

国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLISHING FOUNDATION

★ ★ ★ ★  
“十四五”时期

国家重点出版物出版专项规划项目·重大出版工程

空间科学与技术研究丛书

# 深空探测太阳帆 推进技术

SOLAR SAIL PROPULSION TECHNOLOGY FOR  
DEEP SPACE EXPLORATION

刘宇飞 成正爱 黄小琦 著

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

---

图书在版编目(CIP)数据

深空探测太阳帆推进技术 / 刘宇飞, 成正爱, 黄小琦著. -- 北京: 北京理工大学出版社, 2022.8

ISBN 978-7-5763-1569-1

I. ①深… II. ①刘… ②成… ③黄… III. ①空间探测-太阳帆-太阳能推进-研究 IV. ①V514

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 141013 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68944723(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 23.5

彩 插 / 12

字 数 / 380 千字

版 次 / 2022 年 8 月第 1 版 2022 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 126.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 封 雪

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

---

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

## 前 言

亚瑟·克拉克的科幻小说《太阳帆船》：“紧紧系在悬索上的大圆盘形太阳帆，已经鼓满了宇宙间的长风，像一名斗志昂扬、整装待发的勇士。”电影《阿凡达》中，人类飞抵4光年外的比邻星所使用的巨大宇宙飞船采用了16平方千米的巨大太阳帆作为动力。刘慈欣小说《三体Ⅲ·死神永生》的“阶梯计划”中，人类举全球之力发射了一艘辐射帆飞船，此飞船经受了上千次核爆的考验，帆的面积达到50平方千米，但是只有50千克。非常有意思的是，之前很多科幻小说包括动漫里的某些内容，都会变成现实，像是预言一样。太阳帆推进技术也是这样一种充满科幻色彩的空间创新技术。20世纪70年代，美国国家航空航天局（NASA）提出利用太阳帆实现与哈雷彗星交会的方案，需要一个边长800米的正方形太阳帆。到了2010年日本就发射了一个名叫伊卡洛斯的航天器，也是世界上第一个太阳动力帆航天器，在其星际巡航阶段，部分采用了太阳光压力推进。在经过近60年后，科幻变为现实。太阳帆推进技术需要轻薄的材料、巧妙的折展结构、先进的控制，更需要的是多学科之间复杂的总体优化设计，达到质量面积比的极小化，从而使得1平方千米理想薄膜上最大9牛的阳光压力能够推动航天器星际航行。

国际上太阳帆航天器一直都在受到各国的重视，各种创新的任务方案和航天器方案不断涌现，关键技术逐渐被攻克。目前国内在小型太阳帆或者小型薄膜帆领域进步也很快，近几年，以拦截帆、技术验证帆为目的的薄膜结构也成功在空间展开多次。作者所在的中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室获得国家国

防科技工业局、国家自然科学基金委等多个项目的支持，从“十二五”开始持续关注深空探测任务、在轨服务任务中的太阳帆推进技术。在多个协作单位的支持下，从总体层面对大型太阳帆的各项关键技术进行了初步探索，取得了一定的成果。本书的主要目的是为各位同领域的研究者展示团队的研究思路和研究成果。如果能够为各位学者提供微小的借鉴或者启示，作者将不胜荣幸。

本书的主要研究内容需要感谢清华大学龚胜平老师团队，中科院空间中心高东、杨萱、钱航、马鑫等老师和同学，哈尔滨工业大学卫剑征老师团队、荣思远老师团队，中国空间技术研究院 510 所冯熠东研究员团队，中国空间技术研究院物资部高鸿研究员团队，钱学森空间技术实验室张兴华、刘海涛、贾海鹏等多位同事。特别感谢钱学森空间技术实验室王立研究员等领导的关怀和指导。

作者能力有限，虽然经过多次修改，但是书中肯定还存在很多不足之处，请各位读者不吝指教。

作者

# 目 录

第1章 绪论	1
1.1 利用太阳帆开展主带小行星探测概述	2
1.1.1 小行星探测国内外发展现状	2
1.1.2 主带小行星探测意义	7
1.1.3 主带小行星探测的目标选择	10
1.1.4 利用太阳帆开展主带小行星探测任务设想	19
1.2 太阳帆推进技术发展概述	25
1.2.1 太阳帆探测器以及太阳帆创新概念研究现状	26
1.2.2 太阳帆探测任务研究现状	34
1.2.3 国外主要太阳帆研究团队进展	45
1.2.4 太阳帆后续发展的设想	49
第2章 基于太阳光压力的太阳帆推进理论	52
2.1 太阳光压力建模理论	52
2.1.1 太阳光压力推进理论研究	52
2.1.2 太阳帆光压模型	64
2.2 太阳帆结构静动力学建模方法	66
2.2.1 太阳帆静力学分析	66
2.2.2 太阳帆“中心刚体+挠性附件”动力学方程	71
2.2.3 太阳帆动力学耦合系数计算	72
2.2.4 太阳帆全杆模型	75

2.2.5	太阳帆全帆模型	77
2.2.6	太阳帆全柔性动力学方程	79
2.3	太阳帆姿态轨道耦合动力学建模方法	85
2.3.1	太阳帆姿态轨道耦合动力学模型建立	86
2.3.2	姿态轨道振动耦合动力学降阶模型	87
2.4	基于时变光压力的动力学数值仿真分析	90
2.4.1	振动变形对太阳帆所受光压力的影响	90
2.4.2	振动变形对太阳帆姿态和轨道的影响	93
2.4.3	姿态振动耦合影响分析	94
<b>第3章</b>	<b>利用太阳帆开展主带小行星探测任务设计</b>	<b>102</b>
3.1	太阳帆主要指标	102
3.2	多颗主带小行星目标选择优化方法	103
3.3	主带小行星探测任务轨道设计方法	111
3.3.1	太阳帆日心轨道动力学基础	111
3.3.2	太阳帆轨道优化设计方法	116
3.3.3	标称轨道设计结果	127
3.3.4	轨道设计结果分析	135
3.3.5	不同参数的影响分析	137
3.4	百米级太阳帆姿态轨道耦合控制方法	144
3.4.1	太阳帆 GNC 分系统概述	144
3.4.2	太阳帆光压力矩调节器设计	147
3.4.3	滚转轴稳定机设计	153
3.4.4	太阳帆动力学模型对控制结果的影响分析	159
3.5	总结与展望	167
<b>第4章</b>	<b>百米级太阳帆方案设计</b>	<b>169</b>
4.1	太阳帆构型比较与方案设计	169
4.2	支撑臂选择与设计	177
4.2.1	支撑臂构型种类	177
4.2.2	支撑臂结构设计	183
4.2.3	支撑臂力学分析	191

4.3 帆面选择与设计	196
4.3.1 帆面材料选择	196
4.3.2 帆面镀膜方案	199
4.3.3 帆面结构设计	207
4.4 帆面折展展开方案	211
4.4.1 太阳帆帆面折叠技术研究	211
4.4.2 太阳帆面展开技术研究	226
4.5 太阳帆支撑与包装结构设计	240
4.5.1 构形设计	240
4.5.2 结构设计	242
4.5.3 帆面空间适应性	247
4.5.4 机构设计	248
4.6 其他分系统设计	250
4.6.1 通信数传分系统	250
4.6.2 能源分系统	258
<b>第5章 地面样机研制与实验分析</b>	<b>260</b>
5.1 折叠展开样机方案	260
5.2 折叠展开试验及分析	286
5.2.1 帆面不同折叠方式展开试验	286
5.2.2 帆面与支撑臂整体展开试验	298
5.2.3 总结	301
5.3 原理样机力学测试及分析	302
5.3.1 原理样机静力学测试	302
5.3.2 原理样机振动测试	314
5.4 结论	321
<b>参考文献</b>	<b>337</b>
<b>索引</b>	<b>350</b>

# 第 1 章

## 绪 论

快速、高效、低成本、低风险、高生存能力是 21 世纪航天技术发展要达到的重要目标。而现代飞行器越来越受到了化学燃料火箭能量和其能携带的燃料质量的制约，如燃料在航天飞机起飞时的质量占比接近 95%；而为了深空探测的距离更远和更长期在轨完成更多的空间任务，飞行器的质量也随着增大，这就必然需要携带更多的燃料并付出更加高昂的代价，如 2003 年 6 月 2 日欧洲发射的火星探测器“火星快车”质量达 2 t，耗资 3 亿欧元。为了克服这些缺点，许多新型高效的发动机如核子火箭发动机、电火箭发动机和离子火箭发动机等已经出现并应用于空间飞行任务，但它们都不能摆脱燃料的束缚，飞行器寿命仍受制于所携带的燃料的多少。

为了摆脱庞大的运载工具，且能使航天器携带更多的载荷，达到“更快、更廉价、更好”的目标，一种新型的航天器——太阳帆航天器近年来受到国内外航天界的广泛关注。太阳帆航天器依靠面积巨大但质量很小的太阳帆反射太阳光获得源源不断的推力，是唯一不依靠反作用推进实现飞行控制的飞行器，它不需消耗燃料，在太空中的寿命不受有限燃料的制约；高性能材料的采用使其结构质量很小，可大大减小发射质量，从而使发射费用更低。利用太阳光压的连续加速度，经过长时间加速，太阳帆航天器可以以 93 km/s 的速度前进，这个速度比当今火箭推进的最快航天器快 4~6 倍。

太阳光产生的压力很小，理想情况下全反射时在 1 AU 处每平方米可产生大约  $9 \mu\text{N}$  的压力。为了获得大的推力，太阳帆航天器需要有很大的反射面；而为了获得更大的加速度，太阳帆航天器质量必须非常小。通过控制太阳帆与太阳光

线的夹角，可以使太阳帆航天器向太阳系中心或远离太阳系飞行。

太阳帆航天器是唯一的不依赖于反作用质量的飞行器，它可以适应各种任务，如星际探测、取样返回、太阳极点观测等，高性能的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。从现代航天器无法到达的地方观测星体，增加了探测宇宙的视角与方法，在空间平台任务中有着一定的应用前景。因此太阳帆航天器必将对空间平台任务产生深远的影响。

本章主要概述主带小行星探测任务和太阳帆推进技术进展，既为读者提供概念认知，也为后续章节提供研究对象。首先介绍在小行星探测领域的国内外主要进展，进而针对主带小行星探测任务，描述其探测意义、目标选择以及有效载荷建议。接下来主要介绍利用太阳帆推进技术的特点和近期发展情况。

## 1.1 利用太阳帆开展主带小行星探测概述

### 1.1.1 小行星探测国内外发展现状

在20世纪90年代以前，人们主要通过地面天文观测研究小行星，同时还对陨落到地面的小行星碎片进行研究，从而得到小行星物质组成和化学成分。随着人类深空探索的深入，国外对小行星的探测日益增多。美国、欧洲和日本先后发射了多颗小行星探测器，有的实现了小行星表面物质的取样返回。我国也通过探月任务实现了小行星飞越探测任务。

#### 1. 美国（NASA）主要探测史

美国于1996年2月发射的近地小行星交会（NEAR）探测器（此为美国“发现”计划实施的深空探测飞行之一），于1997年6月27日从253号小行星马蒂尔达近旁飞过，拍摄了多张图像，最后于2001年2月成功地在433号小行星爱神上着陆。

1998年10月发射的“深空一号”小型探测器，除试验若干新技术之外，对1992KD小行星的探测也是其飞行任务的主要目的之一。

1999年2月，彗星探测器“星尘”在美国的佛罗里达州发射升空，预计在

2004年1月飞到怀尔德2彗星采集尘埃并送回地球。

2006年1月发射的“新地平线”探测器，除了探测冥王星及其卫星外，还将探测 Kuiper 带的冰冻小行星。

NASA 于 2007 年 9 月 27 日发射了“黎明”号探测器，其科学目标为了解太阳系开始形成时的条件和过程，测量灶神星（Vesta）和谷神星（Ceres）小行星的质量、形状等（现在将谷神星归为矮行星），同时考察两颗小行星的内部结构并进行对比研究。2011 年 7 月 16 日，该探测器被灶神星捕获并进入其轨道，它也成为首个进入太阳系小行星带主要小行星轨道的探测器。

NASA 还定于 2016 年发射“奥西里斯”号探测器，其主要目的是采集 150 g 小行星（101955 号，1999RQ36）样本返回地球。定于 2025 年以前，实施“普利茅斯岩石”计划，实现载人小行星探测。

#### ● “黎明”号小行星探测器

“黎明”号计划是第一个探测这个重要区域的人类探测器，也是世界上第一个先后环绕两个天体的无人探测器，如图 1-1 所示为“黎明”号任务轨道。此前也曾有航天器飞经体积较小的小行星，并绕其轨道飞行甚至在小行星上降落。在将来，预计还会有更多探测小行星的航天计划。但是，过去从未出现过同一航天器先后环绕两个天体飞行的情况。来自美国加利福尼亚大学洛杉矶分校的科学家克里斯多弗·拉塞尔是“黎明”号计划的领导者。

科学家认为，探测灶神星和谷神星将有助于了解太阳系的起源，因此将这个项目取名为“黎明”。整个“黎明”号计划耗资 3.57 亿美元，其中并不包括德尔塔 2 型火箭的造价。NASA 官员拒绝透露火箭的成本。

“黎明”号探测器的测量目标是：探测谷神星和灶神星的内部结构、密度和均匀性；确定它们的大小、形状、成分和质量；观测它们的表面形态；确定核的热史和大小；了解水在控制小行星演化中的作用；检验当前灶神星作为紫苏钙长无球粒陨石（howardite）、钙长辉长无球粒陨石（eucrite）和古铜无球粒陨石（diogenite）[HED] 母体范例，及其地质的来龙去脉并确定哪种陨石来自谷神星。

根据上述测量目的，“黎明”号探测器的科学载荷包括：分幅摄像机、可见光与红外光谱仪、 $\gamma$  射线与中子谱仪（GR/NS）、无线电科学仪器。

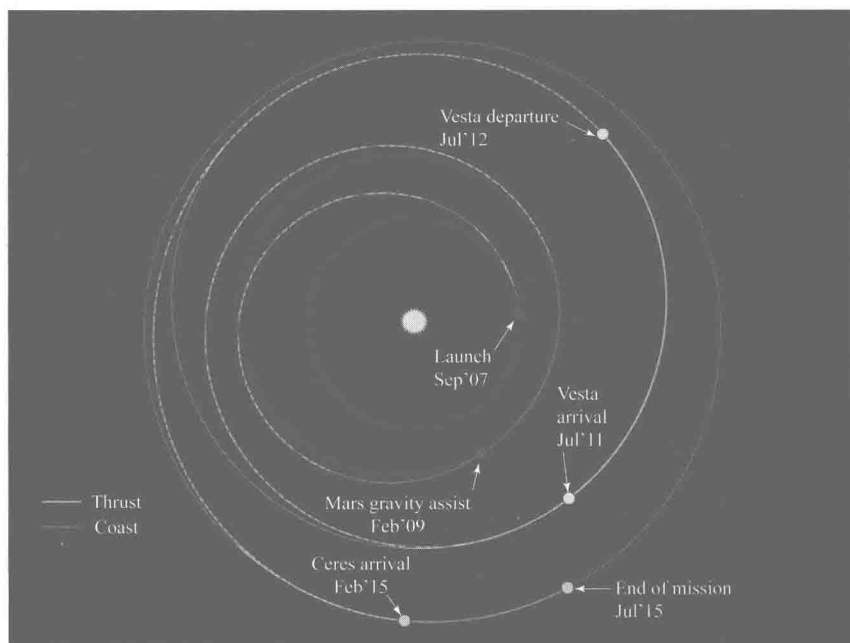


图 1-1 “黎明”号任务轨道

- “冥王”号探测器 (OSIRIS - REx)

据 NASA 的报道,“冥王”号探测器 (OSIRIS - REx) 已经在 2020 年年底完成对小行星贝努的采样工作,并在 2021 年 5 月从贝努小行星上点火起飞,返回地球。预计在 2023 年 9 月 24 日,“冥王”号将会回到地球。

## 2. 欧洲 (ESA) 主要探测史

早在 1989 年 10 月 18 日发射的“伽利略”号航天器,就飞越了 951 号小行星 Gaspra 和 243 号小行星 Ida,获得了第一张高分辨率的小行星照片。

2004 年 3 月发射的罗塞塔 (ROSETTA) (图 1-2) 与 67p/Churyumov - Gerasimenko 彗星交会,飞越了 2867 号 Steins 和 21 号 Lutetia 小行星。

- “罗塞塔”号彗星探测器

“罗塞塔”号的着陆器“菲莱”将在丘留莫夫 - 格拉西缅科彗星的彗核表面钻一个深度超过 20 cm 的洞,从彗核的表层以下提取物质,然后放到显微镜下研究。环绕彗核飞行的将近两年时间里,“罗塞塔”号还将目睹彗核逐渐接近太阳的时候,彗核上的物质 (主要是冰) 逐渐升华,形成彗发和彗尾的过程。

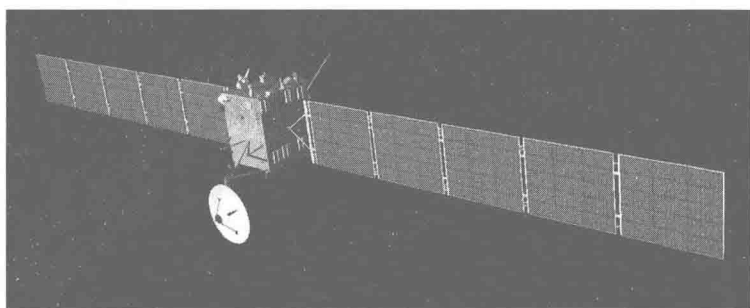


图 1-2 “罗塞塔”号彗星探测器

轨道卫星有效载荷：紫外线成像分光计（ALICE）、彗核无线电波探测实验设备（CONSERT）、彗星次级粒子质量分析仪（COSIMA）、颗粒碰撞分析仪和尘埃收集器（GIADA）、微型成像尘埃分析系统（MIDAS）、“罗塞塔”轨道卫星微波设备（MIRO）、光学分光计和红外线远程成像系统（OSIRIS）、“罗塞塔”轨道卫星离子和中子分析分光计（ROSINA）、可见光和红外线热成像分光计（VIRTIS）、“罗塞塔”等离子体组合仪器（RPC）。

着陆器有效载荷：明确稳定同位素成分轻元素确定与认识方法/托勒密实验设备（MODULUS/Ptolemy）、阿尔法粒子与 X 射线分光计（APXS）、全景和显微成像系统（CIVA，即彗核红外与可见光分析）、彗星采样与成分实验设备（COSAC）、微波发射彗核探测实验设备（CONSERT）、表面与亚表面科学多用途传感器（MUPUS）、表面电震动与声学监测实验设备（SESAME）、“罗塞塔”着陆器磁强计与等离子体监测仪（ROMAP）、样品与分发装置（SD2）。

### 3. 日本（JAXA）主要探测史

日本在小行星探测中虽然起步相对较晚，但是进步很快。

2003 年 5 月发射的日本“隼鸟”（图 1-3）于 2005 年 10 月到达近地小行星 1998 SF36，进行交会与采样，2010 年 6 月返回地球。

2014 年发射“隼鸟 2 号”，探测小行星 1999 JU3，并采样返回。

#### ● “隼鸟”号小行星探测器

“隼鸟”号上的有效载荷为：小行星多光谱带摄像机（AMICA）、光探测和定位设备（LIDAR）、近红外线分光计（NIRS）、X 射线荧光分光计（XRS）。

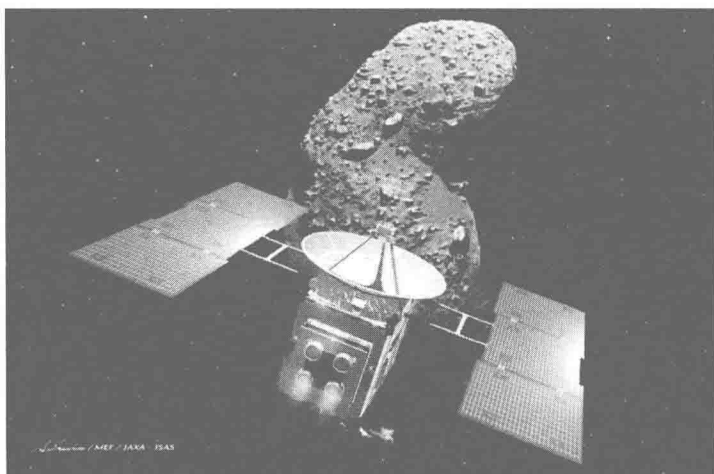


图 1-3 “隼鸟”号小行星探测器

#### 4. 我国研究情况

2012 年 12 月国防科工局传来我国深空探测新突破的佳音——“嫦娥二号”卫星在距离地球约 700 万 km 外的深空，飞越“战神”图塔蒂斯小行星并进行探测，如图 1-4 所示。

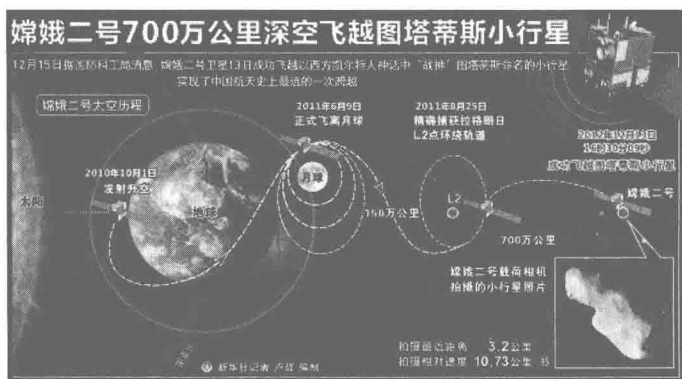


图 1-4 我国探测图塔蒂斯小行星示意图

2021 年 6 月 12 日在北京举办新闻发布会表示，国家航天局目前正在制订航天发展“十四五”规划，并按照国家建设航天强国决策部署，加快推动空间科学、空间技术、空间应用的全面协调发展，未来一段时期，重点提升航天科技创新动力、经济社会发展的支撑能力，同时积极开展更加广泛的国际交流合作；将继续实施国家重大科技工程，提升航天综合实力；将重点推进行星探测、月球探

测、载人航天、重型运载火箭、可重复使用天地往返运输系统、国家卫星互联网等重大工程。中国将在 2025 年前后实施近地小行星取样返回和主带彗星环绕探测任务。

中国空间技术研究院针对我国小行星探测提出了取样返回任务设想。将小行星取样返回任务总结为“一次发射，两类探测目标（近地小行星和主带彗星），三种探测模式（绕飞、附着、采样返回）”。在文章中提到“为实现百米级近距离探测，实现小行星的全球覆盖，需研究绕飞、悬停等多种飞行轨道和探测模式”“针对可能的‘碎石堆’或‘独石’特性，以及表面不同大小的碎石粒径分布特性，除了触碰采样方式外，还需考虑设计悬停采样和附着采样等多种模式和手段，确保能可靠采集到样品”。

### 1.1.2 主带小行星探测意义

小行星带是太阳系内介于火星和木星轨道之间的小行星密集区域。在已经被编号的 120 437 颗小行星中，有 98.5% 是在这里被发现的。这些小行星大多集中在火星与木星轨道之间，其中大约有 95% 的小行星轨道半长径在 2.17~3.64 AU，该区域称为小行星的主环带。小行星是由岩石或金属组成，围绕着太阳运动的小天体。因为在比较上这是小行星最密集的区域，估计为数多达 50 万颗，所以这个区域被称为主小行星带，简称“主带”。

小行星带由原始太阳星云中的一群星子（比行星微小的行星前身）形成。木星的引力阻碍了这些星子形成行星，并造成许多星子相互间高能量的碰撞，于是清扫了这一区域，造成许多残骸和碎片。小行星绕太阳公转的轨道，继续受到木星的摄动，形成了与木星的轨道共振。在这些轨道距离（即柯克伍德空隙）上的小行星会被很快地扫进其他轨道。

主带内最大的三颗小行星是智神星、婚神星和灶神星，它们的平均直径都超过 400 km；在主带中只有一颗矮行星——谷神星，直径大约 950 km；其余的小行星都不大，有些甚至只有尘埃那样大。小行星带的物质非常稀薄，已经有好几艘太空船平安地通过而未曾发生意外。在主带内的小行星依照它们的色彩和主要形式分成三类：碳质、硅酸盐和金属。小行星之间的碰撞可能形成拥有相似轨道特征和成色的小行星族，这些碰撞也是产生黄道光的尘土的主要来源。

主带小行星探测意义主要包括如下几点：

### 1. 探索太阳系小行星的成因和演化历史

目前的理论认为，小行星的形成是与太阳系同步进行的。在 46 亿年前的太阳系初期，固体物质不断从原始太阳星云中凝聚出来，形成行星子（planetesimals）。有些行星子被附近的大行星吸积而捕获，有些则不断增长而形成小行星。目前已发现的小行星有 20 多万颗，绝大多数位于火星和木星轨道之间，距离太阳约 3 AU。在众多的小行星中，有些小行星的轨道特征和光谱类型很接近，它们被划分为很多族。同一族内的小行星可能由一颗较大的小行星原星子破裂而成。另外，不同光谱类型的小行星在空间轨道分布上也有一定的统计规律，原始型小行星（如 C 型）一般分布在小行星主带的外侧，而熔融分异型小行星（如 S 和 M 型）分布在靠近太阳的小行星主带内侧。小行星的成因机制、碰撞历史及空间轨道的分布规律，是当今行星科学研究的一个重要课题。小行星深空探测可以为我们提供近距离全方位的观测数据，使我们更清楚地了解小行星，进而揭开太阳系起源的奥秘。

### 2. 建立小行星与陨石之间的直接联系

除了少数月球和火星陨石，绝大多数陨石都是来自小行星的碎片。目前全世界已收集到 3 万多块陨石样品，其中 80% 是普通球粒陨石，其余为碳质球粒陨石、顽火辉石球粒陨石和分异陨石（无球粒石陨石、石铁陨石和铁陨石）。原始球粒陨石自形成以来没有受过重大变质作用，其化学成分与太阳系平均组成非常相似，它们是原始太阳星云分馏凝聚的产物，代表了太阳系最原始的物质组成；而分异陨石的化学成分和矿物组合变化很大，从玄武质无球粒石陨石，到石铁陨石和铁陨石，它们是太阳系早期小行星内部岩浆熔融分异的产物。要充分认识这些陨石的特性以及它们在太阳系形成过程中的作用，我们必须首先了解陨石的来源和陨石母体的特性。长期以来，人们试图寻找陨石与小行星的关系，如果能确定某种陨石来自某一特定类型的小行星，那么研究这些陨石样品就能了解小行星的形成、内部熔融分异和演化历史。按一般常理，普通球粒陨石的小行星母体应该普遍存在于小行星带内，因为普通球粒陨石是最常见的陨石样品。然而，长期以来的天文观测并没有在小行星带中找到与普通球粒陨石的反射光谱相同的小行星。这是当今行星科学面临的一大困惑，因此寻找普通球粒陨石的小行星母体也

成为行星科学的一大科学目标。

### 3. 探寻新的太阳系原始物质

目前全世界已收集到3万多块各种类型的陨石，大多可能来自S型、C型和M型小行星。但是，还有很多类型的小行星（如T、D、O、Ld型等），与其相对应的物质却不在陨石之列。这些类型的小行星物质的化学成分和矿物组成有什么特性？是否代表了太阳系的原始物质？有没有经历了水变质和热变质作用的影响？对这类小行星的深空探测有望能为我们提供新的线索。

### 4. 对研究地球上的生命起源提供新的思路小行星含有有机成分

小行星含有有机成分，对研究地球上的生命起源提供新的思路。氨基酸(amino acids)是地球生物圈的重要组成单元。早在一个多世纪以前，Pasteur发现地球上的生命大都唯一地选择具有左旋手性的氨基酸，这为探索生命的起源奠定了重要的基础。有的理论认为，生命起源于无手性的有机分子，而生物在长期的演化过程中有选择性地利用了特定手性的有机分子。另一种理论认为，在生命起源以前，地球上已存在大量左旋手性的有机分子，生命就是从这些有机物中发展和演化而成。然而在早期的地球环境下发生的化学反应却不能产生适量的具有左旋手性的有机分子。于是，有人认为组成生命的左旋手性有机分子（如氨基酸）是由陨石、彗星和宇宙尘埃带入地球的；这些天外来客为地球布下了生命的种子。

富含挥发性成分的碳质球粒陨石含有多种有机分子，包括氨基酸、咖啡碱、嘧啶磷等生命起源所需的重要有机分子。C型小行星的反射光谱与碳质球粒陨石非常相似，表面物质富含碳和水，有机物含量也很高。C型小行星是最普遍的小行星，占小行星总数的75%。这类小行星将是深空探测的一个重要目标，从C型小行星上采集样品返回地球，将对研究生命的起源有极其重大的意义。

### 5. 试验和开发航空航天新技术

小行星的重力场很弱，深空探测器的设计要求将与探月器和火星飞船有很多不同之处。目前，全世界对小行星的探测工作还处于初级阶段，有很多技术是开创性的，有待于进一步试验和完善。比如对小行星进行伴飞活动、小行星探测器的自导航系统、动力系统和通信系统，技术要求很高，我国的航天工业将面临新的挑战。

目前世界各国的航天技术仍然采用反作用力的推进形式，通过自带的燃料进

行喷气来实现对小行星的飞跃、伴飞和取样返回，由于燃料是有限的，并不能进行真正意义上的长时间的科学探测，科学投入和产出相对较低，但是，随着太阳帆推进技术的出现，这种情况会得到相当大的改观。

太阳帆在太阳光压力作用下，不断地加速，长时间后能够获得相当可观的速度，而且太阳帆以太阳光为推进动力，无须携带推进剂，理论上它的比冲无限大。持续的加速能力和“永不枯竭”的能量来源决定了太阳帆非常适用于深空探测。美国、欧洲、日本和俄罗斯均开展了太阳帆推进技术的深入研究，特别是2010年日本“伊卡洛斯”（Ikaros）太阳帆航天器的成功发射，更增强了人们利用太阳帆技术进行深空探测的信心。

太阳帆航天器可以将深空探测器推进到太阳系深处，或者使探测器脱离黄道面到达太阳极轨进行对日观测，或者实现悬浮轨道等非开普勒轨道等，非常适合于探测距离比较远的主带小行星。

### 1.1.3 主带小行星探测的目标选择

太阳帆推进技术能够为未来的深空探测任务提供新的轨道方案，小行星的引力比较低，太阳帆可以通过调整帆面使航天器与小行星长时间甚至近距离伴飞。对于主带小行星探测的任务来说，如果结合无需燃料的太阳帆作为推进方式，则可以长时间地探测多颗主带小行星，是非常合适的匹配方案。

与近地小行星相比，主带小行星无论从数量还是从质量、体积上都占有很大的优势，尤其（它）位于火星和木星间，这就为我们向太阳系外甚至更远的地方提供了一个可供休整的“驿站”，可以减少进行深空探测的成本。所以我们需要对小行星的属性（物理参数、地址特性等）进行研究，从而得到理想的太空中转站。

由于M类小行星主要由金属组成，其丰富的矿产资源令人类垂涎欲滴，而主带小行星的相当一部分是M类小行星，通过对它进行研究，不但可以了解它的矿物组成，而且可以为将来的“太空采金”做好准备。

地球上的生命是如何形成的一直是人类探索的目标。目前的一种猜想就是小行星与地球相撞而带到地球上来的，主带小行星与近地小行星相比，其更可能保留着太阳系原始的生命元素，所以探测主带小行星是探究人类起源的主要