; 侵彻过载; 弹引系统; 弹体结构响应

中图分类号: TJ301; TJ302 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2024)09-2906-23

Research Progress of Overload Signal Characteristics and Processing Technologies of Penetrating Projectile

CHEN Baihan^{1,2}, ZHAO Shengwei², ZOU Huihui², WANG Weiguang², DAI Xianghui², WANG Kehui^{2*}

(1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

Abstract: The overload signal of penetrating projectile is of vital importance to reflect the physical process of penetration, which further helps to reveal the mechanism of penetration resistance and the structural response of projectile. It is also an important basis for designing the projectile-fuze system and achieving the precise target strikes. The overload signal is divided into four components: rigid body deceleration, structural response of projectile, response of connection structure and interference signals of sensors. The sources and characteristics of the four components are introduced, and the modeling and evaluation methods for the vibration and sensor-related signals of projectile-fuze system are discussed. For analyzing the components of overload signals, the low pass filtering, mechanical filtering, modal decomposition, wavelet transform, and blind source separation methods are discussed respectively. The accuracies, adaptabilities, real-time performances, and applicabilities of the methods above are also compared. The real-time requirements for overload signal processing, the signal reconstruction methods, the form of rigid body deceleration in complex penetration environments and the challenges brought by high-speed penetration scenario are discussed. Based on the current research status of overload signals processing of penetrating projectiles, the existing problems and possible future research directions are summarized.

Keywords: hard target penetration; overload signal; penetration overload; penetration-fuze system;

收稿日期: 2024-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(11772269)

* 通信作者邮箱: wangkehui@nint.ac.cn

projectile structural response

0 引言

侵彻过载时程,即弹体侵彻硬目标过程中的加速度与时间的关系。过载信号是过载时程在测量位置处的反映,它由4种成分组成:刚体减速度、弹体结构响应、连接结构响应和传感器噪声^[1-2]。过载信号具有高峰值($10^3 \sim 10^5 g$)、高频响(约 10^5 Hz)的特点。相比于终点弹道参数(例如侵彻深度或贯穿残余速度),过载信号对于理解侵彻硬目标的物理过程、揭示应力波传播机理等具有更好的指导作用。具体而言,刚体减速度及其一次、二次积分得到的速度、位移时程直接描述了弹体侵彻靶板过程中的阻力及运动时程,代表了弹体冲击过程中的最基本物理特性^[3-4]。此外,弹体的过载峰值反映了弹体所受最大载荷情况,为弹体是否侵入靶体、侵入几层靶体提供了直接判据^[5-6]。而过载时程也是现代智能引信设计的重要依据,对弹体内缓冲结构、仪器组件的设计至关重要^[7-8]。最后,弹体结构响应信号不仅反映了应力波的传播规律,还为弹体全局模态、刚度质量分布提供了原始资料,蕴含着弹体冲击过程中的变形损伤特性^[9-10]。

另一方面,终点弹道参数相关的研究已成为侵彻领域的经典问题,相关理论公式和数值模拟已经较为成熟。然而,数值模拟多在预测离散的终点弹道参数方面得到验证,在预测弹体运动全过程方面的检验较少。此外,理论公式中最重要的物理条件是弹靶相互作用力,而该作用力的表达是由理论推导而来或通过实验终点效应反推拟合而来,同样缺少运动全过程的准确性验证^[1,11]。因此,对过载信号的研究有望在以往仿真和理论的基础上进一步揭示弹体侵彻全过程,为侵彻问题和弹引系统设计带来更大的进展。

本文首先简要介绍过载信号4种成分各自的特点,然后归纳总结已开展研究中的各种过载信号成分处理技术,进而讨论过载信号的实时性需求、重构手段以及刚体减速度分析和高速侵彻过载分析的方法。最后,结合已有工作给出侵彻弹体过载信号处理的未来发展方向。

1 过载信号特性

不同研究对侵彻弹体过载信号的成分有不同分类。例如,Lundgren等^[12]认为它包含4种成分:刚

体过载、侵彻体结构响应和传感器结构响应及高频噪声。Perez^[5]归纳的前三部分与前者类似,并指出高频噪声包括弹体的路径弯曲和自旋带来的噪声,在大部分情况下高频噪声的贡献很小,研究应主要放在前三者上。徐鹏等^[13]将信号分解为刚体减速度、加速度计安装位置相对弹体质心的振动加速度,以及安装结构刚度、安装方式对加速度信号的干扰三部分。杨明等^[14]通过对加速度计的建模,认为过载信号的传感器相关部分又可分为两小部分:连接装置对测试点的加速度响应、加速度计对激励信号的响应,并指出两者均为比刚体减速度和弹体结构响应更高频的信号。

无论侵彻弹体过载信号的成分如何划分,刚体减速度、弹体结构响应是其中必备的两部分,而剩余部分可归纳为传感器相对于被测截面的过载测量差异。综合之前研究的提法,本文将后者又分为连接结构响应和传感器噪声。其中连接结构响应是指传感器与弹体的连接结构在外载激励下引起的传感器内部应力波传播、反射叠加的信号,传感器噪声是指传感器内部材料和电路特性引起的干扰信号。本节将简要介绍过载信号各个成分的特点,并给出一般性的认识。

1.1 刚体减速度

刚体减速度是各种过载信号中最先被关注的部分。杨平^[15]给出了刚体减速度的具体含义:弹体受侵彻阻力时的质量平均减速度,也等效于弹体“实时”质心的减速度。值得注意的是,它并不等效于与弹体初始质心重合的截面减速度。这是因为质心并不与弹体的任意截面固连,而是随着各部分变形而发生相对位置变化。

Warren等^[16]进一步认为,实验获得的弹体过载信号并不一定准确,在严重偏差的信号基础上做任何讨论都是无意义的,因此Warren等^[16]对过载时域特性进行了考察。过载信号中的低频(约 $0 \sim 1.5$ kHz)部分对应刚体减速度,高频过载信号包括弹体和传感器连接件的结构响应以及传感器噪声。由于刚体减速度的一次、二次积分分别对应弹体速度时程和位移时程,而实验至少可以测得初始速度、终点速度和位移信息,两者比较可提供准确性判断的手段。

任辉启等^[17]在处理过载信号时直接对原信号进行二次积分,发现高频信号消失,曲线接近平滑,

最终值接近侵彻深度。Jungmin 等^[18]和 Lee 等^[19]分别对模拟海床和深层土壤进行了探测器侵彻试验,并对过载信号直接二次积分,所得最终位移与实测位移基本相同。上述研究结果表明,过载信号高频成分的长时间均值接近零,因此可直接对过载信号进行一次、二次积分,得到弹体速度时程和位移时程。

若过载积分得到的速度时程和位移时程与独立测试的弹体初速度、残余速度以及位移不一致,则需考虑信号错误无效的可能性。若信号只是略有偏差,则应对其进行修正。彭永^[1]提出了一种过载信号准确性验证和修正方法。首先,对过载信号进行一次积分,使速度时程与初速度、残余速度实测值吻合。进一步,对修正的过载数据进行二次积分,得到位移时程曲线。若曲线与实测位移吻合,则认为该修正过载数据可信,否则认为信号错误无效。

基于实测过载数据,弹体贯穿混凝土靶前后速度之差可表示为

$$\Delta v = \int_{t_0}^{t_f} a_m(t) dt \quad (1)$$

式中: t_0 、 t_f 分别为弹体着靶时刻、贯穿时刻; $a_m(t)$ 为实测过载信号。则将过载数据修正为

$$a(t) = \frac{v_0 - v_r}{\Delta v} a_m(t) \quad (2)$$

式中: v_0 、 v_r 分别为实测弹体初速度和残余速度。对式(2)积分,可得速度时程曲线为

$$v(t) = v_0 - \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau \quad (3)$$

尽管刚体减速度的一次、二次积分反映了其重要特性,但积分值不是刚体减速度的全部。不同形式曲线的一次、二次积分值可能相同,具体的刚体减速度时程曲线才包含其全部信息。基于刚性弹体侵彻理论,研究者开发了众多侵彻受力模型,例如适用于高速侵彻的流场模型^[20-22]、适用于一般侵彻的空腔膨胀模型^[23-25]、适用于中低速侵彻的恒载模型^[26-28],以及综合各种模型的模糊载荷模型^[29-31]等。利用从侵彻弹体过载信号中提取的刚体减速度时程曲线,上述侵彻受力模型得到了不同程度的验证。综合来看,无论何种侵彻受力模型,其给出的刚体减速度均具有如下特点:

1) 对于半无限靶侵彻,表现出“陡升-缓降-陡降”的时程特征;

2) 对于有限厚靶侵彻,曲线的“陡升-缓降”趋势不变,但末端受自由面影响不会出现“陡降”,而是保持缓降趋势(见图 1^[32]);

3) 对于薄靶侵彻/穿甲,表现出“陡升-陡降”的时程特征,且持续时间不大于弹头穿靶时间。多层侵彻/穿甲情况下则表现为多个“陡升-陡降”过程,具有严格的峰-层对应性。

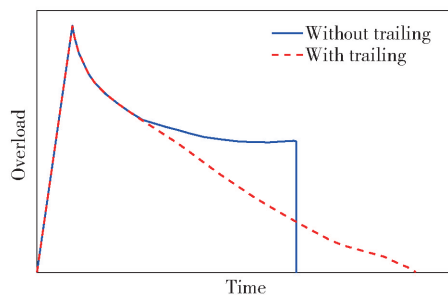


图 1 混凝土靶后边界对减速度的影响^[32]

Fig. 1 The influence of the rear side of concrete target on the deceleration^[32]

因此,对于上述刚性侵彻/穿甲理论(无论其具体场景如何),侵彻弹体对单个靶体的刚体减速度曲线均是单调上升、单调下降的,亦即单峰的。再进一步考虑多层情况,则上述理论均认为刚体减速度曲线具有严格的峰-层对应性。峰-层对应性是刚体减速度的基本特性,也因此成为已有过载信号成分处理方法的基本假设。

1.2 弹体结构响应

弹体结构响应在本文中是指由侵彻阻力瞬时加载引起的,以应力波方式在弹体内传播而体现的加速度信号成分,它的出现表明弹体具有变形体的一般特性,也可由此引申出关于弹体变形损伤特性的研究^[5]。在更严格的定义下,此处的弹体结构响应特指弹体轴线上轴向应力波传播引起的被测点相对于弹体质心的加速度,而不考虑剪切效应等带来的径向振动^[33-34]。

弹体结构响应信号的特征研究首先从低速侵彻开始,一般假设弹体为弹性体,且仅考虑轴向拉伸和压缩。例如,刘小虎等^[35]将弹体等效为刚度 EA 、线质量 m 、长度 l 的线弹性杆,则其轴向振动特征频率表示为

$$f = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{EA}{ml^2}} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

式中: n 为特征频率阶数; ρ 为材料密度。研究发现,弹体低速侵彻混凝土过载信号的高频成分频率与式(4)以及试验前弹体振动测试所得频率基本一致,从而初步验证了过载信号中弹体结构响应成分的存在。徐一源等^[36]对分段式弹体侵彻纸靶进行了多次试验,并将获得的过载曲线进行一次积分,发

现不同测试装置安装位置处的速度时程不同,从而表明过载信号中也含有弹体结构响应成分。

徐文峥等^[37]假设弹体为均质等截面杆,在不考虑剪切、塑性、应变率、屈曲等复杂情况时,杆中过载分布可由模态方法给出。具有特色的是,研究将外载荷精细化表示为

$$F(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin \frac{n\pi t}{t_{\text{total}}} \quad (5)$$

式中: $F(t)$ 为外载荷,其原型由考虑自由面效应的空腔膨胀模型^[38]给出(但并没有考虑结构响应与载荷的耦合作用); a_n 为Fourier级数表达; t_{total} 为弹体侵彻总历时。文献^[37]给出了弹体结构响应的级数解,与刚体减速度综合后,还给出了拟合过载曲线与试验曲线的对比(见图2),可见其对过载信号有良好的解释能力。此外,徐文峥等^[37]也发现了弹体结构响应具有头尾偏大、中间偏低的轴向分布特性,并认为这是弹体结构响应的本质特点之一。

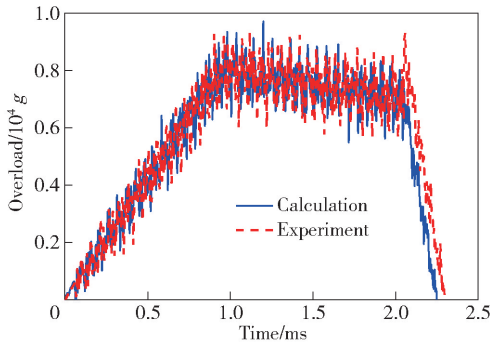


图2 考虑弹体结构响应的过载响应与试验对比^[37]

Fig.2 Contrast among acceleration response with structural vibration and experimental results^[37]

卢玉斌等^[39]对比了徐文峥等^[37]的弹体过载模型和其他经验性的或只考虑刚体减速度理论的过载模型,发现在侵彻速度较低时,徐文峥等^[37]的过载预测具有最佳近似能力,在不同侵彻阶段的过载量、过载持续时间和过载变化趋势与试验所得结果吻合最好。王成华等^[3]考虑斜侵彻问题中的弹体结构响应,载荷由空腔膨胀模型和微分面力法给出,而弹体则被视为等截面梁,可进行模态分解,并在各个模态坐标中求解弹体结构响应,最终获得的结构最大应力与实际误差约30%。然而,当入靶速度较高时,弹体的塑性变形和应力波传播耦合等复杂响应机制不可忽略。由于塑性的引入,弹体结构响应的频率降低,还需考虑其与刚体减速度混杂的可能。

宋英燕^[40]对弹引系统在混凝土侵彻环境下的结构振动过载响应进行了研究。试验前对弹引系统

进行了有限元建模和模态分析,获得了轴向拉压对应的各阶模态。试验中发射速度为350 m/s,之后对获得的过载响应曲线进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),获得的频谱峰值对应频率与模态特征频率之间的对比如表1所示。由表1可见,试验过载信号与模态结果基本一致,表明结构振动以弹性为主,能通过模态分析评估弹体结构响应情况。

表1 文献^[40]中试验过载信号与模态结果对比

Table 1 Contrast of experimental overload signals and modal results in Ref. [40]

信号峰值频率/Hz	模态特征频率/Hz	误差/%
6 400	6 573.3	2.6
12 740	13 394.7	4.9
14 130	14 612.7	3.3
17 380	17 246.0	0.8
19 000	18 977.8	0.1

王森等^[41]利用谐响应分析对引信在弹体结构响应环境中的薄弱环节进行了研究。通过对侵彻引信模型施加与载荷频率接近的轴向正弦激励,获得侵彻引信各零部件上任意节点处的位移响应在频域上的变化规律,由此判断出引信的尾部为其薄弱环节,较好地解释了试验中常发生的引信尾部断裂现象。

马孟新等^[42]考虑到出靶时过载信号中弹体结构响应成分始终存在,影响起爆控制,提出了应力波补偿方法。该方法假设弹体为均质截面杆,只发生轴向拉压弹性响应,轴向载荷由预先计算的仿真结果给出,从而获得过载测试装置所在位置在出靶瞬间的弹体结构响应加速度估计。实测加速度减去该估计值,即得到刚体减速度的估计值(假设噪声信号幅值很小)。该方法虽然有很多不完备之处(例如结构、本构的构建较简单,以及预估载荷的方式适用性差),但最终结果表明其已初步具备补偿效果。

分段式弹体的思路最初来源于装药的考虑,多段装药能减小装药与尾盖的间隙,提高装药安定性^[43]。但同时分段式弹体具有同时搭载多个过载测试装置的能力,也为弹体结构响应研究带来巨大的方便。典型的分段式弹体结构如图3所示。张浩^[44]利用分段式弹体进行了大量仿真和侵彻铝靶试验,得到了与徐文峥等^[37]类似的轴向加速度分布。此外,文献^[44]还对弹体同一截面上的应力分布进行了仿真研究,结果表明弹体中部应力均匀性

较好,而头部和尾部由于几何非线性,产生了泊松效应下轴向拉压引起的径向剪切作用,从而表现为同截面应力不均。因此,弹体结构响应实际上具有轴向和径向双重分布,而将其简化为纯轴向振动是需要考虑误差的。

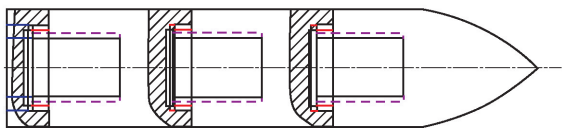


图 3 文献[44]中的分段式弹体结构

Fig. 3 Structure of segmented projectile in Ref. [44]

汪覃^[45]将分段式弹体简化为等截面均质杆,并估计载荷为正弦形式。模态分析结果表明,弹体结构响应在轴向分布不均,弹头和弹尾处具有最大结构振动。此外,文献[45-47]还通过仿真发现弹体侵彻时内外应变响应幅值有差别(弹体中部的情况见图4);越靠近弹身,应变差越大;越靠近弹头,应变差越小。这同样是由轴向拉压产生的剪切效应导致的。应变片贴附于弹体表面,剪切效应无法避免,再加上应变采集系统往往含有大量噪声且噪声特征不确定程度大^[48],相比于加速度计(轴线上安装)采集的过载信号,从应力-应变响应反演弹体结构响应更加困难。

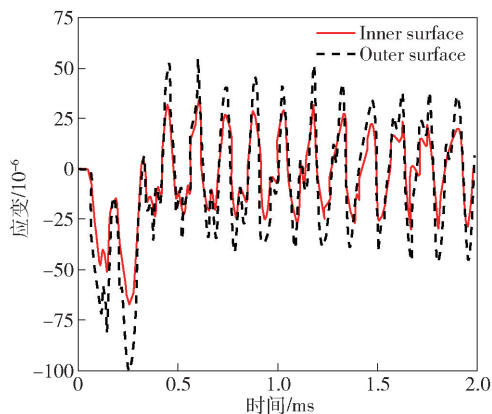


图 4 弹体中部内外表面应变对比^[45]

Fig. 4 Comparison of internal and external surface strains at the middle of projectile^[45]

除了轴向拉压引起的加速度,弹体结构响应还可能由其他因素引起。Gaul等^[49]提出了通过加速度计信号对杆中裂纹进行诊断的方法。在一维应力波传播假设下,研究发现杆件振动能量与表面振动速度的平方成正比。在有裂纹时,截断面处存在波的反射,裂纹处的振动速度必然高于正常杆件截面。因此,过载信号中的次峰值一般意味着裂纹的出现。

在固定点测量过载信号,并根据弹性波传播规律,即可判断裂纹位置和能量反射系数。Saravanan等^[50]在杆梁应力波传播研究中给出了弯曲波在圆频率 ω 激励下波速 c 的表达式为

$$c = \sqrt{\omega} \left[\frac{EI}{\rho A} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

式中: EI 为杆梁抗弯刚度; A 为杆梁截面积。

式(6)表明,对于一般激励,弯曲波具有弥散特性,在与轴向应力波叠加并经过反射后信号将难以分辨。然而,对于一般的杆梁结构,在冲击载荷主频为kHz量级时,弯曲波波速约为轴向拉压应力波波速的1/10,即在约前10个应力震荡周期上弯曲波还没有进入反射状态。因此,在结构响应前期收集的过载信号更适合进行解耦分析。

在弹体多层侵彻工况中,一种常见的问题是过载信号无法反映侵彻层数(见图5),也就无法获取位置信息,这也被称为“信号粘连”现象。李蓉等^[51]对粘连信号进行了频谱分析,发现其包含大量的弹体1阶轴向振动频率成分,从而定性给出了粘连原因。为定量评价干扰叠加程度,马孟新等^[52]提出了将信号按照侵彻层数分段、逐点相减并求绝对值之和的算法,导出为“层系数”和“层间系数”,研究发现弹体多层侵彻中每层和层间对应的系数基本相同,谱分析所得峰值对应弹体1阶轴向振动频率。因此,可以认为弹体结构响应是造成信号粘连的主要因素。

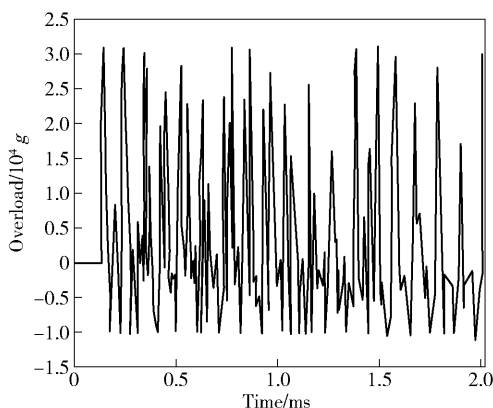


图 5 侵彻三层靶的典型加速度信号^[52]

Fig. 5 Typical acceleration signal of projectile perforating three-layered target^[52]

张美云等^[53]对过载信号粘连现象进行了总结,肯定了其主要原因是弹体结构响应信号没有得到有效抑制(连接结构响应也有一定贡献)。改善信号粘连现象有3种主要途径:

1)对过载信号进行算法处理,以过滤掉弹体结构响应,其中最常用的是低通滤波(案例可见2.1节);

2)在测试装置周围包覆黏弹性材料,加快应力波衰减,其本质是通过材料黏性实现“机械滤波”(案例可见第2.2节);

3)开发新型计层技术,如自带截止频率的加速度传感器,或与其他传感器信号融合^[54-56]等。

除上述途径外,Yu等^[57]提出一种改善信号粘连的方法,即降低测试装置的刚度。传统的过载测试装置设计旨在提高其刚度,以尽量贴合该截面处的过载响应。这一贴合策略导致弹体结构响应成分无法消减,使用阻尼、滤波等方法也不能从根本上解决。利用弹簧-阻尼-质量块的简化加速度计模型,研究发现减小装置刚度、使之特征频率与刚体减速度特征频率接近,就能达到滤去弹体结构响应成分的目的。所得载荷时程能直接根据峰值判断侵彻层数,但载荷实际峰值还需要经过修正获取。

此外,房安琪等^[58]直接利用人工神经网络方法构建原始过载信号和侵彻层数之间的关系,从而避开了关于弹体结构响应等信号成分的复杂讨论。然而,其最终获取的层数信息对侵彻载荷、弹体结构响应等本文更关心的问题指导有限。

总之,弹体结构响应信号成分是侵彻弹体变形体本质的反映。在侵彻环境下,结构响应主要表现为轴向拉压,该信号成分的主频为弹体1阶拉压特征频率,但同时也包含径向振动、裂纹、弥散弯曲波等的影响。弹体结构响应是过载信号粘连现象的主因,多层侵彻中的层数识别和弹体位置估计均需要对弹体结构响应特征有清晰的认识。

1.3 连接结构响应

连接结构响应是由传感器与弹体的连接装置引入的,为研究其信号特点,需要对过载信号测试环境有系统性认识。过载测试系统主要包括加速度测量模块、电路模块、信号存储模块和电源模块,它们集成为一个整体,通过连接模块与外部计算机相连^[59],其中系统与外部的连接是影响信号准确性的主要因素。

张会锁等^[60]分别采用法兰以及螺纹将过载测试装置与弹体相连,通过仿真比较发现,由于螺纹连接存在较大的刚度,过载信号中出现高频项,而法兰连接的刚度较低,曲线接近刚体减速度。因此,测试装置与弹体的连接方式很大程度上影响了信号的组成。若需获得完整的弹体结构响应信息,则需使连

接刚度增大、高于弹体刚度;若需获得单纯的刚体减速度,则需使连接刚度减小、小于弹体刚度。

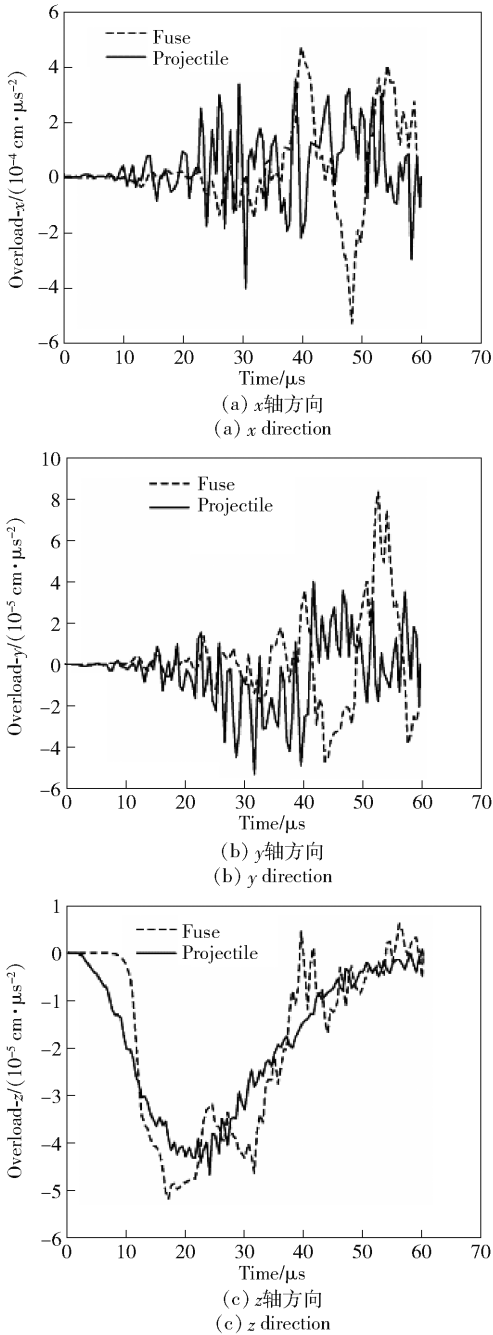
张冬梅等^[61]对通过螺纹与弹体连接的引信系统过载响应进行了仿真研究,其中螺纹之间采用间隙配合,仿真所得的同截面处弹体和螺纹连接结构的 x 轴方向、 y 轴方向、 z 轴方向(侵彻方向)过载响应如图6所示。由图6可见:正侵彻时,由于螺纹的存在,弹体也会受横向冲击,但其大小相对于轴向过载小约一个数量级;由于间隙间的碰撞,螺纹连接处的过载峰值总是大于弹体对应处。研究还发现螺纹上的应力也有从前到后的传播特征,但传播形式比一维波传播更加复杂。

张冬梅^[30]和张冬梅等^[62]对螺纹连接结构进行了详细建模,最终通过螺纹几何结构和材料参数导出了其弹性连接强度。研究发现螺纹连接结构的刚度明显低于材料本身的刚度,因此将螺纹连接结构直接视作固连是不妥的。此外,螺纹连接还会带来比螺纹弹性振动更高频率的碰撞信号,其幅值不可忽略。因此,测试装置与弹体之间的螺纹连接会带来复杂的连接结构响应。

宋英燕^[40]通过仿真比较了将螺纹连接简化为刚性接触和进行实体螺纹建模两种方法对应的引信过载。仿真结果支持张冬梅^[30]的结论,即简化将导致引信过载偏小,螺纹的连接刚度不可忽略。针对传统螺纹连接导致的过载失真,宋英燕^[40]研究提出了压紧式螺纹连接方式,对比图如图7所示。试验和仿真结果均表明,压紧式螺纹连接比传统连接方式具有更大的连接刚度,且减小了螺纹之间的碰撞,连接结构响应的幅值明显减小。

针对连接结构中螺纹难以建模并获得有效仿真结果的现状,Yan等^[63]开发了线弹性模型与薄层单元相结合的螺纹单元,以表征冲击问题中螺纹连接处的非线性受力。仿真结果表明,相比直接使用线弹性体单元,该建模方法能定量体现实验中螺纹弹性力和碰撞力同时存在的现象,揭示连接结构响应的复杂性。

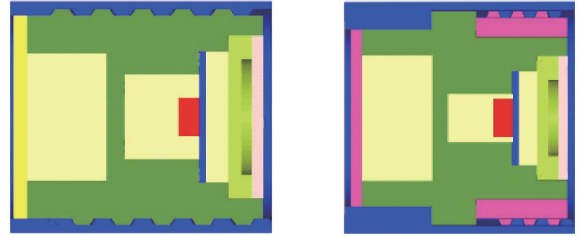
因此,过载测试装置与弹体的连接方式产生了复杂高频信号,过载信号将始终处于多种成分混杂的状态,这是测试条件本身决定的。但是该成分仍可抑制。例如,通过对弹载测试系统的试验和仿真,赵小龙等^[64]发现连接结构的自振频率仅略高于弹体低阶谐振频率,需要提高过载测试装置与弹体的连接刚度,从而避免与弹体结构响应共振。具体地,过载测试装置可化简为弹簧-振子系统,且具

图 6 弹体和螺纹连接结构的过载响应^[61]Fig. 6 Overload response of projectile body and threaded connection structure^[61]

有响应表达式如下:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = -ma_f(t) \quad (7)$$

式中: m 为连接结构质量; k 为连接结构刚度; $a_f(t)$ 为过载测试装置所在位置的实时过载响应, 即刚体减速度与弹体结构响应的混合。Duhammel 积分的求解表明, 在连接装置自振频率大于过载频率时, 自振频率越大, 响应幅值越小, 而自振频率 ω 的表达式为

(a) 体螺纹
(a) Body thread(b) 压螺拧紧
(b) Screw tightening图 7 两种连接结构^[40]Fig. 7 Two kinds of threaded connection structure^[40]

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (8)$$

因此, 在连接结构质量 m 不变时, 通过提高连接结构刚度 k 即可获得较小的响应幅值。类似地, Zhang 等^[65] 在一般连接结构自振频率高于冲击载荷频率的前提下, 利用弹簧-振子系统在半正弦激励信号作用下的响应解, 给出了判断系统跟随能力的关键参数:

$$R = \frac{2\pi}{T} \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (9)$$

式中: R 为跟随能力指数, R 越小, 连接结构响应的幅值越小; T 为冲击载荷持续时间。由式(9)可见: 侵彻速度越高, T 越小, 响应幅值越大; 减小质量或增大刚度有助于减小 R 、减小响应。一般情况下装置的质量固定, 因此增大刚度是减小连接结构响应的最佳选择。

程祥利等^[66] 对弹体-引信系统使用双层弹簧-阻尼-振子结构进行了更细致的建模, 其构成如图 8 所示。图 8 中, 左图为弹体结构响应在模态空间中的表达, 右图为附着在弹体上的引信系统, 连接结构响应表现为引信振子相对于弹体基座的加速度。其中, m_{B_i} 为弹引系统的首层质量, i 为首层振型阶数 ($i=1, 2, \dots, N$), k_{B_i} 为第 i 阶首层振型的刚度, c_{B_i} 为第 i 阶首层振型的阻尼, x_{B_i} 为第 i 阶首层振型的位移, a_{BF} 为首层的合过载, x_{BF} 为首层的合位移, m_F 为弹引系统次层质量, k_F 为次层刚度, c_F 为次层阻尼, x_F 为次层位移。程祥利等^[66] 通过谐响应分析建立了弹体结构响应模型, 再将其作为输入刻画了连接结构响应的产生和发展。结果表明, 弹体 1 阶轴向振动是影响连接结构响应的主要因素, 为减小响应幅值, 应使引信系统的特征频率避开弹体 1 阶轴向振动频率。

唐林等^[67] 针对引信系统中放大器存在自带的低通截止频率, 提出选择恰当频率以消除连接结

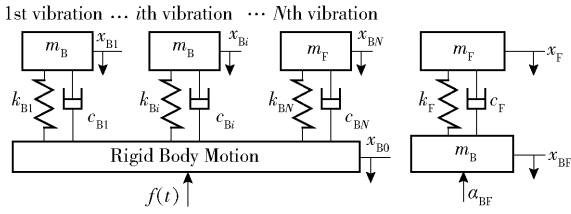


图8 弹引系统的首层(左)和次层(右)建模^[57]

Fig. 8 Models of the first (left) and adjacent (right) layer of projectile-fuze system^[57]

响应的办法。使用模态分析给出了结构轴向的主要特征频率,选取适当高阶频率作为低通截止频率。由于螺纹连接的弹性振动和螺纹间碰撞频率均较高,该低通滤波手段可对两者从源头上进行抑制。

表2概括了过载测试装置与弹体间连接结构的形式和特点。由表2可见,传统螺纹连接由于存在弹性共振和碰撞的复杂响应,不是连接结构的最佳选择。另两种连接结构通过改变刚度改变了自振频率,从而引起不同的响应形式。一般连接结构自振频率高于弹体结构振动主频,此时提高连接刚度即可减小响应幅值(压紧式螺纹连接即利用此原理)。此外,若能完全改变连接方式,则使连接结构自振频率低于弹体结构振动主频,而与刚体减速度特征频率接近(类似于Yu等^[57]的思路),则其响应幅值也较小,连接结构还兼具过滤弹体结构响应的功能。

表2 连接结构的形式和特点

Table 2 Form and characteristics of connection structures

连接结构	刚度	响应形式	响应幅值	适用场景
法兰连接	低	螺纹弹性振动、垫圈缓冲	小	侵彻计层、避免信号粘连
传统螺纹连接	中	螺纹弹性振动、碰撞	大	一般测试
压紧螺纹连接	高	螺纹弹性振动、小碰撞	小	完整过载记录、弹体结构响应分析

表3 过载信号4种成分的特点

Table 3 Characteristics of overload signal's components

过载信号成分	来源	波形	幅值	特征频率	时间积分值	时间二次积分值
刚体减速度	靶体阻力	峰-层对应	最大	低(深侵彻)-中等(多层侵彻)	侵彻速度	侵彻深度
弹体结构响应	弹体内部应力波	往复震荡	中等	中等(基频)-高(高频)	≈0	≈0
连接结构响应	测试装置连接处振动与碰撞	往复震荡	小	高(振动)-极高(碰撞)	≈0	≈0
传感器噪声	传感器内部干扰	往复震荡	小	高	≠0(含零漂)	≠0(含零漂)

总之,连接结构响应是由过载测试装置与弹体的连接结构在外载(特别是弹体结构1阶轴向响应)激励下产生的过载信号成分。调整连接结构刚度可改变结构自振频率,使之避开弹体结构响应主频,从而抑制连接结构响应。一般该信号频率高于刚体减速度和弹体结构响应频率,低通滤波即可将该成分滤去。

1.4 传感器噪声

传感器噪声是指传感器内部材料和电路特性引起的干扰信号。在正常工作模式下,传感器噪声为高频信号,且幅值较低,可通过滤波手段去除^[14]。若传感器处于非正常工作模式,就必须考虑噪声的影响。其中危害最大、必须予以修正的是加速度计在峰值过载后的零点漂移现象,即加速度计的“零漂”。

夏伟强等^[68]将零漂的原因归类为基座和敏感材料形变、预压载荷不足、传感器应力饱和、温度瞬变、外部电荷放大器失效以及电路饱和的影响,并指出合理的传感器设计应考虑到上述失效原因,针对预估的过载幅值选择对应传感器结构。若干研究^[68-72]从改进传感器结构的角度分析了减小冲击加速度传感器零漂的方法。此外,模态分解、小波变换等信号处理方法均可判断信号零漂的严重程度,并予以一定程度的修正^[8,73-75]。

1.5 小结

表3概括了过载信号4种成分各自的特点。由表3可以发现各成分来源不同、波形和幅值均不同。刚体减速度为过载信号的基本组成,而弹体结构响应是其最重要补充。此外,过载信号还附加了传感器测量引起的两种高频信号成分。各成分的区别还体现在频率特性上。在多数情况下,可通过特征频率区分、提取信号成分。然而,特征频率的界限不明确,少数情况下信号频谱还会重叠,为进一步研究各成分造成困难。为此,众多研究聚焦于信号成分处理技术,并取得了丰硕成果。

2 过载信号成分处理技术

基于不同的过载信号研究目的,研究者开发了不同的信号成分处理技术。具体而言:

1) 若需获得侵彻弹体的阻力、速度、位移时程,则需提取刚体减速度信号,滤去弹体结构响应等高频成分。

2) 若需判断弹体侵彻时刻或侵彻层数,则需提取刚体减速度峰值时刻。滤去高频成分的同时,也允许刚体减速度信号幅值变形。

3) 若需保护弹体内关键仪器部件,则需控制过载信号幅值。这一目的常与判断弹体侵彻时刻或侵彻层数搭配。

4) 若需评价引信和过载测量装置设计的合理性,则在综合考察过载信号的同时,还需特别关注连接结构响应和传感器噪声特性。

5) 若需评价弹体变形损伤情况,则需分析处理弹体结构响应信号,同时保留刚体减速度。

本节归纳了 5 种信号成分处理技术,各自适用于不同目的。下面将分别展开论述。

2.1 低通滤波法

获取真实的刚体减速度是过载信号处理的重要目的之一。依据刚体减速度信号成分的低频特性,低通滤波法成为最常用的一种处理方法。低通滤波法认为,提取刚体减速度的关键是确定一个临界性的低通滤波截止频率,使结构振动和噪声信号被过滤,而刚体减速度全部保留。Forrestal 等^[76]在弹体前后两个位置分别装上加速度计,然后对所得两组过载数据同时从高频到低频进行滤波,当滤波至 1 kHz 时两者基本没有差别,即认为 1 kHz 低通滤波所得的过载数据仅含刚体减速度(见图 9)。Longcope^[77]在弹体头尾分别安装加速度计,通过 6 次侵彻土壤试验获取的信号来评估基于空腔膨胀模型和局部面力法的斜侵彻载荷/弹道模型的准确性。研究结果表明,在滤去高频信号后,双加速度计信号能准确反演弹道曲线。过载信号的振幅分析也为其安放位置和弹体斜侵彻的侧向偏转情况提供了指导。该方法思想简单,但要求弹载加速度计至少有两个,对许多试验不适用。

针对只有一个加速度计的情况,冯琳娜^[78]提出:可以利用同种弹体的两次侵彻试验获取的过载信号,同时由高到低滤波,当 2 条曲线均光滑时则获得刚体减速度。与文献^[78]相似,王成华等^[79]也采用从高频到低频滤波的方法。每次滤波后对过载信

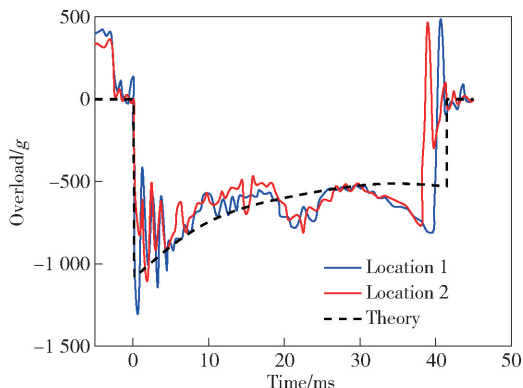


图 9 1 kHz 滤波后不同位置过载响应和预测时程^[76]

Fig. 9 Experimental and predicted overloads at different positions after 1 kHz low-pass filtering^[76]

号进行积分,计算全过程速度变化和最大侵彻深度,并与原始过载信号积分相对比。当截止频率较大时,积分所得速度变化与侵彻深度变化不大;当截止频率低于某个临界值后,积分结果突变,该临界值即为临界截止频率。然而,“突变”是一个模糊概念,王成华等^[79]建议以滤波后积分所得速度改变量相对于原始过载积分所得速度改变量偏差大于 2% 为界限,或者以滤波后二次积分所得侵彻深度相对于原始过载二次积分所得侵彻深度偏差低于 1% 为界限。

若干研究^[67,73,80-85]则提出:可比较弹体结构数值模态分析所得的第 1 阶模态频率和过载信号频谱的第一峰值,进而判断实际的 1 阶模态频率,并作为低通滤波截止频率。孙亚杰等^[86]认为基于 1 阶模态频率的低通滤波仅能获得近似刚体减速度,需结合数值仿真来判断其峰值和脉宽的对应性,进而确定该低通滤波的合理性。然而,考虑到多层侵彻时载荷频率与弹体振动的特征频率接近,该方法不能完全解决信号粘连问题。

刘宗宝^[87]和刘宗宝等^[88]提出了一种自适应实时低通滤波的方法,将窗口内的数据分为相邻段和重合区域,重合区域采用 3 阶非线性权重,只需很少的前置信息就能确定最佳滤波范围。而一种比较糟糕的情况是弹体结构响应和刚体减速度的特征频率接近,即“频域粘连”,相比于结构阻尼不足引起的“时域粘连”,前者没有较好的信号分离方法。这也表明弹引系统在设计上应使弹体结构响应和刚体减速度的特征频率有较大差异。

低通滤波方法可总结为三步:

- 1) 将过载信号进行 FFT 变换。
- 2) 确定临界截止频率,进行低通滤波(一般采

用第一频谱谷值对应的频率)。

3) 校验。将原始过载及滤波后的过载进行积分。如果积分差别可忽略,则认为滤波后的过载为刚体减速度。如果积分差别不可忽略,则增大截止频率,重复上述步骤。

低通滤波法算法简单,可导出侵彻弹体的阻力、速度、位移时程估计,并判断弹体侵彻时刻或侵彻层数。低通滤波法满足侵彻过程中实时快速处理的要求,也可以用于过载信号的后处理,但普遍存在以下缺点:一是滤波截止频率难以确定,并且基于固定频率的阈值滤波在滤除高频无用信号时,容易将有用信号部分滤除,进而造成滤波所得信号与实际有用过载存在差异;二是针对每种工况下的侵彻过载信号,均需要人工判断截止频率并验证,实际工作量大而缺乏通用性^[89]。

2.2 机械滤波法

机械滤波法在判断弹体侵彻时刻或侵彻层数的同时,也能保护弹体内关键仪器部件。该方法利用缓冲材料的黏性和阻尼来减少关键部位在侵彻过程中的过载幅值和振动频率,从而实现上述目的。黏性和阻尼的加入对于高频响应信号特别有效,因此最终保留下的光滑过载曲线绝大部分来自于刚体减速度,进而可利用刚体减速度的性质判断侵彻时刻和层数。缓冲材料在过滤高频信号之外,也通过吸能使过载信号衰减,极大地降低了过载幅值,起到保护关键仪器部件的作用。

例如,李媛媛等^[90]对缓冲材料保护下的应力响应进行仿真,表明一般黏弹性材料均有降低应力峰值、平滑信号的作用。骆海涛等^[91-92]在需要隔振的器件周围填充泡沫铝结构,仿真和试验验证结果表明,结构内过载曲线平滑,峰值普遍下降了70%,最高下降了93.3%。黄用等^[93]设计了一种基于陶瓷叠层电容组的过载测试装置,通过模态分析表明其特征频率远高于载荷频率,而陶瓷叠层自身的大阻尼减少了过载信号的高频部分,最终获取的信号基本只有刚体减速度的贡献,可以用于侵彻计层。董灵飞等^[94]为抑制弹体尾部的过载测试装置在多层侵彻时的信号粘连,在引信壳体内侧添加高阻尼材料,实现了应力波的快速衰减,刚体减速度峰值得以凸显。焦敏等^[95]对引信系统的过载响应进行了仿真研究,在添加黏弹性灌封材料前后,引信系统的过载时程如图10所示。该研究定性说明了黏性的引入能降低过载响应幅值,而改变灌封材料密度、弹性模量对此均无影响。徐萧等^[96]通过引入黏弹性

灌封材料等效本构模型,对侵彻冲击环境下引信系统的过载响应进行了仿真研究,并为灌封材料的减振和防护效果优化提供了指导。宋英燕等^[97]对两种连接结构的载荷传递特性进行了比较,发现两种结构刚度和质量基本一致,但因为螺纹连接方式的不同而产生了阻尼差别,阻尼大的结构对应的高频响应和响应峰值均明显减少。张大猛^[98]对引信灌封层的应力衰减作用进行了分析,依据材料黏弹性本构方程建立了描述应力波传播的特征线方法,表明在数次震荡后应力衰减程度足以满足引信电路的抗过载要求。张冬梅等^[62]对使用胶垫片、灌封胶等保护的引信系统抗过载性能进行了仿真研究,发现引信系统的过载只有最大过载的1/10,得到了充分保护。

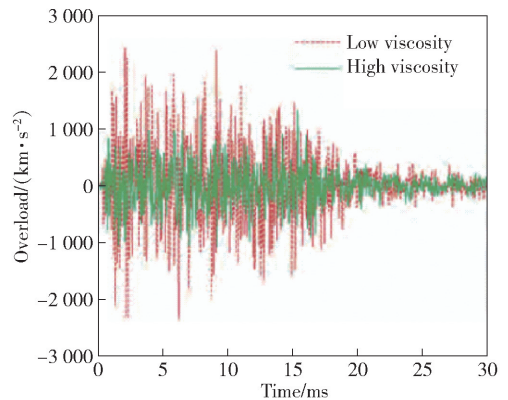


图10 添加黏弹性灌封材料前后的加速度响应^[95]
Fig. 10 Acceleration responses before and after adding viscoelastic sealing materials^[95]

在缓冲材料选择上,传统研究多使用尼龙、橡胶、泡沫铝和聚乙烯^[99-101]等材料。然而,在弹体侵彻多层靶的场景中,传统缓冲材料(特别是泡沫铝)存在前层穿靶导致压溃、使后续过载信号恶化的现象^[102]。因此,在吸能能力之外,缓冲材料的弹性和快恢复性也是机械滤波法关心的。而一些新型多孔复合材料^[103]、夹层复合材料^[104]以及仿生材料^[105]在冲击时的吸能能力、弹性、快恢复性各有改善,可期待利用它们进一步提升机械滤波法的效果。例如,张锦明等^[103]对缓冲材料的抗多次冲击性能进行了研究,冲击次数与缓冲系数的关系如图11所示。研究发现活性炭-三元乙丙橡胶(Ethylene Propylene Diene Monomer, EPDM)构成的多孔复合材料同时具有类泡沫铝的良好抗首次冲击性能,也类似于一般橡胶,具有较好的抗多次冲击性能。因此,活性炭-EPDM是一种更理想的缓冲材料。

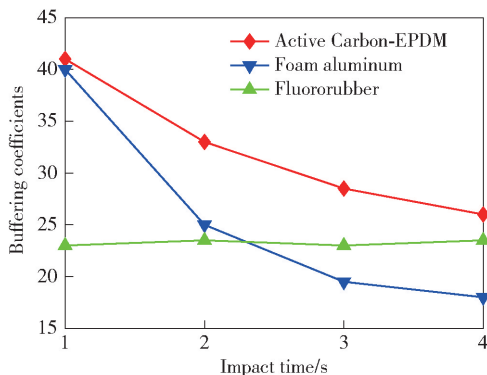


图 11 活性炭-EPDM、泡沫铝和氟橡胶在 4 次冲击过程中的缓冲系数^[103]

Fig. 11 Buffering coefficients of active carbon-EPDM, foam aluminum, and fluororubber during four impacts^[103]

机械滤波法无需复杂算法辅助,大大降低了过载信号收集和分析的难度。不过,在面对大冲击、多次冲击场景时,缓冲材料的压溃也会导致机械滤波的失败^[102]。此外,如果没有明确的结构响应截止频率设计,则黏弹性、大阻尼材料的引入也会引起刚体减速度曲线的变形,使从过载信号中提取关键信息本身变得困难。不同尺寸、不同场景的侵彻弹体有不同的应力波衰减要求,该方法的通用性也较差^[106]。

2.3 模态分解法

针对低通滤波法和机械滤波法确定截止频率困难和通用性差的特点,模态分解法被应用到过载信号处理中。模态分解的核心是将信号分为互相独立的分量,而每个分量代表信号的一种响应“模态”。该类算法包括经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD)、总体经验模态分解 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD)、变分模态分解 (Variational Mode Decomposition, VMD) 等子方法。然而,单纯的模态分解法一般只给出各个分量的形式,不能判断哪个或者哪种组合下的分量才对应刚体减速度,通常需要搭配后处理算法。典型的后处理算法包括频谱分析、连续均方误差 (Continuous Mean Square Error, CMSE) 分析、Hilbert-Huang 变换^[107]、Gabor 变换^[108]、Wigner-wille 分析^[109]等。

模态分解方法中最经典的是经验模态分解,其核心思想是将原始信号由高频到低频分解为具有严格极值特性的本征模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF) 以及趋势项的组合,再将分解后的 IMF 按一定方式组合,以达到滤波效果。它本身不涉及到

频谱变换,计算简单快速,但存在成分混叠问题。

EEMD 是一种基于经验模态分解的自适应信号时频处理方法,更适用于非线性、非平稳信号分析,其流程如图 12 所示。图 12 中, $S(t)$ 为原始信号, $N_i(t)$ 为第 i 个白噪声序列, $X(t)$ 为添加白噪声后的待分解时间序列。EEMD 通过在原始曲线上多次叠加高斯白噪声,对叠加后的曲线分别进行经验模态分解,得到不同信号的 IMF 分量和趋势项,再将各分量和趋势项进行平均,得到最终的 IMF 分量和趋势项。由于高斯白噪声是一种零均值噪声,在将多次分解的结果进行平均时,信号中的高斯噪声相互抵消。利用高斯白噪声 EMD 的二进滤波特性以及加入高斯白噪声后的新信号在整个频域上连续这一特点,可以解决 EMD 中间断信号存在所引起的模态混叠问题。由于 EEMD 加入了零均值噪声的特性,经过多次分解的结果平均后,信号噪声将相互抵消,集成均值的结果就可作为最终结果^[81]。

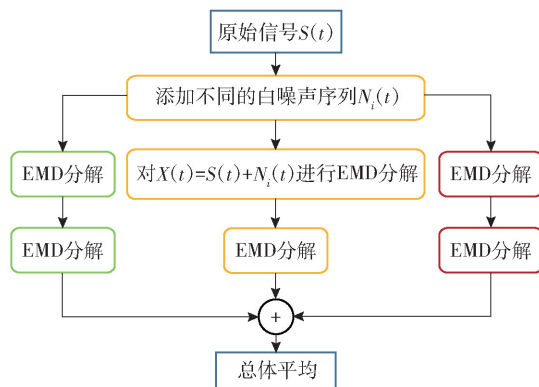


图 12 信号的 EEMD 流程^[81]

Fig. 12 Flow chart of EEMD^[81]

唐林等^[110]将总体经验模态分解和连续均方误差理论相结合,将实测信号直接看成由有用信号 (刚体减速度) 和噪声组成,首先利用 EEMD 对实验信号进行分解,得到 IMF 分量;然后利用 CMSE 判断噪声与信号的分界点分量,对不含分界点分量的前几阶高频分量进行抛弃处理;最后将剩下的低频信号进行重构,得到最终的有用信号。图 13(a)~图 13(j) 展示了利用实例信号进行 EEMD 分解所得的 IMF 分量,图 13(k)、图 13(l) 分别展示了趋势项和对应频谱。从分解结果来看,各阶 IMF 分量均具有较好的上下对称性;从汇总的频谱曲线上看,IMF 分量有明显的从高频到低频分布的变化趋势。除获取的 10 阶 IMF 分量外,分解后最终剩余一个趋势项,在一定程度上能够反映原始信号的变化特征,但还并非最终的完整有效信号。

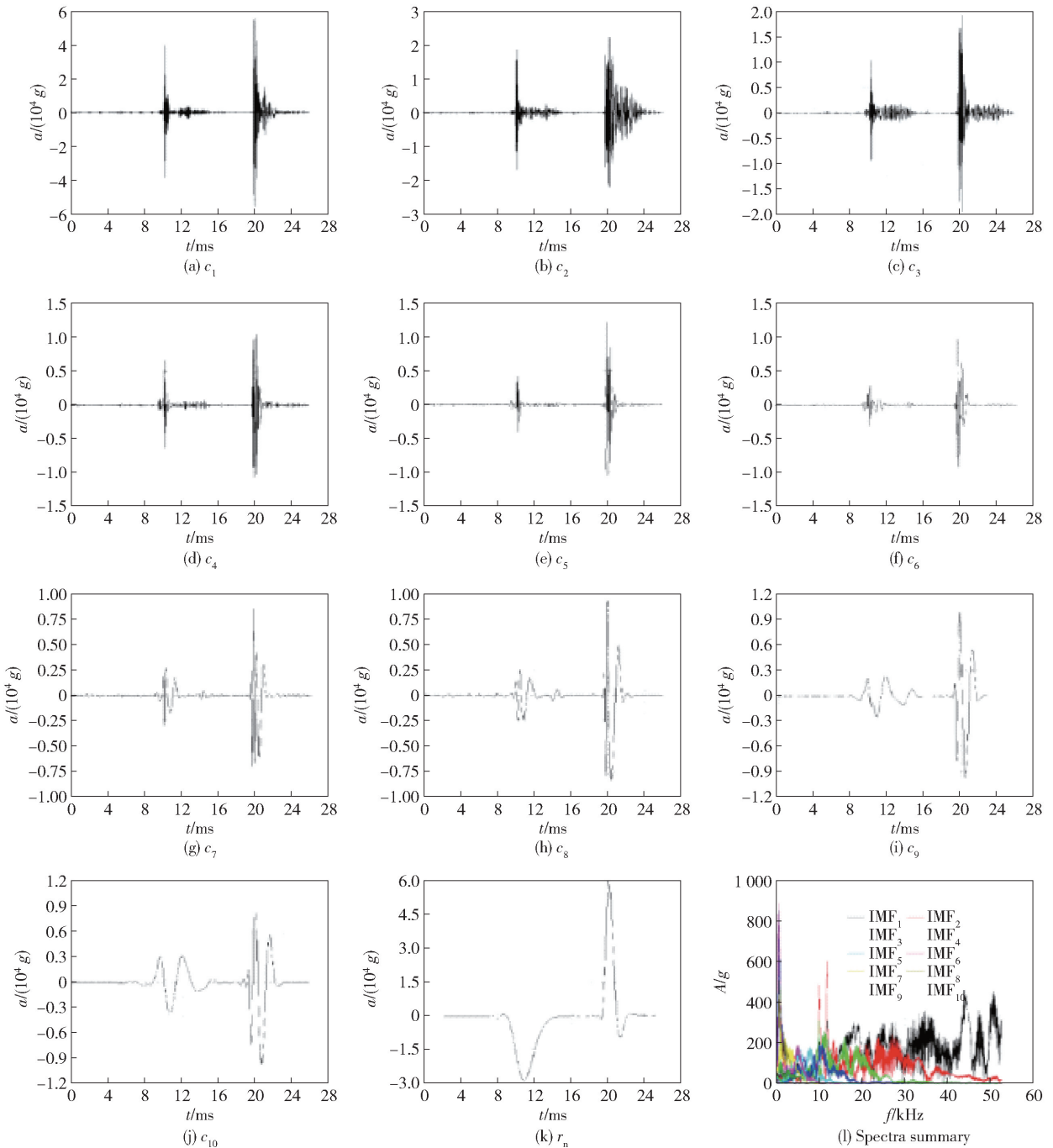


图 13 EEMD 所得的 IMF 分量、余项和频谱^[110]

Fig. 13 IMF, residual and corresponding frequency spectrum after EEMD^[110]

在文献[110]中,获得有效的刚体减速度信号还需经过 CSME 处理。该方法的核心是通过求两个连续重构信号的均方误差寻找对信号的最佳估计。当求得所有连续重构信号之间的均方误差后,其全局极小值对应的重构信号就是对有效信号的最佳估计。这样,便可将此处的 IMF 分量作为高频噪声干扰和低频信号的分界点,将不含分界点的前几阶分量作为高频分量抛弃,其余分量(含趋势项)作为低

频分量进行重构,得到对原始信号有效成分的最佳提取。唐林在后续研究^[111]中将 EEMD 与 CSME 结合的方法应用于跌落试验和弹体侵彻混凝土靶试验后处理中,成功实现了自适应的刚体减速度提取,整个过程几乎不需要前置输入,且相对于低通滤波法更精确。

VMD 同样是将原始信号分解为若干部分,但所用的方法比经验模态分解复杂。具体地,VMD 将原

始信号分解为有限个具有固定带宽的 IMF。以每个 IMF 及其中心频率附近的窄带信号构造变分模型,通过交替方向乘子法在其频域内迭代求解,将原始信号分解为各本征模态函数的线性组合。该方法所得 IMF 端点连续,模态混叠程度也小于 EMD,且具有较强的自适应性。张晨阳等^[112]即根据 VMD 对侵彻过载信号进行了分解,最终选取 2 阶 IMF 作为重构信号,再进行二次积分、获得位移时程曲线。结果表明,VMD 所重构的信号具有更高的信噪比,以及更贴近真实值的侵彻深度估计。

此外,Hao 等^[113]和王世虎^[7]均利用 EEMD 方法得到了一系列 IMF 分量,对每个 IMF 进行 Hilbert-Huang 变换,分析了各个分量的特性。王世虎^[7]还据此判断了刚体减速度与各分量的符合程度,最终实现了有效提取。郝慧艳等^[81]利用 EEMD 方法获取了与谐响应分析获得的共振频率相对应的分量,并认为其对应弹体结构响应信号,将其剔除后获得了刚体减速度。孙猛等^[114]则首先使用模态分析得到弹体的谐振状态,然后使用 EEMD 将谐振状态对应的弹体结构响应成分剔除。Zhang 等^[65]以动态不确定性和近似度为评价指标,提出了一种改进总体经验模式分解 (Modified Ensemble Empirical Mode Decomposition, MEEMD) 的降噪算法,刚体减速度的获取具有自适应性。Zhang 等^[65]对海底爆炸冲击波产生的过载进行 EMD,成功消除了过载信号中的低频趋势项,抑制了信号的零漂。田聪等^[75]和田聪^[115]以弹簧-振子结构的冲击响应谱为参考,对比了 EMD、小波变换和最小二乘等算法对于消除过载信号中趋势项的作用,结果表明 EMD 具有自适应去除低频趋势项的作用,在 3 种算法中表现最佳。

因此,模态分解具有估计侵彻弹体物理运动过程、评价引信和过载测量装置设计合理性的能力,普遍表现出前置条件少、自适应性强、提取精准的特点。它自身存在多个变种,且有若干后处理算法与之搭配,使用时可根据场景判断最佳的组合方式。然而,上述研究均为侵彻后对信号的分析,面对弹体侵彻过程中物理量的实时计算和侵彻时刻、层数的实时判断需求,模态分解计算仍较复杂,在侵彻弹体硬件内是否仍可实时有效处理信号,还需进行检验。

2.4 小波变换法

1995 年,Donoho^[116]提出了小波阈值消噪方法。侵彻信号的小波分析一般通过选择合适的小波对测试信号进行分解,然后对分解后的高频信号采用设定的阈值函数进行滤波,最后对处理后的信号进行

重构,获得消噪信号。其处理过程能够去除信号携带的部分高频噪声,获得较高的信噪比。赵海峰等^[117]采用的提取刚体减速度的小波变换法如下:

1) 根据侵彻过载信号的特点和前人经验^[13]选择 Daubechies II 小波作为侵彻信号分析的母小波进行分解,由分解后的小波系数确定侵彻信号的最佳分解对应的小波层数;

2) 对小波分解后信号的高频噪声进行强制阈值滤波或默认阈值滤波;

3) 利用滤波后的高频系数和最佳小波层数对应的低频系数进行信号重构。

此外,冯琳娜^[78]和汪覃^[45]利用类似的小波变化手段,也成功提取了刚体减速度信号。刘宗宝^[87]利用 db6 小波对引信过载曲线进行时频分析,充分展示了小波变换能在不同时刻分析不同频域响应特征的特点。研究将过载响应分为 3 个阶段:过载上升段、下降段和自由振动段,分别对应弹体的开坑、隧穿和自由飞,每个阶段具有分明的频率响应形式。Wang 等^[118]依据小波变换分析了侵彻信号不同时刻的频率特性,根据突防时刻刚体减速度陡降的特点,开发了一套快速识别弹体突防的算法。张冬梅^[30]提出了分段小波滤波方法,首先利用模态分析给出滤波截止频率导出小波分解层数的推荐值,然后通过自适应算法给出了分段长度的选择方法,两者结合后具有较好的实时滤波效果。李飞胤^[119]和王杰等^[120]针对弹体侵彻多层靶中出现的信号粘连现象,分别采用 db6 小波和 db10 小波对过载曲线进行分解,均较好地过滤了高频信号,实现了对每层侵彻中刚体减速度的正确估计。

小波变换具有与模态分解类似的能力,然而它是一种线性变换,只能根据信号的特征选择小波基,一旦确定小波基,在整个分解过程不能更换,其自适应性不足。此外,实际滤波过程中忽视了侵彻信号本身的频率分析,因此容易去除侵彻阻力本身带有的侵彻高频信号^[106]。尽管已有研究提出了基于小波变化的实时滤波算法,但算法的弹载硬件适配性和有效性还需进一步检验。

2.5 盲源分离法

盲源分离是指从若干观测到的混合信号中恢复出无法直接观测到的原始信号的方法,常涉及到多个信号源和多个传感器构成的复杂系统^[121]。若不加处理,则过载信号为单源单传感器结构,而无法使用盲源分离的经典方法。因此,常在盲源分离前将

单通道混合信号转化为虚拟多通道信号,例如空时法、过采样法和时频域分解法等。这也表明盲源分离需要结合其他算法使用^[87]。

而盲源分离自身的经典方法之一是独立分量分析(Independent Component Analysis, ICA)。它以非高斯源信号为研究对象,在它们统计独立的前提下,对观测到的多路混合信号进行盲分离,从而分离出隐含在混合信号中的独立源信号,其关键是寻找某种变换,使各个源成分尽可能独立。刘宗宝^[87]利用小波变换构建了不同频段的虚拟传感器,再通过主分量分析寻找各个虚拟传感器中能量最大的分量,最终通过独立分量分析给出侵彻过载信号的各种组成成分。该算法基本不依赖弹引系统的前置信息,而是直接基于过载信号,因此是一种普适性很强的综合算法。

赵海峰等^[122]在处理侵彻过载信号时也用了盲源分离法。与刘宗宝^[87]的方法不同,其使用的单通道变换为多通道信号的方法为总体经验模态分解。而盲源分离自身使用“最大互相关系数法”来筛选最优 IMF 函数,与原信号重组、变换构造多通

道混合信号,最后提取混合信号中对应刚体减速度的项,发现其二次积分后对侵彻深度的估计优于低通滤波法以及传统的总体经验模态分解方法,是一种具有自适应能力且更精确的刚体减速度提取手段。

张晨阳等^[123]的研究手段与上述研究类似,但其使用的单通道至多通道信号变换方法为变分模态分解,同样筛选出了最优 IMF 函数,并与源信号重构产生最优刚体减速度信号。

2.6 小结

表4给出了各类过载信号处理方法的特点。由表4可见,低通滤波和机械滤波法作为传统方法,相比于其他信号处理方法的精度和自适应性较差,但与弹载硬件适配性高,实时性好,低通滤波法还可用作后处理初步分析。小波变换法同样具有人为性,需要谨慎选择小波基。而模态分解法的若干子方法除了在精度和自适应性上具有优势外,算法本身比盲源分离法简单。然而,模态分解、小波变换和盲源分离法能否适配弹载硬件、是否具有实时处理信号的能力,还需在测试中检验。

表4 过载信号处理方法的特点

Table 4 Characteristics of methods for overload signal processing

提取方法	基本思路	优点	缺点	适用场景
低通滤波法	进行 Fourier 频谱变换,保留低频成分	简单,实用性强	截止频率难确定,人工判断成分大	实时分析、后处理初步分析
机械滤波法	利用高黏性大阻尼材料滤去信号高频成分,减小过载幅值	简单,实用性强	多次冲击可能失效,普适性差	实时分析、关键结构保护
模态分解法	逐步去除信号高频成分,选取最优本征模态函数	精确,自适应性好	可能出现高频成分丢失、信号端点失真	后处理精确分析
小波变换法	进行小波变换,确定最佳小波层数,保留低频成分	精确	小波基人为选择,可能出现高频成分丢失	后处理精确分析
盲源分离法	将信号转为虚拟多通道,比较得出最显著成分	精确,自适应性好	需搭配其他方法使用,过程复杂	后处理精确分析

3 过载信号分析处理技术发展趋势

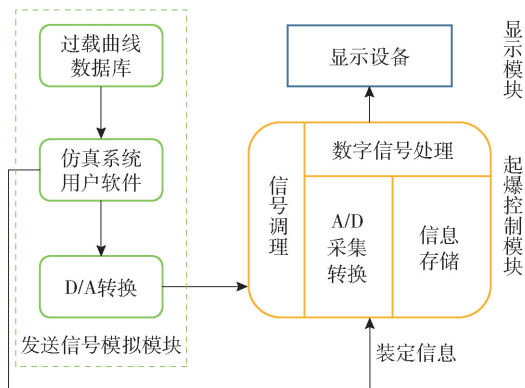
3.1 信号实时处理技术

确定侵彻弹体的实时物理量、实现对靶体的精准打击是过载信号的重要价值之一。这一要求牵引出过载信号的实时处理技术。在众多处理方法中,低通滤波和机械滤波法已在弹载硬件上验证,而模态分解、小波变换和盲源分离法相比前两者计算更复杂,现有弹载硬件能否支持实时计算和控制,还需进行检验。

近期有学者研究开发了无实物和半实物仿真

平台,可用于方法的实时性检验。例如,王世虎^[7]和张冬梅^[30]分别搭建了模拟侵彻环境,通过约束计算量证明方法实时性。刘宗宝^[87]开发了过载信号数据库与引信实物结合的半实物仿真平台,其原理如图14所示。已有过载曲线经过 D/A 转换可输入内置算法的起爆控制模块内,并将算法处理情况实时反馈至软件。黄莎玲等^[55]也采用了类似的半实物仿真手段,用于验证去信号粘连算法的实时性。

尽管弹载硬件的信号处理能力已有提升,但随着侵彻速度和控制精确性要求的提高,信号的实时

图 14 半实物仿真系统原理图^[87]Fig. 14 Schematic diagram of semi-physical simulation system^[87]

处理仍是当前的难题。一方面,要求兼具快速性和有效性的处理方法,另一方面,要求成熟的仿真平台,以进行多种弹靶工况下的算法验证。两方面都需要开展大量工作。

3.2 过载信号重构技术

试验获取侵彻过载信号数据量少、周期长且耗费高,而过载信号的处理、基于过载信号的延伸分析均需大量过载信号作为输入,对多种弹靶工况下的过载进行重构是过载信号相关技术的一大发展趋势。

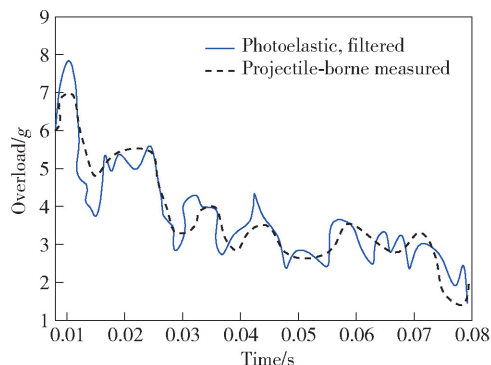
利用仿真对过载信号进行重构是自然的想法。冯琳娜^[78]和杨振兴^[124]利用有限元法对侵彻过程进行数值仿真,得出理想状态下的过载信号,并参照试验过载曲线加入确定幅值的噪声信号,从而实现重构。冯琳娜^[78]还提出了基于实测信号对仿真重构信号进行评价的方法,评价结果可为仿真模型修正提供指导。王永峰^[83]和代慧宇^[125]则利用仿真得到了不同工况下的重构过载,再将其作为输入以校验引信和过载测试装置结构的可靠性。此外,若干近期研究^[42,52,58,84,86,102]也利用仿真获得的过载曲线来校验结构或算法设计的合理性。

然而,有限元算法研究^[126]表明,有限元方法获得的过载曲线包含与网格尺寸相关的干扰信号,通过仿真精确计算过载曲线,需要将弹体的网格尺寸划分得比通常情况细密许多。因此,利用有限元仿真重构过载信号也需要进行大量计算。李蓉等^[6]提出了一种替代思路:以典型试验工况下的过载信号作为训练集,利用机器学习方法进行训练,最终按照给定场景生成对应的模拟过载信号。在实际应用中,机器学习相关方法能更有效且快速地重构过载信号,未来研究可从该方向入手。

3.3 刚体减速度分析技术

在已有的刚体减速度分析技术中,峰-层对应性被广泛应用,曲线光滑成为判断信号提取成功与否的重要指标。然而,刚体减速度的峰-层对应性受到两个方面的挑战。

一是靶体非均质带来的载荷波动性。在靶体为沙土、岩石、混凝土等时,材料的非均质会极大地影响弹体的侵彻性能。Goldman 等^[127]对沙土靶受冲击问题开展了大量试验研究,发现弹体的刚体减速度本身就带有波动,且这种波动在侵彻速度达到一定值后消失。这是均质材料侵彻理论无法描述的。Clark^[128]在研究半无限沙土靶的侵彻时也发现,弹体在颗粒介质中移动时受到的阻力远非单峰。试验中侧向为透明玻璃板,因此能通过拍照记录弹体质心位置,并与弹载测试结果对比。由此获得的典型弹体加速度时程曲线如图 15 所示,从中可见其波动性。考虑到非均匀靶体给予的刚体减速度本身含有波动,如何在此基础上分析信号、又如何导出侵彻过程物理量,还需要进一步研究。

图 15 弹体侵彻沙土的典型加速度时程曲线^[128]Fig. 15 Typical acceleration curve of projectile penetrating sand^[128]

此外,弹靶耦合作用会对刚体减速度的实际形式产生影响。图 16 展示了弹靶耦合作用的机制,得到了一些研究的证实。例如,Zhang 等^[129]对梁和质量块碰撞时的加速度响应进行了研究,发现碰撞两体在交换动量时不可能完全接触。实际由于梁弯曲,接触的形式相当复杂,存在二次甚至三次碰撞的可能。张林^[130]发现,梁受横向质量块撞击时,弯曲波传播会引起复杂的响应模式,当碰撞激发的弯曲波返回到碰撞位置时,梁的几何尺寸将影响碰撞接触时间和幅值。

尽管侵彻方面的弹靶耦合效应研究较少,但依据图 16 所给出的机制,弹靶相互作用力由接触处的

位置和速度决定,而后者又与应力波传播高度相关。因此,弹靶相互作用力会含有与应力波相关的高频成分,刚体减速度中也会含有与弹体结构响应频率接近的成分。在考虑弹靶耦合作用时,还需进一步研究实际过载的峰-层对应性能否保持、刚体减速度中的高频成分如何评估等问题。

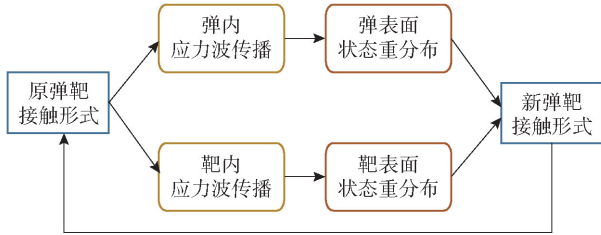


图 16 弹靶耦合作用机制示意

Fig. 16 Demonstration of projectile-target interaction mechanism

3.4 高速侵彻过载分析技术

随着高速动能侵彻武器的研发,高速侵彻场景受到越来越多的关注。相比于中低速侵彻,高速侵彻的弹靶作用方式发生显著改变:弹体在侵彻过程中不能被视作刚体或一般变形体,而应视作半流体甚至流体,表面熔融和质量磨蚀成为弹体的主要结构响应形式^[131-132];靶体则会经历一个极端高温高压过程,产生强烈的径向冲击效应,其影响范围远超侵彻深度,接近浅埋爆炸^[133-134]。

为对高速侵彻现象进行精确定量分析,侵彻过程中加速度信号的准确获取成为当前的重大需求。然而,随着弹靶作用方式的改变,高速侵彻下的过载信号特征也将发生改变。Zhang 等^[65]利用 A-T 流场模型^[20]的理论推导,给出了图 17 所示的弹体中部高速侵彻加速度示意曲线(仅考虑刚体减速度成分)。由图 17 可见其具有如下特征:

- 1) 过载在侵彻的绝大部分时间内幅值很小,近似平稳;
- 2) 在某个时刻,过载突然上升,较之前提升百倍以上,表现为显著的上升沿;
- 3) 过载瞬时达峰后又瞬时下降,直至侵彻速度归零。

这种刚体减速度曲线形式是由 A-T 模型的“前部流体-后部刚体”假设导出的,具有理论自治性。它表明高速侵彻中的刚体减速度具有远高于一般侵彻的频率和脉冲幅值,但仍保持峰-层对应性。此外,A-T 模型和若干高速侵彻模型表明,弹体头部高速侵彻时,弹体后部近似刚体,应力波传播效应不显

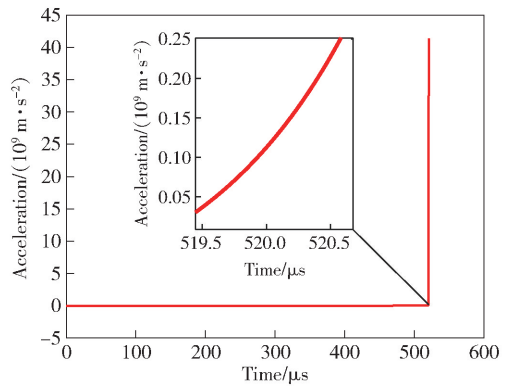


图 17 弹体中部高速侵彻加速度示意曲线^[65]

Fig. 17 Demonstration curve of high-speed penetration acceleration of projectile's middle^[65]

著^[135],因此弹体结构响应对过载信号的贡献不多。Zhang 等^[65]对高速侵彻下的加速度测试系统进行建模,发现极端过载激励下测试系统的可跟随性受到挑战,需利用集成结构设计和后处理算法保证信号的时程对应性和能量完整性。研究表明高速侵彻下连接结构响应和干扰信号对整体过载的贡献更加复杂和突出。

尽管高速侵彻时过载信号的各个成分发生了若干变化,但刚体减速度的峰-层对应性、一般加速度测试系统的高频响特性不变,因此非平稳信号的典型处理方法仍可沿用,例如经验模态分解类^[48,65,111]、小波变换类^[75,136]等。此外,针对高速侵彻下非刚体减速度信号成分建模困难的问题,Teng 等^[137]提出了将信号转化为图像,利用卷积神经网络去除噪声、提取刚体减速度的方法,具有更强的普适性。因此,除了传统方法,机器学习相关方法也可作为高速侵彻过载分析的重要手段。

4 总结与展望

本文主要对已有侵彻弹体过载信号的处理手段进行了综述。过载信号由 4 种成分组成:刚体减速度、弹体结构响应、连接结构响应和传感器噪声,具有高峰值、高频响的特点。它不仅能反映弹体侵彻终点数据,也能测量弹体的物理运动过程,还能对应力波传播过程进行记录、对引信和防护结构的设计提出指导。

一般而言,过载信号中的刚体减速度频率最低,但峰值最大,且具有显著的峰-层对应性,均值不为零。而弹体结构响应信号频率高于刚体减速度,由应力波往复传播产生,均值近似为零。连接结构响应和传感器噪声均来自于传感器对测试点的加速度

响应,频率较高,设计时应注意使连接结构的自振频率避开弹体结构响应主频,以减小连接结构响应幅值。

众多研究聚焦在处理过载信号成分上。基本的分析方法是低通滤波法,而截止频率可根据多试验组合获得,也可根据弹体模态分析获得。机械滤波法则与之类似,采用大黏性、大阻尼的材料使弹体结构响应等高频信号显著衰减,同时保护了弹内关键结构。上述两种方法的实时性较好,普适性却不足。与之相对,模态分解法和小波变化法是信号处理中常用的两种手段,适用于瞬态、非稳定且成分复杂的过载信号的后处理。盲源分离法则是在基础算法之上的又一次提升,具有更好的信号源分解效果。后三种方法均表现出较好的普适性,但它们在弹载硬件上的实时信号处理能力还需进行检验。

侵彻弹体过载信号分析处理技术有若干发展方向。首先是信号处理的进一步实时化和自适应化,从而优化侵彻阻力评估,便于引信实时控制。过载信号样本目前也较缺乏,需要寻找可靠准确的过载信号重构方法。进一步,刚体减速度分析中的峰-层对应性也受到来自靶体非均匀性和弹靶耦合作用两个方面的挑战。此外,多层侵彻中的“信号粘连”现象未得到根本解决,需对弹体结构响应信号进行更深入的建模和分析,寻求刚体减速度和弹体结构响应的本质差别。传感器和连接结构的建模与优化也是一项长期课题,新的结构设计以及更精确的滤波算法均能为还原侵彻过程提供帮助。最后,高速侵彻时过载信号特性产生变化,信号频率和幅值增大,如何针对性地设计测试装置并分析过载信号,也是一大挑战。

参考文献 (References)

- [1] 彭永. 弹体侵彻混凝土靶的力学特性研究[D]. 南京:陆军工程大学, 2018.
PENG Y. Research on the mechanical characteristics of projectile penetration into concrete targets[D]. Nanjing: Army Engineering University, 2018. (in Chinese)
- [2] 刘伟钊, 李蓉, 牛兰杰, 等. 硬目标侵彻起爆控制技术现状研究及展望[J]. 兵工学报, 2023, 44(6): 1602-1619.
LIU W Z, LI R, NIU L J, et al. Research status and prospect of hard-target penetration initiation control technology [J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(6): 1602-1619. (in Chinese)
- [3] 王成华, 杨永刚, 杨阳, 等. 弹体非正撞击/侵彻载荷响应的一种半经验分析方法[J]. 导弹与航天运载技术, 2021(1): 39-44.
WANG C H, YANG Y G, YANG Y, et al. A semi-empirical method for load and response analysis of projectile non-normal impact/penetrating target [J]. Missiles and Space Vehicles, 2021(1): 39-44. (in Chinese)
- [4] 耿宇飞. 侵彻战斗部失效感知技术研究[D]. 太原:中北大学, 2022.
GENG Y F. Failure sensing technology of penetrating warhead [D]. Taiyuan: North University of China, 2022. (in Chinese)
- [5] PEREZ J P. Analysis of the deceleration signal of a missile during a hard-target attack [D]. Quebec, Canada: Universite Laval (Canada), 1997.
- [6] 李蓉, 房安琪. 基于 transunet 的侵彻多层过载信号生成[J]. 测试技术学报, 2023, 37(1): 43-53.
LI R, FANG A Q. Penetration multilayer overload signal generation based on transUnet [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2023, 37(1): 43-53. (in Chinese)
- [7] 王世虎. 硬目标侵彻加速度信号的处理[D]. 北京:北京理工大学, 2010.
WANG S H. Study on the acceleration signal of the hard target penetration [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [8] 杭宇. 发射及侵彻环境下典型弹药过载参数测试方法研究[D]. 南京:南京理工大学, 2022.
HANG Y. Research on test method of typical ammunition overload parameters in launch and penetration environment [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [9] GUO S Q, YANG S P. Wave motions in non-uniform one-dimensional waveguides [J]. Journal of Vibration and Control, 2012, 18(1): 92-100.
- [10] SEHGAL S. Comparative analysis of dynamic responses of a damaged free-free beam with geometrically similar undamaged beams [C] // Proceedings of the 2015 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences. Chandigarh, India: IEEE, 2015.
- [11] 孙桂娟, 何翔, 刘瑞朝, 等. 弹体侵彻过载特性研究综述[C] // 第六届全国工程结构安全防护学术会议论文集. 洛阳:中国力学学会, 2007: 69-73.
SUN G J, HE X, LIU R C, et al. Review of research on overload characteristics of projectile penetration [C] // Proceedings of the 6th National Academic Conference on Engineering Structure Safety Protection. Louyang: Chinese Society of Mechanics, 2007: 69-73. (in Chinese)
- [12] LUNDGREN R G, CREST C. Method and signal processing means for detecting and discriminating between structural configurations and geological gradients encountered by kinetic energy subterranean terra-dynamic crafts; US 7,720,608 B2 [P]. 2009-06-11.
- [13] 徐鹏, 祖静, 范锦彪. 高 g 值侵彻加速度测试及其相关技术研究进展[J]. 兵工学报, 2011, 32(6): 739-745.
XU P, ZU J, FAN J B. Research development of high g penetration acceleration test and its correlative technology [J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(6): 739-745. (in Chinese)

- [14] 杨明, 杨志刚, 林祖森. 加速度计输出信号的信息组成[J]. 华北工学院学报, 2000, 21(1): 44-46.
YANG M, YANG Z G, LIN Z S. Information compositions of the output signal of accelerometers[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2000, 21(1): 44-46. (in Chinese)
- [15] 杨平. 非线性抗振动冲击防护动力学与动态设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
YANG P. Nonlinear vibration and impact protection dynamics and dynamic design [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [16] WARREN T L, FORRESTAL M J, RANGLES P W. Evaluation of large amplitude deceleration data from projectile penetration into concrete targets[J]. Experimental Mechanics, 2014, 54(2): 241-253.
- [17] 任辉启, 何翔, 刘瑞朝, 等. 弹体侵彻混凝土过载特性研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 110-116.
REN H Q, HE X, LIU R C, et al. Research on overload characteristics of projectile penetration into concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 110-116. (in Chinese)
- [18] JUNGMIN S E O, SHIN C, KWON O, et al. Estimation of penetration depth using acceleration signal analysis for underwater free fall cone penetration tester[J]. Journal of Ocean Engineering and Technology, 2020, 34(3): 202-207.
- [19] LEE J S, BYUN Y H. Instrumented cone penetrometer for dense layer characterization[J]. Sensors, 2020, 20(20): 1-19.
- [20] ALLEN W A, ROGERS J W. Penetration of a rod into a semi-infinite target[J]. Journal of the Franklin Institute-Engineering and Applied Mathematics, 1961, 272(4): 275-284.
- [21] YARIN A L, RUBIN M B, ROISMAN I V. Penetration of a rigid projectile into an elastic-plastic target of finite thickness[J]. International Journal of Impact Engineering, 1995, 16(5/6): 801-831.
- [22] ROISMAN I V, YARIN A L. Oblique penetration of a rigid projectile into an elastic-plastic target [J]. Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik, 1996, 76(5): 429-430.
- [23] FORRESTAL M J, LONGCOPE D B, NORWOOD F R. A model to estimate forces on conical penetrators into dry porous rock [J]. Journal of Applied Mechanics-Transactions of the Asme, 1981, 48(1): 25-29.
- [24] LONGCOPE D B, FORRESTAL M J. Penetration of targets described by a mohr-coulomb failure criterion with a tension cutoff [J]. Journal of Applied Mechanics-Transactions of the Asme, 1983, 50(2): 327-333.
- [25] 刘均伟, 张先锋, 刘闯, 等. 空腔膨胀理论靶体阻力模型及其应用研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(10): 101101-1-101101-27.
LIU J W, ZHANG X F, LIU C, et al. Research progress of target resistance model of cavity expansion theory and its application [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(10) 101101-1-101101-27.
- [26] ROSENBERG Z, DEKEL E. The penetration of rigid long rods-revisited[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(4): 551-564.
- [27] VAYIG Y, ROSENBERG Z, ORNAI D. More on the penetration of spherical-nosed rigid projectiles into metallic targets [J]. International Journal of Protective Structures, 2023, 14(1): 122-131.
- [28] YANKELEVSKY D Z, FELDGUN V R. Constant deceleration approaches for penetration analysis of rigid projectile into concrete: revisited [J]. International Journal of Protective Structures, 2020, 11(4): 515-532.
- [29] GAO S Q, LIU H P, JIN L. A fuzzy model of the penetration resistance of concrete targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(4): 644-649.
- [30] 张冬梅. 高速侵彻过程中弹引系统的极端过载及冲击传递研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
ZHANG D M. Research on the extreme overload and impact transmission of projectile-fuze system during high speed penetration[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [31] ZHANG D M, GAO S Q, LIU H P, et al. Real-time numerical calculation for penetration depth of projectiles into concrete targets[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2018, 46(4): 520-531.
- [32] 陈小伟, 金建明. 动能深侵彻弹的力学设计(II): 弹靶的相关力学分析与实例[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(1): 71-78.
CHEN X W, JIN J M. Mechanics of structural design of EPW (II): Analyses on the design of EPW projectile, concrete targets, and examples[J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(1): 71-78. (in Chinese)
- [33] GUO S Q, YANG S P. Longitudinal vibrations of arbitrary non-uniform rods[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2015, 28(2): 187-199.
- [34] GAN C B, WEI Y M, YANG S X. Longitudinal wave propagation in a rod with variable cross-section[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(2): 434-445.
- [35] 刘小虎, 刘吉, 王乘, 等. 弹丸低速垂直侵彻无钢筋混凝土的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(4): 323-328.
LIU X H, LIU J, WANG C, et al. Experimental studies on the projectile penetrating normally into a plain concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(4): 323-328. (in Chinese)
- [36] 徐一源, 卢玉斌, 张浩, 等. 分段式弹体经低速撞击后侵彻纸靶实验[J]. 西南科技大学学报, 2017, 32(4): 82-88.
XU Y Y, LU Y B, ZHANG H, et al. Test study on segmented projectile impacted under low velocity and penetrating paper targets [J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2017, 32(4): 82-88. (in Chinese)
- [37] 徐文峥, 王晶禹, 陆震, 等. 弹性弹体侵彻混凝土靶板的过载特性研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(5): 91-95, 156, 242.
XU W Z, WANG J Y, LU Z, et al. Research on overload

- characteristics of elastic projectile penetrating concrete target plate [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(5): 91–95, 156, 242. (in Chinese)
- [38] FORRESTAL M J, ALTMAN B S, CARGILE J D, et al. An empirical-equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(4): 395–405.
- [39] 卢玉斌, 程永生, 孙远程. 弹体侵入混凝土靶板过载特性的典型理论模型比较分析[J]. *防护工程*, 2013, 35(3): 33–40.
LU Y B, CHENG Y S, SUN Y C. Comparison of acceleration characteristics theoretical models for projectiles penetrating concrete targets[J]. *Protective Engineering*, 2013, 35(3): 33–40. (in Chinese)
- [40] 宋英燕. 弹引系统侵入混凝土的动态特性研究[D]. 北京:北京理工大学, 2017.
SONG Y Y. Research on dynamic characteristics of projectile-fuze system in concrete penetration[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [41] 王森, 徐蓬朝, 黄惠东. 基于谐响应分析的侵入引信薄弱环节分析方法[J]. *探测与控制学报*, 2017, 39(3): 12–16.
WANG S, XU P C, HUANG H D. Harmonic analysis method of penetration fuze weak link[J]. *Journal of Detection & Control*, 2017, 39(3): 12–16. (in Chinese)
- [42] 马孟新, 牛兰杰, 李蓉, 等. 基于侵入过载信号应力波补偿的靶后精确起爆控制技术[J]. *探测与控制学报*, 2022, 44(5): 31–38.
MA M X, NIU L J, LI R, et al. Post-penetration precision detonation control based on acceleration signal stress wave compensation[J]. *Journal of Detection & Control*, 2022, 44(5): 31–38. (in Chinese)
- [43] 谷鸿平, 张立建, 畅博, 等. 侵入载荷下两种结构装药动态响应数值分析[J]. *兵器装备工程学报*, 2020, 41(8): 41–44, 96.
GU H P, ZHANG L J, CHANG B, et al. Numerical simulation on dynamic response of two charge structures subjected to penetration load [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41(8): 41–44, 96. (in Chinese)
- [44] 张浩. 分段弹体侵入铝靶板动态响应特性与过载特性研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2018.
ZHANG H. Dynamic response characteristics and deceleration of sectional projectile penetrating aluminum plates[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [45] 汪覃. 动载荷下分段式弹体结构冲击响应和过载特性研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2017.
WANG Q. Response characteristics of sectional projectile under dynamic loadings [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [46] 汪覃, 卢玉斌, 孙远程, 等. 冲击载荷下分段式弹动态响应特性的数值模拟[J]. *兵器装备工程学报*, 2017, 38(5): 41–47.
WANG Q, LU Y B, SUN Y C, et al. Numerical study on sectional projectile's response characteristics under impact loading [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(5): 41–47. (in Chinese)
- [47] 张浩, 卢玉斌, 徐一源, 等. 分段弹体低速侵入铝靶板动态响应特性的数值分析[J]. *西南科技大学学报*, 2018, 33(1): 96–102.
ZHANG H, LU Y B, XU Y Y, et al. Numerical analysis of the response characteristics of sectional projectile penetrating aluminum plates under low velocity [J]. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2018, 33(1): 96–102. (in Chinese)
- [48] 张博威. 基于阵列数据高 g 值采集系统的校正[D]. 西安:西安工业大学, 2023.
ZHANG B W. Calibration based on high g value acquisition system of array data[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023. (in Chinese)
- [49] GAUL L, BISCHOFF S, SPRENGER H, et al. Numerical and experimental investigation of wave propagation in rod-systems with cracks[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010, 77(18): 3532–3540.
- [50] SARAVANAN T J, GOPALAKRISHNAN N, RAO N P. Experiments on coupled axial-flexural wave propagation in a sagged rod with structural discontinuity using piezoelectric transducers [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2018, 24(13): 2717–2731.
- [51] 李蓉, 戴黎红, 吴敏忠, 等. 超高速侵入引信多层目标过载层间粘连机理[J]. *探测与控制学报*, 2020, 42(2): 1–4, 9.
LI R, DAI L H, WU M Z, et al. Multi-level target adhesion mechanism of high-speed penetration fuze overload[J]. *Journal of Detection & Control*, 2020, 42(2): 1–4, 9. (in Chinese)
- [52] 马孟新, 李蓉, 牛兰杰. 侵入引信加速度信号目标特征中干扰叠加程度的评价指标[J]. *兵工学报*, 2022, 43(1): 20–28.
MA M X, LI R, NIU L J. Evaluation index of disturbance superposition degree in multi-layer penetration acceleration signal [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(1): 20–28. (in Chinese)
- [53] 张美云, 石庚辰, 刘强, 等. 侵入硬目标引信侵入信号获取与处理技术[J]. *制导与引信*, 2020, 41(3): 1–10, 24.
ZHANG M Y, SHI G C, LIU Q, et al. Acquisition and processing technology of penetrating signal of penetrating hard target fuze[J]. *Guidance & Fuze*, 2020, 41(3): 1–10, 24. (in Chinese)
- [54] OU Y K, YANG Y H, RUAN Z Y. A layer count algorithm based on fusion of acceleration sensor and mems impact switch signals[J]. *Journal of Detection & Control*, 2012, 34(2): 7–10.
- [55] 黄莎玲, 朱鸿志, 程祥利, 等. 自适应阈值侵入引信层目标识别算法[J]. *兵工学报*, 2020, 41(9): 1762–1771.
HUANG S L, ZHU H Z, CHENG X L, et al. Adaptive threshold setting method for layer-count in penetration fuze [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(9): 1762–1771. (in Chinese)

- [56] ZHANG D B, LI J, WEI X K, et al. Signal measurement of projectile penetration overload based on charge sensor[J]. IEEE Access, 2019, 7: 178139–178152.
- [57] YU H Y, ZOU Q P, SUI L, et al. Optimal design and experimental study of a layer metering sensor for high-speed penetration through multi-layer hard targets[J]. Soft Computing, 2021, 1–13. DOI: 10.1007/s00500–021–06325–9.
- [58] 房安琪, 李蓉. 基于数据增强的侵彻引信准确层识别神经网络方法[J]. 探测与控制学报, 2022, 44(1): 1–6.
FANG A Q, LI R. Penetration fuze accurate layer recognition neural network data enhancement method [J]. Journal of Detection & Control, 2022, 44(1):1–6. (in Chinese)
- [59] 何丽灵, 高进忠, 陈小伟, 等. 弹体高过载硬回收测量技术的实验探讨[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(6): 608–612.
HE L L, GAO J Z, CHEN X W, et al. Experimental study on measurement technology for projectile deceleration[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(6): 608–612. (in Chinese)
- [60] 张会锁, 罗旭, 张远高. 弹体过载记录仪安装方式对侵彻过载峰值的影响分析[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2014, 35(3): 252–257.
ZHANG H S, LUO X, ZHANG Y G. Research on the influence of the missile overload recorder installation style on penetration acceleration peak value[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2014, 35(3): 252–257. (in Chinese)
- [61] 张冬梅, 高世桥, 牛少华. 侵彻过程中螺纹连接结构的应力传递仿真分析[J]. 兵工学报, 2015, 36(增刊1): 284–288.
ZHANG D M, GAO S Q, NIU S H. Simulation analysis of stress transmission of screw[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(S1): 284–288. (in Chinese)
- [62] 张冬梅, 高世桥, 李世中. 侵彻过程中弹引系统的冲击传递特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 27–34.
ZHANG D M, GAO S Q, LI S Z. Study on impact transfer characteristics of projectile system during penetration[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(12): 27–34. (in Chinese)
- [63] YAN A M, WANG X F, YANG H, et al. Research on the shock response characteristics of a threaded connection using the thin-layer element method [J]. Applied Sciences-Basel, 2021, 11(12):1–19.
- [64] 赵小龙, 马铁华, 徐鹏, 等. 弹丸侵彻混凝土加速度信号测试及分析[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(3): 347–353.
ZHAO X L, MA T H, XU P, et al. Acceleration signal test and analysis for projectile penetrating into concrete[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(3): 347–353. (in Chinese)
- [65] ZHANG D B, LI J, WEI X K, et al. Research on dynamic test of hyper-velocity impact penetration acceleration signal [J]. IEEE Access, 2020, 8: 194879–194893.
- [66] 程祥利, 刘波, 赵慧, 等. 侵彻战斗部-引信系统动力学建模与仿真[J]. 兵工学报, 2020, 41(4): 625–633.
CHENG X L, LIU B, ZHAO H, et al. Dynamic modeling and simulation for penetration warhead-fuze system [J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(4): 625–633. (in Chinese)
- [67] 唐林, 陈刚, 孙远程. 冲击加速度测试中的放大器频率效应[J]. 火箭与制导学报, 2018, 38(5): 77–81.
TANG L, CHEN G, SUN Y C. Amplifier frequency effects in impact acceleration measurement [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2018, 38(5): 77–81. (in Chinese)
- [68] 夏伟强, 马铁华, 范锦彪, 等. 压电式加速度传感器在高冲击环境下的零漂分析[J]. 传感技术学报, 2007, 20(7): 1522–1527.
XIA W Q, MA T H, FAN J B, et al. Analysis of zero-drift of the piezoelectric acceleration sensor in high-impact testing [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(7): 1522–1527. (in Chinese)
- [69] KOLYASEV V A, LENKOV S V, MOLIN S M. Noise immune charge amplifier for piezoelectric accelerometers [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2001, 44(1): 45–47.
- [70] BHARDWAJ R, KUMAR N, KUMAR V. Errors in micro-electro-mechanical systems inertial measurement and a review on present practices of error modelling [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2018, 40(9): 2843–2854.
- [71] 王帅, 李杰, 张德彪, 等. 基于压电传感器的零点漂移改善电路的研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(2): 305–313.
WANG S, LI J, ZHANG D B, et al. Research on zero-drift improvement circuit based on piezoelectric sensor [J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(2): 305–313. (in Chinese)
- [72] WU T Q, YOU D, GAO H Y, et al. Research status and development trend of piezoelectric accelerometer [J]. Crystals, 2023, 13(9):1–19.
- [73] 范锦彪, 祖静, 徐鹏, 等. 弹丸侵彻混凝土目标减加速度信号的处理原则[J]. 探测与控制学报, 2012, 34(4):1–5,9.
FAN J B, ZU J, XU P, et al. Impact deceleration signal processing for concrete target penetration [J]. Journal of Detection & Control, 2012, 34(4):1–5,9. (in Chinese)
- [74] 滑志成, 石云波, 米振国, 等. 基于经验模态与低通滤波的零漂处理方法[J]. 探测与控制学报, 2022, 44(2):66–72.
HUA Z C, SHI Y B, M Z G, et al. Empirical mode and low pass filtering zero-drift processing method [J]. Journal of Detection & Control, 2022, 44(2):66–72. (in Chinese)
- [75] 田聪, 张明远. 基于去除冲击信号趋势项修正中低频冲击谱方法研究[J]. 机械工程师, 2021(11): 40–43.
TIAN C, ZHANG M Y. Research on the method of revising mid-low frequency shock spectrum based on removing shock signal trend item [J]. Mechanical Engineer, 2021(11): 40–43. (in Chinese)
- [76] FORRESTAL M J, LUK V K. Penetration into soil targets [J]. International Journal of Impact Engineering, 1992, 12(3): 427–444.
- [77] LONGCOPE J D B. Oblique penetration modeling and correlation with field tests into a soil target [R]. Albuquerque, NM, US: Sandia National Laboratories, 1996.

- [78] 冯琳娜. 硬目标侵彻引信仿真测试系统信号重构方法研究 [D]. 南京:南京理工大学, 2008.
FENG L N. Research on signal reconstruction method for hard target penetration fuze simulation test [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [79] 王成华, 陈佩银, 徐孝诚. 侵彻过载实测数据的滤波及弹体侵彻刚体过载的确定 [J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(5): 416 - 419.
WANG C H, CHEN P Y, XU X C. Filtering of penetration deceleration data and determining of penetration deceleration on the rigid-body [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(5): 416 - 419. (in Chinese)
- [80] 黄家蓉, 刘瑞朝, 何翔, 等. 侵彻过载测试信号的数据处理方法 [J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(5): 555 - 560.
HUANG J R, LIU R C, HE X, et al. A new data processing technique for measured penetration overloads [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(5): 555 - 560. (in Chinese)
- [81] 郝慧艳, 李晓峰, 孙运强, 等. 侵彻过程弹体结构响应频率特性的分析方法 [J]. 振动. 测试与诊断, 2013, 33(2): 307 - 310, 343.
HAO H Y, LI X F, SUN Y Q, et al. Projectile structural response frequency characteristics analysis method in penetration process [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(2): 307 - 310, 343. (in Chinese)
- [82] 刘波, 杨黎明, 李东杰, 等. 侵彻弹体结构纵向振动频率特性分析 [J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(3): 677 - 682.
LIU B, YANG L M, LI D J, et al. Analysis of axial vibration frequency for projectile structure in penetration [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(3): 677 - 682. (in Chinese)
- [83] 王永峰. 基于微小型测试仪的侵彻过载测试技术研究 [D]. 太原:中北大学, 2016.
WANG Y F. Study on penetration overload test technology based on micro tester [D]. Taiyuan: North University of China, 2016. (in Chinese)
- [84] 邱云潇, 何丽灵, 陈刚, 等. 压装连接对加速度计层间信号粘连的影响 [J]. 高压物理学报, 2022, 36(4): 43 - 54.
QIU Y X, HE L L, CHEN G, et al. Influence of pressed connection on accelerometer signal adhesion between target layers [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(4): 43 - 54. (in Chinese)
- [85] PENG Y, WU H, FANG Q, et al. Deceleration time of projectile penetration/perforation into a concrete target: Experiment and discussions [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(1): 112 - 125.
- [86] 孙亚杰, 梁轲, 马孟新, 等. 弹体侵彻多层混凝土靶板的引信层目标识别方法研究 [J]. 测控技术, 2023, 42(7): 95 - 101.
SUN Y J, LIANG K, MA M X, et al. Target identification method of fuze layer for projectile penetrating multilayer concrete target plate [J]. Measurement & Control Technology, 2023, 42(7): 95 - 101. (in Chinese)
- [87] 刘宗宝. 基于弹引系统动态特性的侵彻起爆控制技术 [D]. 北京:北京理工大学, 2016.
LIU Z B. Detonation control techniques for penetration based on the dynamic response of projectile-fuze system [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [88] 刘宗宝, 高世桥, 牛少华, 等. 侵彻起爆控制系统的过载信息实时采集处理与侵深识别技术 [J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(10): 1025 - 1030.
LIU Z B, GAO S Q, NIU S H, et al. Real-time information sampling and processing and penetration depth identification of penetrating detonation control system [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(10): 1025 - 1030. (in Chinese)
- [89] 徐鹏, 祖静, 范锦彪. 高速动能弹侵彻硬目标加速度测试技术研究 [J]. 振动与冲击, 2007(11): 118 - 122, 188.
XU P, ZU J, FAN J B. Study on acceleration test technique of high velocity kinetic energy projectile penetrating into hard target [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007(11): 118 - 122, 188. (in Chinese)
- [90] 李媛媛, 贾宪振, 高立龙, 等. 侵彻过程中弹体内缓冲材料缓冲特性的数值模拟 [J]. 化工新型材料, 2017, 45(3): 128 - 130.
LI Y Y, JIA X Z, GAO L L, et al. Numerical simulation on cushion property of projectile inner cushion material during penetration [J]. New Chemical Materials, 2017, 45(3): 128 - 130. (in Chinese)
- [91] 骆海涛, 孟祥志, 李玉新, 等. 采用泡沫铝填充薄壁结构的穿透器缓冲防护研究 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2020, 41(8): 1135 - 1139.
LUO H T, MENG X Z, LI Y X, et al. Study on buffer protection for penetrator with aluminum foam-filled thin-wall structure [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(8): 1135 - 1139. (in Chinese)
- [92] 骆海涛, 陈士朋, 富佳, 等. 面向星球探测的高速撞击穿透器缓冲防护设计与仿真分析 [J]. 振动与冲击, 2020, 39(6): 198 - 204, 219.
LUO H T, CHEN S P, FU J, et al. Buffer protection design and simulation analysis of a high-speed impact penetrator for planetary exploration [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(6): 198 - 204, 219. (in Chinese)
- [93] 黄用, 崔敏. 解决侵彻信号粘连的新型传感技术 [J]. 自动化与仪表, 2018, 33(11): 61 - 66.
HUANG Y, CUI M. New sensing technology for solving penetration signal sticking [J]. Automation & Instrumentation, 2018, 33(11): 61 - 66. (in Chinese)
- [94] 董灵飞, 戴黎红, 李蓉. 基于应力波衰减材料的目标层特征凸现方法 [J]. 探测与控制学报, 2018, 40(2): 52 - 55, 60.
DONG L F, DAI L H, LI R. A method on revealing target layer characteristic by stress wave attenuation material [J]. Journal of Detection & Control, 2018, 40(2): 52 - 55, 60. (in Chinese)
- [95] 焦敏, 陈小伟, 阮朝阳, 等. 灌封材料对弹载电子器件的防护仿真研究 [J]. 兵工学报, 2014, 35(增刊2): 51 - 56.
JIAO M, CHEN X W, RUAN Z Y, et al. Numerical analysis on

- potting protection of electronic components in projectile[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(S2):51-56. (in Chinese)
- [96] 徐萧, 高世桥, 牛少华, 等. 灌封材料对侵彻过载下弹载器件的防护分析[J]. *兵工学报*, 2017, 38(7): 1289-1300.
XU X, GAO S Q, NIU S H, et al. Dynamic analysis of projectile-borne electronic devices under impact loading [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(7):1289-1300. (in Chinese)
- [97] 宋英燕, 张京英, 李晓峰, 等. 两种连接结构动载荷传递特性的 Matlab 仿真研究[J]. *图学学报*, 2017, 38(6): 809-813.
SONG Y Y, ZHANG J Y, LI X F, et al. MATLAB simulation study on dynamic load transfer characteristics of two kinds of threaded connections[J]. *Journal of Graphics*, 2017, 38(6): 809-813. (in Chinese)
- [98] 张大猛. 多功能引信侵彻过程仿真及电路抗冲击设计[D]. 南京:南京理工大学, 2018.
ZHANG D M. Research on signal simulation of multifunctional fuze penetration process and circuit impact resistance design[D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [99] LIU H, CAO Z K, LUO H J, et al. Performance of closed-cell aluminum foams subjected to impact loading [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 570:27-31.
- [100] MARX J, RABIEI A. Overview of composite metal foams and their properties and performance [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2017, 19(11): 1-24.
- [101] KHODADADI A, LIAGHAT G, TAHERZADEH-FARD A, et al. Impact characteristics of soft composites using shear thickening fluid and natural rubber-a review of current status [J]. *Composite Structures*, 2021, 271: 1-17.
- [102] 张鹏飞. 球体开孔型泡沫铝冲击缓冲特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2022.
ZHANG P F. Research on shock buffering characteristics of spherical open-cell aluminum form [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022. (in Chinese)
- [103] 张锦明, 张合, 戴可人, 等. 多孔弹性复合材料研制及其吸能缓冲特性[J]. *兵工学报*, 2022, 43(1):159-168.
ZHANG J M, ZHANG H, DAI K R, et al. Preparation of elastic porous composite material and its energy-absorption characteristics[J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(1): 159-168. (in Chinese)
- [104] KARSANDIK Y, SABUNCUOGLU B, YILDIRIM B, et al. Impact behavior of sandwich composites for aviation applications: a review[J]. *Composite Structures*, 2023, 314: 116941.
- [105] WANG Y Y, JIANG X Y, LI X S, et al. Bionic ordered structured hydrogels: structure types, design strategies, optimization mechanism of mechanical properties and applications[J]. *Materials Horizons*, 2023, 10(10): 4033-4058.
- [106] 于润祥, 石庚辰. 硬目标侵彻引信分层技术现状与展望[J]. *探测与控制学报*, 2013, 35(5): 1-6.
YU R X, SHI G C. Development and situation of multi-layer hard target penetration fuze[J]. *Journal of Detection & Control*, 2013, 35(5): 1-6. (in Chinese)
- [107] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. *Proceedings of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995.
- [108] WANG S H, LIU M J, LI X F. Matched correlation algorithm of penetration acceleration signal processing based on gabor transform[C]//*Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. Changsha:IEEE Intelligent Computat Society, 2009: 633-636.
- [109] FENG W, ZHEN Z. Simulation and experiment of projectile penetrate into steel target acceleration signal processing [J]. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, 2011, 3: 9-15.
- [110] 唐林, 陈刚, 吴昊. 基于总体经验模态分解和连续均方误差的侵彻过载信号分析方法[J]. *高压物理学报*, 2018, 32(5):128-134.
TANG L, CHEN G, WU H. Penetration deceleration signal processing method with ensemble empirical mode decomposition and consecutive mean square error[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32(5): 128-134. (in Chinese)
- [111] 唐林. 基于集成经验模态分解的高g值冲击加速度数据处理研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2018.
TANG L. Research on high-g impact acceleration data processing based on ensemble empirical mode decomposition [D]. Mianyang:China Academy of Engineering Physics, 2018. (in Chinese)
- [112] 张晨阳, 张亚, 李培英, 等. 基于变分模态分解的侵彻过载信号特征提取[J]. *探测与控制学报*, 2021, 43(3):16-21.
ZHANG C Y, ZHANG Y, LI P Y, et al. Feature extraction of penetration overload signal based on variational mode decomposition [J]. *Journal of Detection & Control*, 2021, 43(3): 16-21. (in Chinese)
- [113] HAO H Y, ZHAO H. Hard target penetration acceleration signals time-frequency analysis[C]//*Proceedings of the 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics*. Dalian:IEEE, 2011:15-18.
- [114] 孙猛, 徐鹏, 沈大伟, 等. 基于模态分析和经验模态分解的弹体加速度处理[J]. *探测与控制学报*, 2017, 39(2):120-123.
SUN M, XU P, SHEN D W, et al. The projectile acceleration processing method using modal analysis and empirical mode decomposition [J]. *Journal of Detection & Control*, 2017, 39(2):120-123. (in Chinese)
- [115] 田聪. 中低频冲击谱测量装置研制及响应谱修正方法研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2021.
TIAN C. Development of low frequency shock spectrum measuring device and study of response spectrum correction method [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [116] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding [J]. *IEEE*

- Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613–627.
- [117] 赵海峰, 张亚, 李世中, 等. 侵彻弹体频率特性分析及过载信号处理[J]. 中国机械工程, 2015, 26(22): 3034–3039.
ZHAO H F, ZHANG Y, LI S Z, et al. Frequency characteristics analyses of penetrating missile and penetration overload signal processing[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(22): 3034–3039. (in Chinese)
- [118] WANG S, LIU M, LI X. Analysis and processing of penetration acceleration signal based on wavelet transform and matched correlation theory[C]// Proceedings of the 2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science. Wuhan: IEEE, 2009.
- [119] 李飞胤. 多次短间隔冲击-振动耦合力学试验理论与方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
LI F Y. Research on theory and method of multiple short interval impact-vibration coupling mechanical experiment[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [120] 王杰, 李蓉, 黄惠东. 基于小波系数的粘连信号穿层特征提取方法[J]. 探测与控制学报, 2016, 38(1): 13–17, 23.
WANG J, LI R, HUANG H D. Layer penetrating adhesion signal characteristic extracting based on wavelet coefficients [J]. Journal of Detection & Control, 2016, 38(1): 13–17, 23. (in Chinese)
- [121] BELOUHRANI A, ABEDMERAIM K, CARDOSO J F, et al. A blind source separation technique using second-order statistics [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(2): 434–444.
- [122] 赵海峰, 张亚, 李世中. 侵彻过载信号的欠定盲源分离与特征提取[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10): 208–218.
ZHAO H F, ZHANG Y, LI S Z. Undetermined blind source separation and feature extraction of penetration overload signals [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(10): 208–218. (in Chinese)
- [123] 张晨阳, 张亚, 李世中. 基于变分模态分解的侵彻过载信号盲分离[J]. 振动与冲击, 2022, 41(5): 280–286.
ZHANG C Y, ZHANG Y, LI S Z. Blind separation of penetration overload signals based on VMD [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(5): 280–286. (in Chinese)
- [124] 杨振兴. 侵彻加速度信号实时仿真系统的设计[D]. 太原: 中北大学, 2014.
YANG Z X. Design of real-time simulation system for penetration acceleration signal [D]. Taiyuan: North University of China, 2014. (in Chinese)
- [125] 代慧宇. 高速侵彻混凝土的弹引系统动态特性研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- DAI H Y. Dynamic characterization of projectile-fuze system for high speed intrusion into concrete [D]. Taiyuan: North University of China, 2023. (in Chinese)
- [126] WANG C, WANG Y B. Occurring mechanism and restraining method research of numerical noise signal in penetration simulation [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(5): 1037–1043.
- [127] GOLDMAN D I, UMBANHOWAR P. Scaling and dynamics of sphere and disk impact into granular media[J]. Physical Review E, 2008, 77(2): 1–14.
- [128] CLARK A H. Granular impact dynamics: grain scale to macroscale[D]. Durham, NC, US: Duke University, 2014.
- [129] ZHANG Q M, WANG X Y, HUANG F L, et al. An experimental and numerical study of the dynamic response of a free-free aluminum beam under high velocity transverse impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(12): 1385–1393.
- [130] 张林. 柔性梁弹塑性碰撞与波相互作用的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
ZHANG L. Impact wave interaction behavior of elastic-plastic beams [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [131] KARAMIS M B. Tribology at high-velocity impact[J]. Tribology International, 2007, 40(1): 98–104.
- [132] NING J G, LI Z, MA T B, et al. Failure behavior of projectile abrasion during high-speed penetration into concrete [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 115: 104634.
- [133] ANTOUN T H, GLENN L A, WALTON O R, et al. Simulation of hypervelocity penetration in limestone [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 33(1–12): 45–52.
- [134] CHENG Y H, WANG M Y, SHI C C, et al. Constraining damage size and crater depth: a physical model of transient crater formation in rocky targets [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 81: 50–60.
- [135] SUN Y H, SHI C C, LIU Z, et al. Theoretical research progress in high-velocity/hypervelocity impact on semi-infinite targets [J]. Shock and Vibration, 2015, 2015: 1–15.
- [136] ZHAO H F, GUO Y, ZHANG Y, et al. Penetration signal adaptive cognitive filtering model based on wavelet analysis[C]// Proceedings of the 13rd IEEE International Conference on Cognitive Informatics and Cognitive Computing. London, UK: IEEE, 2014: 514–519.
- [137] TENG F, ZHANG Z H, ZHANG W Y, et al. Noise reduction for high-g accelerometer signals using deep learning with residual dense module [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(24): 30903–30912.