

激光引信 12 分元探测定向起爆控制建模及仿真

苏 宏¹, 侯亚丽¹, 王 刚², 李 岗¹

- (1. 机电动态控制重点实验室, 陕西 西安 710065;
2. 西安机电信息技术研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 配合引信定向探测起爆控制参数选择问题, 提出了一种定向战斗部激光引信 12 分元探测定向起爆控制建模方法。该方法基于建立的 12 分元激光探测模型, 通过对目标方位的判别, 实施对定向战斗部的起爆方位控制。结合目标易损性模型, 通过仿真不同弹道及起爆时机对目标造成毁伤的效果, 得到了定向战斗部激光引信延时时间与毁伤效果匹配关系。仿真结果表明, 对于空中高速小目标, 引信延时时间、脱靶量及破片飞散角等参数的匹配对毁伤效果非常重要, 当延时时间不大于 2 ms 时, 脱靶量小于 8 m 时平均毁伤概率达到 0.6 以上, 脱靶量大于 10 m 时平均毁伤概率小于 0.5。建立的模型可综合分析延迟时间、脱靶量等参数对定向战斗部毁伤效果的规律。

关键词: 激光引信; 12 分元; 定向起爆控制

中图分类号: TN209 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0403003

Detonation control modeling and simulation for dodecagon-detection laser fuze

Su Hong¹, Hou Yali¹, Wang Gang², Li Gang¹

- (1. Science and Technology on Electromechanical Dynamic Control Laboratory, Xi'an 710065, China;
2. Xi'an Institute of Electromechanical Information Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aiming at optimal detonation controlling of directional warhead fuze, detonation control simulation for dodecagon-detection laser fuze was presented. Based on dodecagon-detection model, the detonation orientation was controlled by discriminating target orientation. Combining with target vulnerability model, effect of delay time on damage was simulated and analyzed on different trajectories. The simulation results show that it is very important to match the parameters such as fuze delay time, miss distance and fragment fly scattering angle for high-speed small targets in air. When delay time is no more than 2 ms, the average damage probability, if miss distance is within 8 m, is more than 0.6, and is less than 0.5 if miss distance is over 10 m. The model can comprehensively analyze the damage effects with different delay time and miss distances.

Key words: laser fuze; dodecagon; directional detonation control

收稿日期: 2020-02-18; 修订日期: 2020-03-15

作者简介: 苏宏 (1979-), 男, 副研究员, 主要从事目标特性方面的研究。Email: suhong916@163.com

0 引言

目前防空导弹一般采用杀爆战斗部,大多为轴对称结构,破片径向均匀分布,起爆后破片向四周均匀飞散。随着目标和导弹的飞行速度越来越高,高速弹目交会条件下,特别是对于无人机、巡航导弹等小目标,常规杀爆战斗部的毁伤效能会大幅降低。定向战斗部能够向给定方位输出高增益的毁伤元素,实现对空中目标的高效毁伤,是防空战斗部的重要发展方向。新一代防空反导武器系统,配备定向战斗部后毁伤效能明显增加。而定向战斗部的使用,必须以目标脱靶方位的准确识别和战斗部定向起爆的精确控制为前提^[1-2]。激光引信因其具备定距精度高、作用距离内无盲区的特性,良好的低空、超低空截止性能,在防空导弹中应用较为广泛,尤其是具备很高的角度分辨率,可以精确的感知目标相对脱靶方位,是非常适合定向战斗部使用的近炸引信^[3]。

近年来,国内外针对适配定向战斗部的引信开展了大量研究工作。郭泽荣等^[4]人针对某旋转火箭弹定向战斗部,建立了定向战斗部最佳起爆延时的数学模型,研究了六光束脉冲激光探测机理及其应用于定向战斗部时的最佳起爆延时控制。但其建模时将目标简化为杆状,对于目标不做易损性分析,视其几何中心为要害部位,认为战斗部的起爆方向垂直于弹轴。孔德浩等^[5]人为满足定向战斗部对多光束周视激光引信的延时和方位要求,依据激光探测原理建立了弹目交会过程中最佳起爆延时和最佳起爆方位角的数学模型。但其工作原理需要导弹具备相应的自转速度,如果转速太小,目标从同一个探测面两激光探测器之间穿过而没有被探测到的情况就有可能发生。针对定向战斗部引信最佳起爆控制的问题,文中提出了 12 分元激光引信定向起爆控制模型。

1 定向战斗部起爆原理

通常认为在弹目交会段,目标、弹体匀速运动,战斗部起爆后的破片沿直线运动。在弹目遭遇会的过程中,当杀伤元素沿密度最大方向击中目标时,毁伤效果最佳,就认为对应的起爆延时和角度为最佳起爆延时和最佳起爆方位角^[6-8]。定向战斗部破片预先

放置于中心位置,结构见图 1,按照精度要求的不同,主装药被隔爆板平均分为若干象限,周向上设置的起爆点越多,使用时控制角度越准确,通过引爆与目标相对象限的炸药,达到定向效果^[9]。

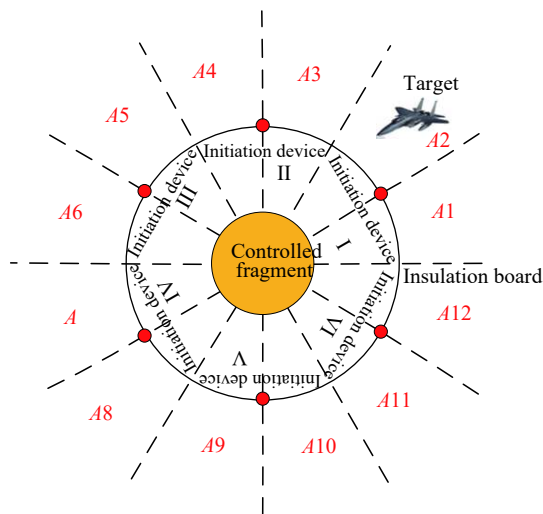


图 1 12 元探测定向战斗部原理示意图

Fig.1 Principle schematic diagram of dodecagon-detection directional warhead

将定向战斗部探测区域分为 12 象限(如 A1、A2、...A12),结合目标所处的某一个或者相邻两个探测象限,设计战斗部模型(破片飞散角、破片速度等),通过引战配合仿真计算战斗部与目标(目标所处探测象限已知)在不同交会条件(交会速度、交会角度、延时时间)下的毁伤概率,分析不同雷管起爆对目标的毁伤程度。

考虑到采用 12 象限的探测方式,每一探测天线覆盖角度为 90°,则相邻两个探测天线重叠探测区域为 60°,其起爆中心方向(即破片飞散圆锥中心线方向)间的交角为 30°,根据目标所处象限设置战斗部不同雷管起爆,按照 30°间隔设定飞散角两个相邻方向。

如图 1 所示,设定弹目交会弹道,按照导引头或引信探测目标相对于战斗部的方位,给出目标的空间方位信息,当目标位于不同象限时,战斗部上周向均匀分布的六个雷管需可控起爆才能达到破片定向飞散的目的。对应目标的方位信息分以下输出起爆决策:

若目标位于某一象限内,如 A2 象限,则起爆方案

选择有如下几种:

- (1) 起爆与之相对应象限 A7、A8 的起爆装置 IV;
- (2) 起爆与之相对应象限 A7、A8、A9 的起爆装置

IV、V。

若目标位于两个象限之间,如 A1、A2 象限之间,则起爆方案选择有如下几种:

- (1) 起爆与之相对应象限 A7、A8 的起爆装置 IV;
- (2) 起爆与之相对应象限 A6、A7、A8 的起爆装置

III、IV;

- (3) 起爆与之相对应象限 A7、A8、A9 的起爆装置

IV、V;

- (4) 起爆与之相对应象限 A6、A7、A8 的起爆装置

III、IV、V。

对应起爆方案,选择相应的战斗部模型,分别计算毁伤概率得出最佳毁伤概率,按照最佳毁伤概率,分析最佳起爆决策。改变弹目交会弹道,重复上述的仿真过程输出相应的最佳起爆决策,其他弹道依此类推。

2 12 分元激光探测目标识别算法

激光引信 12 分元探测通过设置六组独立的激光收发探测装置实现,引信工作时各组激光探测识别装置轮流工作,每次只开启一组探测识别装置,一个周期 6 组全部工作后完成对弹体周围 12 个空间方位的区分。按照激光探测识别装置轮流工作时间段 T1~T6 时刻各激光探测扫描的区域方位如图 2 所示。

上述 6 幅图中,虚直线表示将弹体周围均分为 12 个区域方位,这样每个方位的空间方位间隔为 30°,依次将各空间方位标示为 A1~A12。中心圆点为弹体俯视图,各阴影部分为各组探测装置在各自开启时间段内所探测识别的作用方位。由图中可以看出,每个探测装置的激光光束角为 90°,这样每个探测器工作时所能识别的区域方位为相邻的 3 个,依次开启 1~6 个探测器,后一个探测器与前一个就有一个区域是叠加的,如图 2(a)、(b) 中 A2 区域为两者叠加区域。同时,每个探测器在一个周期内也只有一个区域方位是单独一个开启时间段独自出现的,如图 2(a) 中的 A1 区域方位。这样在一个工作周期内,在各自工作时间段内可以识别 6 组区域方位,而前后两个时间

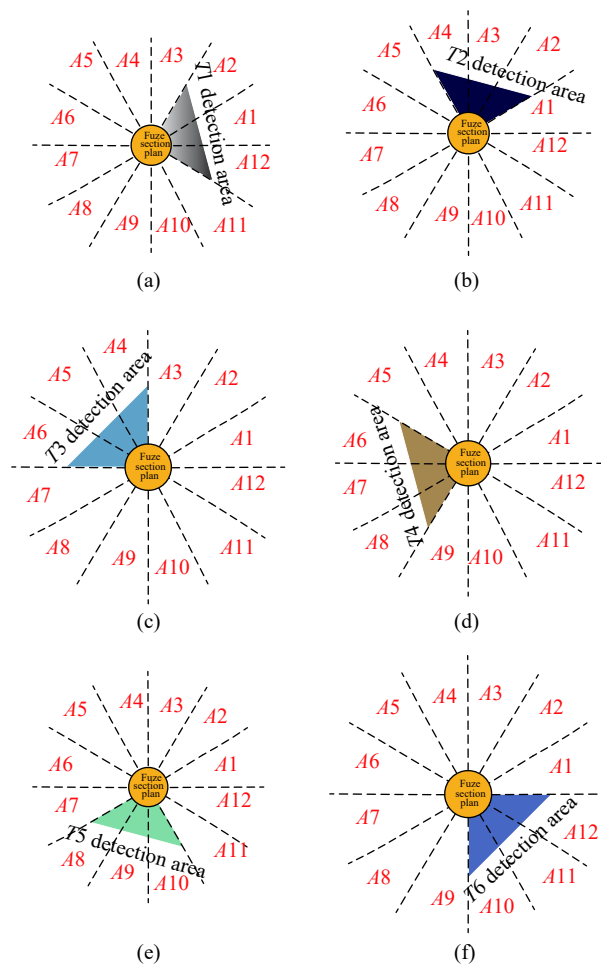


图 2 T1~T6 时刻探测器扫描区域示意图

Fig.2 Schematic diagram of detector scanning area within time T1~T6

段内叠加的区域方位又可以识别剩下的 6 组区域方位,进而应用 6 组激光探测识别装置实现识别弹体周围 12 组空间区域方位的目的。

实际情况下导弹与目标交会时,目标只出现在单一区域方位的情况比较小,大多目标占据弹体周围 2 个、3 个甚至 4 个区域方位。目标所在多个区域方位具体如图 3~图 5 所示。

如图 3 所示,当目标占据两个区域方位大小时,这时激光的回波信号势必在两个相邻时间区间内同时出现(图中 T2、T3 时间段内同时有回波信号)。这时可以确定两个时间段叠加的区域方位(图中 A4 为目标出现的一个空间方位。另一个目标出现的区域方位需通过目标在两个时间段内出现的回波信号强度来确定, T3 回波信号大于 T2 回波信号,说明目标在 T3 段内出现的比较多,即图中的 A5 为目标出现的

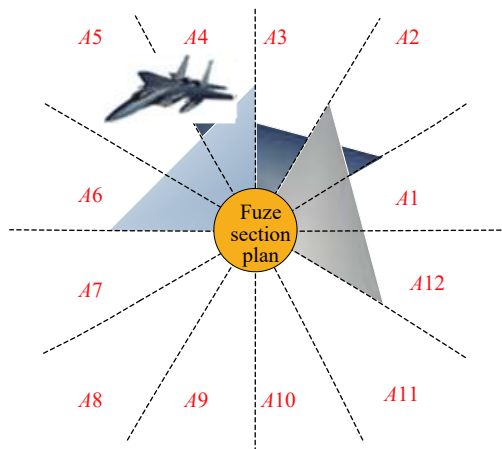


图 3 目标占据两个区域方位示意图

Fig.3 Diagram of target occupying two azimuth regions

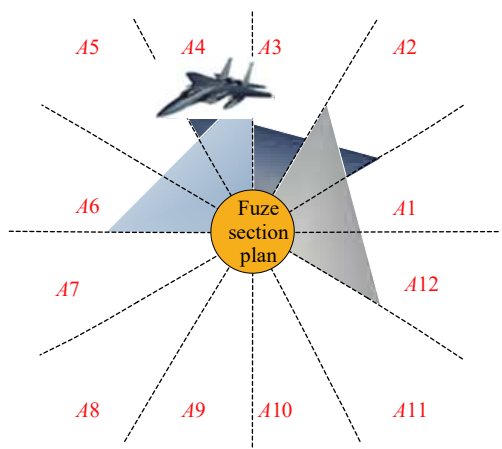


图 4 目标占据 3 个区域方位示意图

Fig.4 Diagram of target occupying three azimuth regions

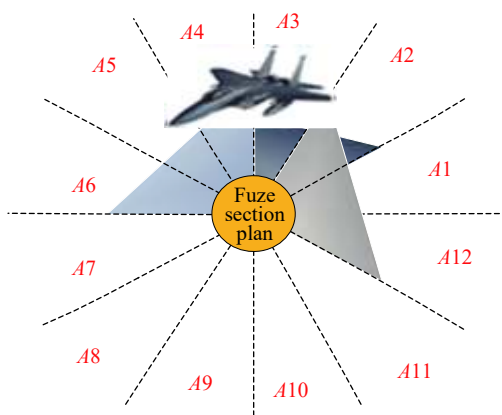


图 5 目标占据 4 个区域方位示意图

Fig.5 Diagram of target occupying four azimuth regions

第二个区域方位。

目标占据 3 个区域方位时如图 4, 这时回波信号有两种情况出现: 一种情况回波信号出现在两个时间

段内, 且两个时间段内的回波信号强度比较相近, T_3 回波信号约等于 T_2 回波信号, 说明目标同时出现于 A_3 、 A_4 和 A_5 区域方位; 另一种情况目标回波信号出现在 T_1 、 T_2 、 T_3 时间段内, 这时可认为目标出现在中间时间段 T_2 所在的区域方位即 A_2 、 A_3 、 A_4 内。

上述两种情况需特别说明的是, 目标占据两个或者 3 个区域方位第一种情况时与目标在一个方位即两个时间段叠加区域方位出现的判定条件是一致的, 但是三者根据目标回波信号强度大小是可以区分的: 两个方位时的两个时间段回波信号大小相差较大, 一个和 3 个方位出现时两个回波信号相近, 区分出两个空间区域方位出现目标的情况; 单一区域方位目标出现时与弹体的距离较远, 此时的回波信号强度远小于目标占据 3 个区域的回波信号, 区分出单一方位与 3 个区域方位的情况。

如图 5 所示, 目标占据 4 个区域方位时, 这时回波信号必定出现在 3 个相邻时间段内 (图中 T_1 、 T_2 、 T_3 时间段), 此时可以认为目标大部分出现在中间时间段 (图中 T_2 时间段) 的区域方位内 (图中的 A_2 、 A_3 、 A_4 方位), 此情况可以归结到目标出现在 3 个区域方位内的情况里面。

3 12 分元激光引信定向起爆控制仿真

为了获取较好的毁伤效果, 在分析了 12 分元战斗部探测与起爆方位的基础上, 还需要进一步结合目标易损模型, 开展延时时间与弹目交会参数的匹配仿真。选取的弹目平行交会弹道, 如图 6 所示。

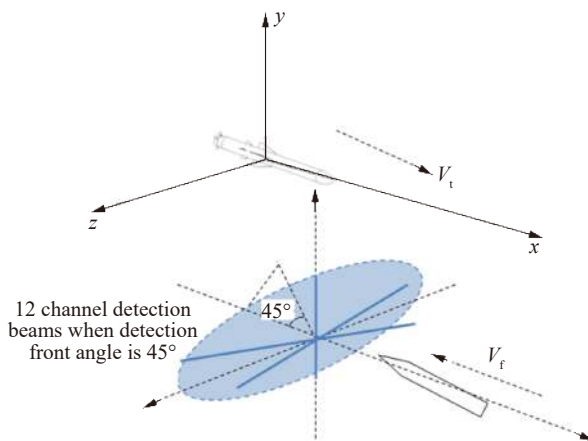


图 6 平行交会示意图

Fig.6 Schematic diagram of parallel intersection

3.1 引信延时时间与弹目交会参数匹配仿真

设置激光引信光束前倾角为 45°, 引信与目标相对速度 2 500 m/s, 脱靶量 3 ~ 15 m, 脱靶角 0° ~ 360°, 通过计算得出当脱靶量为 3 m 时, 破片飞散角范围是 45° ~ 149°, 随着脱靶量的增加, 破片飞散角范围是缩小的。因此, 取破片飞散角分别为 45°、55°、65°、75°、85°、95°、105°、115°、125°、135°和 145°, 通过改变脱靶量和脱靶角, 获取与不同定向战斗部破片飞散角度相匹配的引信延时时间, 即获取具有较高的目标毁伤概率的引战配合参数和引信延时时间。

以导弹最常见工作的弹道作为典型弹道。在该类型交会弹道中, 仿真计算在激光前倾角 45°, 不同战斗部破片飞散角条件下, 共计近 2 万组交会数据, 并按类统计获得目标综合毁伤概率统计结果。以图 7 为例, 延时时间 5 ms 时, 得出在破片飞散角 95°、115°和 125°时, 对目标的综合毁伤效果较好。其中, 脱靶量 3 m 交会条件下毁伤概率为 0.795、0.797、0.788, 脱靶量 5 m 交会条件下毁伤概率为 0.746、0.757、0.757, 脱靶量 8 m 交会条件下毁伤概率为 0.653、0.653、0.382。可以看出, 随着脱靶量的增加, 毁伤效果降低。因为目标长度 8 m 左右, 属于定向战斗部打击类里的小目标, 由于延时时间设定为 5 ms, 加上引信启动延时脉冲, 当脱靶量较小时, 可以通过调整不同的破片飞散角来击中目标, 当脱靶量较大时, 破片飞散角会逐渐调整到超出其毁伤范围, 毁伤效果会逐渐降低。由图 7 ~ 9 中大量的仿真结果也可以得到验证。综合考虑, 对于高速小目标, 脱靶量设定为 3、5、8 m 时对目标毁伤效果是比较好的。

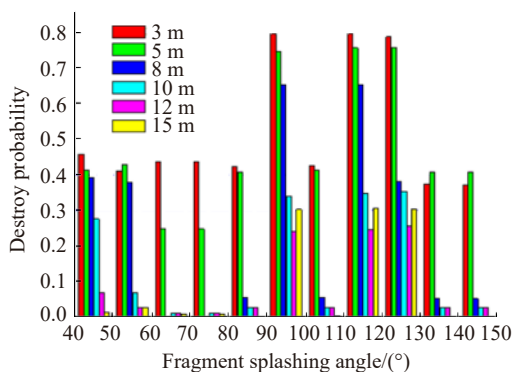


图 7 延时时间 5 ms 时, 破片飞散角和脱靶量与平均毁伤概率的关系
Fig.7 Relationship between fragment flying scattering angle, miss distance and average damage probability when delay time is 5 ms

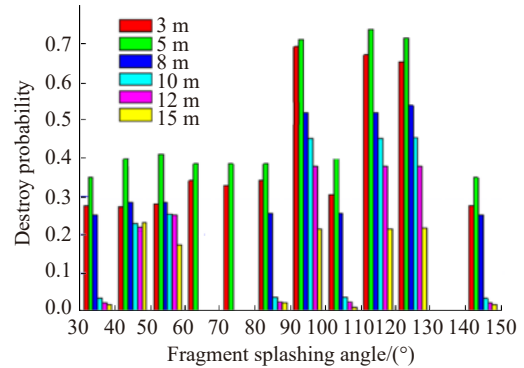


图 8 延时时间 3 ms 时, 破片飞散角和脱靶量与平均毁伤概率的关系
Fig.8 Relationship between fragment flying scattering angle, miss distance and average damage probability when delay time is 3 ms

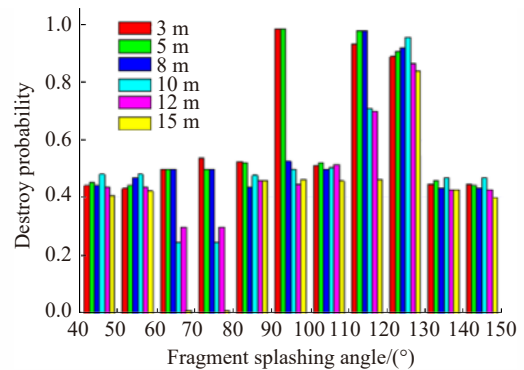


图 9 延时时间 1 ms 时, 破片飞散角和脱靶量与平均毁伤概率的关系
Fig.9 Relationship between fragment flying scattering angle, miss distance and average damage probability when delay time is 1 ms

3.2 引信延时时间、破片飞散角匹配仿真

结合图 10 和图 11 中延时时间、破片飞散角和脱靶量对毁伤效果的综合分析曲线可以看出: 延时时间对毁伤概率影响十分明显。综合考虑在脱靶量 3 ~ 15 m 范围内时, 破片飞散角不小于 90°时, 均可获得较高的目标毁伤概率。毁伤效果较好时, 主要集中在破片后向飞散区域, 延时时间越大, 破片飞散角也随之增加, 同样的交会条件下, 延时时间越短, 毁伤效果越好, 延时时间大于 5 ms, 毁伤效果很差, 基本不能对目标达到有效毁伤; 另一方面, 当延时时间不大于 2 ms 时, 脱靶量小于 8 m 时平均毁伤概率达到 0.6 以上, 脱靶量大于 10 m 时平均毁伤概率小于 0.5。以上两种情况都是由于目标尺寸较小, 相对速度较高, 这样就对精确毁伤要求更高, 延时时间和破片飞散角就需要严格匹配计算。

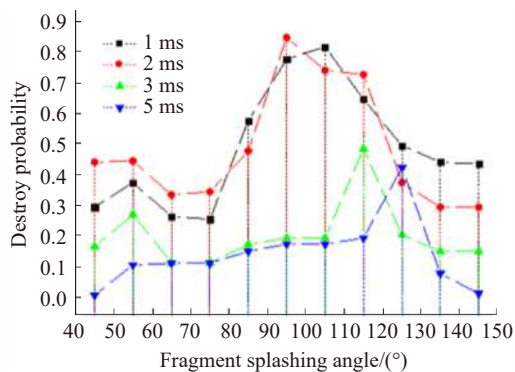


图 10 延时时间、破片飞散角与平均毁伤概率的关系

Fig.10 Relationship of average damage probability, delay time and fragment fly scattering angle

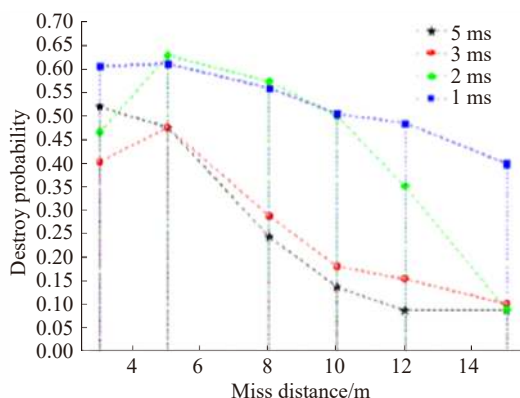


图 11 延时时间、脱靶量与平均毁伤概率的关系

Fig.11 Relationship of average damage probability, delay time and miss distance

4 结 论

文中提出了一种用于配合定向战斗部的激光引信 12 分元探测定向起爆控制建模方法。该方法基于 12 分元激光探测模型及方位识别原理,通过对目标方位的判别,对定向战斗部的起爆方位进行控制仿真。结合目标易损性模型,通过不同弹道及起爆时机对目标造成毁伤效果的仿真计算,实现了定向战斗部激光引信出延时时间与毁伤效果匹配仿真与分析,可综合分析不同延迟时间、脱靶量等对定向战斗部杀伤效果的影响。通过仿真结果可以看出,对于空中高速小目标的毁伤效果,引信延时时间、脱靶量及破片飞散角等参数的匹配非常重要,例如当延时时间不大于 2 ms 时,脱靶量小于 8 m 时平均毁伤概率达到 0.6 以上,脱靶量大于 10 m 时平均毁伤概率小于 0.5。必须注意的是,不同的导引方式可以获得的弹目交会参数

不同,不同的导引律对弹目交会参数也存在影响,如何利用可实际获取的有限弹目交会参数进行引信起爆控制仿真,是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] Zhang Zhihong, Zhou Shensheng. Fuze Warhead Coordination Efficiency and Warhead Design of Air-Defense Missile[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1994.(in Chinese)
张志鸿,周申生.防空导弹引信与战斗部配合效率和战斗部设计[M].北京:宇航出版社,1994.
- [2] Zhang Dongyang, Ren Hongbin, Jian Jinlei. Analysis of technique for directional detecting fuze [J]. *Tactical Missile Technology*, 2002(4): 34-37. (in Chinese)
张东洋,任宏滨,简金蕾.定向探测引信技术分析[J].*战术导弹技术*,2002(4): 34-37.
- [3] Zhang Xiangjin, Feng Ying. Time and space matching characteristics of pulsed laser position detection fuse for aimed warhead [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(12): 3197-3202. (in Chinese)
张祥金,冯颖.定向起爆部脉冲激光方位探测引信系统时间空间匹配特性[J].*强激光与粒子束*,2011, 23(12): 3197-3202.
- [4] Guo Zerong, Li Luo, Li Yuan. Study on the optimum time delay of six laser range-finders for aimed warhead [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2014, 34(6): 588-591. (in Chinese)
郭泽荣,李洛,李元.六光束脉冲激光探测定向战斗部最佳起爆延时研究[J].*北京理工大学学报*,2014, 34(6): 588-591.
- [5] Kong Dehao, Lu Ming, Su Yide. Multi-beam circum-directional laser fuse and aimed warhead [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2019, 17(3): 402-407. (in Chinese)
孔德浩,路明,苏益德.多光束周视激光引信与定向战斗部的配合[J].*太赫兹科学与电子信息学报*,2019, 17(3): 402-407.
- [6] Li Jing, Jian Jinglei, Ren Hongbin. Coordination of two-dimension beam controlled fuze and orientation warhead [J]. *Modern Defence Technology*, 2010, 38(6): 56-60. (in Chinese)
李静,简金蕾,任宏滨.二维波束控制引信与定向战斗部配合[J].*现代防御技术*,2010, 38(6): 56-60.
- [7] Teng Xi, Mi Shuangshan. Current situation analysis and development of aimable fragment warhead [J]. *Aerodynamic Missile*, 2014(4): 89-94. (in Chinese)
滕玺,米双山.定向战斗部的现状分析与发展[J].*飞航导弹*,2014(4): 89-94.
- [8] Si Kai, Li Xiangdong, Zhou Lanwei, et al. Design and

- optimization of directional and focusing multi-EFP warhead [J]. *Energetic Materials*, 2019, 27(6): 528–534. (in Chinese)
- 司凯, 李向东, 周兰伟, 等. 多EFP定向聚焦战斗部设计与优化 [J]. *含能材料*, 2019, 27(6): 528–534.
- [9] Liu Chen, Li Yuan, Li Yanhua, et al. Influence of eccentric initiation ways on fragment dispersion rule of prismatic aimable warhead [J]. *Energetic Materials*, 2017, 25(1): 63–68. (in Chinese)
- 刘琛, 李元, 李燕华, 等. 偏心起爆方式对棱柱形定向战斗部破片飞散规律的影响[J]. *含能材料*, 2017, 25(1): 63–68.