

# 战术激光武器系统的若干考虑

胡士珩

## 一、前 言

去年以来,人们普遍认识到:以“飞鱼”导弹为代表的第三代精确制导武器在战争中的地位将与日俱增。显然,寻求新的武器系统以提供有效的对抗,也就变得紧迫起来。在拟议的新型防御系统中,战术激光武器系统是一个有吸引力的候选者。激光武器命中率高,反应能力快,具有以精确对抗精确的特点。根据强激光器的现有工艺水平和发展潜力来估算,舰载激光武器系统用于近程防空和反导,其现实可能性是相当大的。现在的问题是,为了完成上述作战任务(近程点防御或小区域防御),强激光器和光束定向器的运转性能能否满足要求?其规模可否压缩到适于舰载的程度?不言而喻,对激光器和光束定向器的规模和性能提出何种要求,这取决于所赋予它们的作战任务。以反击“飞鱼”导弹为典型战例,作战任务可归结为:

1. 射程不小于2公里;
2. 有效保护区域的半径为300~500米,这已超过一般舰船的舰身长度;
3. 摧毁来袭导弹的命中率接近100%。

本文下面将要简单分析激光器和光束定向器的工艺水平,能否满足上述作战条件所提出的要求。

## 二、发送望远镜主镜工艺的突破

光束定向器是激光武器系统的重要组成部分,它是跟踪、瞄准和发送三个子系统的总和。其中发送望远镜又称扩束器,是整个光束定向器中的关键部分,这是由于在典型使用条件下它的主镜直径(又称发送孔径)有数米之大。例如在战术应用条件下,取靶上光斑直径1~2厘米,激光波长位于中红外(标称3.8微米),由望远镜公式不难估算出2公里射程时,主镜直径将超过1米。如此大尺寸的凹面反射镜不仅加工工艺复杂,光学性能要求很高,而且热学性能上要求膨胀系数极低以克服热点应力导致的变形。这就使得主镜造价昂贵,而且很难做得轻巧。因此,扩束器主镜是激光武器计划当今面临的一大工艺难题。

收稿日期:1983年8月11日。

最近美国声称取得的突破是：采用石墨纤维复合材料作基底，表面镀硅并抛光，其热膨胀系数接近于零；同时主镜设计成由多块镜片拼装组合而成，因而放宽了光学加工要求。这一主镜工艺，据称可以提供造价低廉、非常轻巧同时光学和热学性能优异的扩束器主镜。

这一工艺突破对于战术激光武器系统的生命力无疑将产生重大影响。首先，造价低廉的主镜可使整个武器系统的造价大幅度下跌，因为主镜造价在总造价中占有举足轻重的地位。同时，非常轻巧的主镜使光束定向器的转动惯量相当小，这大大有助于满足武器系统两个方面的作战要求。第一，保证它的跟踪角速度满足20~40毫弧度/秒。第二，保证该武器系统具有同时处理多个目标的能力，即光束定向器可以快速更换所跟踪和瞄准的对象。总之，新的主镜加工工艺的成功大大提高了战术激光武器系统对于现有反导武器系统的竞争能力。

### 三、破坏机制和靶上功率密度要求

激光对靶材的破坏机制大致有三大类：翘曲、层裂和热烧蚀。在战术反导弹作战情况下要求激光束在1秒钟内摧毁目标，因此翘曲机制（长时间低功率密度辐照蒙皮使之变形）可不予考虑。层裂机制的实验数据尚待充实，并且短脉冲强激光器的工艺水平和工程放大前景也距离实际应用较远，因此该机制暂不考虑。热烧蚀机制相对来说较清楚。由于该破坏机制依靠激光能量沉积在靶材上使之融熔，所以敌方较难采取对抗措施。该机制要求靶面上的激光功率密度适中，且在每个瞄准点上作用的时间足够长，从而在瞄准点上沉积的能量足以烧穿蒙皮，进而破坏其内部结构、元件，甚至引爆战斗部。

烧蚀机制的主要数据是确定靶面上的激光功率密度 $I$ 取何值适当，但此重要数据尚不齐全。对金属厚靶材，一般认为热烧蚀机制要求：

$$I = 10^6 \sim 5 \times 10^7 \text{ 瓦/平方厘米。}$$

更高的 $I$ 值将产生靶面等离子屏蔽。据美国联合工艺公司的激光加工工艺数据，对厚金属材料 $I = 10^5 \sim 10^7$ 瓦/厘米<sup>2</sup>，作用时间2~20毫秒，将形成深孔或深腔，有效地吸收能量。这对应于激光与靶材相互作用谱图上的“焊接与切割”工作区。该区要求靶面上的沉积能量为 $10^4$ 焦耳/厘米<sup>2</sup>左右。再参考其它打靶数据，可规定战术应用中烧蚀机制的标准为：

$$I = 10^6 \text{ 瓦/厘米}^2,$$

$$\text{作用时间 } \tau = 10 \text{ 毫秒/瞄准点,}$$

$$\text{沉积能量 } E = 10^4 \text{ 焦耳/厘米}^2.$$

此标准看来是谨慎的，例如依据铝靶材烧蚀当量3300焦耳/克来估算，每平方厘米光斑面积可提供3克烧蚀量，烧蚀深度大于1厘米，这对于烧穿蒙皮已足够。激光束与一枚导弹靶的总作用时间估计需要0.1~0.5秒钟。若光束定向器在整个反击过程中只盯住一个瞄准点，那么在烧穿蒙皮后将进一步破坏其内部结构，直至引爆。如果激光束在每个瞄准点上停留约10毫秒后就移动一个点，那么0.5秒钟的辐照时间大致可在蒙皮上撕开一道半米长、1厘米宽的口来。

应当指出，所谓“摧毁飞行中的导弹”这句话中的“摧毁”二字是相当含混的。在热烧蚀机制的前提下，大光斑短作用时间（10毫秒）将产生浅层破坏，而小光斑长作用时间（0.5秒）将产生深度破坏。一般认为后一种情况的作战效果较好，所以仅用一个脉宽10毫秒级的单脉冲“射击”一个瞄准点也许是不行的，或不保险的。要么固定一点进行内部深层烧蚀破坏，要么移动瞄准点在靶上打出许多个窟窿来。这两种情况均表明，激光器采用连续波体制是适宜的。输出脉宽10毫秒级的重复脉冲序列的激光器也可提供有效的破坏，但这类强激光器尚无合适的候选者供选用。

#### 四、大气层内传输影响的考虑

战术应用位于大气层内，考虑激光的大气传输影响是必要的。此影响大致分为吸收衰减和发散两大类，主要包括如下过程：

1. 大气分子的共振吸收，主要是具有红外活性的分子，如 $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $NO$ 等的吸收波段。
2. 大气分子的压力诱导吸收，近程可不予考虑。
3. 大气分子的瑞利散射，中红外波段可不予考虑。
4. 大气中雾和霾的吸收和散射。
5. 战场烟幕的吸收和散射。
6. 高功率激光束大气传输中的非线性效应，如热晕等等。
7. 大气湍流造成的光束发散。

对上述过程的重要性的认识尚相当肤浅，这方面的实验数据较为保密。其中前三种机理较为清楚。一般公认，氟化氙/氯化氢的3.8微米激光波长、二氧化碳的10.6微米激光波长均位于大气窗口内。3.8微米波段更适宜于水面潮湿气氛，而10.6微米波段较怕水汽分子的吸收，适用于干燥陆地战场。烟幕、雾和霾均属于大气中的气溶胶。一般说来，固体或液体颗粒的平均尺寸小于或等于激光波长时，它产生的散射影响仍不严重，所以波长较长的 $CO_2$ 激光束穿透它们的能力较强。毫无疑问，获得全面而详尽的大气传输实验数据是重要的。对热晕现象和大气湍流的影响已经提出一些补偿办法，如自适应光学技术。但在近程战术应用中其效果和可行性尚不清楚。

总之，尚不能作出定量的估算，考虑大气传输影响的一个办法是，在最后确定的武器级激光器总功率上再乘一个保险系数，例如1.5。

#### 五、对武器级激光器输出功率的要求

基于以上讨论，可根据望远镜公式：

$$\frac{I}{P} = \left( \frac{D}{L \cdot n\lambda} \right)^2$$

来计算所要求的激光器输出功率。在典型条件下的计算结果如表1所示。

表1 武器级激光器的输出功率

性能指标	DF/HCl	CO <sub>2</sub>
	化学激光器	气动激光器
标称波长λ(微米)	3.8	10.6
衍射极限倍数n	1.5	1.5
射程L(公里)	2.0	2.0
靶上功率密度I(瓦/厘米 <sup>2</sup> )	1×10 <sup>6</sup>	1×10 <sup>6</sup>

续表1

性能指标	DF/HCl	CO <sub>2</sub>
	化学激光器	气动激光器
发送孔径D(米)	1.0	2.0
光斑等效直径d(厘米)	1.14	1.59
激光输出功率P(瓦)	1.3×10 <sup>6</sup>	2.5×10 <sup>6</sup>

表1的设计指标可以同美国现正进行打靶试验的武器级强激光器系统相对比。假定衍射极限倍数均取 $n=1.5$ ，靶上功率密度 $I=10^6$ 瓦/厘米<sup>2</sup>，由此计算各个系统所达到的射程L和光斑直径d，结果见表2。美国空军的机载激光实验室(USAF, ALL)只是一种打靶试验用的装置，而不是武器系统原型。美国海军的海光号(US Navy, Sea Lite)主要用于考察破坏真实反舰导弹的能力，接近武器原型。比较表明，本文的指标尚较合理。再考虑前面指出的大气传输损失，输出功率乘以保险系数1.5，最后可求出战术应用武器级强激光器输出功率要求：

表2 本文与美国著名打靶系统对照表

强激光系统	设计指标 $I=10^6$ 瓦/厘米 <sup>2</sup> 时的		
	P/D	射程L	光斑d
本文CO <sub>2</sub> 气动激光器	2.5兆瓦/2米	2公里	1.6厘米
美国空军机载激光器	0.4兆瓦/0.61米	0.3公里	0.6厘米
本文DF化学激光器	1.3兆瓦/1米	2公里	1.1厘米
美国海军海光号装置	2.2兆瓦/1.8米	4.7公里	1.5厘米

1. DF化学激光器：3.8微米波段，  
D=1米，P=2.0兆瓦；  
2. CO<sub>2</sub>气动激光器：10.6微米波段，  
D=2米，P=3.8兆瓦。

### 六、舰载武器级DF激光器的规模估计

氟化氙化学激光器，从综合性能来考虑，是目前舰载应用的最佳候选者。据近悉，美国海军已建成连续功率为2.2兆瓦的DF化学激光器，但未公布此武器级激光器的运转性能。为了估计舰载条件下该强激光器的规模，假定工程放大到武器级输出功率仍能达到小型DF激光器件的典型性能指标：

质量流比功率：80千瓦/(公斤/秒)，

喷管面积比功率：200瓦/厘米<sup>2</sup>，

光腔激射区平均气压：≤20托，

扩压器出口恢复压力：200托。

武器级DF激光器的规模示意参见图1。除了两侧的镜片箱外，激光器本体是一个4段式矩形截面气流通道，由燃烧室、光腔段、扩压器和引射器四段组成。其长度对小型和大型器件来说大致相等，约5~6米。因此，横截面尺寸是衡量器件规模的唯一关键参数，而它主要取

决于喷管面积效率。假定武器级器件的喷管面积比功率为200瓦/厘米<sup>2</sup>，则不难得出：DF激光器，功率2兆瓦，喷管面积1米<sup>2</sup>。在1米<sup>2</sup>总面积时，喷管的合理尺寸取为：

$$40 \times 250 \text{厘米。}$$

由此可以估计2兆瓦DF激光器尺寸（不计两侧镜片箱）：

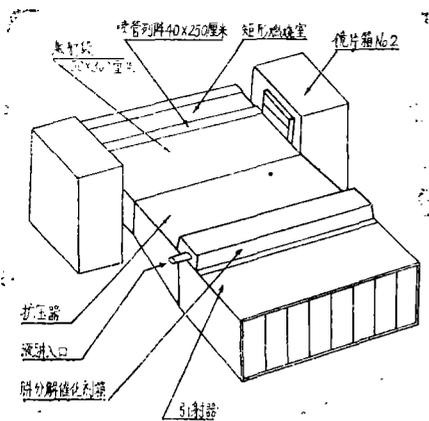


图1 武器级(2兆瓦)DF激光器规模示意图。估计尺寸：高0.6米，宽3.0米，长5~6米

高：0.6米，宽：3.0米，长：5~6米。

至于激光工质原料及其储罐，它们的重量和体积同激光器运转的总时间有关，是不难估计的。

总之，具有上述先进性能的武器级DF激光器的规模将相当紧凑，并且完全适合于舰载应用。但须指出：小型DF化学激光器达到上述先进指标是困难的，而工程放大到武器级规模要保持上述综合先进水平则是极其困难的。关于DF化学激光器的工程放大问题及前景将在另一篇文章中专门讨论。

## 七、小 结

关于“三位一体”激光武器系统的三个组成部分：

△强激光器

△跟踪瞄准系统

△发送望远镜

光束定向器

结合战术应用中提出的要求，讨论了一些主要的问题。主要结论可罗列如下：

1. 跟踪瞄准系统的附属单元技术（电视摄像机、红外热像仪、激光测距仪或激光雷达等）已成熟，可供配套使用。

2. 发送望远镜采用复合材料结构和组装镜工艺，可提供轻型、低造价主镜，从而使武器系统总造价大幅度下跌。

3. 光束定向器的瞄准精度要达到微弧度量级才能满足战术应用的要求，这在技术上是困难而可以实现的。

4. 氟化氙化学激光器最适合于舰载应用，在其工程放大方面存在若干关键问题有待突破，但取得突破的前景仍可乐观。

5. 上述战术激光武器系统的单台造价在批量生产时有可能相当于一辆重型坦克的造价，例如每套200~300万美元。

6. 该武器系统每次射击（指反击一枚来袭的导弹）所需的原料消耗费用有可能相当便宜，例如数万美元。