

文章编号:1674-8190(2020)06-819-08

激光武器发射转塔尺寸对飞机作战效能的影响

鄢奇佳, 宋笔锋, 裴扬

(西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘要: 机载激光武器可以主动防御来袭导弹, 大幅提升作战飞机的生存能力。为了具备更远的打击距离, 激光武器需要尽可能大的发射镜直径, 但几何尺寸较大的发射转塔会对飞机的气动和隐身性能产生不利影响, 降低飞机的战场生存能力。利用计算流体力学和物理光学法, 分析发射转塔直径对飞机的气动性能和隐身性能的影响, 并采用基于 agent 的作战仿真方法研究发射转塔直径对飞机在突防作战中作战效能的影响。结果表明: 飞行速度随着发射转塔直径的增大有小幅度降低, 降低幅度在 2% 以内; 30、50 和 70 cm 的发射转塔直径分别导致飞机的头向 RCS 64%、173% 和 282% 的增加; 对于作战效能而言, 激光武器发射转塔的尺寸并非越大越好, 相对于无防御措施的无人机执行突防任务, 50 cm 的发射转塔直径可以提高 77.2% 的任务成功率, 是三种方案中最高的。

关键词: 机载激光武器; 激光发射转塔; 计算流体力学; 物理光学法; 气动性能; 隐身性能

中图分类号: V211; V218

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.06.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect of Laser Weapon Turret Size on Aircraft Combat Effectiveness

YUN Qijia, SONG Bifeng, PEI Yang

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Airborne laser weapon system can increase the survivability of the aircraft by active defense. In order to obtain longer fire range, a large diameter of the airborne laser weapon turret is required, which may cause negative influence to the aircraft. The influence of turret diameter on aerodynamic and stealth performance of the aircraft is analyzed by means of computational fluid dynamics method and physical optics method. And the influence of turret diameter on combat effectiveness is analyzed with agent-based combat simulation. The results show that the increase of turret diameter will lead to a slight decrease of aircraft speed, while the influence quantity of laser turret to aircraft speed is within 2%. In the meantime, the increase of turret diameter increases the front RCS (Radar Cross Section) of the aircraft, an diameter of 30, 50 and 70 cm of laser turret could lead to an increase of 64%, 173% and 282% of the aircraft RCS. The 50 cm diameter design could increase the most mission effectiveness, which is 77.2%.

Key words: airborne laser weapon; laser turret; computational fluid dynamics; physical optics; aerodynamic performance; stealth performance

收稿日期: 2020-03-09; 修回日期: 2020-05-27

基金项目: 航空科学基金(20185153032)

通信作者: 鄢奇佳, yunqijia@163.com

引用格式: 鄢奇佳, 宋笔锋, 裴扬. 激光武器发射转塔尺寸对飞机作战效能的影响[J]. 航空工程进展, 2020, 11(6): 819-826.

YUN Qijia, SONG Bifeng, PEI Yang. Effect of laser weapon turret size on aircraft combat effectiveness[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(6): 819-826. (in Chinese)

0 引言

激光武器是利用高能激光束对目标进行远距离打击的定向能武器。激光武器具有诸多传统武器所不具备的优势,如发射速度为光速,几乎可以做到发现即摧毁、无声无息、难以防御,非常适合用来对付高速目标;其储弹量不受弹舱空间的限制,只要持续供电就能连续不断地发射,不需要浪费时间装填弹药;并且由于发射只消耗电能,每发成本极低,与动辄百万美元的拦截导弹相比,在很大程度上降低了战争成本,解决了不得不使用昂贵的精确制导导弹去拦截低成本武器的难题^[1-2]。激光武器的使用必将给未来作战模式和武器装备设计带来颠覆式革命。

然而,激光武器发射转塔的安装也存在一些问题。一方面,由于激光武器的有效作用距离与发射镜直径成正比,需要尽可能大的发射镜直径以提高武器射程;另一方面,由于内部空间、转塔尺寸、机身遮挡等限制,激光武器发射转塔无法内埋,而突出于飞机表面的激光武器发射转塔严重地破坏了飞机的流线型外形,对飞机的空气动力学特性和电磁散射特性产生了不利的影 响^[3]。

针对吊舱、导弹、副油箱等外挂物对飞机气动性能和隐身性能的影响已有很多研究。R. Sluder 等^[4]研究了光电吊舱的升阻力系数和表面压力分布,发现光电吊舱所受到的升力大于阻力,为光电转塔在飞机上的安装提供了参考;卫海粟等^[5]采用 CFD 技术研究了外挂吊舱对飞机气动特性的影响,对比了挂载吊舱前后飞机飞行性能和操稳特性,但对于外挂吊舱外形参数变化的影响未进行深入研究;迟圣威等^[6]基于 Workbench 仿真对光电吊舱风阻力矩进行了研究,但却只对光电吊舱进行了研究,并未考虑其安装在飞机上的情况;刘战合等^[7]研究了头部外形对无人机气动和隐身性能的影响,计算了两种头部外形的气动特性和 RCS 曲线分布,但并未对外形参数进行定量研究;刘战合等^[8]还研究了有、无外挂设备对飞行器 RCS 曲线分布特性的影响,但并未研究外挂设备外形参数的影响;岳奎志等^[9]研究了不同挂载导弹方案下作战飞机的 RCS 特性,但并未研究挂载导弹尺寸的影响。

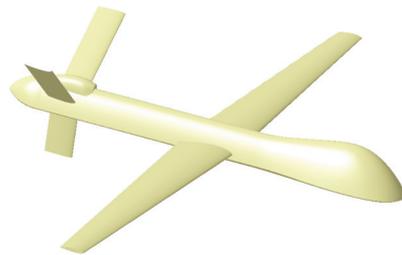
为了量化研究激光武器发射转塔的直径对飞

机气动性能和隐身性能的影响,本文参考美军现有激光武器发射转塔及其载机的尺寸,以美国 MQ-9 无人机为基准,建立不同直径的激光武器发射转塔模型,分析激光武器发射转塔直径对飞机气动性能和 RCS 的影响,并通过作战仿真方法研究其对作战效能的影响,以期 为机载激光武器的设计提供参考。

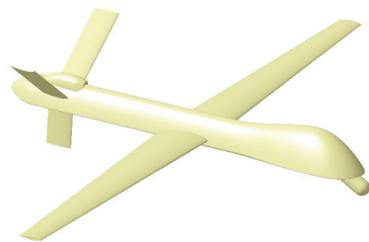
1 无人机模型建立

1.1 三维模型

为了分析机载激光武器发射转塔的直径和安装角对飞机性能的影响,参考美国通用原子公司“低功率激光武器演示器”(Low Power Laser Demonstration,简称 LPLD)项目^[10]的前倾式激光发射转塔安装形式,建立安装角为 30° ,转塔直径分别为 30、50 和 70 cm 的激光武器发射转塔模型,并与原始飞机模型进行对比分析,如图 1 所示。飞机外形参考美国 MQ-9 无人机,采用 CATIA 软件进行建模,飞机翼展 20 m,平均气动弦长 1.2 m,机身长度 12.5 m,机翼参考面积 23 m^2 。



(a) 原始飞机模型



(b) 安装激光武器发射转塔 的飞机模型

图 1 飞机和激光武器发射转塔 的三维模型

Fig. 1 The aircraft and laser turret model

1.2 气动性能计算模型

气动分析中,飞机巡航速度为 $0.3Ma$,任务飞行高度为 7 km ,查询国际标准大气表,可得空气温度为 242.65 K ,大气压强为 $41\ 040\text{ Pa}$,空气密度为 0.589 kg/m^3 ,动力黏度为 $1.55 \times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。采用计算流体力学软件 FLUENT 来计算不同方案的气动性能。计算中设定其俯仰角为 $-4^\circ \sim 10^\circ$,间隔 2° ,控制方程选择为定常可压缩 N-S 方程,湍流模型选择 $k-\omega\text{ SST}^{[11]}$,湍流动能和动量都采用二阶迎风格式处理。为了提高计算效率,取一半机身进行计算,将其所在壁面设为对称面。原始飞机总网格量为 $1\ 691\ 003$,搭载最大尺寸的激光武器发射转塔时总网格量为 $1\ 743\ 884$,所有网格质量均高于 0.6 ,其计算网格如图 2 所示。

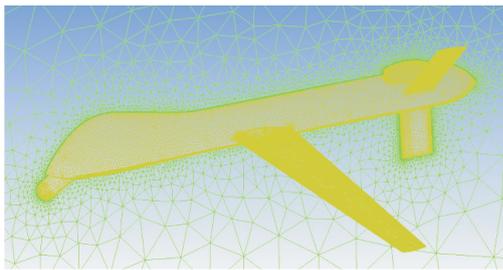


图 2 气动计算的网格模型

Fig. 2 The computation grid of aerodynamic model

1.3 隐身性能计算模型

MQ-9 无人机主要执行对地面目标的跟踪、监视和打击任务,选择 45° 仰角作为典型雷达波入射角,选择 X 波段的典型值 10 GHz 作为入射雷达波的频率。在该频段范围内,MQ-9 无人机为典型的电大尺寸目标,适合高频计算方法。因此,本文采用物理光学法,应用电磁仿真软件 FEKO,计算激光武器发射转塔的直径对飞机 RCS 特性的影响。

2 转塔尺寸对飞机升阻特性的影响

激光武器发射转塔直径分别为 $30、50、70\text{ cm}$ 的飞机升力系数、阻力系数及其变化率如图 3~图 6 所示。

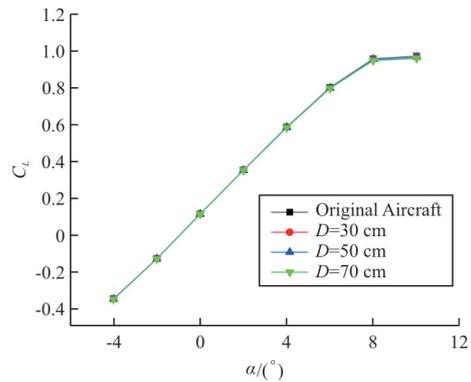


图 3 不同转塔直径的飞机升力系数

Fig. 3 The aircraft lift coefficient of different turret diameter

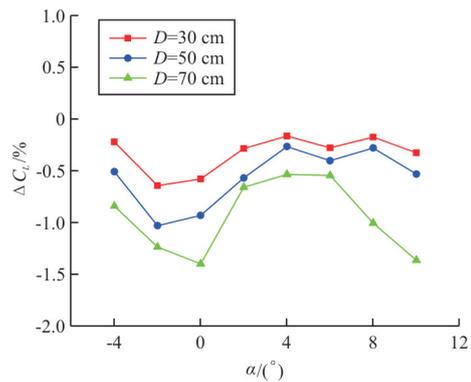


图 4 不同转塔直径的飞机升力系数相对变化率

Fig. 4 The relative variation of aircraft lift coefficient of different turret diameter

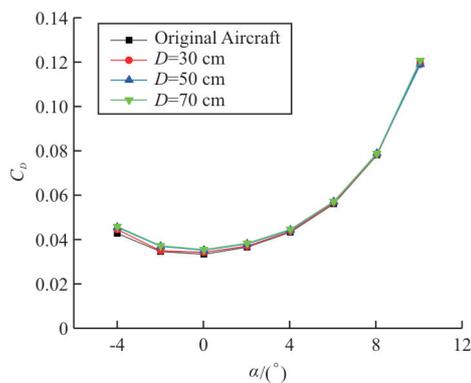


图 5 不同转塔直径的飞机阻力系数

Fig. 5 The aircraft drag coefficient of different turret diameter

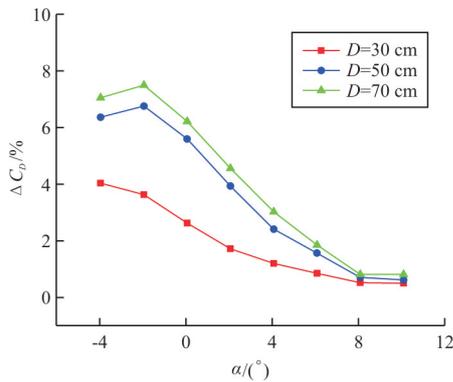


图 6 不同转塔直径的飞机阻力系数相对变化率

Fig. 6 The relative variation of aircraft drag coefficient of different turret diameter

从图 3~图 4 可以看出:安装激光武器发射转塔后,飞机升力系数有所降低,但降幅不大,30、50、70 cm 直径的转塔引起的升力系数相对于原始飞机的减少量分别在 0.6%、1.0%、1.5% 以内;并且在常用迎角 $2^\circ \sim 6^\circ$ 范围内,激光武器发射转塔的影响更小,三种直径的影响均在 1% 以内。表明激光武器发射转塔的安装对飞机升力特性的影响十分微弱。

从图 5~图 6 可以看出:发射转塔对阻力系数的影响幅度大于升力系数,并且发射转塔直径越大,阻力系数的增幅越大;但随着迎角的增大,激光武器发射转塔对阻力的影响逐渐减小,以 0° 迎角为例,激光武器发射转塔直径为 30 cm 时,对飞机阻力系数的增加量为 2.35%;直径为 50 cm 时,对飞机阻力系数的增加量为 5.59%;直径为 70 cm 时,对飞机阻力系数的增加量为 6.20%。

3 转塔尺寸对飞行速度的影响

以最大平飞速度为例,讨论激光武器发射转塔对飞机飞行性能的影响。假设原始飞机的最大起飞质量为 4 700 kg,最大载油量为 1 800 kg,发动机最大输出功率为 700 kW,翼面积为 23 m^2 。

飞机在发动机输出功率达到最大值 P_{\max} 时具有最大平飞速度 v_{\max} 。在巡航高度下,最大平飞速度为

$$v_{\max} = \left(\frac{2P_{\max}}{\rho C_{D\min}} \right)^{1/3} \quad (1)$$

式中: S 为飞机的翼面积; ρ 为空气密度; $C_{D\min}$ 为 0° 迎角下的阻力系数。

激光武器发射转塔的安装会增加飞机的阻力系数,引起最大平飞速度的降低。不同激光武器发射转塔的直径对飞机最大平飞速度的影响如表 1 所示。

表 1 发射转塔直径对最大平飞速度的影响

Table 1 Influence of turret diameter to aircraft maximum speed

发射转塔直径/cm	最大平飞速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
—(原始飞机)	145.23
30	143.97
50	142.61
70	142.34

从表 1 可以看出:激光武器发射转塔的安装增加了飞机的阻力,导致最大平飞速度降低;随着发射转塔直径的增加,最大平飞速度呈减小的趋势,但影响幅度很小,30、50、70 cm 的发射转塔直径分别导致飞机的最大飞行速度降低了 0.9%、1.8% 和 2.0%。

4 转塔尺寸对飞机 RCS 的影响

激光武器发射转塔直径分别为 30、50、70 cm,入射雷达波的频率为 10 GHz 时,各方案的 RCS 曲线如图 7 所示。

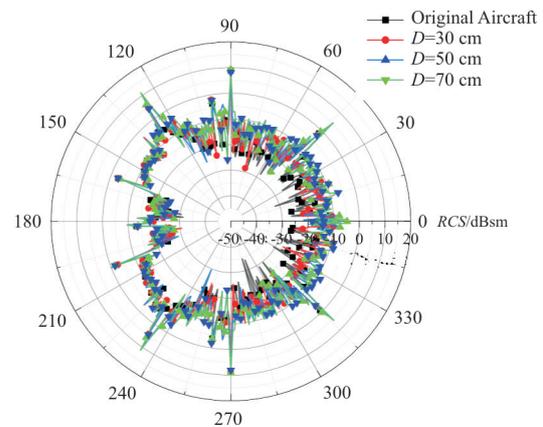


图 7 不同转塔直径的飞机 RCS 曲线

Fig. 7 RCS curves of different turret diameters

从图 7 可以看出:各方案的 RCS 曲线有较大相似性;激光武器发射转塔对飞机 RCS 的影响主

要发生在头向,其次发生在侧向,而对尾向基本没有影响;发射转塔直径对 RCS 的影响表现为对飞机 RCS 的增加,并且随着激光武器发射转塔直径的增加,飞机 RCS 曲线的波峰位置无明显变化,幅值逐渐增大。这是因为激光武器发射转塔直径的增加导致反射面积增加,从而引起 RCS 的增加。

在计算雷达探测概率时,目前主流的做法是选择重要角域内典型雷达波频率的 RCS 均值作为该方向上的飞机 RCS 来计算雷达探测概率。因此,选择 $-30^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的 RCS 均值作为飞机头向重点探测区域的 RCS, $60^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 的 RCS 均值作为飞机侧向重点探测区域的 RCS, $150^{\circ}\sim 210^{\circ}$ 的 RCS 均值作为飞机尾向重点探测区域的 RCS。雷达探测频率为 10 GHz 时不同激光武器发射转塔直径对应的飞机各方向 RCS 如表 2 所示。

表 2 不同发射转塔直径的飞机各向 RCS

Table 2 RCS of different turret diameters

发射转塔直径/cm	$\bar{\sigma}/m^2$		
	头向 $\pm 30^{\circ}$	侧向 $\pm 30^{\circ}$	尾向 $\pm 30^{\circ}$
-(原始飞机)	0.011	0.020	0.014
30	0.018	0.029	0.016
50	0.030	0.038	0.016
70	0.042	0.055	0.015

从表 2 可以看出:发射转塔直径的增加主要导致飞机头向和侧向 RCS 均值增大,对飞机尾向 RCS 均值的影响不大;30、50、70 cm 的发射转塔直径分别导致飞机的头向 RCS 增加 64%、173% 和 282%,侧向 RCS 增加 45%、90% 和 175%。

5 转塔尺寸对光斑能量密度的影响

激光武器的毁伤能力主要取决于目标材料属性和光束在目标表面形成光斑的能量密度。目标在激光的作用下温度逐渐升高,当光斑的能量累积超过一定阈值,就会造成目标材料融化,导致目标毁伤。目标表面的光斑能量密度与激光发射转塔尺寸之间的关系为

$$I = \frac{P_0 K_0 \tau_a (1 - r) \cos \alpha}{\pi R^2 (1.22 \lambda \beta / D)^2} \quad (2)$$

式中: P_0 为激光的初始功率; K_0 为光学系统透过

率; τ_a 为大气透过率; r 为目标材料表面反射率; α 为光束与材料的夹角; λ 为激光的波长; D 为激光发射镜的直径; β 为光束质量因子; R 为机载激光武器与目标之间的距离。

目标表面的光斑能量密度与激光发射转塔尺寸之间的关系如图 8 所示,可以看出:当激光武器与目标之间的距离比较远时,由于大气的吸收和光束的扩散,目标表面光斑的功率密度很低;但随着距离的缩短,目标表面光斑的功率密度呈指数型增长,尤其在 5 km 范围内,发射镜直径的增加可导致目标表面光斑的功率密度成倍的增殖。

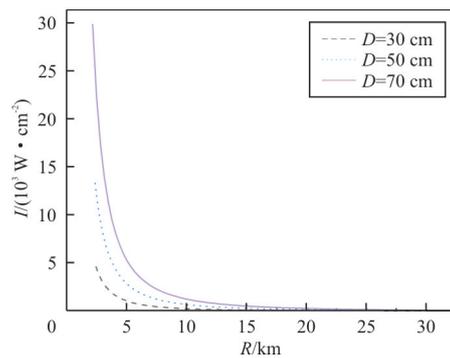


图 8 转塔直径与光斑能量密度的关系

Fig. 8 The relationship of laser mirror diameter and spot energy density

6 转塔尺寸对作战效能的影响

激光武器的安装一方面提高了飞机的主动防御能力和战场生存能力,另一方面又降低了飞机的飞行速度,增大了飞机的 RCS,导致飞机的战场生存能力有所降低。为了量化研究机载激光武器发射转塔的尺寸对飞机作战效能的影响,采用基于 agent 的建模与仿真方法,将上述不同转塔直径的载机性能参数代入模型,进行无人机突防作战仿真,分析各方案的突防成功概率。

6.1 作战场景假设

本文考虑一架搭载激光武器的 MQ-9 无人机在防空导弹阵地的拦截下,执行突防任务的场景。无人机从防区外飞来,穿过防空导弹阵地的防御范围,最终抵达目标点执行作战任务,如图 9 所示。若无人机中途被导弹击落,则认为任务失败,若无

人机成功抵达目标点,则认为任务成功。

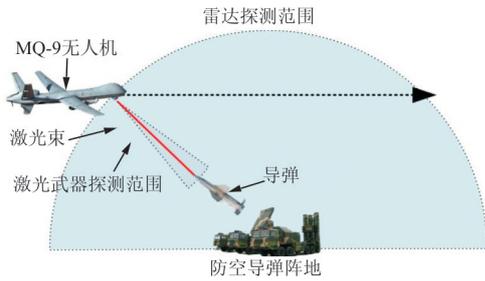


图 9 机载激光武器执行突防任务

Fig. 9 Airborne laser weapon in penetration mission

6.2 作战任务模型

基于突防作战的任务要求,采用模块化的建模思想,将各 agent 按照运动、感知、通信、决策、执行等功能划分为不同的模块,根据各自的功能对每个模块分别进行建模,模型结构以及各模块之间的关系如图 10 所示。各模块的具体数学模型详见文献 [12],在此不再赘述。

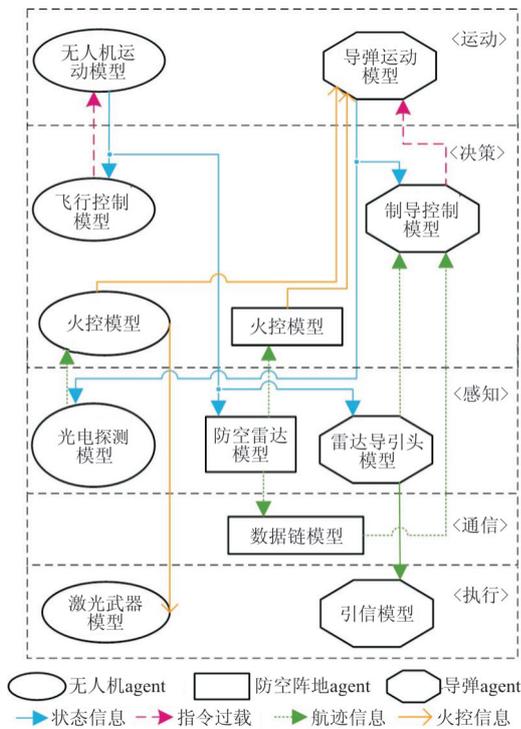


图 10 agent 模型结构图

Fig. 10 The agent model structure

无人机 agent 包含运动模型、飞行控制模型、光电探测模型、火控模型和机载激光武器模型。飞

行控制模型可根据飞机自身状态和对环境的感知计算飞行指令,飞机运动模型得到指令后控制飞行的航路。光电探测模型实时计算探测范围内的目标探测概率,而后由火控模型控制激光武器的发射,激光武器模型实时计算靶面光斑能量密度和目标毁伤所需驻留时间。

防空阵地 agent 包含雷达模型、火控模型和数据链模型。雷达模型实时计算目标无人机的探测概率,火控模型判断导弹发射时机,通过数据链将目标航迹信息发送给导弹。

导弹 agent 包含运动模型、制导控制模型、导引头模型和引信模型。制导控制模型根据导弹和目标的位置、速度信息计算控制指令,运动模型接收到指令后实时调整飞行航迹。导引头模型实时计算目标的探测概率,判断目标是否进入爆炸范围,并由引信模型控制导弹的爆炸时机并计算目标的毁伤概率。

6.3 仿真案例分析

基于 Anylogic 软件平台进行 agent 作战仿真系统的开发,仿真界面如图 11 所示。红色三角形为无人机 agent,蓝色菱形为防空阵地 agent,黄色圆形区域为防空阵地的雷达探测范围,紫色菱形为任务目标点。



图 11 agent 作战仿真演示

Fig. 11 Demonstration of agent-based combat simulation

假设防空阵地雷达对处于 100 km 的 RCS 为 1 m^2 目标的特征探测概率为 0.9,则可得到雷达的特征常数^[13],进而通过恒虚警检法^[14]计算得到任

意目标的探测概率。假设机载激光武器功率为 50 kW,发射转塔尺寸及其对应的载机性能如表 1~表 2 所示,以突防成功率作为效能的衡量指标,进行蒙特卡罗仿真,每个方案进行 500 次仿真,仿真结果如表 3 所示。

表 3 发射转塔直径对作战效能的影响
Table 3 Influence of turret diameter to combat effectiveness

发射转塔直径/cm	突防成功率/%
—(原始飞机)	1.5
30	67.6
50	78.7
70	61.8

从表 3 可以看出:没有防御措施的情况下无人机很难完成突防任务,安装机载激光武器后可以大幅度提升无人机的生存能力;三种方案中,50 cm 直径的方案对无人机突防效能的提高最多,将突防成功率从 1.5% 提升到了 78.7%,提升了 77.2%。表明在设计机载激光武器的过程中不能只追求攻击能力的强大,隐身能力对于飞机的作战效能同样重要。若隐身能力降低太过严重,飞机面临饱和导弹打击时,激光武器也无法拦截所有导弹。设计人员必须对激光武器所带来的优势和引起的问题进行综合权衡,得到最合适的设计方案。

7 结 论

(1) 激光武器发射转塔的安装减小了飞机的升力系数,增大了飞机的阻力系数。随着发射转塔直径的增大,飞机的最大飞行速度有所降低,降低幅度在 2% 以内。

(2) 激光武器发射转塔的安装会导致飞机的 RCS 增大,随着直径的增加,飞机头向和侧向 RCS 有显著增加。30、50、70 cm 的发射转塔直径分别导致飞机的头向 RCS 增加 64%、173% 和 282%,侧向 RCS 增加 45%、90% 和 175%。

(3) 机载激光武器可以提高无人机的作战效能。但随着发射转塔直径的增大,激光武器的射程虽然有所增加,但敌方雷达对飞机的探测距离同样增加。持续增大转塔直径有导致作战效能降低的风险。在本文的三种方案中,50 cm 直径的方案对

无人机突防效能的提高最大,将突防成功率提升了 77.2%。

参考文献

- [1] ELLIS J D. Directed-energy weapons: promise and prospects[M]. USA: Center for a New American Security, 2015.
- [2] APOLLONOV V V. 激光武器—谬论与展望[J]. 中国光学, 2014, 7(3): 491-498.
APOLLONOV V V. Laser weapons-myths and prospects [J]. Chinese Optics, 2014, 7(3): 491-498. (in Chinese)
- [3] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
SANG Jianhua. Low observable technologies of aircraft [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [4] SLUDER R, GRIS L, KATZ J. Aerodynamics of a generic optical turret[J]. Journal of Aircraft, 2015, 45(5): 1814-1815.
- [5] 卫海粟, 李杰, 王正任. 轻型通用飞机外挂吊舱对气动特性影响研究[J]. 航空工程进展, 2017, 8(4): 450-456.
WEI Haisu, LI Jie, WANG Zhengren. Research on the influence of external pods on the aerodynamic characteristics of a light general aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2017, 8(4): 450-456. (in Chinese)
- [6] 迟圣威, 朱镭, 闫伟亮, 等. 基于 Workbench 平台无人机光电吊舱风阻力矩仿真研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014, 37(2): 37-41.
CHI Shengwei, ZHU Lei, YAN Weiliang, et al. Research and simulation of air resistance moment of UAV optoelectronic pod using workbench platform[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2014, 37(2): 37-41. (in Chinese)
- [7] 刘战合, 游泽宇, 王菁, 等. 头部外形对无人机气动/隐身性能影响[J]. 航空兵器, 2020, 27(2): 39-46.
LIU Zhanhe, YOU Zeyu, WANG Jing, et al. Influence of head shape on aerodynamic/stealth performance of UAV [J]. Aero Weaponry, 2020, 27(2): 39-46. (in Chinese)
- [8] 刘战合, 王菁, 姬金祖, 等. 外挂设备对飞行器电磁散射特性的影响[J]. 航空工程进展, 2018, 9(2): 252-258.
LIU Zhanhe, WANG Jing, JI Jinzu, et al. Influence of external store on electromagnetic scattering characteristics of aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(2): 252-258. (in Chinese)
- [9] 岳奎志, 孙聪, 刘虎, 等. 挂载导弹的作战飞机 RCS 特性数值模拟[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(1): 62-67.
YUE Kuizhi, SUN Cong, LIU Hu, et al. Numerical simulation on the RCS of combat aircraft for mounted missile [J]. System Engineering and Electronics, 2014, 36(1): 62-67. (in Chinese)
- [10] 易亨瑜, 齐予, 易欣仪, 等. 通用原子公司高能激光器研制

- 进展[J]. 激光技术, 2017, 41(2): 213-220.
- YI Hengyu, QI Yu, YI Xinyi, et al. Development of GA-ASI's high energy laser[J]. Laser Technology, 2017, 41(2): 213-220. (in Chinese)
- [11] FLORIAN R M. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective[J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2009, 23(4): 305-316.
- [12] 邱奇佳, 宋笔锋, 裴扬, 等. 基于 Agent 建模的机载激光武器系统作战效能影响因素分析[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(4): 826-835.
- YUN Qijia, SONG Bifeng, PEI Yang, et al. Agent based combat effectiveness influence factors analysis method of airborne laser weapon system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(4): 826-835. (in Chinese)
- [13] 马东立, 张考. 雷达散射截面对飞机生存力的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 1998, 24(5): 44-47.
- MA Dongli, ZHANG Kao. Effect of radar cross section on aircraft survivability[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998, 24(5): 44-47. (in Chinese)
- [14] BARTON D K. Radar system analysis and modeling[M]. Norwood: Artech House, 2005: 387-388.

作者简介:

邱奇佳(1990—),男,博士研究生。主要研究方向:飞行器总体设计、机载激光武器、作战效能评估。

宋笔锋(1963—),男,博士,教授、博导。主要研究方向:飞行器总体设计、多学科设计优化与顶层决策技术、高生存力技术及可靠性与维修性。

裴扬(1978—),男,博士,教授。主要研究方向:飞机总体设计、目标毁伤评估与生存力分析。

(编辑:马文静)

(上接第 802 页)

- [20] 周获. 寻的导弹新型导引规律[M]. 北京:国防工业出版社, 2002.
- ZHOU Di. New guidance laws for homing missile[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)

作者简介:

孙磊(1975—),男,博士,副研究员。主要研究方向:飞行器制导控制。

付斌(1989—),男,博士,助理研究员。主要研究方向:飞行

器制导控制、智能无人作战系统。

万士正(1989—),男,博士研究生。主要研究方向:飞行器制导控制、高超声速武器拦截、半实物仿真。

常晓飞(1982—),男,博士,副教授。主要研究方向:飞行器制导控制、反高超声速武器拦截、飞行器半实物仿真。

闫杰(1960—),男,博士,教授。主要研究方向:飞行器制导控制。

(编辑:丛艳娟)