

# 太阳能热推进系统聚光器参数优化\*

黄敏超, 吴尚

(国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**采用先进遗传算法对太阳能热推进系统一次聚光器参数进行优化,达到减小推进系统质量的目的。以聚光器太阳光收集效率和聚光器质量为优化目标函数,建立聚光器工作的数学模型,并开展相关仿真研究。仿真结果表明,先进遗传算法可有效用于太阳光收集效率和聚光器质量优化分析。

**关键词:**聚光器;收集效率;质量;优化

**中图分类号:**V439 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)05-094-05

## Condenser parameters optimization in solar thermal propulsion system

HUANG Minchao, WU Shang

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** An advanced genetic algorithm was used to make an optimization analysis on the solar thermal propulsion system condenser parameters for reducing the mass of system. Considering the sunlight collection efficiency and the mass of condenser as the optimization objective function, a mathematical model of condenser work was established and several related simulation researches were carried out. The simulation results show that the advanced genetic algorithm can be effectively used in the optimization analysis of the sunlight collection efficiency and the condenser mass.

**Key words:** condenser; collection efficiency; mass; optimization

太阳能热推进系统一次聚光器是整个系统的重要组成部分,决定着供给能量的大小,影响着整个系统的光热转换效率和推力器的性能。在太阳能热推进系统一次聚光器的设计方案中。理想的旋转抛物面聚光器是太阳能热微推进系统一次聚光器的最佳选择<sup>[1]</sup>。理想的旋转抛物面聚光器具有良好的聚光特性,能把平行于光轴的入射光线汇聚在焦点上,具有功率高、聚光比高、质量轻和体积小的优点。旋转抛物面聚光器的聚光原理及光路如图1所示,聚光器的顶点在旋转抛物面的正中心,平行于光轴入射到抛物线上的任一点的光线SM,其反射光线都汇聚于抛物线的焦点F上。旋转抛物面是抛物线绕光轴旋转一周得到的,因此抛物面上的点都具备同样的聚光性质,平行于光轴入射到抛物面上的所有反射光线都将聚集在焦点上,这就是旋转抛物面聚光器聚光的原理<sup>[2]</sup>。

在满足微小卫星的任务及动力配置基础上,要求太阳能热推力器推力F至少为100 mN,比冲 $I_{sp}$ 至少为800 s。以一次聚光器安装的接受半角

$\phi$ 和焦距f为自变量,以光的收集效率和一次聚光器质量为目标函数,采用Isight软件中的领域培植遗传算法(Neighborhood Cultivation Genetic Algorithm, NCGA)对一次聚光器进行优化,得到适合于空间应用的太阳能热推进系统一次聚光器结构参数。

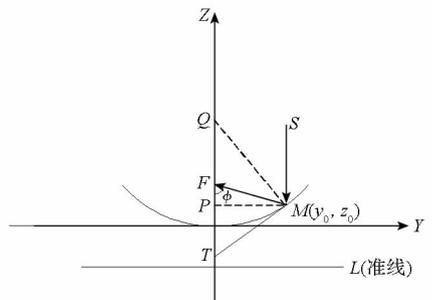


图1 旋转抛物面光路图

Fig. 1 Light path diagram for revolution paraboloid

### 1 聚光器性能评估参数

对于微小卫星来说,其推进系统主要用于其轨道保持和姿态控制,决定了其成本低、质量小、

\* 收稿日期:2015-12-25

基金项目:国家部委级基金资助项目(9140A20100413KG01293)

作者简介:黄敏超(1969—),男,重庆荣昌人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:h\_mchao01@qq.com

体积小、性能高、研制周期短等特点。综合考虑太阳能热推进聚光器系统性能评估,主要参数包括:光收集效率和质量。太阳能热微推进聚光器的优化是由硬件设备的经济性和所要求的收集能力共同决定的,即聚光器系统想要获得较高的光收集效率,就需要增大一次聚光器的面积,但是一次聚光器面积的增加必然会导致聚光器系统质量的增加,所以必须寻找这个折中点。本文采用先进遗传算法,在推进系统能够满足卫星设计功能的基础上,对太阳能热推进系统参数进行优化分析,使光收集效率较高和聚光器系统质量较小。

### 1.1 光的收集效率

太阳能热推进系统的光线的传播过程如图2所示,将收集到的太阳辐射能转化为工质气体的动能,其过程首先要经过一次聚光器的反射。因为对于聚光器不同的反射积层,不同的反射材料的反射率是不同的,对太阳辐射的反射并不能达到100%,一定会有一部分损失。通常采用现代镀膜技术,反射率可高达90%~98%,称为一次聚光器的反射率 $\eta_{c1}$ ;经一次聚光器改变传播方向的光线汇聚到二次聚光器的球形入口处,此过程又会有一部分损失,即反射光到达二次聚光器入口表面的百分比一般在88%~96%之间,称为主聚光器的截取因子 $\eta_{i1}$ ;在二次聚光器内全反射,最后被吸收器/推力室内表面吸收的光线又会有一部分损失,吸收效率一般在87%~96%之间<sup>[3]</sup>,称为折射式二次聚光器的效率 $\eta_{c2}$ ;吸收器/推力室内表面吸收涂层一般在0.8以上<sup>[4]</sup>,用 $\eta_a$ 表示。

参考文献[5],太阳光的收集效率 $C_{eff}$ 为经过上述过程损失所剩光能乘以系数 $\cos^4(\phi/2)$ ,其表达式为:

$$C_{eff} = \eta_{c1} \cdot \eta_{i1} \cdot \eta_{c2} \cdot \eta_a \cos^4(\phi/2) \quad (1)$$

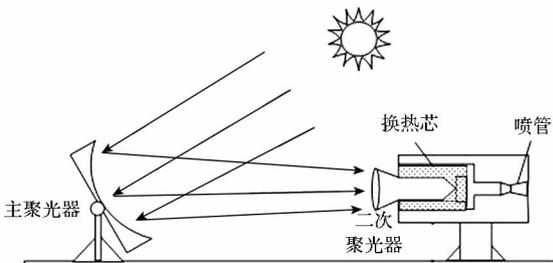


图2 太阳能热微推进系统光线传播路线图  
Fig.2 Light path diagram of solar thermal micro thrust system

### 1.2 一次聚光器质量

空间上采用的是可折叠充气膨胀式一次聚光

器,具有携带方便、质量轻的优点。由图1可知,一次聚光器旋转一周形成一次聚光器的抛物线方程为 $y^2 = 4fz$ ,一次聚光器开口半径为 $R$ ,由积分可以求得一次聚光器的表面积 $S = \frac{\pi}{3f}(R^2 + 4f^2)^{\frac{3}{2}} - \frac{8}{3}\pi f^2$ ,质量 $M = S \times h \times \rho$ ( $h$ 为一次聚光器涂层的厚度, $\rho$ 为涂层的密度)。

一次聚光器主要由底板层、反射层和防护层组成<sup>[6-7]</sup>。聚光器的衬底材料选择厚度为0.5 mm的聚亚酰胺薄膜,密度为1.44 g/cm<sup>3</sup>,此材料在航天工程中的多次使用证明其具有力学性能好、抗张强度高、不易产生褶皱和化学稳定性好等优点。反射膜选择成膜性好、全太阳光谱范围内反射率高的铝膜,厚度为10 μm,密度为2.7 g/cm<sup>3</sup>。为了提高反射率,在反射膜上面镀一层厚度为120 nm的Al-Ag复合膜作为增反膜。为了防止反射膜及增反膜在太空中的蒸发,在增反膜上面镀一层厚度为275 nm的SiO<sub>2</sub>薄膜,因为纳米级的厚度太小,故忽略增反膜和防氧化膜的质量,所以一次聚光器的质量 $M = S(h_1\rho_1 + h_2\rho_2)$ 。

## 2 聚光器数学模型

### 2.1 基本模型

本文聚光器系统基准构型一次聚光器的聚光比为1500,入射半角 $\Phi$ 为45°,由此可以推导出一次聚光器抛物线的方程为 $y^2 = 2.8z$ ,光的收集效率 $C_{eff,ref} = 52.72\%$ ,一次聚光器的质量为 $M_{ref} = 0.82$  kg。

在太阳能热推进系统中,收集到的太阳辐射最终将转化为工质气体的动能,可写出如式(2)所示关系式:

$$C_{eff} \cdot I \cdot \pi R^2 \cdot \cos\Delta\theta = \frac{1}{2} \dot{m} V_e^2 \quad (2)$$

式中,太阳能热推力器的比冲 $V_e = I_{sp} \cdot g$ ,推力 $F = \dot{m} I_{sp} = \dot{m} V_e$ , $I$ 为地球表面辐射照度,一般情况取 $I = 1360$  W/m<sup>2</sup>,主聚光器的开口面积 $S = \pi R^2$ , $\dot{m}$ 为工质气体的质量流量, $V_e$ 为喷气速度,由于 $\Delta\theta \leq 0.1^\circ$ ,所以 $\cos\Delta\theta \approx 1$ 。由此导出:

$$F = \frac{2\pi R^2 C_{eff} \cdot I}{I_{sp} \cdot g}$$

$$I_{sp} = \frac{2\pi R^2 \cdot C_{eff} \cdot I}{F \cdot g}$$

### 2.2 聚光器模型

在满足微小卫星任务需求的情况下,要求太

太阳能推进系统的推力不小于 0.1 N,比冲不小于 800 s,建模如下:

选取目标函数一次聚光器光的收集效率  $C_{eff}$  和质量  $M$ ,为简化计算假设光收集效率中  $\eta_{e1}$ ,  $\eta_{i1}, \eta_{e2}, \eta_{\alpha}$  为固定值,其表达式分别为:

$$C_{eff} = 0.7236 \cos^4(\phi/2) \quad (3)$$

$$M = 0.747 \left[ \frac{\pi}{3f} (R^2 + 4f^2)^{\frac{3}{2}} - \frac{8}{3} \pi f^2 \right] \quad (4)$$

其中: $\phi$  是一次聚光器抛物面的位置角; $f$  是一次聚光器的焦距; $R$  为一次聚光器旋转半径,表达式为:

$$R = \frac{2f \sin \phi}{1 + \cos \phi}$$

设计变量选取如下:

1) 抛物面位置角  $\phi$ :如图 1 所示,  $\phi$  表示入射光的反射光线与光轴的夹角,其范围取  $20^\circ \sim 60^\circ$ 。

2) 一次抛物面聚光器的焦距  $f$  与位置角  $\phi$  和半径  $R$  的关系密切,也是影响聚光器性能的主要因素,其范围取  $0.1 \sim 1$  m。

约束条件: $g1$  表示推力至少为 0.1 N,  $g2$  表示比冲至少为 800 s。

$$g1 = \frac{2\pi R^2 \cdot C_{eff} \cdot I}{I_{sp} \cdot g} - 0.1 \geq 0$$

$$g2 = \frac{2\pi R^2 \cdot C_{eff} \cdot I}{F \cdot g} - 800 \geq 0$$

得到一次聚光器光的收集效率  $C_{eff}$  随接受半角  $\phi$  和焦距  $f$  变化的响应曲面如图 3 所示,质量  $M$  随接受半角  $\phi$  和焦距  $f$  变化的响应曲面如图 4 所示。

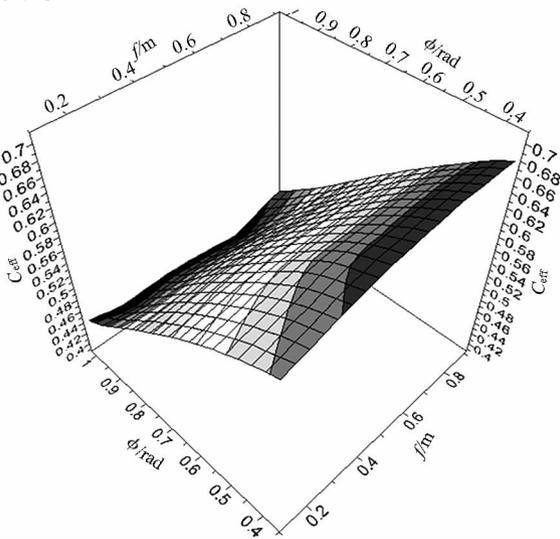


图 3  $C_{eff}$  随接受半角  $\phi$  和焦距  $f$  变化的响应图  
Fig. 3 Response diagram about  $C_{eff}$  with half-angle  $\phi$  and focus  $f$

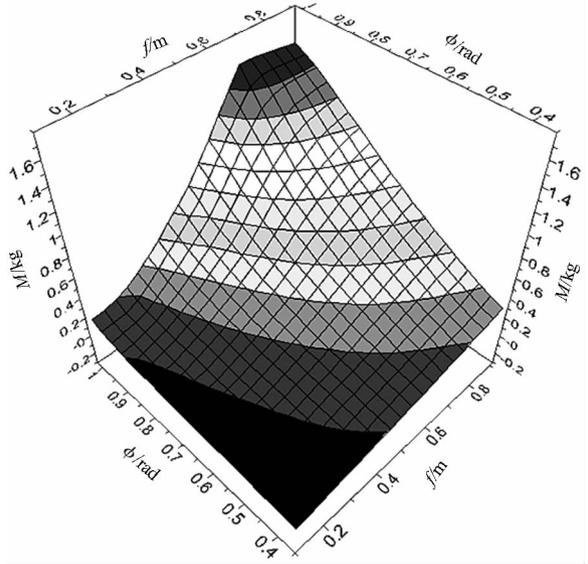


图 4  $M$  随接受半角  $\phi$  和焦距  $f$  变化的响应图  
Fig. 4 Response diagram about mass  $M$  with half-angle  $\phi$  and focus  $f$

### 3 一次聚光器优化分析

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法,由美国 Michigan 大学的 holland 教授于 1975 年首次提出,源于达尔文的进化论、孟德尔的群体遗传学说和魏茨曼的五种选择说。其基本思想是模拟自然界遗传机制和生物进化论而形成的一种过程搜索最优解的算法。

遗传算法是模拟生物在自然环境中优胜劣汰、适者生存的遗传进化过程而形成的一种具有自适应能力的全局性恶概率搜索算法。它是从代表问题可能潜在阶级的一个种群开始,首先将表现型映射到基因型及编码,从而将解空间映射到编码空间,每个编码对应问题的一个解,称为染色体或个体。初始种群产生之后,按照适者生存和优胜劣汰的原理,逐代演化生成出越来越好的近似解。在每一代,根据问题域中个体的适应度大小选择个体,并借助自然遗传学的遗传算子进行组合交叉和变异,产生出代表新的解集的种群。这个过程使种群像自然进化一样,后代种群比前代更加适应于环境,末代种群中的最优个体经过解码可以作为问题近似最优解,遗传算法流程如图 5 所示。目前在遗传算法应用中存在收敛速度慢、局部搜索能力差和早熟等问题,本文应用改进的遗传算法 NCGA 和 NSGA - II 对问题进行优化分析。

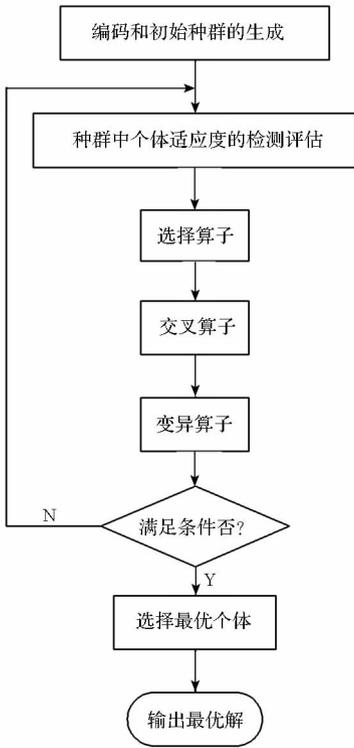


图 5 遗传算法流程图

Fig. 5 Genetic algorithm flow chart

本文研究的多目标遗传算法 NCGA 是由最早的 GA 发展而来,它视各目标同等重要,通过排序后分组进行交叉的方法实现“相邻繁殖”的机制,从而使接近于 Pareto 前沿的解进行交叉繁殖的概率增大,加速了计算收敛过程。NCGA 步骤如下:

- 1) 初始化:令  $t=0$ , 设置第一代个体  $P_0$ , 种群数为  $N$ , 计算个体对应的适应值函数, 记为  $A$ 。
- 2) 令  $t=t+1, P_t=A_{t-1}$ 。
- 3) 排序:个体  $P_t$  按向聚集的目标值的方向进行排序。
- 4) 分组:个体  $P_t$  根据上述排序分为若干组, 每组由两个个体组成。
- 5) 交叉和变异:在每一组中执行交叉和变异操作, 由两个父代个体产生两个子代个体, 同时父代个体被删除。
- 6) 重组:所有子代个体组成一组新的  $P_t$ 。
- 7) 更新:将  $A_{t-1}$  与  $P_t$  组合, 按环境选择 (environment selection) 机制, 从  $2N$  个个体中, 选出其中的  $N$  个个体。
- 8) 终止:如果满足终止条件, 则终止优化程序, 否则返回至第 2 步。

根据工程经验,需要既考虑高聚光效率,又尽量减小一次聚光器质量,因此设定目标函数为  $Y=\lambda_1 C_{\text{eff}}-\lambda_2 M$  (其中  $\lambda_1, \lambda_2$  为聚光效率与聚光

器质量的加权值,  $\lambda_1=0.6, \lambda_2=0.4$ )。采用 NCGA 多目标遗传算法进行优化,种群大小取 10, 遗传代数取 30。结果如表 1 所示。

表 1 NCGA 优化结果  
Tab. 1 Optimization result of NCGA

	$\phi/(\circ)$	$f/m$	$C_{\text{eff}}/\%$	$M/\text{kg}$
1	22.2	0.942	67.1	0.329
2	25.5	0.827	65.6	0.337
3	27.1	0.783	64.6	0.343
4	27.3	0.777	64.5	0.342
5	27.5	0.769	64.4	0.343
6	28.0	0.775	64.1	0.359
7	28.4	0.749	63.9	0.346
8	31.9	0.674	61.8	0.358
9	36.1	0.606	59.2	0.375
10	43.8	0.516	53.6	0.421

表 1 中每一组均为通过遗传算法计算得到在一定入射角和焦距的条件下的最优解(最小质量和最高吸收效率),改变入射角与焦距后得到 10 组数据,结果表明经过优化后的聚光器系统,光的收集效率较优化前大幅提高,聚光系统的质量也大幅减小,达到了优化目的。

但是,当入射角  $\phi$  太小时,一次聚光器的聚光比太大,焦斑的理论温度将达到 5000 K 以上,任何材料承受不了这样的高温。取聚光器系统安装半角  $\phi=28^\circ$ , 焦距  $f=0.775 \text{ m}$ , 此时光的收集效率  $C_{\text{eff}}=64.1\%$ , 质量  $M=0.359 \text{ kg}$ 。

## 4 结论

以太阳能热推进系统一次聚光器为研究对象,开展了对一次聚光器结构参数的优化及性能研究。主要工作与结果如下:

- 1) 建立了一次聚光器的性能评估参数,分析了焦距和接收半角对光的收集效率及聚光系统质量的影响;
- 2) 对聚光器系统进行建模,在基准构型基础上采用 NCGA 进行优化,优化后光的收集效率提高了 21.59%, 质量减轻了 0.461 kg, 因此采用的优化策略有效。

## 参考文献 (References)

[1] 马宝珊. 世界太阳能、风能、生物能的发展现状和前景[J]. 黑龙江电力技术, 1997, 19(6): 380-384.

- MA Baoshan. The development status and prospects of solar energy, wind energy and bio-energy in the world [J]. Heilongjiang Electric Power, 1997, 19(6): 380 - 384. (in Chinese)
- [2] Feuermann D, Gordon J M, Ries H. High-flux solar concentration with imaging designs[J]. Solar Energy, 1999, 65(2): 83 - 89.
- [3] Wong W A, Geng S M, Castle C H, et al. Design, fabrication and test of a high efficiency refractive secondary concentrator for solar applications [C]//Proceedings of Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, 2000: 1117 - 1125.
- [4] Nakamura T, Sullivan D, Mcclanahan J, et al. Solar thermal propulsion for small spacecraft [C]// Proceedings of AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2013.
- [5] Feuermann D, Gordon J M. Solar fiber-optic mini-dishes: a new approach to the efficient collection of sunlight[J]. Solar Energy, 1999, 65(3): 159 - 170.
- [6] 李金丽, 刘全校, 许文才. 光学薄膜及其发展现状[J]. 化工新型材料, 2012, 40(2): 14 - 15.
- LI Jinli, LIU Quanzhao, XU Wencai. The development of optical thin film[J]. New Material, 2012, 40(2): 14 - 15. (in Chinese)
- [7] 赵秀琴. 增透膜和增反膜[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2003, 2(4): 42 - 45.
- ZHAO Xiuqin. AR coating and high reflecting film[J]. Journal of Taiyuan Teachers College(Natural Science Edition), 2003, 2(4): 42 - 45. (in Chinese)