

文章编号: 1671-0576(2020)03-0001-10

侵彻硬目标引信侵彻信号获取与处理技术

张美云¹, 石庚辰², 刘 强¹, 张 力¹, 邱强强¹

(1. 西北工业集团有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 北京理工大学, 北京 100081)

摘 要: 针对侵彻多层硬目标弹药引信发展的现状及存在的问题, 分析归纳了侵彻引信穿层信号产生混叠现象的原因, 介绍了国内为解决穿层信号混叠采取的信息获取技术的最近发展, 提出了解决信号混叠问题的研究思路和建议。

关键词: 多层硬目标; 侵彻; 引信; 信号混叠

中图分类号: TJ43

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0576.2020.03.001

Acquisition and Processing Technology of Penetrating Signal of Penetrating Hard Target Fuze

ZHANG Mei-yun¹, SHI Geng-chen², LIU Qiang¹, ZHANG Li¹, QIU Qiang-qiang¹

(1. Northwest Industries Group Co., Ltd., Xi'an 710043, Shanxi China;

2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In view of the basic situation and the problems of the multi-layer hard target ammunition fuze, the reasons for the aliasing phenomenon of the interpenetrating signal are analyzed and summarized. The recent development of the fuze interlayer information acquisition technology is introduced. The ideas and solutions of the signal aliasing are put forward.

Key words: multi-layer hard target; penetration; fuze; signal aliasing

0 引言

目前, 世界各国军事力量日渐强大, 各种作战武器的作战能力以及防御体系也愈发完善。许多国家的重要军事目标都转移到地下, 并采取了坚固的防护措施。航母以及各种大型舰船的机库、

弹药库、动力舱等重要部位, 都位于多层甲板之下。研制能够有效摧毁各种具有多层、深层坚固防护的目标的武器装备, 成为各大军事强国武器装备竞相发展的重要方向。

为了准确摧毁各种具有多层、深层坚固防护的目标, 就要求引信能够准确感知弹体所处位置(侵彻深度、侵彻介质)、侵彻层数等信息, 并在合适的位置起爆, 以达到最佳的毁伤效果。有效控制弹体在合适的侵彻深度、确定的侵彻介质、确定的层中起爆, 有效打击摧毁掩体内部军事设施、地

收稿日期: 2020-06-24

作者简介: 张美云(1980—), 女, 大学本科, 研究员级高工, 主要从事侵彻引信技术研究。E-mail: happy_pig_2007@126.com

下防御工事、航母及各种大型舰船,已成为硬目标侵彻弹药引信必须要解决的关键技术。

在侵彻过程中,引信的起爆控制模式对弹体的毁伤效果起着决定性作用。根据打击目标的类型,引信的起爆控制模式主要有四种:计时控制、计层控制、计深控制和介质识别控制。

对于侵彻弹药引信来说,目标信息获取与识别技术是其最为关键的技术。引信目标信息获取与识别主要是检测弹体碰撞或侵彻目标过程中的运动信息或周围物理场的信息,将这些信息作为引信计时起爆控制的计时起点、计深控制的深度计算基础数据以及计层控制的依据,完成弹体侵彻深度的计算、穿过层数(含空穴)的识别以及介质的识别,从而实现最佳的起爆控制,对目标进行高效毁伤。

本文重点讨论侵彻多层硬目标弹药引信信息获取与目标识别的技术问题。

1 侵彻多层硬目标弹药引信穿层识别技术

对于硬目标侵彻弹药引信,要准确进行各种方式的起爆控制,首要的任务是实现弹体侵彻目标信息的获取。目前,国内外基本上都是采用高 g 值加速度传感器来获取侵彻过程中的弹体减加速度信息,利用弹体加速度的变化信息实现起爆控制。

弹体在碰靶及穿靶过程中,由于靶板对弹体的阻力作用,弹体会产生一个突变的减加速度,加速度峰值可达到数万 g 。穿过靶板后,在碰击下一层靶板前,弹体进行匀速飞行,加速度变化非常小,引信正是利用弹体穿靶过程中的这种变化来进行计层识别的。图 1 为侵彻 8 层钢筋混凝土的弹体加速度信号^[1]。侵彻过程中出现了 8 个脉冲信号,通过累计脉冲的数量,即可得到穿过的靶板的层数。

弹体侵彻靶板的过程非常复杂,由于弹体不是一个刚体,穿靶过程中以及穿靶后自由飞行期间,其加速度信号不是图 1 所示的理想脉冲信号。弹体上各种振动信号非常丰富,以至于产生信号粘连(混叠)的现象,严重时甚至会影响穿层的识

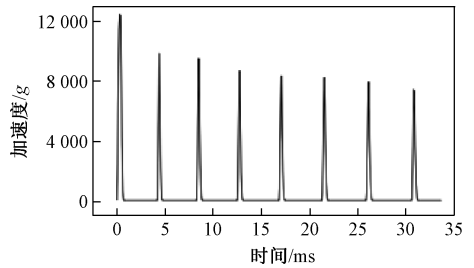
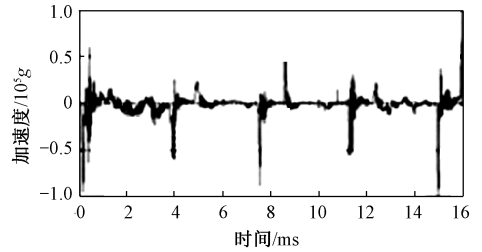
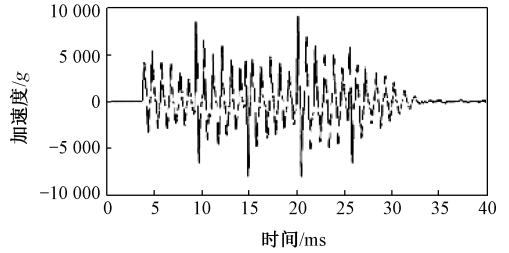


图 1 侵彻多层硬目标加速度曲线

别。图 2(a)和图 2(b)所示曲线分别为文献[2]和文献[3]在不同条件下实测得到的侵彻 5 层钢筋混凝土靶板的加速度曲线。



(a) 文献[2]实测曲线



(b) 文献[3]实测曲线

图 2 侵彻 5 层钢筋混凝土靶板加速度测试曲线

由图 2 可以看出,尽管侵彻的都是 5 层钢筋混凝土靶板,但文献[2]和文献[3]获得的弹体侵彻加速度曲线却差别很大。图 2(a)中可以很容易地对穿透 5 层靶板进行识别,图 2(b)所示的曲线出现了严重的振荡现象,识别穿层信息就比较困难了。

图 3 所示为侵彻 10 层混凝土的测试曲线^[4],加速度信号振动得更加剧烈,出现信号粘连(或称混叠)现象,穿层识别更加困难。

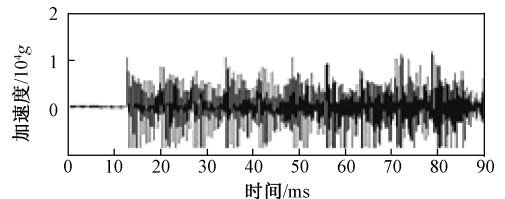


图 3 侵彻 10 层混凝土的加速度测试曲线

穿层信号的混叠严重影响了穿层识别的准确性,从混叠的穿层信号中得到准确有效的穿层信息,成为侵彻多层硬目标弹药引信必须要解决的关键技术。

2 穿层信号产生混叠现象的原因

分析穿层信号产生混叠的原因,是解决信号混叠问题的前提。科研人员从弹体振动、弹体与引信的连接方式、测试装置的安装方式及安装位置,以及传感器的特性等方面对信号混叠产生的影响进行了大量的研究,取得了一些成果。

2.1 弹体振动

科研人员对穿层信号产生混叠现象的原因进行了大量的分析研究,形成的共识是:弹体的振动是产生混叠现象的主要原因。

弹体在侵彻靶板过程中,受到靶板的阻力作用,承受了很大的冲击力,弹体产生很大的减加速度,该加速度与弹体结构力学性能无关,称为刚体加速度。引信传感器实际测得的加速度是由刚体加速度和弹体结构振动响应加速度组成的,弹体结构振动加速度与弹体结构的力学性能有关^[5]。

在侵彻多层目标过程中,弹体碰击靶板时会在弹体内产生应力波,应力波在弹体内传播,并随时间变化逐渐衰减。如果应力波衰减时间大于弹体在两层靶板之间的飞行时间,当弹体再次碰击靶板时,产生的应力波和前次碰靶产生的应力波相互叠加,会对弹体的结构响应产生影响,使侵彻加速度信号上混叠大量的高频振荡信号,层与层之间碰击的加速度信号会产生相互粘连的现象^[6]。由于应力波信号的来回反射叠加,在侵彻过程中,弹体结构振动信号甚至会强于弹体加速度信号^[3]。

图4为中国工程物理研究院电子工程研究所的游金川等^[7]在侵彻4层增强型混凝土厚靶试验中测试得到的加速度曲线。试验的弹体长度约1.4 m,首靶厚0.3 m,其余3层靶厚0.18 m,靶间距2.5 m。使用的传感器为压阻式加速度传感器,入靶初速345 m/s,弹体穿过4层靶后的速度为270 m/s。测试得到的加速度曲线出现了振荡现象。

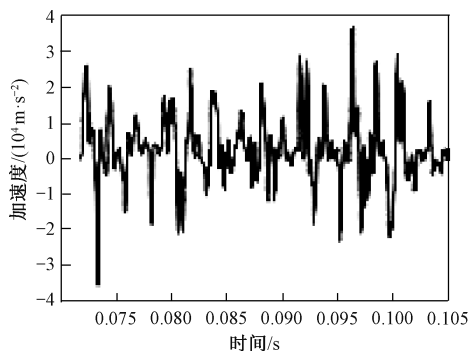


图4 侵彻4层混凝土靶的加速度测试曲线

西南科技大学的张浩^[8]通过仿真分析和坠落试验,对分段弹体侵彻铝靶板的动态响应特性与加速度特性进行了研究。弹体由弹尖、弹中、弹尾、端盖四部分组成,弹体长度301 mm,弹体直径50 mm。在坠落试验中,弹体由8 m高自由下落,以12.2 m/s的速度碰击靶体。图5为测试得到的冲击加速度信号。信号可分为两段,一段为首次碰撞的加速度信号,另一段为弹体回弹后再次碰撞的加速度信号。值得注意的是:试验弹长度只有301 mm,碰撞速度只有12.2 m/s,在这种情况下,加速度信号同样出现了剧烈的振荡现象。

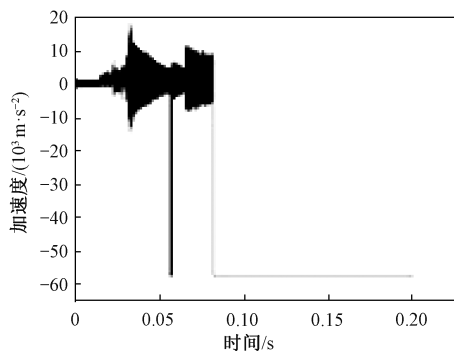


图5 文献[8]坠落试验加速度测试曲线

图6为中北大学刘立军等^[9]在弹体侵彻钢靶板试验中测试得到的加速度曲线。试验用弹体长度0.623 m,弹体重量26.35 kg,着靶速度398 m/s。值得注意的是:试验用传感器采取了环氧树脂胶灌封措施,使得传感器与弹体之间不再是刚性连接。从图6可以看出:第一个脉冲信号为弹体侵彻钢靶板的加速度信号,加速度曲线较光滑。按着靶速度398 m/s估算,弹体穿过靶板所需的时间约为1.57 ms,也就是在弹体穿过靶板后,穿层信号出现了振荡,而信号的脉宽与弹

体侵彻靶板产生的加速度脉宽差别不大。对于穿靶后出现的振荡,刘立军等认为主要是载荷突然卸掉(即弹体穿出靶板)引起的传感器的振动以及由应力波和弹体的结构响应引起的较高的频率成分。

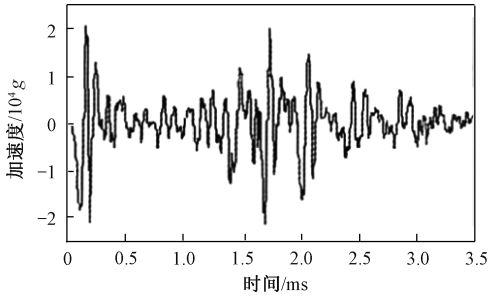


图 6 弹体侵彻钢靶板加速度曲线

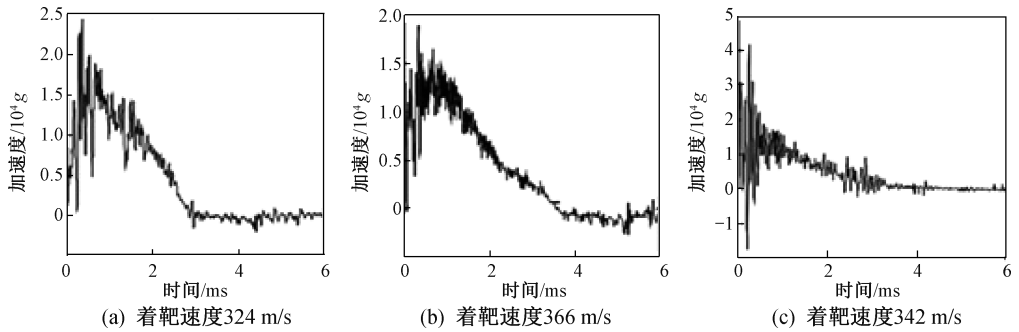


图 7 不同着靶速度的加速度测试曲线

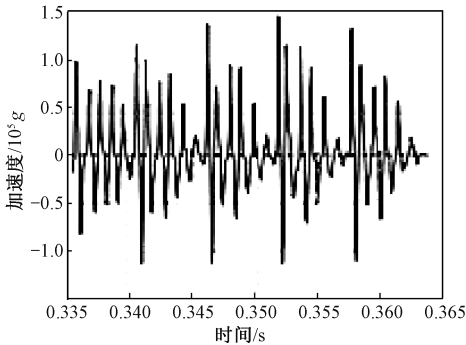


图 8 侵彻 5 层混凝土加速度测试曲线

游金川等^[11]还对侵彻两层钢靶板的加速度进行了仿真。弹体直径为 120 mm,总长 220 mm,头部为卵形,弹体材料为 45 号钢,靶板材料为 Q235。两层钢靶厚度均为 5 mm,靶间距为 0.8 m,弹体入靶速度为 170 m/s,出靶速度为 122 m/s。图 9 为侵彻加速度仿真曲线。

图 10 为侵彻速度为 667 m/s 时,侵彻 3 层靶板的加速度测试曲线^[11]。可以看到,侵彻加速度

北京理工大学的张冬梅^[10]利用轻气炮进行了侵彻混凝土靶板的侵彻加速度测试。试验中的弹体材料为 38CrMnSiA 合金钢,直径为 64 mm,长度为 400 mm,质量为 7.6 kg,弹体头部形状为卵形。混凝土靶板尺寸为 $\varphi 1.2 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$,靶板周边采用厚度为 2 mm 的钢板加固。图 7 为着靶速度为 (300~400) m/s 时测试得到的加速度曲线。可见,冲击结束后,测试曲线基本没有振荡现象。

图 8 为游金川等^[7]进行的高速侵彻 5 层混凝土靶板试验的加速度曲线。首靶厚 0.3 m,其余 4 靶厚 0.18 m,倾斜角为 70° ,靶间距为 3.5 m,入靶初速为 717 m/s,弹体穿过 5 层靶板后的速度为 660 m/s。穿靶后加速度信号出现了剧烈的振荡。

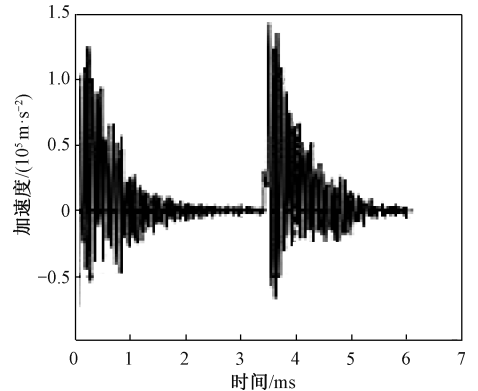


图 9 文献[11]侵彻加速度仿真曲线

曲线发生了严重的信号混叠现象,很难观察出穿层特征信息。

通过分析上述多位科研人员的研究成果可知,侵彻过程中及侵彻结束后自由飞行时(或受到冲击结束后),传感器检测到的加速度信号出现了振荡现象,严重时会产生多层侵彻信号的混叠。振荡现象剧烈时,碰靶及穿层过程中产生的加速

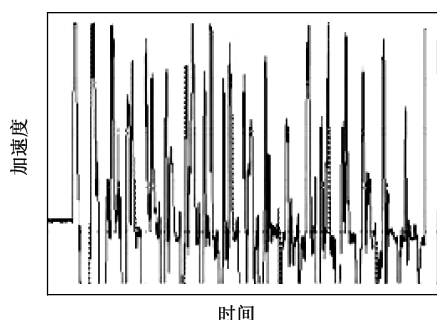


图10 侵彻3层靶板的加速度曲线示意图

度信号中混叠了大量高频信号。高频信号使得测试得到的加速度信号不清晰,甚至被高频信号淹没,导致难以对目标层进行准确识别,计层起爆控制功能无法正常实现。

关于信号混叠的产生原因,正如前面提到的,主要是由弹体的振动所引起的。文献[12]提出:弹体侵彻速度低于 500 m/s 时,目前的目标层识别算法基本可以对侵彻穿层信号进行识别;当弹体侵彻速度高于 600 m/s 时,在碰靶及穿层的加速度信号上将混叠大量的高频信号,使得层与层之间的加速度信号相互粘连。

西北工业大学的贾森清等^[13]对高速火箭弹侵彻多层混凝土靶板过程中,引信的加速度特性进行了仿真研究并得出结论。当弹体速度不大于 800 m/s 时,侵彻过程中各层之间的信号包络清晰,没有出现彼此粘连现象,即弹体穿透各层靶板时,其侵彻加速度曲线特征与弹体穿透单层靶板时的加速度曲线特征相同。文献[12]和文献[13]所提出的极限速度有比较大的差别,说明试验条件不同,测试结果有很大的不同。

图5和图6所示的试验中,图5的着靶速度只有 12.2 m/s,图6的着靶速度却有 398 m/s,两项试验都不是穿多层靶板试验,而是单次冲击试验,但其加速度测试曲线在冲击或穿靶后都出现了剧烈的振荡。可以推断,在这种情况下,如果是穿多层靶板试验,就有可能出现信号混叠的现象。图7的试验着靶速度为(300~400) m/s,冲击结束后曲线没有发生振荡的现象。但是,图4在着靶速度为 345 m/s 条件下测试得到的加速度曲线出现了振荡现象,其试验的弹长比较长,为 1.4 m。因此可以看出,穿靶过程中,弹体的加速度特性不仅与着靶速度有关,还与弹长有关。

北京理工大学的于润祥^[14]对弹体受冲击后

振动的衰减机理进行了研究,并对长弹体和短弹体的冲击振动情况进行了对比模拟测试。长弹体长度为 1 400 mm,短弹体长度为 700 mm,对两种弹体分别进行了两次短时间间隔的冲击,冲击间隔 5 ms。试验测试结果如图 11 所示。图中,纵坐标为加速度,横坐标为时间。可以看出,在第二次冲击到来之前,长弹体的振动基本上没有太大的衰减,而短弹体的振动有较大幅度的衰减,与第二次冲击在幅度上有很大的区别。这个试验也验证了弹体的长度对信号混叠有很大的影响这一结论。

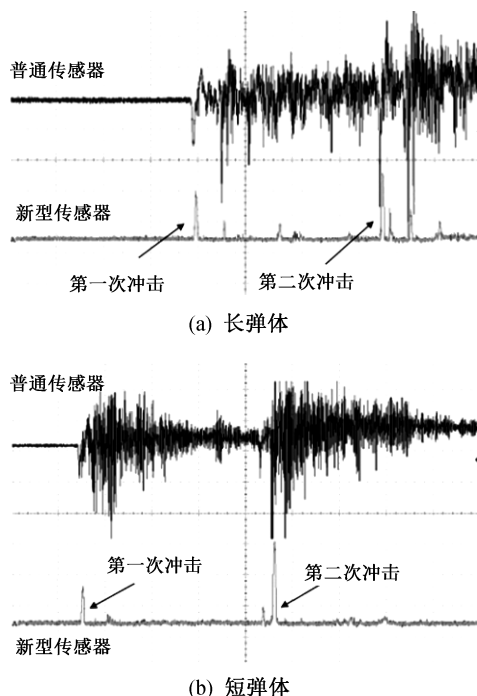


图11 对比冲击试验测试曲线

在分析信号产生混叠的原因时,科研人员将重点放在了弹体振动的影响上。实际上,除弹体振动外,弹体与引信的连接方式(简称弹引连接)引起的冲击响应,以及传感器的安装方式、传感器本身的响应特性都会对信号混叠产生影响。

2.2 弹引连接方式

科研人员已经注意到了弹体与引信连接方式对加速度信号的影响,也进行了一些研究。但由于弹引连接的冲击响应建模复杂,再考虑引信结构后会更加复杂。因此定性研究较多,进行定量建模以及试验验证的研究还比较少。

北京理工大学的张冬梅^[10]对弹引螺纹连接结构的刚度进行了研究,认为弹引螺纹连接结构

的刚度与螺纹的材料、螺纹旋合长度和螺距都有关。增大螺纹材料的弹性模量,增加螺纹旋合长度以及减小螺距均可以显著提高螺纹连接刚度,螺纹的连接刚度决定了引信整体的固有频率。穿靶时弹体的振动频率极其丰富,引信的固有频率如果与其中的某些频率相同或接近,就会导致引信传感器测得的加速度振动幅值偏大,甚至比弹体本身的刚体加速度还要大。

中国工程物理研究院电子工程研究所的刘军等^[15]对引信与弹体螺纹连接结构的加速度传递特性进行了仿真研究,得出的结论是:螺纹连接结构通过螺牙之间的弹性碰撞,对弹引连接的加速度传递起到一定的滤波作用,过滤掉了弹体的高频振动信号。

2.3 传感器的安装

中北大学的张会锁等^[16]对测试装置安装方式对侵彻加速度峰值的影响进行了对比研究。测试装置采用径向螺纹安装与法兰安装两种安装方式,进行了靶场验证试验。试验采用单层钢靶板,靶厚 30 mm。弹体直径 152 mm,弹体长度 630 mm,弹体重量 47.3 kg,弹体着靶速度 550 m/s。图 12 为螺纹安装和法兰安装两种方式分别测得的加速度曲线。验证试验得到的结论是:传感器测试装置与弹体的连接方式对所测得的加速度信号有一定的影响;测试装置与弹体连接刚性越小,弹体振动对测试结果的影响就越小,测得的加速度曲线越平滑,测试加速度越接近于刚体加速度;法兰安装测试方式,所测得的加速度幅值偏低,加速度持续时间也相对偏短。

从测试曲线上还可以看出:弹体穿透靶板过程中加速度曲线有振荡现象,穿靶后振荡现象不明显,加速度从出现到基本上恢复至初始状态历时大约 0.8 ms。为分析问题方便,假设穿靶过程中弹速不变,在 0.8 ms 的时间内,弹体飞行了 0.44 m。因为弹体的长度为 630 mm,也就是弹体还没有完全穿过靶板,加速度值就下降到很小了,再穿下一层靶板时基本上不会产生信号混叠现象。法兰安装和螺纹安装除去对加速度峰值有影响外,对弹体的振动影响不大。

空军工程设计研究局的韩国建等^[17]在大口径弹体侵彻加速度试验研究中,采用 320 mm 口

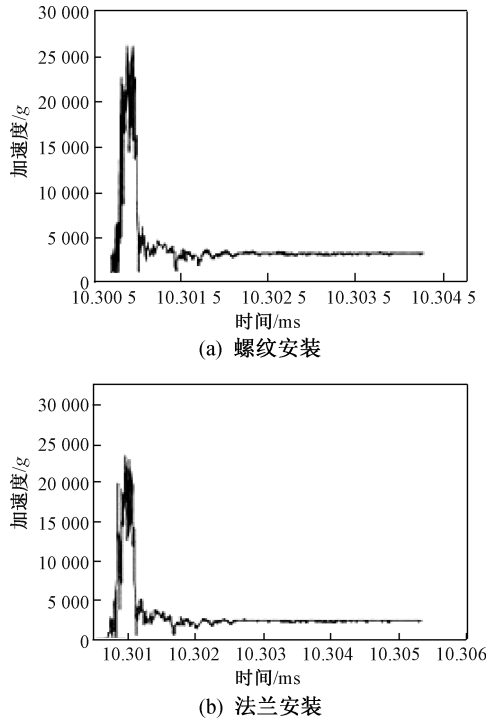


图 12 两种安装方式测得的加速度曲线

径平衡炮,发射直径 290 mm、重 250 kg 的半穿甲侵彻砂弹,分别对 1.8 m 厚的 C40 混凝土靶体、0.7 m 厚的 RPC120 靶体及 3.0 m 厚的块石固结体靶体进行了侵彻加速度测试。砂弹着靶速度约为 300 m/s。图 13 为其中一次测试的曲线。对于测试曲线的振荡现象,韩国建等认为:加速度曲线中的高频成分主要是弹体的振动响应,此外还可能包括传感器谐振及其他干扰信号等。

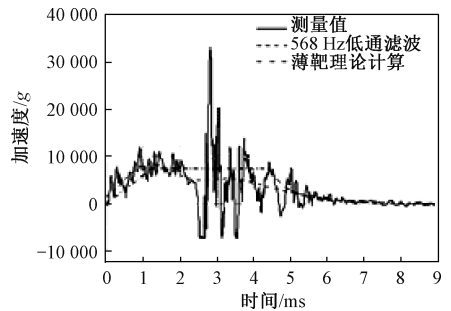


图 13 弹体侵彻 C40 混凝土靶加速度测试曲线

中北大学的赵小龙等^[18]对弹丸侵彻混凝土进行了加速度测试,分析后得出结论:由于碰靶时弹体内应力波的传播,造成在侵彻过程中弹体不同部位的加速度是不一样的;对于侵彻过程中弹体刚体加速度的测量,加速度测试装置在弹体内的安装位置和安装方式不会对其造成影响,这样

就可以通过滤波得到所需要的加速度信号;测试装置不同的安装方式,对加速度传感器测得的信号有很大的影响;加速度计应采用刚性连接,同时应提高测试装置的安装刚度。

中国工程物理研究院电子工程研究所的谢玉斌等^[19]在侵彻引信压阻式传感器信号调理技术研究中,对传感器频响带来的问题进行了分析。他们认为,弹体侵彻靶板的过程中所产生的冲击响应频谱的截止频率在 20 kHz 以下,而大多数高 g 值冲击测量值都含有超过 100 kHz 的频率成分,这些高频成分覆盖了传感器的谐振频率,侵彻过程中几乎会使所有的实际结构发生谐振。压阻式传感器谐振时,会使其输出产生非线性,导致测量误差。这是国内为数不多的几篇论述传感器频响对侵彻信号测试影响的文章之一,文章有助于对冲击后部分振动信号的幅值大于冲击信号幅值现象的理解。

北京航天长征飞行器研究所的王成华等^[5]经过研究提出:如果由于传感器结构设计和安装问题,或者弹体本身的结构尺寸较大或刚度较小,使弹体主要谐振频率与冲击载荷主要谐波分量的频率成分重叠,那么从数据中分离出刚体加速度将变得异常困难。

从上述的研究成果中可以了解到:穿层信号混叠现象的产生是弹体振动、弹引连接方式、传感器的安装方式及安装位置等因素,以及弹体着靶速度、靶板特性等综合影响的结果。

对于穿层信号的识别,还有一个值得注意的问题,即弹体加长以后,在穿靶过程中,弹体与靶板多次碰撞的问题。南京理工大学的李豪杰^[20]通过仿真研究发现,细长弹体斜侵彻混凝土靶板时,由于所受到的阻力作用方向与速度方向不在同一直线上,弹体在过靶时头部速度与尾部速度不一致,会出现弹体尾部再次与靶板碰击的现象,出现二次加速度信号,如图 14 所示。为了避免出现穿层误判,对于弹体比较长的情况,除去要考虑弹体振动问题,还要考虑穿层过程中弹体的二次碰撞问题。

3 穿层信号处理及存在问题

侵彻多层硬目标信号处理的目的是从传感器

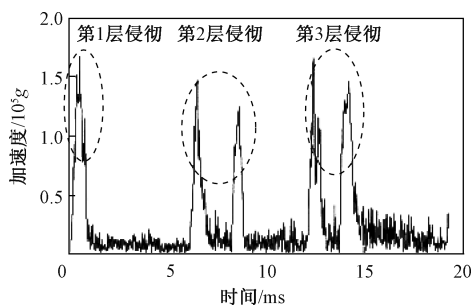


图 14 弹体二次碰撞加速度仿真曲线

输出信号中获取准确的穿层信息,以便实现计层功能。目前,国内外基本上都是采用加速度传感器来对穿层信息进行检测。测试高冲击的加速度传感器主要有压电式和压阻式两种,国内使用比较多的是压阻式加速度传感器。

如何将弹体的刚体冲击加速度与弹体的振动加速度区分开来,从混叠信号中得到准确有效的穿层信息(弹体的刚体冲击加速度),成为穿层信息处理技术重点要研究的问题。目前,传感器穿层信号处理的研究很多,但基本上都是基于穿层信号与振动信号频率不同开展研究的^[2,7,10,21-22]。振动信号的研究更多的是考虑弹体振动的影响,而考虑弹引连接方式、传感器特性,以及弹体着靶速度、靶板特性等综合影响的研究还比较少。随着弹体着靶速度的增加、弹长的增加,信号混叠现象更为复杂和严重,基于信号频率不同的信号处理方法的问题更加凸显。

王成华等^[5]给出了弹体振动信号频率的计算公式

$$f_i = \frac{ic_0}{2L}, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中: i 为振动阶数; c_0 为弹体材料声速,钢质弹体弹性区内 $c_0 \approx 5188$ m/s; L 为弹体长度。由弹体振动频率公式可以看出,振动频率除与弹体材料有关外,还和弹体长度有关。文献^[5]中,当弹体长度 $L = 0.5$ m 时,由公式确定的弹体纵向结构振动响应的频率在 5 kHz 以上,周期在 200 μ s 以下。通常弹体穿靶板产生的冲击信号的持续时间为 (200~300) μ s。为分析问题方便,将其视为半正弦信号,周期为 (400~600) μ s,对应频率为 (2.5~1.7) kHz,弹体的冲击加速度的频率低于弹体振动频率。采用低通滤波即可将混叠信号中弹体振动加速度的成分尽量衰减、弹体的冲击加

速度尽量保留,实现对穿层信息的准确识别和计层起爆控制。尤其是在弹体比较短、弹体着靶速度比较低时,弹体冲击加速度的频率与弹体振动频率相差比较大,滤波还是比较可行的方法。

但是,如果弹长增加到 1.5 m,则弹体的振动频率减小到 1.7 kHz,与冲击信号的频率相当。很显然,在这种情况下,再使用低通滤波的方法已经无法将弹体的刚体冲击加速度与弹体的振动加速度区分开来。如果弹体着靶速度进一步增加,则弹体的振动频率会进一步降低,当接近弹体的刚体冲击振动频率时,从原理上来讲,采用滤波的方法已经不可行了。

此外,采取一定的措施加快冲击后振动信号的衰减,也是一种减小信号混叠现象的技术途径。西安机电信息技术研究所的张海涛等^[23]通过选用阻尼系数与刚度系数比值较大、弹性模量相对较高的材料,对芯片级封装的压阻式加速度传感器进行二次封装,用来提高传感器振动模型的阻尼比,达到缩短传感器动态指标中的稳定信号建立时间、降低侵彻过程中加速度信号混叠现象的目的。试验结果表明,采用该措施的加速度传感器响应信号的衰减速率明显加快。本质上讲,二次封装是一种机械滤波的方法,不同之处在于该滤波是在传感器感受信号之前进行的。

与该思路相同,基于信号混叠主要是由于弹体撞击硬目标时产生的应力波在弹体内衰减过慢,与撞击下一层目标产生的应力波相互混叠引起的这一认识,西安机电信息技术研究所的董灵飞等^[24]提出了一种基于应力波衰减材料的目标层特征凸现方法。使用应力波衰减材料加快应力波在弹内传播时的衰减速度,使应力波在弹体内传播的时间小于弹体在两层靶板之间的飞行时间,从而避免应力波沿着弹体多次重复混叠,造成侵彻加速度的层间粘连。把硅橡胶+纳米 SiO₂ 颗粒缓冲材料灌封到引信壳体内侧制成缓冲层,加速应力波在弹体内的衰减,突出了侵彻的加速度特征。试验结果表明,同一发试验弹,采用缓冲措施测得的侵彻冲击加速度特征比没有采取该措施的侵彻冲击加速度特征明显。

这些方法的本质还是基于滤波原理,只是把获取信号后进行的滤波改为在获取信号前进行,并没有从根本上解决穿层信号混叠的问题。

4 穿层信息获取技术的发展

通过对侵彻多层硬目标弹药侵彻过程中,由加速度传感器获取的加速度信号发生混叠的现象及产生原因的分析,可以得到如下的结论:

a) 侵彻过程中,加速度信号发生混叠是由弹体的刚体冲击振动和本身的弹性振动、弹体与引信的连接方式、传感器的频响特性与安装方式,以及弹体着靶速度、弹体参数、靶板特性等综合影响的结果;

b) 随着弹体侵彻速度的增加和弹体长度的增加,弹体的刚体冲击频率和弹体本身的弹性振动频率会越来越接近,在这种情况下,基于频率差别获得弹体穿层的准确刚体加速度的信号处理方法不可行。

为解决穿层信号混叠的问题,在探索采用传统加速度传感器获取穿层信息的新的处理方法的同时,科研人员还进行了新原理穿层信号获取技术的探索。

与计行程起爆控制模式不同,获取与识别穿层信号的目的是要实现计层起爆控制。因此采用何种传感器获取穿层过程中的什么信息并不重要,重要的是能够获取真实反映穿层特征的信号,能够实现准确的穿层识别。实际上,在穿层过程中,除去弹体加速度的变化外,弹体的速度、位移等与力学有关的运动参数都会发生变化,弹体周围的其他非力学环境也会发生变化。从理论上讲,只要是在穿层过程中弹体能够感受到变化的物理量,都可以作为穿层识别的依据,如声场的变化、磁场的变化、温度的变化等。只是不是所有的物理量的测量在工程上都可以实现,探索在工程上可以实现测量的物理量,是解决穿层信号混叠现象的另一个技术途径。

国内的科研人员已经注意到这个问题,并开始了相关探索研究。北京理工大学的于润祥等^[25]研究了一种同时兼有开关特性与模拟量输出特性的压电加速度传感器。这种传感器已经不是传统意义上的加速度传感器,而是兼有加速度开关和加速度传感器的双重输出特性,可衰减高频振动信号。图 15 为该传感器与传统加速度传感器的对比测试曲线。图中,纵坐标为加速度,横

坐标为时间。可以看出,冲击后振动现象消失了。

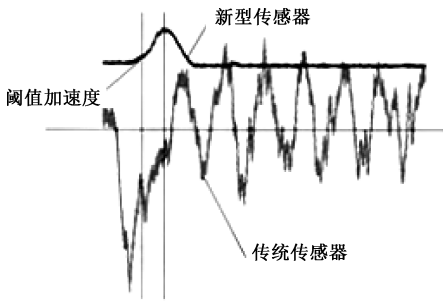


图 15 传感器对比测试曲线

北京理工大学的黄珏等^[26]研究了一种作用原理不同于传统的压电加速度传感器。它采用刚度远小于传统压电加速度等效刚度的弹簧,压电元件在加速度作用下,经历一段位移后撞击限位块,产生冲击信号。由于刚度较小,可以过滤掉弹体的高频振动,实现穿层信息的获取。

北京理工大学的苏怀维等^[27]研究了一种电涡流传感器,用以获取穿层信号。该传感器的输出与弹体穿靶过程中的位移变化相关。这是一个新的思路,初步研究结果表明,该传感器能够有效抑制冲击结束后的振动。这也为解决穿层过程中的信号混叠问题提供了新的技术途径。

北京理工大学的李长龙^[28]研究了高冲击载荷下钽电容电参数的变化规律,发现随着冲击加速度的加大,钽电容的电容量增大,同时漏电流也呈指数型升高。冲击消失后,钽电容电参数仍可恢复至冲击发生前的量级。钽电容在高冲击载荷下的参数变化成为影响侵彻引信工作可靠性的重要因素之一。清华大学的戴可人^[29]利用在经受高冲击时,电容器上的电压会发生突变这一现象,研究了一种电容器式侵彻多层硬目标传感器。这种传感器的特点是,只对高冲击敏感,对弹体的振动不敏感。电容作为引信的二次电源,在大冲击加速度作用下,输出会出现波动,影响引信工作的可靠性,因此科研人员采取了各种措施,避免电容大冲击加速度作用下出现波动现象。而戴可人恰恰利用了这种对二次电源来说要尽量避免的不利现象来实现穿层识别。电容器式传感器可对穿各种靶板的穿层信息进行提取。目前,这种传感器正在进一步深入研究中。

中北大学的黄用等^[30]对一种用于多层侵彻信号获取的双电容结构的电容式传感器进行了研

究。该传感器为变极距型电容传感器,由可动上极板和中间极板、固定下极板以及上下氧化锆陶瓷介电层构成。其工作原理为:侵彻过程中,在惯性力的作用下,电容器中的上极板和中间极板产生位移,上极板和中间极板与固定的下极板之间的间隙发生改变,导致电容发生变化。仿真结果表明,该传感器能很好地解决侵彻信号连粘的问题,实现对弹体侵彻计层信号的实时和高精度测量。该传感器的性能虽然还需进一步经过工程试验来验证,但这是一个很好的思路。

上述新原理、新结构的传感器仍是通过感受侵彻过程中弹体的力学环境变化来获取穿靶信息的。北京理工大学的张兵^[31]在2010年提出了一种不依赖于弹体侵彻过程力学环境变化的电涡流传感器。该传感器与北京理工大学的苏怀维提出的基于电涡流效应的位移传感器不同,是一种通过在弹壁四周安装多个线圈来敏感金属材料垂直于弹轴的电涡流变化的传感器。在弹体穿过金属靶板的过程中,由于电涡流效应,会使得线圈的阻抗、电感和品质因数(Q值)等参数发生变化,通过相应的信号处理电路即可获得穿层信息。由于弹体强度的要求,该方法在工程上实现起来还有一定问题,但其为穿层信息获取传感技术的研究开创了一个新的思路。

西安机电信息技术研究所的张雄星等^[32]对磁原理探测穿靶信息技术进行了研究,这是一种利用磁钢和磁传感器构成磁探测装置感知穿层信息的方法。其原理是:当弹体侵彻含有导磁性材料(如钢筋、钢甲板)的目标时,弹体周围的磁场会发生变化,引信内磁场的强度将随靶板与弹体相对位置的改变而产生显著变化;通过在引信内部某些敏感位置安装磁传感器检测引信内部的磁场变化,即可得到穿层信息。该方法不依赖力学环境,具有非接触、灵敏度高、不受目标速度和振动等因素影响的优点,为解决传统加速度传感器信号粘连问题提供了另一个新的技术途径。

上述基于力学和非力学原理来获取穿靶信号的新原理、新结构的侵彻传感器,尽管还有很多技术问题需要解决,工程上得到应用的还不多,但这些研究突破了传统的设计观念,开创了新的技术途径,可以解决信号混叠问题,有助于穿层信号的准确获取。

5 结 论

根据上述对侵彻信号混叠现象的分析,以及对新原理穿层信息探测技术发展情况的总结,作者建议从两个方面深入开展工作。

(1) 弹引结合(含传感器)冲击响应的研究方面

侵彻过程中加速度信号混叠现象的产生与诸多因素有关。由于建模复杂,以往的冲击响应研究更多是研究弹体的响应,与传感器实际感受到的响应相差较大,这给信号处理带来了很大的盲目性。通过模拟试验的方法得到弹体受到冲击、并经过一系列环节传递后,输出给传感器的信号,是对传感器获取的穿层信息进行处理的基础。传感器包括加速度传感器、速度传感器和位移传感器。

(2) 新原理、新结构穿层传感器的研究方面

获取穿层信号的目的是用于穿层识别。需要突破传统的通过高冲击加速度精确测试来实现穿层识别的思维模式,研究新原理、新结构的穿层传感器。清华大学和北京理工大学的研究思路完全不同于传统的加速度传感器测试思路,这种传感器在高冲击测试中是不会采用的,而在穿层测试中已经初步体现出它减少混叠现象的效果。由此建议要大胆创新,进一步大力开展新原理、新结构穿层传感器的研究。

参 考 文 献

[1] 程祥利, 赵慧, 李林川, 等. 基于机械振动理论的垂直侵彻弹靶作用模型[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(9): 093301.

[2] 靳鸿, 靳书云, 陈昌鑫, 等. 侵彻层数全时态相对波峰检测方法研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(23): 150-154.

[3] 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.

[4] 王杰, 李蓉, 黄慧东. 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 游金川, 李东杰, 黄莎玲, 等. 动能贯穿混凝土多层靶标加速度信号失真修复[J]. 中国测试, 2016, 42(10): 95-99.

[8] 张浩. 分段弹体侵彻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.

[9] 刘立军, 祖静, 范锦彪, 等. 动能子弹侵彻钢板加速度测试与分析[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(6): 15-17.

[10] 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.

[11] 游金川, 李东杰, 欧阳科, 等. 侵彻引信炸点精确控制技术[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(1): 114-118.

[12] 李蓉, 陈侃, 康兴国, 等. 硬目标侵彻引信炸点控制方法综述[J]. 探测与控制学报, 2010, 32(6): 1-4.

[13] 贾森清, 王富生, 虞跨海, 等. 高速火箭弹侵彻过程引信过载特性研究[J]. 强度与环境, 2010, 43(3): 24-31.

[14] 于润祥. 侵彻多层硬目标传感与识别关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.

[15] 刘军, 程祥利. 侵彻引信螺纹连接结构过载传递特性研究[C]// 中国兵工学会第二十一届引信学术年会论文集, 惠州. [出版地不详]: 中国兵工学会引信专业委员会, 2019: 457-462.

[16] 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.

[17] 韩国建, 陈士, 边振江, 等. 大口径弹体侵彻过载试验研究[J]. 防护工程, 2013, 35(2): 5-10.

[18] 赵小龙, 马铁华, 徐鹏, 等. 弹体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.

[19] 谢玉斌, 阮朝阳. 侵彻引信压阻传感器的信号调理技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(6): 957-960.

[20] 李豪杰, 胡怀春. 基于侵彻过载数值仿真的引信计层起爆控制方法[J]. 南京理工大学学报, 2016, 40(6): 715-719.

[21] 智丹, 石云波, 陈艳香, 等. 弹体侵彻中加速度计的机械滤波仿真研究[J]. 电子器件, 2015, 38(6): 1401-1405.