

## 外腔振荡式激光光子推进的推力放大特性仿真研究

黄 钦, 叶继飞, 金 星

(装备学院 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

**摘 要:** 激光光子推进是利用激光产生的连续光子流在两面高反镜构成的振荡腔内往复振荡, 通过光子与推力器多次动量交换循环利用光子流能量完成推力放大的一种全新的推进概念。文中分析了 Gray 和 Edwards 等人对于外腔振荡技术已进行的实验研究和结果; 阐述了推力产生机理并推导了推力计算方程; 建立了推力器模型; 最后, 利用 COMSOL 有限元分析软件对振荡腔内的光子流进行准确追迹, 研究振荡腔构型参数(腔镜距离、曲率、直径、相对偏转角、孔径位置)对推力放大特性的影响并进行了分析总结, 对未来搭建实验平台提供了设计依据与理论指导。仿真结果表明: 1 000 W 激光在反射率 0.999 的高反镜构成的振荡腔内进行激光振荡最高可以实现功率放大 61 倍, 产生 409  $\mu\text{N}$  的微推力, 满足空间任务的实际需求。

**关键词:** 激光光子推进; 推力放大; COMSOL; 微推力

**中图分类号:** V430 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.S106007

## Thrust amplification simulation of photonic laser propulsion based on oscillation in external cavity

Huang Qin, Ye Jifei, Jin Xing

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Equipment Academy, Beijing 101416, China)

**Abstract:** The photonic laser propulsion is a new propulsion concept, which uses the thrust amplification generated by multiple momentum exchange and photon energy recycling through photon oscillation in external cavity composed of two HR mirrors. The experimental study and results related to photonic laser propulsion based on oscillation in external cavity of Gray and Edwards were analyzed. The principle of thrust amplification was introduced; the thrust calculated equations were deduced; the thruster simulation model was built. Finally, COMSOL was used to study and analyze the oscillation cavity's parameters' (cavity mirrors' distance, curvature radius, diameter, relative angle and aperture position) impact on thrust amplification by ray trace method, providing the establishment of future experiments with design basis and theory guidance. The simulation results indicate that in condition of 1 000 W and reflectivity 0.999, the maximum amplification factor 61 and maximum photon thrust 409  $\mu\text{N}$  can be realized, satisfying the needs of space missions.

**Key words:** photonic laser propulsion; thrust amplification; COMSOL; micro thrust

收稿日期: 2017-06-05; 修订日期: 2017-07-14

作者简介: 黄钦(1993-), 男, 硕士生, 主要从事激光航天应用方面的研究。Email: 1375979642@qq.com

导师简介: 金星(1962-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光与物质相互作用、激光航天应用方面的研究。Email: jinxing@163.com

## 0 引言

随着国内外小卫星技术的飞速发展,其性能不断提升,功能不断拓展<sup>[1]</sup>,在有限的星上资源条件下尽可能的提高整星的使用寿命,是微小卫星技术发展的重要难题,其中推进系统已成为制约小卫星在轨寿命和有效载荷的关键因素<sup>[2]</sup>。激光光子推进技术由于具有理论比冲无限高、结构简单、寿命长等优点,适用于微、小卫星的空间任务。

激光光子推进是一种依靠激光产生的连续光子流在两面高反镜间形成的振荡腔内往复振荡,通过形成多次辐照循环利用光子流的能量完成推力的放大的新型推进概念<sup>[3-4]</sup>,这种推进模式的推力来源于光子流与辐照面的动量交换<sup>[5-6]</sup>,依据激光工作介质是否在振荡腔内,分为外腔振荡式与内腔振荡式推进技术<sup>[7]</sup>。目前国内尚未对相关工作开展研究。国际方面,美国马歇尔太空飞行中心的 Gary 和 Edwards 等人对于外腔振荡式激光光子推进开展了实验研究<sup>[8-9]</sup>,在激光功率 28.45 W 的条件下,推力测量结果为 0.428 μN<sup>[10]</sup>。美国图斯汀学院的 Young Bae 研究小组对于内腔振荡式激光光子推进进行了实验研究<sup>[11]</sup>,使用圆柱工作介质进行侧面泵浦的实验方法取得了 35 μN 的推力测量结果<sup>[12]</sup>;为了克服圆柱工作介质过热限制功率的问题<sup>[13]</sup>,改进使用薄片工作介质<sup>[14]</sup>进行端面泵浦的实验方法取得了 1.1 mN 的推力测量结果<sup>[15]</sup>。对比外腔振荡式与内腔振荡式激光光子推进的已有实验结论,推力结果差距较大;但是通过分析 Gray 和 Edwards 等人的实验可知,存在以下制约实验结果的因素<sup>[9]</sup>:(1) 构建振荡腔的腔镜反射率较低,反射损耗较大;(2) 腔镜的损伤阈值较低,导致实验过程中发生了腔镜表明烧蚀的情况;(3) 激光多次振荡可能从入射孔径逸出,为防止或延缓振荡腔失稳,所以振荡腔构型对于推力放大具有重要意义;以上因素导致了推力放大结果远低于 Gary 等人的理论估计值。腔镜的反射率与损伤阈值取决于光机产品的工业发展水平,故实际操作中影响推力放大能力的决定性因素是搭建的振荡腔构型。

为了研究振荡腔构型对外腔振荡式激光光子推进的推力放大特性的影响。文中推导了激光光子推进的推力计算方程;利用 COMSOL 软件建立了外腔振荡式激光光子推力器仿真模型;设置了仿真分析

边界条件、绘制网格,定量研究了腔镜的距离、曲率、直径、相对偏转角和入射孔径位置等结构参数对放大特性的影响,获得了相关规律和几组典型工况,为将来搭建实验平台提供了设计和优化的理论指导。

## 1 推力产生机理与推力计算公式

根据爱因斯坦的光量子理论,光是由一群无静止质量但有动量的光子构成。当光束投射到靶面,发生动量交换产生作用力,根据牛顿力学第三定律,靶面受到反作用力,光束的压力是大量反作用力的叠加。则垂直于靶面的方向上,激光入射、反射前后的动量增量为:

$$\Delta P = \frac{(1+R)I}{c} \cos \theta \quad (1)$$

式中: $c$  为光在真空中的传播速度; $I$  为入射激光的光强; $R$  为靶面反射率; $\theta$  为激光入射角。

力和动量是矢量,作用力的方向与动量方向相同,根据牛顿运动学第二定律,作用在物体上的力等于单位时间的动量变化:

$$F = \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{(1+R)W}{c} \cos \theta \quad (2)$$

由公式(2)估算,1 000 W 激光单次辐照产生的最大光压推力为 6.7 μN,没有实际应用价值。

外腔振荡原理:如图 1 所示,外腔振荡式激光光子推进中,激光器产生的光子流在两个高反镜之间多次反射形成与推力器的多次动量交换、循环利用光子能量形成推力放大。推力器采用分离式系统,推力器是可运动平台,激光器所处的资源平台是固定的天基平台,激光在两个高反镜上产生的光压推力大小相同、方向相反。理论上,激光辐照次数即光子振荡次数可以无限大,即永远辐照下去。但是由于激光在高反镜之间往返振荡中存在吸收、反射、透射等各种损耗,激光能量很快衰减;衰减速度与激光振荡过程中的损耗率有关。

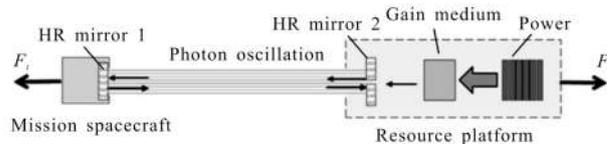


图 1 外腔振荡式激光光子推进原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of photonic laser propulsion based on oscillation in external cavity

真空环境中,激光在自由空间传输的损耗较小,忽略不计,只考虑镜面反射不完全引起的反射损耗,并假设两个高反镜的反射损失一样,并且忽略激光入射角对推力计算的影响。此时对于激光光子推力器上的高反镜而言,相邻两次激光辐照功率关系为:

$$W_{\text{After}}=R^2W_{\text{Before}} \quad (3)$$

通过高反镜之间的激光振荡,极大地增加了激光辐照次数,其等效作用是增大了推力器上的激光辐照功率。此时,推力器上的多次辐照等效激光功率为:

$$W_{\text{Eq}}=W(1+R^2+R^4+\dots+R^{2n})=W_0 \frac{1-R^{2n}}{1-R^2} \quad (4)$$

$$M=\frac{W_{\text{Eq}}}{W_0}=\frac{1-R^{2n}}{1-R^2} \quad (5)$$

式中: $n$ 为激光在高反镜构成的腔体内往复振荡的次数; $W_0$ 和 $W_{\text{Eq}}$ 分别为激光器发射的激光功率和多次辐照等效激光功率; $M$ 为多次辐照的激光放大倍率,只与高反镜的反射率和振荡次数率有关。因为光压推力与辐照的激光功率成正比,所以光压推力的放大倍率等于激光放大倍率。而且光压推力、冲量耦合系数、比冲和能量转换率等推进性能参数都是与激光辐照功率成正比。所以光压推力、冲量耦合系数、比冲等推进性能参数计算公式为:

$$F_t=\frac{M(1+R)W_0}{c} \quad (6)$$

冲量耦合系数 $C_m$ 是指单位激光能量产生的冲量,即推力与激光器发射功率的比值,单位是 $\text{N}\cdot\text{s}/\text{J}$ ,冲量耦合系数反映了激光能量转化为推力器冲量的能力:

$$C_m=\frac{P}{I_0}=\frac{F_t}{W_0}=\frac{M(1+R)}{c} \quad (7)$$

式中: $F_t$ 为光压推力; $W_0$ 为激光器发射功率; $C_m$ 为冲量耦合系数。

比冲 $I_{\text{sp}}$ 的含义是指消耗单位质量工质所产生的冲量,即推力与消耗的工质的质量流量的比值,单位是 $\text{N}\cdot\text{s}/\text{kg}$ ,另一种表示是消耗单位重量的工质所产生的冲量,单位是 $\text{s}$ ,比冲反应了工质产生冲量的能力:

$$I_{\text{sp}}=\frac{P}{m_L g}=\frac{F_t}{m_L g}=\frac{Mc(1+R)}{g} \quad (8)$$

式中: $m_L$ 和 $\dot{m}_L$ 分别为光子质量和光子质量流量; $I_{\text{sp}}$ 为比冲。激光光子推进中,光子作为非传统意义上的“工质”,计算比冲过程中其产生的推力是多次动量

交换后耦合的结果,故理论上计算得到的比冲数据远大于光速。

假设当振荡次数 $n$ 趋向于无穷大,激光器输出功率为 $1\,000\text{ W}$ 时,通过外腔振荡形成多次激光辐照产生光压推力及相关性能参数计算如表 1 所示。

表 1 外腔振荡推进性能

Tab.1 Related propulsion characteristic index oscillating with external cavity

| $R$     | $M$   | $F_t/\mu\text{N}$ | $C_m/\text{Ns}\cdot\text{J}^{-1}$ | $I_{\text{sp}}/\text{s}$ |
|---------|-------|-------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| 0.9     | 5     | 32                | $3.2\times 10^{-8}$               | $2.9\times 10^9$         |
| 0.99    | 50    | 330               | $3.3\times 10^{-7}$               | $3.0\times 10^{10}$      |
| 0.999   | 500   | 3 400             | $3.4\times 10^{-6}$               | $3.0\times 10^{11}$      |
| 0.999 9 | 5 000 | 34 000            | $3.4\times 10^{-5}$               | $3.0\times 10^{12}$      |

## 2 仿真模型

利用COMSOL 有限元分析软件建立了外腔振荡式激光光子推进仿真模型。如图 2 所示,模型由激光光源、两面高反镜组成的光学腔和矩形控制域组成,光学腔为两个同轴的高反射凹面镜组合而成,其中靠近光源的一面凹面镜边缘预留了容许激光入射

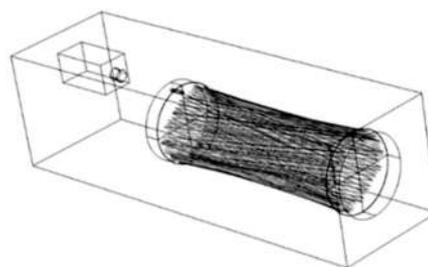


图 2 仿真模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of simulation model structure

的微小孔径。文中建立的模型可以对射线轨迹进行仿真追迹。基于现有假设,在忽略自由空间传输的损耗,只考虑由反射镜引发的反射及透射损耗,默认激光器入射功率 $W$ 一定并且入射激光与轴线在同一平面保持平行的条件下,推进性能主要由组成腔体的高反镜反射率 $R$ 和激光在腔体内往复振荡的次数 $n$ 共同决定。反射率 $R$ 的取值与材料和工艺水平直接相关,目前的技术可以达到 $0.999\,99$ 的超高反射率;由于入射孔径的存在,光子在腔内振荡一段时间

后易从孔径或者振荡腔边缘逸出,故有效扩大振荡次数  $n$  对放大推力起到了重要的作用。振荡次数  $n$  则取决于外置振荡腔的构型,采用控制变量法逐一研究振荡腔结构参数对推进性能的影响研究内容包括构成腔体的反射镜的距离、曲率、直径、相对偏转角、入射孔径位置等结构参数。

仿真选取的凹面镜参数来源于美国 THORLABS 公司官网如表 2 所示。

表 2 凹面镜参数表

Tab.2 Concave mirror parameters

| $F/mm$           | $T_c/mm$ | $T_e/mm$ | $R_c$ |
|------------------|----------|----------|-------|
| Diameter 50.8 mm |          |          |       |
| 50               | 9        | 12.2     | 100   |
| 100              | 9        | 10.6     | 200   |
| 150              | 9        | 10.1     | 300   |
| 200              | 9        | 9.8      | 400   |
| Diameter 75 mm   |          |          |       |
| 150              | 12       | 14.3     | 300   |
| 200              | 12       | 13.7     | 400   |

表 2 中,  $F$  为凹面镜焦距,  $T_c$  和  $T_e$  分别为凹面镜的中心和边缘厚度,  $R_c$  为曲率半径。

### 3 仿真结果和分析

#### 3.1 仿真分析边界条件

仿真分析的边界条件如表 3 所示。

表 3 边界条件汇总表

Tab.3 Boundary parameters

| Material input   | Geometrical optics input                | Grid input                  | Research input           |
|------------------|---|-----------------------------|--------------------------|
| Laser surface:Al | Laser power:<br>1 000 W                 | Size:tessellate             | Step:0.01 ns             |
| Reflector:N-BK7  | Distribution<br>function:uniform        | Sequence:<br>physical field | Time:500 ns              |
| Environment:Air  | Number:1                                |                             | Stop:no<br>activated ray |
|                  | Mean frequency:<br>4.54e14 Hz           |                             |                          |
|                  | Standard deviation:<br>1e14 Hz          |                             |                          |
|                  | Reflector walls:<br>specular reflection |                             |                          |
|                  | Other walls:frozen                      |                             |                          |

#### 3.2 腔镜距离对推进性能的影响

为研究腔镜距离对推力性能的影响,在控制腔镜各项参数不变的条件下,选用曲率为 400 mm;取 10 mm 为取样间隔,两面腔镜距离初值为 40 mm,终值为 600 mm;对激光在振荡腔内的推力放大特性进行了仿真分析,结果如图 3 所示。

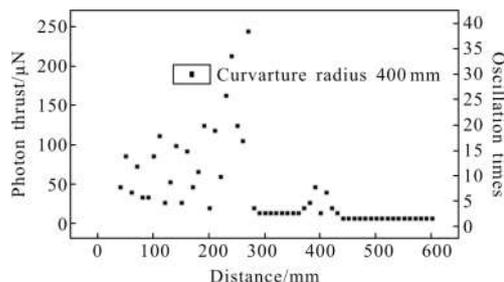


图 3 光压推力-腔镜距离关系图(曲率 400 mm)

Fig.3 Photon thrust varied with distance (400 mm)

通过仿真结果可知,振荡次数与光压推力随腔镜距离变化而变化,当距离为 270 mm 时取得最大振荡次数 38 次和光压推力 248  $\mu\text{N}$ ;根据对光子轨迹的绘制,当距离小于 300 mm 即 1.5 倍焦距时,失去振荡的主要原因是光子从孔径逸出,当距离大于等于 300 mm 时,失去振荡的主要原因是光子从振荡腔边缘逸出;当距离大于 400 mm 即大于腔镜曲率半径或两倍焦距时,光压推力将逐渐减小直至失去振荡不产生放大恒为 6.7  $\mu\text{N}$ ,分析表明腔镜的曲率半径或 2 倍焦距是产生推力放大的设计阈值上限。

#### 3.3 腔镜曲率对推进性能的影响

为研究腔镜曲率对推力性能的影响,在控制腔镜其余各项参数不变的条件下,分别选用曲率为 100、200、300、400 mm 的凹面镜组成振荡腔;取 10 mm 为取样间隔,两面腔镜距离初值为 40 mm,终值为 500 mm;对激光在振荡腔内的推力放大特性进行了仿真分析,结果如图 4 所示。

通过仿真结果可知,符合 3.2 节的结论当距离大于曲率半径时振荡次数将逐渐减小直至失去振荡,腔镜的曲率半径对应振荡腔振荡工作区。曲率半径 100 mm、焦距 50 mm 工况下,在距离 70 mm 处取得最大推力 194  $\mu\text{N}$ ,振荡次数 30;曲率半径 200 mm、焦距 100 mm 工况下,在距离 130 mm 处取得最大推力 106  $\mu\text{N}$ ,振荡次数 16;曲率半径 300 mm、焦距 150 mm 工况下,在距离 200 mm 处取得最大推力 170  $\mu\text{N}$ ,振

荡次数 25;曲率半径 400 mm、焦距 200 mm 工况下,在距离 270 mm 处取得最大推力 248  $\mu\text{N}$ , 振荡次数 38;分析表明最大推力对应的距离数值介于腔镜的焦距与 1.5 倍焦距之间。

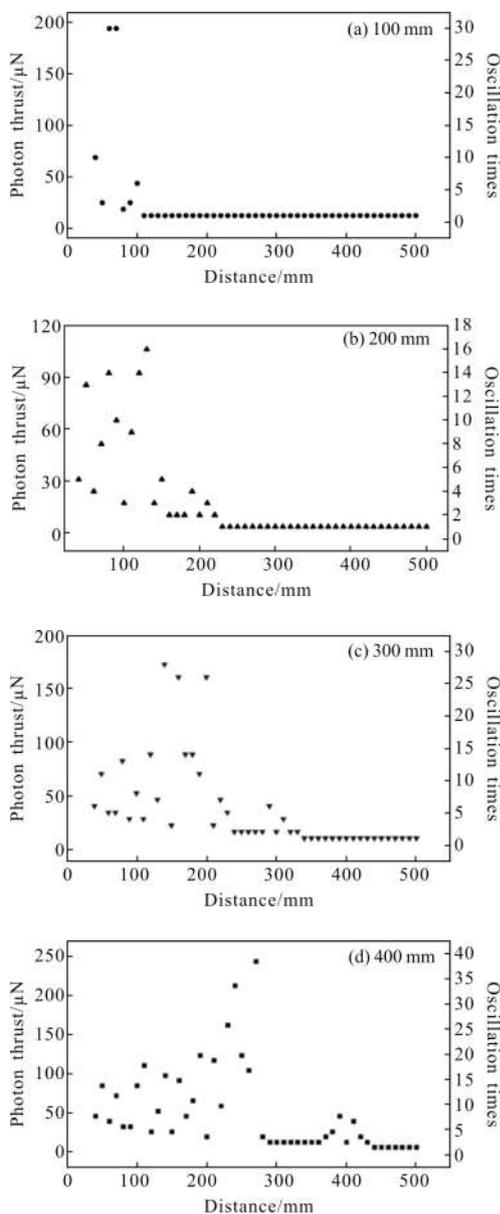


图 4 光压推力-腔镜曲率关系图

Fig.4 Photon thrust under the circumstance of 100, 200, 300 and 400 mm

### 3.4 腔镜直径对推进性能的影响

为研究腔镜直径对推力性能的影响,在控制腔镜其余各项参数不变的条件下,选用曲率同为 400 mm,直径分别为 50.8 mm 和 75 mm 的凹面镜组成的振荡腔;取 10 mm 为取样间隔,两面腔镜距离初值为 40 mm,

终值为 500 mm;对激光在振荡腔内的推力放大特性进行了仿真分析,结果如图 5 所示。

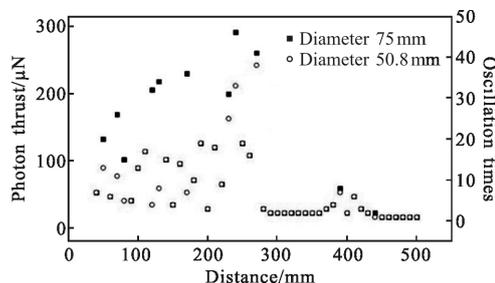


图 5 光压推力-腔镜直径关系图(曲率 400 mm)

Fig.5 Photon thrust varied with diameter (400 mm)

通过仿真结果可知,腔镜曲率半径 400 mm,直径 75 mm 工况下,在距离 240 mm 处取得最大推力 295  $\mu\text{N}$ ,振荡次数 46;腔镜曲率半径 400 mm,直径 50.8 mm 工况下,在距离 270 mm 处取得最大推力 248  $\mu\text{N}$ ,振荡次数 38;基于现有取样间隔、相同距离下,直径 75 mm 条件下的光压推力恒大于或等于直径 50 mm 的;分析表明增大直径对光压推力放大有促进作用,距离小于 1.5 倍焦距的条件下,减小了光子从孔径逸出的几率,对距离大于 1.5 倍焦距的情况,对光子从振荡腔外缘逸出或是失去振荡没有影响。

### 3.5 腔镜相对偏转角对推进性能的影响

为研究腔镜相对偏转角对推力性能的影响,在控制腔镜各项参数不变的条件下,选用曲率 400 mm,分别选用相对倾斜角度为  $1^\circ$  的凹面镜组成的振荡腔与无偏转角的振荡腔;取 10 mm 为取样间隔,两面腔镜距离初值为 40 mm,终值为 500 mm;对激光在振荡腔内的推力放大特性进行了仿真分析,结果如图 6 所示。

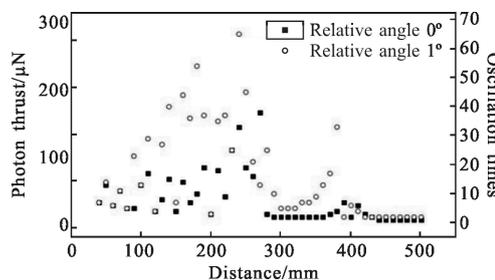


图 6 光压推力-腔镜相对偏转角关系图(曲率 400 mm)

Fig.6 Photon thrust varied with relative angle (400 mm)

通过仿真结果可知,腔镜曲率半径 400 mm,相对偏转角  $1^\circ$  工况下,在距离 240 mm 处取得最大推力 409  $\mu\text{N}$ ,振荡次数 65;腔镜曲率半径 400 mm,无相对

偏转角工况下, 在距离 270 mm 处取得最大推力 248  $\mu\text{N}$ , 振荡次数 38; 当距离大于 400 mm 即两倍焦距时, 有偏转角情况下光压推力将逐步减小但是恒为 13.4  $\mu\text{N}$ , 保持一次振荡; 基于现有取样间隔, 除 270 mm 相同距离下, 有偏转角条件下的光压推力恒大于等于无偏转角的; 分析表明微小的偏转角对推力放大促进作用。

### 3.6 腔镜孔径位置对推进性能的影响

为研究腔镜孔径位置对推力性能的影响, 在控制腔镜其余各项参数不变的条件下, 选用曲率 400 mm, 分别选用中心入射孔径的振荡腔与边缘入射孔径的振荡腔; 由于光的反射定律为避免中心入射光子的垂直反射直接从孔径逸出, 统一将腔镜的相对偏转角调整为  $1^\circ$ ; 取 10 mm 为取样间隔, 两面腔镜距离初值为 40 mm, 终值为 500 mm; 对激光在振荡腔内的推力放大特性进行了仿真分析, 结果如图 7 所示。

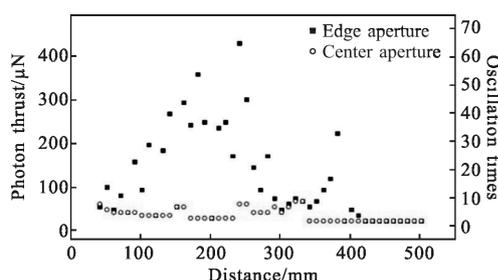


图 7 光压推力-腔镜孔径位置关系图(曲率 400 mm)  
Fig.7 Photon thrust varied with aperture position (400 mm)

通过仿真结果可知, 腔镜曲率半径 400 mm, 存在偏转角, 边缘孔径入射工况下, 在距离 240 mm 处取得最大推力 433  $\mu\text{N}$ , 振荡次数 65; 腔镜曲率半径 400 mm, 中心孔径入射工况下, 在距离 320 mm 和 330 mm 处取得最大推力 60  $\mu\text{N}$ , 振荡次数 9; 基于现有取样间隔、相同距离下, 边缘入射条件下的光压推力恒大于或等于中心入射的; 分析表明边缘孔径方案优于中心孔径方案。

### 3.7 获得的典型工况(激光功率 1 000 W, 反射率 0.999, 曲率半径 400 mm)

归纳总结 3.2~3.6 小节的仿真结果, 列举出不同振荡腔构型下的典型工况如表 4 所示, 通过对比可以较为直观地认识到腔镜直径、腔镜相对偏转角和边缘入射孔径对于增大推力的积极作用。

表 4 典型工况

Tab.4 Typical operation condition

| Operation condition   | $M$ | $F_t/\mu\text{N}$ |
|---|-----|-------------------|
| Diameter 50 mm; Relative angle $0^\circ$ ;<br>Edge aperture   | 37  | 248               |
| Diameter 75 mm; Relative angle $0^\circ$ ;<br>Edge aperture   | 44  | 295               |
| Diameter 50 mm; Relative angle $1^\circ$ ;<br>Edge aperture   | 61  | 409               |
| Diameter 50 mm; Relative angle $1^\circ$ ;<br>Center aperture | 9   | 60                |

## 4 结论

文中建立外腔振荡式激光光子推力器模型, 采用 COMSOL 有限元分析软件对激光在腔内的振荡次数和推力放大进行了仿真计算, 定量研究了振荡腔参数(腔镜距离、曲率、直径、相对偏转角、入射孔径位置)对推力放大特性的影响规律, 对相关研究工作总结归纳如下:

(1) 影响外腔振荡式激光光子推进的主要因素为激光功率, 腔镜反射率和振荡腔的构型; 高功率连续激光器和高反射率、高损伤阈值的反射镜是激光光子推进的优选组合; 进一步优化振荡腔构型是提高激光振荡次数和推力放大性能的主要手段。

(2) 腔镜的曲率半径是产生推力放大的振荡腔长度的设计阈值上限, 超过这个阈值将不产生振荡, 推力不再放大; 光压推力和振荡次数的最大值对应的振荡腔长度介于腔镜 1 倍焦距与 1.5 倍焦距之间。

(3) 提高推力放大性能的方法有多种, 如扩大腔镜的直径、令两面腔镜间存在相对偏转角以及选取合适的腔镜距离。

(4) 仿真确定的最佳工况是腔镜直径 50 mm, 相对偏转角  $1^\circ$ , 振荡腔长度 240 mm, 曲率半径 400 mm 和边缘孔径入射的组合, 在此振荡腔构型下, 1 000 W 激光水平注入腔镜反射率为 0.999 的振荡腔内, 获得了功率放大倍率 61, 光压推力 409  $\mu\text{N}$  的仿真结果。

### 参考文献:

[1] Li Ming. Perspective on development of micro-small satellites [J]. *Spacecraft Engineering*, 2016, 25(6): 1-5. (in Chinese)  
李明. 微小卫星发展的若干思考[J]. 航天器工程, 2016, 25

- (6): 1-5.
- [2] Cervone A, Zandbergen B, Bouwmester J, et al. Micro-propulsion research; challenges towards future nano-satellite projects[J]. *Society for Aerospace Engineering Students Vsv Leonardo Da Vinci*, 2013, 17(1): 11-11.
- [3] Ye Jifei, Hong Yanji, Li Nanlei. Impulse coupling performance of liquid propellant with ns laser micro ablation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 102-106. (in Chinese)  
叶继飞, 洪延姬, 李南雷. 纳秒激光烧蚀液态工质冲量耦合特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(1): 102-106.
- [4] Meyer T R, Pryor W R, Mckay C P, et al. Laser elevator: momentum transfer using an optical resonator[J]. *Journal of Spacecraft & Rockets*, 2002, 39(2): 258-266.
- [5] Forward R L. Roundtrip interstellar travel using laser-pushed lightsails [J]. *Journal of Spacecraft & Rockets*, 2012, 313(21): 187-195.
- [6] Zhou Pu, Hou Jing, Liu Zejin, et al. Photon propulsion and its feasibility analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 805-808. (in Chinese)  
周朴, 侯静, 刘泽金, 等. 光子推进及其可行性分析[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 805-808.
- [7] Bae Y. Photonic laser propulsion (PLP): photon propulsion using an active resonant optical cavity[C]//AIAA Space 2007 Conference & Exposition, 2007, 6131-818.
- [8] Gray P A, Edwards D L, Carruth, et al. Enhancements in photon pressure measurements using a solar simulator [C]//AIAA Conference Reno Nevada, 2001: 2001-1136.
- [9] Gray P, Edwards D, Carruth M. Laser photon force measurements using a CW laser [C]//AIAA 33rd Plasmadynamics and Laser Conference, 2002: 2002-2178.
- [10] Gray P A, Carruth, Ralph M, et al. Photon flux amplification for enhancing photonic laser propulsive forces [C]//AIAA 33rd Plasmadynamics and Lasers Conference, 2002: 2002-2177.
- [11] Bae Y K. Photonic laser thruster(PLT): experimental prototype development and demonstration [C]//AIAA Space 2007 Conference Proceeding, 2007: 6156-318.
- [12] Bae Y K. Photonic Laser propulsion: Proof-of-concept demonstration [J]. *Journal of Spacecraft & Rockets*, 2008, 45(1): 153-155.
- [13] Bae Y K. Prospective of photon propulsion for interstellar flight[J]. *Physics Procedia*, 2012, 38(2): 253-279.
- [14] Latham W P, Newell T C, Lobad A, et al. 6.5 kW, Yb: YAG ceramic thin disk laser [C]//American Institute of Physics, 2010: 758-764.
- [15] Feng Yunhao. Photonic laser thruster promoting the development of space travel[J]. *Defense View*, 2017(3): 62-62. (in Chinese)  
冯云皓. 光子激光推进器将促进载人太空旅行发展[J]. *防务视点*, 2017(3): 62-62.