

文章编号: 1002-1582(2026)03-0341-05

高能激光武器拦截RAM目标部署位置分析

张茂*, 岳通, 张纪鹏, 彭杰, 李轶国, 寇峻, 田建康, 杨艺帆

(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘 要: 随着高能激光武器装备的不断发展, 欧美等国家开展大量激光武器拦截迫击炮弹、火箭弹等RAM目标的验证试验, 对于激光武器实战化运用具有重要意义, 国内还未见相关报道。主要目的是构建激光武器拦截迫击炮弹等RAM类目标试验场景, 提出试验中确定武器系统相对弹道最优部署位置的方法。文章基于迫击炮弹的模拟弹道, 以弹体上积累的激光能量最大作为最优部署位置的判据, 仿真分析拦截迫击炮弹试验的最优部署位置。研究结果表明切向拦截试验场景, 航路捷径越小, 弹体表面激光能量积累越高, 在弹道发射方向存在最优的位置解, 使弹体表面积累的激光能量最大; 径向拦截的试验场景, 部署位置离弹着点越近, 弹体表面积累激光能量越高。研究结果可为高能激光武器拦截迫击炮弹等RAM目标试验设计提供依据, 同时也可可为高能激光武器后续实战应用部署提供支撑。

关 键 词: 激光武器; 迫击炮弹; 弹道; 激光能量

中图分类号: TN249; TP306.2

文献标识码: A

The deployment of high-energy laser weapons C-RAM

ZHANG Mao*, YUE Tong, ZHANG Jipeng, Peng Jie, LI Yiguo, KOU Jun, TIAN Jiankang, YANG Yifan

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: With the continuous evolution of High - Energy Laser (HEL) weapons, Western nations have undertaken extensive verification testing for laser interception of Rapid-Attack Munitions (RAM), including mortar and rocket shells. This is crucial for the operational deployment of laser weapons in combat situations. In contrast, similar initiatives in China have not been reported yet. The purpose of this study is to create a test scenario for the interception of RAM targets like mortar shells using laser weapons and to devise a strategy for determining the optimal deployment position of the weapon system relative to the target trajectory during testing. Based on the simulated trajectory of mortar shells, the criterion of maximizing the accumulated laser energy on the projectile is adopted as the basis for the determination of the optimal deployment position. The results indicated that in a tangential interception scenario, the shorter the route shortcut, the higher the laser energy accumulation on the projectile. An optimal position existed along the trajectory's launch direction that maximizes the accumulated laser energy on the projectile. In radial interception test scenarios, the closer the deployment position to the point of impact, the greater the laser energy accumulation on the projectile. These results can serve as a foundation for designing RAM tests, such as the interception of mortar shells by HEL weapons, and can also offer support for the subsequent practical application and deployment of HEL weapons.

Keywords: laser weapon; mortar shell; ballistics; laser energy

0 引 言

随着激光技术的不断进步, 尤其是光纤激光器的成熟, 高能激光武器近年来实现快速发展,

功率等级从数万瓦提升至数十万瓦, 拦截目标从“低慢小”无人机目标拓展至火箭弹、火炮炮弹、迫击炮弹 (Rockets, Artillery and Mortar, RAM) 类目标, 并逐步迈向实战部署与运用^[1-3]。高能激

收稿日期: 2024-09-11; 收到修改稿日期: 2025-03-22

作者简介: 张茂 (1986—), 男, 研究员, 硕士, 从事高能激光试验评价技术研究。

* 通讯作者: maozhang@163.com

光武器具有精度高、反应快、附带损伤小、效费比高、抗电磁干扰能力强等显著优势,在末端防空领域相较于传统防御手段展现出巨大应用潜力。尤其是迫击炮弹等 RAM 弹药在战场上的广泛应用,造成了巨大的威胁,现有手段难以形成有效应对,高能激光武器被寄予厚望,用于高效拦截迫击炮弹等 RAM 目标^[4]。

美国、以色列等欧美国家开展了大量高能激光装备研制与试验验证工作,处于国际领先地位。依托“鸚鵡螺”、“高能激光移动演示装置”等项目支撑,从上世纪 90 年代开始,陆续开展多次高能激光拦截迫击炮弹、火箭弹等 RAM 类目标的试验^[4-9]。早在 1996 年 2 月,美国在白沙导弹靶场采用中红外先进化学激光体制的系统开展多次用激光拦截 BM-21 火箭弹试验,以验证高能激光摧毁火箭弹等目标的技术可行性。2000 年起,美国战术高能激光武器 (THEL) 启动拦截火箭弹、迫击炮弹试验,截至 2002 年底,成功击落 122mm 火箭弹 28 枚和 155mm 迫击炮弹 5 枚^[5,6]。2007 年,美国雷声公司研发具有近距离防御能力的激光区域防御系统 (LADS),主要用于机场、战区基地、港口的防御,其功率达到了 50kW,并成功完成 60mm 迫击炮弹拦截试验,并于 2009 年在白沙靶场开展陆军型号测试^[3]。2013 年,美国陆军在白沙导弹靶场首次成功使用高能激光移动演示装置 (HELM) 拦截了 90 多枚迫击炮弹^[8]。2014 年,以色列研制的以高功率固体激光器为激光源的“铁束” (Iron Beam) 激光武器系统拦截迫击炮弹和火箭弹最大距离达 7km^[9]。2022 年,美国“守护者”陆基激光防空武器系统由雷声公司和科德技术公司基于“斯特瑞克” A1 8×8 轮式装甲车底盘集成 50kW 级高能激光器。在陆军在白沙导弹靶场的实弹演习中,成功拦截了多枚 60mm 迫击炮弹。充分展示了高能激光武器在末端近程防空领域的应用潜力,尤其突显其是在拦截迫击炮弹等弹药目标方面的优异性能。

美国等国家开展的高能激光武器拦截 RAM 类目标的试验,所用激光功率一般高于 50kW,且后续项目激光功率计划提升至数百千瓦,以满足拦截 RAM 类目标实战化部署的需求。由公开报道可知,国内高能激光武器近几年也取得快速的发展,但是未见激光拦截 RAM 类目标的相关报道。

RAM 弹类目标弹道具有相似性,本文以迫击炮弹为典型研究对象,其弹道呈类抛物线特征,且飞行过程中伴随微旋运动,高能激光武器拦截迫击炮弹原理是通过作用在弹体表面的激光能量

持续加热弹体,使装药达到起爆温度阈值,引爆战斗部炸药。在激光武器发射激光参数确定的情况下,在拦截时间窗口内以弹体表面积累的激光能量最大为最优部署位置的判定准则。本文从高能激光武器拦截典型迫击炮弹场景出发,分析阵地部署位置对弹体表面激光能量积累的影响。通过构建迫击炮弹模拟弹道,建立高能激光武器侧向和径向拦截迫击炮弹的试验场景,以激光作用到弹体上的能量累积最大为目标,解算最优的阵地部署位置,并分析计算了激光武器跟踪靶弹过程中的角速度和角加速度。研究结果可为高能激光武器拦截迫击炮弹等 RAM 类目标试验设计提供依据,同时也可作为高能激光武器后续实战运用部署提供支撑。

1 构建场景

构建高能激光武器固定阵地防御试验场景,以拦截迫击炮弹任务为例,高能激光武器相对弹道有两种典型阵地部署方式,其一为侧向拦截,此时迫击炮弹相对激光武器呈切向飞行状态,高能激光武器阵地部署在弹道侧面;其二为径向拦截,此时迫击炮弹相对激光武器呈迎头飞行状态,高能激光武器阵地部署在弹道前面,如图 1 所示。

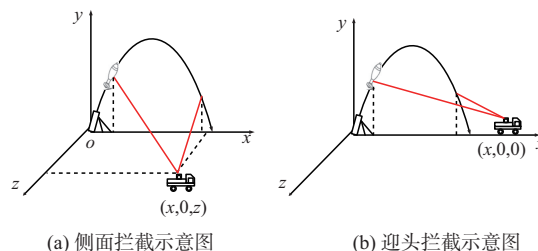


图 1 高能激光武器拦截迫击炮弹的试验场景

迫击炮弹空中飞行时间一般仅有 40~50s,武器系统稳定跟瞄目标后立即发射激光拦截。本文想定的激光武器拦截迫击炮弹流程如下:迫击炮弹发射后,搜索雷达于第 10s 捕获目标,并转光电跟踪,第 15s 时实现对目标稳定跟瞄,随即发射激光并持续辐照目标,通过激光作用在弹体表面的热效应加热迫击炮弹,最终在目标离地高度 200m 时引爆战斗部炸药,使其空中爆炸,成功拦截迫击炮弹。

2 数学模型

2.1 模拟弹道

以美制 60mm 口径 M224 式迫击炮为典型目标,仿真计算模拟弹道。该迫弹重量约 1.7kg,发射时的初速约 237.7m/s,最大射程约 3.5km。

在理想条件下,迫击炮弹发射后,只受空气

阻力和重力的影响,运动方程可表示为^[10]

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = -c_b H(y) G(v) v_x \\ \frac{dv_y}{dt} = -c_b H(y) G(v) v_y - g \\ \frac{dx}{dt} = v_x \\ \frac{dy}{dt} = v_y \end{cases} \quad (1)$$

式中, c_b 为弹道系数; $H(y)$ 为空气密度函数; $G(v)$ 为空气阻力函数; g 为重力加速度; v_x 为 x 方向速度, v_y 为 y 方向速度; x 为迫弹水平射程; y 为迫弹射高。

初始条件为

$$\begin{cases} x(0) = 0 \\ y(0) = 0 \\ v_x(0) = v_0 \cos \theta_0 \\ v_y(0) = v_0 \sin \theta_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, v_0 为发射初速度; θ_0 为发射时的射角。图2分别为仿真模拟的3.5km、2.5km和1.5km射程的弹道曲线。

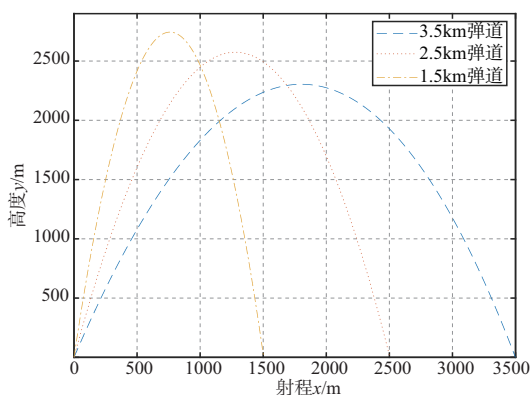


图2 弹道曲线

2.2 激光能量积累

高能激光武器拦截迫击炮弹作用机理是通过激光能量在弹体表面累积,加热弹体后将热传导至战斗部内的炸药,使炸药温度升高,当温度达到起爆阈值时,迫击炮弹发生爆炸。弹体表面累积的激光能量决定了拦截效果,可作为最佳阵地部署位置选择的判定准则。

作用到弹体表面激光功率为

$$P = \gamma \tau P_0 \quad (3)$$

式中, P_0 为发射激光功率; τ 为激光大气传输透过率; γ 为作用到弹体表面的激光能量比例。

在理想条件下,到靶激光光斑为高斯分布,为简化分析,忽略弹体形状和大气湍流等因素的影响,作用到弹体表面的激光能量约为弹体直径内的

环能量,作用到弹体表面的激光能量比例为^[11]

$$\gamma = \frac{P(R)}{P(\infty)} = \frac{\int_0^R \int_0^{2\pi} I(r) 2\pi r dr d\theta}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} I(r) 2\pi r dr d\theta} = \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{2R^2}{\omega^2}\right)} \quad (4)$$

式中, R 为迫击炮弹的半口径; ω 为到靶光斑半径。 $I(r)$ 为到靶激光光斑分布,近似为高斯分布, $I(r)$ 为

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right) \quad (5)$$

假设迫击炮弹在发射第15s时,武器系统实现对目标稳定跟瞄,并发射激光持续辐照在迫击炮弹壳体表面,至离地高度200m时作用到弹体上的激光总能量可表示为

$$E = \int_{t_0}^{t_1} P_i dt \quad (6)$$

式中, E 为弹体表面积累的激光能量; t_0 为开始发射激光时间; t_1 为迫击炮弹离地200m的时间。

当弹体表面积累的激光能量满足下式时,能够成功拦截炮弹,表达式为

$$E \geq E_{th} \quad (7)$$

式中, E_{th} 为激光辐照弹体表面使战斗部炸药起爆的激光能量阈值。

3 仿真分析

3.1 侧向拦截

在激光武器侧向拦截迫击炮弹的场景下,取阵地部署位置为弹道中点,仿真计算弹体上累积激光能量随航路捷径的变化,如图3所示是归一化的激光能量累积。弹体表面累积激光能量随着航路捷径的增加而减少。在阵地位置部署时,需综合权衡激光武器杀伤范围等约束条件,在安全距离外,航路捷径越小越有利于激光成功拦截迫击炮弹。

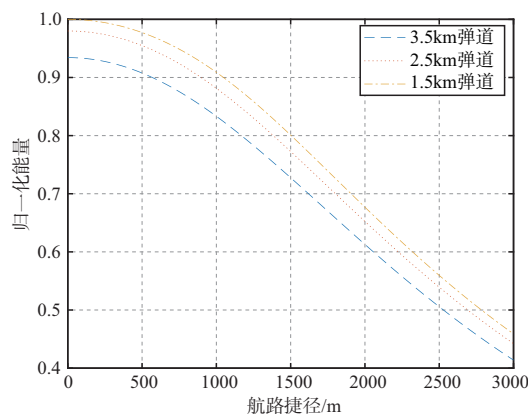


图3 弹体表面积累激光能量随航路捷距的变化

设定激光武器位置相对弹道的航路捷径固定为1km，不同射程的弹道，弹表面积累的激光能量随激光武器阵地部署位置距发射点距离而不同，对于每个弹道存在最优阵地部署位置，见图4所示。

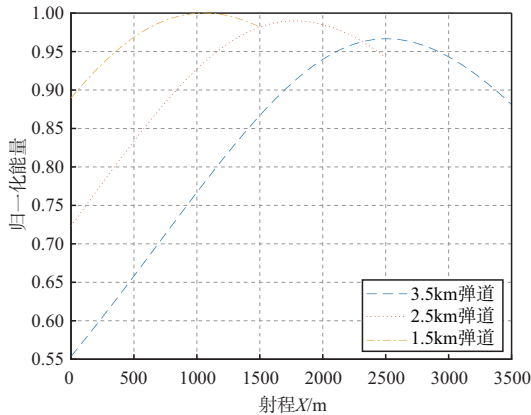


图4 不同位置处弹体上累积的激光能量

随着迫击炮弹射程的增加，激光武器阵地部署在最优位置处的激光能量累积减少。见表1所示，航捷为1km时，对于不同射程的弹道，阵地部署的最优位置及归一化能量值。

表1 阵地部署最优位置及归一化能量		
射程/km	最佳部署位置x/m	归一化能量
1.5	1057	1
2.5	1778	0.99
3.5	2505	0.97

当激光武器部署在最优位置处时，系统跟踪目标相对角速度、角加速度也是影响成功拦截迫击炮弹的主要因素之一。图5、6是跟踪过程中角速度、角加速度的变化，其中俯仰向角速度和角加速度远大于方位向。迫击炮弹射程越短，相对角速度、角加速度最大值越大，是选择阵地部署位置的重要依据。在满足跟踪伺服性能的前提下，迫击炮弹射程越短，越有利于成功拦截。

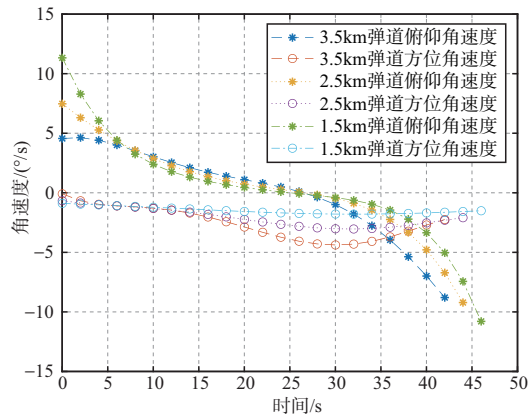


图5 侧向拦截角速度变化

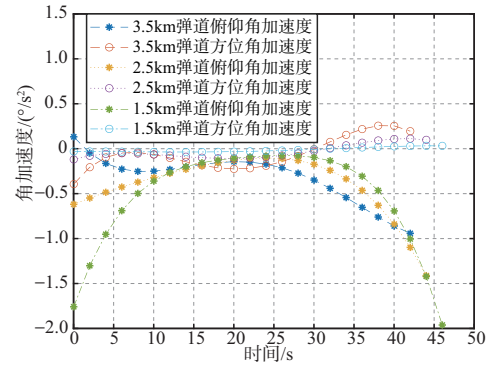


图6 侧向拦截角加速度变化

3.2 径向拦截

在高能激光武器径向拦截迫击炮弹的试验场景下，航路捷径为0，设定安全距离为0.8km，激光武器阵地部署位置在安全距离范围外。图7是弹体表面积累的归一化激光能量随阵地部署位置的变化，部署位置距离越远，积累的激光能量越低，近似呈线性变化规律。在径向拦截迫击炮弹的试验场景中最优阵地部署位置为离弹着点最近的位置。

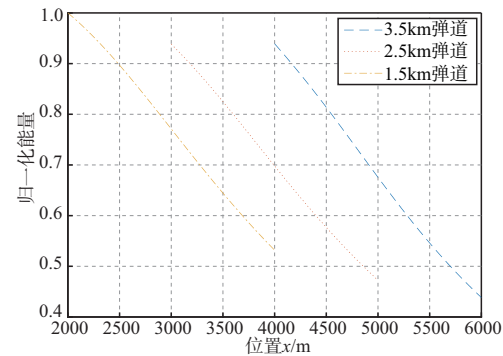


图7 不同位置处弹体表面积累的激光能量

图8是迫击炮弹相对激光武器的角速度随时间变化，俯仰向角速度远大于方位向角速度，其中迫击炮弹射程越小，相对俯仰角速度越大。图9是迫击炮弹相对激光武器的角加速度随时间变化，俯仰向角加速度远大于方位向角加速度。与径向拦截结论相似，在满足跟踪伺服性能的前提下，迫击炮弹射程越短，越有利于成功拦截。

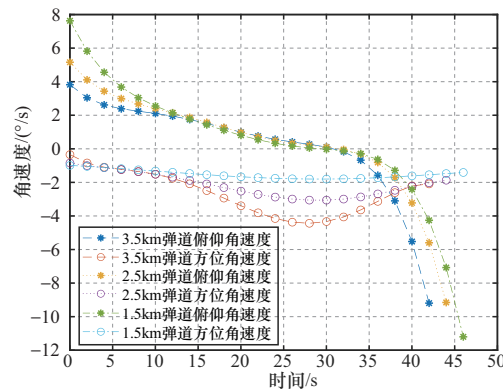


图8 径向拦截角速度变化

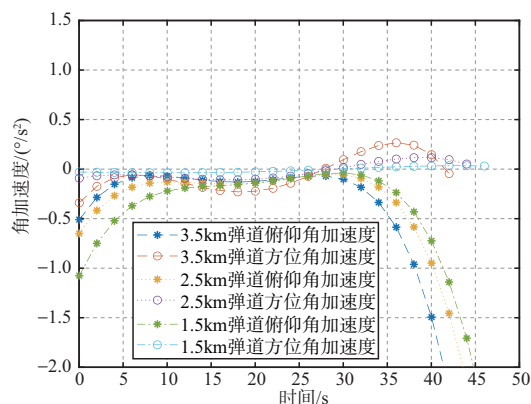


图9 径向拦截角加速度变化

4 结 论

本文针对高能激光武器拦截RAM目标的阵地位置部署问题展开研究,以拦截典型迫击炮弹为例,分析了侧向拦截和径向拦截的场景下,弹体表面激光能量的积累特性,以弹体表面激光能量累积作为依据,确定了不同弹道条件下的最优部署位置,并对比分析了不同弹道条件下的激光能量累积。在高激光武器部署在最优位置的前提下,弹道射程越短,弹体表面积累的激光能量越高,但对武器系统跟踪目标的最大角速度和角加速度要求也更为严苛。因此,在高能激光武器实际阵地部署中,需综合权衡系统的跟踪性能和拦截效能,以确定最优的位置部署方案。本文的研究结果可为高能激光武器拦截迫击炮弹等RAM类目标的试验设计提供依据,同时也可高能激光武器后续实战应用部署提供支撑。

参考文献:

- [1] 李朝龙,李明辉,陈玉华. 激光武器在陆军全域作战中的运用[J]. 激光与红外, 2020, (05): 515—520.
Li Chaolong, Li Minghui, Chen Yuhua. The application of laser weapon in the army's whole area operation[J]. Laser & Infrared, 2020, (05): 515—520.
- [2] 李怡勇,王建华,李智. 高能激光武器发展态势[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(6): 1—6.
Li Yiyong, Wang Jianhua, Li Zhi. Development situation of high-energy laser weapons[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(6): 1—6.
- [3] 李伟,余志锋,邓晓智. 美国激光武器发展建设研究[J]. 激光与红外, 2023, (11): 1637—1643.
Li Wei, Yu Zhifeng, Deng Xiaozhi. Research on the development and construction of laser weapons in the United States[J]. Laser & Infrared, 2023, (11): 1637—1643.
- [4] 易亨瑜,锁兴文,易欣仪等. 美国定向能机动近程防空计划进展分析[J]. 应用光学, 2024, (03): 485—494.
Yi Hengyu, Suo Xingwen, Yi Xinyi, et al. Development analysis of American directed energy maneuver short-range air defense program[J]. Journal of Applied Optics, 2024, (03): 485—494.
- [5] 冯寒亮,韩锋. 美军激光武器的研究进展与思考[J]. 现代军事, 2010(4): 43—50.
Feng Hanliang, Han Feng. Research and development of laser weapons of US army [J]. Modern Military, 2010 (4): 43—50.
- [6] 刘伟超. “鹦鹉螺”激光武器系统解析[J]. 舰船科学技术, 2007, (S1): 26—29+49.
Liu Weichao. Analysis of nautilus laser weapon[J]. Ship Science and Technology, 2007, (S1): 26—29+49.
- [7] 陈军燕,杨春才,马寒,等. 美军高能固体激光武器实战化的技术瓶颈[J]. 激光与红外, 2016, (04): 381—386.
Chen Junyan, Yang Chuncai, Ma Han, et al. Bottleneck of high-energy solid-state laser for practical application in the US army[J]. Laser & Infrared, 2016, (04): 381—386.
- [8] 刘晓明,葛悦涛. 美国陆军首次成功试验车载激光武器拦截迫击炮弹和无人机[J]. 飞航导弹, 2014, (2): 12.
Liu Xiaoming, Ge Yuetao. The US army has successfully tested its first vehicle-borne laser weapon to intercept mortar shells and drones[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2014(2): 12.
- [9] 程勇,郭延龙,唐璜,等. 战术激光武器的发展动向[J]. 激光与光电子学进展, 2016, (11): 39—49.
Cheng Yong, GuoYanlong, TangHuang, et al. Development trend of tactical laser weapons[J]. Laser&Optoelectronics Progress, 2016, (11): 39—49.
- [10] 伍建辉,董亮. 基于Matlab迫击炮外弹道仿真[J]. 火控雷达技术, 2014, (02): 39—42.
Wu Jianhui, Dong Liang. Simulation on external trajectory of mortar based on matlab[J]. Fire Control Radar Technology, 2014, (02): 39—42.
- [11] 陈钰清,王静环. 激光原理[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1992: 192—193.
Chen Yuying, Wang Jinghuan. Laser principles[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 1992: 192—193.