

论光动力飞行器

许德胜 郭振华 S. Messaoud* 辜建辉
(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 分析了勿需化学燃料的光动力飞行器, 并概述了下个世纪从卫星上用太阳光泵浦的激光束推进星际飞行器的设想。

关键词: 光动力飞行器 高功率激光束 推进剂

On Lightcraft

Xu Desheng, Guo Zhenhua, S. Messaoud , Gu Jianhui*
(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: In this paper, the lightcraft vehicle without on-board chemical fuel was analyzed. Sending manned craft into space on satellite laser-beams powered by solar energy in next age was speculated.

Key words: lightcraft high-power laser beam propellant

引 言

21 世纪人类的梦想之一将是进行星际航行, 对于已在本世纪实现登月壮举和行星探测的科学家来说, 一方面雄心勃勃, 充满自信; 另一方面也感到困难重重, 举步维艰, 其中最关键的可能还是飞行器的载重和速度问题。因为按照当前的火箭技术, 使用固体、液体燃料是很难把多种大型的科研仪器和宇航员长期生活设备加速到第二、第三宇宙速度以上的。20 世纪, 人们把喷气技术发展到了相当好的水平, 在地球上洲际旅行已十分方便易行, 并使全世界向地球村演化, 用质子火箭到火星去考察已指日可待。21 世纪人们在高速飞行方面则应集中力量研

* 在激光技术国家重点实验室就读的外国研究生。

激光器及昆明物理所研制的单元 PV 型 CMT 探测器, 在此, 作者对提供上述关键元器件的侯天晋、江东、魏建华、庄继胜等人以及所有对此项工作提供过帮助和支持的同事表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 封鸿渊. 激光与红外, 1994; 20(4): 48
- 2 封 巍. 激光技术, 1993; 18(3): 190
- 3 Byren R W. Laser Rangefinders. Hughes Aircraft Company. The infrared & electro-optical systems handbook, 1993
- 4 Kaminski W R. SPIE, 1980; 227: 65

作者简介: 封 巍, 女, 1968 年 5 月出生。工程师。现从事质量管理工作。

究与发展光子推动的新一代飞行器,使载人飞船能够很容易地离开地球到其它行星去度假旅游,而科学考察装置甚至能够克服太阳引力而达到银河系的其它星球去进行探索。我们仅就高速宇航的光推动问题作些初步探讨。

1 研究近况

美国加利福尼亚爱德华空军基地的科学家们^[1]最近于新墨西哥洲的白沙导弹试验场用 9kW, 20Hz 脉冲 CO₂ 激光器的光子能量作动力, 把一个直径约 15.3cm, 重约 42.5g 的 606-T 6 型铝质试验模型(图 1) 在 3s 内送上了大约 22.86m 高的空中。10.6 μ m 远红外激光在电脑程序控制下用光学器件转换成垂直向上的回形光束, 其横截面外形尺寸是边长 6.67cm 的正方形, 它的中心部分含有一个边长 3.3cm 的方孔, 这个试验模型未带任何燃料, 只是依靠其尾部一个抛物面形聚光镜把激光束聚焦使空气加热, 温度猛升产生急剧爆炸膨胀而推进飞行器

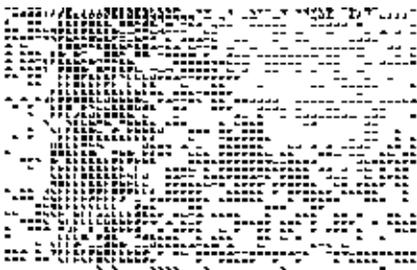


Fig. 1 Lightcraft vehicle (from the rear) with parabolic reflector works via a directed, then reflected, high power laser beam

升空前进, 所以其比推力几乎是无穷大。每兆瓦激光功率产生的推力大约为 100~200N, 为了保持试验模型的垂直升空姿态, 事前用空气喷射动力把模型加速旋转到了 3000~6000rpm, 他们借用美国战略防御计划(SDI 即“星球大战”计划)的成熟技术进行定点和跟踪制导。聚焦目镜带有伺服电机能变化 5mrad 的角度与入射光束达到最佳耦合。和电脑联接在线的照相系统拍摄了试验时模型升空过程和开始降落时的分帧图片(图 2)。分析表明, CO₂ 激光束的推力在这次升空过程中, 最初产生的加速度大约是 $2g(2 \times 9.8m/s^2)$, 在升空离地 6~15m 范围内, 其末端向上速度约为每个激光脉冲 30.5cm, 激光器每秒发射 20 个脉冲。主要研究人员声称, 下一年半时间内, 他们可以把试验模型垂直升高到千米。目前限制升高的主要因素是激光衍射和光束畸变把射向靶标的能量分散到了太大的面积上。他们计划利用 Cassegrain 望远镜和更大的光学器件以提高激光束有效作用距离。其长远目标则是, 设法让激光动力能将飞行器的速度提高到 5 个马赫数并使飞行器升高到 30km 高空, 那么就可逃离到大气层外, 他们设想能在 5 年内把一个直径 0.5~1m, 重 1kg 的飞行器送入地球轨道运行, 这样光飞行器就能够用它的镜面做发射器或以专用望远镜完成各种各样的通讯与遥感任务。

要达到更高的外层空间需要更大的激光器, 现在美国已试制 100kW 量级的激光器, 这种名为“驱动者”的激光器产生的冲击力估计可以把飞行器送到 100km 高度, 要把“驱动者”激光器改造成适合于做光飞行试验, 所需的经费大约 50 万美元。纽约 Rensselaer 综合技术研究所的科学家 L. Myrabo 设想, 在外层空间可以在人造卫星上用太阳光束能量驱动人造飞行器, 这种装置只需目前化学能火箭质量的 10% 到 20%, 大家知道现在用常规方法发射一个 5600kg 的 Cassini 轨道卫星需要 940000kg 的起飞重量。虽然用光动力替代化学能动力还是个长远任务, 但是也不能说就不可以实现, 因为昨日的梦想正是今日的希望, 到明日则可能变为现实。

升空前进, 所以其比推力几乎是无穷大。每兆瓦激光功率产生的推力大约为 100~200N, 为了保持试验模型的垂直升空姿态, 事前用空气喷射动力把模型加速旋转到了 3000~6000rpm, 他们借用美国战略防御计划(SDI 即“星球大战”计划)的成熟技术进行定点和跟踪制导。聚焦目镜带有伺服电机能变化 5mrad 的角度与入射光束达到最佳耦合。和电脑联接在线的照相系统拍摄了试验时模型升空过程和开始降落时的分帧图片(图 2)。分析表明, CO₂ 激光束的推力在这次升空过程中, 最初产生的加速度大约是 $2g(2 \times 9.8m/s^2)$,



Fig. 2 Time lapse photographs show lightcraft flights in a laboratory

2 简要回顾

在第一台激光器刚刚发明不久, D. W. Gregg 等人在 1966 年就着手研究相干辐射激光和固体靶材间的能量、动量转换关系^[2,3], 而 B. B. Kopylov^[4] 在当时已着手研究激光和各种靶材相互作用所产生的等离子体形态, 70 年代初, A. R. Kantrowitz 提出了激光推进的设想^[5], 即从远距离传输到飞行器上的激光能量用于加热火箭发动机中的推进剂, 使其温度急升形成高压气体或等离子体, 然后从飞行器尾部喷管喷射出去产生推力, 这种方法勿需传统方法中的大分子质量氧化剂, 而且燃烧温度能大大提高, 可以得到很高的比推力。而 T. B. Auer^[6] 等人更进一步提出了激光空气喷气发动机概念^[6]。到 1978 年前苏联就做到了在大气条件下, 利用 CO₂ 激光脉冲造成空气击穿产生的冲击波能量获得 50dyne/W 的能量耦合系数。后来 B. A. Auer^[7] 还用 Q 开关钕玻璃激光器产生的高功率密度光束(10⁸~10⁹W/cm²) 研究了激光喷管中等离子体的磁场。

70 年代中后期, 美国人做了大量实验工作^[8~11], 集中研究 CO₂ 激光与物质相互作用中, 等离子体的膨胀过程、推力、比推力和能量耦合系数。他们曾在实验上得到 500s 比推力和 10~100dyne/W 的能量耦合系数, 并且预言要达到激光推进初步实用化, 需研制平均功率兆瓦到京瓦的激光器。另外, 美国和前苏联的研究人员在实验室内摩擦系数很小的平面上, 依靠有线制导系统, 用激光束驱动一辆带有光束聚焦系统的小车, 该小车把接受到的激光能量转化成气体热膨胀动能之后, 可以在水平方向移动到 122m 远处。也有人在水池中用 120mm 长的小舟做试验, 把一个直径 16mm, 焦距 30mm 的透镜固定在舟上接受激光束并加热气体使之膨胀产生推力。1981 年美国还曾在弗吉尼亚州举行了一次专题会议研讨空间激光推进问题。进入 80 年代^[12~14], 美国的研究主要集中在改变激光参数(波长、能量密度、脉冲宽度)和靶材选取上, 使这方面的理论研究和实验研究并举进行。到 80 年代末^[15], 美国 SDI 组织还投入数百万美元进行过用陆基激光推进, 将小的有效载荷送入地球轨道的尝试, 估算出的发射费用为 \$ 18/kg, 比传统航天运载动力的 \$ 10000/kg 小得多, 激光推进估计能把起飞重量的 15% 作为有效载体, 它远远高于传统航天的 1.5%。估算还表明, 当连续 CO₂ 激光功率密度达到 108W/cm² 时, 激光能量才可以和材料比一般性的吸收与加热更有效地耦合, 其中材料升华与离化产生的等离子体起着重要作用。

3 原理分析

当高功率激光束聚焦在火箭燃烧室内初步形成等离子体时, 可达到 20000K 高温。作为例子, 图 3 示出了用 2.5kW 连续 CO₂ 激光聚焦($f/7$) 加热 1 个大气压力流动(流速 394cm/s) 氩气时得到的等离子体电子温度分布图, 其温度值在 10000K~19000K 范围内。此时等离子体会产生辐射, 损耗一些能量, 然后再与火箭中的推进剂热气流耦合引发进一步的体膨胀高压, 并通过喷嘴向后射出产生前进推力, 等离子体扮演了能量在激光束与燃烧介质间的传递作用。所以, 激光支持的等离子体特性就必须弄得尽量清楚。早前人们探讨了激光与铝材间的相互作用, 我们也曾用厚 1mm 的铝片靶材做试验, 得到了一些数据。例如把铝片放在 $f=95\text{mm}$ 的透镜焦点区, 用脉宽

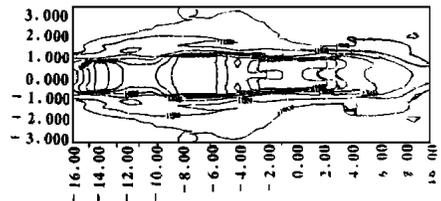


Fig. 3 Electron temperature contour plot for an argon plasma with 2.5kW laser power, $f/7$ optics, 394 cm/s flow speed and 1 atmosphere chamber pressure

1ms, 脉冲功率 6.4J 的 $1.06\mu\text{m}$ 波长激光轰击时, 功率密度约为 $7 \times 10^5 \text{W}/\text{cm}^2$, 因为未达到铝的汽化阈值 $10^6 \text{W}/\text{cm}^2$, 只产生了一些铝的熔滴。同样的激光束, 当我们用环氧树脂板材 (EP) 作靶时, 在实验上得到了单脉冲激光推力 $5 \times 10^{-1} \text{N}$, 比推力 20~120s, 激光功率转换效率 2~8.5dgne/W, 且激光的推力、比推力和能量耦合系数三者都随激光作用于靶材上的功率密度增加而增加, 在一定范围内呈现出近似线性的变化。把 EP 材料的物理参数: 密度 $2\text{g}/\text{cm}^3$, 升华能 $10^3 \text{J}/\text{g}$, 热散率 $0.15 \text{cm}^2/\text{s}$, 热导率 $0.042 \text{cal}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$, 比热 $0.14 \text{cal}/\text{g} \cdot ^\circ\text{C}$, 汽化温度 $10^3 ^\circ\text{C}$, 克分子量 $10^3 \text{g}/\text{cm}^3$, 比热比 1.33 等代入有关公式, 估算出的单脉冲推力为 $2 \times 10^{-1} \sim 9 \times 10^{-1} \text{N}$, 比推力约为 33s, 激光能量转换效率 3.4dyne/W 与上述实验结果在数量级上是一致的^[16]。十分明显, 对于远距离空间飞行来说, 比推力是更加关键的参数。由图 4 可见, 使用化学燃料虽然能产生 $10^4 \sim 10^6 \text{N}$ 的推力, 但是比推力却很低, 另一方面电气比推力很大 (2500~5000s), 但是其推力又太小, 所以, 只有激光推进兼顾了两方面的优点, 既能达到 10^4N 足够强大的推力又可以产生 2000s 以上的比推力。实验上已用真空条件下的电荷收集技术测得碳靶等离子体扩散速度随入射激光功率密度的变化关系, 在光功率密度 $10^{10} \text{W}/\text{cm}^2$ 时, 等离子体扩散速度可达 $8 \times 10^4 \text{m}/\text{s}$, 对应于 $10^8 \text{W}/\text{cm}^2$ 大约是 $2 \times 10^4 \text{m}/\text{s}$ ^[17], 这无疑能产生很大的比推力。综上所述, 激光推进确实是 21 世纪宇宙航行的一个甚好的动力源选择。当然, 激光推进要走的路还很长, 要解决的问题也很多, 人们用 10kW 级的 CO_2 的激光束聚焦后辐照一定压力下 (例如 1~2.5atm) 的空气、氢气或氦气, 使之电离, 在气流速度 $10\text{m}/\text{s}$ 的情况下, 已能使激光的整个吸收达到 80% 以上, 且热效率 60% 左右^[18], 这对于激光推进显然又是一个令人鼓舞的信息。

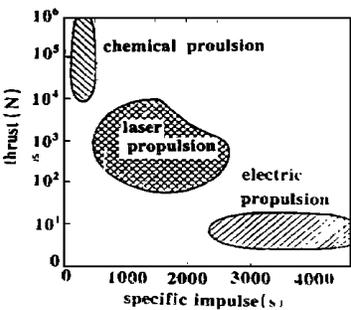


Fig. 4 Thrust and specific impulse (I_{sp}) comparison, laser propulsion is expected to fill the gap between the two conventional propulsion systems

另一方面, 高功率激光束在大气中的传输是设立陆基激光推进站必须面临的课题, 我们在 90 年代初期用 10kW 级连续 CO_2 激光器进行了相当长时间的研究。首先在实验室内用聚焦光束对数十种材料样品反复进行了强光辐照实验^[19~21]。继而在开阔荒草地带做了多次高功率激光束近地面 (2m 左右) 百米距离打靶演示观测^[22]。同一时期还在华中理工大学校园上方 50m~100m, 空中 1500m 范围内的楼顶与山头间进行了长期大气传输的连续测量^[23], 实验结果不但在周日变化趋势上与美国学者一致^[24], 而且在绝对值上也与苏联学者相同^[25], 得到白天中等湍流范围内折射率结构常数 $C_n = 2.2 \times 10^{-8} \text{m}^{-1/3}$, 早晚对应的强湍流, $C_n = 7.5 \times 10^{-7} \text{m}^{-1/3}$ 。这些数据与国内学者得到的其它有关大气湍流对激光束传输影响的资料^[26], 对于未来由陆基激光器向高空飞行器提供能量的设计具有一定意义。

如果能把太阳光泵浦的多个 10MW 级激光器布置在适当的外层空间轨道上 (图 5), 利用它们通过自适应光学系统给进入地球轨道的激光动力飞行器分段接力提供能源, 那么, 激光飞行器的有效载体就可以大大增加, 并能获得足够动力使其达到极高的宇宙速度去土星、木星考察, 甚至到海王星探险, 人类的宏伟目标也可进一步实现。

但是其推力又太小, 所以, 只有激光推进兼顾了两方面的优点, 既能达到 10^4N 足够强大的推力又可以产生 2000s 以上的比推力。实验上已用真空条件下的电荷收集技术测得碳靶等离子体扩散速度随入射激光功率密度的变化关系, 在光功率密度 $10^{10} \text{W}/\text{cm}^2$ 时, 等离子体扩散速度可达 $8 \times 10^4 \text{m}/\text{s}$, 对应于 $10^8 \text{W}/\text{cm}^2$ 大约是 $2 \times 10^4 \text{m}/\text{s}$ ^[17], 这无疑能产生很大的比推力。综上所述, 激光推进确实是 21 世纪宇宙航行的一个甚好的动力源选择。当然, 激光推进要走的路还很长, 要解决的问题也很多, 人们用 10kW 级的 CO_2 的激光束聚焦后辐照一定压力下 (例如 1~2.5atm) 的空气、氢气或氦气, 使之电离, 在气流速度 $10\text{m}/\text{s}$ 的情况下, 已能使激光的整个吸收达到 80% 以上, 且热效率 60% 左右

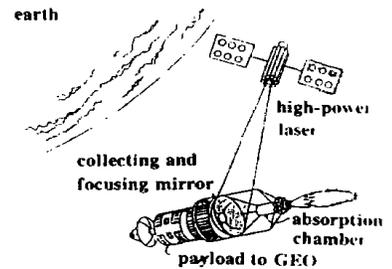


Fig. 5 Schematic of laser rocket propulsion system at work in outer-space

参 考 文 献

- 1 Appell D. L F World, 1998; 90~ 91
- 2 Gregg D W, Thom es S T. J A P, 1966; 37(7): 2787
- 3 Gregg D W, Thom es S T. J A P, 1966; 37(12): 4313
- 4 Korbkin V V, Serov R V. TETP Lett, 1966; 4: 170
- 5 Kantrowitz A R. Astronautics and Aeronautics(A/A), 1972; 10(5): 74~ 76
- 6 Barchukov T V, Bunkin F V. Sov Phys Usp, 1976; 19(7): 561
- 7 Gorbuniz V A, Nikol L S. Sov J Q E, 1984; 14(2): 238
- 8 Londer J E, Lencioni D E. J A P, 1973; 44(6): 2759
- 9 Weiss R F, Pirri A N. A/A, 1979; 17(3): 50
- 10 Gerry E T, Ratter J D G. A/A, 1979; 17(3): 60
- 11 Hertgberg A, Billman K W. A/A, 1979; 17(3): 41
- 12 Roser D I, Hastings D E. J A P, 1982; 53(8): 5882
- 13 Simons G A. A/AA J, 1984; 22(9): 1275
- 14 Peterk S W, Root R G, Pirri A N. A/AA J, 1985; 3(9): 1449
- 15 辜建辉, 徐启阳, 李再光 *et al.* 推进技术, 1995; (2): 80~ 84
- 16 郑启光, 辜建辉. 激光与物质相互作用. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996: 247
- 17 Chen X L. Spectroscopic Diagnostics of Argon Plasmas During Laser-Gas Interaction, MS Thesis, Univ of Illinois USA, 1988
- 18 Guo Zh H, Xia Zh Zh, Gu J H *et al.* AD- A256 907 U SA
- 19 郭振华, 许德胜. 激光技术, 1989; 13(5): 5~ 20
- 20 郭振华, 王世鹏, 许德胜 *et al.* 激光技术, 1991; 15(4): 199~ 201
- 21 郭振华, 辜建辉, 许德胜. 激光技术, 1991; 15(6): 331~ 334
- 22 郭振华, 许德胜, 王世鹏 *et al.* 激光技术, 1992; 16(2): 65~ 72
- 23 Clifford S F, Ochs G R, Lawrence R S. J O S A, 1974; 64: 148
- 24 Zuev V E. Laser Beams in the Atmosphere. New York: Plenum press, 1982
- 25 张逸新, 宋正方. 光学学报, 1986; 6(12): 1111~ 1117

作者简介: 许德胜, 男, 1963年9月出生。学士, 讲师, 激光技术国家重点实验室学术秘书。主要从事强激光大气传输与破坏机理研究。

收稿日期: 1998-11-23

• 简 讯 •

工作在红外波段的三维硅光晶体

Sandia 国家实验室(新墨西哥州阿尔伯克基)和衣阿华大学 Ames 实验室(衣阿华州艾姆斯)的研究人员已在硅片上制造出三维(3D)红外光子晶体。这种晶体含有在二氧化硅中腐蚀的平行杆的层状结构,其逐层旋转 90° ,每间隔一层移动杆与杆之间一半的间距,这样就形成了每隔四层便重复的结构。Sandia 实验室的 Shawn Yu Lin, James G. Fleming 及其同事生产出一种不透明带在 $10\sim 14.5\mu\text{m}$ 之间的晶体,不透明带内对光急剧衰减(每单位晶格大约12dB)并且对于6英寸晶片,其光谱响应的均匀性优于1%。

由于带隙宽,该晶体可以用作与硅波导或光电探测器集成的带通滤波器。恒定的衰减可产生高Q值共振腔,这就能制造出单模发光二极管。三维光子晶体还能改进或抑制用于红外热辐射工程的发热体的固有热辐射。

(更生 曹三松 供稿)