



上海市空间智能控制技术重点实验室
Shanghai Key Laboratory of Aerospace Navigation Control Technology

• 侯建文 阳光 曹 涛 贺 亮 等编著
刘付成 主审

深空探测

—— 小天体探测

Deepspace Exploration
— Small Solar System Body Exploration



国防工业出版社
National Defense Industry Press

本书获得国家国际科技合作专项(2012DFR808540)资助

• 侯建文 阳光 曹涛 贺亮 等编著
刘付成 主审

深空探测

— 小天体探测

Deepspace Exploration
— Small Solar System Body Exploration



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书首先对小天体进行了介绍,从小天体探测的目标出发,系统地介绍了小天体的分类及各自的物理环境,对各国的小天体探测活动进行了详细地介绍,包括探测任务整体概况、探测器系统总体设计、飞行历程以及探测成果等内容;然后介绍了未来小天体探测规划,包括小天体伴飞探测任务、小天体附着探测任务、小天体表面巡视与取样返回探测任务以及载人小天体探测任务;最后对未来小天体探测的特点进行了分析和预测。

本书可以作为航天爱好者的参考书,也可以作为航天器总体及有关专业的科技人员和高校师生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

深空探测:小天体探测 / 侯建文等编著. —北京:
国防工业出版社, 2016.7
ISBN 978-7-118-10352-6

I. ①深… II. ①侯… III. ①外行星探测器 IV.
① V476

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 122849 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 20 $\frac{1}{4}$ 字数 415 千字

2016 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 98.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前言

PREFACE

“我们从何而来？”人类一直对浩瀚无垠的神秘宇宙充满了无限向往。当今世界，深空探测的发展水平已经成为民族创新能力、国家综合国力的重要标志之一。1957年苏联发射了人类第一颗人造卫星，1960年3月美国发射了人类第一个深空探测器——“先驱者”5号。进入21世纪以来，美国、俄罗斯、欧洲空间局、日本以及印度相继制定了宏大的深空探测的长远规划和实施计划，一些深空探测项目已经成功实施，深空探测已经成为世界航天活动的主要发展方向之一。

根据第26届国际天文学联合会的最新标准，太阳系内的天体被归类为行星、矮行星以及太阳系小天体三类。一般将比行星小而又不属于矮行星的天体统称为小天体。小天体包括小行星、彗星、流星体。

按照在太阳系内的位置，小行星主要分为近地小行星、主带小行星、特洛伊小行星、柯伊伯带小行星、半人马小行星。

在进入太空旅行的年代之前，小行星即使在最大的望远镜下也只是一个针尖大小的光点，因此它们的形状和地形仍然是未知的奥秘。第一张真正的小行星特写镜头是由前往木星的太空船“伽利略”号在1991年飞掠过的951盖斯普拉(Gaspra)，然后是1993年的243艾女星和它的卫星戴克太(Dactyl)。截至2015年年底，共发射了15颗小天体探测器，其中，美国8颗、苏联1颗、欧洲空间局2颗、日本4颗。

本书由侯建文统稿，共分11章，具体如下：

第1章：由侯建文、阳光编写。介绍小天体的物理、气候和地质地貌特征，

小行星的分类与命名,小天体探测的科学目标和工程目标,以及对小天体探测的过去、现在和未来。

第2章~5章:由曹涛、贺亮、冯建军、满超、郭彦余、吴猛编写。介绍小天体探测的过去和现在,其中:第2章介绍美国小天体探测的过去和现在;第3章介绍苏联小天体探测的过去和现在;第4章介绍欧洲小天体探测的过去和现在;第5章介绍日本小天体探测的过去和现在。

第6章~10章:由贺亮、曹涛、王卫华、周杰、刘宇、张少伟编写。介绍小天体探测的规划,其中:第6章从总体上概述小天体探测的路线规划图;第7章介绍未来小天体飞越与伴飞探测任务;第8章介绍未来小天体附着与取样探测任务;第9章介绍未来小天体捕获变轨探测任务;第10章介绍未来小天体载人探测任务。

结束语由侯建文编写。

全书由刘付成主审。

附录为各国小天体探测活动编年表。希望本书能够为各国小天体探测任务提供有力的借鉴和佐证,促进探测任务的圆满完成;并且能够对世界各国未来的深空探测发展战略的制定、小天体探测技术的发展发挥有力的支撑作用。

限于编者的水平,书中难免有不妥之处,恳请专家和读者批评指正。

编著者

2016年1月

目录

Contents

第 1 章	概述	1
1.1	小天体概况	1
1.1.1	小行星概况	2
1.1.2	小行星的命名	30
1.1.3	彗星概况	37
1.1.4	流星体概况	45
1.2	小天体探测的目标	47
1.2.1	科学目标	47
1.2.2	工程目标	49
1.3	小天体探测的过去概述	52
1.4	小天体探测的现在概述	53
1.5	小天体探测的未来概述	54
第 2 章	美国的小行星探测任务	55
2.1	“伽利略”号探测器	55
2.1.1	概述	55
2.1.2	探测对象和科学目标	56
2.1.3	探测器设计	57
2.1.4	飞行过程	61
2.1.5	探测成果	64

2.2	会合-舒梅克号探测器	65
2.2.1	概述	65
2.2.2	探测对象和科学目标	66
2.2.3	总体设计	67
2.2.4	飞行过程	78
2.2.5	探测成果	85
2.3	“深空”1号探测器	86
2.3.1	概述	86
2.3.2	探测对象和科学目标	86
2.3.3	总体设计	87
2.3.4	飞行过程	96
2.3.5	探测成果	103
2.4	“星尘”号探测器	104
2.4.1	概述	104
2.4.2	探测对象和科学目标	105
2.4.3	总体设计	106
2.4.4	飞行过程	112
2.4.5	探测成果	117
2.5	“新视野”号探测器	118
2.5.1	概述	118
2.5.2	探测对象和科学目标	119
2.5.3	总体设计	120
2.5.4	飞行过程	123
2.6	“黎明”号探测器	125
2.6.1	概述	125
2.6.2	探测对象和任务目标	127
2.6.3	总体设计	130
2.6.4	飞行过程	143
2.6.5	探测成果	147
2.7	“深度撞击”号探测器	148
2.7.1	概述	148
2.7.2	探测对象和任务目标	149

2.7.3	总体设计	150
2.7.4	飞行过程	154
2.7.5	探测成果	160
2.8	“彗核旅行”号探测器	161
第3章	俄罗斯(苏联)的小天体探测	163
3.1	金星-哈雷彗星探测器	163
3.1.1	概述	163
3.1.2	探测对象	164
3.1.3	总体设计	164
3.1.4	飞行过程	166
第4章	欧洲的小行星探测任务	168
4.1	罗塞塔号探测器	168
4.1.1	概述	168
4.1.2	探测对象和科学目标	169
4.1.3	总体设计	171
4.1.4	飞行方案	184
4.2	乔托号探测器	190
第5章	日本的小行星探测任务	192
5.1	“先驱”号探测器与“行星”-A 探测器	192
5.1.1	概述	192
5.1.2	探测对象和科学目标	193
5.1.3	总体设计	193
5.2	“隼鸟”号探测器	195
5.2.1	概述	195
5.2.2	探测对象和科学目标	196
5.2.3	总体设计	198
5.2.4	飞行过程	209
5.2.5	探测成果	225
5.2.6	故障分析	227
第6章	未来小天体探测的路线图	229

第7章 小天体飞越与伴飞探测 232

7.1 欧洲“堂吉诃德”小行星防卫任务计划	232
7.1.1 任务概述	232
7.1.2 探测对象和科学目标	233
7.1.3 系统设计	234
7.1.4 有效载荷	236
7.1.5 任务规划	236
7.1.6 预期成果	237

第8章 小天体附着与取样返回探测 238

8.1 日本“隼鸟”2号探测器计划	238
8.1.1 任务概述	238
8.1.2 探测对象和科学目标	239
8.1.3 系统设计	241
8.1.4 任务规划	245
8.2 美国源光谱释义资源安全风化层辨认探测器计划	249
8.2.1 概述	249
8.2.2 探测对象和科学目标	251
8.2.3 探测器设计方案	252
8.2.4 飞行方案	256
8.2.5 预计成果	259
8.3 欧洲空间局“马可波罗”近地小行星采样返回计划	260
8.3.1 任务概述	260
8.3.2 探测对象和科学目标	260
8.3.3 总体设计	261
8.3.4 飞行方案	266
8.4 中国小行星探测规划	268
8.4.1 伴飞附着探测	268
8.4.2 取样返回任务	268

第9章 小天体捕获变轨探测 270

9.1 美国小行星捕获任务	270
---------------	-----

9.1.1	概述	270
9.1.2	任务意义	271
9.1.3	安全性	272
9.1.4	目标小行星的筛选和特征	273
9.1.5	探测器设计方案	274
9.1.6	飞行方案	276
第 10 章	载人小天体探测	285
10.1	美国洛克希德·马丁公司普利茅斯岩石计划	285
10.1.1	任务概述	285
10.1.2	探测对象与科学目标	285
10.1.3	基线方案	286
10.1.4	改进方案	289
10.1.5	可行性与技术难点	290
10.1.6	未来工作	291
10.2	美国阿波菲斯载人登陆计划	291
10.2.1	探测对象和科学目标	292
10.2.2	系统方案	293
10.2.3	关键技术	297
10.2.4	飞行流程	299
10.2.5	与载人登月、登火的比较	302
结束语		305
附 录	世界各国小天体探测活动编年表	307
参考文献		309

1

概述

1.1 小天体概况

根据2006年8月24日第26届国际天文学联合会的最新标准,太阳系内的天体被归类为行星、矮行星以及太阳系小天体三类。一般将比行星小而不属于矮行星的天体统称为小天体。小天体包括小行星、彗星、流星体。

太阳系中绕太阳旋转的比行星小比流星体大且没有大气活动的固体天体称为小行星。关于小行星和流星体的界定目前没有统一的标准,一般认为直径小于50m(或100m)的固体小天体是流星体。图1-1为NEAR2001年2月24日拍摄的爱神星(433Eros)近距离图像。

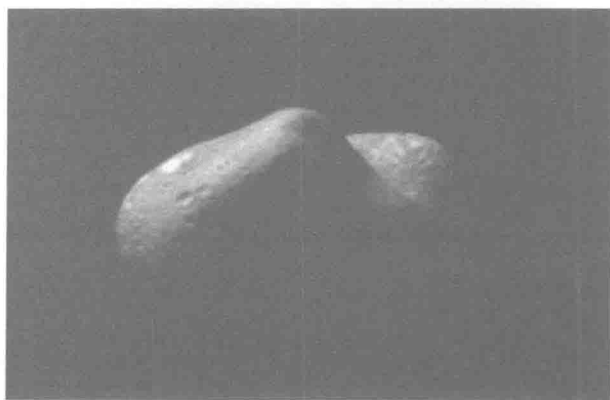


图1-1 NEAR2001年2月24日拍摄的爱神星(433Eros)近距离图像

彗星是形状不规则的天体,由冰冻的杂质、尘埃组成。彗星一般由彗头和彗尾组成,彗头包括彗核和彗发两部分,彗尾则是彗星靠近太阳时彗核物质被蒸发、膨胀、喷发而形成的。彗星的轨道一般为绕太阳的大椭圆轨道或以太阳为焦点的双曲线轨道。图 1-2 为 2007 年在澳大利亚拍摄的 McNaught 彗星(C/2006P1)。



图 1-2 2007 年在澳大利亚拍摄的 McNaught 彗星(C/2006 P1)

体积很小,不符合小行星或彗星标准的物体称为流星体。图 1-3 为 2009 年狮子座流星雨时拍摄的流星体。



图 1-3 2009 年狮子座流星雨时拍摄的流星体

通常所说的小天体探测是指小行星探测和彗星探测。由于流星体体积过小地面难以观察且探测价值低,因此目前国际上没有针对流星体的探测任务。

1.1.1 小行星概况

小行星是太阳系内类似行星环绕太阳运动,体积和质量比行星小得多的天体。

至今为止,在太阳系内已发现约 70 万颗小行星,但这可能仅是所有小行星中的一小部分。

皮亚齐于 1801 年在西西里岛发现了第一颗小行星,截至 2013 年 2 月 9 日,具有轨道数据的小行星共 604344 颗,获永久编号的小行星共 353926 颗,已命名的小行星共 17698 颗。图 1-4 为最大的两颗小行星——灶神星、谷神星与月球的对比。

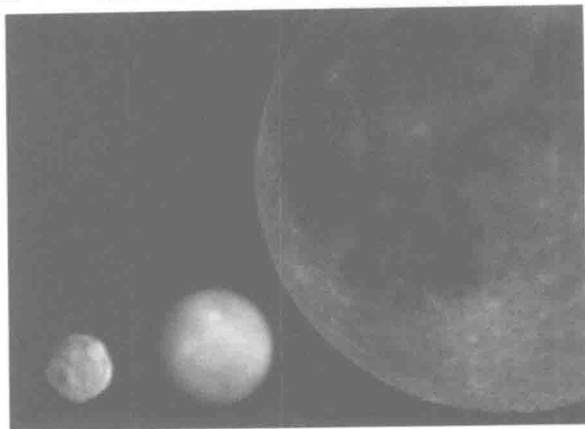


图 1-4 灶神星、谷神星与月球对比

开始天文学家认为小行星是一颗在火星和木星之间的行星破裂而成的,但小行星带内的所有小行星的全部质量比月球的质量还要小。今天天文学家认为小行星是太阳系形成过程中没有形成行星的残留物质。木星在太阳系形成时的质量增长最快,它防止在今天小行星带地区另一颗行星的形成。小行星带地区的小行星的轨道受到木星干扰,它们不断碰撞和破碎。其他的物质被逐出它们的轨道与其他行星相撞。大的小行星在形成后由于铝的放射性同位素²⁶Al 的衰变而变热。重的元素(如镍和铁)在这种情况下向小行星的内部下沉,轻的元素(如硅)上浮,造成小行星内部物质的分离。因此,在此后的碰撞和破裂后所产生的新的小行星构成也不同。有些碎片落到地球上就成为陨石。

1.1.1.1 小行星的物理特性

了解小行星的物理参数不但能够建立较为精确的动力学模型,为探测器的轨道设计以及自主着陆导航提供参考,也能够对小行星乃至整个太阳系的起源进行推断。

由于大部分小行星离地球较远,体积较小,因此仅用地面望远镜很难得到类似大行星那样详细的物理参数。下面仅对小行星的大小、形状、质量、密度、自转、绝对星等、反照率和温度做简单介绍。

1) 大小和形状

小行星大小的变化范围很大,从上千千米到几百米,甚至更小,编号前 10 位的

小行星大小与月球的比较如图 1-5 所示。

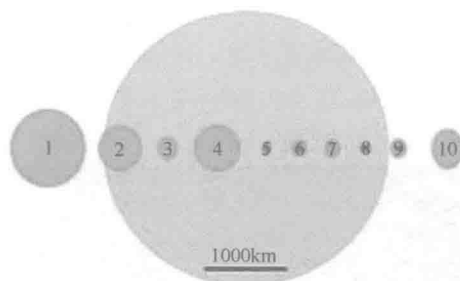


图 1-5 编号前 10 位的小行星大小与月球的比较

从整体上看,小行星的数目随其直径呈指数分布,但在 5 km 和 100 km 处存在两处峰值高于此分布,见表 1-1。

表 1-1 直径大于 D 的小行星数目

直径 D /km	0.1	0.3	0.5	1	3	5	10
数目 N	25000000	4000000	2000000	750000	200000	90000	10000
直径 D /km	30	50	100	200	300	500	900
数目 N	1100	600	200	30	5	3	1

体积最大的 4 颗小行星分别是 Ceres、Vesta、Pallas 和 Hygiea,与其相关的参数见表 1-2。

表 1-2 4 颗质量最大的小行星的参数

小行星	Ceres	Vesta	Pallas	Hygiea
半长径/AU	2.77	2.36	2.77	3.14
轨道倾角/ $^{\circ}$	10.6	7.1	34.8	3.8
偏心率	0.079	0.089	0.231	0.117
周期/年	4.6	3.63	4.62	5.56
尺度/km	975 × 975 × 909	578 × 560 × 458	580 × 555 × 500	530 × 407 × 370
质量/ (10^{18} kg)	940	260	210	87
密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.08	3.35	2.49	2.08
自转周期/h	9.07	5.34	7.81	27.6
黄赤交角/ $^{\circ}$	约 3	29	约 80	约 60
表面温度/K	167	85 ~ 270	164	164

体积较大的小行星形状比较接近球形,但剩下的多数小行星形状都极不规则(图 1-6),这表明后者很可能是从一个较大的母体受到撞击碎裂出来或被自转分裂出来的。

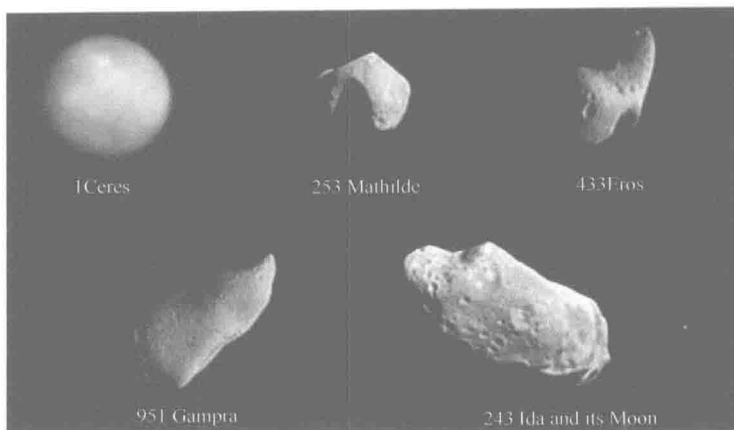


图 1-6 几颗已知形状的小行星

2) 质量和密度

小行星的质量也同样难以测定。对于 3 颗最大的小行星,可以利用它们的引力摄动效应(包括快速飞越造成的摄动效应和轨道共振造成的累积摄动效应)间接推算出它们的质量。而对于一般的小行星,引力摄动效应很小,除非存在自然卫星或有探测器近距离飞越,才有可能用该方法来推算。

假定小行星为 $a \times b \times c$ (直径) 的三轴椭球体,通过某种方法得到了 a 、 b 、 c 的值,且密度估计为 ρ ,则小行星的质量 $m = \frac{\pi abc\rho}{6}$ 。

小行星的质量很小,全部主带小行星的总质量仅为 $(2.8 \sim 3.2) \times 10^{21}$ kg,分别为月球质量的 3.81%~4.35% 和地球质量的 0.0469%~0.0536%。其中质量最大的小行星 Ceres,其质量占全部小行星总质量的 1/3。若加上 Pallas、Vesta、Hygiea 的质量,那么 4 颗小行星的质量可达主带小行星总质量的 51%。主带小行星的数目分布随着质量的减少而迅速增加。

对于柯伊伯带(KBO),根据观测到的亮度分布,估计其总质量为地球质量的 10%~20%,比主带小行星的总质量大 2 个量级。

若已知小行星的质量和体积,则可计算出其平均密度(表 1-2)。有时也可以通过考察该小行星的光谱类型,估测出其大致密度。

3) 自转

小行星的自转参数主要是指其自转周期和自转轴指向。如果通过观测获得了小行星的光变曲线,便可推测出该小行星的自转周期。通过对大量小行星自转周期和直径的研究,发现两者有明显的相关性。一般而言,直径小于 10km 的小行星比直径大于 10km 的小行星自转得更快(图 1-7)。直径超过 200m 的小行星中最短的自转周期为 2.2h,这表明此类小行星构成可能比较松散,它们更像是由引力聚合在一起形成的巨大的碎石堆结构。

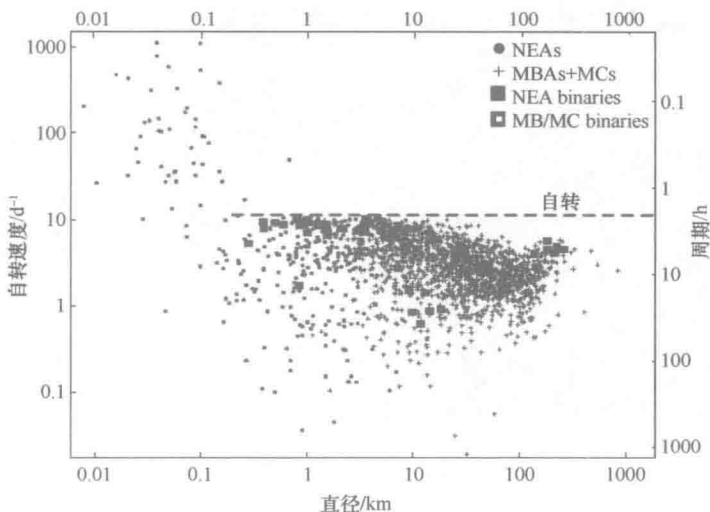


图 1-7 小行星自转周期随直径的分布
(虚线为小行星自转周期的估计极限值 2.4h)

若要描述小行星的自转轴指向,首先需要确定其北极,然后给出其在天球坐标系中的指向。通过对小行星自转轴矢量的统计后发现,小行星的自转轴指向几乎是随机分布。

4) 绝对星等、反照率和温度

与大行星一样,小行星须靠反射太阳光才能够被地面的光学设备观测到,因此小行星的视亮度与其离太阳的距离、离地球的距离和相位角(星-日方向和星地方向的夹角)有关。常用视星等描述观测到的视亮度,用绝对星等描述小行星真实的反射光的能力。小行星(包括行星、彗星)的绝对星等与恒星、星系的绝对星等的定义不同,前者指小行星距离地球为 1AU 且相位角为 0° 时呈现的视星等。通过一些简单的公式,可以将小行星的视星等和绝对星等进行换算,星等值越低,表明该小行星的亮度越大。大多数小行星的绝对星等为 11 ~ 19 等,平均值为 16 等(图 1-8 ~ 图 1-10)。

小行星的绝对星等不仅与其大小有关,还与其表面反照率有关。反照率有邦德反照率、几何反照率等。考虑小行星被太阳照射后,其反射或散射掉的能量与入射到小行星表面的总能量之比在所有频率范围的积分称为邦德反照率。相位角为 0° 时的反射光与入射光通量之比称为几何反照率。反照率与小行星表面的物质结构、成分等有关。

小行星被太阳加热的效果使得其“傍晚”的半球比“早上”的半球温度高一些,其向外热辐射呈各向异性,从而产生两种分别对小行星的轨道和自转产生影响的效应,即 Yarkovski 效应和 YORP 效应。