

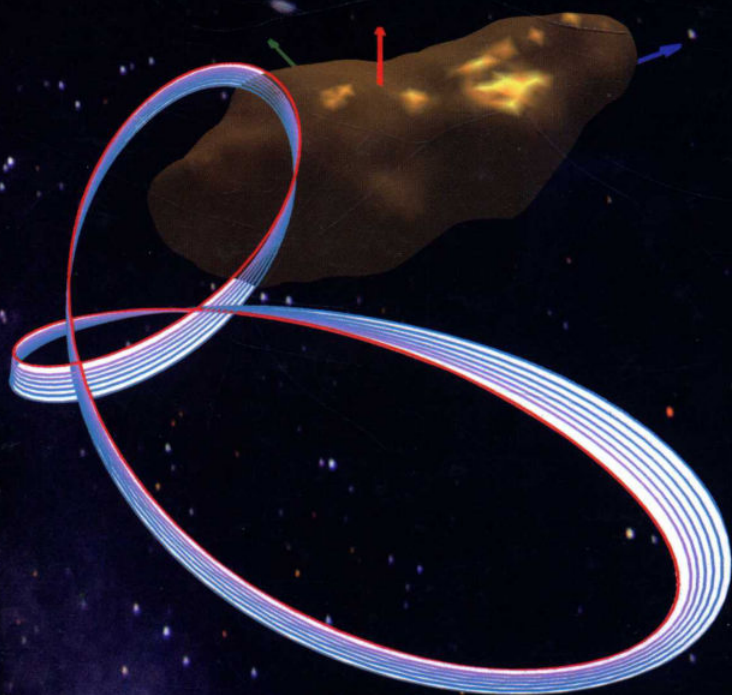


中国航天科技前沿出版工程·中国航空间信息技术系列
“十二五”国家重点图书出版规划项目

Dynamics and Control over Elongated Asteroids

细长小行星探测动力学与控制

曾祥远 李俊峰 刘向东 著



清华大学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

中国航天科技前沿出版工程·中国航天空间信息技术系列

“十二五”国家重点图书出版规划项目

Dynamics and Control over Elongated Asteroids

细长小行星探测动力学与控制

曾祥远 李俊峰 刘向荔 著

贵州师范学院内部使用

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

太阳系内已经发现的小行星数以百万计,它们形态各异,存在诸多不同于地球等大行星的奇特动力学现象。为深入理解和揭示上述现象的动力学机理,书中选取细长小行星为研究对象,分析不规则引力场特征及其绕飞探测器动力学特性等。全书共计6章,主要内容分为两大部分:(1)小行星引力场描述——不规则引力场建模方法、Chermnykh偶极子模型及其改进模型的动力学特性分析,包括引力平衡点分布、平衡点稳定性与局部流形等;(2)小行星引力场中质点动力学,包括自然周期轨道、广义甩摆轨道、太阳帆航天器本体悬停轨道等。本书可供航天动力学、深空探测等领域研究者参考,也可供对小行星探测感兴趣的人员阅读。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

细长小行星探测动力学与控制/曾祥远,李俊峰,刘向东著. —北京:清华大学出版社,2019

(中国航天科技前沿出版工程·中国航天空间信息技术系列)

ISBN 978-7-302-52273-7

I. ①细… II. ①曾… ②李… ③刘… III. ①外行星探测器—轨道力学 ②外行星探测器—飞行控制
IV. ①V476.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第024552号

责任编辑:佟丽霞

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:三河市铭诚印务有限公司

装 订 者:三河市启晨纸制品加工有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:11

字 数:268千字

版 次:2019年7月第1版

印 次:2019年7月第1次印刷

定 价:79.00元

产品编号:070676-01

贵州师范学院内部使用

序言

人们流连于层峦叠嶂之间时,忍不住会赞叹大自然的鬼斧神工;人们徜徉在海边或湖畔时,可能会被漂亮的鹅卵石吸引。假如你去遨游太空,就会发现很多大大小小、奇形怪状的石块散落在太阳系中,像地球一样绕着太阳运行。这些“太空怪石”有些飞行在地球轨道附近,有些在木星轨道上伴随在木星的“鞍前马后”,有些游荡在海王星轨道以外,但更多的则聚集在火星和木星轨道之间,形成了一个巨大的环带。它们大的直径上千公里,块头小的则仅有几米,而且部分石块表面有着深坑和悬崖等复杂的地形。

这些“太空怪石”正是本书的研究对象——小行星。小行星轨道分布以及地形地貌等,是人类近200年来不断探索得到的信息。作为太阳系形成后的残余物质,小行星还有很多有趣而神秘的故事等待你去发现,等待人类去探索。

曾祥远博士自研究生阶段开展深空探测动力学与控制相关研究已约10年。本书是作者近几年重要科研成果的系统性整理,重点阐述了细长小行星的动力学特性。我们研究团队近20年来一直从事航天动力学与控制研究工作,结合国家重大基础工程,面向世界航天动力学前沿,在火星探测、月球探测、小行星探测、轨道设计与优化、航天器充液晃动等方向做出一些成果。本团队在清华大学出版社已出版两部动力学与控制方面专著,第一部是《深空探测动力学与控制》,共10章,每一章讲一个专题;第二部是《太阳帆航天器动力学与控制》,是第一部专著中第10章内容更详细更系统的阐述,包含更丰富的研究成果。这本书可以与前两部构成一个系列。书中自小行星的奇特动力学入手,再由不规则引力场描述、平衡点特性、自然周期轨道,讲到悬停探测轨道等,渐次递进,适合于读者由浅入深了解小行星动力学研究。

随着国际航天科技发展,小行星探测的动力学与控制问题成为研究热点,相关的学术专著还较少见。希望此专著为有志于研究小行星探测动力学与控制的读者揭开神秘面纱之一角,愿有越来越多的同仁关注航天动力学发展。

星空浩瀚,追梦无止。

李俊峰 于清华园

2019年3月1日

前言

小行星探测是 21 世纪深空探测领域的重要方向之一,小行星不规则引力场内的动力学与控制问题则是探测任务轨道设计的理论基础和亟待解决的关键问题。自 20 世纪 70 年代,人类对小天体的航天探测才逐渐兴起。已有的理论研究、天文观测以及航天探测实践,使得人们对这些奇形怪状的“太空石块”有了基本了解,但仍缺乏系统深入的认知。目前国内小行星探测研究方兴,理论分析和未来工程实践均面临诸多挑战。作为小行星研究领域的专业书籍,书中主要阐述了作者有关小行星动力学的研究成果,包括小行星引力场简化模型及其动力学特性、引力场近似方法、环绕小行星的周期轨道、广义甩摆和应用太阳帆的悬停探测等。全书内容具体安排如下:

第 1 章介绍小行星探测意义、研究进展与挑战、奇特动力学特性等。

第 2 章为小行星引力场中轨道动力学基础,简要介绍不规则引力场建模方法与极子棒模型,分析 Chermnykh 偶极子模型及其绕飞质点动力学。

第 3 章研究一类改进偶极子模型,讨论改进模型的平衡点分布与稳定性等问题。

第 4 章针对细长小行星介绍两类引力场近似方法,包括平衡点位置逼近方法和引力梯度近似方法。

第 5 章探讨小行星不规则引力场中的周期轨道,介绍分层网格法和最优控制法等两类周期轨道搜索方法,给出多族周期轨道并分析轨道特性。

第 6 章研究两类特殊轨道:广义甩摆和本体悬停。分析不规则引力场中广义甩摆的动力学机理;简要介绍太阳帆航天器,研究太阳帆在小行星引力场内的悬停飞行。

除已经标明的引用外,全部内容均为作者近几年研究成果。书中公式和符号较多,同一符号在不同章节可能含义不同,请读者注意具体说明。

感谢国家自然科学基金“细长形小行星引力场拓扑动力学与轨道控制研究”(11602019)、“碎石堆小行星的不规则散体建模与 N 体动力学仿真研究”(11572166)、“深空探测中的若干关键非线性不确定性动力学与控制问题研究”(11432001)、中国科协青年人才托举工程(2016QNRC001)、北京理工大学优秀青年教师资助计划(2015YG0605)的大力支持。本书获得 2017 年度国家科学技术学术著作出版基金资助(2017-A-001)。曾祥远特此感谢家人,感谢美国工程院院士 Kyle T. Alfriend 教授、Srinivas R. Vadali 教授、国际宇航科学院院士 Giovanni Vulpetti、宝音贺西教授、唐胜景教授、张景瑞教授等的指导、合作与帮助。

限于作者水平,不妥或错误之处恳请批评指正。

编者

2018 年 10 月

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	2
1.2 小行星分类与细长小行星	3
1.2.1 轨道分布与光谱特性	3
1.2.2 细长小行星	5
1.3 小行星探测进展与挑战	6
1.3.1 小行星探测任务	6
1.3.2 小行星探测之挑战	7
1.4 小行星的奇特动力学	9
1.4.1 雅科夫斯基效应和 YORP 效应	10
1.4.2 引力平衡点与局部流形	11
1.5 周期轨道与悬停轨道	13
1.5.1 自然周期轨道	13
1.5.2 悬停飞行轨道	15
1.6 小结	16
参考文献	16
第 2 章 不规则小行星引力场模型	21
2.1 引言	22
2.2 轨道动力学建模	23
2.2.1 引力作用范围与参考坐标系	23
2.2.2 质点运动方程	25
2.3 不规则引力场的描述	27
2.3.1 引力场建模方法概述	28
2.3.2 多面体法	30
2.3.3 简化模型法	33
2.4 Chermnykh 偶极子模型	35
2.4.1 动力学方程	36
2.4.2 引力平衡点	37
2.5 偶极子模型平衡点特性	40
2.5.1 平衡点拓扑分类	41
2.5.2 平衡点附近扰动解	42

2.6 小结	47
参考文献	47
第3章 偶极子模型的改进	51
3.1 引言	52
3.2 单椭球偶极子模型	52
3.3 赤道面内引力平衡点	54
3.3.1 平衡点分布特征	56
3.3.2 模型参数对平衡点的影响	58
3.4 赤道面内平衡点稳定性	61
3.4.1 共线平衡点	62
3.4.2 非共线平衡点	64
3.5 赤道面外引力平衡点	65
3.5.1 平衡点位置	66
3.5.2 模型参数的影响	67
3.6 赤道面外平衡点稳定性	68
3.7 双椭球偶极子模型	71
3.7.1 引力平衡点	71
3.7.2 三类双椭球改进模型	72
3.8 小结	76
参考文献	77
第4章 用简化模型近似细长小行星引力场	79
4.1 引言	80
4.2 偶极子模型近似细长小行星	80
4.2.1 平衡点位置近似方法	81
4.2.2 仿真算例与讨论	84
4.2.3 偶极子模型近似效果	87
4.3 极子棒模型动力学特性	90
4.3.1 动力学方程与受力比	91
4.3.2 引力平衡点与稳定性	92
4.4 引力梯度近似方法	97
4.4.1 简化模型参数优化	97
4.4.2 小行星(8567)1996 HW1 算例	98
4.4.3 与其他简化模型比较	101
4.5 仿真算例与讨论	102
4.5.1 误差分析与计算效率	102

4.5.2	近似 433 Eros 小行星	105
4.6	小结	106
	参考文献	107
第 5 章	环绕细长小行星的周期轨道	109
5.1	引言	110
5.2	环绕周期轨道	111
5.2.1	周期轨道定义	111
5.2.2	传递矩阵与单值矩阵	112
5.2.3	分层网格法与轨道延拓	113
5.3	小行星 1620 Geographos 绕飞周期轨道	115
5.3.1	引力平衡点局部周期轨道	116
5.3.2	大范围周期轨道	118
5.4	其他类型周期轨道	120
5.4.1	线性稳定平衡点 E_1 绕飞轨道	121
5.4.2	线性稳定三角平衡点周期轨道	122
5.4.3	其他新型周期轨道	124
5.5	最优控制方法求解周期轨道	125
5.5.1	间接法求解周期轨道	126
5.5.2	两类赤道面内周期轨道	128
5.5.3	倾角轨道及其延拓	131
5.6	小结	132
	参考文献	133
第 6 章	广义甩摆与太阳帆悬停	135
6.1	引言	136
6.2	广义甩摆	136
6.2.1	甩摆轨道能量方程	137
6.2.2	单次甩摆动力学机理	139
6.3	广义甩摆参数化讨论	140
6.3.1	近拱点对甩摆轨道的影响	140
6.3.2	小行星附近逃逸轨道	143
6.4	本体悬停飞行与太阳帆航天器	146
6.4.1	悬停飞行动力学建模	146
6.4.2	太阳帆航天器	147
6.4.3	太阳帆简化模型	148
6.5	悬停探测球形小行星	150

6.5.1	太阳帆悬停动力学	151
6.5.2	太阳帆模型对悬停轨道的影响	153
6.5.3	小行星自转周期与悬停半径	155
6.6	悬停探测细长小行星	157
6.6.1	太阳帆航天器可行悬停轨道	158
6.6.2	悬停探测小行星 951 Gaspra	162
6.7	小结	164
	参考文献	165

第1章

绪论

贵州师范学院内部使用

1.1 引言

浩瀚星空宛若无垠的画卷,展示着难以名状的深邃之美。对未知好奇的天性与了解自然的渴求,激励着人们不断向深空迈进,在一次次伟大的冒险之旅中,尽情展现着人类的智慧、浪漫和一往无前的勇气。历经 40 多年的太空旅行(1977 年发射),携带着载有地球问候语金质唱片的“旅行者 1 号”已进入恒星际空间,且仍在不断刷新着深空的记录;从日地 L_1 点轨道“借走”去探测哈雷彗星的 ISEE-3 探测器,在 2014 年 8 月与美国宇航局(NASA)的设计师 Farquhar 擦肩而过,再一次远离地球而去;2000 年的情人节,第一颗以小行星为直接探测目标的 NEAR 飞行器成功绕飞爱神星(433 Eros^①);2011 年,美国喷气推进实验室(JPL)的工程师们提出了一个疯狂的想法,拟邀请一颗小行星到地月系统“做客”;2016 年的 7 月 31 日晚,超期服役两年多的“玉兔号”月球车发出最后一条晚安的微博,从此长眠于月球^[1]。上述故事仅撷取了深空探测大潮中的几朵浪花,面对星辰大海的征途,人类从未停止前进的脚步。

北京时间 2014 年 11 月 13 日凌晨,“菲莱”着陆器(Philae)在彗星表面成功着陆,成为人类历史上首颗着陆彗星的探测器。这是欧空局(ESA)“罗塞塔”(Rosetta)任务的一部分,该探测器于 2004 年 3 月发射,历经 10 年太空飞行,于 2014 年 8 月成功交会 67P/Churyumov-Gerasimenko 彗星,并在绕飞三个月后成功释放着陆器^[2],图 1.1 分别给出轨道器及着陆器的特写。实际上,该项目早在 20 世纪 70 年代就被提出,于 1993 年批准实施,这个几乎穷尽一代科技人员职业生涯的伟大项目,无疑将小天体探测推向了新的高峰!尼罗河畔的罗塞塔石碑打开了通往古埃及历史文明的大门,人们以石碑之名命名该项目,就是希望它为人类揭开彗星是否为地球提供了生命所需的有机物等谜题,进而在研究太阳系及人类起源等问题中起到突破作用。

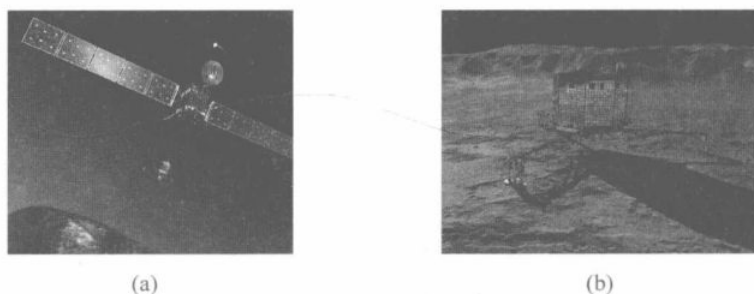


图 1.1 “罗塞塔”彗星探测器与“菲莱”着陆器示意图
(a) “罗塞塔”环绕探测器; (b) “菲莱”着陆器

太阳系内除了 8 颗大行星、已辨认的 5 颗矮行星(Dwarf planet)外,还存在着数以亿计的小天体,其中绝大多数是位于主小行星带的小行星,另外还包括彗星以及柯伊伯带(Kuiper belt)天体等。截至目前太阳系内发现的小天体逾 110 多万颗,它们大小不一、形状各异、轨道分布及自旋状态等亦不相同,为科学研究和航天探测带来了极大挑战。

相比于“西瓜”一样的大行星,“芝麻”大小的小行星不过 200 多年的研究历史。1801 年

① 各章首次提到小行星时以“数字+名称”形式表示,如 433 Eros,后文将略去数字

意大利天文学家 Piazzzi 发现了第一颗小行星——谷神星(1 Ceres, 2006 年被重新归类为矮行星)。受科技水平限制和人们观念的影响,小行星观测与研究工作进行非常缓慢,直至 1970 年被正式编号的小行星尚不足五千颗。在真正进入航天时代以前,人们只能通过地面观测获取小行星的数据。1971 年“水手 9 号”(Mariner 9)探测器获得了火星卫星 Phobos 和 Demos 的照片,人类才首次揭开了小行星地形地貌的奥秘。20 年后,木星探测器“伽利略号”(Galileo)飞越 951 Gaspra 小行星并拍照,1993 年飞越 243 Ida 小行星时首次确认了太阳系内双小行星系统的存在^[3]。图 1.2 展示了酷似马铃薯的 Gaspra 小行星(18.2km×10.5km×8.9km)、Ida 小行星(59.8km×25.4km×18.6km)以及它的小月亮 Dactyl(1.6km×1.4km×1.2km)。

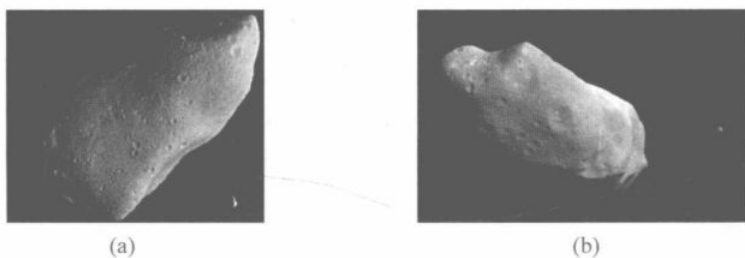


图 1.2 小行星 951 Gaspra(a)、小行星 243 Ida 和 Dactyl 双小行星(b)

伴随世界范围内第二轮深空探测热潮的兴起^[4],小行星逐渐成为科学探测的重点目标。通过地面观测以及航天探测等活动,人类目前已初步了解太阳系内小行星的大致轨道分布、基本化学组成、内部结构及个别小天体的地形地貌等。随着研究的深入,人们惊奇地发现这些不起眼的“太空石块”蕴含着丰富的太阳系早期物质。对小天体开展科学探测,将有助于揭示太阳系起源、行星演化及生命起源等谜题,丰富科学研究的内涵和推动人类空间科技的发展。此外,部分近地小行星对地球具有潜在撞击威胁,如 2013 年 2 月一颗直径约 15 米的小行星坠毁在俄罗斯车里亚宾斯克上空,导致多人受伤及建筑物受损。从未来小天体防御^[5]的实际出发,开展小行星探测对于提前获取目标信息及制定防御策略等,具有重要的现实意义。

放眼人类历史发展的长河,15 世纪的“大航海时代”造就了一批世界性大国。迪亚士、达·伽马、哥伦布等一大批航海先驱探索了新的航线,使得葡萄牙和西班牙成为第一代世界大国。麦哲伦船队的环球航行证明了地圆说,增进了人们对地球的认知并促进了科学的发展。之后,荷兰、法国、英国等一大批欧洲国家先后崛起,经过 170 多年的追赶,中国也逐渐走上自己的强国之路。21 世纪以来,随着知识的积累和科学技术的进步,各国航天事业都取得了长足的发展,加强国际合作成为人们的共识与提高创新能力的重要方式^[6]。各航天大国或机构除了争夺优势空间资源外,未来是否会有更多的国际合作,包括寻找地外宜居星球、共同防御对地球有撞击威胁的小行星等? 人类是否会跨入“大航天时代”,携手续写人类文明的新篇章,让我们拭目以待。

1.2 小行星分类与细长小行星

1.2.1 轨道分布与光谱特性

小行星指那些围绕太阳运行的比行星质量小得多的天体,是依据系统的质量和体积对

太阳系内天体进行分类的结果。“小行星”一词在汉语中最早见于1855年^[7],对应于英文中的“minor planet”,日文则称为“小惑星”。现在狭义的小行星应是除彗星和大行星卫星以外的小天体,对应英文中“asteroid”。书中小行星应理解为广义上的小行星(minor celestial bodies),包括小行星、彗星以及大行星的卫星等各类小天体。谷神星的发现主要是受提丢斯-波得定则(Titius-Bode law)的激励,预测在距离太阳约2.8 AU(AU为天文单位,1 AU为日地平均距离 1.496×10^8 km)处应该有一颗行星^[8]。为此,在谷神星发现后的近100年里,新的小行星的观测都集中在谷神星轨道附近。直至1898年Eros的发现,人们注意到其近日点仅有1.13 AU,这才意识到小行星并非全部位于火星和木星之间。

随着天文观测技术水平不断提高,被发现的小行星数量不断增加。根据它们的轨道分布,研究人员将其大致分为如下几类:距离太阳由近及远依次为近地小行星(Near Earth objects)、主带小行星(Main belt asteroids)、特洛伊小行星(Trojan asteroids)、半人马小行星(Centaurs)和柯伊伯带小行星。特别地,近地小行星由于存在撞击地球的潜在可能性而备受关注,如近年来一直跟踪研究的99942 Apophis小行星。为进一步区分近地小行星的轨道分布,又可将其归为3类(或4类),分别为阿登型(Atens)、阿波罗型(Apollos)和阿莫尔型(Amors),如图1.3所示。其中Aten族群中一部分小行星的轨道严格位于地球轨道之内,被称为阿迪娜型(Atiras或Apoheles)。另外,与太阳-木星系统三角平动点处特洛伊小行星类似,太阳-火星等系统三角平动点处发现的小行星称为对应系统的特洛伊小行星。

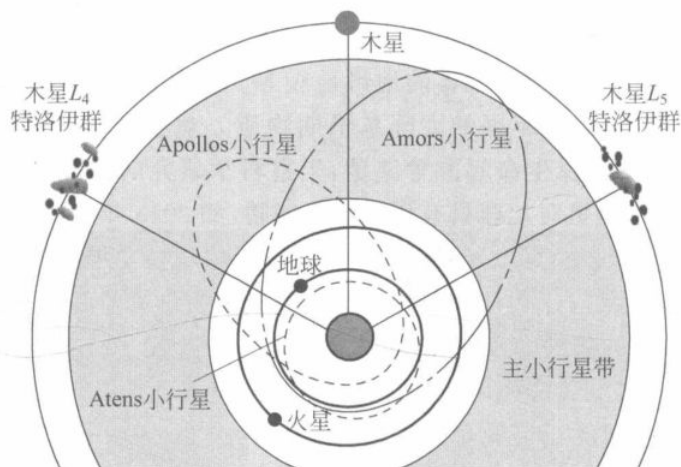


图 1.3 典型近地小行星、主小行星带、特洛伊小行星轨道分布示意图

另一种常见的小行星分类方法是按照光谱特性划分的,主要反映各小行星表面性质和物质组成的不同。反照率(Albedo)是衡量小行星表面结构和化学成分的重要参数,表征着行星或卫星反射光的能力,天文学家便是依据小行星的反照率和亮度来粗略估计它的大小。反照率取值范围为 $[0, 1]$,即从完美黑体至完全反射。目前,基于反照率和反射光谱,一般将小行星分为反照率较大 $[0.10, 0.22]$ 的石质小行星S型、反照率较小 $[0.03, 0.09]$ 的碳质小行星C型、具有相似光谱但不同组成的X型以及一些其他异常类型^[9]。

在已经发现的小行星中,约75%为C型,近17%为S型,其他的则绝大多数为X型中的亚类M型小行星。作为参照,月球的反照率约为0.07,而金星的高达0.6。另据统计发现上述小行星的轨道分布也存在一定的规律,C型小行星大多位于主带小行星的外侧,而S型

和 M 型则更多靠近主带内侧。我们已经知道由于木星轨道共振作用而导致“柯克伍德空隙”(Kirkwood gap)的出现,又是什么机制使得不同光谱类型的小行星呈现上述分布规律?不同反照率的小行星物质组成与演化机制有哪些特性?这些都是目前行星科学领域研究的重点。

1.2.2 细长小行星

在过去的研究中,人们对于一类具有细长外形的小行星特别感兴趣,因为它们典型的不规则外形与(近)球形相差甚远。原来广泛应用于近球形大行星的引力场建模方法,在细长小行星表面附近时近乎完全失效,促使人们不得不另辟蹊径,寻找新的引力场建模方法。相比于轨道分布和光谱类型等分类,细长小行星(Elongated asteroids)并非严格的分类定义,而是根据外形所挑选的一类研究对象。胡维多和 Scheeres 曾基于三轴惯量提出一个形状特征数^[10],用以描述小行星的质量分布特征,该参数可以从一定程度上反映小行星的形状,但很难用其定义形状。常见的哑铃形小行星(Dumbbell-shaped asteroids)显然属于细长小行星,如 216 Kleopatra、2063 Bacchus、4769 Castalia 以及密接双星(Contact-binary asteroids)(8567)1996 HW1 和 67P/Churyumov-Gerasimenko 等。除此之外,一些长短轴之比较大的小行星也属于此类,包括 Ida、Eros、Gaspra、1620 Geographos 及 25143 Itokawa(中文名“丝川”)等。

为了直观地理解细长小行星概念,图 1.4 给出了两颗小行星对比图,图中 Itokawa 属于典型的细长小行星,而 101955 Bennu 则为近球形小行星(非细长形)。图 1.4(a)所示为 2005 年 9 月“隼鸟号”探测器在距离 Itokawa 约 8km 处拍摄的照片,其酷似生姜的外形由“头”和“身体”两部分组成,经由凹陷的颈部区域连接在一起,三维尺寸约为 $535 \times 294 \times 209\text{m}$ 。根据“隼鸟号”导航数据等可估算出其系统质量为 $(3.58 \pm 0.18) \times 10^{10}\text{kg}$,进而可得平均密度为 $(1.95 \pm 0.14) \times 10^3\text{kg/m}^3$ 。基于 Itokawa 的多面体模型^[11],可得其三轴转动惯量 $[I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}]^T$ 分别为 $[3.8914, 9.1408, 9.6189]^T \times 10^8\text{kg} \cdot \text{km}^2$,对应的形状特征数 $(I_{yy} - I_{xx}) / (I_{zz} - I_{xx}) = 0.9165$,非常接近理想细长体的 1.0。

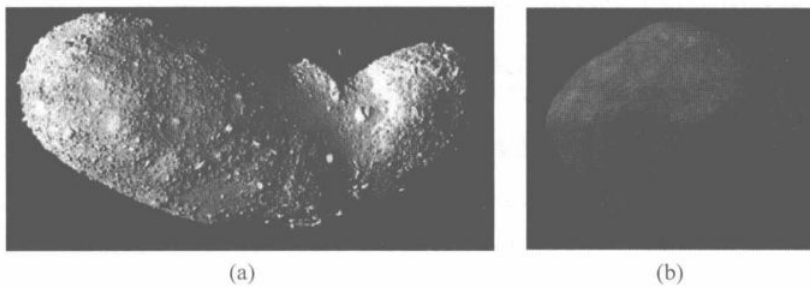


图 1.4 细长小行星 Itokawa 与近球形小行星 Bennu
(a) 25143 Itokawa; (b) 101955 Bennu

近地小行星 Bennu 为美国 OSIRIS REx 任务探测目标(OSIRIS REx 全称 Origins Spectral Interpretation Resource Identification Security Regolith Explorer^[12],中文译名“源光谱释义资源安全风化层辨认探测器”),运行在轨道半长轴约 1.1264 AU 的椭圆轨道上,目前仅有雷达观测模型^[13]。数据显示它的平均半径约 $246 \pm 10\text{m}$,系统质量 $6 \sim 7.76 \times 10^{10}\text{kg}$,平均密度 $(1.26 \pm 0.07) \times 10^3\text{kg/m}^3$ 。其三维尺寸约为 $576 \times 539 \times 526\text{m}$,基于多面体模型可

得三轴转动惯量分别为 $[1.3749, 1.4285, 1.5421]^T \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{km}^2$, 对应形状特征数为0.3206。因此, Bennu 虽然具有不规则的外形和表面陨击坑等, 但整体外形更趋向于球体。

由于小行星数量庞大且形态各异, 很难(像地球等近球形大行星一样)给出较为统一的动力学性质以及探测轨道设计方法等。书中选取细长小行星为主要研究对象, 寻找合适的引力场描述方法, 研究它们共有的动力学特性。通过讨论小行星附近的周期轨道和悬停轨道等, 揭示小行星引力场中特殊动力学行为, 为人们了解细长小行星提供参考, 为未来航天探测任务奠定理论基础。同时, 本书希望藉此细长小行星为突破口, 为其他不规则小天体问题分析提供一种研究思路。

1.3 小行星探测进展与挑战

1.3.1 小行星探测任务

20 世纪 90 年代以来, 世界各航天大国或空间机构纷纷提出各自的深空探测计划, 包括 NASA 的“新太空计划”、ESA 的“曙光女神计划”以及日本的“月球和小行星探测计划”等。2004 年, 中国探月工程正式立项, 拉开了我国深空探测的序幕。在上述探测计划的支持下, 以小天体为直接目标的任务已开展 6 项, 包括美国的“尼尔-舒梅克号”(NEAR-Shoemaker)、“黎明号”(Dawn)以及 2016 年 9 月刚发射的 OSIRIS-REx 探测器、日本的“隼鸟号”(Hayabusa)和“隼鸟 2 号”(Hayabusa-2)、ESA 的“罗塞塔号”等。

特别地, 我国的“嫦娥二号”探测器在圆满完成探月任务后, 使用剩余燃料成功开展了一系列拓展任务。探测器自环月轨道出发, 首先飞往日地拉格朗日点 L_2 点, 在完成一个拟周期轨道的完整飞行后, 继续飞往深空, 并于 2012 年 12 月近距离飞越近地小行星 4179 Toutatis, 首次拍摄并传回了它表面的清晰图像, 实现了我国在小行星探测领域零的突破。中国学者黄江川和季江徽等有机会第一次使用自主观测数据分析 Toutatis 的外形地貌与自旋状态等^[14], 改进了人们对 Toutatis 的认识, 为未来深空探测积累了宝贵经验。表 1.1 列出了近 30 年来世界范围内与小行星相关的主要探测任务, 包括飞越、绕飞以及采样返回等。

表 1.1 部分代表性小行星探测任务简述

任务名称	小行星探测任务描述
Galileo 1989.10 NASA	1991 年飞越探测小行星 951 Gaspra, 1993 年飞越探测小行星 243 Ida(首次发现双小行星系统 Ida-Dactyl)
Near-Shoemaker 1996.2 NASA	1997 年飞越小行星 253 Mathilde, 2001 年登陆小行星 433 Eros(首颗绕飞并登陆小行星的探测器)
Cassini 1997.10 NASA/ESA/ASI ^①	2000 年偶遇小行星 2685 Masursky 并远距离飞越, 2004 年进入环土星轨道并成功分离着陆器 Huygens。2005 年 Huygens 交会土卫六 Titan 并成功着陆(首颗外太阳系着陆器)

① ASI: Italian Space Agency, “意大利宇航局”简称。

续表

Deep Space 1 1998.10 NASA	1999年7月飞越探测小行星 9969 Braille, 2001年9月飞越探测彗星 19P/Borrelly
Stardust 1999.2 NASA	2002年远距离飞越小行星 5535 Annefrank, 2004年飞越彗星 81P/Wild 并将采集的慧发样本运回地球, 2011年飞越彗星 9P/Tempel
Hayabusa 2003.5 JAXA	2005年9月交会小行星 25143 Itokawa, 同年11月登陆小行星并采样, 于2010年6月返回地球(首颗小行星采样返回探测器)
ROSETTA 2004.3 ESA	2008年飞越小行星 2867 Steins, 2010年飞越小行星 21 Lutetia, 2014年8月交会彗星 67P/Churyumov-Gerasimenko 并于11月释放着陆器 Philae 成功着陆(首颗彗星环绕探测器及着陆器)
Deep Impact 2005.1 NASA	2005年7月飞越彗星 9P/Tempel(又名“Tempel 1”)并释放撞击器成功撞机彗核, 2010年飞越彗星 103P/Hartley-2
New Horizons 2006.1 NASA	2006年偶遇小行星 132524 APL(又名“2002 JF56”)并远距离飞越, 2015年7月14日以 12500km 距离飞越矮行星 Pluto。预计 2019 年飞越探测柯伊伯带小天体(486958)2014MU ₆₉
Dawn 2007.9 NASA	2011年7月交会探测主带小行星 4 Vesta(“灶神星”), 2015年交会探测矮行星“谷神星”1 Ceres
Chang'e-2 2010.10 (CASA)	绕月球飞行并拍照, 2011年8月飞抵日地拉格朗日点 L ₂ 点并绕飞探测, 2012年12月近距离飞越探测小行星 4179 Toutatis
Hayabusa 2 2014.12 JAXA	2018年7月交会小行星 162173 Ryugu (1999 JU3), 一年半时间绕飞探测及采样, 预计 2019 年飞离小行星并于 2020 年 12 月返回地球
OSIRIS-REx 2016.9 NASA	2018年交会近地小行星 101955 Bennu (1999 RQ36), 开展 500 多天绕飞探测, 预计 2020 年 7 月完成采样, 于 2023 年 9 月返回地球

由表 1.1 可知,小行星探测任务从“伽利略号”的简单飞越向着绕飞、着陆、采样返回等复杂方向发展。以一次完整的采样返回任务为例,轨道设计大致分为 7 个阶段:地心逃逸段、日心转移段、目标小行星俘获段、近距离探测段、小行星逃逸段、日心返回段、地球再入段,其中涉及航天器长期在轨飞行、精密定轨、深空测控通信等诸多关键技术。近距离探测的方式包括环绕飞行、悬停飞行、着陆采样等操作^[15],这与地球、火星等引力场内的开普勒轨道极为不同。

1.3.2 小行星探测之挑战

小行星不规则的引力场极为复杂且差别较大,探测器在小行星附近的运动控制仍是亟待解决的技术难点,也是开展小行星探测活动必须面对的挑战。准确把握小行星附近的轨道动力学特性,将是任务成功实施的前提和基础。目前的地面观测还无法提供小行星的准

确信息(包括运动状态、外形及引力场数据等),探测器只能在接近目标的同时进行测量和校准。无论是日本的“隼鸟号”,还是欧空局的“罗塞塔”探测器,为了能够顺利执行采样或子探测器着陆任务,航天器需要不断调整和降低轨道高度,获取满足任务要求的高精度引力场数据。实际上,每次接近操作都存在着因参数估计不准确而导致任务失败的巨大风险,即撞向小行星表面或飞离目标引力场等^[16]。

上述困难会直接反映在航天器的实际飞行中。以日本的“隼鸟号”任务为例,在采样操作之前,轨道器拟释放一个微小型着陆器“智慧女神”(MINERVA,全称 Micro/Nano Experimental Robot Vehicle for Asteroid)。MINERVA 通过内部的动量轮实现在 Itokawa 弱引力表面的移动和跳跃探测,开展小行星表面拍照等研究。该着陆器于 2005 年 11 月 12 日投放,但未能成功着陆且未被 Itokawa 俘获,最终进入了日心轨道,成为一颗绕太阳运行的小卫星^[17]。事后查明“隼鸟号”投放着陆器的实际高度距离小行星表面约 200m,而原定投放高度为 60~70m,即投放着陆器的指令错过了最佳投放时机。失败的直接原因推测是对“隼鸟号”飞行轨迹估计不足(释放着陆器由地面指令控制),而更深层次的原因或是当时对 Itokawa 不规则引力场的认识还不够充分。

另一个遗憾来自“罗塞塔”任务的着陆器“菲莱”,它虽然成功降落至 67P 彗星表面,但并未将自己固定在预定着陆区域,而是落地反弹后掉入一个几乎没有光照的悬崖底部。这使得“菲莱”在耗尽自身能源后进入“沉睡”状态,之后基本没再提供新的科学数据。实际上,欧空局的项目人员在“罗塞塔”绕飞 67P 一段时间后,为“菲莱”挑选了几个可能着陆区域,综合论证后才选定了一块较为平坦的地方作为最终着陆地点。即便如此,“菲莱”依然未能着陆在计划区域,可见小天体近距离探测挑战之大。

作为“罗塞塔”任务的探测目标,67P 彗星丘留莫夫-格拉西缅科的三维尺寸为 $4.1\text{km} \times 3.2\text{km} \times 1.3\text{km}$,平均密度约 $0.4 \times 10^3 \text{kg/m}^3$,自转周期 12.4 小时,总质量 $1.0 \pm 0.1 \times 10^{13} \text{kg}$,由此估算其逃逸速度约 1m/s 。据 ESA 官方消息,“菲莱”着陆时用于固定的鱼叉系统出了故障,只能依靠三条腿来把自己固定在彗星表面。对彗核地表地质特征了解不够准确、加之固定依附系统故障,“菲莱”落地反弹在所难免。对于彗核 1m/s 的低逃逸速度,“菲莱”经过反弹后能最终降落至彗核表面已属不易。若 67P 的尺寸小到和 Itokawa 一个量级,那“菲莱”的命运很有可能和 MINERVA 一样,成为太空里又一个飘荡的小卫星。因此,深入研究小行星地貌地质特征、分析小行星引力场分布,对于近距离航天探测及着陆采样等活动格外重要。

小行星 Itokawa 的表面重力加速度仅为 $\sim 0.1\text{mm/s}^2$ (地球表面重力的 10^{-5} 倍),表面逃逸速度约 0.2m/s ,释放着陆器在其表面稳定着陆、继而完成稳定表面移动极具挑战,着陆速度稍大就会出现落地反弹。如果反弹速度低于表面逃逸速度,随着碰撞的能量衰减,最终有可能降落在小行星表面。若反弹速度大于表面逃逸速度,着陆器的最终命运将很难准确预测。因此,在设计小行星着陆器或者表面探测机器人时,如何实现稳定抓地与成功完成表面移动将是未来重要发展方向之一^[18]。

在以往的火星和月球探测中,着陆器一般为轮式探测车。对于小行星表面探测器而言,传统的轮式探测车很难适应其复杂的地表结构(大量陨击坑、悬崖、碎石堆结构等),容易发生侧翻或弹跳。同时,小行星的表面弱引力使得车轮与地面接触力很小,牵引力稍大会高于最大表面摩擦力,进而导致车轮打滑而无法有效行进。此外,为了避免化学推进剂等污染