

# 新型的火箭推进方式——激光等离子体推进

霍海波

传统推进技术是利用化学能将运载器送入预定空间轨道和实现航天器在轨机动的技术，主要是指液体和固体化学推进。从1926年美国戈达德研制出以液氧/汽油为推进剂的液体火箭发动机至今，化学推进已经有近80年的发展历史，目前其理论体系和应用技术基本成熟，发射基地和地面测控系统等配套设施健全。化学推进最突出的特点是可以提供大推力，一直以来是航天领域使用最多的推进技术，而且在可预见的将来仍是重要的航天推进技术。

新世纪以来，随着人类利用和探索宇宙空间的范围和深度大大拓展，各国竞相出台新的太空政策，人类又掀起了新一轮以深空探测为标志的太空探索热潮，而传统的化学推进已经无法满足未来空间探索特别是深空探测的需要。它最主要的不足是能量密度低，需要携带大量的燃料。目前液体和固体火箭发动机所携带的燃料，要占到总质量的90%以上，而有效载荷只占1%~1.5%，将1kg的载荷送入轨道的费用达上万美元。同时，现在的运载工具需要有2~3级火箭持续加速才能将航天器送入轨道，这样就导致了化学推进效费比低、系统可靠性低等。化学推进需要消耗大量燃料，且不能将航天器加速到足够速度，从而无法满足深空探测的要求。新型推进技术是相对传统化学推进技术而言的，指航天推进基本原理或能源方式不同于化学推进的非化学



推进。目前，世界各国正在竞相研究各种新型推进技术，以满足未来太空探索的需要。

## 激光等离子体推进的基本概念

激光推进是利用高能激光与工质相互作用产生的反作用力推动飞行器前进的新概念推进技术。如图1所示，激光推进系统主要包括激光系统、光束发射与控制

系统、光船三部分。

从是否消耗自身携带工质看，激光推进的驱动模式可分为大气呼吸模式和火箭烧蚀模式。大气呼吸模式是将经进气道吸入的空气作为工质，激光击穿空气，产生激光支持的等离子体爆轰波，推动光船前进的推进模式。这种模式不用消耗自身携带的推进剂（图2）。火箭烧蚀模式是指激光加热光船自身携带的工质（气体、液体和固体）产生高温高压等离子体，经喷管推动光船前进的推进模式（图3）。两种激光推进模式都是通过激光与工质的相互作用，将激光能量转化为等离子体热能，最终转化为



图1 激光推进系统的工作示意图

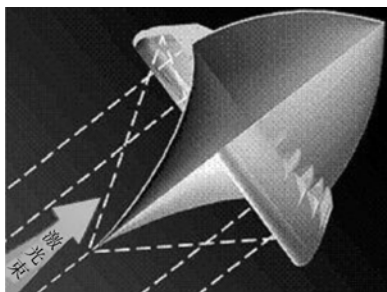


图2 大气呼吸模式示意图

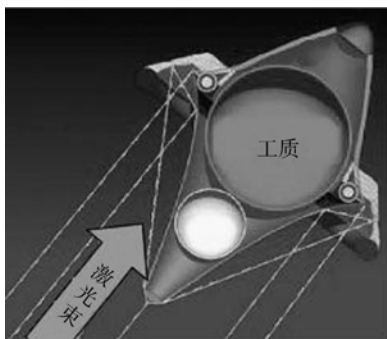


图3 火箭烧蚀模式示意图

光船的动能。当飞行器位于大气层内时,可利用飞行器尾部抛物面反射镜聚焦地基激光器发出的激光能量,在焦点处点燃空气等离子体进行推进(大气模式),这时飞行器不消耗自身质量。当处于大气上层(30km以上)或外空间时转为采用自携工质(火箭烧蚀模式)。

烧蚀模式激光推进是利用激光烧蚀固体靶(在特殊结构下也可利用液体等靶材料)产生高温、高压等离子体喷射,进而产生推力。烧蚀模式与大气模式的显著区别在于是否需要靶物质,因烧蚀模式激光推进需要消耗自身携带的“燃料”,所以又称为火箭模式。

目前,激光推进还只限于理论和实验室研究阶段,激光功率还达不到将小卫星从地面发射至空间轨道,而且要实现激光发射小卫星,还有许多关键技术问题需要解决。空间激光微推进采用的就是烧蚀模式,是目前技术条件下可以实现的激光推进方式,也是近几年来激光推进研究的热点。

### 当前国内外研究现状

其实早在1972年,美国学者Kantrowitz等就首先提出利用激光烧蚀产生的等离子体来代替化学燃料推进空间飞行器的概念。随后,其他发达国家(如德国、前苏联、日本等)也开始涉足这个领域,他们的主要目标就是大幅度减少卫星发射费用,近期的研究目标是驱动1kg的载荷花费1000美元,并且对于激光驱动的发射费用,研究者希望限定在每千克100美元的范围内,以便在将来的空间传输中发挥重要作用。利用激光等离子体来推进微型飞行器,因为没有传统意义上的发动机,只配备观察和通信装置,质量较小,可用于观察气候和火山。激光等离子体推进技术还可将卫星直接发射进入近地轨道,将近地轨道卫星转移到地球同步轨道,维持卫星参数和清理太空垃圾等,在航天运载火箭发射、卫星和飞行器空间发动机等方面有着广泛的应用前景。

激光等离子体推进技术有许多优点,首先是发射费用明显降低。激光推进技术一旦获得广泛应用,将使发射费用降低两个量级左右,将一个1kg的微型卫星推进到近地轨道仅需几百美元,远低于运载火箭发射所需的几万美元,将彻底改变传统运载火箭发射航天器的模式。其次,它的比冲远大于一般的化学燃料火箭。化学燃料推进由于受燃料自身化

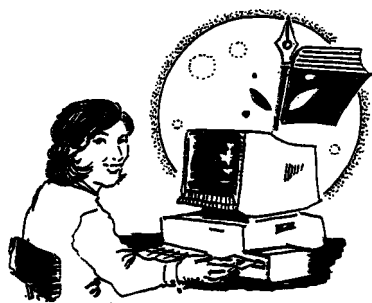
学能、燃烧温度和效率等固有条件的限制,比冲受限,一般小于500s。而激光推进不受以上条件的限制,可获得比化学火箭高几倍、几十倍的比冲,从而实现航天发射低成本、短周期、可重复的目标。再者是安全性好,在激光推进技术中,飞行器与能源、能源与工作介质是完全分离的,火箭推进的动力不是依靠燃烧化学燃料获得,而是来自外部激光束。这样,推进剂本身的化学燃烧值就变得不重要,因此完全可以采用不可燃的材料作为推进剂,这便使火箭的制造加工、发射以及使用过程更加完全。第四是污染小而且可以控制。目前很多种类的化学燃料燃烧后产生的排放物是有污染甚至是有毒性的,而激光推进火箭完全可用清洁无污染的材料作推进剂而不产生任何环境污染。到那时候,火箭发射既没有长长的火焰,也没有震天动地的隆隆巨响,在无声无息中将火箭送入轨道。

正是由于激光推进技术有着巨大的潜在优势和广阔的应用前景,各个发达国家先后对该项技术进行了研究。美国是最早提出激光推进技术并开展相关研究的国家。自20世纪60年代中期以来,美国就开始进行激光能量与固体靶所获得动量之间的转换研究。70年代,美国开始系统研究激光推进技术。1997年,美国空军实验研究室的推进部与美国宇航局的马歇尔空间飞行中心利用10kW、10Hz的CO<sub>2</sub>激光器,将直径为15.3cm、重量约为42g的铝制模型在3s内上升到了22m的高度。这项研究起源于80年代末由战略防御倡议办公室激光推进计划所资助的“轻型飞行器技术验证器”概念项目,目标是用100MW的CO<sub>2</sub>激光器将净质量为120kg,直径1.4m的飞行器送入轨道。1998年,美国科学家使飞行器垂直自由高度升高4.72m,水平滑行121.3m。1999年,他们又将直径为11cm的光船发射到39m的垂直高度。2000年,美国光船技术公司则将直径为12.2cm、重约50g的光船发射到71m的高度,光船飞行12.7s,这是迄今为止飞行时间最长、飞行高度最高及飞船质量最重的记录,其意义不亚于当年莱特兄弟第一次驾驶飞机飞上蓝天。

俄罗斯对激光推进技术的研究几乎是与美国同时进行的。前苏联从20世纪60年代开始大量研究强激光与各种靶材相互作用产生的等离子体及其动力学过程。于70年代中后期相继报道激光空气发动机和大气中的激光推进等研究成果。到80年代进一步

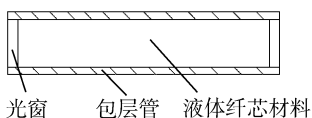
# 液芯光纤及其应用

晁军峰 邢淑敏 魏山城



液芯光纤是一种新型的光传输元件，它不同于常见的普通石英光纤，此种光纤以透明液体作为纤芯材料，填充于折射率较低的聚合物材料包层管中。具有芯径和数值孔径大、光谱传输范围广、传光效率高等特点。因此，特别适用于紫外固化、光谱治疗、荧光检测、刑侦取证、科学研究等方面。

研究液芯光纤的最初目的是用于光通信，但直到今天还未找到适合光通信波段的纤芯材料，随着研究的不断深入，它仍然作为一种潜在的通信媒介受到众多研究人员的关注。在非通信领域，随着其种类的不断增多，液芯光纤的应用已越来越广泛。



液芯光纤的结构示意图

液芯光纤是由高度透明的柔性聚合物包层

管、硬质材料做成的透明光窗以及折射率大于包层的透明液体纤芯材料构成，光线在纤芯内部发生全反射而向前传输，结构如图所示。制造液芯光纤的包层材料一般为毛细石英管材或聚合物管材，用毛细石英管材制造的液芯光纤的纤芯直径一般小于 1mm，而聚合物管材制作的液芯光纤纤芯直径可达 3~14mm 甚至更大。对芯液的选择比较严格，选择范围却比较宽，可根据不同实际需要选择相应的液体。早期的液芯光纤多采用无机含水离子溶液（如盐溶液），后来逐渐用有机液体、单醇和多元醇有机和无机液的混合物、硝基苯、四氯乙烯、亚麻油、氯苯、四氯甲烷、苕醇、四氯化碳等。

## 液芯光纤的性能

液芯光纤的纤芯由液体填充，因而具有普通石英光纤、塑料光纤所无法比拟的优点。

纤芯内部是可以自由流动的液体，当光纤弯曲时，内部产生的应力可通过液体向周围释放，光纤的弯曲半径可以很大，可利用性增高，避免了以往石英光纤弯曲时容易造成的损坏，从而使光纤的应用领域得以拓宽。

研究了激光喷管中等离子体的磁场问题。俄罗斯计划在最近 3 年内，实现在大气中进行轻飞行器的穿线式飞行实验，将光船推进到 40~50m 的垂直高度。

德国空间中心从 20 世纪 90 年代开始进行激光推进技术的实验研究，他们提出了利用激光推进技术将 10kg 的载荷发射到近地轨道的设想。此外，日本已于 90 年代研制了激光推进实验装置。1991 年，日本航空宇宙技术研究所流体力学部与大阪府立大学工学部联合进行的激光小船模型的实验获得成功。2002 年，东京技术研究所又成功地推进了纸飞机的飞行。

2000 年 7 月在美国召开的“大功率激光烧蚀”国际会议，专门设置了“激光推进与微推进”专题。第 38 届 AIAA 联合推进会议也设立了“激光推进”专题。每年一次国际束能推进会议至 2005 年已举办

4 届，激光推进是重点讨论的问题之一，说明国际上对激光推进研究的重视。

国内关于激光推进的研究开展得较晚。2000 年以来，装备指挥技术学院、华中科技大学和中国科技大学等单位在国内率先开展了激光推进的理论和实验研究，其中中国科技大学应用“火箭烧蚀模式”实现了 5.87g 铝弹丸的单脉冲激光垂直发射，高度达 1.48m。中科院物理研究所光物理重点实验室也在进行激光烧蚀推进方面的研究，分别从激光能量、脉宽以及靶的结构方面进行了研究。并发现相对于无约束的平面靶，坑靶将动量耦合系数提高了 5 倍，而约束的平面靶将动量耦合系数提高了 10 倍以上。随着我国的“嫦娥一号”探月卫星成功发射，我们相信，在不久的将来，我国的航天科技实力必将大大提高！

（北京中国矿业大学理学院 100083）