

红外/毫米波复合末端制导弹药作战效能仿真评估

黄成功, 吴军辉, 陈前荣, 郭 豪, 许振领, 李英华

(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 以末敏弹药为代表的红外/毫米波复合末端制导弹药在战场上被广泛应用; 受诸多条件限制, 很难通过实弹射击方式进行末敏弹药攻击装甲集群的效能评估; 采用数学仿真试验手段, 根据末敏弹作战过程的各个阶段建立了末敏弹弹道模型、稳态扫描模型、目标识别模型以及坦克队形、运动模型, 构建按照作战编成进攻的作战态势, 进行末敏弹药对坦克目标命中概率的计算, 评估红外/毫米波复合制导末敏弹药作战效能; 仿真结果表明, 末敏弹药是坦克部队的严重威胁。

关键词: 仿真评估; 末敏弹药; 运动模型; 作战效能

中图分类号: E917; TJ413.*2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2702-05

Operational effectiveness evaluation for IR/MMW terminal combined guidance missile

Huang Chenggong, Wu Junhui, Chen Qianrong, Guo Hao, Xu Zhenling, Li Yinghua

(Luoyang Electric Equipment Test Center, Luoyang 471003, China)

Abstract: The IR/MMW terminal combined guidance missile, such as terminal-sensitive submunition, has been used widely on the war field. It is difficult to evaluate operational effectiveness with ball firing of terminal-sensitive submunition attacking armored forces. The movement model of terminal-sensitive submunition operate, such as ballistic model etc. was established. The attack state of terminal-sensitive submunition aiming at armored forces was constructed. The simulation test was used to evaluate hitting probability of terminal-sensitive submunition to armored forces. The operational effectiveness of terminal-sensitive submunition was evaluated also by simulation test. The simulation result demonstrates that the terminal-sensitive submunition has been the severe threat for armored forces.

Key words: simulation evaluation; terminal-sensitive submunition; movement model; operational effectiveness

收稿日期: 2013-02-21; 修订日期: 2013-03-24

基金项目: 军队预研项目

作者简介: 黄成功(1984-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事光电对抗系统及其数学仿真方面的研究。Email: huang162001@126.com

0 引言

红外/毫米波复合末端制导弹药以其超常的目标识别能力、抗干扰能力以及全天候作战能力^[1-2],受到各国军方的广泛注视,并大量装备部队,被誉为装甲集群和火炮的“克星”,如美国的“萨达姆”(SADARM)155 mm 末敏炮弹、德国“灵巧”(SMArt)155 mm 末敏弹。目前,世界上美、德、法、瑞典和俄罗斯等国拥有数个型号、数十万枚装备量的末敏弹药。受实验成本、安全性、场地等诸多条件限制,很难通过实弹射击方式进行末敏弹药攻击装甲集群的效能评估。文中采用数学仿真评估手段,建立末敏弹作战过程中各阶段的运动模型,构建末敏弹药按照作战编成进攻的作战态势,评估红外/毫米波复合制导末敏弹药作战效能。

1 作战过程描述

装甲集群进行阵地进攻时,需要以一定战斗队形、行进速度向对方阵地前进。末敏弹药攻击之前,需要获取对方装甲集群方位、运动速度、运动方向等信息,并根据作战任务及气象、地理等参数计算并装定射击诸元,如射角、射向、时间引信的开舱时间等^[3]。

1.1 末敏弹攻击过程

末敏弹的典型攻击过程包括母弹发射、子母弹分离、子弹减速减旋、子弹稳态扫描、搜索和探测目标、发射弹丸等,如图 1 所示,末敏弹各攻击过程的主要特点包括以下几点^[4]:

(1) 末敏弹药普遍采用饱和式攻击方式,按照装定设计诸元向装甲集群目标同时发射数十枚末敏子弹;(2) 装有末敏子弹的母弹由火炮/火箭炮等发射平台发射后按预定弹道以无控方式飞向目标,在目标区域上空的预定高度(1 000 m 左右),从母弹分离出末敏子弹;(3) 为了使末敏子弹的高度、速度、转速能够满足稳态扫描阶段末敏子弹运动的要求,末敏子弹打开减速伞,进行减速减旋;(4) 末敏子弹下降到 150~300 m 高度,打开旋转伞,达到预定的稳定状态,使子弹以设定的速度匀速旋转、垂直下降,弹载扫描传感装置对地面做螺旋状扫描,同时距离敏感装置实时测高,当测出预定距地面的斜距时,即解除引爆机构的保险。(5) 末敏子弹进入其威胁作用范围

后,敏感装置开始探测视场范围内红外/毫米波信号,一旦根据红外/毫米波综合判据锁定目标后,弹上信号处理器就发出一个起爆自锻破片战斗部的信号,战斗部起爆后瞬时形成高速飞行(2 000~3 000 m/s)的侵彻体去攻击装甲目标。

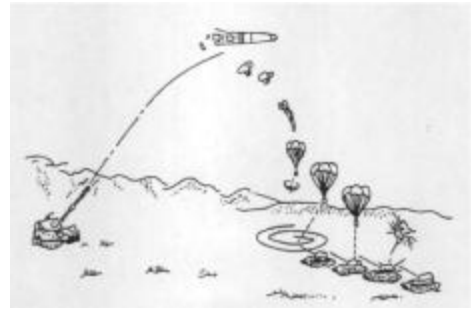


图 1 末敏弹典型攻击过程

Fig.1 Typical operational process of terminal-sensitive submunition

1.2 装甲目标红外/毫米波辐射特性及战斗队形

运动中的装甲目标在红外波段属于“热”目标,红外辐射强度高于背景环境;在毫米波波段,其自身发射率近似为 0,反射率近似为 1,因此在毫米波被动探测模式中为“冷”目标,在毫米波主动探测模式中为“热”目标。末敏弹系统根据装甲目标的红外/毫米波辐射特性设定综合判据识别目标。

战斗中,一个坦克排通常有 3 辆作战坦克;一个坦克连有 3 个坦克排,加上连指挥车,共 11 辆作战坦克;一个坦克营有 3 个坦克连,加上营指挥车,一般有 31~35 辆作战坦克。坦克部队在战斗中需要维持一定的战斗队形才能集中主要火力,迅速机动以及各战斗单元之间密切协同,击退敌人向侧翼发起的突然袭击,最大限度地减少敌人火力的杀伤。坦克连(排)战斗队形通常有“前三角”、“后三角”、“左梯形”、“右梯形”等战斗队形。

2 作战效能仿真方法

命中概率计算是效能分析的基础^[5]。末敏弹药作战效能分析中的主要因素是对装甲目标的命中概率。因此文中通过建立末敏弹弹道模型、稳态扫描模型、目标识别模型以及装甲目标运动模型,采取所有作战单元基于步进时间推进的方式,进行末敏弹药对装甲目标命中概率的计算,评估末敏弹药对装甲集群的作战效能分析,仿真流程见图 2。

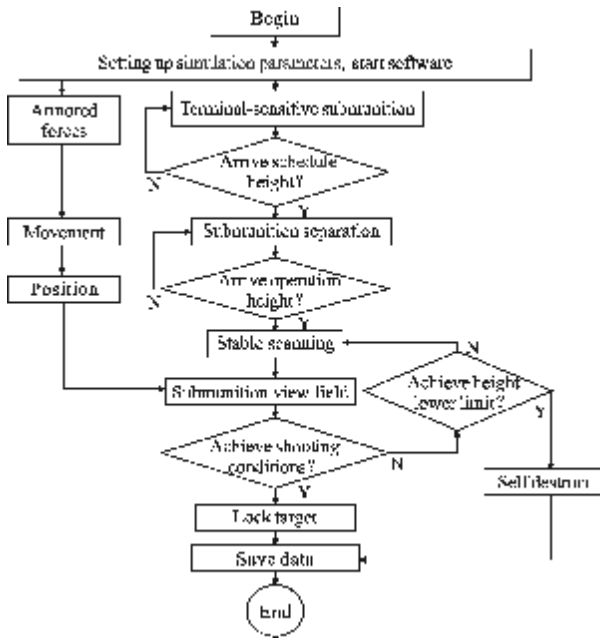


图 2 末敏弹攻击目标仿真流程

Fig.2 Simulation flow chart of terminal-sensitive submunition operational process

通过查阅相关参考文献和情报资料，仿真过程的主要参数设置如下^[3-5]：

- (1) 末敏弹药射程为 17~22 km；
- (2) 母弹出射速度为 1 050 m/s；
- (3) 末敏弹母弹质量为 44 kg；
- (4) 末敏弹单发母弹携带子弹数目为 2 枚；
- (5) 末敏子弹弹重为 11.7 kg；
- (6) 末敏子弹弹径为 147 mm；
- (7) 末敏子弹稳态扫描下降速度为 16.6 m/s；
- (8) 末敏子弹稳态扫描转速为 7.47 r/s；
- (9) 末敏子弹扫描角为 30°；
- (10) 末敏子弹扫描视场为 1.5°；
- (11) 末敏子弹对装甲目标识别高度为 150 m；
- (12) 末敏子弹对装甲目标锁定概率为 90%；
- (13) 仿真步进时长为 1 ms。

3 末敏弹药运动及探测识别模型

为了仿真计算末敏弹药对装甲目标的命中概率，需要建立末敏弹药攻击过程模型及装甲集群的队形、运动模型。其中末敏弹药攻击过程模型包括末敏弹药母弹运动、子弹分离与自由落体、末敏子弹减速减旋、末敏子弹稳态扫描、末敏子弹识别概率等模型。

3.1 末敏弹药母弹运动模型

母弹所受外力为重力和空气阻力，根据牛顿第二定律得母弹质心运动方程为^[6]：

$$\begin{cases} m \frac{dV}{dt} = -X - mg \sin \theta \\ mV \frac{d\theta}{dt} = -mg \cos \theta \\ \frac{dx}{dt} = V \cos \theta \\ \frac{dy}{dt} = V \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中： m 为母弹质量； $X=1/2c_x\rho V^2S$ 为气动阻力； $\rho=1.129 \text{ kg/m}^3$ 为空气密度， $S=\pi(d/2)^2$ 为母弹截面积， c_x 是阻力系数。

设末敏弹母弹阻力系数 c_x 为速度的函数：

马赫数小于 0.8 时， $c_x=0.2$ ；

马赫数大于 0.8 小于等于 1 时， $c_x=0.52+0.9V/340$ ；

马赫数大于 1 时， $c_x=0.4671-0.0859V/340$ 。

3.2 子弹分离与自由落体模型

母弹到达最高点后开始下降，下降到一定高度通过引信和抛射炸药进行子弹分离，抛出两枚末敏子弹。通过子弹分离模型，赋予两枚末敏子弹初速度和飞行姿态。在母弹抛出末敏子弹后，不能立即打开减速伞，而必须让其自由飞行一段时间后再打开减速伞。主要的目的是为了子弹能侧向散开，达到必要的毁伤面积，同时末敏子弹的气动阻力使其速度大为降低，开伞动载和减速距离也显著减小，有利于减速伞的展开。这一过程称为自由坠落阶段^[5]。

根据牛顿第二定律 $m \cdot dv/dt = \sum F$ 可以得到末敏子弹自由坠落段的质心运动学方程组：

$$\begin{cases} \frac{dV_{rx}}{dt} = -\frac{1}{m_d} \left[\frac{1}{2} \rho V_r S_d C_{sd} (W_{rx} - W_x) \right] \\ \frac{dV_{ry}}{dt} = -\frac{1}{m_d} \left[-\frac{1}{2} \rho V_r S_d C_{sd} V_{ry} \right] - g \\ \frac{dV_{rz}}{dt} = -\frac{1}{m_d} \left[\frac{1}{2} \rho V_r S_d C_{sd} (W_{rz} - W_z) \right] \\ \frac{dx}{dt} = V_{rx} - W_x \\ \frac{dy}{dt} = V_{ry} \\ \frac{dz}{dt} = V_{rz} - W_z \end{cases} \quad (2)$$

式中： V_r 为相对速度； (V_{rx}, V_{ry}, V_{rz}) 为末敏子弹相对速度在轴坐标系中三个分量； (W_x, W_z) 为风速在水平坐标中的分量； m_d 为末敏子弹质量； C_{sd} 为末敏子弹弹体阻力系数； S_d 为弹体最大横截面积。

3.3 末敏子弹减速减旋模型

为了使末敏子弹的高度、速度、转速能够满足稳态扫描阶段末敏子弹运动的要求, 末敏子弹进行首次抛伞, 减速降落伞打开, 到二次抛伞前, 使子弹速度降至打开稳态旋转伞时强度允许范围, 把这一过程称为减速减旋阶段^[5]。

在减速减旋阶段, 把末敏子弹看作刚体, 而减速伞简化为质点加以研究, 在此基础上作如下假设, 建立了末敏子弹质点-刚体数学模型:

(1) 地球重力加速度 g 为常数; (2) 伞的阻力系数为常数, 伞衣的质量和附加质量为常数, 其压心与质心重合, 伞衣的转动惯量忽略不计; (3) 伞衣为轴对称外形, 伞和弹体之间的连接线与该对称轴重合; (4) 伞绳的张力和滚转力矩与弹丸的速度方向在一条直线上, 当方向相反, 有风时认为与相对速度方向相反。

根据牛顿第二定律, 可得减速减旋阶段末敏子弹质心运动方程:

$$\begin{cases} \frac{dV_{px}}{dt} = \frac{1}{m_p+m_d} \left[-\frac{1}{2} \rho V_p (S_p C_p + S_d C_{sd}) (V_{px} - W_x) \right] \\ \frac{dV_{py}}{dt} = \frac{1}{m_p+m_d} \left[-\frac{1}{2} \rho V_p (S_p C_p + S_d C_{sd}) V_{py} + (m_p+m_d)g \right] \\ \frac{dV_{pz}}{dt} = \frac{1}{m_p+m_d} \left[-\frac{1}{2} \rho V_p (S_p C_p + S_d C_{sd}) (V_{pz} - W_z) \right] \\ \frac{dx_p}{dt} = V_{px} - W_x \\ \frac{dy_p}{dt} = V_{py} \\ \frac{dz_p}{dt} = V_{pz} - W_z \end{cases} \quad (3)$$

式中: V_p 为减速减旋阶段弹伞系统相对空气运动速度; (V_{px}, V_{py}, V_{pz}) 为相对速度在轴坐标系的分量; m_p 、 m_d 分别为减速伞质量(含伞衣附加质量)、末敏子弹质量; S_p 、 S_d 分别为减速伞截面面积、弹体最大横截面积; C_p 、 C_{sd} 分别为减速伞阻力系数、末敏子弹弹体阻力系数。

3.4 末敏子弹稳态扫描模型

末敏弹从母弹中抛出并经历了一次减速减旋后, 其飞行速度已大大减小, 自转速率已接近于零。在这种情况下, 弹伞系统进入了减速稳定飞行过程。由此可以假定, 旋转伞已处于完全充满状态, 伞衣充满的瞬间, 其旋转速率为零; 末敏弹体与旋转伞运动速度相等, 方向相同, 可近似为一质点来处理, 末敏弹体与旋转伞同步旋转。

根据以上假设, 可以导出末敏弹伞系统减速稳定段的四自由度弹道方程为^[7]:

$$\begin{cases} \frac{dV_v}{dt} = -b_s V_v V_w + b_g \\ \frac{d\dot{\gamma}}{dt} = C_{m1} V_w^2 = C_{m2} V_w \dot{\gamma} \end{cases} \quad (4)$$

式中: V_v 、 V_w 分别为弹伞系统相对于地面和相对于空气的运动速度; $\dot{\gamma}$ 为系统的旋转速率; g 为重力加速度; b_s 、 b_f 、 C_{m1} 、 C_{m2} 可分别表示为:

$$b_s = \frac{\rho(C_s A + C_x S_d)}{2(m+m_s+m_f)}, b_f = \frac{m+m_s}{m+m_s+m_f}$$

$$C_{m1} = \frac{\rho A d_s}{2(I_x + I_{sx} + I_{fx})} m_{xs}, C_{m2} = \frac{\rho A d_s^2}{2(I_x + I_{sx} + I_{fx})} m_{ps}$$

式中: m 、 m_s 、 m_f 分别表示为末敏弹体质量、旋转伞衣质量和旋转伞附加质量; I_x 、 I_{sx} 、 I_{fx} 分别表示为末敏弹体沿伞轴方向的转动惯量、旋转伞轴向转动惯量和轴向表观惯性矩; C_s 、 A 、 d_s 分别为旋转伞的阻力系数、参考面积和参考长度; m_{xs} 和 m_{ps} 分别为弹伞系统的导转力矩系数和旋转阻尼力矩系数导数; C_x 、 S 分别为末敏弹体的阻力系数和参考面积; ρ 为试验场地实测的空气密度。

通常 $m_f = B \rho r_p^3$, 其中 B 为附加质量系数, r_p 为旋转伞的投影半径。

3.5 末敏子弹对装甲目标探测识别模型

由于末敏子弹稳态扫描下降过程中具有固定的扫描角和探测视场角, 因此它在地面的瞬时扫描区域近似为椭圆, 仿真过程中将其等效为圆形, 如图 3 所示, 以椭圆短半径为圆半径。假设装甲目标几何尺寸为 $7m \times 3.5m$, 仿真过程中将其等效为 $3.5m \times 3.5m$ 正方形, 如图 3 所示。随着末敏子弹运动高度的下降, 其瞬时扫描区域面积逐渐减小, 椭圆短半径也逐渐减小。令末敏子弹扫描角为 θ , 探测视场角为 α , 末敏子弹高度为 h , 则瞬时扫描区域的短半径 a 表达式为:

$$a = \frac{h}{2} \left[\tan\left(\theta + \frac{\alpha}{2}\right) - \tan\left(\theta - \frac{\alpha}{2}\right) \right] = \frac{h \sin(\alpha)}{2 \cos\left(\theta + \frac{\alpha}{2}\right) \cos\left(\theta - \frac{\alpha}{2}\right)} \quad (5)$$

仿真过程中, 作如下假设: 当装甲目标几何中心进入末敏弹扫描区域与末敏弹扫描区域几何中心进入装甲目标等效区域两种情况发生其一时, 则认定装甲与末敏弹探测视场交汇, 两种情况临界如图 3。这样可以把末敏弹地面扫描区域和装甲目标等效为点目标, 只需两个点目标之间距离 z 满足下述判定条件时, 可以判定装甲目标与末敏弹探测视场交汇:

$$z \leq \max(1.75, a) \quad (6)$$

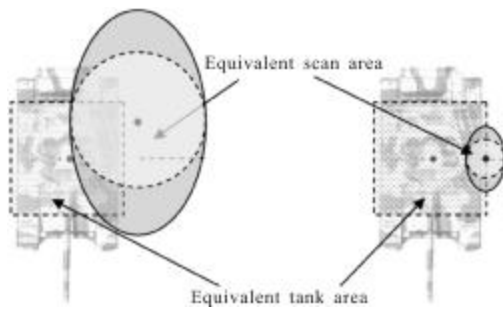


图 3 末敏弹对装甲目标探测识别示意图

Fig.3 Sketch map of detection and identification of armored vehicle to terminal-sensitive submunition

4 末敏弹药作战效能评估

仿真过程中作了以下基本假设:一、末敏弹药发射单元从侦察无人机可以准确获取对方装甲集群位置及运动速度、运动方向等信息;二、仿真空域内风向为水平,且在一次末敏弹攻击周期内无变化;三、装甲目标被锁定后,不会被再次识别、攻击。

假设坦克连共 11 辆坦克以“后三角”战斗队形、设定速度向前行进。在距对方阵地 10 km 位置,被对方侦察无人机发现。侦察无人机引导纵深区域内距坦克部队 20 km 位置的火炮连发射 12 发末敏炮弹(24 枚末敏子弹),对行进坦克部队进行攻击。

图 4 为某次仿真过程的扫描探测结果。如图 4 所示,坦克连 11 辆坦克中,4 辆顺利到达预定地点,7 辆在行驶过程中被末敏弹命中,已经基本丢失了战斗队形,丧失了对敌方阵地的攻击威胁。经过 10 次仿真计算,末敏炮弹对行进中坦克集群的命中率平均达到 61.82%,仿真结果见表 1。

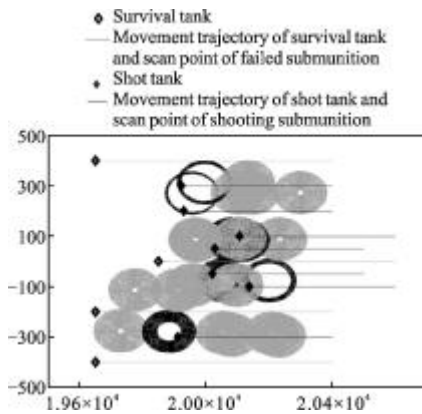


图 4 某次仿真末敏弹对装甲目标扫描探测结果

Fig.4 Detection result of some simulation of terminal-sensitive submunition to armored vehicle

表 1 末敏弹药对坦克集群作战效能仿真结果

Tab.1 Simulation results of operational effectiveness of terminal-sensitive submunition to armored vehicle

Simulation order	Tank number	Shot tank number	Shooting probability/%
1	11	6	54.55
2	11	7	63.64
3	11	6	54.55
4	11	8	72.73
5	11	7	63.64
6	11	7	63.64
7	11	7	63.64
8	11	7	63.64
9	11	6	54.55
10	11	7	63.64
Total	110	68	61.82

5 结论

通过对末敏炮弹攻击装甲集群命中概率的仿真计算,评估了其作战效能,验证了末敏弹药是坦克部队的严重威胁。在未施加任何防护手段的情况下,坦克集群一旦遭受末敏弹药的攻击,基本上丢失了战斗队形和对敌方阵地的攻击威胁。因此坦克集群必须采取对抗手段,减小末敏弹药带来的威胁。

参考文献:

- [1] Pan Bo, Feng Jinfu, Li Qian, et al. Tracing algorithm for MMW/IR multi-sensors fusion [J]. J Infrared Millim Waves, 2010, 23(3): 230-235. (in Chinese)
- [2] Cui Zhishe, Zeng Tao, Long Teng. Target tracking for IR/MMW combined seeker based on data fusion [J]. J Infrared Millim Waves, 2002, 21(6): 460-464. (in Chinese)
- [3] Yang Shaoqin. Smart Munition Engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 4-47. (in Chinese)
- [4] Fan Kun. Research of passive countermeasure for terminal-sensitive submunition [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007: 4-8. (in Chinese)
- [5] Guo Rui. Study on general correlative technology of terminal-sensitive submunition for missile[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006: 10-43. (in Chinese)
- [6] Davis B S. Comparison of Aerodynamic Coefficients for the M4831A1 and XM898 Projectiles Determined from Transonic Range Data[M]. BRL-MR 3999, U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, 1992.
- [7] Liu Shiping, Han Zipeng, Yu Jintian, et al. Parameters estimation and trajectory calculation of parachute/submunition system from the data of free flight test [J]. Journal of Ballistics, 1997, 9(3): 70-73. (in Chinese)