文章编号：1001-1455(2014)03-0347-07

弹丸侵彻混凝土加速度信号测试及分析*

赵小龙[1,2]，马铁华[1,2]，徐 鹏[1,2]，范锦彪[1,2]
(1. 中北大学电子测试技术重点实验室，山西 太原 030051；
2. 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)

摘要：针对弹丸侵彻混凝土加速度信息获取及实测信号失效问题，采用弹载存储测试系统进行了实验，并基于 LS-DYNA 进行了高速碰撞过程的数值模拟，经处理后的数据曲线与实测侵深符合较好，数值模拟计算结果与实验结果较吻合。通过实验分析与理论推导相结合的方式对应力波、测试装置的基础运动和安装结构刚度、加速度计安装方式等部分影响因素进行了实测加速度信号的影响分析，分析结果对高 g 值冲击测试问题具有一定的参考价值。

关键词：爆炸力学；加速度；弹载存储测试系统；侵彻；LS-DYNA
中图分类号：O385 **国标学科代码**：13035 **文献标志码**：A

为了攻击机库、高级指挥要地等各种不同形式的综合防护目标，“智能型”的钻地弹药相继出现[1]。弹体高速侵彻硬目标的加速度-时间历程曲线是一个非常重要的测试量，对于考核钻地弹的结构强度，检验弹体设计合理性，考核战斗部装药的安定性，研究弹载电子仪器的存活性、引信的工作可靠性，评价防护工事的抗侵彻效果至关重要。在现有的侵彻加速度测试技术中，弹载存储测试技术较先进[2-4]，它能记录膛内、飞行穿靶几个过程的实时加速度。国外对于硬目标侵彻过程动态参数测试起步较早，瑞士的武器系统和弹药实验中心设计了高 g 值弹道飞行数据记录器，质量较轻(3.58 kg)，安装了 3 个 6×10^4g 量程的 Endevco_7270A 压阻加速度计，成功测得最大加速度(9×10^4g)。国内中北大学电子测试技术国防科技重点实验室通过选购 B&K 公司的 8309 或兵器 204 所 988 加速度计，并采用泡沫铝缓冲保护，电路模块质量控制在 $150g$ 以内，测试范围最高可达 2×10^5g。经过多年的研究，高 g 值侵彻加速度现场测试技术已经基本解决了低速和中速条件下(800 m/s 以下) “测不着”的问题，正朝着提高高速侵彻条件下数据捕获率和进一步解决“测不准”问题的方向发展。弹载测试装置的工作环境恶劣，侵彻原型实验需要耗费大量资源，进行必要的数值模拟分析是对侵彻实验的必要补充。对于加速度信号测试的影响分析有利于提高数据捕获率，能够进一步优化弹载测试装置的设计。

1 测试原理及实验

加速度测试系统原理图如图 1 所示，由 4 部分组成：加速度传感器、存储记录部分、数据接口、数据处理软件。测试装置如图 2 所示。

实验时，将加速度过载测试仪与配重块放入子弹中，用压筒的一端压紧测试仪下端盖的上部平面，另一端加配合垫片，并用尾翼组合

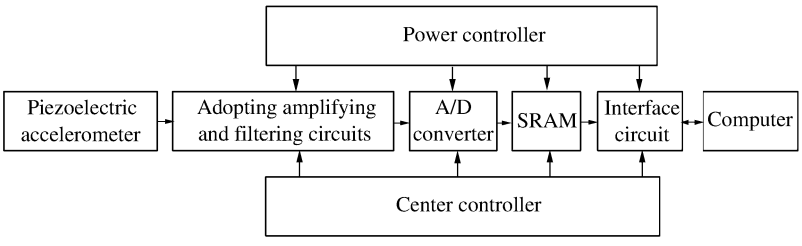


图 1 加速度测试系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of acceleration testing system

* **收稿日期**：2013-04-01；**修回日期**：2013-06-06
基金项目：武器装备预研基金项目(9140C1204050609)
作者简介：赵小龙(1986—)，男，博士。

件拧紧到位，保证加速度过载测试仪与弹体内腔前部平面完全贴和，尽可能保证刚性连接。

弹丸侵彻混凝土靶板后靶板正面破坏情况如图 3 所示，可以看到靶体表面成坑、靶体表面的径向和环向裂纹破坏现象，证明弹体在撞击靶体时具有良好的姿态。图 4 是弹体侵彻混凝土靶过程的加速度曲线图。图 5 为以 3 kHz 截止频率滤波后的加速度曲线图，峰值加速度为 $4.133\times10^4 g$。对侵彻加速度曲线二次积分得到侵彻深度曲线(见图 6)，积分位移为 0.562 m，与实测侵深 0.600 m 相差 6.3%。



图 2 加速度测试装置

Fig. 2 Acceleration test equipment



图 3 弹丸侵彻混凝土靶板的破坏情况

Fig. 3 Damage of concrete target penetrated by projectile

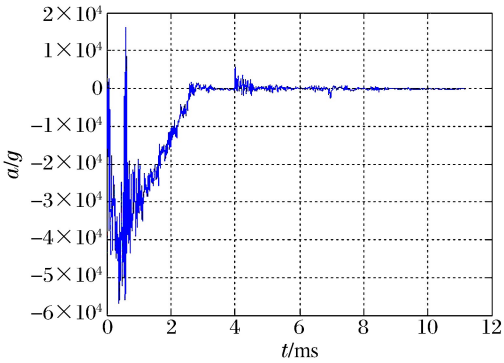


图 4 侵彻过程的加速度曲线

Fig. 4 Acceleration curve during penetration

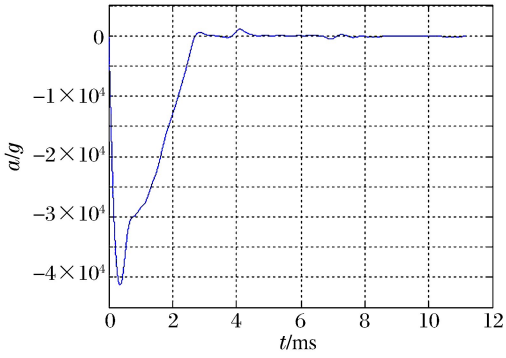


图 5 3 kHz 滤波后的加速度曲线

Fig. 5 Acceleration curve after 3 kHz filter

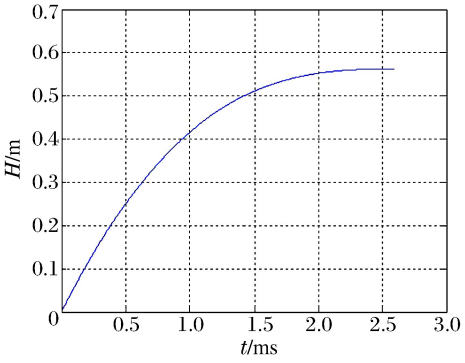


图 6 侵彻深度曲线

Fig. 6 Penetration depth curve

2 弹体侵彻混凝土靶过程的数值模拟

在适量的实验基础上基于 LS-DYNA 进行数值模拟，是对侵彻实验的重要补充[5-6]。

弹丸壳体是按照实验弹尺寸建立的，内部结构作了较大的简化，将测试仪和套筒处理成一等重的质量块装在结构前部，结构后部则同样用一等重的质量块来代替套筒和弹尾翼。由于侵彻计算中主要关心壳体和测试仪的刚体加速度以及侵彻最大行程，不关心各结构的受力情况，因此以上简化具有一定的合理性。为了模拟半无限靶，将实验用的混凝土靶板半径取足够大，除了对称面和自由面外，模型的边界条件是将靶板的周身加以非反射边界条件(应力波通过此边界传播而不产生反射效应)以模拟实际目标的边界效应。测试仪视为各向同性弹塑性模型，本构模型(强度模型)采用 Von Mises 准则。弹内尾部的套筒可等同为一个弹性体，材料模型采用弹性模型即 MAT_ELASTIC。混凝土结构采用 JHC 模型，该模型能够很好地描述高应变率条件下混凝土的响应问题。考虑到弹丸垂直侵彻靶板为对称问题，在进行有限元分析时选取 1/2 实际模型建立计算模型。有限元模型网格如图 7 所示。

图 8 给出了弹丸侵彻靶板的数值模拟结果。从计算结果来看，混凝土靶表面成坑漏斗形状、侵彻过程转弯等同实验现象较吻合。图 9 为弹体轴向刚体加速度随时间的变化曲线，与图 5 相比，幅值与持续时间基本相同，与实验结果较接近，表明了数值模型建立及参数选择的正确性。

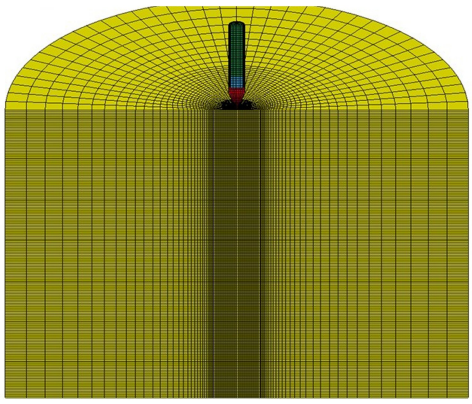


图 7 有限元网格划分图

Fig. 7 Finite element mesh for generation

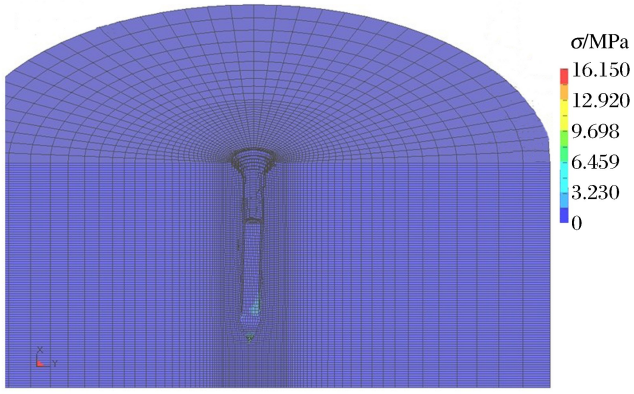


图 8 $t=2\ 500\ \mu s$ 侵彻过程的 Von-Mises 应力云图

Fig. 8 Von-Mises stress nephogram of penetration process

由于应力波的传播，弹体的不同部位在侵彻过程中的加速度是不一样的，应力波的波前是加速度的峰值之处[7]，但波前过后峰值很快下降，所以峰值处的脉宽一般很窄。图 10 为弹壳体 A、测试仪 B 及套筒 C 的侵彻加速度。通过对加速度信号的滤波，将高频部分滤除，最后只剩下各部分的刚体加速度，而此刚体加速度各部分相同，如图 11 所示。

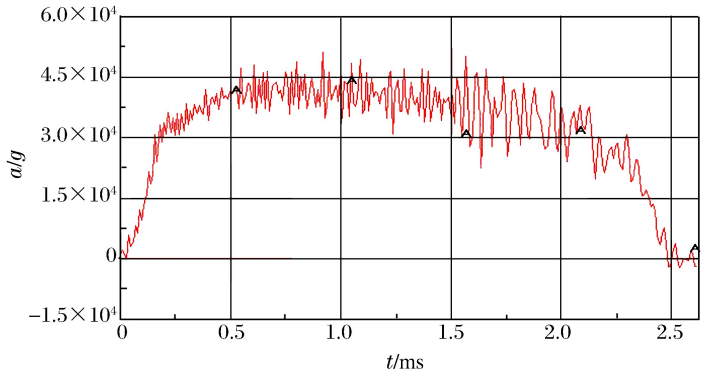


图 9 侵彻加速度-时间曲线

Fig. 9 Penetration acceleration vs time

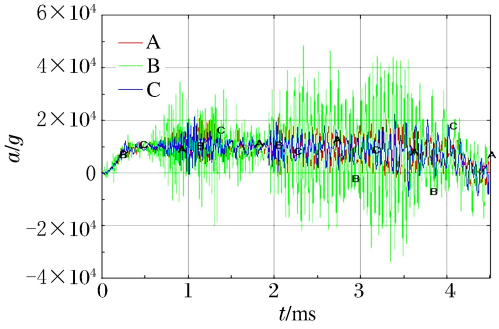


图 10 3 个点的侵彻加速度

Fig. 10 Penetration acceleration at three points

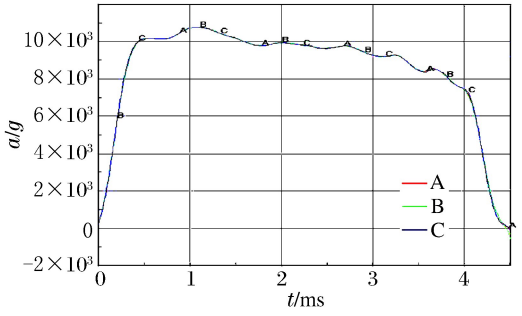


图 11 3 个点的侵彻加速度(滤波)

Fig. 11 Penetration acceleration at three points (filter)

在弹体强度设计、战斗部装药安定分析等时，弹体的整体加速度，即刚体加速度是大家非常关心的[8]，加速度测试仪在弹体内的安装部位和安装方式不会对侵彻过程中的刚体加速度测量造成影响，这可以通过采用适当的滤波截止频率进行滤波而得到所需要的加速度信号。

弹体内腔的前端面加工较粗糙，为了使加速度计与弹体之间绝缘，在加速度计与安装座间通常加绝缘纸垫，当应力波从弹头传播到弹体与测试装置的接触面以及加速度计安装座时，大部分应力波被反射，所以加速度计基本不受应力波的影响。

3 测试装置基础运动对实测加速度信号的影响分析

图 12 的加速度计安装方式可以简化为图 13 所示的模型，图中 c 为阻尼器的阻尼系数，m 为运动质

量块的质量，k 为弹性元件的刚度系数，$x(t)$为质量块所受激励，它可被视为一个基础激励单自由度二阶系统。设加速度计的激励信号为基础运动：$u=u_0\sin\omega t$，基础加速度：$a_f(t)=-u_0\omega^2\sin\omega t$，其相对基础的运动方程为

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=-ma_f(t) \tag{1}$$

整理得

$$\ddot{x}+2\zeta\omega_n\dot{x}+\omega_n^2x=u_0\omega^2\sin\omega t \tag{2}$$

式中：ω_n 为无阻尼固有角频率，ζ 为阻尼比。若忽略阻尼，则式(2)为

$$\ddot{x}+\omega_n^2x=-a_f(t) \tag{3}$$

对杜哈梅积分逐次应用分部积分，可把相对位移表示成关于 $\frac{1}{\omega}$ 的幂级数，因加速度传感器的自振频率很高，取其前 3 项为

$$x(t)=-\frac{1}{\omega_n^2}\left[a_f(t)-a_f(0)\cos\omega_n t-\frac{1}{\omega_n}\dot{a}_f(0)\sin\omega_n t\right] \tag{4}$$

因为 $-\frac{ma_f(t)}{k}=-\frac{a_f(t)}{k/m}=-\frac{a_f(t)}{\omega_n^2}$，上式右边第 1 项为加速度计对惯性力 $-ma_f(t)$ 静力响应，其余各项为加速度计对惯性力 $-ma_f(t)$ 的动力响应，它是以 ω 为频率的高频信号。式(4)中的后 2 项在加速度实测信号中反映出弹体和安装结构的高频振动的影响。

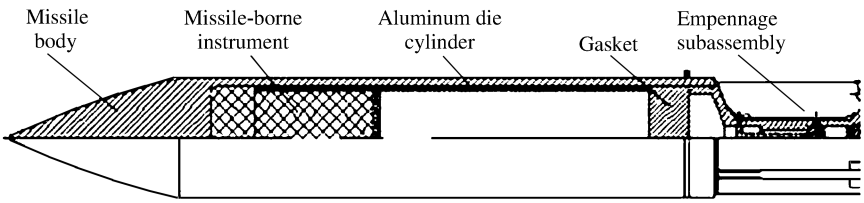


图 12 加速度测试仪安装图

Fig. 12 Installation drawing of acceleration recorder

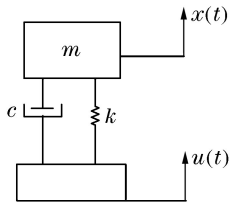


图 13 加速度计力学模型

Fig. 13 Mechanical model for accelerometer

4 测试装置安装结构刚度对实测加速度信号的影响

下面结合图 14 中的测试装置安装结构，分析铝压筒和加速度计安装座的刚度对实测加速度信号的影响。

(1)当弹体在炮膛内加速向前运动时，测试装置因惯性向后运动压缩铝筒，铝压筒的刚度将影响膛内加速度信号，甚至导致测试失败。图 15 中曲线出现剧烈振荡。计算机模拟可知铝压筒的固有频率为 1.6 kHz，而图 16 中在 1.5 kHz 左右出现一个尖峰，即膛内加速度信号中包含铝压筒刚度的影响。按 1.5 kHz 滤波，可得到弹体在膛内运动时的刚体加速度，如图 17 所示。

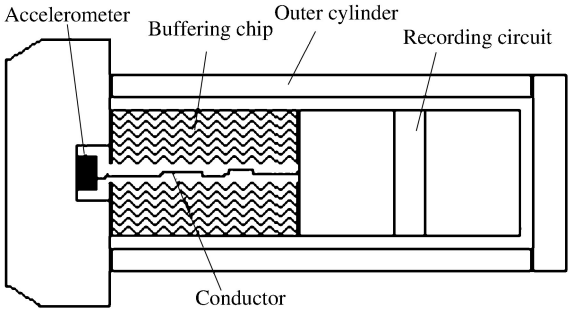


图 14 加速度测试仪结构示意图

Fig. 14 Structural diagram of acceleration recorder

在图 16 的频谱图中，23 kHz 附近出现一个谐振峰，表明在该频率附近结构发生剧烈振动。采用 ANSYS 对弹体进行模态分析，取整个结构的四分之一进行分析。图 18 显示弹体第 23 阶模态(除零频外)对应的振型，主要为测试装置上、下端盖的弯曲振动，其振动方向与加速度计的敏感方向相同，并且该频率(22.0 kHz)接近加速度计的谐振频率(25 kHz)。可以判断，正是第 23 阶模态(除零频外)对应的振动使加速度计输出过大，可能导致测试在膛内阶段就失败。

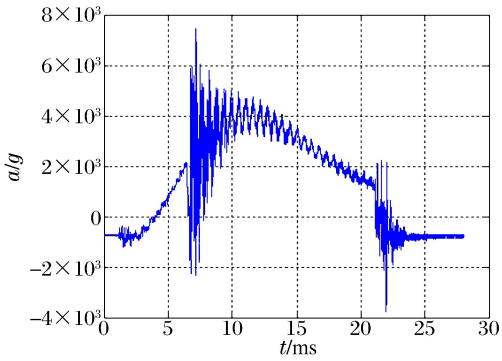


图 15　膛内加速度曲线

Fig. 15　Acceleration-time curve in bore

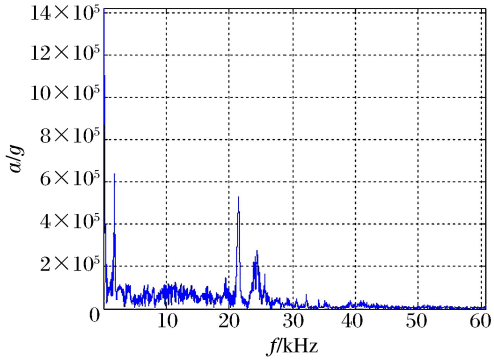


图 16　膛内加速度频谱

Fig. 16　Frequency spectrum of acceleration in bore

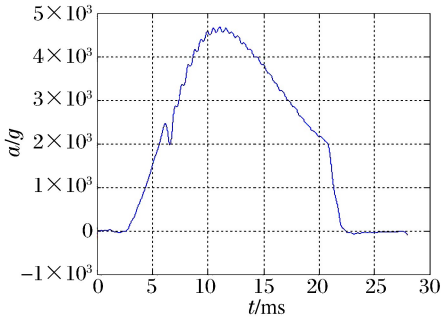


图 17　弹体在膛内的刚体加速度

Fig. 17　Rigid-body acceleration of projectile in bore

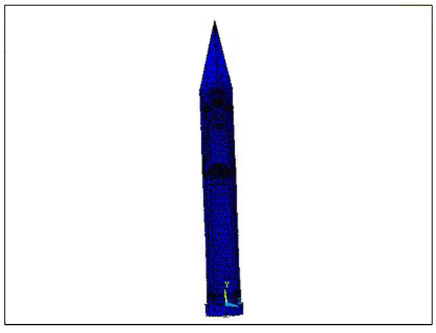


图 18　弹体第 23 阶模态的振型

Fig. 18　Projectile mode shape of the twenty-third order mode

若将铝筒换为钢筒，并不能明显提高测试装置上、下端盖的弯曲振动频率，其值为 23.37 kHz。

$$\omega_n = \frac{n\pi}{l}\sqrt{\frac{EA}{m}} \qquad n = 0,1,2,\cdots \tag{5}$$

由自由杆纵向振动频率公式(5)可知，l(长度)一定，E(材料弹性模量)、m(质量)均增大，频率增大不明显。

为了增加铝压筒刚度，使其上段为实心，质量增加 0.74 kg，整体装配后弹体重心后移 2.5 mm，对弹的飞行稳定性影响很小。对应测试装置上、下端盖的弯曲振动的频率(第 13 阶)为 28.46 kHz。另外，还可将铝筒和尾翼间的调整垫片改为钢片，以增加预压力，提高该振动频率。采取提高铝压筒刚度的措施后，且膛内加速度曲线振荡比以前明显降低。这就从一个方面提高了数据的质量。

(2)当弹体侵彻靶板时，测试装置相对弹体有向前运动的趋势，加速度计安装座压紧弹体，因为安装座本身的刚度大，而加速度计是通过钢螺栓安装在基座上，所以此时整体安装刚度大，可以认为加速度的信号是对弹体内腔前端安装面的响应。

5　加速度计安装方式对实测信号影响的分析

由实验可知加速度测试仪在弹体内的安装部位和安装方式不会对侵彻过程中的刚体加速度测量造成影响，但加速度计的输出信号是其对安装点(面)加速度激励的响应。所以不同的安装方式对加速度计的输出信号有很大影响。下面对目前已采用或可能的安装方式进行讨论。

(1)将加速度计通过钢螺栓直接安装在弹体上。这种安装刚度最大，频响特性最好，但无论安装在弹体内空腔的前端还是尾翼盖上，传感器数据线与记录电路的连接都难以实现，所以目前国内外都采用类似于图 14 的结构。

(2)将电路模块与加速度计安装成一个整体，或将加速度计直接灌封在电路模块中，然后再对这一

整体进行缓冲保护，目的是减短连接到电路模块上的加速度计数据线的长度，提高数据线的抗高冲击能力。这种安装方式可简化为图 19 所示的力学模型。

在侵彻过程中，整体相对弹体以相对加速度 a_r 向前运动，加速度计感知的绝对加速度为 $a_0=a+a_r$，实际上并不是弹体的加速度。

若从冲击响应的角度考虑，这个问题可简化为一个基础激励的二阶系统，如图 20 所示，整体的运动方程为

$$m\ddot{y}+c\dot{y}+ky=-m\ddot{x} \tag{6}$$

令 $a=\ddot{x}/\ddot{x}_{\max}$，$\tau=t/T$，$\delta=-ky/(m\ddot{x}_{\max})$，$R=2\pi\sqrt{m/k}/T$。其中 $\ddot{x}_{\max}$ 为弹体加速度最大值，$\ddot{x}$ 为弹体加速度瞬时值，T 为弹体加速度脉冲持续时间。

对上式进行量纲一化，得到

$$\left(\frac{R}{2\pi}\right)^2\frac{\mathrm{d}^2\delta}{\mathrm{d}\tau^2}+\frac{R\xi}{\pi}\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}\tau}+\delta=a \tag{7}$$

式(7)为相对于量纲一输入 a 的量纲一响应 δ，从式(7)可知，当 R 很小时，方程的前 2 项可以忽略，于是 $\delta=a$；当 R 变大时，前 2 项发生影响，第 1 项引起在 a 值上下的振荡，第 2 项引起时间滞后。这将使弹体加速度波形发生变化，由该加速度信号积分得到的着靶速度、侵彻深度与实测值之间的误差也随之加大。

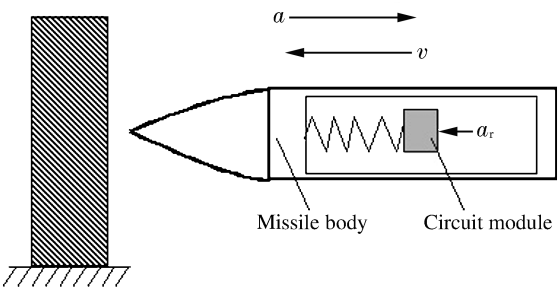


图 19 整体安装的力学模型

Fig. 19 Mechanical model for overall installation

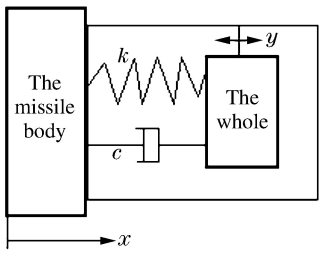


图 20 基础激励的 2 阶系统

Fig. 20 Two-order system in base excitation

所以，采用类似于图 14 的结构将加速度计刚性安装，目前来看是比较理想的。

6 结 论

(1)洛阳水利工程技术研究所进行了过载特性的理论计算[9]，计算结果与实验测量数据符合较好。数值计算结果与实验结果较吻合，表明此数值模型建立及参数选择的正确性。测试数据为实测信号的影响分析提供了事实依据。

(2)由于应力波的传播，弹体的不同部位在侵彻过程中的加速度是不一样的，应力波的波前是加速度的峰值之处，但波前过后峰值很快下降，所以峰值处的脉宽一般很窄。在进行加速度测试时，可根据不同的目的(如各部件的抗冲击能力等)，将加速度计安装在需要测试的位置。通过在加速度计安装座下加绝缘纸，既可使加速度计与弹体绝缘，又可大幅减轻应力波影响。

(3)加速度测试仪在弹体内的安装部位和安装方式不会对侵彻过程中的刚体加速度测量造成影响，可以通过采用适当的滤波截止频率进行滤波而得到所需要的加速度信号。加速度计的输出信号是其对安装点(面)加速度激励的响应，不同的安装方式，对加速度计的输出信号影响很大。在具体安装时，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。

参考文献：

[1] 何翔，徐翔云，孙桂娟，等. 弹体高速侵彻混凝土的效应实验[J]. 爆炸与冲击，2010，30(1)：1-6.
He Xiang, Xu Xiang-yun, Sun Gui-juan, et al. Experimental investigation on projectiles' high-velocity penetration into concrete targets[J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(1): 1-6.

[2] Forrestal M J, Frew D J, Hickerson J P, et al. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(5): 479-497.

[3] Booker P M, Cargile J D. Investigation on the response of segmented concrete targets to projectile[J]. International

Journal of Impact Engineering, 2009,36(7):926-939.

[4] Zhang Wen-dong, Chen Lu-jiang, Xiong Ji-jun, et al. Ultra-high *g* deceleration time measurement for the penetration into stetarget[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007,34(3):436-447.

[5] 孙传杰,卢永刚,张方举,等.新型头形弹体对混凝土的侵彻[J].爆炸与冲击,2010,30(3):269-275.
Sun Chuan-jie, Lu Yong-gang, Zhang Fang-ju, et al. Penetration of cylindrical-nose-tip projectiles into concrete targets[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(3):269-275.

[6] 葛涛,刘保荣,王明洋.弹体侵彻与贯穿有限厚度混凝土靶体的力学特性[J].爆炸与冲击,2010,30(2):159-163.
Ge Tao, Liu Bao-rong, Wang Ming-yang. Penetration and perforation of concrete targets with finite thickness by projectiles[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(2):159-163.

[7] 刘晓鹏,石云波,朱政强,等.应力波在弹体侵彻靶板中的传播特性研究[J].仪器仪表学报学报,2008,29(增刊 8):557-560.
Liu Xiao-peng, Shi Yun-bo, Zhu Zheng-qiang, et al. Research on stress wave propagation characteristic for missile impacting on target[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008,29(suppl 8):557-560.

[8] Liu Hai-peng, Gao Shi-qiao, Li Ke-jie, et al. Measurement technologies and result analysis on experiment of penetration of steel projectile into thick concrete target[C]// The 5th International Symposium on Test and Measurement. Shenzhen, China, 2003,4:1-5.

[9] 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 Hui-qi, He Xiang, Liu Rui-chao, et al. A study on the overload characteristics of projectile penetrating concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2005,38(1):110-116.

Acceleration signal test and analysis for projectile penetrating into concrete*

Zhao Xiao-long[1,2], Ma Tie-hua[1,2], Xu Peng[1,2], Fan Jin-biao[1,2]

(1. *Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi, China*;
2. *Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi, China*)

Abstract: Aimed at acceleration information acquisition and original signal failure problem of projectile penetrating into concrete, a projectile-borne storage testing system was used to conduct test, and the numerical simulation of high-velocity impact was carried out based on LS-DYNA, and the processed data curve corresponds to the measured penetration depth. The numerical simulation results and testing results are in good agreement, which indicates the correctness of this numerical simulation model establishment and parameter selection. The influence analysis of original acceleration signal is conducted on stress wave, fundamental motion of testing device, installed structural stiffness, installation way of accelerometer and some other influencing factors by way of combining test analysis with theoretical derivation, and the results of analysis have certain reference value for high-*g*-value shock test problem.

Key words: mechanics of explosion; acceleration; projectile-borne storage testing system; penetration; LS-DYNA

* Received 1 April 2013; Revised 6 June 2013
Corresponding author: Zhao Xiao-long, long5505221@163.com

(责任编辑　曾月蓉)