

第一章 激光推进简史

[toc]

摘要

本章节分析了1970年代激光推进取得的基本成就。现代激光推进的发展开始于二十一世纪初，主要关注于那些将激光推进应用于实际应用的激光技术。这些应用的典型例子是高校激光推进发动机和高能激光推进（HPLP）系统。

先进的推进技术研究和技术需要能够大大降低任务成本的发射和太空飞行技术。激光推进基于将光束能量从非机载激光器传递到飞行器。自20世纪70年代初以来，各种激光推进概念已经在理论和实验上进行了研究。在20世纪80年代，战略防御计划（Strategic Defense Initiative, SDI）导致了光船概念的产生。结合这一想法，美国空军和美国宇航局共同开发了一种将小型有效载荷发射到近地轨道（low Earth orbits, LEOs）所需的激光技术模型。该技术的近期目标是在不久的将来展示其基本的发射能力。大于1000秒的大推力和高比冲 I_{sp} 都可以被认为是激光推进的优势。此外，由于没有动力部分和更简单的推进剂喷射供给系统，激光推进发动机更为简单和可靠。然而，这项技术同样受到巨大的限制，例如可用的激光能量，激光束在通过地球大气层时吸收和失真，以及如何将激光能量输送到激光推进发动机中。

关键词 激光推进 · 激光推进发动机 · 战略防御计划（SDI） · Kantrowitz的“4P”原则 · 耦合系数 · 激光推进动力学 · 无限比冲 · 光船概念 · 激光轨道传输器 · 光束能量推进

1.1 简介

在1924年，二十世纪著名的俄罗斯科学先驱 K. E. Tsiolkovsky (1857–1935)，在他的书中指出了火箭技术在行星际人类旅行中的某些缺点以及航天器发射到近地轨道的可能性 [1]。其中一个问题是必须在火箭上储存大量的推进剂，而推进剂的质量超过有效载荷大约三倍。他的推断如下：

最后，还有第三种，也是最吸引人的获得速度的方法，就是能量从外部，从地球转移到导弹上。导弹本身并不携带物质能量（比如：以爆炸物或燃料形式的重量）。它将以一束波长较小的平行电磁波束的形式从行星发射出去。

Tsiolkovsky 并没有将这个想法发展成“光束能量推进”的概念，但是，但他的科学远见向其他研究人员暗示，有必要开发另一种具有远程能量源的喷气式飞行器。

对近地空间的探索正式开始于1957年苏联发射第一颗太空卫星。并且，第一台激光器大约同时在美国和苏联 [2] 制造出来。此后不久，在1962年，G. A. Askaryan 和 E.M. Moroz——两位苏联物理学家——通过蒸发具有激光脉冲效应的固态材料，研究出了反冲脉冲的生成：

集中在固体表面小面积上的强能量通量能够产生材料的强烈蒸发，导致表面压力降低，从而在材料蒸发过程中产生强烈的反冲脉冲。蒸发时产生的反冲压力可能比光束压力高几个数量级，这种现象是在红宝石激光的聚焦光束实验种观察到的 [3]。

他们提出使用反冲脉冲来加速小粒子，并模拟微陨石在物体表面的作用。

在1972年, Arthur Kantrowitz 教授发表了题为“通过地面激光推进轨道”的论文 [4,5], 并提出使用高能激光器将小型卫星发射到太空, 而不是制造大型且低能效的化学火箭。这种卫星将横跨在激光束的尖端, 聚焦于它们的“推进剂”区域。当一束高能光束(甚至是松散的)聚焦在一种固体物质上时, 这种物质几乎在瞬间被蒸发和电离, 也就是说, 其释放的能量比火箭中燃烧氢所释放的能量要高得多。因此, 激光驱动的飞行器仍将以同样的火箭原理飞行, 但废气能量和结构轻度将无可比拟地优于氢燃烧火箭。

由激光驱动的火箭将由非常轻的聚焦镜, 一个相对较小的(节能)数量的固体推进剂, 其余将是有效载荷! 激光推进的本质是由 Kantrowitz提出的, 他将其命名为“4P规则”。1989年 [5], 他提出了实现HPLP的四项基本激光工程技术:

- 1. 平均激光功率必须增加几个数量级;
- 2. 需要探索大气传输问题;
- 3. 需要研制大型的反光镜;
- 4. 将激光能量高效转换为射流的动能的技术, 速度高达约 10^6 cm/s (比冲为1000 s) 和需要开发独立于激光束轴的推力矢量。

本章的主题是, 从20世纪70年代开始应基于高功率激光器的推进系统研究的历史回顾。

1.2 激光推进发展的主要阶段

激光推进的主要特点是, 所有产生推力的机制都是由远程的能量源(激光)驱动。这些机制由以下几点决定: (a) 固体材料的激光烧蚀, (b) 由瞬时激光脉冲能量引起的激光爆轰波在有限气体体积的气体介质中的释放, (c) 化学中性聚合物的内部能量释放等。

20世纪70年代最初的激光推进研究可以被描述为在不久的将来寻找潜在的HPLP应用。而20世纪80年代, 是寻找技术和科学方法来产生有效的激光推进, 包括创造最佳发动机设计。到了20世纪90年代, 则是致力于近地空间激光推进的概念发展。自2000年以来, 研究采用了一种类似商业的激光推进方法, 将激光推进发动机应用于将飞行器发射到近地轨道和卫星的轨道飞行中。

在过去的40年中, 该领域经历了不同的资助阶段。特别是, NASA在1970-1980年代为激光推进项目提供了积极的财政支持 [6]。这些研究主要科学和工程结果将得到进一步考虑。

在20世纪70年代研究了以下激光推进课题:

1. 通过吸收激光功率产生激光推进电流的机制。有必要了解诸如有效加热工质(推进剂)和将激光功率转换为推力等问题。
2. 聚焦激光束以激活气态介质进而激光击穿的光学反光镜。当时, 人们还不知道哪种类型的激光最适合应用于激光推进, 这导致了将光束集中器和射流喷嘴叠加在一起的想法, 以形成一个单一的整体, 用于CW和重复脉冲(RP)激光辐射。
3. 推进剂类型的选择及其热物理参数, 对激光推进发动机达到产生稳定推力的能力有很大的影响。

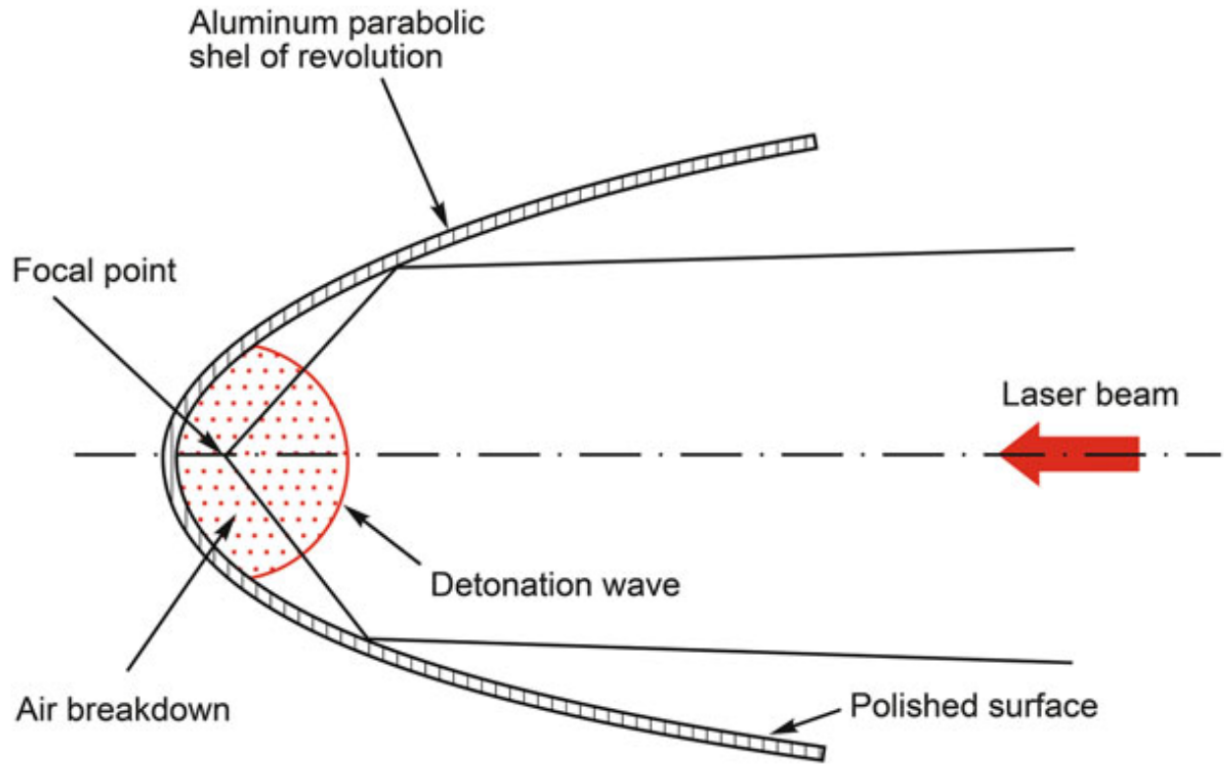


图 1.1 用于激光推进射流喷嘴的旋转抛物面 [8]

这些研究的主要目的是验证基于高功率激光器的激光推进的可靠性，是否能够取代使用化学喷气发动机的传统火箭发射系统。Anthony Pirri 教授在该领域进行了最为持久的研究 [7]，他在 RP CO₂ 激光能量产生激光推进方面的理论做出了贡献。在1972年，Pirri [8] 考虑了称为激光推进耦合系数的参数 C_m ，它来自于推力 (N) 与激光功率 (W) 的比值。该系数表征了激光功率效应下推力产生的效率。Pirri 研究的推进机制是在位于反光镜焦点的气态推进剂中产生强冲击波，这些冲击波由高功率激光辐射激活。值得注意的是，在这种情况下，实现的排气射流的比冲为 $I_s \sim 10^3$ s。

这些参数（耦合系数和比冲）定义了激光推进的总效率 η ： $\eta = g \cdot I_s \times C_m / 2$ ，其中 g 是重力加速度。

在反射时间，Pirri建议使用旋转抛物面形的激光束集中器来聚焦入射的激光束并激活机载推进剂的激光击穿（图1.1）。我们将在第2章中更详细地研究这种类型的激光推进，以定义激光和推力特性之间的主要相关性。

俄罗斯关于激光推进原理和理论的论文发表得稍晚一些，分别在1976年和1977年。激光推进理论和实验研究的主要研究成果在A. M. Prokhorov 院士的授权下发表在俄罗斯《量子电子学》和《物理科学的成功》杂志上 [9,10]。

Prokhorov和他的合作者通过气态推进剂的RP激光击穿和固体材料的激光烧蚀对激光推进产生的气体动力学过程进行了详细的理论分析。这些研究的结果允许开发自相似解决方案，以实现推力产生，并将激光功率最有效地过渡到推力。这些科学家展示了在大气中发射小型激光驱动物体的第一次实验。

1977年，Pirri 和 Girard A. Simons [8] 首次独立地提出了用于太空飞行器飞行的激光推进的气体动力学理论模型。他们还获得了描述抛物面喷嘴中冲击波的产生和传播的气体动力学方程的自相似解。他们还获得了描述抛物面喷嘴中冲击波的产生和传播的气体动力学方程的自相似解。

所有这些关于激光推进的理论（由 Prokhorov 和 Pirri 撰写）在[第2章](#)中进行更详细的讨论，因为所得到的结果对于理解激光功率添加到有限体积的气体推进剂的爆轰机制产生的激光推进非常重要。

在10年的时间里（1972-1982）激光推进的其他重要研究是在空军研究推进实验室（AFRPL：Air Force Research Propulsion Laboratory）进行的[\[6\]](#)。根据实验室的研究，我们可以提出三个重要的实用建议：首先，激光的功率越大，产生的推力就越大；其次，致力于研究实现外部动力源和物质可以提供的"无限比冲"，该建议假定飞行器甲板上缺少工作实质；第三，成功的激光推进技术可以产生其他非常规技术，如激光能量在空间范围内传输。这些建议是以高功率激光器（当时是千瓦级）的快速发展为前提的。

激光推进装置（LPD）的是基于以下几点（[图 1.2](#)）：

- 由激光烧蚀固体物质引发的激光支持的爆轰波
- 脉冲产生的爆破波伴有声耦合气流
- 腔室中激光支持的燃烧波加热气体

应用于激光推进的激光-物质相互作用的详细过程将在[1.2-1.5](#)节中进行讨论。

在20世纪80年代，美国提出了称为战略防御计划（SDI，俗称"星球大战"）的计划，旨在保护美国免受弹道战略核武器（洲际弹道导弹和潜射弹道导弹）的攻击[\[10\]](#)。接下来的计划是：创建地面，空中和天基高功率激光器，包括光学自适应系统，以补偿地球大气层引起的激光束扭曲，开发大口径望远镜，用于通过空间距离传输激光能量，等等。但作为该计划活动的结果，有利的条件似乎是发展出基于高功率激光器的激光推进概念。

当时，制造高功率激光器的许多工程和技术问题，包括天基激光器和激光光学器件，似乎很快就会得到解决。基于化学或自由电子激光器的设计，似乎有可能生产出十亿瓦的激光器。利用线性和非线性自适应光学技术克服高功率激光穿过地球大气层传播的难题。当时最先进的光学技术被认为可以开发由子孔组成的相位光学望远镜。

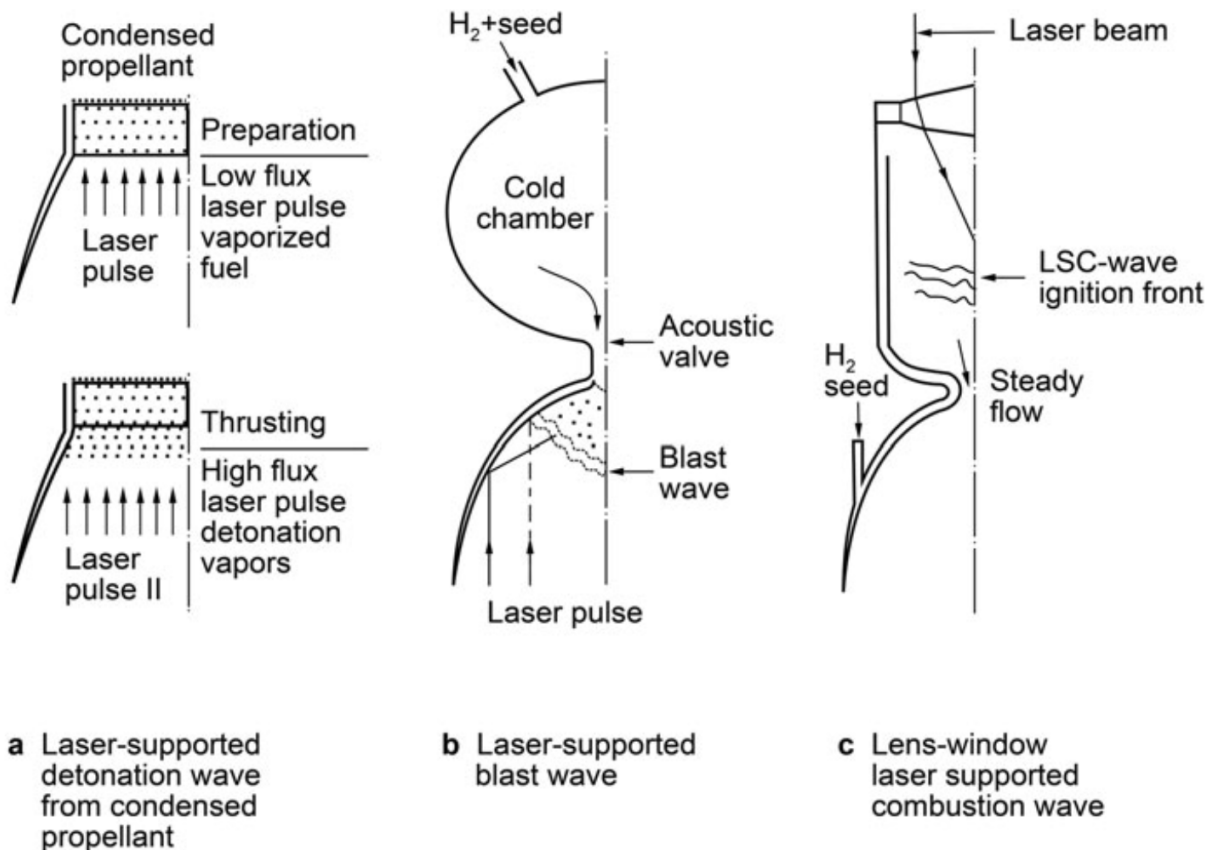


图 1.2 应用于激光推进的物质激光击穿 [6]

Leik N. Myrabo 教授在1985年与 Dean Ing 合著的《飞行的未来》一书中介绍了当时的一些HPLP的研究结果 [11]。该书阐述了作者对波束能量推进的进一步发展，包括应用射频和激光辐射产生推力的观点。作者还考虑了解决HPLP问题的方法，这是 Kantrowitz 早些时候提出的。不幸的是，当时苏联出版的关于激光推进的科学出版物非常少。

Myrabo 的研究表明 [11,12]，载人飞行到达近地轨道需要100兆瓦的激光。如前言中所述，到目前为止，激光器功率已经发展到了几兆瓦（最大）；然而，在过去，它只是一个重要的推进概念。此外，Myrabo 还提出了两种激光推进方式。第一个问题涉及推力产生，当气体推进剂的功率转化为气体中的热能时，由气体推进剂吸收激光功率，然后将能量转化为排气射流的动能。第二种情况的特点是激光能量转换为部分电离气体的平动动能，然后转化为由MHD发电机产生脉冲电力，最后转化为喷射动能。所有这些过程都在专门为每种情况设计的燃烧室中进行。

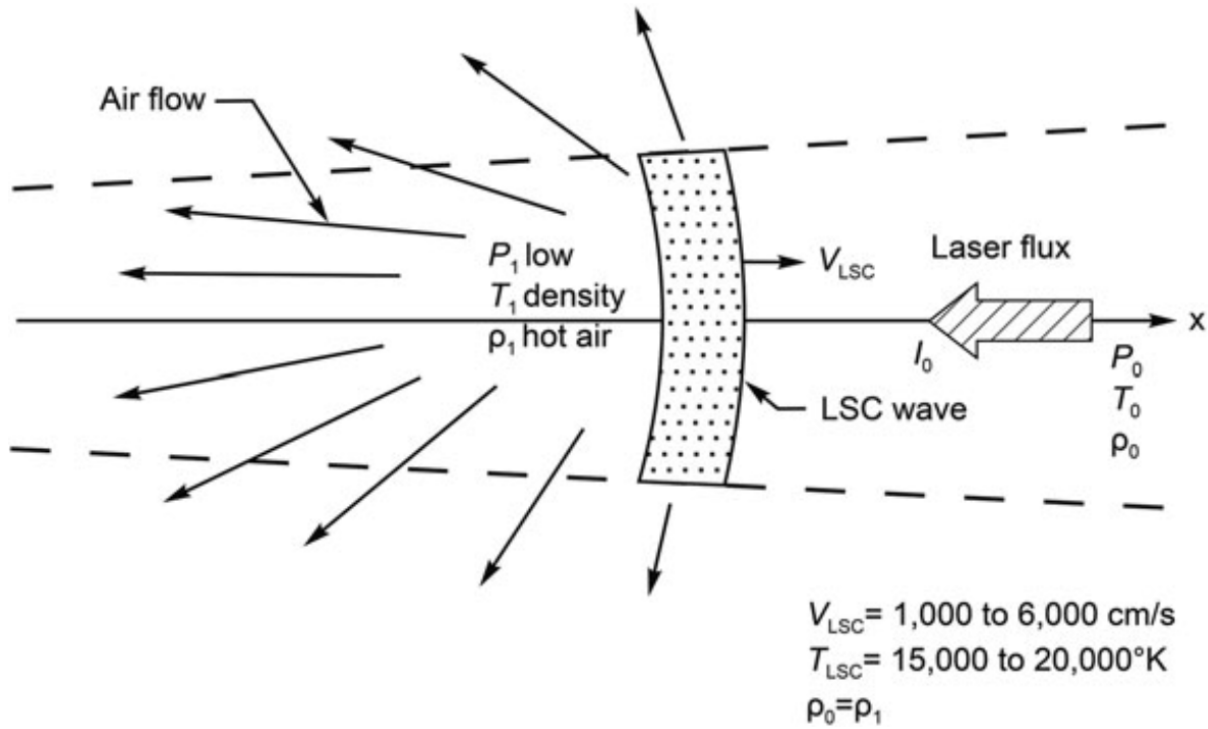


图 1.3 激光持续、燃烧-波-模式和激光束-物质相互作用示意图

1.3 激光推进中的物理过程

1.3.1 激光推进现象的基本分类

1.3.2 激光推进发动机基本推力规格参数

1.4 激光推进的基本概念

1.4.1 利用激光推进将太空飞行器发射到低地球轨道

1.4.2 激光推进对低轨卫星进行修正

1.4.3 太空飞行器利用激光推进进行轨道间任务

1.5 高能激光推进的初始概念

1.5.1 “4P” 飞行器

1.5.2 光船技术演示 (LTD)

1.5.3 激光脉冲空间推进——LISP

1.5.4 高能激光推进的主要概念设计

参考文献

[1] Tsiolkovsky, K.E.: Proceedings on rocket engineering. OboronGiz, Moscow (1947)

[2] Durrani, M.: The Laser at 50. Phys.World. 23, 16–62 (2010) ([The laser at 50 – Physics World](#)) (<https://physicsworld.com/a/the-laser-at-50/>)

[3]

[4]

[6] Myrabo, L.: Advanced beamed-energy and field propulsion concepts. Principal investigator. Department of Mechanical Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York (1983) (<https://ntrs.nasa.gov/citations/19850024873/>)