

舰载激光武器对典型无人机蜂群目标毁伤 距离研究

杨剑波,宗思光,陈利斐

(海军工程大学电子工程学院,湖北 武汉 430033)

摘要:未来海战中,传统武器很难有效杀伤无人机蜂群目标,严重影响水面舰艇安全,舰载激光武器的加入可以较好地与传统武器进行互补,填补防空漏洞。研究其对于典型无人机蜂群目标的射表,将极大提升舰艇防空整体作战能力。本文针对“郊狼”无人机蜂群目标,以七个模块搭建了舰载激光武器毁伤无人机模型,计算了舰载激光武器在不同能见度、高度、功率、毁伤阈值情况下的概率毁伤距离,验证了舰载激光武器的毁伤能力,为舰载激光武器演示论证工作提供了理论支撑。

关键词:舰载激光武器;无人机蜂群;毁伤距离

中图分类号:E920.8 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2022.05.020

Research on destruction distance of shipborne laser weapon to typical UAV swarm target

YANG Jian-bo, ZONG Si-guang, CHEN Li-fei

(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Traditional weaponry may struggle to successfully kill UAV swarm targets in future naval combat, jeopardizing surface ship safety. The inclusion of shipborne laser weapons can improve the complementarity of traditional weapons and close gaps in air defense. The firing table shipborne laser weapons to typical UAV swarm targets is studied, which will substantially improve the overall fighting capabilities of naval air defense. In this paper, seven modules are used to build a naval laser weapon destruction UAV model for coyote UAV swarm targets, and the probability of shipborne laser weapon destruction distance at different visibility, altitude, power, and destruction threshold are calculated. The destruction capability of shipborne laser weapon is verified. Theoretical assistance is provided for demonstration of shipborne laser weapons.

Keywords: shipborne laser weapons; UAV swarm; destruction distance

1 引言

当前海上作战环境日益复杂,作战模式、理念随着武器迭代而推陈出新,高超音速武器、反舰导弹、制导炸弹、小型快艇、小型无人机及蜂群、“低慢小”目标等新型目标的出现,使得传统武器很难

满足防空反导、近区防卫及信息攻防等职能使命需求,舰载高能激光武器、微波武器和电磁炮等新概念武器应运而生。世界各军事强国均在花大气力投入研究,抢占该领域制高点,掌握军事主动权。尤其是近年来,美国洛马公司、诺格公司、雷

作者简介:杨剑波(1993-),男,研究生,研究方向为信息对抗指挥。E-mail:bonyyang2008@163.com

通讯作者:宗思光(1979-),男,副教授,研究方向为信息对抗指挥。E-mail:41119749@qq.com

收稿日期:2021-12-08

锡恩公司等军工巨头,均积极参与到海军舰载激光武器的研发工作,成效显著,加速了激光武器向实战化应用推进^[1]。

激光武器是一种以高能量密度激光束作用于来袭威胁目标上,使目标被摧毁或受到干扰而失效的作战武器。相较陆基、空基激光武器系统而言,因作战环境的不同,海基激光武器作战应用亦有其特点。主要体现在执行任务多样性,舰载平台适装性和作战环境适用性等方面。现役的大型水面舰艇能为激光武器提供足够的电源功率、安装空间和制冷能力,海上良好的通视性方便了激光武器的作战使用,海上环境特点为抑制激光的热晕效应起到了天然冷却剂作用,海上相对较弱的大气湍流更有利于激光束的传输,这些客观因素推动了激光武器舰载化。

目前舰载激光武器的理论研究主要集中在对外军的舰载激光武器试验和进展情况进行总结梳理启示,提出对舰载激光武器的军事需求和使命任务,分析拦截各类目标的技术指标,或是进行体系贡献率的计算,对拦截各类目标的毁伤距离计算方面研究相对较少。本文研究的是舰载激光武器对典型无人机蜂群目标的毁伤距离,而激光武器属于“点”杀伤武器,一次出光只能照射毁伤一个目标,所以舰载激光武器的毁伤距离研究主要针对单个无人机目标,此数据同样适用于无人机蜂群目标(即以点概面),该数据能在未来海战中为舰艇指挥员对战场环境研判、武器选择等方面提供辅助决策的作用。

2 无人机目标激光易损性分析

激光武器对无人机的毁伤方式分为两类,一类是硬毁伤,通过毁伤无人机关键部件达到丧失作战能力的目的。例如激光辐照机翼、机身等部位,使得结构材料强度下降,影响飞行能力;照射油箱、发动机或机载导弹战斗部等易燃易爆部位,产生大爆炸,毁伤机体。另一类是软毁伤,即对光电侦察载荷、天线或机身内部电子元器件等部件进行激光辐照,使得光学器件致眩、致盲及任务载荷失效,致使无人机丧失侦察、导航等任务效能。

无人机机身、机翼等部位为了保证力学载荷、减重效益和成型工艺,大量采用由结构蒙皮材料组成复合结构材料,主要有玻璃纤维/环氧树脂 +

纤维纸/环氧树脂蜂窝芯 + 玻璃纤维/环氧树脂复合蒙皮,以及碳纤维/环氧树脂 + 纤维纸/环氧树脂蜂窝芯 + 碳纤维/环氧树脂结构复合蒙皮,两者被激光照射,达到毁伤阈值时,会发生不同程度的烧蚀穿孔,产生两种后果,其一是对机身内部电子元器件进行辐照毁伤,其二是影响机身结构材料强度及气动性能,使无人机丧失作战能力或达到毁伤目的。表 1 为无人机组成材料激光毁伤阈值^[2]。

表 1 无人机材料激光毁伤阈值

Tab. 1 Laser destruction threshold of UAV materials

毁伤材料	毁伤阈值
玻璃纤维材料	200 ~ 300 W/cm ² , 辐照 5 s
碳纤维材	200 ~ 500 W/cm ² , 辐照 10 s
薄铝板	100 W/cm ² , 辐照 5 s
航模轻木、泡沫、玻璃钢材料	100 W/cm ² , 辐照 2 ~ 6 s
电子调速器	100 W/cm ² , 辐照 7 s
电池	100 W/cm ² , 辐照 17 s

3 典型无人机蜂群目标选取

近年来,随着美空军接连发布《空军未来作战概念》(2015 年)、《2016 - 2036 年小型无人飞行器系统飞行规划》(2016 年)和《2030 年科技战略》(2019 年)^[3],及无人机蜂群在实战中的运用(俄罗斯驻叙利亚防空部队遭遇 13 架无人机集群袭击事件,沙特东北部阿布盖格炼油厂和胡赖斯油田遭受 18 架无人机袭击事件)^[4],使得蜂群作战的概念及作战效果得到了验证和推广,各国均加大了无人机蜂群领域的研究力度。

美国在无人机蜂群作战领域独树一帜,尤其是以美国战略能力办公室(SOC)、美国海军研究局(ONR)和美国国防预先研究计划局(DARPA)牵头研究,形成了以十克级(“CICADA”项目)、百克级(“Perdix”项目)、公斤级(“LOCUST”项目)、十公斤级、百公斤级(“Gremlins”项目)等平台为基础的作战系统序列^[5]。表 2 为美军典型无人机蜂群平台及基本性能参数表^[6]。

以上三种型号无人机蜂群,主要承担战场数据收集、集群攻击等任务,“小精灵”项目于 2020 年 10 月的第三次飞行测试中验证了自主编队飞行能力,但 9 次空中对接试验均以失败告终,空中回收技术

还未成熟^[7]。“郊狼”无人机能够携带 0.9 kg 战斗部进行察打一体自杀式作战。“灰山鹑”无人机属于微型无人机范畴,主要执行近距精准侦察任务。

基于以上分析,根据激光武器作战使命,选取“郊狼”无人机作为典型目标,选取其相关参数进行后续建模仿真。

表 2 美军典型无人机蜂群平台及基本性能参数表

Tab. 2 Bee colony platform and basic performance parameters of typical U. S. UAV

牵头研究单位	型号	质量/kg	最大飞行速度/(m·s ⁻¹)	最大飞行高度/m	续航时间/h
美国战略能力办公室(SOC)	灰山鹑(Perdix)	0.45	20~30	≤1000	0.3
美国海军研究院(ONR)	郊狼(Coyote)	5.9	30	6094	1.5
美国国防预先研究计划局(DARPA)	小精灵(Gremlins)	320	238~272	9000	1~3

选取“郊狼”无人机主要是为了获取其飞行速度及高度等相关参数,尤其是对于不同飞行速度的无人机目标,舰载激光武器的毁伤距离不同。本文研究的是对“郊狼”无人机蜂群的毁伤距离,如研究对蜂群目标的毁伤能力,还需考虑舰载激光武器系统的各个方面,包括转火时间、响应时间等其他因素。

4 仿真模型建立

激光武器毁伤距离主要由照射到目标上的激光功率密度、能量密度(照射时间)和目标的破坏阈值所决定。目前普遍使用公式(1)来简化推算激光毁伤。

$$I_r(t) = \frac{aD^2P\eta}{\lambda^2\beta^2L^2} \tag{1}$$

式中, $I_r(t)$ 为激光上靶功率密度; a 是常数; D 是发射望远镜直径; P 是激光发射功率; η 是大气透过率; λ 是激光波长; β 是发射光束质量; L 是目标距离。

从公式(1)中可以看出考虑因素过于理想化,忽略了气象环境、激光武器本身自带的误差、大气传输等相关指标的关联性及影响。因此需要构建一套相对较为全面的舰载激光武器反无人机毁伤模型。

依据激光武器系统涉及激光器系统、光束传输系统、大气光学系统、目标捕获跟踪系统(ATP)、目标强激光毁伤系统等关键部分,仿真主要从气象环境参数、激光武器系统平台及目标特性参数、目标等效模拟、大气传输模型、上靶光斑面积模拟、上靶能量密度模拟和毁伤概率模拟七模块进行^[8]。图 1 为舰载激光武器毁伤无人机仿真运行图。

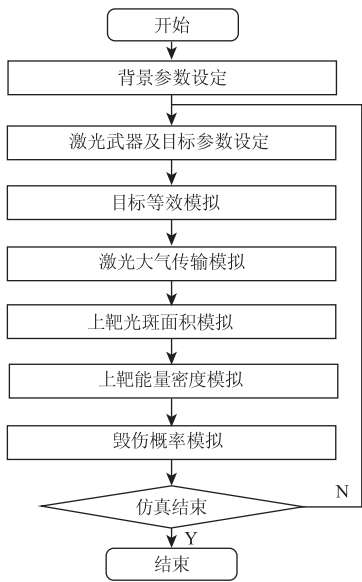


图 1 舰载激光武器毁伤无人机仿真运行图

Fig. 1 Simulation diagram of shipborne laser weapon damaging UAV

第一步对气象环境参数、激光武器系统平台及目标特性参数(包括目标部位的毁伤阈值)进行设定;其次对目标进行空间坐标的转换,方便计算各型角度和空间距离^[9];第三步根据大气传输模型、上靶光斑面积模型和上靶能量密度模型,结合无人机的飞行姿态及角度,采用蒙特卡洛仿真模拟跟瞄误差与射击误差,得到激光上靶功率/能量密度,最后与毁伤阈值进行比对,计算出激光毁伤距离及毁伤概率。相关模块具体内容介绍如下。

4.1 大气传输模型

大气传输模型主要考虑大气衰减和大气湍流两个方面。

在不考虑大气热晕效应等非线性效应的条件下,在水平传输情形下,大气透过率 T 为:

$$T = e^{\frac{-3.912 \times (\frac{0.55}{\lambda})^{\gamma} \times R}{V}} \tag{2}$$

斜率传输情形下,大气透过率 T 为:

$$T = e^{\{-\sec\theta \times \frac{K}{V} \times [1 - e^{-0.835R \times \cos\theta}] \}} \quad (3)$$

其中:

$$q = \begin{cases} 1.6 & V > 20 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \leq V \leq 20 \text{ km} \\ 0.585 V^{1/3} & V < 6 \text{ km} \end{cases} \quad (4)$$

式中, V 为大气能见度; R 为激光武器与目标的距离; K 是常数,取决于大气气溶胶类型,在海洋环境下取 $K = 4.543$; λ 为激光波长; θ 为天顶角; q 为修正因子。

空间中的大气始终处于一种湍流状态,即大气的折射率随空间和时间作无规则的变化,容易导致光束质量严重下降。湍流的强度常用折射率结构常数用 $C_n^2(h)$ 表示,本文主要采用 modified Hufnagel - Valley (MHV) 湍流模型^[10]:

$$C_n^2(h) = 8.16 \times 10^{-54} h^{10} e^{-h/1000} + 3.02 \times 10^{-17} e^{-h/1500} + 1.90 \times 10^{-15} e^{-h/100} \quad (5)$$

$$S = \begin{cases} \pi \min(r_1, r_2)^2 & d_t < |r_1 - r_2| \\ \frac{1}{2} \left(\frac{x}{r_1} \right) r_1^2 + \frac{1}{2} \cos^{-1} \left(\frac{d_t - x}{r_1} \right) r_1^2 - d_t \sqrt{r_1^2 - x^2} & |r_1 - r_2| < d_t < \max(r_1, r_2) \\ 0 & r_1 + r_2 < d_t \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$x = \frac{1}{2}(d_t + (r_1^2 - r_2^2)/d_t) \quad (8)$$

式中, d_t 为光斑中心与目标靶点中心距离; r_2 为靶标等效半径; S 为光斑重叠面积; r_1 为远场光斑半径。

计算过程中,考虑激光武器系统的跟瞄误差和射击误差,两者均服从正态分布的均值为 0,均方差为 σ 的随机数,利用蒙特卡洛仿真,随机生成新的光斑中心^[6]。

4.3 上靶能量密度模型

经过传输后激光上靶功率密度 $I_r(t)$ 为:

$$I_r(t) = \frac{0.84 P_0 T}{A} \quad (9)$$

式中, P_0 为激光发射功率; T 为辐照时间; A 为远场光斑面积。

上靶能量密度 E 为:

$$E = \frac{0.8 I_r(t) S}{\pi r_2^2} \quad (10)$$

式中, S 为光斑重叠面积; r_2 为靶标等效半径。

式中, h 为目标实时高度。

4.2 上靶光斑面积模型

激光经过大气传输,会在远场形成光斑,远场光斑半径 r_1 为:

$$r_1 = \frac{1.22 \beta \lambda R}{D} \quad (6)$$

式中, β 为激光经过大气湍流后的光束质量; D 为激光发射口径; λ 为激光波长; R 为激光武器与目标的距离。

激光照射目标分为两种情况,一是迎头打击,即激光束与目标夹角小于 30° ;另一种是侧向打击,即夹角大于 30° 。两者的光束投影面积不同,与激光武器的高低角、方位角、目标高低角、目标方位角和目标俯冲角有关。

由于激光武器瞄准误差及射击误差导致远场光斑中心与目标靶点中心不重合,产生距离 d_t ,靶标等效半径为 r_2 ,则光斑重叠面积 S 为:

$$\begin{aligned} d_t &< |r_1 - r_2| \\ |r_1 - r_2| &< d_t < \max(r_1, r_2) \\ r_1 + r_2 &< d_t \end{aligned} \quad (7)$$

4.4 毁伤概率模型

根据激光武器毁伤模型判断是否有效毁伤:

$$E_0 (\text{kJ/cm}^2) = P_{r_0} (\text{W/cm}^2) \times T (\text{s}) \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_r > P_{r_0} \cap E > E_0 & \text{毁伤有效} \\ P_r < P_{r_0} \cup E < E_0 & \text{毁伤无效} \end{cases} \quad (12)$$

式中, P_r 为激光上靶功率密度; P_{r_0} 为材料功率密度阈值; E_0 为材料毁伤能量密度阈值; E 为激光上靶能量密度; T 为辐照时间。

公式(2)~(4)中, K 的赋值取决于激光武器所处工作环境的大气气溶胶类型,乡村环境 K 取值 2.828,城市环境 K 取值 3.132,海洋环境 K 取值 4.453,沙漠环境 K 取值 2.496。大气能见度 V 在海洋环境中更有实际意义,在陆地环境中,会有建筑、高山等遮蔽物阻挡,影响激光的传输;在海面上,良好的通视性方便了激光武器的作战使用,海上环境特点为抑制激光的热晕效应起到了天然冷却剂作用,海上相对较弱的大气湍流更有利于激光束的传输。该模型仿真输出条件差异主要体现在仿真环境的不同。

5 仿真结果分析

假定某舰载激光武器的性能参数为:波长为 $1.06\ \mu\text{m}$, 发射光束质量为 3, 发射望远镜直径 $0.3\ \text{m}$, 平均发射功率为 $30\ \text{kW}$, $50\ \text{kW}$ 和 $100\ \text{kW}$ 三档, 跟踪误差及射击误差均为 $10\ \mu\text{rad}$; 选取“郊狼”无人机为目标无人机, 速度为 $110\ \text{km/h}$, 初始飞行高度为 $2\ \text{km}$ 和 $3\ \text{km}$ 两档, 靶标等效半径 $0.01\ \text{m}$; 设定能见度为 $5\ \text{km}$, $15\ \text{km}$ 和 $25\ \text{km}$ 三档。考虑系统的跟瞄误差与射击误差, 进行 100 次蒙特卡洛仿真, 计算概率毁伤距离。图 2 为能见度为 $15\ \text{km}$, 初始高度 $2\ \text{km}$, 毁伤阈值 $200 \times 5\ \text{kJ/cm}^2$ 情况下, 不同功率对无人机目标概率毁伤距离图。图 3 为激光功率 $50\ \text{kW}$, 初始高度 $2\ \text{km}$, 毁伤阈值 $200 \times 5\ \text{kJ/cm}^2$ 情况下, 不同能见度对无人机目标概率毁伤距离图。表 3 为舰载激光武器对“郊狼”无人机目标概率毁伤距离汇总表。

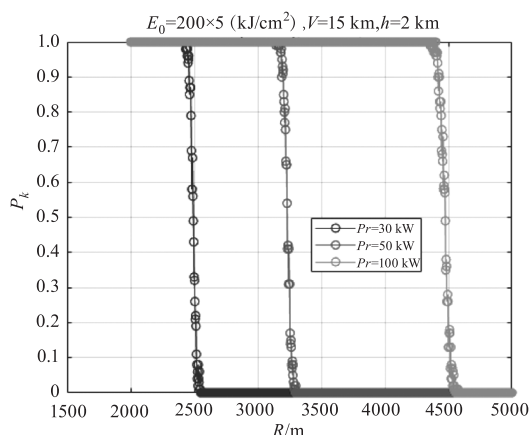


图2 不同功率下概率毁伤距离图
Fig. 2 Probability destruction distance diagram
under different power

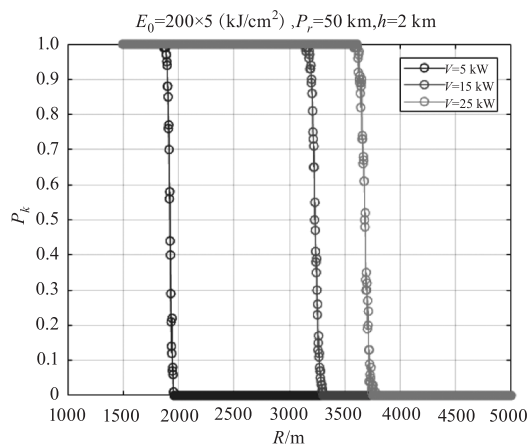


图3 不同能见度下概率毁伤距离图
Fig. 3 Probability destruction distance diagram
under different visibility distance

可以发现表 3 中部分数据, 尤其是 $100\ \text{kW}$ 功率对应部分, 有些毁伤距离已经超过了 $5\ \text{km}$ 。这些数据的出现是为了表 3 数据的完整性, 适当调整了这部分数据的无人机初始距离, 以致能出现概率毁伤距离。表 3 中毁伤距离数据若是小于 $5\ \text{km}$ 的, 其初始距离均为 $5\ \text{km}$; 若大于等于 $5\ \text{km}$ 的, 则理解为适当调整了初始距离。

在无人机易损性分析中, 简要介绍了激光毁伤机理, 激光主要还是通过能量累积达到材料的毁伤阈值能量, 造成材料毁伤。在仿真过程中, 以玻璃纤维材料毁伤阈值能量为 $200 \times 5\ \text{kJ/cm}^2$ 为例, 把目标 $0.01\ \text{s}$ 运动作为一个点, 按每一个起算点后每 $5\ \text{s}$ 为一个界定, 需要 500 个目标点能量密度相加, 但是随着目标的飞行, 距离越近, 远场功率越强, 实际上并不需要 500 个点 (即 $5\ \text{s}$) 就能满足毁伤阈值, 这个起算点也满足毁伤条件。

激光指向性特别好, 理论上讲毁伤概率要么是 1, 要么就是 0, 但是由于瞄准误差及射击误差等客观因素存在, 导致靶上光斑重合面积会随机抖动, 无法对瞄准点进行持续且准确的辐照, 使得上靶能量发散明显, 无法在规定时间内达到毁伤阈值, 即无法对目标材料造成毁伤, 就出现了概率毁伤这种情况, 但由于激光的精准性, 概率毁伤距离范围偏差并不大。

毁伤概率为 0, 意味着这个距离不能造成激光毁伤; 毁伤概率为 $0 \sim 1$, 此状态下, 激光可以对目标进行毁伤, 但不能保证效果; 毁伤概率为 1, 意味着这个距离, 能 100% 毁伤目标。单从毁伤单目标而言, 可从毁伤概率 $0 \sim 1$ 的距离开始照射, 但对于无人机蜂群目标而言, 优先选择距离在毁伤概率为 1 的距离以内的目标进行照射, 这样能保证毁伤有效性。

从图 2 可得出, 在能见度、初始高度及目标毁伤阈值一定的情况下, 有效毁伤距离 (概率为 1) 随着激光发射功率的提升而变远; 从图 3 可得出, 在发射功率、初始高度及目标毁伤阈值一定的情况下, 有效毁伤距离随着环境能见度的提升而变远, 因为修正因子 q 随着能见度分段取值, 使得能见度从 $5\ \text{km}$ 到 $15\ \text{km}$, $15\ \text{km}$ 到 $25\ \text{km}$, 这两者的毁伤距离增长比值, 前者较大。

对于毁伤阈值为 $100 \times N\ \text{kJ/cm}^2$ 系列的材料, 在

相同能见度情况下,由于功率大小不同,导致远场功率密度不一,随着激光束与目标夹角的不同,即不同打击状态下激光投影面积不同,出现以下 3 种情况。

以薄铝板材料能见度 15 km 为例,一是功率为 30 kW 情况下,夹角大于 30°,为侧向打击,高度 2 km

的毁伤距离大于高度 3 km 的毁伤距离;二是功率为 50 kW 情况下,夹角略大于 30°,也为侧向打击,高度 2 km 和 3 km 的数据接近;三是功率为 100 kW 情况下,夹角小于 30°,为迎头打击,高度 2 km 的毁伤距离小于高度 3 km 的毁伤距离。

表 3 舰载激光武器对“郊狼”无人机目标概率毁伤距离汇总表

Tab. 3 Summary of probability destruction distance of shipborne laser weapon to Coyote UAV target

郊狼无人机 $V=110\text{ km/h}$ 初始距离 $d=5\text{ km}$											
打击部位	毁伤能量 $/(\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-2})$	高度 $/\text{km}$	能见度/ km								
			5			15			25		
			功率/ kW								
			30	50	100	30	50	100	30	50	100
			概率毁伤距离/ km								
光电 传感器	70×5	2	2.41~2.46	2.97~3.01	3.80~3.88	4.12~2.22	5.09~5.20	6.68~6.82	4.73~4.88	5.93~6.10	7.80~8.02
		3	2.31~2.45	3.18~3.26	4.38~4.50	4.07~4.19	5.37~5.51	7.30~7.50	4.59~4.75	6.15~6.28	8.44~8.70
玻璃 纤维材料	200×5	2	1.43~1.49	1.89~1.96	2.57~2.63	2.46~2.52	3.16~3.28	4.41~4.54	2.80~2.89	3.62~3.73	5.06~5.19
		3	1.13~1.19	1.16~1.46	2.90~2.68	1.75~1.88	2.87~3.00	4.43~4.59	2.12~2.26	3.28~3.41	5.06~5.20
	300×5	2	1.05~1.12	1.53~1.58	2.17~2.22	1.95~2.01	2.59~2.67	3.66~3.77	2.21~2.27	2.92~3.04	4.21~4.28
		3	0.20~0.25	1.35~1.39	1.87~2.01	1.62~1.70	2.00~2.14	3.49~3.63	1.87~1.94	2.35~2.50	3.97~4.09
碳纤维 材料	200×10	2	1.52~1.56	1.98~2.03	2.66~2.71	2.53~2.60	3.28~3.34	4.51~4.60	2.86~2.92	3.72~3.80	5.16~5.26
		3	1.22~1.28	1.29~1.47	2.68~2.75	1.83~1.96	2.99~3.07	4.55~4.64	2.20~2.32	3.37~3.45	5.16~5.27
	500×10	2	0.94~1.00	1.14~1.19	1.77~1.83	1.43~1.48	2.03~2.08	2.94~3.00	1.63~1.68	2.28~2.34	3.33~3.38
		3	0	0.60~0.68	1.66~1.72	0.59~0.64	1.67~1.75	2.49~2.59	0.91~0.97	1.95~2.01	2.87~2.96
薄铝板 材料	100×5	2	2.07~2.12	2.58~2.63	3.34~3.42	3.49~3.57	4.43~4.53	5.78~5.95	3.98~4.07	5.04~5.19	6.70~6.87
		3	1.69~1.81	2.57~2.68	3.76~3.86	3.27~3.40	4.44~4.56	6.29~6.44	3.71~3.83	5.08~5.20	7.22~7.40
航模轻木、 泡沫、玻 璃钢材料	100×2	2	2.00~2.08	2.51~2.58	3.27~3.38	3.39~3.55	4.34~4.51	5.64~5.83	3.90~4.06	4.98~5.17	6.71~6.96
		3	1.60~1.80	2.51~2.66	3.69~3.81	3.21~3.39	4.37~4.55	6.18~6.44	3.63~3.81	4.93~5.19	7.10~7.37
	100×6	2	2.08~2.14	2.59~2.64	3.38~3.42	3.51~3.60	4.44~4.55	5.83~5.95	3.99~4.10	5.08~5.18	6.75~6.90
		3	1.71~1.83	2.61~2.70	3.76~3.87	3.27~3.40	4.46~4.59	6.30~6.44	3.72~3.85	5.07~5.22	7.22~7.40
电子 调速器	100×7	2	2.10~2.15	2.60~2.66	3.38~3.44	3.52~3.60	4.46~4.55	5.86~5.96	4.02~4.12	5.11~5.21	6.84~7.00
		3	1.73~1.84	2.63~2.70	3.79~3.88	3.31~3.41	4.50~4.58	6.31~6.46	3.75~3.86	5.10~5.22	7.26~7.42
电池	100×17	2	2.27~2.31	2.79~2.83	3.57~3.61	3.70~3.75	4.65~4.71	6.05~6.13	4.19~4.26	5.27~5.36	7.04~7.12
		3	1.87~1.97	2.79~2.85	3.96~4.03	3.49~3.54	4.67~4.73	6.51~6.59	3.92~3.99	5.29~5.37	7.45~7.52

6 结 语

美空军助理部长威尔·罗珀在美《空军》杂志提到“蜂群作战就是未来战场的样式”^[11]。在未来海战场,无人机蜂群作战样式在战场态势感知、有无人机协同作战方面将发挥重大作用。本文具体计算

了舰载激光武器对“郊狼”无人机目标的射表,得出了舰载激光武器在不同能见度、功率、高度、毁伤阈值情况下的毁伤数据。下一步,将围绕优化七个模块的模型,添加舰艇在水面活动状态等因素,完善舰载激光武器对典型无人机蜂群目标的射表研究。

参考文献:

- [1] Luo Lei, Tan Bitao, Zhang Peng. Research on the development of American shipborne laser weapons[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021, (4): 33–37. (in Chinese)
罗磊, 谭碧涛, 张鹏. 美军舰载激光武器发展研究[J]. 飞航导弹, 2021, (4): 33–37.
- [2] Zhang Yuanming, Zhao Pengfei. Analysis of composite UAV structure[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composite, 2003, (6): 36–40. (in Chinese)
张元明, 赵鹏飞. 低速小型无人机中的复合材料结构及分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2003, (6): 36–40.
- [3] Dong Yu, Gao Min, Zhang Yue, et al. Research progress and development trend of American UAV swarm[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020, (9): 37–42. (in Chinese)
董宇, 高敏, 张悦, 等. 美军蜂群无人机研究进展及发展趋势[J]. 飞航导弹, 2020, (9): 37–42.
- [4] Cai Jie, Wang Feifei, Yang Bin. Exploration of UAV cluster defense technology[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020, (12): 32–35. (in Chinese)
蔡杰, 王菲菲, 杨彬. 无人机集群防御技术探索[J]. 飞航导弹, 2020, (12): 32–35.
- [5] Song Yiran, Shen Chao, Li Dongbing. Research progress of distributed low cost UAV swarm in the United States[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2016, (8): 17–22. (in Chinese)
宋怡然, 申超, 李东兵. 美国分布式低成本无人机集群研究进展[J]. 飞航导弹, 2016, (8): 17–22.
- [6] Liu Qiang, He Ming. Research on countermeasures and equipment requirements of small UAV swarm at sea[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2019, 33(4): 59–65. (in Chinese)
柳强, 何明. 海上小型无人机集群的反制装备需求与应对之策研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2019, 33(4): 59–65.
- [7] Yuan Cheng, Dong Xiaolin, Zhu Chaolei. Summary of foreign advanced military UAV technology development in 2020[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021, (1): 17–24. (in Chinese)
袁成, 董晓琳, 朱超磊. 2020年国外先进军用无人机技术发展综述[J]. 飞航导弹, 2021, (1): 17–24.
- [8] Luan Shengli, Han Jianxing, Jiang Chongjian. Modeling and simulation for shipborne energy laser weapon system[J]. Command Control & Simulation, 2008, 30(5): 61–64. (in Chinese)
栾胜利, 韩建兴, 蒋充剑. 舰载激光武器系统建模与仿真技术[J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(5): 61–64.
- [9] Wang Hangyu, Wang Shijie, Lipeng. Shipborne fire control principle[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 146–148. (in Chinese)
王航宇, 王士杰, 李鹏. 舰载火控原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 146–148.
- [10] Su Yi, Fang Min. High energy laser system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 123–133. (in Chinese)
苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 123–133.
- [11] Harrison Schramm. Mosaic warfare: exploiting artificial intelligence and autonomous systems to implement decision-centric operations[EB/OL]. <https://csbaonline.org/research/publications/mosaic-warfare-exploiting-artificial-intelligence-and-autonomous-systems-to-implement-decision-centric-operations/publication/1>, 2020–02–11.