

一种应用于激光微烧蚀的光学聚焦系统简化设计方法

常 浩, 叶继飞, 李南雷, 周伟静*

(航天工程大学 宇航科学与技术系 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘要: 针对激光微推力器对光学聚焦系统结构紧凑、聚焦光斑尺寸小以及避免羽流污染的特殊要求, 采用传统的光线追迹法研究单透镜直接聚焦、双透镜准直聚焦两种典型方案光学设计方法。针对低功耗半导体激光器光纤耦合输出的芯径和数值孔径条件, 在 50 μm 级聚焦光斑约束下, 研究单透镜聚焦系统设计方案, 得到了透镜厚度、焦距、工作距等设计参数的关系; 研究准直聚焦光学系统的双透镜系统设计方案, 得到了透镜厚度、透镜中心距、工作距等设计参数特征关系。针对两种典型光学设计方案, 给出了工程应用设计参数。文中提出的设计方法避免了复杂的光学设计过程, 可为激光微推力器激光光束微尺度聚焦提供一种简单实效的方法。

关键词: 光线追迹; 光束聚焦; 激光烧蚀微推力器; 折射

中图分类号: V416.5; TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0906007

Simplified optical focusing design method applied to laser micro ablation

Chang Hao, Ye Jifei, Li Nanlei, Zhou Weijing*

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Its Application, Department of Aerospace Science and Technology,
Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: Considering the optical focusing system in need of compact structure, the small focus spot size and avoiding the plume pollution in laser ablation micro thruster, the traditional ray tracing method was used to study the two typical optical design methods of single lens direct focusing and double lens for collimation and focusing. In the condition of fiber core diameter and numerical aperture for the low power semiconductor laser output and the design requirement of 50 micron focus light spot, the relationship between the design parameters of the lens thickness, the focal length and the working distance was obtained for the single lens focusing system. On the other hand, the relationship between design parameters such as lens thickness, lens center distance and working distance were also discussed, in the light of the design scheme of the double lens system for collimated focusing optical system. According to two typical schemes, the engineering application design parameters were given. The design method proposed in this paper avoids the complicated optical design process and provides a simple and practical method for the laser beam microscale focusing.

Key words: ray tracing; light focusing; laser ablation micro thruster; refraction

收稿日期: 2018-04-13; 修订日期: 2018-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(11502301, 11602304)

作者简介: 常浩(1987-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事激光航天应用技术方面的研究。Email: changhao5976911@163.com

通讯作者: 周伟静(1982-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事推力器推进性能评测技术方面的研究。Email: viviazhouyy@163.com

0 引言

激光推进技术作为一种新概念推进技术,在航天推进及应用方面具有广阔前景,可以用于卫星直接发射进入近地轨道、近地轨道卫星轨道转移和清除太空垃圾等方面。在激光推进技术的整个发展过程中,针对微小卫星的轨道调整、位置保持、姿态控制等任务,而逐渐发展起来的用于星载激光微推力器的激光微推进技术一直是重要的探索方向^[1]。激光微推进是指激光与工质在微米至百微米尺度上发生的激光微烧蚀过程,在这一过程中由于烧蚀所产生的物质喷射会产生反喷推力。由于受到激光器的功率水平、激光远距离传输等技术瓶颈,使得用于星载激光微推力器的激光微推进技术成为激光推进现阶段研究热点。在众多星载微推力器当中,激光烧蚀微推力器以其比冲高、推力水平低、最小冲量比特小、功耗低、简单可靠^[2-5]等显著优势成为微纳卫星可负担的起的动力系统备选方案。美国从 20 世纪末就开始致力于将激光微推进技术应用于星载激光微推力器,主要研究单位包括 Photonic Associates 公司和麻省理工学院,先后开展了基于半导体激光器的毫秒脉宽激光烧蚀微推力器原型机、固体靶带式激光微推力器原理样机等^[6-9]研究。近年来国内方面研制的某激光微推力器^[10-11]可以提供的最小冲量可达 10^{-9} Ns;最大推力在毫牛量级;质量在公斤量级;功耗可控制在 20 W 以内。此外,激光烧蚀微推力器还具有易实现数控、推力波动偏差小、工作电压低等特点,适用于轻量级、低功耗的微纳卫星姿轨控和编队飞行需求。

在激光微推力器的设计中,为保证激光与工质的高效能量耦合,需要将激光束整形聚焦在工质靶表面,由于激光器功率在瓦量级,因而经光学系统聚焦后的光斑尺寸在百微米尺度以下(一般为几十微米量级)才能保证较高的激光功率密度,从而实现工质的高效烧蚀与喷射;同时,微纳卫星对推力器尺寸有较高的限制(一般控制在 1 U 左右),由于激光器及控制器、工质存储与工质、控制系统等已占据较大部分,因而留给光学系统的尺寸一般较小(一般在几个厘米量级),即希望在较小的尺寸目标

下,实现激光束的整形聚焦,从而完成激光与工质的能量耦合,实现推力输出。论文即针对这一研究目标,提出一种应用于激光微烧蚀的光学聚焦系统简化设计方法,针对激光微推力器对光学系统的特殊要求,采用光线追迹法研究光学聚焦系统的尺寸、焦距等设计特征参数,避免了复杂的光学设计过程,可为激光光束微尺度聚焦提供一种简单实效的方法。

1 基于光线追迹法的聚焦系统仿真与近轴焦点计算

光线追迹^[12]是光学系统设计中经常采用的方法。当光在一定的介质中传播,介质影响光传播的性质一般用折射率表示。描述折射率变化的介质中光线传输方程为:

$$\frac{d}{ds} \left[n(r) \frac{dr}{ds} \right] = \nabla n(r) \quad (1)$$

式中: s 为光线路径的弧长;方程待求解函数是光线路径上的位置矢量 r ; n 为介质折射率; $\nabla n(r)$ 为折射率梯度,其展开式为:

$$\nabla n(r) = \frac{\partial n}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial n}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial n}{\partial z} \hat{z} \quad (2)$$

设有一透镜曲面,其方程为 $f(r)=0$,在曲面的两边,介质的折射率各自为常数,光线从介质 1 进入介质 2。光线折射满足 Snell 定律 $n_2 \sin i_2 = n_1 \sin i_1$ 。其中 n_1 、 n_2 分别是介质 1 和 2 的折射率; i_1 、 i_2 分别是入射光线和折射光线相对于界面法线的夹角。

假定法线的单位矢量为 M ,其方向垂直于界面,由介质 1 指向介质 2,并规定两种介质沿着光线方向的单位矢量分别为 v_1 、 v_2 ,根据 Snell 定律,可写成矢量形式

$$n_2 v_2 \times M = n_1 v_1 \times M \Rightarrow k_2 \times M - k_1 \times M = 0 \quad (3)$$

由于 $k_2 = k_1 \times \lambda M$,用 M 点乘两边,可得 $\lambda = k_2 M - k_1 M$ 。由于 $(k_2 M)^2 = (n_2 \sin i_2)^2$,因此,光线折射时,可得:

$$\lambda = \sqrt{n_2^2 - n_1^2 + (k_1 M)^2} - k_1 M \quad (4)$$

由此可以得到入射光线的方向和折射光线的方向,这也是光线追迹的基本方程。

光束经整形后聚焦,这时每条光线都要折射后与光轴相交,通过连续计算不同的离轴入射线的折

射率与光轴的交点,观察交点的分布,就可以外推光学系统的近轴焦点,即离轴距离为零的入射光线的折射线与光轴的交点。

2 单透镜聚焦光路设计

对于普遍适用的整形聚焦光路,如图 1 所示,采用半导体激光器作为推力器的能量源,激光光束通过光纤耦合输出,光纤口径为 a ,经过 D 汇聚后,光线经过透镜聚焦后形成的光斑直径为 b 、 b_1 、 \dots 、 b_n , d 标识各透镜的口径, x 、 y 标识各透镜物距和像距, z 为光纤头距离第 1 面透镜的距离, w 为最后一面透镜距离聚焦点的距离,即工作距。根据几何关系可得 $a/c = z/D \cdot d/w$,因此对于某特定光纤出光,无论经过多少透镜将光纤头聚焦,其聚焦光斑的大小取决于最后一面透镜的口径与工作距的比值。

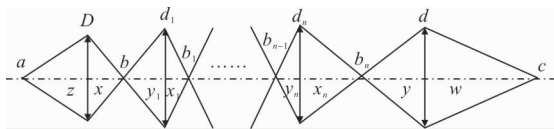


图 1 普遍适用的聚焦光路

Fig.1 Reshaping and focusing light path for general application

为了使光纤耦合的二极管激光器出光经过聚焦后能够形成较高的功率密度,设计光学聚焦系统将光纤头出光有效汇聚于较小的聚焦光斑区域,设计过程中如下因素可以确定:(1) 确定条件,光纤头芯径 $105 \mu\text{m}$,数值孔径 $NA=0.22$ 。(2) 设计目标,聚焦光斑大小 $\Phi 50 \text{ m}$ 左右,对应功率密度 $2.54 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ (功率 5 W 核算)。(3) 限定条件,为保证一定的工作距和透镜的利用率,透镜的通光口径为透镜口径的 $2/3$ 左右;工作距越大越好,整个光学系统口径越小越好,光路长度越小越好。

根据现有透镜的一般尺寸参数,主要有如下 2 个方面需要注意:(1) 光纤头距离透镜的距离须保证光线完全收集;(2) 聚焦透镜的选取,需要考虑其口径和焦距。根据以上设计依据,最简洁的方式是,仅用一面透镜完成光纤头的聚焦,由一面透镜完成聚焦的情况简图如图 2 所示。

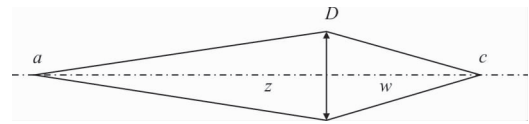


图 2 简洁的聚焦光路设计

Fig.2 Concise design of focused optical path

由透镜成像原理可知:

$$\frac{1}{z} + \frac{1}{w} = \frac{1}{F} \quad (5)$$

令放大倍数为 M ,即

$$\frac{c}{a} + \frac{w}{z} = M \quad (6)$$

因此,可以获得系统参数与焦距 F 的关系如下:

$$\begin{cases} w = (M+1)F \\ D = \frac{M+1}{5M}F \end{cases} \quad (7)$$

由限制条件可知, $M \approx 1/2$,也即

$$\begin{cases} w = \frac{3}{2}F \\ D = \frac{3}{5}F \end{cases} \quad (8)$$

由限制条件可知,工作距不宜过小,根据激光烧蚀微推力器紧凑设计和防止激光烧蚀羽流污染原则,一般约为 20 mm ,此时对应的通光口径在 8 mm 以上,对于 8 mm 以上口径可选透镜,通常为 $1/2 \text{ in}$ ($1 \text{ in}=2.54 \text{ cm}$)规格口径透镜。根据光纤的数值孔径和透镜的通光口径,光纤头距离透镜的距离 z 为 25 mm ,透镜口径 D 为 12.7 mm 。采用光线追迹法仿真分析透镜的折射率、透镜厚度等参数。此外,透镜的理论衍射斑直径要至少大于聚焦光斑的 5 倍以上。一般来说,透镜的材料通常为 K9 、石英两种,对应的设计波长下的折射率分别为 1.519 、 1.460 ,仿真选用的透镜材料为 K9 。根据上述已知条件,得到不同透镜厚度下的光迹仿真结果,如表 1 所示。

由表 1 可以看出,在光纤距离透镜中心距离和通光口径相同条件下,随着透镜厚度的增加,透镜焦距逐渐减小,为保证聚焦光斑尺寸,根据几何原理,工作距也在逐渐减小,具体参数如表 2 所示。可以看出,在透镜厚度为 4 mm 条件下,工作距在 20 mm 左右,可有效防止工质烧蚀羽流溅射污染。

表 1 单透镜聚焦光路下不同透镜厚度的光迹仿真结果

Tab.1 Ray tracing results of different lens thickness under single lens focusing optical path

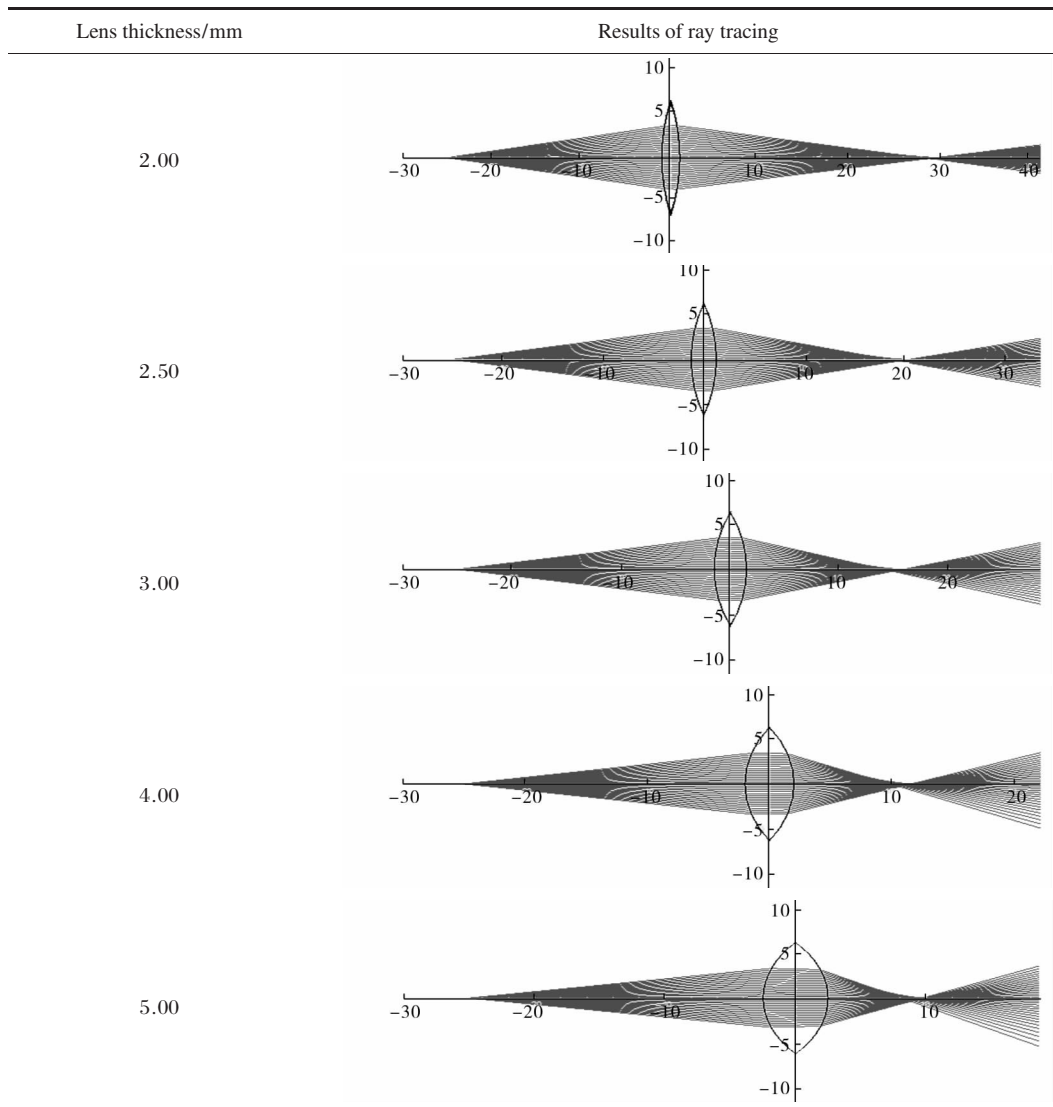


表 2 单透镜聚焦光路条件下不同透镜厚度的光学设计参数

Tab.2 Optical design parameters of different lens thickness under single lens focusing optical path

Lens thickness/mm	Lens focal length/mm	Working distance/mm	Diffraction spot diameter/ μm
2.00	30.65	45.97	1.98
2.50	20.83	31.25	1.35
3.00	16.23	24.35	1.05
4.00	12.01	18.02	0.79
5.00	10.22	15.33	0.67

综上所述,半导体激光器光学聚焦模块参数列表如表 3 所示。

表 3 单透镜聚焦下半导体激光器聚焦参数列表

Tab.3 List of focusing parameters for semiconductor lasers under single lens focusing

Item	Value
Working distance f/mm	18.02
Distance between fiber head and lens center z/mm	25
Lens focal length F/mm	12.01
Aperture of lens/mm	12.7
Actual optical aperture D/mm	8
Focal spot diameter $c/\mu\text{m}$	50

$$\frac{c}{a} = \frac{w}{z} = M \quad (9)$$

3 准直聚焦光路设计

同样采用半导体激光器，常用的光学聚焦系统还可采用 2 个透镜组合设计，即第一个透镜作为准直镜使用，第 2 透镜作为聚焦镜使用，光束先准直后聚焦，结构见图 3。

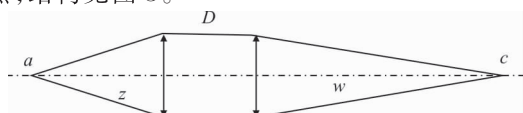


图 3 准直聚焦光路示意图

Fig.3 Schematic diagram of a collimated focusing light path

准直后聚焦光路同样遵循上述的关系，即：

式中： z 为准直透镜与光纤头的距离； w 为聚焦透镜的工作距，显然，同样的缩小倍数，准直透镜的焦距越小，工作距越小，因此，为了保证合适的工作距，选取的准直镜焦距尽可能大。由于光纤芯径和数值孔径已知（同上），为保证合适的通光孔径，光纤头距离准直镜的距离同样为 25 mm，聚焦透镜的工作距也同样选择 20 mm 为最佳，采用光线追迹法仿真分析透镜的折射率、透镜厚度、相距距离等参数，仿真选用的透镜材料为 K9。不同透镜厚度条件下，准直镜与聚焦镜中心距离变化时的光迹仿真结果如表 4 所示。

表 4 准直镜与聚焦镜中心距离变化下的光迹仿真结果

Tab.4 Ray tracing results when the center distance between collimator and focusing mirror changes

Lens thickness/mm	Distance between the center of collimator and focusing mirror/mm	Results of ray tracing
1.0	2	
	10	
	20	
1.5	2	
	3	
	4	
2.0	9	

续表 4

Continued Tab.4

Lens thickness/mm	Distance between the center of collimator and focusing mirror/mm	Results of ray tracing
10		
11		

将仿真得到的结果总结如下,如表 5 所示。由表可以看出,当透镜厚度为 2 mm 且准直镜与透镜之间的中心距离为 3 mm 时,工作距为 20 mm 左右。尽管在透镜厚度为 2 mm 情况下,准直镜与透镜之间的中心距离在 9~11 mm 时,工作聚也接近 20 mm,但此种情况下的光学系统尺寸要大于前述条件,从尺寸结构优化角度考虑,采用透镜厚度 1.5 mm、两镜中心距离 3 mm 的设计方案。

表 5 准直聚焦光路条件下不同透镜厚度的光学设计参数

Tab.5 Optical design parameters of different lens thickness under collimator and focusing optical path

Lens thickness/mm	Distance between the center of collimator and focusing mirror/mm	Lens focal length/mm	Working distance/mm
1.0	2	40.67	40.83
	10	44.19	44.37
	20	49.61	49.80
1.50	2	19.87	19.94
	3	20.80	20.88
	4	21.72	21.81
2.00	9	19.73	19.80
	10	20.67	20.75
	11	21.61	21.70

综上所述,半导体激光器整形聚焦设计条件下的聚焦模块参数列表如表 6 所示。

表 6 准直聚焦镜下半导体激光器聚焦参数列表
Tab.6 List of focusing parameters for semiconductor lasers under collimator and focusing lens

Item	Value
Working distance of focusing lens f /mm	20.88
Focal length of focusing lens F_2 /mm	20.80
Lens focal length F /mm	12.7
Aperture of lens /mm	8
Focal spot diameter c /μm	50
Distance between the center of collimator and focusing mirror/mm	3

4 结论

由于激光微推力器尺寸结构限制,要求光学聚焦系统简单紧凑,同时又要满足一定的工作距,以避免羽流喷射污染;由于推力器较低的电功耗水平,因此为保证较高的激光功率密度和高效的激光与工质能量耦合,要求光学聚焦系统对光束的聚焦光斑在微尺度。论文针对上述目标,采用光线追迹方法,设计了单透镜直接聚焦和双透镜先整形后聚焦两种设计方案,并分别给出了设计参数。该方法避免了复杂的光学设计过程,可为激光光束微尺度聚焦提供一种简单实效的方法。但需要指出的是,作为一种工程上应用的简化设计方法,该方法没有考虑半导体激光快慢轴在聚焦面上的聚焦面差异和畸变对焦斑的影响,上述两个方面需要在具体实验中,通过对光束质量的进一步分析确定聚焦光斑内的能量特性。

参考文献:

- [1] Phipps C R, Birkan M, Bohn W, et al. Review: Laser-ablation propulsion [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(4): 609-637.
- [2] Phipps C R. Micro laser plasma thrusters for small satellites[R]. Afosr Str Phase I, 1999.
- [3] Phipps C R, Luke J R, McDuff G G, et al. A Laser-ablation-based micro-rocket[R]. AIAA-2002-2152.
- [4] Phipps C R. Micro laser plasma thrusters for small satellites[R]. Afosr Str Phase II, 2002.
- [5] Phipps C R, Luke J R, Helgeson W. Performance test results for the laser-powered microthruster [C]// Beamed Energy Propulsion: Fourth International Symposium, 2006: 224-234.
- [6] Gonzales D, Baker R. Microchip laser propulsion for small satellites [C]//AIAA 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2001.
- [7] Gonzales D A, Baker R P. Micropropulsion using a Nd: YAG microchip laser [C]//Proc SPIE Conference on High Power Laser Ablation IV, 2002, 4670: 752-765.
- [8] Phipps C R, Luke j R. Advantages of a Ns-pulse micro-laser plasma thruster [C]//Beamed Energy Propulsion: First International Symposium on Beamed Energy Propulsion, 2003: 230-239.
- [9] Phipps C R, Luke J R, Helgeson W, et al. A Ns-pulse laser microthruster[C]//Fourth International Symposium on Beamed Energy Propulsion, 2006: 235-246.
- [10] Ye Jifei, Ly Nanlei, Chang Hao. Discussion on two kinds of working modes of laser ablation micro-thruster[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2017, 43(5): 7-13.
- [11] Ye Jifei, Hong Yanji, LI Nanlei, et al. Laser ablation thruster and its performance test [C]//Joint Conference of China Aerospace Power, 2007.
- [12] Li Dongxi, Lu Zhenwu, Sun Qiang, et al. Design of conformal optical system based on real ray tracing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 834-838.