

doi: 10.7690/bgzdh.2021.11.001

图像末制导炮弹射击效率分析

陈朋¹, 马翰宇², 武天宇¹

(1. 陆军炮兵防空兵学院研究生大队, 合肥 230031; 2. 陆军炮兵防空兵学院兵器工程系, 合肥 230031)

摘要: 为指导图像末制导炮弹的后期具体运用, 分析其射击效率。将图像末制导炮弹的外弹道分为无控段、中制导段及末制导段, 分别对每个阶段的误差、有效幅员和命中概率进行分析, 计算出不同条件下对固定和运动目标的射击命中概率及毁伤概率, 并与普通榴弹和激光末制导炮弹进行对比。结果表明: 在不考虑操纵手搜索发现目标的情况下, 图像末制导炮弹的射击效率与距离关系不大, 整体上高于激光末制导炮弹, 对装甲类点目标的命中概率基本保持在 0.7 以上。该研究可为下一阶段该弹的具体作战运用提供理论支撑。

关键词: 误差; 命中概率; 末制导; 有效幅员

中图分类号: TJ012.3 **文献标志码:** A

Analysis of Shooting Efficiency of Image Terminal Guidance Shell

Chen Peng¹, Ma Hanyu², Wu Tianyu¹

1. Brigade of Graduate Student, PLA Army Academy of Artillery & Air Defense, Hefei 230031, China;

2. Department of Weaponry Engineering, PLA Army Academy of Artillery & Air Defense, Hefei 230031, China)

Abstract: Abstract: In order to guide the later application of the image terminal guidance shell, the shooting efficiency is analyzed. The exterior trajectory of image terminal guidance shell is divided into non-control section, middle guidance section and terminal guidance section. The error, effective area and hit probability of each stage are analyzed, and the shot hit probability and damage probability of fixed and moving targets are calculated under different conditions. Compare it with ordinary grenade and laser terminal guidance shell. The results show that the shooting efficiency and distance of the image terminal guided projectile are not related, which is higher than that of the laser terminal guided projectile, and the hit probability of the armored point target is above 0.7. This study can provide theoretical support for the specific operational application of the projectile in the next stage.

Keywords: error; hit probability; terminal guidance; effective size

0 引言

图像末制导炮弹是一类通过弹上图像导引头获取目标区图像并回传至地面站, 由地面站人员观察图像并寻找和锁定目标, 进而引导炮弹打击的新型智能炮弹, 使用的是人在回路的打击方式。相比较而言, 激光末制导炮弹需要对目标进行激光指示, 作战使用时不太方便, 而电视制导炮弹则通过地面控制站实现制导, 保障要求低、抗干扰能力强, 与激光末制导炮弹具有互补性。很多学者研究过激光末制导炮弹的射击效率, 但对图像末制导炮弹的研究并不多, 因此有必要对图像末制导炮弹的射击效率进行分析, 为后期具体运用做指导。

1 图像末制导炮弹工作过程

图像末制导炮弹弹丸出炮口后尾翼张开, 弹丸进入无控飞行段。当弹丸掠过弹道顶点时, 惯性陀螺开始测量弹体下滑角, 根据卫星定位得到实时炮

弹的坐标、速度信息以及目标坐标, 解算生成控制指令从而控制炮弹向目标区域飞行。接近目标区域时, 炮弹将导引头探测的目标区域图像实时发送到地面站, 地面操作手观察图像, 搜索发现目标后, 通过鼠标点击锁定目标, 系统自动跟踪目标并调整弹丸飞行姿态, 炮弹在飞行过程中如果出现偏差, 操作手可通过重复多次点击目标实现炮弹弹道修正, 人为操作误差对炮弹命中概率的影响可以忽略。随着炮弹距目标距离越来越近, 目标越来越清晰, 操纵手点击位置越来越精确, 最终控制弹丸准确飞向选定的目标从而完成对目标的毁伤。如图 1 所示, 图像制导弹外弹道可以分成无控段、卫星中制导段和图像末制导段。

2 毁伤概率计算

射击效率是指在不同射击条件下完成射击任务的好坏程度, 其指标有毁伤程度、毁伤概率、弹药

收稿日期: 2021-07-11; 修回日期: 2021-08-20

作者简介: 陈朋(1991—), 男, 江西人, 硕士, 从事武器装备作战运用研究。E-mail: chenpeng9314@163.com。

平均消耗量、所需平均时间，笔者采用的指标为毁伤概率^[1]。

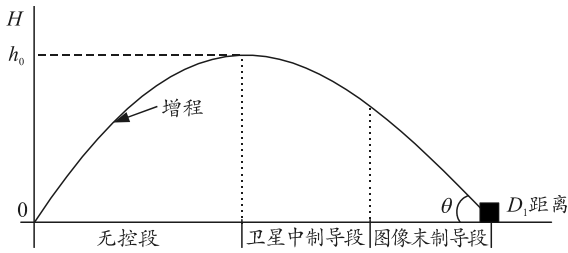


图 1 图像制导弹外弹道

2.1 射击误差分析

根据图像末制导炮弹的射击特点，可以把整个飞行弹道划分为 3 段：无控段、中制导段、末制导段。无控段飞行与普通榴弹相似，其误差主要有诸元误差、散布误差，远程射击时还有发动机增程误差，对运动目标射击时还包括预测误差，即目标在某个时刻的预测位置与在该时刻目标真实位置之间的误差；中制导段误差主要有侦察定位误差、卫星定位误差、制导误差；末制导段误差主要有操纵手锁定位置误差、制导误差。误差组成如图 2 所示。

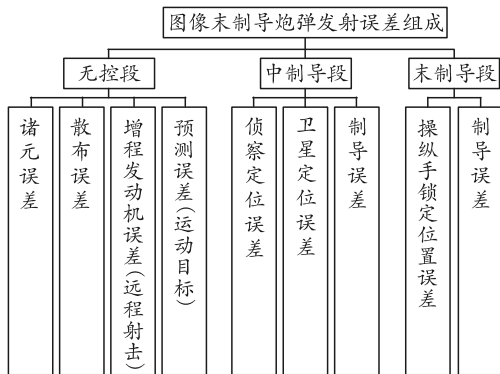


图 2 误差组成

2.2 构建计算模型

根据图像末制导炮弹的作用过程可知，该弹毁伤目标的概率受操纵手搜索发现并锁定目标概率、各类误差以及目标特性影响。故单发炮弹的毁伤概率 P 可以表示为：

$$P=P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \quad (1)$$

式中： P_1 为操纵手发现并锁定目标的概率； P_2 为炮弹在各类误差条件下的命中概率； P_3 为单发毁伤概率，且 $P_3=1/\omega$ ， ω 为毁伤目标所需命中弹数的数学期望。

图像末制导炮弹射击的目标多为重要点目标或幅员目标的重点部位，包括指挥所、装甲目标、通信枢纽、导弹发射装置等。笔者以装甲目标为目标对象，且目标毁伤幅员(设为 S_3) 近似为矩形，其边

分别平行于 X 轴和 Z 轴，正面为 $2L_z$ ，纵深为 $2L_x$ 。

对于 P_1 ，由于该概率的大小受到人员素质、地形环境、目标隐蔽性、能见度等多种因素的影响，且实弹射击数据较少，难以计算，在计算时可以进行假设。

对于 P_2 ，由于没有足够的实弹射击数据作支撑，下面主要以建立数学模型并采用统计试验法的方式进行计算。参考激光末制导炮弹命中概率的计算模型^[2]，将 P_2 分成 3 部分命中概率的乘积，即设无控段与中制导段存在的有效幅员，设为 S_1 ，命中该有效幅员的概率为 P_{21} ；中制导段与末制导段之间存在的有效幅员，设为 S_2 ，命中 S_2 的概率为 P_{22} ；最后末制导段炮弹命中目标的概率设为 P_{23} 。则：

$$P_2=P_{21} \cdot P_{22} \cdot P_{23} \quad (2)$$

借鉴舰炮电视末制导炮弹有效幅员的计算方法^[3]，通常目标在整个导引头的视场内才能被搜索发现，导引头开机后对地面的观察区域为一曲面，面积大小与导引头启动时的高度、视场角以及弹轴线倾斜角度有关。为方便研究，将导引头的观察区域等面积转换为正方形，其边分别平行于 X 轴和 Z 轴，设其边长为 $2a$ 。如图 3 所示，目标包含于观察区域时，操纵手才可能搜索和发现目标，同时还需考虑炮弹能否机动飞行至目标。

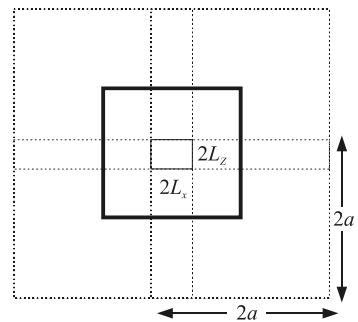


图 3 有效幅员 S_2

假设观察区域的中心位置为炮弹的落点，则图中黑线方框区域即为有效幅员 S_2 的约束条件之一，其面积为 $4(a-L_z)(a-L_x)$ ，另一约束条件是末制导段炮弹的最大机动飞行范围。有效幅员 S_1 由有效幅员 S_2 、炮弹所受法向过载及中制导段持续时间决定，根据现有资料显示，炮弹舵机可以提供最大为 $1.5g$ 的法向加速度，中制导的飞行时间在 $30\sim 40s$ ，中制导段开始于弹道顶点，此时只有水平速度，炮弹在中制导段飞行约 $1/3$ 时间后，其弹道倾角变化缓慢，至末制导阶段基本可以认为弹道倾角和速度保持不变^[4]，中制导段结束时的弹道倾角约在 $20\sim 30^\circ$ ，据此可以估算一个炮弹较小机动范围。以中制

导时间 30 s, 弹道顶点速度 $v_0=200$ m/s, 结束时弹道倾角 20° , $g=9.8$ m/s 计算, 可得炮弹较小方向机动范围为:

$$\Delta f = \pm 1/2 \cdot a \cdot t^2 = \pm 1/2 \cdot 1.5 \cdot 9.8 \cdot 30^2 = \pm 6\ 615 \text{ m}.$$

距离上采取分段计算, 前 1/3 段:

$$\begin{aligned} \Delta d_1 &= \pm \int_0^{18^\circ} a \sin \theta \cdot t^2 d\theta / 2 = \\ &\pm \int_0^{18^\circ} 1.5 \cdot 9.8 \sin \theta \cdot 10^2 d\theta / 2 = \pm 36 \text{ m}. \end{aligned}$$

经过前 1/3 段的飞行后, 炮弹水平速度为

$$v_1 = 200 \pm \int_0^{18^\circ} a \sin \theta \cdot t d\theta = (200 \pm 7) \text{ m/s},$$

则后 2/3 段:

$$\begin{aligned} \Delta d_2 &= \pm (207 \cdot 20 + 1.5 \cdot 9.8 \cdot \sin 19^\circ \cdot 20^2 / 2 - \\ &200 \cdot 20) = \pm 2\ 533 \text{ m}. \end{aligned}$$

则最终的距离机动范围为:

$$\Delta d = \Delta d_1 + \Delta d_2 = \pm 2\ 569 \text{ m}.$$

假设末制导段炮弹的弹道倾角为 25° , 炮弹在距目标水平距离约为 3 000 m 处开始末制导, 末制导段时间以 12 s 计算, 则根据文献[1]相关公式可以求出导引头的观察面积约为 1 483 400 m^2 , 则 a 为 609 m. 同样也可以计算出末制导段炮弹的最大方向和距离机动范围为:

$$\Delta f' = \pm a \cdot t^2 / 2 = \pm 1.5 \cdot 9.8 \cdot 12^2 / 2 = \pm 1\ 058 \text{ m};$$

$$\Delta d' = \pm a \sin \theta \cdot t^2 / 2 = \pm 1.5 \cdot 9.8 \cdot \sin 25^\circ \cdot 12^2 / 2 = \pm 447 \text{ m}.$$

则机动面积为 2 126 $\text{m} \times 894$ m, 假设装甲目标幅员为 1.5 $\text{m} \times 3$ $\text{m} = 4.5$ m^2 , 则使目标始终位于观察区域内应满足的面积为 1 216.5 $\text{m} \times 1$ 215 m, 在满足炮弹机动飞行至目标和目标始终处于观察区域内 2 个条件时, 有效幅员 S_2 应为 1 216.5 $\text{m} \times 894$ m, 远大于 4.5 m^2 , 可见小幅员目标对有效幅员 S_2 的影响很小, 故可以不考虑目标幅员直接认定 S_2 为 1 218 $\text{m} \times 894$ m. 据此可以计算出有效幅员 S_1 的正面积为 14 446.5 m, 纵深为 6 032 m.

设诸元误差的距离中间误差和方向中间误差分别为 E_d 和 E_f , 则诸元误差的概率密度函数为:

$$\begin{aligned} f(X_c, Z_c) &= \\ &(\rho^2 / (\pi E_d E_f)) \exp[-\rho^2 (X_c^2 / E_d^2 + Z_c^2 / E_f^2)]. \quad (3) \end{aligned}$$

增程发动机误差主要为射程误差及增加了散布误差中的距离误差, 该误差是由于点火时间精度、装药量误差、药剂长度不同和火药作用时间不同等因素造成的, 其中主要的影响因素有点火时间精度、发动机总冲偏差。由于图像末制导炮弹与普通增程弹在弹重、气动外形、火箭发动机装药方面差异不

大, 且缺少相关数据, 故以点火时间精度对普通增程榴弹射程的影响近似代替图像末制导炮弹。炮弹在射角约为 60° 时, 点火精度对射程的影响最大, 假定点火时间误差为 ± 1 s, 此时射程的散布误差最大为 234 m 和 -270 $\text{m}^{[5]}$ 。根据总冲计算公式知:

$$I = I_{SP} \cdot m_P. \quad (4)$$

其中: I 为总冲; I_{SP} 为比冲; m_P 为装药量。假定比冲散布误差与装药量散布误差相互独立, 则有:

$$\Delta I / I = \Delta I_{SP} / I_{SP} + \Delta m_P / m_P. \quad (5)$$

由于没有相关资料, 装药量的相对偏差和比冲偏差参照激光末制导炮弹数据, 分别为:

$$\Delta m_P / m_P = 0.54\%, \quad \Delta I / I = 1.5\%.$$

根据相关文献关于射程与火箭装药量、比冲的模型和计算数据^[6-7], 可以得出两者距离误差, 分别为 ± 128 m 和 ± 84 m, 故总冲误差对射程的影响最大约为 210 m, 在此扩大为 250 m. 故由发动机偏差造成的距离散布误差最大可达 480 m 和 -520 m.

设散布误差的距离中间误差和方向中间误差分别为 B_d 和 B_f , 则散布误差的概率密度函数为:

$$\begin{aligned} h(X_s, Z_s) &= \\ &(\rho^2 / (\pi B_d B_f)) \exp[-\rho^2 (X_s^2 / B_d^2 + Z_s^2 / B_f^2)]. \quad (6) \end{aligned}$$

在远程射击时, 散布误差包含了发动机增程误差, 故此时的距离散布误差比正常近区射击大得多。

在诸元误差为 (x_c, z_c) 的条件下, 发射误差的概率密度函数为:

$$\begin{aligned} h(X, Z) &= (\rho^2 / (\pi B_d B_f)) \\ &\exp\{-\rho^2 [(X - X_c)^2 / B_d^2 + (Z - Z_c)^2 / B_f^2]\}. \quad (7) \end{aligned}$$

发射时若不计算设计修正量 (设修正量分别为 ΔD 和 ΔF), 则此时的发射误差为:

$$\begin{aligned} h(X, Z) &= (\rho^2 / (\pi B_d B_f)) \exp\{-\rho^2 [(X - X_c - \\ &\Delta D)^2 / B_d^2 + (Z - Z_c - \Delta F)^2 / B_f^2]\}. \quad (8) \end{aligned}$$

考虑误差的整体性, 参照文献[2]的计算模型, 则可以求得对固定目标射击的单发炮弹落入有效幅员 S_1 的概率为:

$$\begin{aligned} P_{21} &= \iint_{S_1} (\rho^2 / (\pi E_d E_f)) \exp[-\rho^2 (X_c^2 / E_d^2 + Z_c^2 / E_f^2)] \cdot \\ &P_{21}(X_c, Z_c) dX_c dZ_c. \quad (9) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} P_{21}(X_c, Z_c) &= \\ &\iint_{S_1} (\rho^2 / (\pi B_d B_f)) \exp\{-\rho^2 [(X - X_c - \\ &\Delta D)^2 / B_d^2 + (Z - Z_c - \Delta F)^2 / B_f^2]\} dX dZ. \quad (10) \end{aligned}$$

若对运动目标射击, 则还包含了预测误差, 根据实际情况可近似认为该误差服从正态分布, 且距离中间误差和方向中间误差相同, 设为 E_y , 则其概率密度函数为:

$$g(X_y, Z_y) = (\rho^2 / (\pi E_y^2)) \exp[-\rho^2 (X_y^2 + Z_y^2) / E_y^2] \quad (11)$$

则在预测误差为 (x_y, z_y) , 诸元误差为 (x_c, z_c) , 不修正射击条件 (修正量分别为 ΔD 和 ΔF) 的条件下, 发射误差的概率密度函数为:

$$h'(X, Z) = (\rho^2 / (\pi B_d B_f)) \exp\{-\rho^2 [(X - X_y - X_c - \Delta D)^2 / B_d^2 + (Z - Z_y - Z_c - \Delta F)^2 / B_f^2]\} \quad (12)$$

单发炮弹落入有效幅员 S_1 的概率为:

$$P'_{21} = \iint_{S_1} (\rho^2 / (\pi E_y^2)) \exp[-\rho^2 (X_c^2 + Z_c^2) / E_y^2] \cdot P_{21}(X_y, Z_y) dX_y dZ_y \quad (13)$$

其中

$$P_{21}(X_y, Z_y) = \iint_{S_1} (\rho^2 / (\pi E_d E_f)) \exp[-\rho^2 (X_c^2 / E_d^2 + Z_c^2 / E_f^2)] \cdot P'_{21}(X_c, Z_c) dX_c dZ_c \quad (14)$$

$$P'_{21}(X_c, Z_c) = \iint_{S_1} (\rho^2 / (\pi B_d B_f)) \exp[-\rho^2 (X - X_y - X_c - \Delta D)^2 / B_d^2 + (Z - Z_y - Z_c - \Delta F)^2 / B_f^2] dX dZ \quad (15)$$

在炮弹飞行的中制导段, 对固定目标射击时, 弹道的实际落点受侦察定位误差、卫星定位误差和制导误差综合影响而产生误差, 侦察定位误差对炮弹中制导段弹道影响最大, 根据炮兵侦察方法不同, 侦察定位误差的大小也不同, 可以近似认为该误差也服从正态分布, 且距离中间误差与方向中间误差相等, 设为 E_z 。卫星定位误差主要是由于卫星系统算法、制造工艺、信息传输延迟等因素决定, 可以认为这些因素造成的误差是服从正态分布的, 距离中间误差等于方向中间误差, 设为 E_w 。制导误差主要是由于炮弹飞行过程中舵机工作精度、弹丸轴线抖动、弹体惯性等因素造成。该误差也服从状态分布, 距离中间误差也等于方向中间误差, 设为 E_m 。中制导段的误差由以上误差合成而来, 且上述误差相互独立, 故中制导段的中间误差 (设为 E_2) 可以表示为:

$$E_2 = \sqrt{E_z^2 + E_w^2 + E_m^2} \quad (16)$$

中制导段的误差概率密度函数为:

$$y(X_2, Z_2) = (\rho^2 / (\pi E_2^2)) \exp[-\rho^2 (X_2^2 + Z_2^2) / E_2^2] \quad (17)$$

则其命中有效幅员 S_2 的概率为:

$$P_{22} = \iint_{S_2} y(X_2, Z_2) dX_2 dZ_2 \quad (18)$$

在末制导阶段, 假定目标被锁定而不存在预测误差, 此时炮弹向目标飞行的过程中主要产生制导误差。故此时的命中概率为:

$$P_{23} = \iint_{S_3} (\rho^2 / (\pi E_m^2)) \exp[-\rho^2 (X_3^2 + Z_3^2) / E_m^2] dX_3 dZ_3 \quad (19)$$

则最终可求得对运动目标的命中概率为

$$P'_2 = P'_{21} \cdot P_{22} \cdot P_{23} \quad (20)$$

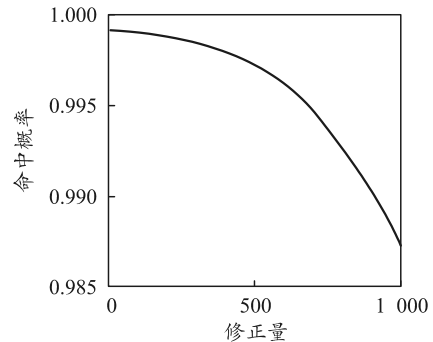
对于 P_3 , 考虑目前炮弹技术的成熟和可靠性, 可近似认为炮弹命中目标后正常爆炸的概率为 1, 同时设毁伤目标所需的命中弹数的期望值为 1, 则 $P_3=1$ 。

2.3 仿真计算

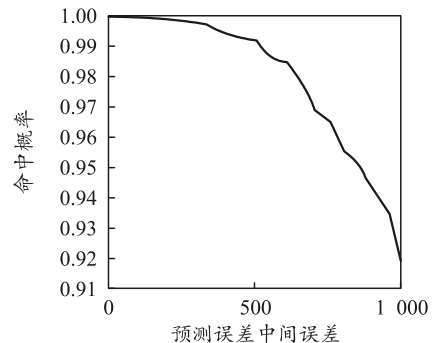
通过计算机模拟产生各类误差, 根据各类幅员大小设定约束条件, 重复多次模拟计算, 计算相关概率。

按照下列数据计算相关概率, 得到如下结果:

1) 远程对运动目标射击, $E_d=100$ m, $E_f=80$ m, $B_d=600$ m, $B_f=40$ m, $\Delta F=0.6\Delta D$, $E_z=20$ m, $E_w=10$ m, $E_m=0.5$ m, 在预测误差中间误差为 50 m, 距离修正量为 100 m 时, 分别改变预测误差和距离修正量, 考虑到运算量的关系, 得到图 4。



(a) 命中有效幅员 S_1 的概率 P_{21} 与修正量的关系



(b) 命中有效幅员 S_1 的概率 P_{21} 与预测误差的关系

图 4 命中有效幅员 S_1 的概率 P_{21} 分别与修正量和预测误差的关系

2) 远程对固定目标射击时, $E_f=0.8 E_d$, $B_f=0.5 B_d$, $E_z=20$ m, $E_w=10$ m, $E_m=0.5$ m, $L_x=1.5$ m, $L_z=0.75$ m, $\Delta F=0.5\Delta D$, $\Delta D=100$ m, 在 E_d 为 100 m, B_d 为 600 m 时分别改变 B_d 和 E_d , 如图 5 所示。

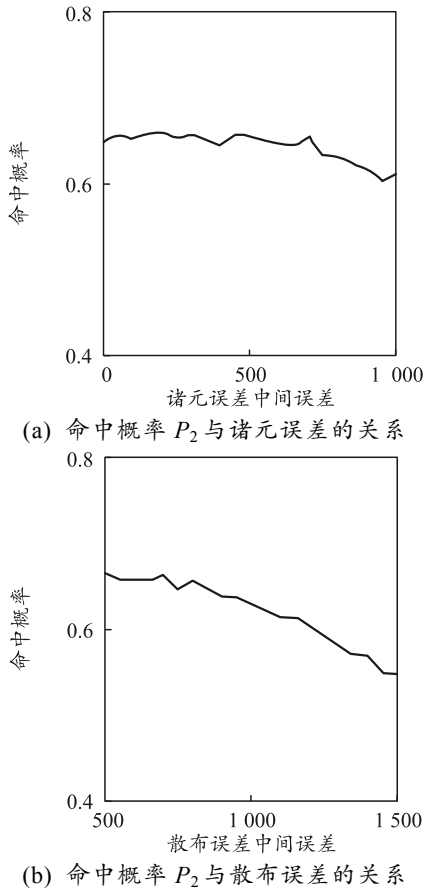


图 5 命中概率 P_2 分别与诸元误差和散布误差的关系

3) 远程对固定目标射击时, $E_f=0.8E_d$, $E_d=80$ m, $B_f=0.5B_d$, $B_d=50$ m, $L_x=1.5$ m, $L_z=0.75$ m, $\Delta F=0.5\Delta D$, $\Delta D=100$ m, 得到命中目标的概率 P_2 与中制导误差的关系如图 6 所示。

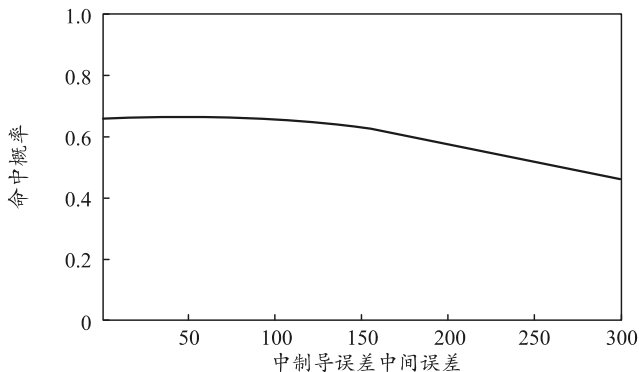


图 6 命中概率 P_2 与中制导误差的关系

4) 远程对固定目标射击时, $E_d=100$ m, $E_f=80$ m, $B_d=600$ m, $B_f=40$ m, $L_x=2$ m, $F=0.5$, $\Delta D=50$ m, 在 L_x 为 1.5 m, E_m 为 0.5 m 时分别改变 E_m 和 L_x , 得

到图 7。

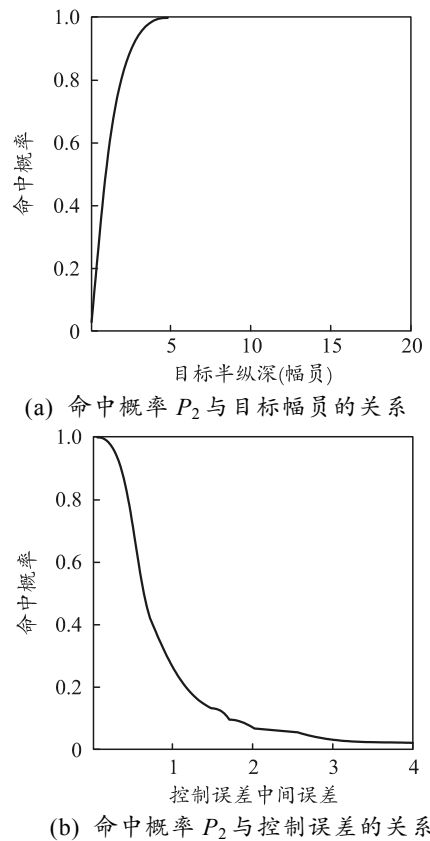


图 7 命中概率 P_2 分别与目标幅员和控制误差的关系

5) 与激光末制导炮弹和普通榴弹作对比, 激光末制导炮弹近程对固定目标射击时命中概率主要受诸元误差、散布误差、指示误差、导引误差、准直误差的影响^[2,8], 榴弹则只受诸元误差和散布误差的影响。近程对固定目标射击, 修正修正量, $E_d=100$ m, $E_f=80$ m, $B_d=80$ m, $B_f=40$ m, $L_x=2L_z$, 改变 L_x 的值, 得到图 8。

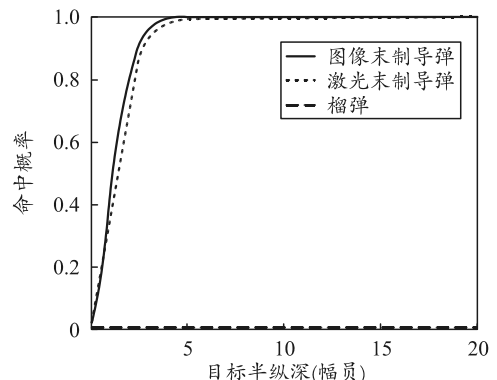


图 8 各弹种近程对固定目标射击的命中概率

6) 同样与激光末制导炮弹和普通榴弹作对比, 炮弹对运动目标行远程射击, 不修修正量, $E_y=50$ m, $E_d=100$ m, $E_f=80$ m, $B_d=600$ m, $B_f=40$ m, $L_x=2L_z$, 改变 L_x 的值, 得到图 9。

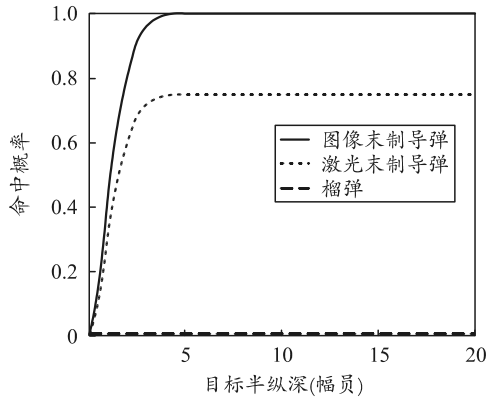


图 9 各弹种远程对运动目标射击的命中概率

3 结果分析

在不考虑操纵手搜索发现目标概率的情况下,综合以上结果可以看出,无控段、中制导段和末制导段对炮弹命中目标概率的影响依次增大。根据图 4、5 的计算结果,结合实际诸元误差、散布误差、预测误差可能及修正量的值,可以看出除非出现极小概率的意外事件,不然炮弹命中有效幅员 S_1 的概率基本等于 1,说明炮弹在使用上具有更快的反应速度。从图 6 看,中制导段对炮弹命中概率的影响大约在 0.2 以内,卫星定位误差和控制精度误差的总误差通常在 10 m 左右,因此,在中制导段,影响炮弹命中概率的主要因素便是侦察定位误差。从图 7 可以看出,主要是控制误差和目标幅员在影响炮弹命中概率,实际情况下图像末制导炮弹的控制误差很小,以 0.5 m 算,无论远程还是近程,无论固定目标还是运动目标,炮弹对装甲目标的命中概率都在 0.7 左右。从图 8 和 9 可以看出,近程对小幅员目标甚至点目标射击时,图像末制导炮弹命中概率稍高于激光末制导炮弹,远高于普通榴弹,远程对小幅员目标射击时,图像末制导炮弹的命中概率较激光末制导炮弹高。因此,距离对图像末制导

炮弹几乎没有影响。以上情况建立在操纵手能搜索发现目标的情况下,只有保证操纵手的搜索发现概率才能保证图像末制导炮弹的高命中率,因此必须重视对操纵手判读图像、搜索发现目标的训练。

4 结束语

笔者参照激光末制导射击效率分析模型,从射击原理出发,建立了基于外弹道无控段、中制导段、末制导段的射击效率模型,通过计算机仿真计算得出了各误差对射击效率的影响大小,并对比分析了激光末制导炮弹、普通榴弹的射击效率。结果表明:在不考虑操纵手搜索发现目标的情况下,图像末制导炮弹的射击效率与距离关系不大,整体上高于激光末制导炮弹,对装甲类点目标的命中概率基本保持在 0.7 以上。

参考文献

- [1] 唐克,邢立新,赵太平. 现代炮兵射击学[M]. 北京: 军事科学出版社, 2004.
- [2] 李桂成. 激光末制导炮弹作战效能分析及应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2002.
- [3] 朱惠民,王航宇,石章松,等. 电视末制导炮弹射击效力分析[J]. 海军工程大学学报, 2016, 28(3): 103-107.
- [4] 刘玉文,侯明. 电视制导炮弹弹道建模与仿真研究[J]. 炮兵学院学报, 2012.
- [5] 吴义峰. 底排火箭复合增程弹射程优化研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [6] 刘鹏,王雨时,闻泉,等. 火箭增程发动机点火时间精度对弹丸射程的影响[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(5): 99-102.
- [7] 钟文超. 复合增程外弹道优化设计及实验结果分析[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2008.
- [8] 俞波. 激光末制导炮弹制导误差分析[J]. 兵工自动化, 2018, 37(9): 46-48.