

第1章

绪论

1.1 引言

浩瀚星空宛如无垠的画卷,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。

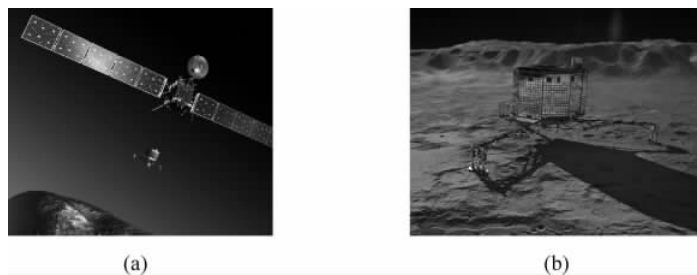


图 1.1 “罗塞塔”彗星探测器与“菲莱”着陆器示意图

(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 Piazz 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的进展非常缓慢,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($18.2\text{km} \times 10.5\text{km} \times 8.9\text{km}$)、Ida 小行星($59.8\text{km} \times 25.4\text{km} \times 18.6\text{km}$)以及它的小月亮 Dactyl($1.6\text{km} \times 1.4\text{km} \times 1.2\text{km}$)。



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 $1.496 \times 10^8 \text{ km}$)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。

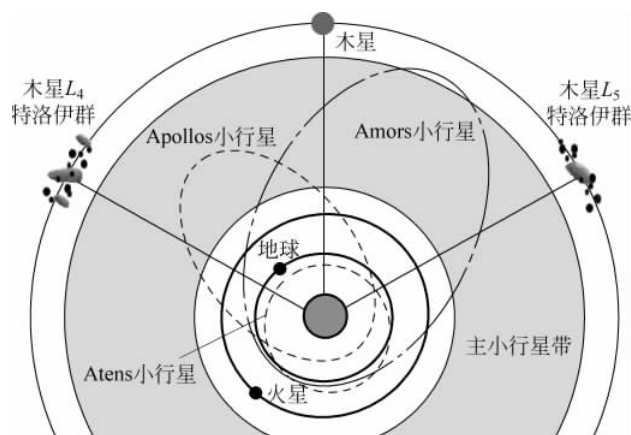


图 1.3 典型近地小行星、主小行星带、特洛伊小行星轨道分布示意图

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、Gaspia、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。

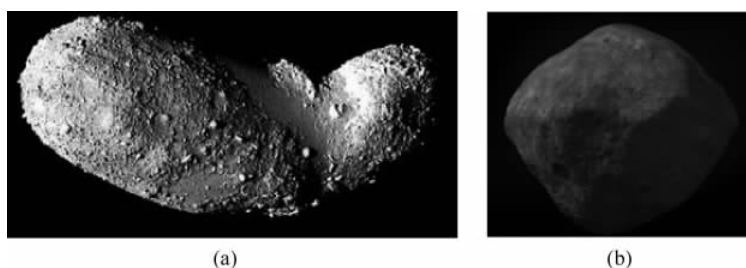


图 1.4 细长小行星 Itokawa 与近球形小行星 Bennu

(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
发射时间	
发射机构	
Galileo	
1989. 10	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)
NASA	
Near-Shoemaker	
1996. 2	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)
NASA	
Cassini	
1997. 10	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)
NASA/ESA/ASI ^①	

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,牵引力稍大便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

小行星,微小型着陆器不采用反作用推力式。因此,为了适应小行星不规则弱引力场和复杂多变的地表,需要研发设计全新的表面探测机器人,包括但不限于跳跃式机器人、柔性附着机器人,以及特殊抓地机器人等^[19]。

早在 1999 年,日本东京大学的 Yoshimitsu 和日本空间科学研究所(ISAS)的 Kubota 等人便着手 MINERVA 的研制工作^[19]。作为 Hayabusa 的备选载荷,他们对圆柱外形的 MINERVA 跳跃探测进行了理论分析和落塔试验等^[20]。1999 年 JPL 的 Fiorini 等^[21]设计了球形跳跃机器人,可以在微重力环境中实现滚动和跳跃。2002 年日本东北大学 Yoshida 等^[22]设计了一种足部带爪的三足爬行机器人,用以完成定点探测和攀爬悬崖等任务,如图 1.5(a)所示。之后,Yoshida 研究组进一步对多足机器人探测小行星的适应性和稳定性开展了研究^[23]。2008 年,Bellerose 和 Scheeres^[24]对椭球体近似的小行星表面动力学进行了理论分析,给出了曲面上弹跳运动的近似解析解。2012 年,Nagaokay 和 Yoshida 等^[25]研制了一种毛刷跳跃机器人,通过将偏心轮和毛刷弯曲跳跃机制相结合,实现了新的表面跳跃探测方式。

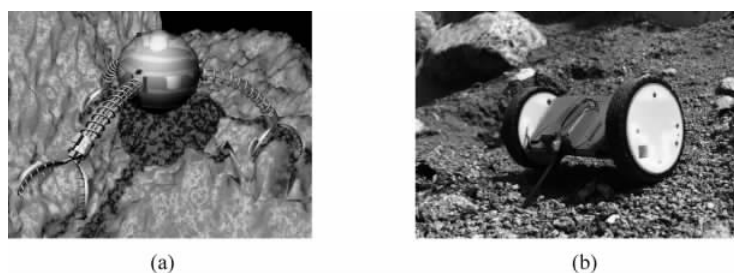


图 1.5 小行星表面探测机器人
(a) 三足带爪机器人; (b) JPL 的 PUFFER 机器人

2017 年 3 月 NASA 发布了一款非常萌的弹出式平板折叠探测机器人,取名 PUFFER (Pop-Up Flat Folding Exploring Robot)^①。该款机器人高约 7cm,重约 150g,是 JPL 以折纸为灵感开发的火星探测最新设备,如图 1.5(b)所示。试验表明,它可以通过折叠身体穿过狭小空间或进入探测车无法驶入的洞穴,还可利用尾巴支撑攀爬斜坡或越过障碍物等。JPL 的研发团队表示,在一次任务中,可以派出数十个 PUFFER,专门负责钻探洞穴等实地探测,将表面样本带回着陆器进行分析。上述研究为小行星表面探测机器人研制提供了新的思路,但目前仍处于地面测试阶段。迄今为止,世界范围内还没有完全成功的小行星表面探测器,作为未来探测的重要方式之一,有必要进行深入研究。

1.4 小行星的奇特动力学

随着小行星探测任务的开展和科学研究的不断深入,研究人员对于小行星不规则引力场有了初步了解。由于不规则外形与快速自旋的耦合作用,小行星会存在一些不同于传统大行星的奇特动力学现象。本节重点介绍对于小行星演化具有重要作用的雅科夫斯基效应

① <https://gameon.nasa.gov/projects/puffer/>

和 YORP 效应,以及快速自旋不规则引力场中的平衡点与局部流形等。小行星引力场中的自然周期轨道和悬停探测轨道将在下一节单独讨论。

1.4.1 雅科夫斯基效应和 YORP 效应

近年来,小行星天文观测及相关理论研究取得了一系列瞩目成果,发现双星系统、三小行星系统、运行轨道奇特的“逆骨”(Niku)小行星^[26]等。同时,人类已经观测证实了雅科夫斯基效应(Yarkovsky effect)和 YORP(Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack)效应。由于小行星不规则的外形和复杂的地表特性,被反射的太阳光以及二次辐射等相对星体质心均会具有不对称性,使得星体上产生一个净力和净力矩的作用。二者的作用都很微弱,但在小行星长期演化中会逐渐积累,净力会对小行星的轨道半长轴产生影响,即为雅科夫斯基效应;而净力矩则会改变小行星自转轴指向以及自旋速率等,即为 YORP 效应。

2003 年来自 JPL 的 Chesley 和 Ostro 等在《科学》杂志发表论文,通过对 6489 Golevka 小行星的观测首次证实了雅科夫斯基效应的存在^[27],并据此推算它的平均密度约为 2.7g/cm^3 。2007 年 Lowry 和 Taylor 等^[28]在《科学》杂志同一期上发表两篇文章,证实他们的小行星 2000 PH5 上发现了 YORP 效应。为纪念这一发现,该小行星后来被命名为 54509 YORP。上述效应会受多种因素的影响,包括目标天体的大小、形状、轨道分布,甚至表面粗糙度等,对于研究小行星轨道和自旋状态等的长期演化具有重要意义。在此基础上,若进一步考虑小行星表面石块间的热传导,会有一个切向分量对小行星自旋产生影响,称为“切向 YORP 效应”(Tangential YORP effect)^[29]。受 YORP 效应的影响,小行星自旋速率可能会不断增大,直至星体某一部分的结构力无法平衡掉离心力和引力的综合作用时,小行星便会解体。若解体的部分(可以是多块)恰好被另外质量较大部分所俘获并开始绕飞,它们就可能构成双小行星(或多小行星)系统。

自人类发现第一个双小行星系统 Ida-Dactyl 以来,迄今已发现了约 300 个可能的双星或多星(如 Kleopatra 有两颗小月亮)系统,其中近地系统约 60 个,主带约 120 个。这些多星系统为理解太阳系的演化机制提供了重要线索,同时也为确定系统内小行星的质量密度等提供关键信息。目前研究认为,这些小行星系统的形成极有可能是原来的小行星在 YORP 效应下加速自转解体后形成的^[30]。不过在仿真分析中,如何精确地计算小行星的 Yarkovsky 和 YORP 效应,依然是当前研究的一大难题。

实际上,仅计算双星系统引力势就已经给研究人员带来了很大的挑战。美国得州奥斯汀大学 Braun 在其博士论文中研究了任意两个天体间的球谐函数引力势并应用于地月系统^[31],波兰的 Maciejewski 推导了全二体(Full two-body problem)模型中绝对与相对运动方程并分析了相对平衡点^[32]。为了研究双星系统内部物质的交换机制,Geissler 等用相同质量的大量质点描述原双星系统中的小行星,来分析 Ida-Dactyl 间的物质传递^[33]。科罗拉多大学 Scheeres(原密歇根州立大学)将全二体模型应用于双星系统,并进一步引入了双多面体模型^[34]。之后,Fahnestock 与 Scheeres 合作开发了多面体双星模型的仿真程序,对近地双星系统(66391)1999 KW4 的运动情况进行了仿真分析。结果表明,1999 KW4 系统主星 Alpha 的高速自旋已接近稳定性极限,间接地支持了 YORP 效应令 Alpha 加速自旋解体并最终形成当前双星系统的理论^[35]。