

doi: 10.7690/bgzd.2018.09.012

激光末制导炮弹制导误差分析

俞波

(陆军炮兵防空兵学院教务处, 合肥 230031)

摘要: 针对激光末制导炮弹受许多随机因素影响会出现脱靶的问题, 对激光末制导炮弹制导误差进行分析。给出激光末制导炮弹的工作过程, 建立误差的数学模型, 采用数值积分算法, 定量分析制导误差对命中精度的影响, 并给出提高末制导炮弹射击精度的措施。结果表明: 在射击过程中, 照射误差、制导精度、目标幅员等因素会直接影响激光末制导炮弹的命中精度。该研究可为末制导炮弹的作战使用提供理论参考。

关键词: 激光末制导炮弹; 制导误差; 命中概率

中图分类号: TJ305 **文献标志码:** A

Guidance Error Analysis of Laser Terminal Guidance Shell

Yu Bo

(Affairs Office, Army Artillery Air Defense Corps College, Hefei 230031, China)

Abstract: Aiming at the problem that the laser-guided projectile will miss the target due to many random factors, the guidance error of the laser-guided projectile is analyzed. The working process of the laser-guided projectile is given, the mathematical model of the error is established, the influence of the guidance error on the hitting precision is analyzed quantitatively by using the numerical integral algorithm, and the measures to improve the shooting accuracy of the terminal guided projectile are given. The results show that during the shooting process, the illumination error, guidance precision, target size and other factors will directly affect the accuracy of the laser-guided projectile. This study provides a theoretical reference for the operational use of terminal guided projectiles.

Keywords: laser terminal guidance shell; guidance error; hitting probability

0 引言

现代战争, 目标呈现小型化、易机动的特点。对目标进行精确打击, 已经成为现代战争的主要作战样式。激光末制导炮弹具有很高的命中精度, 一般达 80%~90%, 使炮兵具备了远程精确打击点目标的能力, 是目前炮兵的“杀手锏”武器^[1-2]。

尽管激光末制导炮弹命中精度很高, 但并非百发百中, 在命中目标过程中, 仍受许多随机因素的影响, 也会出现脱靶现象, 主要原因是由于制导误差造成。笔者进行末制导炮弹制导误差分析, 使该武器系统充分发挥其应有的作战效能, 对提高炮兵精确打击能力具有十分重要的意义。

1 激光末制导炮弹的工作过程

火炮发射瞬间, 阵地的指挥同步器向观察所的执行同步器发送同步信号, 执行同步器控制激光目标指示器工作, 当弹丸飞行到预定位置时, 激光目标指示器发射激光束照射目标, 弹上导引头探测并接收到激光反射信号后, 引导弹丸命中目标。

从上述工作过程可以看出, 激光末制导炮弹对目标的命中过程大致可分为 2 个阶段: 1) 自由飞行段。从弹丸发射瞬间到弹上导引头接收到激光信号, 产生制导控制指令瞬间这个阶段, 其弹道特征与普通炮弹弹道几乎一样。2) 制导段。从弹上导引头产生制导控制指令瞬间到命中目标这个阶段, 有激光反射脉冲的制导。弹道示意图如图 1 所示。

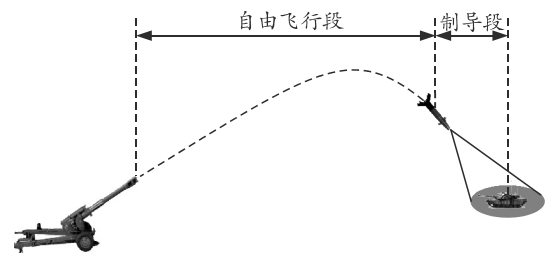


图 1 末制导炮弹弹道

在制导段, 导引头有个视场角, 理想情况下, 目标恰好处于导引头视场中心, 这种情况下, 制导精度最高。由于受到各种因素的影响, 弹丸可能偏远, 也可能偏近, 可能左偏, 也可能右偏。但只有弹丸落达在这个区域内, 导引头才能有效接收到激

收稿日期: 2018-05-15; 修回日期: 2018-07-17

作者简介: 俞波(1983—), 男, 安徽人, 硕士, 从事作战指挥研究。

光反射信号，弹丸才可能被制导，否则，弹丸将不可能被制导。这个区域被称为有效制导幅员，如图 2 所示。

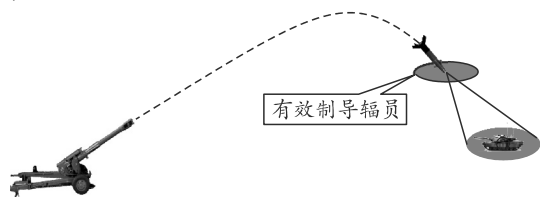


图 2 有效制导幅员

通过计算与实践证明，在现有的决定射击开始诸元方法的精度范围以及正常的射弹散布条件下，射弹落达有效制导幅员的概率非常高，几乎为 1；因此，制导段是影响激光末制导炮弹命中概率的主要原因。

2 制导误差数学模型

在制导段有 2 个关键环节：1) 激光目标指示器照射目标的环节；2) 弹上导引头接收激光信号，导引弹丸命中目标的环节。在这 2 个环节中，由于受各种因素的影响，都会产生误差，进而会影响命中概率。照射环节产生的误差称为照射误差，导引环节产生的误差称为导引误差。

2.1 照射误差

照射误差主要包括 3 方面：

1) 激光能量中心偏移。

激光目标指示器发射激光束照射目标，会在目标上形成一个光斑^[3]。理想情况下，光斑内的能量是服从高斯分布的，光斑中心的能量最强，弹丸将沿着光斑中心的反射光路飞行，如图 3 所示。

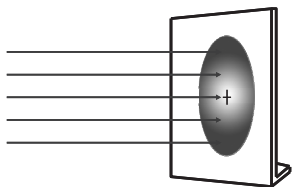


图 3 理想状态下的激光光斑

实际上，战场环境往往比较恶劣，空气中弥漫着大量的烟尘、烟雾等。这些因素会对激光信号产生吸收、散射、折射等效应，造成激光能量中心偏移^[4]，如图 4 所示。

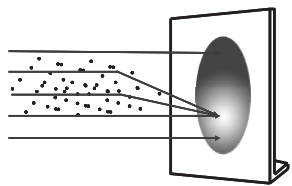


图 4 干扰状态下的激光光斑

激光能量中心偏移，会使弹丸沿着能量中心飞行，从而使弹着点偏离瞄准点而产生误差，进而影响命中概率。

2) 照射距离。

激光光斑的大小也会影响命中概率。激光光斑的大小与照射距离的函数关系为

$$R = D_{zs} \tan\left(\frac{\theta_s}{2}\right) \approx \frac{1}{2} D_{zs} \theta_s \quad (1)$$

式中： R 为激光光斑半径； D_{zs} 为激光照射距离，m； θ_s 为激光束散角， 0.4×10^{-3} rad。

由式(1)可知，激光光斑随照射距离的增大而增大。如果照射距离过远，激光光斑大于目标幅员，如果目标背景对激光反射强度高于目标，就会使弹丸命中目标背景而脱靶。所以激光末制导炮弹在作战使用时，通常通过控制照射距离，以减小照射误差，增大命中概率。

3) 准直误差。

此外，由于制导工艺的原因，激光目标指示器本身的光学瞄准轴与激光发射轴很难重合，也会引起照射误差，该误差通常称为准直误差。

上述因素中，激光能量中心偏移是引起照射误差的主要原因。通常认为激光能量中心在光斑内任一点是等概率出现的，所以，照射误差近似服从圆内均匀分布。为了计算方便，将激光光斑等效为面积相等的正方形，假设正方形边长为 $2L$ ，则照射误差概率密度函数为：

$$f_z(x, z) = \begin{cases} \frac{1}{4L^2} & -L \leq x \leq L, -L \leq z \leq L \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 导引误差

导引头有一个多透镜光学聚焦系统和一个八单元光敏场，目标反射的激光信号经光学聚焦后，成像于八单元光敏场，如图 5 所示。导引头测量出目标信息点与弹轴中心的偏差量，产生控制指令，控制舵机调整弹丸姿态，使弹轴向目标信息点靠拢，逐渐将弹丸导引到目标上。

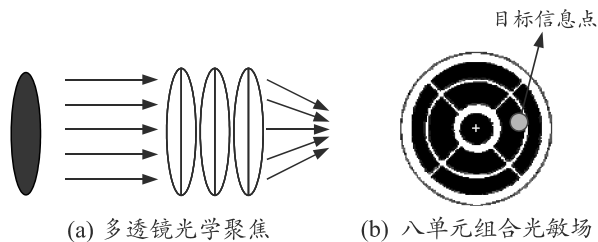


图 5 导引头工作原理

在导引头工作过程中，会受到各种随机因素的影响而产生误差。归纳起来，主要有 3 个因素：

1) 目标反射特性。

目标反射特性，如目标材质、表面形状、表面粗糙程度，都会对激光反射信号的强度和方向产生影响，而影响命中精度。

2) 激光传输介质。

激光信号在空气中传播，受传输介质，如云、雨、雾霾、烟尘的影响，能量会衰减、信号会变弱、反射距离会变短，导致导引时间变短，就可能使弹丸姿态调整不到位，而影响命中精度^[5]。

3) 导引头引起的误差。

如图 5 所示。由于制造工艺的原因，导引头也会产生误差。导引头的光敏场中心轴、物镜轴、弹轴三者应该是重合的，实际上很难做到，它们之间总是存在偏差，从而影响命中精度。

根据概率论的大数定理及中心极限定理可知，导引误差服从正态分布，而且这些因素对激光反射信号在距离和方向上的影响相同，所以导引误差的距离中间误差和方向中间误差相等，其概率密度函数为：

$$f_d(x, z) = \frac{\rho^2}{\pi E_m^2} \exp\left[-\rho^2 \frac{(x^2 + z^2)}{E_m^2}\right] \quad (3)$$

式中 E_m 为距离中间误差(方向中间误差)。

2.3 制导误差

事实上，在制导段，照射误差和导引误差共同影响激光末制导炮弹的制导精度。为了方便研究，将照射误差和导引误差合成，合成后的误差称为制导误差。根据误差合成理论^[7]，制导误差的分布规律取决于 L 和 $5E_m$ 的相对大小，当 $L \leq 5E_m$ 时，制导误差近似服从正态分布；当 $L \geq 5E_m$ 时，制导误差近似服从均匀分布。

假设激光末制导炮弹 $E_m \approx 0.5$ m， $5E_m \approx 2.5$ m。不同照射距离所对应的 L 值如表 1 所示。

表 1 不同照射距离对应的 L 值 m

照射距离	100	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000	7 000	8 000
L	0.18	0.35	0.53	0.71	0.89	1.06	1.24	1.41

若按照照射距离 5 km 计算，此时 $L=0.89$ m $<$ 2.5 m，所以激光末制导炮弹制导误差可以用正态分布近似替代。

设制导误差的中间误差为 E'_m ，制导误差的概率密度函数为：

$$f_m(x, z) = \frac{\rho}{\pi E_m^2} \exp\left[-\rho^2 \frac{(x^2 + z^2)}{E_m^2}\right] \quad (4)$$

根据方差的定义以及照射误差和导引误差的数字特征可知，制导误差的方差与照射误差和导引误差的方差存在如下关系：

$$\frac{E_m'^2}{2\rho^2} = \frac{L^2}{3} + \frac{E_m^2}{2\rho^2},$$

则

$$E_m' = \sqrt{E_m^2 + 0.152L^2} \quad (5)$$

3 制导误差对命中精度的影响

由于制导误差服从正态分布，根据式(4)可知制导段对目标的命中概率为：

$$P = \int_{-l_x}^{l_x} \int_{-l_z}^{l_z} \frac{\rho^2}{\pi(E_m'^2 + 0.152L^2)} \exp\left[-\rho^2 \frac{(x^2 + z^2)}{E_m'^2 + 0.152L^2}\right] dx dz \quad (6)$$

由式(6)可知，制导段影响激光末制导炮弹命中精度的因素主要有：1) 目标幅员 $2l_x \times 2l_z$ ；2) 照射距离(照射距离与 L 的大小有关)；3) 激光末制导炮弹的制导精度(E_m)。利用数值积分法，对式(6)进行计算，结果如图 6、图 7 所示。

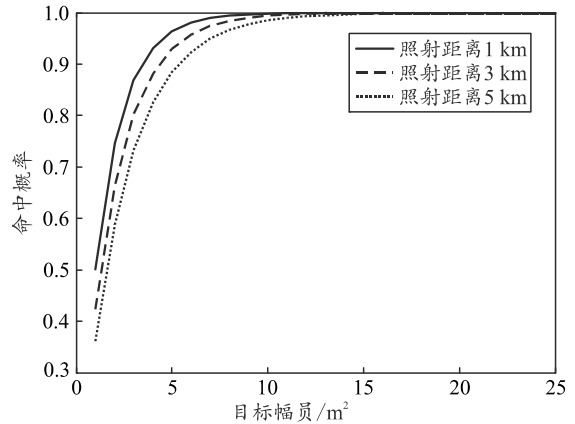


图 6 计算结果

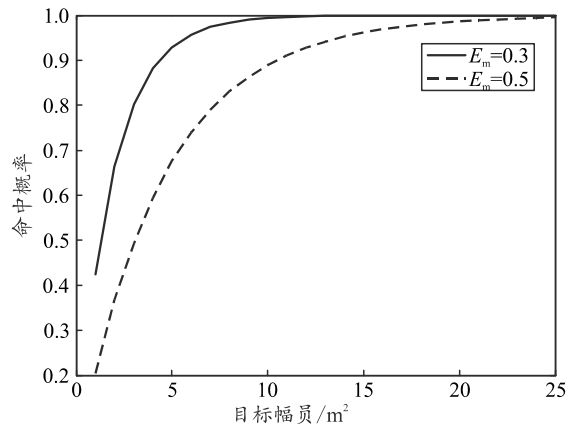


图 7 计算结果

进的过程，最终经过调压阀的调节控制，输出的油压在时间上及压力大小上最终满足离合器油腔所需压力的大小，满足换挡要求。然而在调压阀卡滞的情况下，主调压阀的输出压力降低，在同样条件下，不能满足驱动离合器活塞运动到规定的位置，导致换挡不便，影响装备的作战效能的发挥。

4 结论

1) 调压阀的输出特性直接决定了离合器换挡过程中的平稳性，从而影响到车辆的换挡品质，调压阀芯容易出现卡滞现象^[7]，在该型装甲车辆维修保养时，当测得的调压阀输出油压的压力在建立过程中出现过早或推迟现象，可以考虑检查阀芯是否卡滞，并及时更换。

2) 根据将主调压阀的输出油压和理论冲油特性曲线对比，发现换挡控制系统内部存在耦合关系。

3) 在阀芯卡滞以及油泵效率降低(液压油缸流量较小)时，会降低调压阀的输出压力，进一步会减

(上接第 48 页)

由图 6 可知：在制导段，激光末制导炮弹的命中概率随照射距离的增大而减小，随目标幅员的增大而增大。

图 7 是 $E_m=0.3\text{ m}$ 和 $E_m=0.5\text{ m}$ 的计算结果，显然，在相同的照射距离上，对同一目标射击时，激光末制导炮弹的制导精度越高，命中概率越大。

4 结论

通过上述分析发现，在射击过程中，照射误差、制导精度、目标幅员等因素会直接影响激光末制导炮弹的命中精度。其中目标幅员不以指挥员的意志为转移，而照射误差和制导精度可以采取相应措施进行增减：一是加强分队的训练水平，提高激光照射手的业务能力，减小照射误差；二是加强武器系

少阀芯以及油管的寿命，造成换挡不及时，换挡冲击过大，影响装甲车辆的正常作业。在出现换挡时间上的偏差或者挂挡延迟的现象，应该首先考虑这 2 种典型故障是否发生，以便采取相应的措施。

参考文献：

[1] 毛明, 周广明, 邹天刚. 液力机械综合传动装置设计理论与方法[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2015: 12.
 [2] 付永领, 祁晓野. LMS Imagine.Lab AMESim 系统建模和仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 10.
 [3] 艾武, 李承. 电路与磁路[M]. 2 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004: 7-22.
 [4] 李瀚荪. 简明电路分析基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 78-102.
 [5] 孟非. 大功率 AT 离合器压力比例控制技术[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
 [6] 金涛涛. 综合传动装置换挡品质优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
 [7] 唐治. 履带车辆综合传动装置电液比例控制系统及其控制方法[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.

统的日常维护保养，确保武器系统始终保持良好的战术技术性能，减小制导误差；三是改进生产工艺或优化设计，提高制导精度。

参考文献：

[1] 刘怡昕. 末制导炮弹射击学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1996: 35-38.
 [2] 刘怡昕. 新弹种射击效力与运用[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1994: 46-48.
 [3] 邓开发. 激光技术与应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002: 54-58.
 [4] 中国人民解放军总参谋部军训部. 炮兵射击基础理论[M]. 北京: 解放军出版社, 2014: 56-57.
 [5] 王代智, 戴俊. 霾、雾条件下激光末制导武器作战研究[J]. 兵器装备工程学报, 2012, 33(11): 135-137.