



装备学院·学术专著

吸气式脉冲激光推进导论

洪延姬 金星 李倩 窦志国 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

图书在版编目(CIP)数据

吸气式脉冲激光推进导论 / 洪延姬等编著. —北京:
国防工业出版社, 2012. 4

ISBN 978 - 7 - 118 - 08028 - 5

I. ①吸... II. ①洪... III. ①推进系统 - 研究
IV. ①TN248②V43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 053984 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 19½ 字数 349 千字

2012 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

前 言

随着激光技术的发展及其在航天航空领域的广泛应用,激光推进作为一种新概念定向能推进技术以其独特的优势越来越受到各航天大国的高度重视。激光推进的概念早在 1972 年就被提出了,国内从 2000 年以来有许多单位开展了激光推进的相关研究,但是迄今为止,国内外尚未出版系统介绍激光推进基础理论的书籍。

激光与物质相互作用方面的书籍较多,如中国工程物理研究院孙承纬院士等编著的《激光辐照效应》、南京理工大学陆建等编著的《激光与材料相互作用物理学》、苏联泽尔道维奇等编著的《激波和高温流体动力学现象物理学》等,这些著作从不同角度系统阐述激光与物质相互作用的物理现象、热效应、力学效应,高温气体的热力学和光学性质、高温高压下固体的热力学性质、激波波阵面结构和激波自模运动、热波线性和非线性热传导机制。但是这些著作对于激光推进的气体激光击穿、能量沉积和能量转化机理以及推进性能等都未作系统研究,更未涉及激光推进相关的基本概念和基本原理。本书尝试用简单通俗的语言,追寻激光能量转化并产生推力的过程,循序渐进地讲解吸气式脉冲激光推进相关的物理和力学理论。

全书由洪延姬、金星、李倩和窦志国负责制定著编写大纲和写作方案。本书内容是激光推进团队集体智慧的结晶,主要为洪延姬、金星、李倩、窦志国、文明、王广宇、叶继飞、崔村燕、李修乾、王宇、阿荣、李兰等教员近几年的研究成果。全文插图由王宇、张杨、杨鹏涛、吴赛虎、刘准和宋俊玲绘制完成,在此向他们表示感谢。同时感谢国防工业出版社对本书出版的支持和帮助。

作 者

2011 年 12 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 激光推进概述	1
1.1.1 概念与特点	1
1.1.2 物理力学过程	5
1.1.3 激光推进的推进性能参数	7
1.2 国内外研究现状	8
1.2.1 实验与理论研究进展	9
1.2.2 技术成熟度分析	16
1.2.3 应用前景	17
相关知识	19
参考文献	23
第2章 气体中的激光击穿和能量沉积	26
2.1 激光及激光特性	26
2.1.1 激光及激光器分类	26
2.1.2 激光性能参数	27
2.1.3 激光特性	28
2.1.4 激光束的聚焦特性	31
2.2 气体主要性质	34
2.2.1 气体的可压缩性与热膨胀性	34
2.2.2 气体的输运性质	36
2.3 高温气体中光的吸收和发射	39

2.3.1	气体对激光的吸收和发射机制	39
2.3.2	短距离传输激光的吸收系数计算模型	42
2.4	激光大气传输的线性效应	51
2.4.1	大气折射	51
2.4.2	大气吸收	52
2.4.3	大气散射	54
2.4.4	大气湍流效应	57
2.5	激光大气传输的非线性效应	59
2.5.1	热晕	59
2.5.2	大气击穿	61
2.5.3	受激拉曼散射	62
2.6	激光束的聚焦和激光击穿	63
2.6.1	激光击穿及击穿阈值	63
2.6.2	气体对激光束的吸收及气体的加热	66
2.7	激光的吸收和激光能量沉积	68
2.7.1	光子能量较小时激光的吸收系数	68
2.7.2	光子能量较大时激光的吸收系数	70
2.7.3	激光能量沉积	71
	相关知识	72
	参考文献	78
第3章	激光击穿和能量沉积引起的力学效应	80
3.1	激光等离子体和激光维持的吸收波	80
3.1.1	激光等离子体	80
3.1.2	激光等离子体对能量沉积的作用	82
3.1.3	激光维持的吸收波形成机制	83
3.1.4	激光维持的燃烧波和爆轰波的判别和转化	83
3.2	激光维持的吸收波的演化	84
3.2.1	激光维持的吸收波演化过程的气体动力学分析	84

3.2.2	激光维持的燃烧波的演化过程	88
3.2.3	激光维持的爆轰波的演化过程	90
3.2.4	激光维持的爆轰波速度	93
3.3	激光维持的爆轰波的稳定传播	95
3.3.1	CJ 点的激光维持的爆轰波速度	95
3.3.2	激光维持的爆轰波稳定传播的条件	98
3.3.3	影响激光维持的爆轰波稳定传播的因素	99
3.4	激光维持的爆轰波前后熵和能量的变化	100
3.4.1	熵在激光维持的爆轰波能量曲线上的变化	100
3.4.2	熵在激光维持的爆轰波波速线上的变化	101
3.4.3	能量在波速线和能量曲线上的变化	101
3.5	离解和电离对激光维持的爆轰波的影响	102
3.5.1	双原子分子离解对气体内能和压强的影响	102
3.5.2	原子的电离对气体内能和压强的影响	103
3.5.3	库仑作用对激光维持的爆轰波的影响	104
3.5.4	粒子数对激光维持的爆轰波的影响	105
3.6	激波及激波相互作用	106
3.6.1	激波的基本性质	106
3.6.2	激波的相互作用	111
3.6.3	初始间断分解	117
	相关知识	121
	参考文献	126
第 4 章	含激光能量沉积流场的基本方程	127
4.1	热力学基本概念	127
4.1.1	热力学状态和过程	127
4.1.2	热力学定律和基本方程	131
4.1.3	完全气体的热力学特性	134
4.1.4	化学热力学简介	135

4.1.5	声速和马赫数	136
4.2	高温气体热力学性质及空气状态方程	138
4.2.1	比热容和粒子数不变的理想气体	138
4.2.2	用统计求和法计算热力学函数	140
4.2.3	双原子分子的离解	141
4.2.4	电离和电子激发	142
4.2.5	多次电离范围内的近似计算方法	144
4.2.6	稀薄电离气体的状态方程	146
4.2.7	稠密高温气体的状态方程	147
4.2.8	高温平衡气体的状态方程	149
4.3	流体力学方程组	151
4.3.1	理想流体	151
4.3.2	间断面及其分类	152
4.3.3	黏性流体	154
4.3.4	自然坐标系与特征线方法	156
4.4	光辐射及辐射输运方程	159
4.4.1	光辐射描述	159
4.4.2	辐射输运方程	160
4.4.3	光学厚条件下辐射输运方程的简化	163
4.4.4	光学薄条件下辐射输运方程的简化	165
4.4.5	光线追踪激光辐射输运方程的简化	167
4.5	辐射流体动力学方程组	167
4.5.1	高温气体的辐射和辐射热交换	169
4.5.2	辐射流体动力学方程组及其简化形式	172
4.5.3	计算结果	175
	相关知识	178
	参考文献	180
第5章	吸气式脉冲激光推进机理及推进性能	182
5.1	吸气式脉冲激光推进机理概述	182

5.2	能量沉积机理	183
5.2.1	激光聚焦空气击穿过程	183
5.2.2	激光维持的吸收波的形成及演化过程	184
5.3	推力形成机理	186
5.3.1	激波在流场中的传播过程	186
5.3.2	流场与抛物面的冲量耦合过程	189
5.4	典型圆锥形喷管的推进性能和相似律	194
5.4.1	圆锥形喷管的推进性能	194
5.4.2	圆锥形喷管的相似律	213
5.4.3	理论模型的局限性	222
5.5	吸气式脉冲激光推进的高度特性	223
5.5.1	国内外的高度特性实验数据分析	224
5.5.2	高度特性的理论研究	225
5.5.3	高度特性的机理	227
5.5.4	高度特性规律	229
	相关知识	229
	参考文献	232
第6章	吸气式脉冲激光推进中物理力学量的测量方法	235
6.1	测量参数及测量方法	235
6.2	激光能量加载系统与激光参数测量方法	235
6.2.1	激光器及光学系统	236
6.2.2	激光能量及波形测量系统	237
6.3	力学性能参数测量方法及系统	240
6.3.1	冲击摆冲量测试方法及系统	242
6.3.2	瞬态推力测试方法与系统	248
6.3.3	瞬态压力测试方法与系统	257
6.4	激光等离子体瞬态温度测量方法	262
6.4.1	测温系统	263

6.4.2	测温原理	266
6.4.3	图像预处理	271
6.4.4	标定实验	273
6.4.5	温度测量实验	277
6.5	瞬态流场的光学测量方法	284
6.5.1	流场参数诊断系统的特点	285
6.5.2	纹影技术基本原理	288
6.5.3	纹影实验系统	291
6.5.4	时序关系	293
6.5.5	爆轰波或激波速度求解的数据处理	295
	相关知识	297
	参考文献	299

第 1 章

绪 论

1.1 激光推进概述

1.1.1 概念与特点

1. 激光推进的概念与分类

激光推进是利用高能激光与工质相互作用产生推力,推动光船(Lightcraft,特指激光推进中所用的飞行器)前进的新概念推进技术,它属于定向能推进技术的一种,可以按照不同方式将其分类:

- (1) 按激光工作模式——连续/脉冲/换热式激光推进;
- (2) 按推进剂——吸气式/气体/液体/固体/混合激光推进;
- (3) 按激光吸收机制——分子共振吸收式/逆韧致吸收式激光推进。

本书中所说的吸气式脉冲激光推进按激光工作模式属于脉冲式,按推进剂属于吸气式,按激光吸收机制则属于逆韧致吸收式。

连续(CW)激光推进的工作原理是将远处传来的高能连续激光聚焦到推力器的吸收室(类似于化学火箭发动机的燃烧室),通过逆韧致吸收机制将激光能量直接转化为工质热能,在吸收室中心处形成激光维持的等离子体(Laser Supported Plasma, LSP),LSP 通过喉部和喷管产生推力,如图 1-1 所示。连续激光

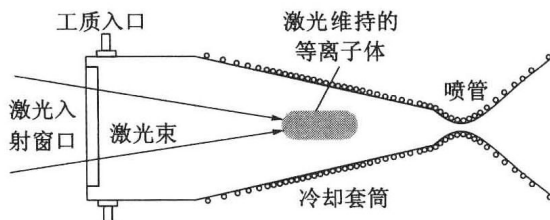


图 1-1 连续激光推进工作原理示意图

推进工作过程与传统的化学火箭发动机类似,只是用激光能量代替了化学火箭发动机燃烧释放的化学能。图中考虑到了连续激光推进中,由于吸收室内等离子体温度过高带来的热防护问题,采取了必要的冷却措施。

CW 激光推进系统的特点是当激光束连续为推进剂提供能量时,它的推力始终保持不变,而且工作介质排气与激光束入射不是同一个通道。

脉冲激光推进的工作原理是远处传来的高能脉冲激光聚焦并诱导击穿工质形成激光等离子体,激光等离子体的吸收系数远大于冷气体,所以沿着激光束入射方向因优势吸收形成激光维持的爆轰波(Laser Supported Detonation Wave, LSDW),通过 LSDW 后按照等离子体的吸收机制将激光能量转化为工质热能。LSDW 的波后流场是冲击压缩形成的超声速流场,不再需要传统的拉瓦尔喷管,如图 1-2 所示。脉冲激光推进的吸收室和喷管合二为一,喷管没有收缩加速段而直接用扩张段加速形成脉冲推力。

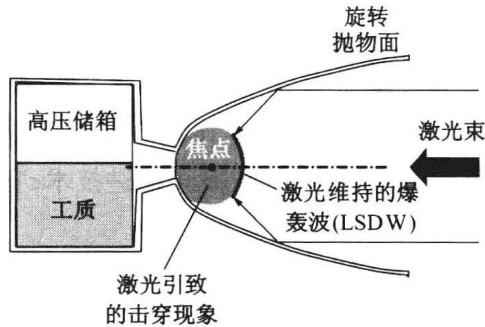


图 1-2 脉冲激光推进工作原理示意图

脉冲激光推进的工作特点是工作流体不是稳定加热的,而是由一系列激光脉冲在工作介质中形成一系列的光爆炸(重复形成激光维持的爆轰波),将激光束能量间歇式地转化为飞行器的动能,而且排出气体方向逆着激光束的入射方向。

换热式激光推进的工作原理是远处传来的高能激光束直接辐照在飞行器携带的换热器上,通过热传导机制将激光能量转化为工质热能,被加热的工质经过传统喷管喷射产生推力,如图 1-3 所示。这种激光推进对激光模式要求不高,理论上用连续和脉冲激光均可,但脉冲激光辐照在换热器上会产生周期性的热力冲击问题。

一般而言,在连续激光推进中由于激光功率密度小于能够形成 LSDW 的阈值,从而不能形成 LSDW;对于脉冲激光推进,激光脉宽在 $\text{ns} \sim \mu\text{s}$ 量级,在相同激光平均功率密度下对应较高的峰值功率密度,使得峰值功率密度远大于形成

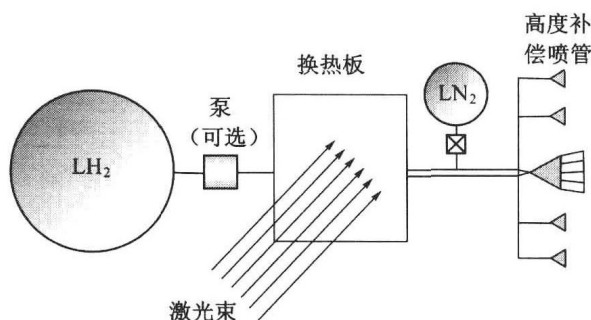


图 1-3 换热式激光推进工作原理示意图

LSDW 的阈值,从而能够形成 LSDW。利用 LSDW 工作的脉冲激光推进有更高的比冲,推力器结构也比较简单。这也是近几年,相比于连续激光推进,脉冲激光推进研究更受到重视的一个主要原因。

值得一提的是,近年来出现了一种更新概念的激光推进——高重频脉冲激光推进,它也属于脉冲激光推进的一种。对于脉冲激光推进而言,通过某种聚焦方式可利用入射的脉冲激光形成高重频周期性的光学脉冲放电 (Optical Pulsed Discharge, OPD),这些 OPD 在气体中以一定速度沿着某个方向运动,将会产生周期性的激波 (Shock Wave, SW),在一定条件下,这些激波相互追赶并且相互作用,在 OPD 运动前方合并形成准静态波 (Quasi-Stationary Wave, QSW),QSW 与推力器壁面耦合产生推力。与低重频的脉冲点火不同,OPD 产生的激波合并生成的 QSW 会在 OPD 前面形成一个持久的相对高压区,从而可以提高推力器的冲量和冲量耦合系数。

吸气式激光推进是以吸入的空气作为工质,光船自身不携带工质,理论比冲无限大,适合在大气层中使用。气体/液体/固体/混合激光推进只是光船携带的工质形态不同,其原理基本相同。

分子共振吸收式连续激光推进 (简称分子共振吸收推进) 是在连续激光推进基础上,将纯推进剂换成注入种子气体的推进剂混合物,依靠推进剂中混入的杂质,对入射激光束进行分子振动吸收,可以避免纯氢等离子体极高的温度,同时还抑制了等离子体潜在的不稳定性和击穿阈值高而难以激发等问题。由于在注入种子气体时,有目的地选择较易于电离的气体,故不需要很高的激光束功率密度即可击穿推进剂。所以入射激光束可以大范围辐照吸收室,均匀加热流动的混合物推进剂,如图 1-4 所示。此时,虽然推进剂峰值温度很低 (4000K ~ 6000K),但是均匀加热使喷管出口处温度与吸收室的等离子体温度差别甚微,而且也不存在喷管喉部冷/热气流的混合问题,同时可以很好地解决激光点火问题。

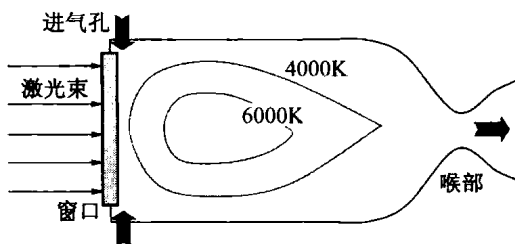


图 1-4 分子共振吸收式推力器中的温度场分布

分子共振吸收推进,有上述性能改进的地方,但还存在一些问题:

(1) 分子共振吸收推力器的能量损失预计要高出 10 倍,因为这种装置没有隔离气体;

(2) 分子共振吸收推力器未采用纯氢,而混合气体的分子量大,相同的吸收室温度下比冲要低 20%;

(3) 分子共振吸收推力器的热损失斜率为正,即当入射激光束能量增加时热损失也增加;

(4) 注入的种子分子气体,需要选择合适的峰值温度以防止种子分子的离解。

上述这些问题都将导致分子共振吸收推进的能量转化效率大幅度下降。

2. 激光推进技术的特点

激光推进技术的特点主要体现在两个分离上:

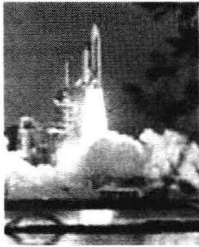
(1) 飞行器与能源的分离。飞行器不必携带庞大笨重的能源系统,可以极大地简化飞行器结构和控制系统,缩短发射前检测周期,有利于应急发射。

(2) 能源与工质的分离。可以选用安全的工质,不必像现在的化学火箭推进必须携带易燃易爆、甚至有毒的推进剂(如偏二甲肼、硝酸等)。分子量小的“轻型”工质比冲较高,这类工质既安全又环保。安全环保的工质可以提前加注,缩短发射前的准备周期,提高激光推进的机动灵活性,可以直接提高系统的安全可靠性。同时,比冲大的推进系统完成同一航天任务需要携带较少的工质,减小飞行器的起飞质量,使得有效载荷占起飞质量的比例大,有效载荷比增大使得整个系统的发射成本降低。

激光推进由于两个分离,带来了推进技术的革命,其主要特点是:比冲大、成本低;机动性好、可靠性高;远距离传输能量,在轨机动能力强;发射周期短、批量发射能力强。美国学者 Kantrowitz 关于激光推进的 4P 原则(It leaves everything on the ground except “Payload, Propellant, and Photons... Period!”)是对激光推进特点的高度概括。

激光推进与传统的化学火箭推进技术在各个方面的比较见表 1-1。

表 1-1 激光推进与化学火箭推进技术的比较

	化 学 火 箭	激光推进光船
发射过程典型照片		
发射近地轨道卫星的总成本/美元	175000000	46000
性能比较	自身携带大量推进剂 不可重复使用 耗资巨大 由于自带燃料易于爆炸	推进能源位于地面 可重复使用 光船成本低、质量极轻 无须承担飞行风险
具体发射任务的成本比较(注:近地轨道卫星发射成本 = 推进成本 + 卫星成本)/美元	Atlas/Delta = 5000 万 ~ 9000 万 + 12500 万 (大型卫星: 大于 1000kg) Pegasus = 1800 万 + 2000 万 (小型卫星: 100kg ~ 500kg)	光船技术 = 24000 + 22000 (纳型卫星: 1kg ~ 10kg) (微型卫星: 10kg ~ 100kg)

1.1.2 物理力学过程

1. 激光能量传输过程

激光能量在大气中的传输是随着激光技术研究发展起来的一门新学科,也是激光推进中的重要物理过程。它主要研究激光束在大气传输过程中,与大气相互作用所产生的一系列效应,以及这些效应对激光的影响。在高功率激光的某些应用中,大气的影晌可能是相当严重的。例如激光束的功率即使提高到尽可能获得的最高水平也无法顺利地通过云雾,即使晴朗天气也会由于大气衰减而损失可观的能量,由于湍流扰动而导致光束质量大大降低。在激光功率高到一定程度后还会出现若干非线性现象,使光束很快发散,或使能量更难传送。因此详细了解大气传输的规律,对于激光推进的研究来说具有重大意义。

激光束与大气相互作用所产生的效率可以分为两大类:线性效应与非线性效应。线性效应主要包括气体分子对激光能量的吸收(吸收机制)、大气密度的分布不均匀导致激光光束的折射(折射机制)、在大气中的气体分子和大气气溶

胶粒子(液态、固态)的散射导致的辐射能量损失(散射机制)以及大气湍流效应导致光束横截面上能量分布起伏、光束的扩展和漂移(大气湍流机制)等。这几类效应都使激光束的性能单方面地变化,大气本身并不因受光束作用而发生改变,激光束性能变化只与大气状况有关。因此称这种效应为线性效应。但当激光功率很高时,大气中的分子和气溶胶粒子自身的性质也会产生变化。性质变化后的大气反过来又影响激光束,使激光束的性能变化加剧,这种由于大气和高功率激光相互作用影响而产生的效应,称为非线性效应。非线性效应内容十分广泛。只要激光辐射的功率密度足够强,几乎所有的光学非线性效应都可能产生,然而就影响强激光大气传输而言,目前一般认为主要有大气气体光学击穿效应;大气非线性热畸变效应(热晕);受激拉曼散射。

非线性效应是高功率激光传输所独有的,但实际上也是某些线性效应在一定功率或能量水平的延伸和发展。例如有了大气分子和气溶胶的吸收,才可能发展成热晕。正是由于线性效应和非线性效应都存在于高功率激光大气传输过程中,高功率激光大气传输问题还增加了在这种情况下所产生的综合效应,它使得激光束的传输过程更加复杂。

第2章对线性效应和非线性效应的主要方面作了详细介绍,其中着重概念的阐述,也讨论了激光推进中所涉及的具体现象,以使读者对本学科分支有一个较为全面的认识。

2. 激光与物质相互作用过程

激光与物质相互作用大体上可以分为3个层次:

(1) 当激光束照射到物质上或者在物质中传播时,在物质的特性和状态还没有明显改变之前,物质对于激光的反射、折射和吸收特性;

(2) 当激光束在物质中有明显的能量沉积之后,将使物质的特性和状态发生变化,例如微观上电子或者空穴的激发、跃迁、分子离解和原子电离等;宏观上的升温、膨胀、熔融、汽化、飞散、击穿和破坏等,这里主要研究激光对物质的效应;

(3) 在很强的激光束作用下,物质特性和状态的变化将使传播中的激光束发生变化,例如激光聚焦、散焦、屏蔽、激光强度和光束质量的改变等。

由于在激光推进中,激光的功率密度相对来说很高,重点是研究工质在激光的作用下如何能够更有效地将激光能量转化为推力器的动能,因此主要关注的是第二层次,也即激光对物质的效应。

激光与空气相互作用是光学、原子分子物理、流体力学、等离子体物理等多学科交叉的领域。在吸气式脉冲激光推进过程中,当一束强激光通过聚焦装置聚焦到焦点后,达到空气的击穿阈值便会产生光学击穿,从而形成等离子体,伴随着激光维持的吸收波,吸收波可能是爆轰波也可能是燃烧波。在这个极短的

瞬间存在许多物理/力学问题,包括光学击穿及击穿阈值的计算、激光等离子体的形成及传播、等离子体对激光能量吸收及不透明作用、激光维持的吸收波的形成及传播、分子离解和原子电离作用对吸收波的影响以及高温气体热力学过程等。只有把这一系列问题都较好地描述清楚并加以解决,才能更好地研究吸气式脉冲激光推进机理。本书在第2章中着重说明了空气对激光能量的吸收作用,第3章较为详细地描述了激光与空气相互作用的力学效应,第4章对高温空气热力学参数和过程进行了说明。

3. 激光能量沉积过程和推力形成过程

经过激光能量传输及激光与物质的一系列相互作用过程后,激光能量以一定效率沉积下来并被空气吸收,使其升温升压,这个过程可以用辐射流体动力学过程来描述。首先根据辐射输运方程以及高温条件下空气对激光的逆韧致吸收系数求解得到空气中沉积的激光能量,将该沉积能量作为流体动力学方程组中能量方程的源项,同时考虑高温气体向外辐射的能量损失。这一过程即为脉冲激光推进的辐射流体动力学过程。气体对激光的吸收机制及吸收系数计算见第2章最后一节相关内容,针对辐射流体动力学过程的详细描述见第4章,能量沉积机理说明见第5.2节。

激光能量沉积过程随着脉冲激光能量的注入中止而结束,随后便是激光维持的吸收波演化而成的激波在流场中的传播过程及激波与推力器固壁发生流固耦合从而产生推力的过程,也即推力形成过程。在这个过程中,涉及到激波及激波的相互作用、流固耦合作用、各种因素对推进性能的影响,这种影响可以用理论推导、数值模拟和实验研究的方法来进行研究。第5章对各种作用以及研究方法都进行了详细描述,揭示了推力形成机理。

1.1.3 激光推进的推进性能参数

衡量推进性能的主要参数有推力、冲量、冲量耦合系数、比冲和能量转化效率等。

(1) 入射激光能量(Incident Laser Energy)指的是从激光器发出的激光能量,记作 E_{in} ,单位是J。

(2) 推力(Thrust)是指高温高压的工质高速排出喷管产生的推动飞行器运动的反作用力,记作 F ,单位是N。

(3) 冲量(Impulse)定义为发动机工作时间内推力对作用时间的积分,记作 I ,单位是 $N \cdot s$ 。冲量是表征发动机工作能力的指标。

(4) 流量(Flux)定义为单位时间内流过喷管端面的流体量。可以用体积、质量表示,其相应的流量分别称为体积流量、质量流量。一般使用体积流量,记

作 q_v , 单位是 m^3/s 。

(5) 激光烧蚀气体量 (Laser Ablated Gas Amount) 定义为单位时间内激光烧蚀的气体体积量, 记作 q_{va} , 单位是 m^3/s 。

(6) 比冲 (Specific Impulse) 是消耗单位质量工质所产生的冲量, 单位是 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{kg}$; 除以重力加速度 g 之后, 记作 I_{sp} , 单位是 s 。激光推进的突出优点之一是推力器内部最高温度不由燃烧释放的化学能决定, 可超过 10^4K , 这意味着激光推进很容易获得 $1000\text{s} \sim 2000\text{s}$ 之间的高比冲。

(7) 冲量耦合系数 (Impulse Coupling Coefficient) 是激光推进区别于其他航天推进的特有参数, 定义为推力器在激光作用下获得的冲量与入射激光能量的比值, 记作 C_m , 单位是 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{J}$, 有时也使用 N/MW 。冲量耦合系数反映了激光能量转化为推力器冲量的能力, 可用于估算发射一定质量的有效载荷所需的激光能量, 进而估算所需的推进系统各项性能指标和整个发射成本等, 对激光推进的研究具有重要作用。

(8) 能量转化效率 (Efficiency) 在激光推进中定义为喷气动能与激光能量的比值, 记作 η , 为一个无量纲参数。实际上, 入射的激光能量转化成喷气动能要经历复杂过程: 入射激光聚焦后产生等离子体, 激光能量向等离子体内能的转化率为激光能量沉积率, 记作 η_{de} ; 等离子体极速膨胀, 形成爆轰波, 爆轰波在传播过程中转化为激波, 与喷管壁面发生流固耦合, 形成推力对推力器做功, 推力器动能增加, 等离子体内能向喷气动能的转化率记作 η_{jet} 。能量转化效率是一个过程量, 有 $\eta = \eta_{de} \eta_{jet}$ 。

在激光推进应用基础研究阶段, 谈到推进性能时一般指的是冲量耦合系数、比冲和激光能量转化效率。冲量耦合系数描述激光能量耦合出推力器冲量的能力, 或激光功率产生推力器推力的能力; 比冲描述推进剂产生冲量的能力, 或推进剂流量产生推力的能力; 激光能量转化效率描述激光能量转化为喷射气体动能的能力。

1.2 国内外研究现状

作为一种新概念航天推进概念, 激光推进技术在概念、机理和方法等方面还存在着大量的基础性探索研究工作要做。这是一项充满生机和挑战的新技术。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, 美国、俄罗斯、日本和德国等发达国家始终对这项研究表现出浓厚的兴趣。

随着研究工作的逐步深入, 美国、俄罗斯、日本和德国等发达国家在脉冲激光推力器方面做了大量卓有成效的工作。美国的光船、热交换器, 俄罗斯的航天