

# 太阳帆推进

张敏贵, 陈祖奎, 靳爱国

(陕西动力机械设计研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 太阳帆依靠反射太阳光光子产生推力, 在飞行任务的整个过程推力连续作用于飞行器上而不需要任何推进剂。太阳帆可广泛应用于低成本大速度增量的太阳系飞行任务, 具有其它推进系统无法替代的优点。简要介绍了太阳帆推进的机理及研究现状, 给出了太阳帆飞行器的主要性能参数及需要解决的主要技术关键。

**关键词:** 太阳帆; 飞行器; 光子

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2005)03-0035-04

## Solar sail

Zhang Mingui, Chen Zukui, Jin Aiguo

(Shaanxi Power Machine Design and Research Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Solar sails reflect photons streaming from the sun and convert some of the energy into thrust. This thrust, though small, is continuous and acts for the life of the mission without the need for any propellant. Solar sails provide a wide range of opportunities for low-cost large V-requirements interplanetary missions with many of which may be difficult or even impossible to be carried out with other types of spacecraft propulsion systems. Mechanics and state-of-the-art of solar sail are introduced briefly. The performance parameters and key technology are presented.

**Key words:** solar sail; spacecraft; photon

## 1 引言

长期以来, 人们不断地提出了进入空间和探测空间的新的推进方案与途径, 并开展了不懈的探索性研究, 部分已取得了可喜的成果<sup>[1]</sup>, 太阳帆就是其中一种很有前景的推进技术。太阳帆推进

又称太阳帆, 是一种利用太阳光的压力进行太空飞行的航天器。在没有空气阻力的宇宙空间中, 太阳光光子会连续撞击太阳帆, 使太阳帆获得的动量逐渐递增, 从而达到要求的加速度。太阳光实质上是电磁波辐射, 主要由可见光和少量的红外光、紫外光组成。光具有波粒二象性, 光对被照射物体所施的压力称为光压, 光压的存在说明

收稿日期: 2005-01-24; 修回日期: 2005-05-23。

作者简介: 张敏贵(1965—), 男, 博士, 高工, 研究领域为液体火箭发动机。

电磁波具有动量。太阳帆的动力来自于太阳粒子。尽管这些粒子的撞击力非常微弱，但它们却是持续不断的并且遍布宇宙空间，且不需要任何推进剂<sup>[2]</sup>，所以可以利用它进行空间探测和太空旅游。

著名天文学家开普勒在400年前就曾设想不要携带任何能源，仅仅依靠太阳光能就可使宇宙帆船驰骋太空。但太阳帆飞船这一概念到20世纪20年代才明晰起来。1924年，俄国航天事业的先驱康斯坦丁·齐奥尔科夫斯基和其同事弗里德里希·灿德尔明确提出“用照到很薄的巨大反射镜上的阳光所产生的推力获得宇宙速度”。正是灿德尔首先提出了太阳帆——一种包在硬质塑料上的超薄金属帆的设想，成为今天建造太阳帆的基础。

## 2 太阳帆推进的机理<sup>[3~4]</sup>

早在人们获得一束光并测量出它能产生多大推力之前，就有人预测光对照射的物体会产生微小的推力。Maxwell发现了电磁波的规律，并推断出光也是一种电磁波。Maxwell预测当光照到物体上并被物体吸收或发射时，光波会推动物体表面的电荷，进而推动物体其余部分的电荷。如果光在物体表面进行反射，那么物体可得到两倍大小的推力。美国人 Nichols 和 Hull 以及俄罗斯人 Lebedev 根据 Maxwell 的推测测量出了光压。

由于太阳光子的动量转移使得作用在太阳帆上的太阳辐射压力 (SRP) 的大小和方向完全由太阳与帆的距离  $r$  和帆的姿态所决定。姿态通常表述为法向量  $\mathbf{n}$ ，其方向一般用帆时钟角  $\alpha$  和帆锥角  $\beta$  表述。作用在平板上的力以及作用在帆表面中心的太阳辐射压力  $p$  完美地反射到面积为  $A$  的太阳帆上，由几何关系可得总的 SRP 力  $F_{\text{SRP}}$ ，可以很容易地算出：

$$F_{\text{SRP}} = 2pA\cos^2 \beta \mathbf{n}$$

因此，在理想反射情况下，推力总是沿着帆的法向  $\mathbf{n}$  的方向。在 1AU（一天文单位里，地球到太阳的平均距离）时，太阳辐射压力为  $p_0 = 4.5631 \text{ N/m}^2$ 。因为，作用在太阳光线法向的理想帆上的有效压力（每单位面积上的力）为两倍的太阳辐射压力， $2p_0 = 9.1262 \text{ N/m}^2$ 。然而，实际的太阳帆不是完全的反射器，所以一个完整

的弹道分析必须考虑实际太阳帆的光学特性。在这种情况下一小部分也是很重要的一部分进入的太阳光被吸收或者非镜面反射，一个切向力分量作用在实际的太阳帆上，因此， $F_{\text{SRP}}$  不再沿着  $\mathbf{n}$  的方向。作为初步的任务分析，这个切向分量可以忽略，因为， $F_{\text{SRP}}$  在帆的法线方向很小的角度偏差可以由星际转移轨道中帆的控制策略而得到补偿。但是，由于载荷作用在帆上的变形和扭曲导致非理想反射引起的  $F_{\text{SRP}}$  大小的变化，必须考虑帆的效率参数  $h$ 。假设一个保守的帆的效率为  $h=0.85$ ，可以得到

$$p_{\text{eff}} = 2hp_0 = 7.757 \text{ N/m}^2$$

这就是作用在帆上太阳线法向 1AU 的有效压力，而且可得到离太阳距离为  $r$  的相应的 SRP 力为

$$F_{\text{SRP}} = p_{\text{eff}} \left( \frac{1\text{AU}}{r} \right)^2 A \cos^2 \beta \mathbf{n}$$

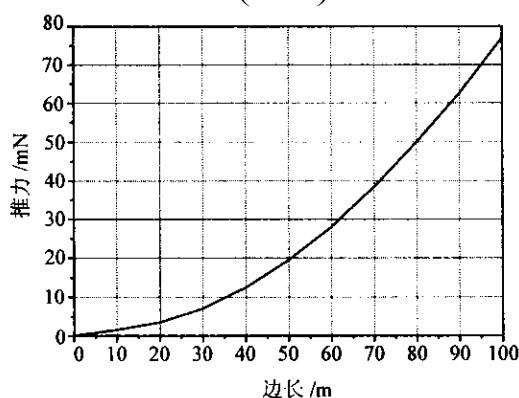


图 1 太阳帆产生的推力与帆边长的关系

Fig.1 The relationship between thrust and solar sail edge length

一个正方形太阳帆产生的推力与帆边长的关系见图 1。由于这种推力很小，所以不能用太阳帆使航天器从地面起飞，但在没有空气阻力存在的太空，这种小小的推力仍然能为有足够帆面面积的太阳帆提供  $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ g}$  左右的加速度。如先用火箭把太阳帆送入低轨道，则凭借太阳光压的加速，它可以从低轨道升到高轨道，甚至加速到第二、第三宇宙速度，飞离地球，飞离太阳系。如果帆面直径为 300 米，可把 0.5 吨质量的航天器在 200 多天内送到火星；如果直径大到 2000 米，可

使 5 吨质量的航天器飞出太阳系。

由以上可知, 要得到一个理想的加速度, 太阳帆航天器必须足够大而且很轻。

### 3 太阳帆飞行器的性能参数

太阳帆飞行器的性能参数有: 太阳帆总体载荷、太阳帆飞行器载荷、特征加速度、轻巧数等。

(1) 太阳帆总体载荷

$$\mathbf{s}_s = \frac{m_s}{A} \quad (1)$$

定义为单位面积帆的总质量 (帆及存储、打

开和张开帆所需的结构质量), 因此, 帆总体载荷为太阳帆性能及结构设计有效性的关键参数。

(2) 太阳帆飞行器载荷

$$\mathbf{s} = \frac{m}{A} = \frac{m_s + m_p}{A} = \mathbf{s}_s + \frac{m_p}{A} \quad (2)$$

相应地定义为帆船的比质量 (包括有效载荷), “ $p$ ” 代表的是除太阳帆总质量以外的整个帆船质量。

(3) 特征加速度

定义为一天文单位里 (AU) 的距离里的最大加速度, 它可按下式计算:

$$p_{\text{eff}} A = m a_c = \mathbf{s} A a_c = \left( \mathbf{s}_s + \frac{m_p}{A} \right) A a_c \Rightarrow a_c = \frac{p_{\text{eff}}}{\mathbf{s}_s + m_p / A} \quad (3)$$

利用特征加速度, 作用在帆上的 SRP 力可以写为:

$$F_{\text{SRP}} = m a_c \left( \frac{1 \text{ AU}}{r} \right)^2 \cos^2 \theta \mathbf{b}_n \quad (4)$$

(4) 轻巧数

它和太阳的距离无关, 定义为垂直于太阳线的太阳帆的 SRP 加速度与太阳的重力加速度 (在 1AU 的距离里为  $5.93 \text{ mm/s}^2$ ) 之比。

$$I = \frac{a_c}{5.93 \text{ mm/s}^2} \quad (5)$$

利用轻巧数, 作用在帆上的 SRP 力可以写为:

$$F_{\text{SRP}} = I \frac{m}{r^2} \cos^2 \theta \mathbf{b}_n \quad (6)$$

其中  $m$  为太阳中心的万有引力常数,  $m = GM_{\text{sun}}$

### 4 太阳帆推进的主要应用及关键技术

由于可自由利用太阳的辐射压力作为推进动力, 太阳帆可提供很宽范围的低成本星际飞行, 这些飞行需要大的速度增量, 用其它常规的飞行器很难甚至不可能实现。这些高能任务中的绝大多数适合进行科学研究, 比如水星任务和高度倾斜或逆行轨道的近地目标 (小行星和短周期彗星)。在太阳系内部 (包括主要的小行星带), 太阳帆飞行器由于其无限的速度增量特别适合于多飞行会合和返回任务。

文献[2]提出了第一代具有合适性能的太阳帆

飞行器 (例如加速度为  $0.1 \sim 0.2 \text{ mm/s}^2$ , 这似乎代表了一种典型高能量星际飞行的可用加速度的更低的边界)。德国航空航天研究院 (DLR) 的弹道计算表明以相对低的费用挑战这项任务是可行的, 那就是研制第一代性能适当的太阳能飞行器。表 1 示出了太阳系内部太阳帆的最小转移时间。

表 1 太阳系内部太阳帆的最小转移时间

Tab.1 Minimum transfer times to the inner planets for solar sailcraft

目标体	转移时间 (yr)		
	$a_c = 0.10$ /( $\text{mm/s}^2$ )	$a_c = 0.15$ /( $\text{mm/s}^2$ )	$a_c = 0.20$ /( $\text{mm/s}^2$ )
水星	8.3	5.9	4.2
金星	4.6	2.9	2.0
火星	9.2	7.5	5.1

DLR 近期和中期目标水星任务的太阳帆飞船: 近期目标使用的太阳帆加速度为  $a_c = 0.10 \text{ mm/s}^2$ , 从地球到水星需要 3603 天 (9.86 年); 远期目标使用的太阳帆加速度为  $a_c = 0.55 \text{ mm/s}^2$ , 从地球到水星需要 571 天 (1.56 年), 由于加速度增加使地球到水星的转移时间大大缩短, 这是由于帆的尺寸加大所致, 而帆尺寸加大会使帆的研制难度增加。

太阳帆推进的关键技术有: 制造低总体载荷 ( $10 \text{ g/m}^2$  或更低) 的大型帆 (100m 级) 技术; 导

航及姿态控制技术;长寿命(5至10年)的系统及部件研制。

## 5 太阳帆推进研究现状

主要的研究机构有:俄罗斯巴巴金空间研究中心、俄罗斯空间研究所、欧洲航天局(ESA)、DLR和英国格拉斯哥大学(University of Glasgow)等俄罗斯在利用太阳光能作为航天动力技术上率先迈出了一步。莫斯科时间2004年7月20日4时31分,俄罗斯在巴伦支海成功进行了“宇宙-1”号太阳帆飞船的发射实验。它是人类历史上第一艘实验型太阳帆飞船,“宇宙-1”号太阳帆由国际行星协会与俄罗斯巴巴金科学研究中心共同研制。此次发射升空进行飞行试验的目的,主要是测试形如花瓣的两个太阳帆能否在太空中顺利打开并产生动力,检验现行方案的合理程度,并为更远距离的航行提供借鉴,探索将来进行星际旅行的可能性。弹头在液体燃料发动机的推动下,进入远地点约1200公里的太空轨道后,飞船与弹头分离,并缓缓地张开了两个花瓣状、总直径约26米的太阳帆。这艘太阳帆飞船在近地轨道飞行约25分钟后,按预定计划返回了地球,并准确降落至俄堪察加半岛。俄罗斯、美国、德国和法国的专家在距离发射水域约3海里的考察船上,仔细观察了宇宙1号的此次出航,专家们认为,测试进行得非常成功。

德国航空航天研究院(DLR)于1999年12月进行了20m×20m的太阳帆地面演示试验。目前DLR正在和欧洲航天局(ESA)合作进行太阳帆飞船的下一步研究,他们制定了一个从2002~2014年的12年详细研究计划,主要研究内容包括:地面展开演示、轨道展开演示、自由飞行演示、深空科学探测等,总经费达1亿欧元。

目前,美国也在进行太阳帆航天器的研究,并为选择太阳帆的制造材料进行了大量测试工作,探讨了发射问题和太阳帆在太空展开问题。美国航天局预计,于2010年成行的太阳帆航天器将历经15年以上的航程,飞行37亿公里,直至太阳系边缘。与此同时,美国德克萨斯一家名为Team Encounter的公司也宣布,他们正着手研制被

其称为“人类第一艘星船”的太阳帆,大小相当于一个足球场。公司负责人介绍,这艘“星船”计划于2005年升空,届时巨大的太阳帆将推着“星船”穿越太阳系,进入外太空。美国国家海洋和气候管理局也正在研究在地球极地上空的气象卫星上使用太阳帆的可行性。目前,美国专家正在俄罗斯科学家的协助下研制一种可能会用于今后载人火星飞行任务的太阳帆。

## 6 结论

太阳帆推进是直接利用光子的动量产生推力,无需推进剂。由于来自太阳的光线提供了无穷无尽的能源,因此,远距离的太空旅行使用太阳帆比使用传统的火箭推进器要更胜一筹。使用太阳帆可以实现长期太空飞行,可用于长期轨道驻留飞行器(如星球通讯与资源勘察卫星、星球空间站等)的姿态与轨道机动控制或者恒星系内长期飞行的太空探测器的主推进上。但要获得足够的推力需要超大面积的帆,这就需要解决超薄超轻的薄膜材料制备技术、超大面积薄膜的空间展开与结构支撑技术以及姿态控制技术等。

从太空旅行成为现实的那一天起,人类通往宇宙一直以来只有一种方式,那就是依靠常规化学火箭推进器。科学技术的发展是人类不断探索、不断创新的结果。俄罗斯“宇宙-1”号太阳帆飞船的发射成功使人们看到了人类使用太阳帆进行载人航行与深空探测的曙光。可以预期,人类使用太阳帆遨游太空的那一天已经为时不远了。

### 参考文献:

- [1] 刘红军.新概念推进技术及其应用前景[J].火箭推进,2004,(8).
- [2] McInnes C.R. Solar Sailing Technology [M]. Dynamics and Mission Applications. Springer-Praxis,1999.
- [3] Wolfgang Seboldt. Bernd Dachwald. Propulsion 2000 Program Phase II—Solar Sail[R].2003.
- [4] David Lichodziejewski. etc. Bringing an Effective Solar Sail Design Toward TRL6[R].AIAA 2003-4659.

(编辑:侯 早)