

太阳帆推进技术研究现状及其关键技术分析

陈 健, 曹 永, 陈 君
(北京控制工程研究所, 北京 100080)

摘 要: 详细阐述太阳帆推进技术作为深空探测的技术方面的应用优势、技术特征、工作原理, 总结了国外对太阳帆推进技术研究的历史发展和研究现状, 并对太阳帆推进的关键技术进行分析, 在此基础上, 提出了我国发展太阳帆相关推进技术的必要性、发展策略和途径。

关键词: 太阳帆; 深空探测; 关键技术

中图分类号: V439

文献标识码: A

文章编号: (2006) 05-0037-07

Current status of solar sail propulsion and analysis of its key techniques

Chen Jian, Cao Yong, Chen Jun
(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100080, China)

Abstract: In this paper the application advantages, technical characters, work principle of solar sail propulsion as deep exploration spacecraft are expatiated. And its history of development, current status are summarized and the key techniques are analyzed. According to our technical base, the necessity of development and the strategy and approach on the technique are brought forward.

Key words: solar sail; deep exploration; key techniques

1 引言

星际旅行的最佳方法是使航天器不携带大量

推进剂, 而是从空间环境中不断获得动力, 由此产生了类型多样的新概念“空间帆”, 其基本的共同点就是利用电磁波(太阳光、人工调制的激光或微波)或太阳风与航天器的动量交换来获得

收稿日期: 2006-06-19; 修回日期: 2006-07-18。

作者简介: 陈健(1969—), 男, 高级工程师, 研究领域为卫星推进技术。
万方数据

动力。目前,“空间帆”的研究主要有:太阳帆、激光帆、微波帆、磁帆和等离子帆。前三种的原理与结构类似,属于光压(电磁波)推进,磁帆和等离子帆较特殊,属于磁层推进。综合考虑推进性能和现有实用技术,其中太阳帆是最简单、最易实现的一种设想,特别适用于太阳系内的行星际探测。另外,太阳帆也可完成过去一些无法实施的任务,如沿非开普勒轨道绕地球或太阳运行,或发射有商业价值的极地通信卫星。

太阳帆的概念在1899年的一部科幻作品中首次提出。1924年,世界宇航先驱齐奥尔科夫斯基提出宇宙中光子的压力可以成为航天器的动力,同年Fridrikh·Tsander给出了轻型太阳帆的设计,即覆盖金属的塑料薄膜。1976年,美国喷气推进实验室就曾提出大规模实验太阳帆的计划,但NASA认为这一方案的风险太大,从而中止了太阳帆的研究。2001年7月,美国行星学会、宇宙影视公司和俄罗斯巴巴金宇航中心、马克耶夫设计局合作研制了“宇宙-1”号太阳帆试验航天器,在进行的第一次发射试验时,因航天器没有与运载火箭第三级成功分离而导致失败,2005年的第二次发射也失败。但是,随着微电子技术和材料科学的飞速发展,一直在探索更快、更好、更便宜的空间飞行方式的美国航天部门又将目光投向太阳帆计划。

太阳帆推进的机理是利用太阳光的光压产生推力进行宇宙航行^[1],考虑每个光子的动量 I 为:

$$I = h \cdot \nu / c$$

式中, h 为普朗克常数; ν 为光波频率; c 为光速。

如果每秒钟有 N 个光子垂直撞击在物体上,并被完全反射回去,则物体获得的动量增量(即光压)为 $2N \cdot h \cdot \nu / c$ 。在地球附近,绝对黑体受到的太阳光压为 $p_0 = 4.57 \times 10^{-6} \text{N/m}^2$ 。如果太阳光以 θ 角照射在面积为 S 的太阳帆上,并被反射回去,则太阳帆产生的推力为:

$$F = 2p_0 S (R_0 / R)^2 \cos\theta$$

式中, R_0 为地球到太阳的距离; R 为太阳帆到太阳的距离。

按照上述公式,如果帆的面积为2平方米,

则太阳光只能产生1毫克推力。这种推力虽然很微小,但在没有空气阻力的太空,却会使太阳帆不断加速,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。根据计算,直径为300米的太阳帆,可使重0.5吨的航天器在200多天内飞抵火星。

为了使太阳能提供足够的光压,太阳帆必须尽可能多地捕着到太阳光,这就意味着帆的面积必须足够大,从理论上说,行星际太阳帆飞行100天后,速度达40km/s,3年后达400 km/s,不出5年就能到达冥王星,而使用化学推进的美国“新地品平线”探测器计划要用9年时间。但是,离太阳越来越远,一旦飞出木星轨道,太阳光压就会非常弱,加速度变小,未来太阳帆要带着人类飞往其它恒星星系,科学家提出了用激光推动其前进的原理设想,到距离地球4.3光年的“半人马座”的恒星星系,只需数十年,而“先驱者”和“旅行者”探测器却需要8万年。

2 太阳帆研究现状^[2-4]

2.1 NASA支持的太阳帆研究项目

近年来,在NASA的戈达德空间飞行中心(GSFC)、喷气推进实验室(JPL)、兰利研究中心(LaRC)、马歇尔空间飞行中心(MSFC)和NASA先进概念研究所均有太阳帆项目,NASA空间技术公司(Code R)和NASA空间科学办公室(Code S)则致力于太阳帆工艺的研究、任务研究与任务分析。

2.1.1 LaRC的研究工作

(1) 太阳帆地面试验台

1/5到1/4的比例制造40~50m级别、10~20g/m²的太阳帆,进行地面展开试验和结构评定,采用了四根支撑、正方形的帆体设计,如图1所示。

(2) 刚性支撑试验

目标是建立试验验证的展开/刚性支撑分析模型,从而可靠地预测未来的太阳帆支撑结构的结构力学、动力学及热响应。

(3) 太阳帆材料的研发

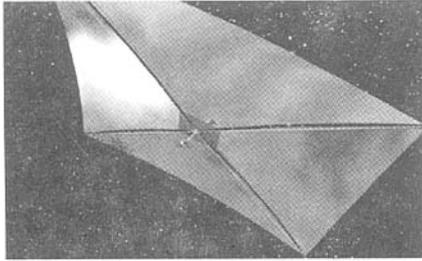


图 1 正方形太阳帆

Fig.1 Square solar sail

发展具有适当综合性能的超薄（小于 $7\mu\text{m}$ ）的聚合材料薄膜，以满足近期（40m 级别， $10\sim 20\text{g}/\text{m}^2$ ）和远期（100m 级别， $5\sim 10\text{g}/\text{m}^2$ ）任务需求。

(4) 超轻超薄航天器的研究计划

这项 NASA Code S 的新计划旨在发展超大超轻和多孔结构的远期技术，以使 NASA 提出更有挑战性的新探测计划，诸如寻找绕恒星运行的行星上的生命迹象和用光束使空间帆飞离太阳系等。该项目希望通过在结构、材料、光学设计和多功能自适应系统方面的革新措施，发展非常规技术，从而在增强任务能力和降低成本上实现突破，实现 NASA 远期目标。

2.1.2 MSFC 空间帆项目

(1) 先进空间运输计划 (ASTP)

ASTP 是“空间推进” (ISP) 计划的一部分，由 Code S 管理，MSFC 执行。在 2001 财年，由 NASA 各中心、其他政府组织、高校和工业界共同参与，建立了太阳帆技术工作组，其宗旨是确定太阳帆技术途径和发展规划，计划不久进行太阳帆分系统可行性飞行验证试验。

(2) MSFC 内部的研究工作

2001 年，MSFC 内部开展的研究工作包括：鉴定和测试 ESLI 的新型碳纤维；光子与材料相互作用的物理模型；激光与帆体材料的相互作用；各种超薄膜的物理性质测量以及在国际空间站对薄膜进行空间飞行试验 (MISSE)。空间环境效应课题组研究了测定薄膜上光子压力的方法。测得的光压力与理论计算值的误差在 7% 以内。还对各种候选太阳帆材料进行了空间环境影响试

验，并送到地球同步转移轨道 (GTO) 上进行测试和评估。

2.1.3 JPL 太阳帆项目

(1) 环形帆

如何获得简单可靠的展开效果是大多数太阳帆方案面临的关键问题。这种“嵌套环”结构的太阳帆用轻巧的结构把一个置于小型容器中的折叠好的巨大帆体从压缩状态展开并去掉了褶皱，因此很可能在太阳帆三轴稳定方面有所突破。

环形帆把帆体结构固定在大量由很轻的管构成的环上，以保持帆膜的张力。大量的圆环在各自的边界处以嵌套方式联结为一体，仅靠自然的反弹力就可展开，而且可以装进很小的容器中，如图 2 所示。所有环体可以以折叠方式收入辊状容器，靠弹簧的张力使帆体展成一个由多个环帆组成的阵列平面。这样的帆体未折叠或被弄皱，因此不用为了拉平帆体而施加较大的表面张力。在 MSFC 资助的先进推进概念项目中，用程控激光焊，联接不锈钢管的方法制成了嵌套环原型，框体结构的面密度为 $5.5\text{g}/\text{m}^2$ 。该原型在 KC-135 飞机上作了近零重力条件下的动力学展开试验并获得了成功。

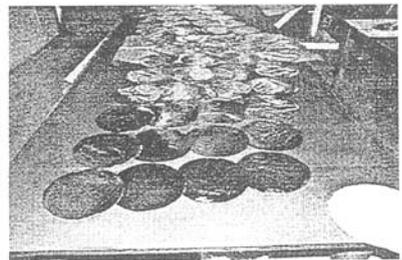


图 2 嵌套环型太阳帆

Fig.2 Nesting ring-style solar sail

(2) 旋转太阳帆的研发

在展开时，帆体（占整个飞行器质量的 50%）从压缩折叠状态到完全展开成为超薄帆膜的过程中必须承受极端的受力变化。这项工作的重点是进行初步的设计、分析模拟以及为星际探测任务演示旋转太阳帆的方案。

(3) 挥发性膜材料

为了便于保护、加工、包装和展开太阳帆帆

体,使用挥发性材料的考虑由来已久。这一概念是用较厚的聚合物膜支撑和展开较薄的太阳帆膜,然后逐渐在太阳光下分解蒸发,从帆体上分离开,使帆体只剩下很小的质量。

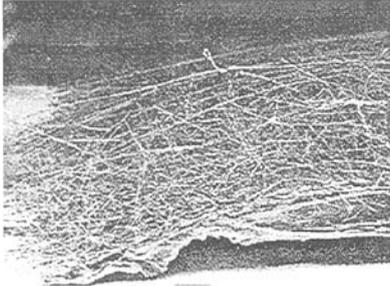


图3 碳纤维微桁架

Fig.3 Carbon fibre tiny joist

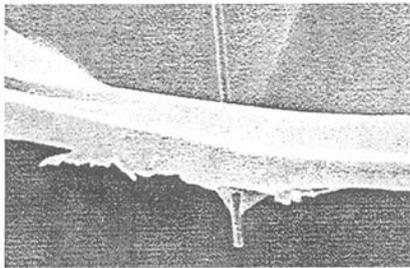


图4 碳质帆膜

Fig.4 Carbon sail film

(4) 碳纤维微型桁架

能源科学试验室采用轻质难熔的碳材料,对碳纤维太阳帆进行探索性研究。帆体结构由三维纤维状的微型桁架组成,表面覆盖碳薄膜以减少吸收,如图3、4所示。这类材料质地坚硬,减少了超薄帆飞行器对加强肋结构的需求,帆体可以靠自身的弹性从卷曲和打褶状态展开。

(5) 帆体支撑架

该项目针对7米等距格栅型管材进行了用于太阳帆的可膨胀刚性管材技术的研究,演示了其展开和膨胀硬化过程,还进行了一些太阳帆的应用与方案改进的研究。

2.2 欧洲的太阳帆项目

根据与洛克希德·马丁公司的合同,格拉斯哥大学对一项性能要求较低的小型太阳帆方案进行了研究(GEOSAIL)。GEOSAIL任务采用了

40m×40m的太阳帆,使小型空间有效物理载荷保持在地球磁场的尾部。

格拉斯哥大学还和欧洲空间局签有概念研究的合同。现有的SEP任务概念,如COLOMBO水星轨道探测器,在重新设计之后决定采用太阳帆推进。对于到达水星轨道这一任务,采用太阳帆方案后发射质量可能减小50%,大幅降低发射成本。除了这些针对未来任务的概念研究外,还评估了一项总发射质量40kg的小型太阳帆项目(ESA PROBA系列技术试验项目中的第二项)。

欧洲对硬件的研究集中在20m×20m太阳帆的地球轨道展开试验,与德国宇航中心(DLR)在1999年12月进行的地面试验类似。

DLR一直在进行太阳帆的可膨胀结构在轨演示试验(ODISSEE)的概念研究,以满足一项从同步转移轨道开始,通过低推力进行盘旋式轨道提升,最终飞掠月球或进入一绕月椭圆轨道的太阳帆推进任务,以及与之类似的小行星的探测任务。

2.3 太阳帆推进系统总体研究与试验

2.3.1 卡内基-梅隆大学

卡内基-梅隆大学(CMU)建立了太阳帆模型并设计了称为太阳翼(Solar Blade)的低成本太阳帆验证方案。该方案结合了纳卫星技术,采用小型太阳帆来减轻飞行器的质量,针对任务需求设计了80m直径的直升机旋翼式太阳帆。这种太阳帆由4只超薄聚酰亚胺膜制成的40m长、1m宽的帆片组成,安装在位于中心的航天器本体上。帆片沿轴向伸展,内部植入凯夫拉纤维和肋条来增加硬度和强度。

卫星通过同时和轮流调整这些帆片相对太阳光线的角度来控制姿态和推力,重量不到7kg,在收缩状态时是一个直径0.4m,高1.2m的圆柱体,卫星和运载器作为整体发射,包括运载器的总发射质量为35kg。从运载火箭中释放出来后,运载器上的推力单元使航天器稳定并指向太阳,航天器的转速达到每分钟60转。在维持太阳方向的同时,帆体支撑装置展开,太阳帆在保持平衡的受控状态中释放出来,航天器的转速也降低到1rpm。安装在运载器上的全景广角相机摄下整

个展开过程,然后运载器与太阳帆航天器分离,缓慢地脱离轨道。太阳帆航天器则将在地球轨道上进行为期1个月的姿态调节、转速控制、轨道调整和位置保持演示。

2.3.2 行星学会的太阳帆演示项目

美国行星学会、宇宙影视公司与俄罗斯合作,计划进行太阳帆的亚轨道和完整的飞行试验。

亚轨道飞行试验的目的是演示太阳帆基本设计的展开动力学过程。俄罗斯巴巴金宇航中心完成了太阳帆的制造和容器包装。太阳帆由两片三角形的翼片组成,如图5所示,宽10.5m,长15m,用可膨胀管作支撑结构,用 $5\mu\text{m}$ 厚的聚酯薄膜作为帆的反射面,见图4。帆包在400km高度释放,此时帆管中充入由帆包中枢供应的冷气而膨胀展开,帆体的展开过程预计需要300s。

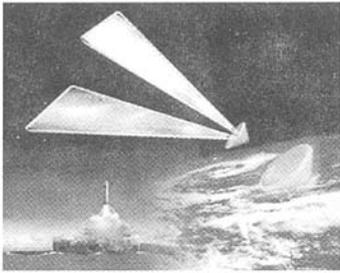


图5 2叶型太阳帆

Fig.5 2-leaf style solar sail

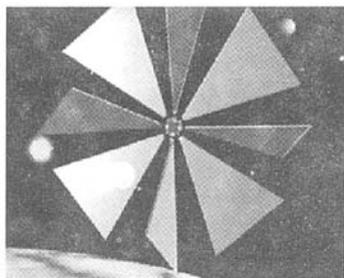


图6 8叶型太阳帆

Fig.6 8-leaf style solar sail

亚轨道试验如果成功,将进行完整的太阳帆展开验证试验(宇宙1号),如图6所示。按照两叶帆体的设计制造8叶型太阳帆,封装在40kg

的航天器中,射入高度约850km,倾角为 78° 的近极轨道,此时航天器的转速将达到10弧度/秒(约1.6转/秒)。经过300s的帆体内加压和展开过程后,太阳帆便停止转动,帆板能够以每秒1度的速度倾斜,从而控制飞行方向。帆板安装在2块甲板上,每甲板装4片帆体,各帆体相隔45度。在完全展开之后,太阳帆直径可达30m,面密度约为 $11\text{g}/\text{m}^2$,有可能在地面上观察到。遥测信号将由美俄两国接收。

3 关键技术研究分析

分析以上国外太阳帆推进技术研究现状,目的是充分吸取国际先进经验和失败教训,为我所用,少走弯路。应在完成严谨的原理性分析和可行性论证后,对以下几项关键技术开展研究:

- 帆体薄膜的研究与工艺;
- 超轻支撑结构;
- 帆体的压缩包装与展开方案;
- 测量与试验技术;
- 太阳帆的控制方法。

3.1 超薄帆膜技术

随着超薄帆膜技术的发展,进行研究的帆体材料有很多种类,要求帆体材料自身的耐撕扯性很强,超轻($<5\text{g}/\text{m}^2$)、高强度、高反射率;并针对大面积薄膜的裁切、涂层、接合与操作,发展行之有效的低成本技术。

- 超轻太阳帆材料

目前的技术已成功地在 $0.9\mu\text{m}$ 厚聚乙烯膜上一面镀50nm的铬,另一面镀100nm的铝。背面的铬来提供高发射率,朝向太阳的正面镀的铝提供高反射率和紫外线保护。该材料稳定加热至 150°C ,收缩不到2%。

- 薄膜的纤维增强技术

用Kevlar纤维加强薄膜,使材料的抗撕扯力和可处理性显著提高,加强纤维间隔2.54cm的 $2.5\mu\text{m}$ 聚酯薄膜密度约为 $4\text{g}/\text{m}^2$ 。

- 薄膜的激光减薄技术

由于商品化薄膜厚度一般不够于用作太阳帆,可采用激光去除多余厚度。

- 自金属化薄膜

使金属再聚合物薄膜内扩散, 就形成了一个有反射性和导电性的层面, 以解决常规镀膜易于脱落及镀层易折断的问题。

- 挥发性薄膜

采用可光解的聚合物作衬底, 使金属化、帆体的折卷填装和展开变得易于操作。帆体展开后, 在日光下衬底膜会彻底挥发。

- 碳纤维薄膜

一种新颖的、厚度较大的多孔性材料, 称为微桁架纤维, 采用高强度碳纤维和细丝材料制造, 耐高温性强, 面密度的范围在 $1\sim 10\text{g}/\text{m}^2$ 。适用于微波帆和激光帆。

- 帆膜的制造技术

一般以塑料薄膜为基体, 反射面覆有铝层, 发射面覆有铬层。采用止裂加强结构, 由细纤维制造, 植入帆体或附着于衬底, 帆体上每隔一定距离就有加强筋与之结合, 以承受可能发生的撕扯力的传播。帆膜的粘接技术也很重要, 既要坚固, 又要避免增加过多的重量。

3.2 帆体设计

目前最流行的是四方型帆体设计。采用4根支撑架成交叉支撑四边形的帆体, 有4点悬挂、5点悬挂、5点分片悬挂、条纹拉紧结构和连续固定等几种帆体附着安装方案。目前研究较多的是5点分片悬挂, 具有受力均匀、帆体变形小、展开方案灵活等优点。

3.3 超轻支撑结构

关于超轻支撑结构的研究与工艺。目前较先进的技术是用碳纤维材料制作桁架机构的支撑架。具有重量轻, 强度高, 弹性好的优点, 可方便地收卷、展开。采用旋钮式压缩包装, 展开时靠材料的优良弹性自动弹出。

3.4 帆体的压缩包装

关于太阳帆的包装贮存, 如5点分片悬挂的4叶帆体, 可采用折叠-打卷包装, 3个交点均连接帆索, 用于展开、固定。

3.5 轻量帆体结构在空间的展开

关于太阳帆结构(帆体和支架)的展开研究; 可采用展开顺序如下: 支撑架缓慢从容器中

弹出, 完成后, 启动马达, 绕过支撑架外端滑轮的帆索将帆体从卷曲-折叠的压缩状态缓缓拉出, 直至张紧。

3.6 太阳帆航天器的受力情况的测量诊断技术

集成的太阳帆测量诊断技术要求太阳帆诊断系统的传感器网络的质量必须很低 (10.0kg , 5000m^2 的太阳帆要达到 2.0kg), 实现以下参数的测量和监视:

- 帆膜应力;
- 帆承受的张力;
- 桁架应力;
- 桁架和帆体的偏转;
- 桁架和帆体的固有频率;
- 太阳帆的完整性。

3.7 太阳帆的控制

目前太阳帆姿态控制的主要方案是通过质心与光推力作用中心的偏移来实现, 由安装在太阳帆中心的万向支撑架执行。

3.8 太阳帆计算模型

象太阳帆这样的大型超薄结构, 在地面进行空间环境模拟试验室很受限制, 应开展仿真研究:

- 预测和分析细长弹性支撑架、张紧的薄膜、展开与控制分系统和太阳帆系统的整体性能。
- 预测和分析环境对太阳帆航天器的影响(不均匀带电、材料物理性能的长期变化、等离子体激发效应)。

4 我国发展太阳帆推进技术的策略

随着经济和科技的不断发展, 我国航天的活动范围必然要向地球以外的空间扩展, 探索未知的宇宙。太阳帆是不需要推进剂的新概念航天器推进方式, 以太阳帆作推进系统可执行一些成本较低且技术要求不高的研究任务。除了可用作空间探测器的动力装置外, 还有其它的广泛用途, 如在高纬度绕地运行的卫星等, 国外还有人提出利用太阳帆改变威胁地球的小行星运行轨道。

(下转第46页)

表1 涂层工艺试验性能状态
Tab.1 Performance of the coating test

| 涂层厚度 | 加工孔数 | 单支涂层成本/元 | 磨损情况 |
|------|-------|----------|--------|
| 1~3 | 10左右 | 60.00 | 正常磨损 |
| 3~5 | 30左右 | 120.0 | 正常磨损 |
| 5~7 | 30~40 | 200.0 | 正常磨损 |
| >7 | | 300.0以上 | 涂层容易脱落 |

未涂层刀具每把仅加工斜孔 5~8 个

从表中可直接看出涂层厚度为 3~5 μm 的涂层铰刀在使用寿命和综合成本上占综合优势, 故被选为最终设计方案。

4 结论

选用 PVD 涂层工艺, 涂层材料为 TiN, 涂层厚度为 3~5 μm 的涂层工艺处理锥孔铰刀, 通过

设计方案改进, 可以使该专用锥孔铰刀的使用寿命提高 5~10 倍以上, 并且可以有效提高加工锥孔的表面粗糙度, 使其全面达到技术要求。

这项工艺研究方案的实施和应用, 有效减少了频繁更换刀具的过程与环节, 提高了工效, 减少了成本, 确保了产品质量。

参考文献:

- [1] 朱祖良, 编著. 孔加工刀具 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990年1月第一版.
- [2] 袁哲俊, 刘华明, 主编. 刀具设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996年6月第一版.
- [3] 王世清, 主编. 深孔加工技术 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2003年10月第一版.

(编辑: 王建喜)

(上接第 42 页)

对太阳帆的研究还可以促进我国新材料、新工艺的发展, 加强我国基础学科的建设。

在国外, 太阳帆推进技术已研究了多年, 已作过大量的理论分析和论证, 工程化正在迅速实施。从我国未来深空探测和国防现代化建设的角度考虑, 太阳帆原理简单, 易于实现, 通过系统方案的确定, 对关键技术进行研究突破, 就可实现其工程化, 研究太阳帆推进技术是完全必要的, 其工程化实施应该走循序渐进的道路:

(1) 考虑到先进性和实用性, 我国太阳帆的研究最好参照国际最流行的四方型基本布局。

(2) 太阳帆选型方案的论证应该紧密配合可能的航天任务进行, 首先应该在原理上解决太阳帆飞行器的轨道控制和姿态控制方案。

(3) 结合我国实际, 选择合适的帆体、支撑架材料和制造技术, 以降低生产成本。

(4) 对最关键的展开方案及对应的支撑架结

构和展开机构设计, 应该有充分的论证和试验, 展开的可靠性是最关键的。

参考文献:

- [1] 张敏贵等. 太阳帆推进 [J]. 火箭推进, 2005, 31 (3).
- [2] Charles Garner, et al. Developments and Activities in Solar Sail Propulsion [R]. AIAA-2000-3858, 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit.
- [3] David M Murphy, et al. Demonstration of a 10-m Solar Sail System [R]. AIAA-2004-1576, 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit.
- [4] Charles Garner, et al. Developments and Activities in Solar Sail Propulsion [R]. AIAA-2001-3234, 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit.

(编辑: 王建喜)