

# 探月飞行中太阳帆航天器帆面光学性能演化\*

王春成<sup>1,2,3</sup>, 张旭东<sup>4</sup>, 黄文浩<sup>5</sup>, 郑津津<sup>5</sup>

(1. 中国科学技术大学天体物理中心, 安徽合肥 230026; 2. 中国科学院上海天文台-中国科学技术大学星系和宇宙学联合实验室;  
3. 中国科学技术大学天文与应用物理系, 安徽合肥 230026; 4. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏南京 210042;  
5. 中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽合肥 230027)

**摘要:**介绍了太阳帆航天器在进行探月飞行时,非理想帆面的推力计算;重点分析了在轨长时间运行时空环境对帆面光学系数及轨道漂移的影响.计算结果表明,太阳帆光学性能的退化对总推力、特征加速度和光压数的演化不可忽视,高精度深空探测轨道的设计要考虑空间环境因素.

**关键词:**月球探测器;光压;太阳帆

**中图分类号:**V212.13;V529.1

**文献标识码:**A

## Optical performance evolution of solar sail-driven lunar probe

WANG Chun-cheng<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xu-dong<sup>4</sup>, HUANG Wen-hao<sup>5</sup>, ZHENG Jin-jin<sup>5</sup>

(1. Center for Astrophysics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Joint Institute for Galaxy and Cosmology (JOINGC), SHAO and USTC, CAS;

3. Department of Astronomy and Applied Physics, USTC, Hefei 230026, China;

4. National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, CAS, Nanjing 210042, China;

5. Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, USTC, Hefei 230027, China)

**Abstract:** Based on a non-perfect reflection model of light pressure propulsion, the effects of space environment on the optical coefficients and orbit drifting of solar sail spacecraft carrying out long-term mission of lunar exploration were analyzed. The results suggest that the optical degradation of solar sails can not be neglected in studying the evolution of total propulsion, characteristic acceleration and lightness number. The role of space environment must be included in high-precision trajectory design of deep-space missions.

**Key words:** lunar probe; light pressure; solar sail

## 0 引言

太阳帆(solar sail)是一种利用太阳光压作为动力的新型航天器.在帆面足够大时,通过光压的小推力持续加速,很容易达到和超过宇宙速度,实现星际航行<sup>[1]</sup>.另一方面,太阳帆由于不需要携带大量化学燃料,具有重量轻、运行和发射成本低等优点,因而

也可以执行如探月等未来的深空探测任务.

刘林的研究指出,在面质比足够大时,用光压将探测器推向月球进行无动力探月飞行是有效和可行的<sup>[2]</sup>.由于太阳帆航天器面向深空探测,要求长时间在轨运行完成特定的任务<sup>[3]</sup>,例如10年以上.因此,对于在严峻的空间环境中长期运行的太阳帆月球探测器,需要研究由于其帆面光学性能退化对精密的

\* 收稿日期:2006-09-02;修回日期:2006-11-17

作者简介:王春成,男,1971年生,讲师.研究方向:航天器轨道与性能. E-mail: ccwang@ustc.edu.cn

通讯作者:黄文浩,教授. E-mail: whuang@ustc.edu.cn; Tel:0551-3603372

轨道设计和姿态控制产生的影响。

目前研制的太阳帆,帆面一般采用高分子材料 Kapton 或 Mylar,正面镀铝,反面镀铬。在实际空间环境中,对太阳帆性能产生影响的主要因素是太阳辐射的光子和带电粒子。当帆面长期受到大剂量辐照时,会引起材料表面分子的活化,可能降低太阳帆的光学和机械性能。到目前为止,还没有系统地进行过太阳帆候选材料样品的空间辐照实验,也没有可以利用的数据。因此,我们采用 Dachwald 等最新提出的参数化 OSSD 方法<sup>[4]</sup>,来研究太阳帆航天器在探月空间环境中长期运行时的性能演化。

## 1 理论模型

图 1 是太阳帆的空间运行示意图,入射太阳光沿  $e_r$  方向,与帆面法线方向  $n$  夹角为  $\alpha$ 。入射与反射光的合成光压推进力  $F_{SRP}$  沿  $m$  方向,由方位角  $\theta$  和  $\delta$  来确定。对于最简单的理想反射太阳帆模型,总推进力为

$$F_{SRP} = 2PA \cos^2 \alpha n, \quad (1)$$

其中,光压  $P$  与到太阳距离成平方反比; $A$  为帆的面积。对于在 1 AU 处运行的探月航天器, $P \equiv 4.563 \mu\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。为了使光压加速作用明显,需要取较大的面质比。我们采用文献[2]的参数,即用正方形帆面,面积  $A$  为  $120 \text{ m} \times 120 \text{ m}$ ;质量  $m$  为 500 kg。

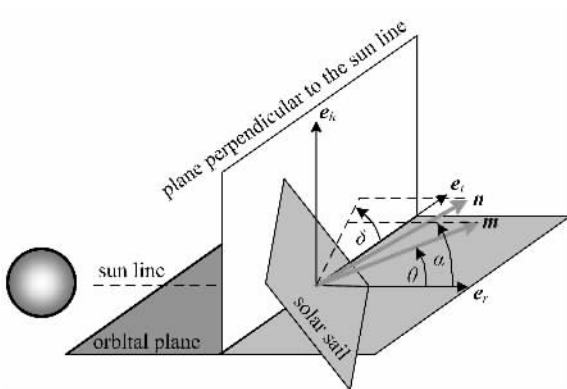


图 1 太阳帆空间运行示意图<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Illustration of solar sail spacecraft in space<sup>[4]</sup>

实际的太阳帆由于具体的材料特性,不会是理想反射体。因此进行轨道设计和姿态控制时,要采用非理想反射太阳帆模型。描述相关的帆面光学性能目前采用 6 个系数:总反射系数  $\rho$ ,镜面反射系数  $s$ ,太阳帆正面发射率  $\epsilon_f$ ,太阳帆背面发射率  $\epsilon_b$ ,以及正面和背面的非郎伯系数  $B_f$  与  $B_b$ 。根据 Wright 给出

的数据<sup>[5]</sup>,镀铝和铬的太阳帆材料光学参数为

$$P_{Al/Cr} = \{\rho = 0.88, s = 0.94, \epsilon_f = 0.05, \epsilon_b = 0.55, B_f = 0.79, B_b = 0.55\}.$$

我们把该组系数作为光学性能演化的初值。

对于非理想反射太阳帆,光压的总推动力为<sup>[4]</sup>

$$F_{SRP} = 2PA \cos \alpha \Psi m, \quad (2)$$

其中,  $\Psi = [(a_1 \cos \alpha + a_2)^2 + (a_3 \sin \alpha)^2]^{1/2}$ , 它的大小依赖于太阳光入射角  $\alpha$  和帆面光学系数的 3 个函数。3 个函数定义为

$$a_1 = \frac{1}{2}(1 + s\rho),$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \left[ B_f(1-s)\rho + (1-\rho) \frac{\epsilon_f B_f - \epsilon_b B_b}{\epsilon_f + \epsilon_b} \right],$$

$$a_3 = \frac{1}{2}(1 - s\rho).$$

图 2 给出了上述正方形太阳帆对于不同的太阳光入射角  $\alpha$ ,在理想反射和非理想反射情形下的光压总推力。由数值计算结果可以看出,理想反射太阳帆对推力估计偏高,特别在小入射角时与实际的非理想反射情形偏差较大。而太阳帆在轨运行时,为获得显著的光压加速效果,一般保持较小的  $\alpha$  角。因此,精确的轨道设计和优化必须采用非理想反射太阳帆模型。

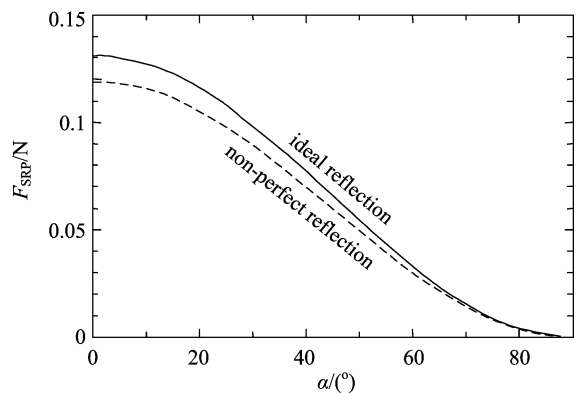


图 2 不同太阳光入射角时理想反射(实线)和非理想反射太阳帆(虚线)的光压总推力

Fig. 2 Total propulsion of light pressure in the case of ideal reflection (solid line) and non-perfect reflection (dashed line) solar sails versus incident angle of solar photons

我们在上述非理想反射太阳帆模型的基础上,进一步研究其在轨长期运行时空间环境对帆面光学性能的退化和对太阳帆航天器整体运行性能的影响。Dachwald 等的研究指出,太阳帆受到的光压推力对  $\rho, s, \epsilon_f$  3 个参数的变化很敏感,而对其他 3 个参数  $\epsilon_b, B_f, B_b$  的变化不敏感<sup>[4]</sup>。因此,在初步的分

析中,我们主要考虑  $\rho, s, \epsilon_f$  随运行时间的演化;而  $\epsilon_b, B_f, B_b$  保持相应的初值不变。

太阳帆在轨运行期间,  $\rho, s, \epsilon_f$  中任一系数(写为  $p(t)$ )是含时演化的. 实质上,  $p(t)$  受到时间  $(t-t_0)$  内太阳辐射剂量  $\tilde{\Sigma}(t)$  (SRD) 的影响而发生变化. 位于  $r_0=1$  AU 处, 垂直阳光的帆面在  $T=1$  a 期间受到的太阳辐射剂量约为(平均太阳活动)  $\tilde{\Sigma}=15.768$  TJ/m<sup>2</sup>. 进一步考虑到太阳帆的光线入射角  $\alpha$  和到太阳距离的变化, 可以定义无量纲太阳辐射剂量<sup>[4]</sup>

$$\Sigma(t) = \frac{\tilde{\Sigma}(t)}{\tilde{\Sigma}_0} = \frac{1}{T} \left( r_0^2 \int_{t_0}^t \frac{\cos \alpha}{r^2} dt' \right), \quad (3)$$

因此, 光学系数的演化可以写为  $p(t) = p(\Sigma(t))$ .

对于我们研究的探月太阳帆航天器, 始终在 1 AU 处运行. 太阳帆的姿态则采用一种简单的方案<sup>[2]</sup>, 即向着太阳飞行的半圈轨道使帆面法向垂直于阳光方向 ( $\alpha=90^\circ$ ), 以免光压形成阻力; 另外半圈轨道则取  $\alpha=0^\circ$ , 以达到最有效推动. 则我们不难得到此时的太阳辐射剂量为

$$\Sigma(t) \approx \frac{1}{2T} \int_0^t dt = \frac{1}{2T} t, (t_0 = 0). \quad (4)$$

Dachwald 等<sup>[4]</sup> 假设  $p(t)$  从  $t=t_0 \rightarrow \infty$  按指数形式演化, 即  $p(t) = p_\infty + (p_0 - p_\infty) e^{-\lambda \Sigma(t)}$ . 这里参数  $\lambda$  由“半衰期”辐射剂量  $\hat{\Sigma}$  给出, 即  $\lambda = \ln 2 / \hat{\Sigma}$ . 计算时我们按文献<sup>[4]</sup> 取  $\hat{\Sigma} = 0.5$ . 同时, 引入退化因子  $d$  描述  $t \rightarrow \infty$  时的边界条件, 即

$$\begin{aligned} \rho_\infty &= \rho_0 / (1 + d), \quad s_\infty = s_0 / (1 + d), \\ \epsilon_{f\infty} &= (1 + d) \epsilon_{f0}. \end{aligned} \quad (5)$$

这一描述表明, 随着空间辐照时间增加, 帆面的反射率逐渐下降, 而发射系数会逐渐增加. 此时可以写出太阳帆光学系数的解析演化律<sup>[4]</sup>

$$\rho(t) = \rho_0 (1 + d e^{-\lambda \Sigma(t)}) / (1 + d), \quad (6a)$$

$$s(t) = s_0 (1 + d e^{-\lambda \Sigma(t)}) / (1 + d), \quad (6b)$$

$$\epsilon_f(t) = \epsilon_{f0} [1 + d(1 - e^{-\lambda \Sigma(t)})]. \quad (6c)$$

进一步, 非理想反射太阳帆模型涉及的前述 3 个函数  $a_i (i=1, 2, 3)$  也都是含时演化的. 相应地, 我们最终可以得到描述太阳帆整体运行性能的两个物理量, 特征光压加速度  $a_c$  和光压数 (lightness number)  $\beta$  的演化形式

$$a_c(t) = \frac{2P_0 A}{m} (a_1(t) + a_2(t)), \quad (7a)$$

$$\beta(t) = \frac{a_c(t)}{\mu / r_0^2}. \quad (7b)$$

其中,  $\mu / r_0^2 \approx 5.930$  mm/s<sup>2</sup> 是 1 AU 处太阳的引力加速度.

根据式(2), 我们还可以导出太阳帆航天器在  $\alpha=0^\circ$  的轨道阶段受到的光压推力

$$F_{\text{SRP}}(t) = 2P_0 A (a_1(t) + a_2(t)). \quad (8)$$

可以看出, 3 者的演化都正比于  $a_1 + a_2$ . 对于理想反射太阳帆,  $a_1 + a_2 = 1$ , 因此其性能和推力没有任何演化, 这种近似对于实际的飞行任务设计显然是过于粗糙了.

## 2 计算结果及讨论

对探月太阳帆航天器在轨运行 10 年的计算结果如图 3 所示. 从图上可以看出, 太阳帆的光学系数比初值有明显的退化, 从而引起总推力、特征加速度和光压数的不可忽略地降低. 这表明, 在复杂的空间环境中长期运行(太阳帆是目前最有希望实现星际航行的动力机制), 太阳(恒星)的辐照因素对精确的轨道设计和优化是必须考虑的.

这一参数化分析结果的有价值启发是: 若太阳帆性能按此规律演化, 则轨道设计可以采取分阶段策略, 即前期太阳帆性能快速演化阶段和后期性能稳定阶段.

## 3 空间环境中太阳帆轨道演化实例

为了研究空间环境中太阳帆航天器的轨道演化, 我们考虑一种简单的情形. 太阳帆航天器在轨运行时, 主要受到太阳、地球和月球的引力; 由于光压的推力, 会在太阳和地-月之间形成一系列人工拉格朗日点(人工  $L_1$  点)<sup>[1,3]</sup>. 假设将上述参数的太阳帆航天器定位于该点, 并研究它的位置受空间环境辐照时的漂移特性.

这是一个圆型限制性三体问题. 采用无量纲形式, 地-月系质量为  $\mu = 3.04 \times 10^{-6}$ , 太阳质量为  $1 - \mu$ <sup>[6]</sup>. 在旋转坐标系中, 太阳帆的运动方程可以写为<sup>[7]</sup>

$$\ddot{\mathbf{r}} + 2\boldsymbol{\omega} \times \dot{\mathbf{r}} = \nabla V + \mathbf{a}, \quad (9)$$

其中,  $\boldsymbol{\omega}$  为旋转坐标架的角速度,  $\mathbf{r} = [r_x \ r_y \ r_z]^T$  是太阳帆航天器相对太阳-地(月)系质心的位置矢量;  $\mathbf{a}$  是太阳光压加速度;  $V$  为有效势. 人工  $L_1$  点满足条件

$$\ddot{\mathbf{r}} = \dot{\mathbf{r}} = 0; \quad r_y = r_z = 0. \quad (10)$$

此时, 我们导出有效势可以表示为

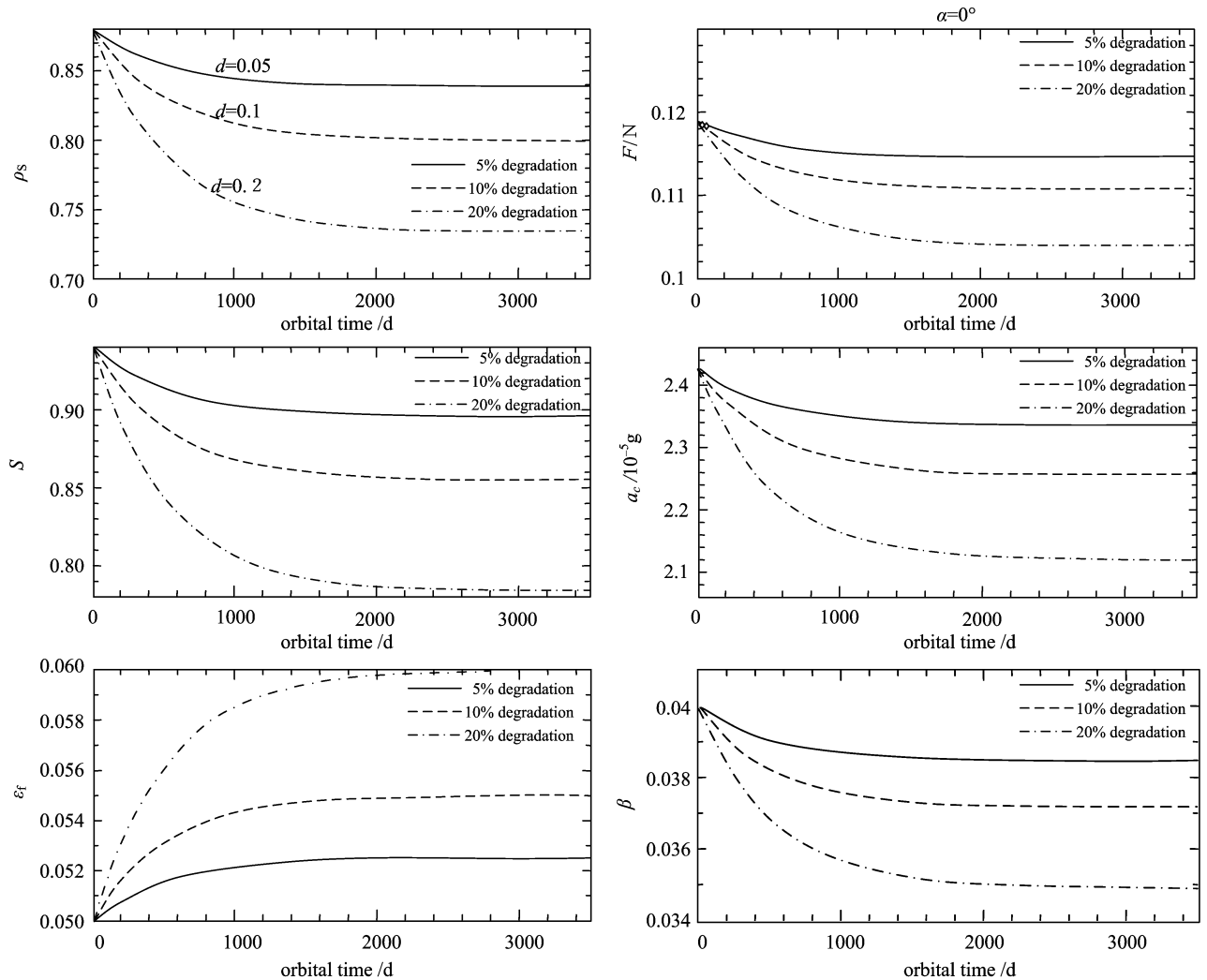


图 3 太阳帆的光学系数演化, 以及总推力、特征加速度(以  $10^{-5}$  地球重力加速度为单位)和光压数的演化

Fig. 3 Temporal evolution for the optical coefficients, total propulsion, characteristic acceleration (in unit of  $10^{-5}$  of Earth's gravitational acceleration) and lightness number of the solar sail spacecraft

$$V = \frac{1-\mu}{\mu+x} + \frac{\mu}{1-\mu-x} + \frac{1}{2}x^2. \quad (11)$$

通过数值求解运动方程(9), 就可以得到具有前述参数的太阳帆航天器人工  $L_1$  点位置与光压数(无量纲化的光压加速度)的关系  $x = x(\beta(t))$ . 这里光压数  $\beta$  由于空间环境辐照而随时间演化, 从而使人工  $L_1$  点位置产生一定程度的漂移.

图 4 给出了空间环境退化因子分别取 5%(实线), 10%(虚线)和 20%(点线)时, 在轨运行 10 年的太阳帆航天器人工  $L_1$  点位置(相对太阳)的漂移. 计算结果表明, 虽然太阳帆航天器始终保持在地月空间飞行( $1 \text{ AU} = 1.496 \times 10^8 \text{ km}$ ), 但空间环境对轨道漂移的影响达到  $10^4 \sim 10^5 \text{ km}$ . 因此, 对于高精度的轨道设计和控制, 空间环境的影响不能忽略. 同

时, 我们发现随着光压数的减小, 太阳帆航天器人工  $L_1$  点的位置缓慢远离太阳, 这和 Baoyin 与 McInnes 的最新研究工作结论是一致的<sup>[3]</sup>.

## 4 结论与展望

本文采用参数化 OSSD 方法<sup>[4]</sup>对探月太阳帆航天器长期在轨运行性能的演化进行了研究. 我们的工作表明, 理想太阳帆模型不适用于在实际空间环境中飞行任务的研究. 尽快开展太阳帆样品材料的空间和地面模拟辐照实验对未来的研究至关重要.

另外, 本文初步分析采用的单一均匀平坦太阳帆可能偏简单化. 基于结构和姿态控制等考虑, 实际设计的太阳帆航天器可能采用弯曲复杂的几何结构; 帆面也不会是单一的, 可能由几部分组成, 其间

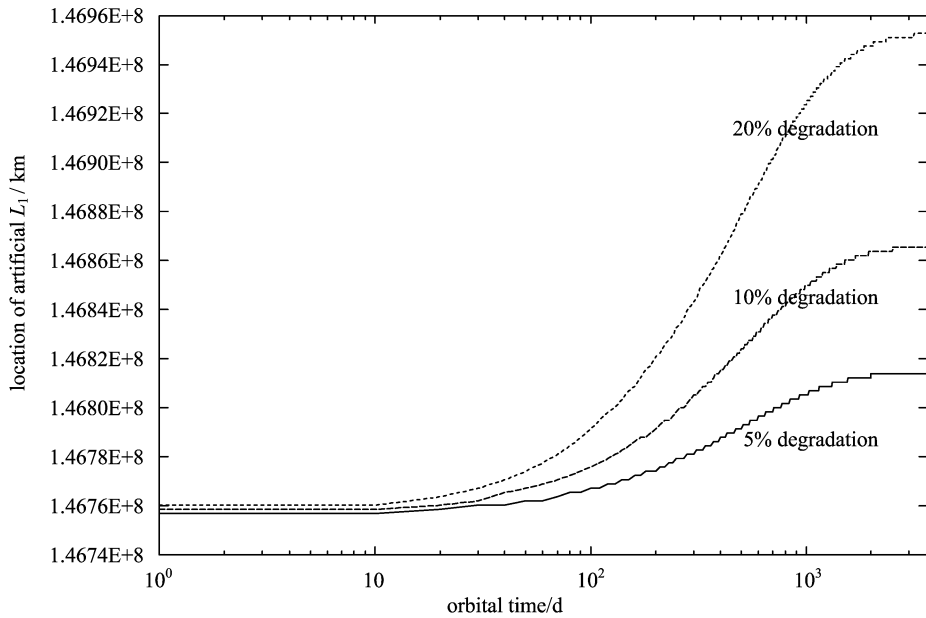


图 4 3 种不同空间环境退化因子下太阳帆航天器人工  $L_1$  点位置(到太阳距离)的漂移

Fig. 4 Location drift of solar sail artificial  $L_1$  point due to three different degradation factors of space environment

根据工程需要布设支架,展开机构,控制单元和有效载荷,等等.我们下一步的工作是针对这些实际问题构建复杂的数学模型,研究其光压推力、力矩和空间环境性能退化,并探索相应的深空探测轨道最优控制律.

**致谢** 这一工作得到了德国航天中心(DLR)专家 Bernd Dachwald 教授的热情帮助,在此表示衷心感谢!

#### 参考文献(References)

- [1] McInnes C. Solar Sailing: Technology, Dynamics and Mission Applications [M]. Berlin: Springer-Praxis, 1999.
- [2] 刘林. 借助光压将探测器推向月球[J]. 天文学报, 2001, 42(1): 70-74.

- [3] Baoyin H, McInnes C R. Solar sail halo orbits at the Sun-Earth artificial  $L_1$  point [J]. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2006, 94: 155-171.
- [4] Dachwald B, Mengali G, Quarta A, et al. Parametric model and optimal control of solar sails with optical degradation [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, 29: 170-178.
- [5] Wright J. Space Sailing[M]. Philadelphia: Gordon and Breach Science Publishers, 1992.
- [6] LIU Lin. An Introduction of Astrodynamics [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2006: 216.  
刘林. 航天动力学引论[M]. 南京: 南京大学出版社, 2006: 216.
- [7] McInnes C R, McDonald A J C, Simmons J F L, et al. Solar sail parking in restricted three-body system [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1994, 17(2): 399-406.