

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0242

基于机械振动理论的垂直侵彻弹靶作用模型*

程祥利, 赵 慧, 李林川, 叶海福

(中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为了给侵彻引信抗高过载优化设计提供准确的力学输入, 将机械振动理论引入侵彻过程建模领域, 提出了一种侵彻战斗部刚体运动与一阶轴向振动相结合的垂直侵彻弹靶作用模型。在垂直侵彻过程受力分析的基础上, 基于牛顿第二定律建立了战斗部刚体运动模型, 基于单自由度弹簧-质量-阻尼系统建立了战斗部一阶轴向振动模型, 并采用数值积分的方法获得了垂直侵彻过程中各物理量的变化规律。和火炮试验实测加速度信号的对比分析结果表明: 考虑战斗部一阶轴向振动后的垂直侵彻弹靶作用模型能更准确地描述侵彻过程, 能更有效地指导侵彻引信的抗高过载优化设计。

关键词: 垂直侵彻; 机械振动; 弹靶作用模型; 弹簧-质量-阻尼系统

中图分类号: O385 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

现代战争中, 越来越依靠超高速侵彻战斗部(弹)对防御工事、水面舰艇、机场跑道、地面建筑、飞机掩蔽库等高强度硬目标(靶)进行毁伤^[1]。侵彻过程中, 弹靶作用机理异常复杂, 给战斗部、装药、引信的抗高过载优化设计带来很大困难^[2-3], 已成为具有重大军事需求的力学难题。

然而, 现有研究主要关注战斗部的结构强度、侵彻能力以及装药安定性^[4-5], 较少涉及到引信, 导致引信抗高过载优化设计的力学输入不明确。针对上述难点, 一种行之有效的解决方法是通过建立合理、有效、简化的弹靶作用模型获得侵彻过程中的加速度信息并等效为引信设计输入。

传统的弹靶作用模型建模方法主要考虑战斗部刚体运动^[6-11], 即侵彻过程中战斗部不发生弹性变形。首先, 在侵彻过程受力分析的基础上采用空腔膨胀理论和微分面元法获得侵彻过程中的弹靶作用力, 随后, 基于牛顿第二定律建立刚体运动模型, 即侵彻过程中的运动微分方程, 最后, 采用数值积分的方法求解刚体运动模型, 获得侵彻过程中各物理量(含位移、速度、加速度)的变化规律, 并分析各种因素的影响。

但是, 打靶试验结果显示战斗部在侵彻过程中都会发生不同程度的变形^[12-14], 在理论上都应视为弹性体^[15]。另外, 部分电子元器件在正弦或交流载荷作用下更易损坏^[16-17], 说明侵彻过程中的战斗部弹性变形会影响内部组件的生存性及工作可靠性, 特别是含多种电子元器件的引信。

为了揭示战斗部弹性变形对侵彻引信受力环境的影响规律, 本文将机械振动理论引入侵彻过程建模领域, 提出一种战斗部刚体运动与一阶轴向振动相结合的垂直侵彻弹靶作用模型。首先, 将战斗部等效为具有阻尼特性的线性弹簧, 基于单自由度弹簧-质量-阻尼系统建立一阶轴向振动模型, 并与传统的刚体运动模型相叠加作为修正后的弹靶作用模型; 其次, 在垂直侵彻过程受力分析的基础上, 采用空腔膨胀理论和微分面元法获得弹靶作用力, 并作为弹靶作用模型的输入; 最后, 采用数值积分的方法获得垂直侵彻过程中各物理量的变化规律, 并和实测数据进行对比以验证模型的准确性。

* 收稿日期: 2018-07-03; 修回日期: 2018-09-08

第一作者: 程祥利(1984—), 男, 博士, 助理研究员, chengxiangli126@126.com;

通信作者: 叶海福(1982—), 男, 硕士, 副研究员, yehaifu@126.com。

1 垂直侵彻过程受力分析

1.1 空腔膨胀理论

作为求解侵彻问题的一种近似方法,空腔膨胀理论根据质量守恒定律和动量守恒定律建立法向应力与空腔膨胀速度的关系,并通过对弹头表面积分得到弹靶作用力^[18]。

战斗部表面微元处的法向应力 σ_n 与空腔膨胀速度 V_n 、靶标材料特征参数 A 和 B 密切相关,如式(1)所示。参数 A 和 B 的表达式分别如式(2)和式(3)所示^[10]。

$$\sigma_n = A + BV_n^2 \tag{1}$$

$$A = \frac{2\tau_0}{3}(1 - \ln \eta^*) = \frac{2}{3}(1 - \ln \eta^*)\left(1 - \frac{\lambda}{3}\right)\sigma_0 \tag{2}$$

$$B = \rho_0 \left[\frac{3\tau_0}{E} + \eta^* \left(1 - \frac{3\tau_0}{2E}\right)^2 + \frac{3\eta^{*\frac{2}{3}} - \eta^*(4 - \eta^*)}{2(1 - \eta^*)} \right] \left[\left(1 + \frac{\tau_0}{2E}\right)^2 - (1 - \eta^*) \right]^{-\frac{2}{3}} \tag{3}$$

式中: η^* 为锁变体积常数, ρ_0 为初始密度, λ 为强化模量参数, E 为弹性模量, τ_0 为侧向抗剪强度, σ_0 为抗压强度。

战斗部表面微元处的切向应力 σ_τ 如下式所示。

$$\sigma_\tau = \mu\sigma_n \tag{4}$$

式中: μ 为动摩擦因数。

1.2 弹靶作用力

假设战斗部垂直侵彻过程中攻角始终为零,即战斗部不发生姿态偏转。此时,战斗部主要承受靶标施加的侵彻阻力作用,即弹靶作用力 F_x ,如图 1 所示。图中, H 为靶标厚度, x 为侵彻深度, V 为侵彻速度, L 为卵形弹头的长度。

弹靶作用力可根据微分面元法求解。对于卵形弹垂直侵彻,在垂直于弹轴方向的圆截面上取微面元,记为 dS ,如式(5)所示。

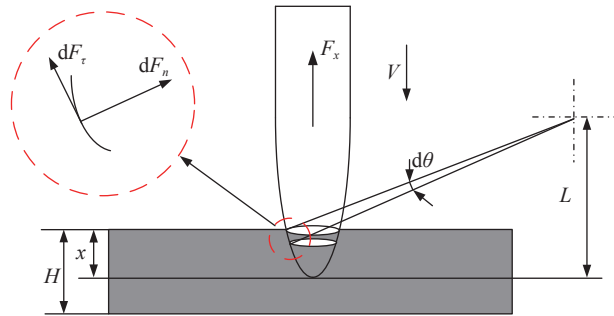


图 1 垂直侵彻过程受力分析图

Fig. 1 Force diagram in normal penetration process

$$dS = 2\pi\chi^2 D^2 \left(\sin\theta - \frac{\chi - 0.5}{\chi} \right) d\theta \tag{5}$$

式中: χ 为弹头系数, D 为弹径, θ 为卵形母线的圆心角。

微面元 dS 所受法向力 dF_n 和切向力 dF_τ 如式(6)所示。

$$\begin{cases} dF_n = \sigma_n dS \\ dF_\tau = \sigma_\tau dS \end{cases} \tag{6}$$

将微面元 dS 的法向力和切向力向弹轴方向投影,可得微面元 dS 的轴向力 dF_x ,如式(7)所示。

$$dF_x = dF_n \cos\theta + dF_\tau \sin\theta = 2\pi\chi^2 D^2 \sigma_n \left(\sin\theta - \frac{\chi - 0.5}{\chi} \right) (\cos\theta + \mu \sin\theta) d\theta \tag{7}$$

对微面元 dS 的轴向力 dF_x 沿战斗部表面进行积分,可得整个战斗部的轴向力,即弹靶作用力,如式(8)所示。

$$F_x = \int_{\theta_1}^{\theta_2} dF_x = 2\pi\chi^2 D^2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sigma_n \left(\sin\theta - \frac{\chi - 0.5}{\chi} \right) (\cos\theta + \mu \sin\theta) d\theta \tag{8}$$

2 弹靶作用模型建模

侵彻过程中, 战斗部既有刚体运动, 又有弹性振动, 可分别建立刚体运动模型和弹性振动模型。

2.1 刚体运动模型

垂直侵彻时, 弹靶作用力使战斗部做减速运动, 可简化为质心的刚体运动。假设战斗部头部的位移为 x_1 , 则战斗部各个位置的位移均为 x_1 。根据牛顿第二定律可得运动微分方程, 即刚体运动方程为:

$$\frac{d^2 x_1}{dt^2} = \frac{dV}{dt} = -\frac{F_x}{M} \quad (9)$$

式中: t 为侵彻时间, M 为战斗部质量。

2.2 一阶轴向振动模型

垂直侵彻时, 弹靶作用力会激发起战斗部的多种振动模式, 使得战斗部剧烈振动。由于轴向载荷起主要作用, 可近似用一阶轴向振动模型描述弹性振动。

假设战斗部为两端自由的一维圆杆, 可根据应力波传播理论计算出战斗部一阶轴向振动的固有频率 f_1 , 理论值如下式所示, 且与模态仿真结果吻合较好^[19]。

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E_0}{\rho}} \quad (10)$$

式中: L 为战斗部长度, E_0 为战斗部壳体材料的弹性模量, ρ 为战斗部壳体材料的密度。

由于真实战斗部与理想的一维圆杆有差异, 固有频率理论值会比实际值偏大。另外, 飞行速度、侵彻阻力均会降低一阶轴向振动频率^[20]。因此, 取一修正系数 k 对固有频率理论值进行修正。结合大量实测数据的频谱分析结果, k 一般取 0.7~0.9, 此时一阶轴向振动的固有频率可近似为:

$$f_1 \approx \frac{k}{2L} \sqrt{\frac{E_0}{\rho}} \quad (11)$$

战斗部的一阶轴向振动频率已知后, 便可借鉴机械振动理论进行战斗部弹性振动模型建模。将战斗部等效为具有阻尼特性的线性弹簧, 质量集中于战斗部尾部, 则一阶轴向振动模型可简化为单自由度弹簧-质量-阻尼系统, 如图 2 所示, 与基础运动引起的强迫振动类似^[21]。图中, 战斗部头部位移为 x_1 , 与刚体运动一致, 战斗部尾部(即引信安装位置)位移为 x_2 , 战斗部等效刚度 K 和等效阻尼 C 分别如下式所示:

$$K = M\omega_n^2 = M(2\pi f_1)^2 = 4M\pi^2 f_1^2 \quad (12)$$

$$C = 2\xi\omega_n M = 2\xi\sqrt{MK} \quad (13)$$

式中, ω_n 为 f_1 对应的圆周固有频率, 单位为 rad/s, ξ 为无量纲阻尼比。对于金属材料而言, 阻尼比远小于 1。

根据图 2 可知, 弹靶作用力经弹簧传递后再作用于战斗部, 此时战斗部受两部分作用力, 一是阻尼力, 其方向与振动方向相反, 大小与振动速度成正比, 二是弹簧力, 其方向与振动方向相反, 大小与振动位移成正比。由于战斗部尾部对于头部有相对位移 $x_2 - x_1$, 因而作用于战斗部的弹簧力为 $K(x_1 - x_2)$, 阻尼力为 $C(dx_1 - dx_2)/dt$ 。

以战斗部为研究对象可得到运动微分方程, 如下式所示:

$$M \frac{d^2 x_2}{dt^2} = C \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + K(x_1 - x_2) \quad (14)$$

两边同时减去 Md^2x_1/dt^2 并移项、化简可得:

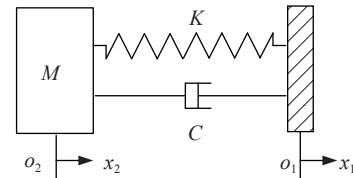


图 2 单自由度弹簧-质量-阻尼系统
Fig. 2 Single DOF spring-mass-damper system

$$M\left(\frac{d^2x_2}{dt^2} - \frac{d^2x_1}{dt^2}\right) + C\left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt}\right) + K(x_2 - x_1) = -M\frac{d^2x_1}{dt^2} = F_x \quad (15)$$

记战斗部一阶轴向振动引起的长度变化量为 ΔL , 则 $\Delta L = x_2 - x_1$ 。当 $\Delta L > 0$ 时, 战斗部被压缩, 反之被拉伸。此时, 式(15)可简化为式(16), 即一阶轴向振动模型, 描述了战斗部轴向振动变形与弹靶作用力之间的关系。

$$M\frac{d^2\Delta L}{dt^2} + C\frac{d\Delta L}{dt} + K\Delta L = F_x \quad (16)$$

2.3 弹靶作用模型

将式(9)和式(16)所示的微分方程相叠加, 便可得到战斗部刚体运动与一阶轴向振动相结合的弹靶作用模型, 如式(17)所示。可以看出, 弹靶作用力决定了战斗部的刚体运动特性与一阶轴向振动特性。其中, 刚体运动用战斗部头部位移 x_1 及其一阶导数、二阶导数描述, 一阶轴向振动用战斗部长度变化量 ΔL 及其一阶导数、二阶导数描述。

$$\begin{cases} M\frac{d^2x_1}{dt^2} = -F_x \\ M\frac{d^2\Delta L}{dt^2} + C\frac{d\Delta L}{dt} + K\Delta L = F_x \end{cases} \quad (17)$$

对于刚体运动, 可直接根据积分求解出侵彻深度 x_1 、速度 dx_1/dt 、加速度 d^2x_1/dt^2 , 如下式所示:

$$\begin{cases} \frac{d^2x_1}{dt^2} = -\frac{F_x}{M} \\ \frac{dx_1}{dt} = V_0 - \int_0^t \frac{F_x}{M} dt \\ x_1 = V_0t - \int_0^t \int_0^t \frac{F_x}{M} dt^2 \end{cases} \quad (18)$$

式中: V_0 为初始速度。

假设弹靶作用力 F_x 的加载、卸载非常快, 可近似为峰值为 F_{\max} 的脉冲函数, 则一阶轴向振动微分方程的解等效为二阶欠阻尼系统的脉冲响应。此时, 战斗部长度变化量 ΔL 为:

$$\Delta L = \frac{F_{\max}}{M\omega_n\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_n\sqrt{1-\xi^2}t) \quad (19)$$

对其进行求导可得出变形速度、变形加速度。可以看出, ΔL 是振荡衰减的, 频率近似为 ω_n 。

为了分析方便, 记 d^2x_1/dt^2 为战斗部刚体过载, 该值仅与战斗部刚体运动有关; 记 $d^2\Delta L/dt^2$ 为战斗部弹性过载, 该值仅与战斗部的一阶轴向振动有关; 记 d^2x_2/dt^2 为战斗部总过载, 并等效为引信设计输入, 该值既与刚体运动有关, 又与一阶轴向振动密切相关。此时, 战斗部总过载与刚体过载、弹性过载之间的关系为:

$$\frac{d^2x_2}{dt^2} = \frac{d^2x_1}{dt^2} + \frac{d^2\Delta L}{dt^2} \quad (20)$$

2.4 模型数值求解

由于侵彻过程中的弹靶作用力计算非常复杂, 而且存在加载与卸载, 无法等效为脉冲函数, 因此直接求解式(17)的解析解是非常困难的。为此, 本文采用数值积分的方法预测侵彻过程中的战斗部刚体运动特性和一阶轴向振动特性。

首先, 根据已知的战斗部参数、靶标参数、速度参数, 采用空腔膨胀理论和微分面元法求解弹靶作用力; 随后, 以弹靶作用力为输入求解刚体运动微分方程, 获得侵彻深度、侵彻速度、刚体过载等物理量, 以弹靶作用力为输入求解一阶轴向振动微分方程, 获得长度变化量、变形速度、弹性过载等物理量, 并判断是否满足程序结束条件。如果不满足, 则计算下一时刻的值直至满足程序结束条件。

详细的程序流程如图3所示。

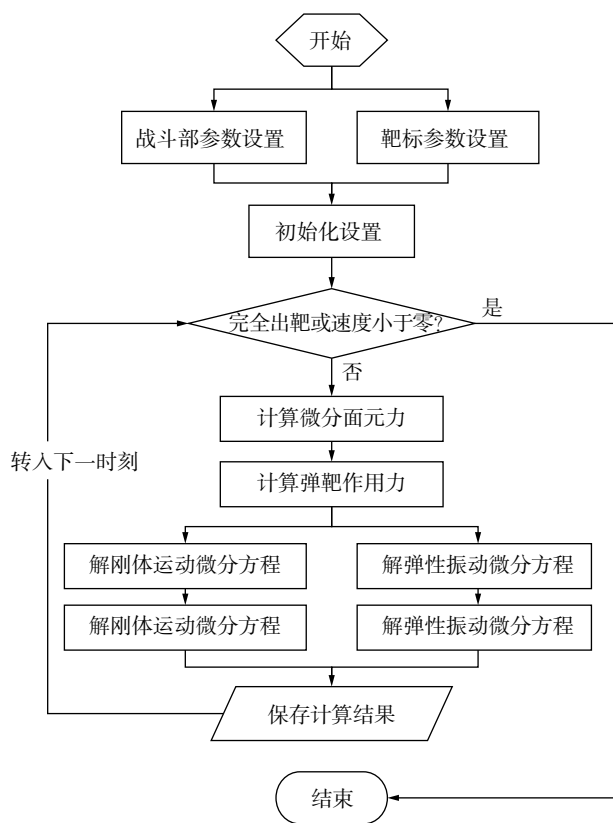


图 3 程序流程图

Fig. 3 Flow diagram for programming

3 分析与讨论

本文以某火炮试验弹侵彻钢筋混凝土靶标为例进行计算, 详细的参数如下:

试验弹弹径 0.155 m, 弹长 0.89 m, 弹头系数 3.0, 弹重约 90 kg, 无量纲阻尼比 0.02; 弹体材料为高强度合金钢, 弹性模量 210 GPa, 密度 7 800 kg/m³, 一阶轴向振动的固有频率修正系数 0.8。根据以上参数计算出试验弹的一阶轴向振动的固有频率约 2.3 kHz。

靶标分强度靶 (single-layer concrete target) 和多层靶 (multi-layer concrete target) 两种。其中, 强度靶为 3.5 m 厚 C40 钢筋混凝土; 多层靶为 8 层 C40 钢筋混凝土, 首靶的厚度 0.3 m, 其余靶的厚度 0.14 m, 靶间距 3 m。C40 钢筋混凝土的抗压强度 40 MPa, 弹性模量 32.5 GPa, 密度 2 400 kg/m³。采用空腔膨胀理论计算弹靶作用力时, 动摩擦系数 0.02, 锁变体积常数 0.1, 强化模量参数 0.65。

数值积分算法选用四阶龙格库塔算法。计算时, 时间步长 1 μs, 采样频率 20 kHz, 即每隔 50 μs 输出一次计算结果。

取试验弹以 830 m/s 速度垂直侵彻强度靶和多层靶为典型工况, 对每种工况分别采用传统方法

(traditional method) 和本文的修正方法 (modificatory method) 进行计算。其中, 传统方法仅考虑战斗部刚体运动, 修正方法综合考虑战斗部刚体运动与一阶轴向振动。

3.1 与传统方法的对比

侵彻强度靶时, 持续时间 (以弹尾完全出靶为准) 约 9 ms, 剩余速度约 355 m/s, 侵彻多层靶时, 持续时间 (以弹尾完全出最后一层靶为准) 约 33 ms, 剩余速度约 645 m/s。

垂直侵彻过程中, 战斗部刚体过载变化曲线如图 4 所示。可以看出, 无论是强度靶还是多层靶, 刚体过载均是单向的, 本质上与弹靶作用力的变化趋势一致。

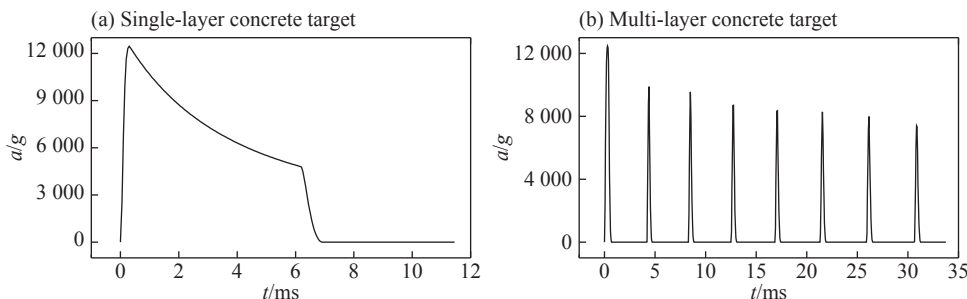


图 4 垂直侵彻过程中的刚体过载变化曲线

Fig. 4 Rigid acceleration curve in normal penetration process

垂直侵彻过程中, 战斗部弹性过载变化曲线如图 5 所示。可以看出, 无论是强度靶还是多层靶, 弹性过载的变化规律是一致的, 均表现出明显的周期性, 而且由于阻尼耗散作用, 幅值是衰减的, 直到下一次碰靶。

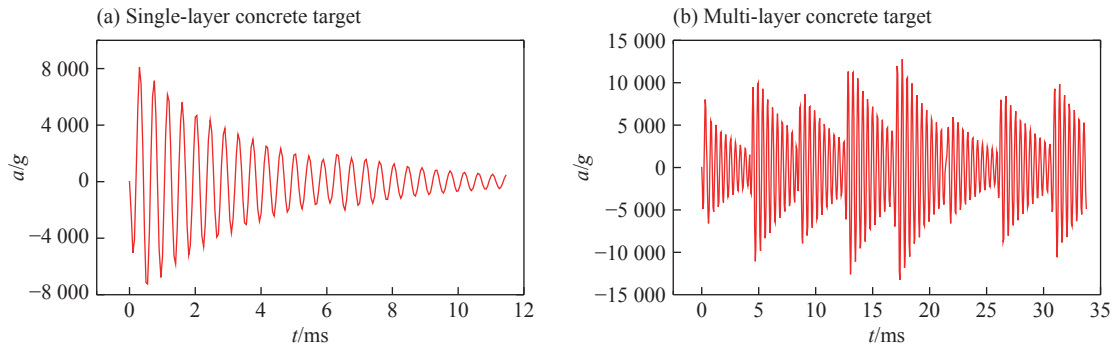


图 5 垂直侵彻过程中的弹性过载变化曲线
Fig. 5 Elastic acceleration curve in normal penetration process

对弹性过载进行频谱分析,结果如图 6 所示。可以看出,无论是强度靶还是多层靶,信号能量主要集中于 2.3 kHz,与一阶轴向振动频率一致,这种现象是由战斗部的频率响应特性决定的。将式(16)进行拉普拉斯变换,可得到以刚体过载为输入、以弹性过载为输出的传递函数,如式(21)所示,对应的频率响应特性如图 7 所示。可以看出,侵彻过程中的战斗部实际上是一个自动控制系统,该系统响应外界输入时,信号的能量主要集中于固有频率 f_1 附近,与图 6 结果一致。

$$G(s) = \frac{Ms^2\Delta L(s)}{-F_x(s)} = \frac{Ms^2}{Ms^2 + Cs + K} = \frac{s^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (21)$$

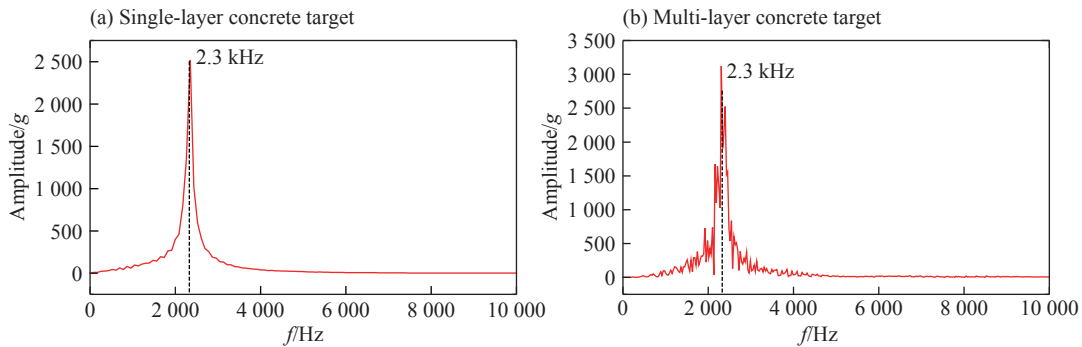


图 6 弹性过载的频谱分析结果
Fig. 6 Frequency spectrum of elastic acceleration signal

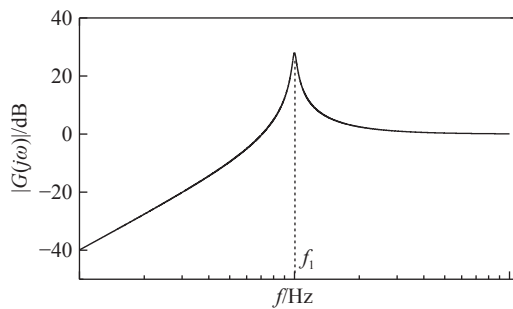


图 7 战斗部一阶轴向振动的频率响应特性
Fig. 7 Frequency response characteristics of the first order axial vibration for projectiles

垂直侵彻过程中,同时考虑战斗部刚体运动和一阶轴向振动的战斗部总过载变化曲线如图 8 所示,对应的频谱分析结果如图 9 所示。

可以看出,两种方法的差异主要体现在计算结果的频率成分不同。采用传统方法时,加速度信号是单向的,未叠加高频信号,而采用修正方法时,加速度信号是振荡的,甚至是正负交替变化的,含有明显

的高频成分,且高频成分的能量主要集中于一阶轴向振动频率附近。因此,直接将传统方法计算出的加速度值作为引信受力是不合理的。

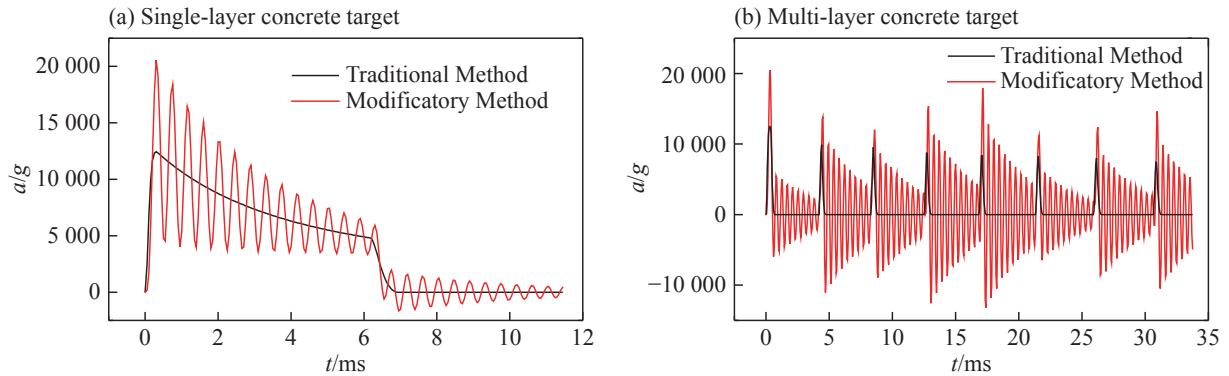


图 8 垂直侵彻过程中的总过载变化曲线

Fig. 8 Total acceleration curve in normal penetration process

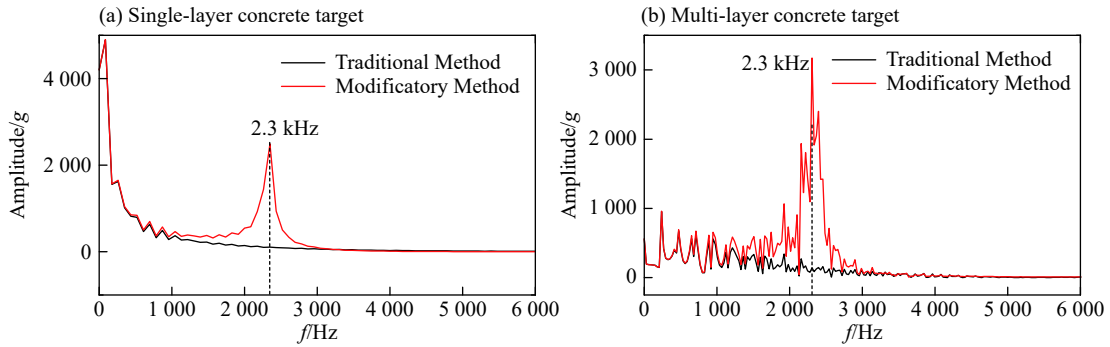


图 9 战斗部总过载的频谱分析结果

Fig. 9 Frequency spectrum of total acceleration signal

3.2 与打靶实测数据的对比

为了验证计算结果的准确性,利用 155 火炮平台开展了侵彻 8 层钢筋混凝土靶试验,靶标布置和试验弹分别如图 10、图 11 所示。其中,靶标是倾斜 80°安装的,与垂直侵彻略有区别。



图 10 靶标布置

Fig. 10 Schematic diagram of the target



图 11 试验弹

Fig. 11 Schematic diagram of the projectile

试验时,通过高速摄像记录完整的穿靶图像,并判读出侵彻速度约 833 m/s,通过弹载记录装置采集侵彻过程中的加速度信号。本文从两个方面对计算结果和试验结果进行了对比,一是每层靶的碰靶时

刻(以碰首靶为零点),目的是验证刚体运动模型的准确性,二是加速度信号,目的是验证一阶轴向振动模型的准确性。

每层靶的碰靶时刻对比如表1所示。表中,绝对误差等于计算结果减去高速摄像判读结果,相对误差等于绝对误差除以高速摄像判读结果。可以看出:(1)计算出的碰靶时刻要比高速摄像判读结果略有延迟,说明采用空腔膨胀理论和微分面元法计算出的侵彻阻力偏大;(2)绝对误差最大值仅为1.00 ms,发生在侵彻第6层靶时,相对误差最大值仅为5.97%,发生在侵彻第5层靶时,说明侵彻第5层靶时开始出现较为明显的弹体姿态偏转并持续至碰靶结束,与图10中弹道向上偏转的规律相似,导致高速摄像判读出的后三层的碰靶时刻延后,即后面三层的绝对误差和相对误差均减小。以上分析说明战斗部刚体运动模型的计算结果与试验结果一致,能满足工程估算的需要。

弹载记录装置采集到的加速度信号如图12所示,对应的频谱分析结果如图13所示。从时域角度看,实测加速度信号是振荡的,变化规律与修正方法计算结果基本一致,从频域角度看,实测加速度信号含有明显的高频成分,且信号的能量主要集中于约2.5 kHz的频段,与试验弹的一阶轴向振动频率基本吻合。

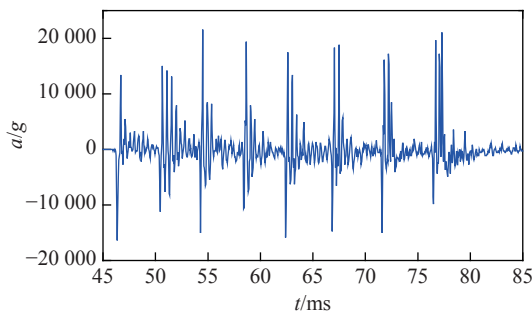


图12 实测加速度信号

Fig. 12 Acceleration data collected

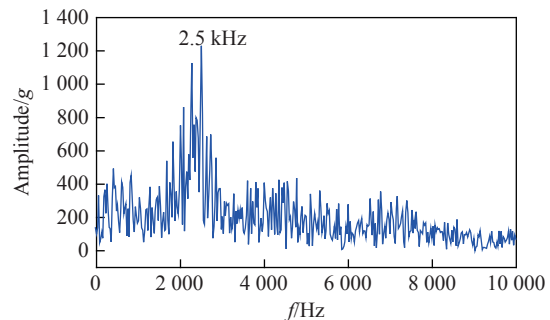


图13 实测数据的频谱

Fig. 13 Frequency spectrum of data collected

综合对比分析时域特性和频域特性可以看出,修正方法的计算结果更接近于实测数据,说明战斗部刚体运动与一阶轴向振动相结合的弹靶作用模型能更合理地描述侵彻过程,能为侵彻引信抗高过载优化设计提供准确的力学输入。

4 结 论

(1)将侵彻战斗部等效为具有阻尼特性的线性弹簧,基于单自由度弹簧-质量-阻尼系统建立了战斗部一阶轴向振动模型,对传统的仅考虑战斗部刚体运动的垂直侵彻弹靶作用模型进行了修正;

(2)采用数值积分的方法求解战斗部刚体运动模型和一阶轴向振动模型,获得了垂直侵彻过程中各物理量的变化规律,重点分析了战斗部过载的变化规律;

(3)利用155火炮平台开展了侵彻8层钢筋混凝土靶试验,通过高速摄像获得了每层靶的碰靶时刻,通过弹载记录装置获得了侵彻过程中的加速度信号;

(4)计算结果与实测数据的对比分析结果表明:考虑战斗部一阶轴向振动的弹靶作用模型能更准确地预测侵彻过程中的过载变化规律,能为侵彻引信抗高过载优化设计提供更明确的力学输入。

参考文献:

- [1] 李晓峰. 侵彻弹药引信技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 1-3.
- [2] 王伟力, 黄雪峰, 杨雨潼. 半穿甲战斗部侵彻过程中装药安定性研究 [J]. *海军航空工程学院学报*, 2010, 25(1): 79-82. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1522.2010.01.019.
WANG Weili, HUANG Xuefeng, YANG Yutong. Research on the grain safety during the penetration process of semi-armour-piercing warhead [J]. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 2010, 25(1): 79-82. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1522.2010.01.019.
- [3] 张建新. 侵彻引信炸点控制理论及试验研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012: 1-2.
- [4] 赵生伟, 初哲, 李明. 抗侵彻过载战斗部装药安定性实验研究 [J]. *兵工学报*, 2010, 31(S1): 284-287.
ZHAO Shengwei, CHU Zhe, LI Ming. Experiment investigation on stability of explosive in anti-overload warhead [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(S1): 284-287.
- [5] 赵南, 王可慧, 李明, 等. 薄壁弹体高速侵彻钢筋混凝土实验研究 [J]. *实验力学*, 2017, 32(4): 573-579. DOI: 10.7520/1001-4888-16-179.
ZHAO Nan, WANG Kehui, LI Ming, et al. Experimental study of high speed penetration of thin-wall projectile in steel reinforced concrete [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(4): 573-579. DOI: 10.7520/1001-4888-16-179.
- [6] FORRESTAL M J, TZOU D Y. A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1997, 34(31-32): 4127-4146. DOI: 10.1016/S0020-7683(97)00017-6.
- [7] BENDOR G, DUBINSKY A, ELPERIN T. Analytical solution for penetration by rigid conical impactors using cavity expansion models [J]. *Mechanics Research Communications*, 2000, 27(2): 185-189. DOI: 10.1016/S0093-6413(00)00080-X.
- [8] 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. DOI: 10.1016/S0734-743X(02)00108-2.
- [9] 虞青俊, 李玉龙, 金连宝, 等. 侵彻多层混凝土目标弹丸过载特性研究 [J]. *探测与控制学报*, 2007, 29(1): 13-17. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1194.2007.01.004.
YU Qingjun, LI Yulong, JIN Lianbao, et al. Research of deceleration-time curves during penetration of multi-plate concrete targets [J]. *Journal of Detection & Control*, 2007, 29(1): 13-17. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1194.2007.01.004.
- [10] 周栋, 吴俊斌. 动能战斗部侵彻混凝土力学响应研究 [J]. *战术导弹技术*, 2012(4): 16-19.
ZHOU Dong, WU Junbin. Research on penetrating concrete effective of kinetic warhead [J]. *Tactical Missile Technology*, 2012(4): 16-19.
- [11] 徐文亮, 何春, 李朝君. 侵彻爆破型战斗部侵彻性能总体评估系统研究 [J]. *战术导弹技术*, 2013(1): 93-100.
XU Wenliang, HE Chun, LI Chaojun. General evaluation study of penetration warhead's penetrate capability [J]. *Tactical Missile Technology*, 2013(1): 93-100.
- [12] 皮爱国, 黄风雷. 大长细比结构弹体侵彻 2024-O 铝靶的弹塑性动力响应 [J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(3): 252-260. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)03-0252-09.
PI Aiguo, HUANG Fenglei. Elastic-plastic dynamic response of slender projectiles penetrating into 2024-O aluminum targets [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(3): 252-260. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)03-0252-09.
- [13] 王琳, 王富耻, 王鲁, 等. 空心弹体垂直侵彻混凝土靶板的应变测试研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2002, 22(4): 453-456. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2002.04.014.
WANG Lin, WANG Fuchi, WANG Lu, et al. Strain measurement in hollow projectiles impacting concrete targets [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2002, 22(4): 453-456. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2002.04.014.
- [14] 程兴旺, 王富耻, 王鲁, 等. 钨合金壳体侵彻混凝土靶板过程壳体应变的实验测试 [J]. *兵工学报*, 2004, 25(1): 102-105. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2004.01.026.
CHENG Xingwang, WANG Fuchi, WANG Lu, et al. Experimental study on the strain history of critical section during a normal penetration of tungsten alloy shell into a concrete target [J]. *Acta Armamentarii*, 2004, 25(1): 102-105. DOI: 10.3321/j.issn:1000-1093.2004.01.026.
- [15] 韩学平, 芮筱亭, 王国平, 等. 基于小波的弹性弹丸膛内引信过载研究 [J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(13): 3496-3499.
HAN Xueping, RUI Xiaoting, WANG Guoping, et al. Research of fuze overload in bore of flexibility pills based on wavelet method [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(13): 3496-3499.

- [16] 陈学强, 闫明明, 徐晓辉, 等. 微加速度计在高冲击下的断裂失效分析 [J]. *仪表技术与传感器*, 2014(2): 16–19. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1841.2014.02.006.
CHEN Xueqiang, YAN Mingming, XU Xiaohui, et al. Fracture failure analysis of micro-accelerometer under high impact [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2014(2): 16–19. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1841.2014.02.006.
- [17] 刘燕芳, 郭海波, 潘启智, 等. 多层陶瓷电容器的失效分析 [J]. *电子元件与材料*, 2010, 29(11): 72–74. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2028.2010.11.021.
LIU Yanfang, GUO Haibo, PAN Qizhi, et al. Failure analysis of multi-layer ceramic capacitor [J]. *Electronic Components and Materials*, 2010, 29(11): 72–74. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2028.2010.11.021.
- [18] 何涛, 文鹤鸣. 靶体响应力函数的确定方法及其在侵彻力学中的应用 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2007, 37(10): 1249–1261. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2778.2007.10.017.
HE Tao, WEN Heming. Determination of the analytical forcing function of target response and its applications in penetration mechanics [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2007, 37(10): 1249–1261. DOI: 10.3969/j.issn.0253-2778.2007.10.017.
- [19] 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. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0282.
LIU Bo, YANG Liming, LI Dongjie, et al. Analysis of axial vibration frequency for projectile structure in penetration [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(3): 677–682. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0282.
- [20] 罗梦翔, 刘涛, 蔡国平. 导弹振动的动力学建模和频率分析 [J]. *中国科技论文*, 2015, 10(16): 1924–1927. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2783.2015.16.012.
LUO Mengxiang, LIU Tao, CAI Guoping. Dynamics modeling and frequency analysis of missile vibration [J]. *China Science Paper*, 2015, 10(16): 1924–1927. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2783.2015.16.012.
- [21] 季文美. 机械振动 [M]. 北京: 科学出版社, 2016: 68–69.

Projectile target response model for normal penetration process based on mechanical vibration theory

CHENG Xiangli, ZHAO Hui, LI Linchuan, YE Haifu

(*Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China*)

Abstract: In order to provide exact mechanics input for anti-high-overload optimal design of penetration fuze, the mechanical vibration theory is introduced into theoretical analysis on normal penetration and a projectile target response model combining the rigid body motion with the first order axial vibration is proposed. On the basis of force analysis for normal penetration process, a rigid body motion model for projectile is built by adopting Newton second law. The first-order axial vibration model is built based on single DOF spring-mass-damper system. Then, numerical integration calculation is carried out and the trend of each physical variable in normal penetration process is obtained. To verify the credibility of the model proposed, artillery test is carried out and the acceleration signal in the penetration process is collected. Considering that the calculated values agree well with the experimental ones, it could be concluded that the model taking axial vibration effect into account is suitable to analyze force conditions, therefore, could be applied to guide the optimal design of penetration fuze.

Keywords: normal penetration; mechanical vibration; projectile target response model; spring-mass-damper system

(责任编辑 王易难)