DOI：10.11883/1001-1455(2015)05-0758-05

基于 Choi-Williams 分布的侵彻层数识别方法*

王　燕[1,2]，马铁华[1,2]，徐　鹏[1]，范锦彪[1,2]
(1. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室，山西　太原　030051；
2. 中北大学计算机与控制工程学院，山西　太原　030051)

摘要：针对侵彻多层硬目标过程中实测加速度信号的振荡叠加，以及可能引起的层数误判问题，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，提出了以侵彻过程加速度信号的能量分布为依据的层数识别方法。侵彻 8 层等间距混凝土靶板的实测数据处理结果表明，该方法可快速准确实现层数识别，解决了低通滤波方法无法获取准确层数信息的问题，为实时控制起爆位置提供依据。

关键词：爆炸力学；层数识别；Choi-Williams 分布；多层硬目标；侵彻；加速度
中图分类号：O382　　**国标学科代码**：1303530　　**文献标志码**：A

针对桥梁、多层建筑物、地下工事等多层硬目标，精确地命中并控制起爆位置，是有效发挥侵彻武器的威力、大幅提高作战效能的必要手段。基于计层、定深和介质识别技术的智能引信是侵彻武器精确控制炸点的关键技术。如何处理侵彻过程的加速度信号对层数识别的准确性至关重要。对于侵彻加速度信号，目前常采用低通滤波的方法获得刚体加速度[1-6]。通过侵彻过程加速度的变化情况实现对目标的探测与识别[7-8]。郝慧艳等[9]提出采用提升小波和中值滤波相结合的方法对加速度信号进行预处理，通过提取信号的幅值陡变的特征来检测信号，从而快速获得侵彻混凝土靶板层数信息。欧阳科等[10]提出了一种基于加速度传感器和 MEMS 开关信号融合的计层算法。该算法通过对加速度传感器和开关信号分别与不同窗函数在时域中的卷积加权和得到的复合信号，来判定弹丸侵彻过程中的分层特性。为避开实测曲线上叠加的大量振动信号的影响，不增加其他信息即可实现准确计层。本文中采用 Choi-Williams 时频分析法，研究侵彻过程弹体主轴方向加速度信号的能量分布特征，利用信号在时频平面上的能量聚集特性，提出以加速度信号的能量分布为依据的层数识别方法，并用实测数据验证。

1　多层硬目标侵彻实验方案

实验方案如图 1 所示。弹体侵彻 8 层均质混凝土靶板，介质抗压强度为 45 MPa，第 1 层靶板尺寸为3 m×3 m×0.16 m，第 2～8 层靶板尺寸均为 3 m×3 m×0.08 m，靶间距 1.2 m，炮口与第 1 层靶板

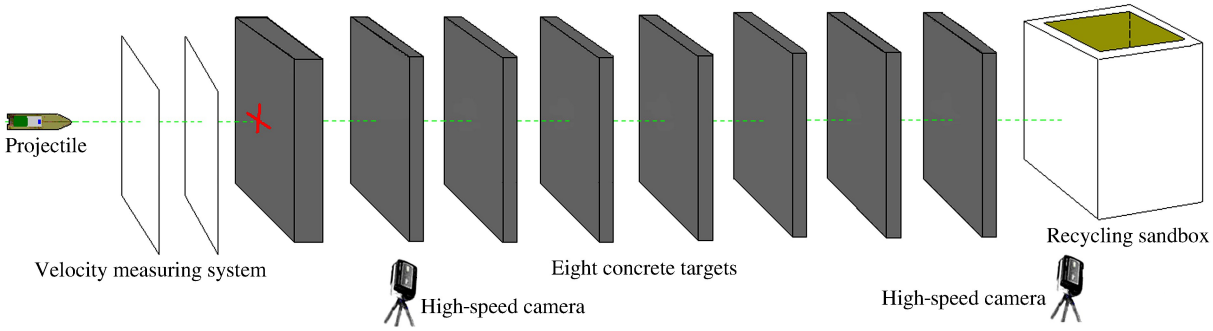

图 1　弹体侵彻多层靶板示意图

Fig. 1　Diagram of a projectile penetrating multi-layer hard targets

* 收稿日期：2014-03-21；修回日期：2014-10-15
基金项目：国家自然科学基金项目(51275488)
第一作者：王　燕(1979—　)，女，博士研究生，讲师，wangyan_zkk@163.com。

的距离为 10 m。长 630 mm、质量为 23 kg、直径为 100 mm 的实验弹以约 700 m/s 的初速正侵彻靶板。实验前，通过支撑筒将三轴加速度测试仪安装于弹体内，并使测试仪处于待触发工作状态。弹体侵彻目标过程中，沿弹体主轴方向加速度值达到预设的触发值时，测试仪自动触发，并记录下触发点前后的加速度信号。利用线圈靶测量实验弹着靶速度，用高速摄像机记录实验弹在飞行过程、侵彻过程中的姿态变化，并计算着靶速度及穿靶后的余速。实验后，通过沙箱回收实验弹，将测试仪从弹体中取出，通过 USB 接口与计算机通信，读取测试仪中存储的数据。

2　侵彻多层硬目标过程加速度信号的特征分析

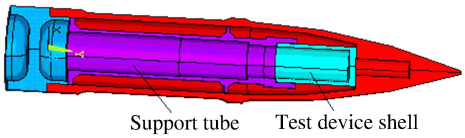

图 2　弹体有限元模型

Fig. 2　The finite element model for the projectile

高速侵彻目标时，弹体的高阶模态被激发，在弹体中产生弹塑性应力波，由此导致刚体加速度信号上叠加了大量振动信号。理论上，刚体加速度脉冲信号与侵靶过程是对应的，可作为侵彻武器的层数识别信息。从实测数据中提取刚体加速度的常用方法是对数据进行低通滤波，把弹体结构等高频振动响应滤掉。

利用 ANSYS 软件建立了测试弹的有限元模型，建模时弹体、测试装置以及支撑筒采用布尔运算的粘接处理，保证结构的整体性，如图 2 所示。因难以准确模拟弹体侵彻过程所受的约束，进行模态分析时将弹体设置为空间自由体，模拟得到弹体的各阶模态（振型和频率），再结合实测数据频谱选择滤波截止频率[3]。提取前 20 阶模态，其中前 6 阶（由于对称性）为刚体运动，理论上频率应为零，从第 7 阶模态开始为弹性振动，第 8 阶弹体外壳的轴向振动和第 13 阶弹体外壳、铝支撑筒、测试装置外壳的轴向振动对实测加速度影响较大，分别对应的频率是 3.6 和 5.2 kHz。实测轴向振动信号不仅是弹体的刚体加速度，还包含弹体结构和测试装置及其安装结构的响应信号。因此，需要以轴向振动信号的相应频率作为截止频率进行滤波。弹体侵彻时存在边界约束，模态分析的轴向频率略高于实测数据的对应频率。

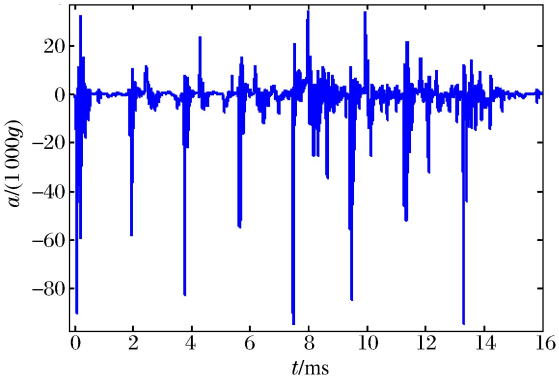

图 3　轴向加速度实测曲线

Fig. 3　Measured axial acceleration-time history

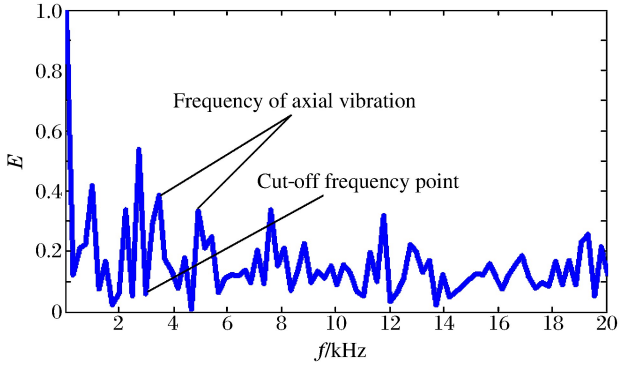

图 4　加速度数据频谱图

Fig. 4　Frequency spectrum of acceleration

侵彻 8 层均质混凝土靶板过程沿弹体主轴方向的实测加速度数据如图 3 所示。从图中可以看出，整个侵彻过程约 14.7 ms，贯穿第 1 层靶板时信号主脉宽约 120 μs，最大加速度峰值为 90 280g，贯穿第 2～8 层靶板时信号主脉宽均约 80 μs。图 4 是图 3 所示曲线的频谱，3.45 和 4.98 kHz 分别与模态分析中的 2 个轴向振动频率对应。实测信号的轴向振动频带宽 3～4.12 kHz，为有效滤掉非刚体加速度信号，将数据的滤波截止频率选在轴向振动频带起点处，对应的频率为 3 kHz。

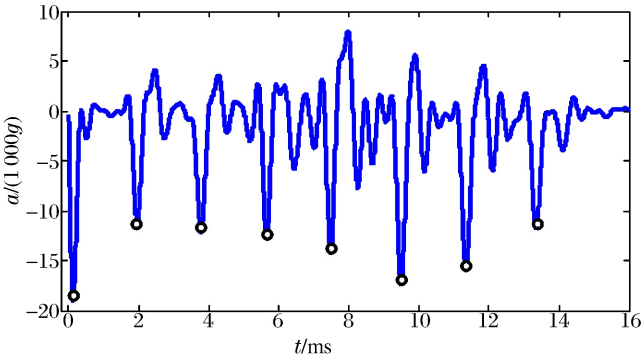

图 5　加速度滤波后曲线（3 kHz）

Fig. 5　Acceleration data filtered with a digital low-pass filter

采用 3 kHz 滤波截止频率对实测加速度数据进行低通滤波，如图 5 所示。随着侵彻层数的增加，刚体加速度和振动信号的频率范围出现交叉，导致滤波后的曲线中仍含有振动信号，且峰值可能和刚体加速度峰值接近，甚至更大。第 2 层穿靶加速度的最大峰值为 11 480g，曲线中振动信号的最大峰值为 7 655g，因此通过设置阈值来识别层数容易产生层数的误判。

3 侵彻多层硬目标的层数识别方法

3.1 侵彻加速度信号的二次型时频分析

侵彻过程的加速度信号具有持续时间短、突变等特点，对其能量分布的表示，希望贯穿每层靶板时的加速度信号既有局部能量的区域，还具有时频分布聚集性，更利于层数的识别。二次型时频分布是一种精确的时频分析方法，能够准确地将信号在时频平面的能量分布表现出来。L. Cohen 发现众多的二次型时频分布只是 Wigner-Ville 分布的变形[11]，可统一表示为：

$$C_x(t,f)=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}z\left(u+\frac{\tau}{2}\right)z^{*}\left(u-\frac{\tau}{2}\right)\varphi(\tau,\nu)\mathrm{e}^{-2\pi\mathrm{j}(t\nu+\tau f-u\nu)}\,\mathrm{d}u\mathrm{d}\nu\,\mathrm{d}\tau \tag{1}$$

式中：ν 为频率延迟，τ 为时间延迟；$\varphi(\tau,\nu)$为核函数，核函数不仅决定了分布，还决定了分布的性质。

当 $\varphi(\tau,\nu)=1$ 时，式(1)表达的时频分布就是 Wigner-Ville 分布(WVD)。WVD 具有比其他时频分布更好的时频集聚性，但多分量的 WVD 存在严重的交叉项。为了减少交叉项，在应用中 WVD 通过设计核函数来实现交叉项的抑制。当 $\varphi(\tau,\nu)=\exp(-\nu^2\tau^2/\sigma)$ 时，其相应的时频分布称为 Choi-Williams 分布(CWD)。这里 σ 为衰减系数，σ 的取值一般在 0.1～10 之间。改变 σ 的值可以改变对信号交叉项的抑制程度。σ 越大，自项的分辨率越高；σ 越小，对交叉项的抑制越大。图 6 是实测加速度信号 2 种时频分布对应的时频谱图。WVD 的时频谱如图 6(a)所示，可以看出 WVD 的能量分布杂乱，这主要是因为出现了大量的交叉项，有些交叉项的幅值甚至超过了真正信号的幅值，严重干扰了信号能量的正确分布。CWD 的时频谱如图 6(b)所示，CWD 分布能够较好抑制交叉项干扰，并保持较高的时频聚集性，从图中可以看到 8 次穿靶时侵彻加速度信号的能量集中，基本可分辨出信号侵彻 8 层混凝土靶板的信息。

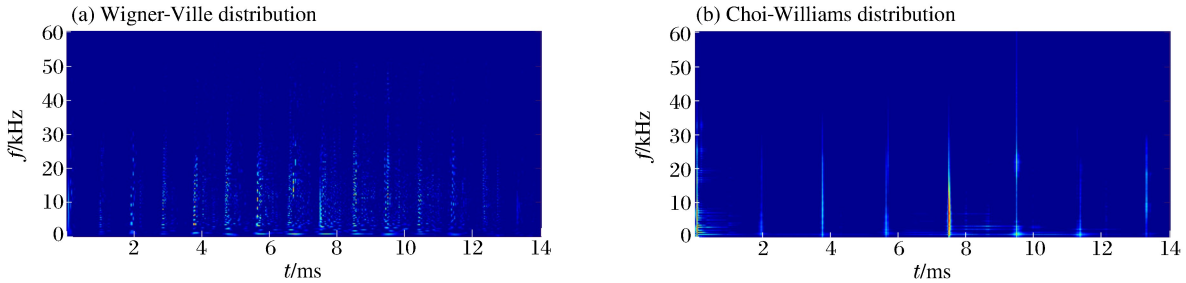

图 6 时频谱分析对比

Fig. 6 Comparison of time-frequency analysis methods

3.2 基于 Choi-Williams 分布的层数识别方法

采用 CWD 时频分析方法，衰减系数 σ 取值为 1，对侵彻加速度信号作进一步分析。图 7 是对实测加速度信号进行 CWD 时频变换的能量分布三维图，得到不同时间、不同频率处加速度信号的能量分布。从图 7 可以看出：(1)加速度信号的能量最大值出现在侵彻第 1 层靶板时，这是由于此刻的着靶速度最大，且第 1 层靶板厚度是其余靶的 2 倍。以此能量峰值作为基准，对能量作归一化处理。(2)从侵彻第 2 层靶开始能量有递增的趋势。这是由于弹体头部变形使得穿靶阻力逐渐增大。(3)侵彻第 5 层靶板能量开始大幅增加，在侵彻第 6 层靶时能量达到峰值，之后逐渐减小。这是由于弹体侵彻靶板时发生了偏转，使得穿靶阻力明显增大。从图 8 主轴 x 方向的实测曲线可以看出，7.45 ms 后加速度信号叠加更多的振动成分。对比图 8 中径向 y、z 方向的加速度幅值增大幅度，进一步验证了弹体从侵彻第 5 层靶时发生偏转这一情况。(4)图 7 中构成能量的一部分来自于侵彻加速度信号上叠加的振动信号。

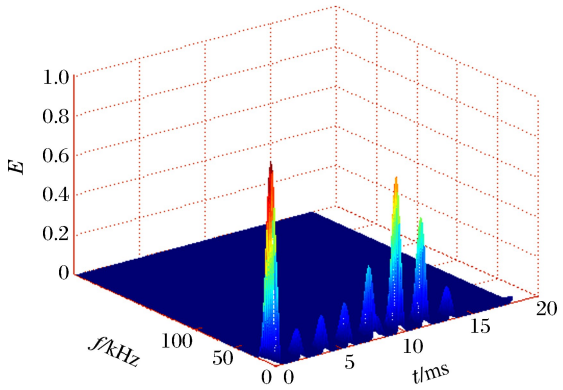

图 7　加速度信号的 CWD 能量分布三维图

Fig. 7　Three-dimensional diagram for CWD energy distribution of acceleration signal

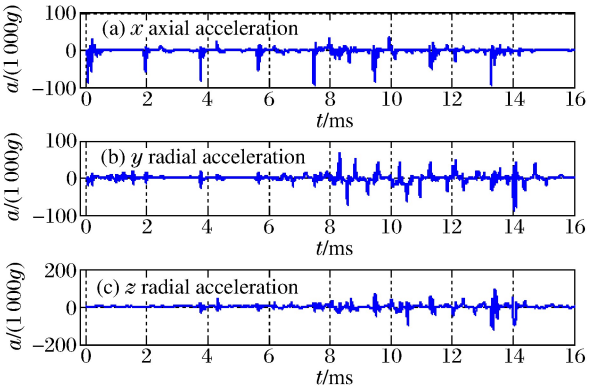

图 8　三轴加速度实测曲线

Fig. 8　Measured triaxial acceleration-time histories

为更清楚地研究信号特性，将三维谱图转换为二维谱图，如图 9 所示。从图 9 可以看出，穿靶信号中叠加振动信号会使能量增大，但不影响层数识别。与图 5 中 3 kHz 滤波后加速度数据对比看出，穿靶时间一致，峰值的变化趋势相同。而 2 次穿靶过程中的振动信号所对应的能量较小，因此加速度信号的能量信息更适合作为层数识别信息，可以避开振动信号的影响。通过自动判读方法，从时间-能量分布图中得到准确的侵彻靶板层数信息。

用时频分析法得到弹体主轴方向加速度信号的能量分布，再通过自动判读方法实现层数识别，过程为：(1)用时频分析方法进行处理，得到加速度信号包含的能量信息；(2)设置能量阈值，去除较小能量信号，能量阈值选择 0.05；(3)对阈值处理后的数据寻找峰值点，即可得到层数信息。

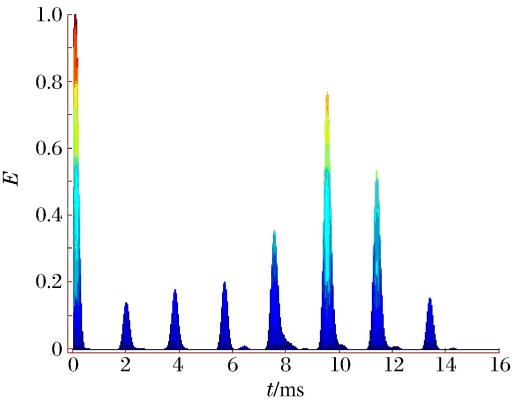

图 9　时间-能量二维分布图

Fig. 9　Two-dimensional distribution of time-energy spectrum

4　结　论

(1)侵彻多层靶板过程中，刚体加速度信号和振动信号的频率交叉，所包含的振动信号的峰值可能接近或大于刚体加速度峰值，采用低通滤波的方法，无法选择合适的阈值得到真实的刚体加速度信息，难以获取准确的计层信息。(2)通过 WVD 和 CWD 时频分布的对比可知，CWD 能够有效抑制交叉项干扰，并保持较高的时频聚集性，适合用于侵彻加速度信号的分析。(3)侵彻过程实测加速度信号中不可避免包含各种振动信号，采用时频分析方法得到加速度信号的能量分布信息。穿靶时的振动信号能量也作为穿靶能量的一部分，这样恰能消除振动信号对识别算法的影响。因此，以侵彻过程加速度信号的能量为依据可快速准确地实现层数识别，为实时控制炸点起爆提供依据。

参考文献：

[1]　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)：1-9.
Fan Jin-biao，Zu Jing，Xu Peng，et al. Impact deceleration signal processing for concrete target penetration[J]. Journal of Detection & Control，2012，34(4)：1-9.

[2]　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 Peng，Zu Jing，Fan Jin-biao. Research development of high g penetration acceleration test and its correlative technology[J]. Acta Armamentarii，2011，32(6)：739-745.

[3]　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 Jia-rong, Liu Rui-chao, He Xiang, et al. A new data processing technique for measured penetration overloads[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(5):555-560.

[4] 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 Cheng-hua, Chen Pei-yin, Xu Xiao-cheng. Filtering of penetration deceleration data and determining of penetration deceleration on the rigid-body[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(5):416-419.

[5] Paul M B, James D C, Bruce L K. Investigation on the response of segmented concrete targets to projectile impacts [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009,36(7):926-939.

[6] Franco R J, Platzbecker M R. Miniature penetrator (MIN-PEN) acceleration recorder development test[R]. USA: Sandia National Laboratories, 1998.

[7] 侯超,刘勇涛,杨旭.侵彻硬目标武器及其智能引信关键技术研究[J].航空兵器,2012(2):44-48.
Hou Chao, Liu Yong-tao, Yang Xu. Penetrating hard target weapons and the key technology research of its smart fuse[J]. Aero Weaponry, 2012(2):44-48.

[8] 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.
Li Rong, Chen Kan, Kang Xing-guo, et al. Hard target smart fuze detonating control summary[J]. Journal of Detection & Control, 2010,32(6):1-4.

[9] 郝慧艳,李晓峰,刘明杰.侵彻混凝土靶板层数快速算法[J].火力与指挥控制,2013,38(3):167-170.
Hao Hui-yan, Li Xiao-feng, Liu Ming-jie. Fast algorithm research of penetration concrete target layers[J]. Fire Control & Command Control, 2013,38(3):167-170.

[10] 欧阳科,杨永辉,阮朝阳.基于加速度传感器和开关信号融合的计层算法[J].探测与控制学报,2012,32(2):7-10.
Ou-yang Ke, Yang Yong-hui, Ruan Zhao-yang. A layer count algorithm based on fusion of acceleration sensor and MEMS impact switch signals[J]. Journal of Detection &Control, 2012,32(2):7-10.

[11] 马瑞恒,时党勇.爆破振动信号的时频分析[J].振动与冲击,2005,24(4):92-95.
Ma Rui-heng, Shi Dang-yong. Time-frequency analysis of blasting vibration signal[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005,24(4):92-95.

Identification of penetration layers based on Choi-Williams distribution

Wang Yan[1,2], Ma Tie-hua[1,2], Xu Peng[1], Fan Jin-biao[1,2]

(1. *Ministry of Education Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi, China*;
2. *School of Computer and Control Engineering, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi, China*)

Abstract: There is an oscillation signal superposition on measured acceleration signals during the process of penetrating multilayer hard targets, which can cause a misjudgement of the target layer number. To overcome the above problem, a time-frequency analysis method was adopted to study the Choi-Williams energy distribution features of the acceleration signals in the directions of projectile main axes. Based on the energy distribution of the acceleration signals during penetration process, a target layer identification method was put forward. The acceleration data were processed, and these data were measured from the penetration of eight concrete slabs with the same thickness by a projectile. The processed results show that the layer identification method put forward can identify the layer number rapidly and accurately. The problem, that the low-pass filtering method can not acquire the accurate layer number, was solved. So the layer identification method put forward can provide basis for the real-time control of initiation positions.

Key words: mechanics of explosion; layer identification; Choi-Williams distribution; multilayer hard target; penetration; acceleration

(责任编辑 张凌云)