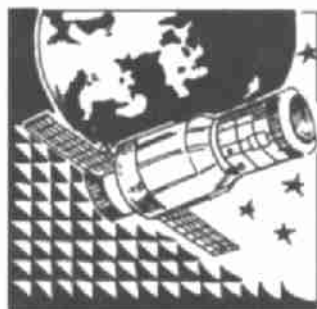


# 用激光向飞行器传送能量

张传胜 唐力铁

人类出于对宇宙的好奇和对经济利润的追求不断发展新的宇航器。推进系统是宇航器的关键。衡量推进系统性能的指标是比冲，即单位质量燃料产生的冲量，比冲越大性能越好。然而，目前的推进系统必须携带大量的燃料，这是由于现有燃料的比冲受到



燃料燃烧温度(上限为 4 000—5 000K)的限制，一般不超过 500s。这就限制了目前的推进系统应用于更加深远的星际航行活动。另外，从地面发射飞行器至地球低轨道，费用大概是 67,000 美元/磅，而至同步轨道则是 7,200 美元/磅。高昂的发射费用，同样限制其进行更大规模商业航天活动。为了解决这一问题，人们提出并研究了电推进、核能推进、微波推进等先进的推进方式。但飞行器本身仍必须携带能源。

大功率激光器，特别是平均功率 100MW 以上、效率达 50% (理论上可达 70—80%) 的自由电子激光器的研制成功，以及关于高能激光传播并与物质相互作用的大量研究成果，给人们带来了新的曙光。它提示人们可以利用天基(见图 1)或地基(见图 2)高能激光器，向远处的飞行器发射高能激光，飞行器通过多种途径吸收激光能并将其转化为推进功。这样就可以将飞行器与能源分离，从而研制出性能更好的激光推进系统。

理论与实验向人们揭示了激光推进的三种有效途径。第一类是基于高能激光(大于  $10\text{MW}/\text{cm}^2$ ) 的强电场(约  $10^7\text{V}/\text{cm}$ ) 可以使推进剂迅速气化、电离并形成等离子体，等离子体进而通过逆韧致辐射以 90—100% 的效率吸收激

光的电磁能从而达到 10000K 至 20000K 的高温，并以相当高的速度喷出产生推力，其比冲可达 500—2000s。据此，人们研究了激光脉冲推进方式和稳态激光方式。第二类是基于中等能量的激光直接照射低分子量分子(如  $\text{H}_2$ , He) 的推进剂使其达到 1300K 的

温度，推进剂从喷管喷出形成推力这一原理。这种方式技术要求不高，比冲也可达 800s。第三类则是利用光电效应原理，飞行器的 GaAs 光电池阵列以近 60% 的效率将照射在其表面上的激光能转换为电能，以此作为电推进或其他用途的能源。

NASA 的研究表明，利用这些原理的推进系统可以使飞行费用大大节省，也使卫星的寿

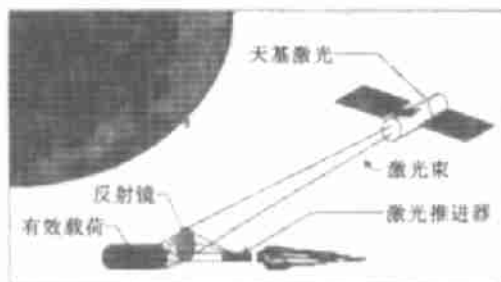


图1 天基激光推进系统示意图

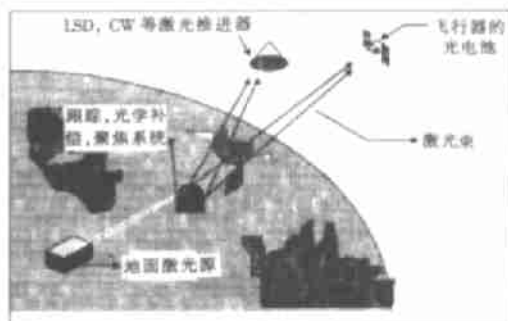


图2 地基激光供能示意图

命延长。激光功率为10—100MW时,可以完成机动飞行和近地轨道向同步轨道转移的任务;功率为1—2GW时,可以相当经济的以单级入轨的方式发射大量的近地轨道卫星;功率为1TW以上时,可以进行更快、更深远的宇宙探险活动。大量的分析表明,这种系统有诱人的技术和经济上的优势,值得引起重视。图3展示其在经济上的优势。

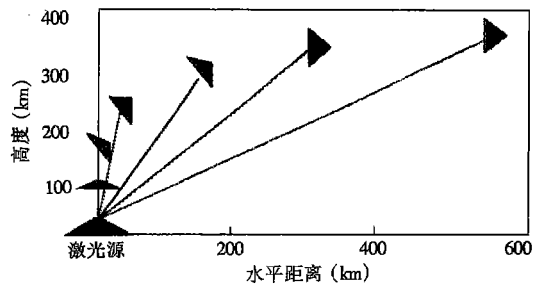


图4 Kantrowitz给出的发射轨道

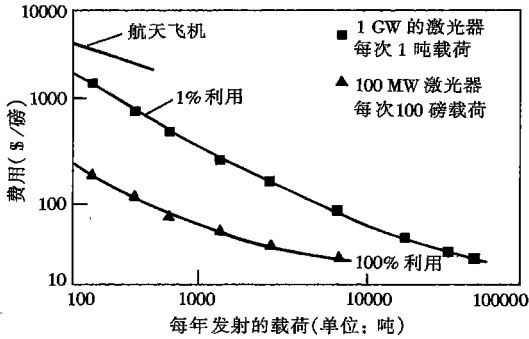


图3 用激光推进把载荷送入地球低轨道的费用

激光推进的实现方案有多种。这是因为飞行器可以以多种途径吸收激光能,从而就可以有多种实现方案。目前,人们已经研究了激光脉冲爆震发动机、连续激光发动机、激光热交换发动机、激光光电转换供能等实现方案。

### 一、激光脉冲爆震发动机

Kantrowitz 提出这种相当简单而又便宜的发动机的最初形式。这种发动机象一个圆锥,锥顶是有效载荷,底部是固体推进剂(LiH、冰、 $\text{COH}_2$ 等)。它采用双脉冲工作方式,一束能量较低的激光束首先照射在锥尾的固体推进剂表面上,使其蒸发并让其稍微膨胀几个微妙,然后,第二束高能激光脉冲将产生的气体加热到10,000K以上,从而产生激光支持的爆震波(LSD),并以定向的方式高速喷出,比冲可达600—800s,能量效率可达20—40%。理论与实验已经基本弄清其工作机理。Kantrowitz 还对其发射轨道、费用作了简单的计算,结果见图4。

以色列空军的 Aviad Brandstein 提出另外一种脉冲爆震发动机形式,见图5。它采用频率为104Hz、宽度为30ns、每个脉冲能量为

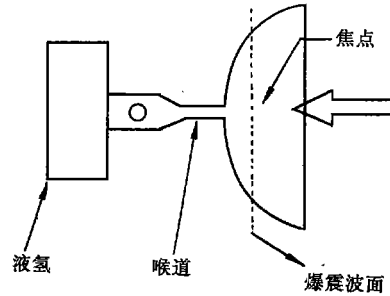


图5 Brandstein的发动机

50KJ的激光器驱动,可以达到19,600N的推力,和1,200s的比冲,将500Kg的卫星从300Km高的轨道提升至同步轨道。这种方案难点在于,目前尚难以有这样的激光器。

### 二、连续激光发动机

与脉冲工作方式不同的是,这种发动机让连续激光通过光学系统聚焦在气体推进剂的对流场中,从而产生高温的激光支持的等离子体。温度高达15,000—20,000K的等离子体以90—100%的效率吸收激光能,并加热周围的气体工质,气体工质在喷管中加速喷出形成推力。以氢作工质,可以有1000—2000s的比冲。等离子体可以有一个或多个。图6是单等离子体发动机原理图。

80年代中期详细的实验工作已经证明,激光支持的等离子体可以在一个比较宽的范围内稳定存在。1986年测量了等离子体的温度分布。人们已经利用全N-S方程计算了激光与等离子体的相互作用。并且还作了10KW推进实验。其物理机理已经基本清楚。

连续激光推进至少需要10MW以上的连续激光功率。目前的自由电子激光器仍然是以脉冲方式工作的,例如,星球大战发展的RF-

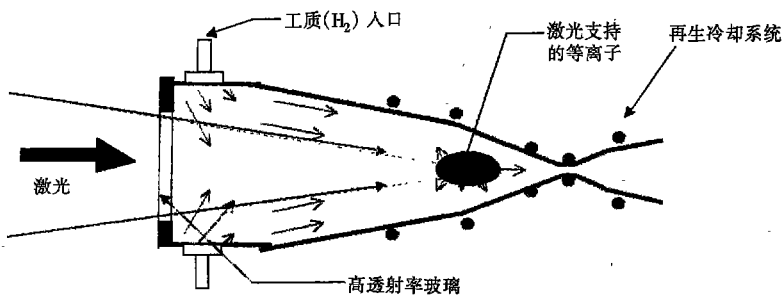


图6 单等离子体激光推进发动机原理图

LINAC 自由电子激光器脉冲间隔时间是 46ns。但是,实验证明,等离子体的复合时间大概为 1 $\mu$ s,远大于 46ns。人们正在考虑,能否用高频激光脉冲来代替连续激光,产生半稳定的等离子体,以期取得同样的效果。

### 三、激光热交换发动机:

劳能斯·利弗莫尔国家实验室的 J. T. Kare 在 1992 年详细论述这种发动机模型。其原理在图 7 中给出内部流动着 H<sub>2</sub>,经过特殊设计的黑色平板是由能耐 2,773K 高温的钨铼合金制成的,可以吸收照射在其表面的激光能,将其传导至 H<sub>2</sub>。H<sub>2</sub> 接受传导过来的热能,温度升高,通过喷管喷射出去。据初步估计,这种方式能够产生 800s 的比冲,20—40% 的能量效率。它的突出优点是对激光的模式、波长要求不高,并且可以利用现有不少成熟的技术。这一方案得到了 SDIO 的支持。

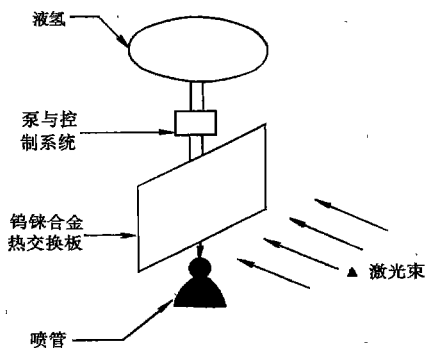


图7 热交换发动机的结构简图

### 四、激光向飞行器光电池阵列供能方式:

建立在地面上的自由电子激光器从电网中获得能量,卫星上用 Si 或 GaAs 制成的光电池将激光能高效的转换为电能。激光能量的要求

可以比以上方式低得多。1994 年,刘易斯研究中心的 Micheal R. LaPointe 等,就提出一种只需 5KW 地面激光器,向 2000Km 以外的光电池阵列供电方案。这是目前相当热门的内容,也是技术上障碍最小、最成熟的方式。1990 年美国就已经掌握了激光准确瞄准轨道上的飞行器的技术,采用的是光学补偿的技术。这就是 NASA、DOE 在搞雄心勃勃的 SELENE 计划的原因。由于光在空间中的自然发散,必须在地面上建立直径达 10m 以上的反光镜。据信,美国已经可以制造直径达 11m 的反射镜。

科学技术的发展使人们已经弄清了发生在激光推进中的基本物理过程,但这并不能说激光推进可以进入实用阶段。目前,还存在一些难度较大的技术问题。

①难以找到大功率并且长时间持续工作的激光器。

如果只是为了补偿轨道上的卫星的光电池因为地球或月球的阴影造成的影响,则并不需要很大的功率。但要进行激光推进,则需要功率达 10MW—2GW 能持续工作达数小时的激光器。例如实现地球低轨道向同步轨道转轨,需要 10MW—100MW 的功率,把有效载荷从地面送至地球低轨道,则需要 1GW 的激光功率。

美国、日本、德国、英国的一些研究所的激光系统尽管已经取得了 10TW 级高亮度输出,聚焦功率密度可达 10<sup>18</sup>—10<sup>20</sup>W/cm<sup>2</sup>,但持续时间太短,通常只有几个 ps,甚至只有几个 fs。RF-LINAC 的脉冲宽度只有 10—20ps。自由电子激光器在 10KW 时,只能持续 0.1ms,100MW 运行时,则只有 10ps。这将有赖于未来激光技

# 扫描隧道显微镜

周小明 胡跃辉

1982年, Binning 和 Rohrer 研制成世界上第一台扫描隧道显微镜 STM(Scanning Tunneling Microscope), 是目前唯一具有原子级分辨率的实空间成像技术, 当这两位科学家用 STM 观察到高序石墨表面原子的图像时, 人们对微观世界的认识一下子从幻想和抽象的分析飞跃到对原子的直接观察和操纵. STM 和其它的传统显微镜相比, 光学显微镜、扫描电子显微镜的分辨率不够, 而高分辨的透射电子显微镜虽然能够达到较高的分辨率, 可它的制样异常麻烦, 破坏了样品, 而且在测量过程中离不开真空环境. STM 因其可直接观察物体表面原子结构而不会对样品表面造成任何损伤, 被广泛地用于测定材料的物理、化学和生物性质, 并成为纳米加工的关键技术. 同时还能够通过其针尖与表面原子的相互作用, 对样品表面进行单个原子或多个原子的操纵, 成为近年来发展起来的一种技术——扫描探针显微术.

景德镇陶瓷学院基础部 江西 333001

术的进一步突破.

②能适应高能量通量的光学系统也有待进一步发展.

例如, 在连续激光推进方式中, 如果让 100MW 的激光束, 以  $3.2 \times 0.1\text{MW}/\text{cm}^2$  的能量密度通过通透率达 99.98% 的透镜, 则仍有 20,000W 的热能被透镜吸收, 这将产生很严重的热变形, 甚至熔化等问题. 对于地面站, 要建造直径更大的反射镜也不是一件容易的事.

③经费昂贵.

无论是自由电子激光器, 还是巨型光学系统, 都是极其昂贵的. NASA, 以及白沙靶场的高能激光系统实验设施, 都在寻找私人支持.

但是, 美国政府对 BMDO 的天基激光计划

## 1. 原理

根据量子力学原理, 粒子可以穿过比它能量更高的势垒如图 1 所示, 这种现象称为隧道效应, 它是由于粒子的波动性而引起的, 由量子力学可计算出穿过势垒的透射系数为:

$$T \approx \frac{16E(V_0 - E)}{V_0^2} e^{-\frac{2a}{\hbar} \sqrt{2m(V_0 - E)}}$$

由式中可见,  $T$  与势垒宽度  $a$ , 能量差  $(V_0 - E)$  以及粒子的质量  $m$  有着很敏感的依赖关系, 随着势垒宽度  $a$  的增加,  $T$  将指数衰减, 因此在一

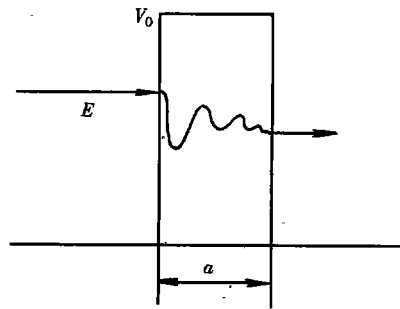


图1 量子力学中的隧道效应

(Space-Based Laser Program)投入却在最近大幅度增加, 1997 年的经费为 0.98 亿美元, 1998 年增至 1.268 亿美元. 这一计划的实施, 必将为激光推进积累更多的技术.

在提出用激光向轨道上的飞行器传送能量这一概念到现在的 26 年时间内, 美国和前苏联(后来的俄罗斯)无论是在基础理论研究, 还是实验研究、技术验证上, 均取得了很多研究成果. SDI 计划强有力地推动这一设想变成现实. 随着激光技术与航天技术的迅猛发展, 人类将有可能全面解决这一设想面临的激光源、透镜等技术问题. 一旦解决这些问题, 其巨大的经济技术优势将有可能深刻地改变未来的航天面貌.