

激光武器设计准则探讨

刘泽金*, 杨未强, 韩凯, 许晓军**

国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073

摘要 研制激光武器需要综合考虑技术挑战、战场环境和作战任务等因素, 推动激光武器的实战应用面临众多难点, 包括高能高光束质量光源难、远距离作战难、高效毁伤难、高效紧凑难、实战应用难等。结合激光武器面临的困难, 依据基本的物理原理, 本文探讨了激光武器的设计准则, 提出高亮度准则、发散角匹配准则、桶中功率最高准则、高效耦合准则、平台适装准则等 5 条主要设计准则, 为激光武器研究和设计提供参考。

关键词 激光光学; 激光武器; 系统构成; 主要参数; 设计准则

中图分类号 TJ95

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1201001

1 引言

激光武器是利用定向发射的高能激光束毁伤敌方目标的一种定向能武器, 具有快速、精准、作战成本低和作战隐蔽等优点, 很多军事专家把它看作是有望改变战争“游戏规则”的新概念武器, 期望其在防空反导、反卫星侦察、反无人机、反高超声速飞行器作战场景中发挥独特作用。激光在其诞生之初就被称作科幻小说中的“死光”, 希望其在军事行动中发挥独特威力^[1]。为实现激光武器的军事潜力, 美、俄、德等国进行积极探索^[2-4], 极大地推动了相关技术的发展。近些年, 许多媒体的宣传夸大了激光武器的作战效能, 导致学术界、工业界对激光武器的研制热情空前高涨。然而, 一个真正有作战能力的高能激光武器系统研制极其复杂, 本文依据基本的物理原理和作战需求, 对高能激光武器的设计准则进行探讨, 为工程师们提供参考。

2 激光武器的系统构成与主要参数

激光武器主要由激光光源、光束控制及作战指挥三个部分构成: 1) 激光光源是武器的“弹仓”, 产生杀伤目标所需的激光能量; 2) 光束控制包括光束定向器和自适应光学系统, 光束定向器负责瞄准目标并控制激光发射方向, 将能量准确投射到目标上, 自适应光学系统对各种原因引起的光束波阵面畸变进

行校正, 以保证系统的光束质量达标; 3) 作战指挥负责作战任务规划和指令, 以及引导信息接入, 并控制整个武器系统完成各项作战任务。激光武器作战时, 需要有目标预警系统配合, 在其引导下, 完成对来袭目标的捕获、跟踪、瞄准和打击任务。

实际作战中, 激光武器要将激光束聚焦在靶目标上, 且有足够的到靶功率密度和时间积累后, 才可以损伤目标, 其作战效能 E 与各主要参数间的关系为

$$E \propto \frac{a(\lambda)\tau(\lambda)PD^2\Delta t}{\lambda^2\beta^2L^2} = \frac{a(\lambda)\tau(\lambda)P\Delta t}{(\theta_a L)^2}, \quad (1)$$

式中: $a(\lambda)$ 为靶目标吸收率; $\tau(\lambda)$ 为大气透射率; D 为系统发射口径; P 为激光器功率; λ 为激光波长; L 为传输距离; β 为全系统的广义光束质量因子; Δt 为有效作用时间; θ_a 为激光武器系统到靶发散角。由于大气传输效应中湍流的影响与发射口径有关, 热晕的影响与激光束功率密度有关, 所以这些参数不是完全独立的。特别是广义光束质量因子 β , 它是到达目标处的光束质量, 除与发射激光束的质量有关, 还与系统的跟踪精度、瞄准精度和大气传输结果(自适应光学校正后)等有关。光束定向器的跟踪精度、瞄准精度也是武器系统设计的主要参数。

3 激光武器研制面临的困难

激光武器研究已有近 60 年的历史, 美、俄等国

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-05-19; 录用日期: 2021-05-24

*E-mail: zejinliu@nudt.edu.cn; **E-mail: xuxiaojun@nudt.edu.cn

制定了多个研发计划,但大多都未能达到预期效果,激光武器军事潜力的实现还有众多技术难题需要攻克。近年来,激光武器拦截无人机、火箭弹等打靶试验时有报道,然而这些试验都只是技术验证试验,其试验条件(主要在作战距离和目标复杂性方面)离实际作战环境还有很大的差距。一款具有实战意义的激光武器研制难度极大,除技术上的突破外,还需要考虑战场环境和作战任务对激光武器使用的影响。综合而言,激光武器面临的困难主要有以下五个方面。

3.1 兆瓦级高光束质量光源难

核心区域防空反导、舰载激光末端拦截、机载激光反导等战术应用,都期望激光武器的输出平均功率达到兆瓦级,并且具有较好的光束质量。为实现这一目标,科学家先后探索了灯泵固体激光、二氧化碳激光,以及氟化氙和氧碘等化学激光,其中只有化学激光实现了兆瓦级高光束质量输出,但其体积规模庞大且战场保障困难,限制了其战术使用。21世纪以来,由于半导体泵浦技术的快速发展,固体激光再次兴起^[5],固体激光、光纤激光相继实现了百千瓦输出,但系统复杂、含能源热管理后整体规模大、光束质量仍不理想,离兆瓦级高光束质量还有差距。

3.2 远距离作战难

激光束的传播距离理论上很远,但它是有一定发散角的电磁波,到达目标的激光功率密度(也可理解为作战效果的表征)与传输距离的平方成反比。所以,激光武器有一个作战射程表(与作战目标有关)或有效射程的概念。另外,远距离作战还面临着光束控制的巨大难度。以百公里反导为例,假设激光武器具有近衍射极限的光束质量,工作波长为 $1\ \mu\text{m}$,有效发射口径为 $1\ \text{m}$,理想情况下 $100\ \text{km}$ 处的光斑直径仅为 $25\ \text{cm}$ 左右,将如此小的光斑稳定保持在远距离外高速运动导弹目标上,光束稳定指向控制的精度需要达到微弧度级。在整个交战过程中,还要克服平台抖动和大气效应造成的光束抖动、漂移、畸变等不利影响,如果不控制这些影响,系统跟踪瞄准偏差是远大于微弧度级的。

3.3 高效毁伤难

激光武器能够实现很高的跟踪瞄准精度,而且能够快速转换打击目标,但是激光武器难以瞬间“秒杀”目标。通常情况下,激光打中目标后,还需要在目标上持续作用一段时间,能量累积到一定程度后才能毁伤目标。激光武器拦截火箭弹、巡航导弹、弹道导弹、高超声速导弹等大型目标时,即使辐照到目

标上的激光功率密度高达 $1000\ \text{W}/\text{cm}^2$,也需要 $1\sim 10\ \text{s}$ 量级的持续辐照时间,这就大大限制了激光武器的实战应用。若要缩短毁伤时间,只能通过大幅提升激光功率等指标,但增加了激光武器研制的难度。

3.4 高效紧凑难

激光武器要实战化,就必须与平台相结合,对应于激光器,除要求高能、高光束质量外,还应具备高效率。另外,激光武器的热管理、光束控制、能源供给等,也需要通过合理的设计和技术保障,实现紧凑化。提升效率和紧凑化是为了降低系统的功率重量比(简称“功重比”)和功率体积比(简称“功体比”)。始于20世纪90年代的美国机载激光武器(ABL)计划,最初设想的功率为 $3\ \text{MW}$,但波音747飞机上只能装载 $1\ \text{MW}$ 功率的激光系统,最终只击落了 $80\ \text{km}$ 远的模拟弹道导弹,未能实现原定作战目标,导致项目下马。

3.5 实战应用难

为实现对作战目标的有效破坏,在激光武器设计中还需要考虑战场环境和作战任务等对激光武器使用的影响,推动激光武器的实战应用面临着众多困难。激光的大气传输是激光武器应用的重要物理基础,特别是在陆基、海基和空基作战领域,大气吸收、散射、湍流和热晕等效应可造成激光能量的衰减和光束质量下降^[6],从而减弱激光武器的作战效果。另外,平台环境对激光武器系统自身的可靠性、安全性影响也很大,战场可保障性也是一个重要方面。

4 激光武器主要设计准则

设计激光武器需要综合考虑多方因素,本文结合激光武器面临的困难,依据基本的物理原理对激光武器设计准则进行探讨。研究认为,激光武器的主要设计准则有以下五个方面。

4.1 高亮度准则

激光武器输出功率提升时要保持良好的光束质量,对激光武器系统而言, $P/(\lambda\beta)^2$ 所表征的亮度越高越好。对于激光器,高亮度设计的基本准则可表述为:

1) 提升激光功率是实现高亮度的基础,对化学激光和碱金属蒸气激光,以提升单口径激光功率为主;对固体激光和光纤激光,重点提升单链路激光功率,合理的光束合成方案,扩充合成的激光路数,获得高功率激光。

2) 光束质量的提升是实现高亮度的关键,由

(1)式可知,激光武器的作战效能与功率成正比,而与光束质量因子的平方成反比,光束质量提升往往比功率提升更重要。功率提升会造成增益介质的不均匀、激发非线性效应和光学器件的形变,从而影响光束质量,因此必须通过高效的热管理方案避免激光增益介质、光学器件热积累造成的光束质量退化。

3) 短波长是实现高亮度的有利因素,但波长优势需适当。理论上,波长越短激光武器有限发射口径引起的光束发散角越小。然而,短波长更易受大气扰动影响,光束补偿控制更难,对光学器件加工的精度要求更高。

此外,为提高激光武器系统的亮度,还需要提升系统光学器件镀膜水平及杂散光的控制水平,实现激光的高效发射。当目标照明激光、自适应光学信标激光和激光武器主激光共孔径发射时,光学器件镀膜应以主激光损耗最小为原则进行设计,兼顾其他波长的损耗优化。

4.2 发散角匹配准则

发射口径和激光器的光束质量决定了系统出射发散角 θ_0 ,但大气湍流、热晕等大气扰动造成的角度扩散 θ_i ,以及致稳系统残留误差和跟踪残留抖动引起的光束抖动角 θ_j 等也会造成系统到靶发散角 θ_a 扩大,系统瞄准精度 θ_p 引起光斑核心偏离,均需要优化匹配。其设计的基本准则可表述为:

1) $\theta_a = \sqrt{\theta_0^2 + \theta_i^2 + \theta_j^2}$, θ_0 、 θ_i 和 θ_j 要优化设计,不是单项最小,而是总体最小。

2) 大气扰动造成的角度扩散 θ_i 主要与湍流和热晕效应有关。当激光武器没有配备自适应光学系统且激光功率不足以引起强烈的热晕效应时,大气湍流引起激光波前相干性退化造成的角度扩散为主要因素,此时 θ_i 受制于大气湍流相干长度 r_0 ,约为 λ/r_0 。在此情况下,再大口径的发射望远镜其等效口径也不会超过 r_0 ,增大发射口径,不会明显减小 θ_i ,选择 D 大于 r_0 即可。

3) 使用自适应光学系统时,可校正大气湍流引起的波前畸变,重新获得相干性较好的波前。此时, θ_i 受制于发射口径 D ,正比于 λ/r_0 。增大发射口径 D 有利于减小 θ_i ,但考虑自适应光学系统的湍流校正能力,发射口径达到一定值后继续增大,其对作战效果的提升不明显。在此情况下,通常选择 D 大于大气湍流相干长度 r_0 ,理论上 (λ/D) 约为 10^{-6} 是较为理想的匹配^[7]。

4) 热晕效应也可造成光斑的畸变和扩散,使 θ_i 增大。热晕效应与 P/D 成正比,功率提升引起的

热晕效应必须控制在自适应光学系统可校正的范围内,否则会出现随着激光器功率提升到靶功率密度不升反降的非线性现象。增大发射口径 D 有利于减少热晕效应,但 D 的增大也会提升湍流校正的难度,增加跟踪机架的抖动量,需要综合评估设计。

5) 光束抖动角 θ_j 主要由致稳系统残留误差和跟踪残留抖动引起,也称为视线抖动。消除视线抖动主要是通过快速反射镜实现,通常光束抖动角 θ_j 应小于衍射极限角,一般控制在衍射极限角的 $1/3$ 之内。

6) 瞄准偏差导致光斑核心偏离目标预设瞄准点,若系统瞄准精度 θ_p 过大,则将导致激光光斑无法有效覆盖目标区域或在目标附近随机晃动。系统瞄准精度 θ_p 应和系统到靶发散角 θ_a 匹配设计,一般 θ_p 不超过 θ_a 的 $1/3$ 。

7) 自适应光学系统既可以校正对目标的成像误差,提高激光武器的跟瞄精度,也可以校正大气湍流和热晕造成的激光束畸变,提高激光到靶功率密度。然而,受限于波前传感器的分辨率、变形镜的可控单元数、系统响应速度和校正带宽等因素,自适应光学系统不可能实现对大气影响的完全校正,其基本规律是发射口径越大,湍流的校正难度越大;激光束功率密度越高,热晕越强,校正难度越大。这是互相矛盾的事,为了降低热晕效应,希望加大发射口径(从而降低发射激光功率密度),另一方面,为了有效校正湍流,希望减小发射口径。因此,高能激光工程上能用的自适应光学系统对湍流和热晕的校正能力有限,这也是激光武器不能靠简单地提升功率和加大发射口径来提高作战能力的物理限制。

4.3 桶中功率最高准则

激光武器到靶功率密度与到靶发散角 θ_a 及传输距离 L 的平方成反比,目标处的功率密度是毁伤能力的直接体现,要打击一定距离的目标必须保证足够的远场桶中功率。其设计的基本准则可表述为:

1) 以靶目标处一定直径圆桶中的激光功率作为桶中功率,圆桶的直径需根据武器系统的应用,结合目标特性来设置。

2) 用于攻击 $1\sim 10$ km 级近距离目标的激光武器,通常没有配备自适应光学系统,激光束的发散角和激光武器跟瞄精度相当,在几到十微弧度,可选择 $10 \mu\text{rad}$ 对应的远场光斑作为靶目标处的圆桶直径。

3) 用于攻击 $100\sim 1000$ km 级作战目标的激光武器,通常配备自适应光学系统,具有高精度的跟踪

瞄准能力,可选择 $3\lambda L/D$ 作为靶目标处的圆桶直径。

4) 用于攻击 1000 km 级以及更远距离作战目标的激光武器,激光光斑通常大于作战目标,可根据作战目标大小来设置桶中功率对应的圆桶直径。

5) 桶中功率可作为激光武器的测试评价准则。桶中功率以及桶中功率效率(桶中功率除以激光武器发射功率)除涵盖了激光武器的功率、光束质量等因素外,还直接反映了激光武器的跟踪、瞄准能力以及大气湍流、热晕效应等综合因素,可以直接牵引武器系统的整体设计优化,也可用于激光武器试验鉴定评估。

4.4 高效耦合准则

激光破坏机理决定了毁伤效应,在到靶桶中功率确定的情况下,毁伤效果受耦合系数影响很大,而耦合系数强烈依赖于波长,因此要结合目标特性选择材料耦合系数较高的激光波长。其设计的基本准则可表述为:

1) 目标对激光的吸收率应尽可能高。由于目标材料对不同波长激光的吸收率 $a(\lambda)$ 不同,损伤阈值也有较大差别。例如,高压聚乙烯膜对于中红外波段激光是强吸收,而对于近红外波段激光几乎透明,该材料在 $1\ \mu\text{m}$ 波段的激光损伤阈值是中红外激光($3.5\sim 4.0\ \mu\text{m}$)的 60 倍以上。

2) 对于光电系统的干扰,主要考虑的是激光与光电探测器之间的耦合,当激光波长位于光电系统工作波段内时,称为波段内干扰。波段内干扰达到有效干扰效果所需的到靶功率密度较低,一般比信号光亮度高 3 个数量级时即可实现对光电探测器的饱和和干扰。如果波长位于光电子系统的工作波段外,则称为波段外干扰,此种情况下由于热效应、二次辐射或滤光片截止深度有限等因素,也可实现对光电探测器的干扰,但要达到饱和和干扰通常所需光强度比波段内干扰高 3 个数量级。

4.5 平台适装准则

功重比和功体比决定了系统的体积规模,为适应各类平台应用,应尽量压缩功重比和功体比。另外,还需要考虑一体化设计、平台环境适应性、可维护性等因素。其设计的基本准则可表述为:

1) 要符合平台尺寸和载荷的限制。激光武器设计不能超过平台的总重量载荷和体积限制,如车载激光武器,为方便运输其高度一般不超过 4.0 m,宽度不超过 2.5 m,即使考虑到军事应用战车的宽度一般也不超过 3 m。

2) 为提高激光武器的平台适装性,除提高激光器、光束控制等硬件紧凑化程度外,还需通过优化激光武器与平台在结构、能源、热管理等方面的一体化设计,来减小整个系统的尺寸和重量。

3) 要充分考虑平台环境的适应性。激光武器必须要能够适应所处平台的各方面环境条件,比如海况、路况,以及平台的力学、热学、电磁环境等。

4) 要尽量减少激光武器对平台的干扰。激光武器自身工作也会对平台产生较大的干扰,比如,化学激光器压力恢复系统短时、大流量向外排气所产生的振动干扰;光束控制系统内的运动机构,特别是粗跟踪的俯仰轴和方位轴调节对平台存在一定的力矩干扰;固体激光器、光纤激光器的驱动电源系统存在电磁干扰。这些干扰要控制在一定范围内,不能影响平台的正常运行。

5) 要提高激光武器的可维护性。作为一种武器系统,激光武器的可维护性非常重要,在出现故障时能够快速排查原因,排除故障,尽快恢复到备战状态。

5 结束语

激光武器设计的主要目的是提升到靶功率密度、指向控制精度等核心指标,推动激光武器平台集成,提高战场适应能力,实现对作战目标的高效毁伤。以上讨论的激光武器设计准则仅是粗线条的,真正设计一个武器系统还有许多细节部分需要考虑。激光武器的工程研制涉及多个学科,需要扎实的理论基础和丰富的工程实践经验,优化设计系统参数,提升激光武器系统综合性能。

参 考 文 献

- [1] Hecht J. Short history of laser development [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(9): 091002.
- [2] Cook J R. High-energy laser weapons since the early 1960s [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(2): 021007.
- [3] Zarubin P V. Academician Basov, high-power lasers, and the antimissile defense problem [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(2): 021002.
- [4] Ludewigt K, Riesbeck T, Schünemann B, et al. Overview of the laser activities at rheinmetall waffe munition [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8547: 854704.
- [5] McNaught S J, Komine H, Weiss S B, et al. 100 kW coherently combined slab MOPAs [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics 2009*, May 31-June 5, Baltimore, Maryland, United States. Washington,

- D.C.: OSA, 2009: CThA1.
- [6] Su Y, Wan M. High energy laser system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 114-153.
苏毅, 万敏. 高能激光系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 114-153.
- [7] Wang Y J. Mathematical model analysis of high energy laser propagation in atmosphere and the system design consideration. Private communications.
王英俭. 高能激光大气传输数学模型分析与系统设计考虑. 私人通讯.

Research on the Design Criteria of Laser Weapons

Liu Zejin^{*}, Yang Weiqiang, Han Kai, Xu Xiaojun^{**}

*College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China*

Abstract The development of laser weapons needs to consider the technical challenges, battlefield environment, and combat missions. There are many difficulties in promoting the application of laser weapons, such as high energy and high beam quality laser source, long distance fighting, high efficient damage, high compact design, and actual combat. According to the basic physical principles, this paper discusses and put forward five design criteria of the laser weapons, including high brightness criterion, divergence angles matching criterion, maximum of bucket power criterion, high efficient coupling criterion, and platform fit criterion. These design criteria can provide reference for the research and design of laser weapons.

Key words laser optics; laser weapons; system composition; main parameters; design criterion

OCIS codes 140.3430; 220.4830