小行星形貌特征的分析与描述

王栋1,徐青1,邢帅1,刘衷瑞2

(1. 信息工程大学 地理空间信息学院,郑州 450052;2. 济南军区联勤部司令部军务装备处,济南 250022)

摘 要:小行星形貌特征的分析对深空探测器的导航、着陆点的选取具有重要意义。现有的深空星体形貌特征的分析与描述主要集中在火星、月球等类地天体上,而作为宇宙中为数众多、信息量丰富的小行星却鲜有文献对 其形貌特征作详细深入的介绍。文章以 Vesta、Eros、Mimas 等人类已探测的小行星为例,分析了几种典型的小行 星表面形貌特征,完善了凹坑、岩石等形貌特征的描述参数,并用仿真实验生成了 Mimas 小行星表面的 Herschel 凹坑模型。实验结果显示,所提出的特征描述方法具有较好的仿真度和实用性。

关键词:球型小行星;特征描述;特征模型;撞击坑;地形脊线

中图分类号: V11 文献标识码: A 文章编号: 2095-7777(2015)04-0358-07

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2015.04.010

0 引 言

随着深空探测技术的不断发展,世界各航天大 国相继开展了空间小天体的探测与研究,甚至实现 了对极少数小行星的近距离观测和表面附着实 验[1-2]。近年来,飞跃、绕飞和附着小行星的探测活 动主要有 Galileo 探测器飞越 Gaspra 小行星,接近 距离为1600 km(1991); NEAR 携带6种探测器飞 越 Eros 小行星(2000 年)和 Mathilde 小行星 (1997), 与它们的最近距离分别为 35 km 和 1 212 km; Deep Space-1 探测器造访了小行星 Braille(1999):"隼鸟号"探测器完成了小行星 Itokawa 的采样与返回任务(2005):DAWN 探测器 成功飞越了小行星 Vesta 和 Ceres(2007);"罗塞塔 号"(Rosetla) 探测器飞越了小行星斯坦斯(Steins) 和鲁特蒂亚(Lutetid)(2008,2010);而"嫦娥2号" 探测器成功交会了小行星"图塔蒂斯",相对距离约 为 3.2 km(2012 年)。这些探测器在空间旅行中, 获取了大量的影像视频和激光测距数据,为小行星 的研究提供了重要基础。

结合小行星的观测数据,华盛顿大学的 JimAlexopoulos等^[3-5]解算生成了Eros、Mimas、 Dione等多颗小行星点云模型,如图1(a)和图1(b) 所示;蓝朝桢等(2014)^[6]结合数字摄影测量处理技术,用DAWN探测器获取的影像数据及其姿态辅 助数据重建了 Vesta 小行星的三维模型,其效果如 图 1(c)所示。

但是,测量、重建地形形貌不是小行星探测的最 终目标,据航天大国拟定的小行星探测计划,精确附 着小行星、获取目标资源将是下一阶段小行星探测 的主要目的。这就需要我们对小行星的形貌特征作 相应的研究,以满足探测器自主着陆导航、附着点智 能选取^[7-9]。与类地天体相比,小行星因体积较小 而存在自身特点:

1)重力加速度微小而无法吸引气体,不存在液态水等流体;

2)星体形状差异较大,与其形成原因相关;

3)局部特征退化较小,鲜见火山喷发、风化、腐 蚀等作用。

本文将以现有观测的小行星数据为基础,分析 并总结小行星表面的典型形貌特征,尤其是特征的 空间结构,完善了凹坑特征的描述参数以规范和表 达特征信息,并用仿真实验验证特征描述参数的 效果。

1 典型的形貌特征

经过光谱仪、雷达等设备探测发现,小行星可分为 S、C、X 三大类以及一些次要的异常类型,而 S 和 C 类型是较为常见的。其中,S 型小行星的表面主 要成分为硅酸盐与金属铁,C 型的化学成分与太阳

收稿日期:2015-09-28 修回日期:2015-10-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41371436,41401533);国家 973 计划(2012CB720001)

大气的平均组成很相似,富含碳质和有机质成分,类 似于碳质球粒陨石[10-11]。目前,被深空探测器近距 离探测的小行星数量还非常之少,实际附着小行星 的只有"隼鸟号"和 NEAR 探测器,而其探测的目标 均是S型小行星。在小行星天然始成的基础上,加 之岩石质变、小陨石撞击等原因,使得其皱褶复杂、 形貌各异,但是仍存在着天然的共性特征。经过总 结现有小行星探测数据,本文将小行星表面形貌的 典型特征概括为:凹坑、裂沟、岩石、山丘、脊线等五 类特征。



(a) Eros小行星

图 1 Eros、Dione、Vesta 小行星的形貌模型 Fig. 1 Topography model of Mimas, Dione and Vesta asteroid

1.1 凹坑特征

一般的,小行星表面的凹坑是由空间小型陨石 撞击造成的,其半径小到百米之内大至数十千米。 下面列举出 Dactvl 与 Gaspra 小行星表面的凹坑影 像,如图2所示。



(a) Dactyl小行星凹坑影像 (b) Gaspra小行星凹坑影像 图 2 Dactyl 与 Gaspra 表面凹坑特征标绘 Fig. 2 Sign crater features on the surface of Dactyl and Gaspra

图 2(a)是由 Galileo 探测器在前往木星的途中 所拍摄的,其大小约为1.6 km×1.6 km,国际天文 学联合会(international astronomical union, IAU) 已为其标绘了两个典型的凹坑;图 2(b)亦是由 Galileo 探测器从 1.62 km \times 10⁴ km 的地方拍摄的, 并且获取了 Gaspra 小行星的全星影像,经过观测发 现,其表面布有大量的撞击坑特征,而 IAU 已为其 标绘出的凹坑就有 34 个。其中,半径最大的为 104.23 km,最小的为 0.57 km。

1.2 沟壑特征

小行星表面的沟壑主要是由于星体表面的坚硬 岩石区域先遭受撞击而造成裂缝,再经过岩石质变 填补而形成狭长的沟状。下面列举出 Lutetia 与

Vesta 小行星表面的沟壑特征影像,如图 3 所示。





(a) Lutetia小行星沟壑影像 (b) Vesta小行星沟壑影像 图 3 Lutetia 与 Vesta 表面沟壑特征标绘 Fig. 3 Sign fossa features on the surface of Lutetia and Vesta

图 3(a) 是 2010 年"罗塞塔号" 探测器掠过 Lutetia 小行星时所拍摄的,其大小约为 120 km× 100 km×80 km, IAU 已为其标绘的沟壑有 3 处。 图 3(b)是 Vesta 小行星的局部影像,包含了 Divalia 和 Lupercalia 两 处 沟 壑 特 征, 前 者 长 度 为 549.37 km,后者长度为 96.35 km。

1.3 岩石特征

与凹坑相似,多数小行星上都会存在一定数量 的岩石块,主要是由于微重力作用而吸附在小行星 星体表面。最具典型的是 Itokawa 小行星,如 图 4所示,普遍认为它是一个碎石堆,是一团被微弱 重力勉强聚在一起的岩石和冰块。由图可见,该小 行星表面遍布了大量的岩石块,形状自然,呈无规则 的突起块状物。

1.4 山丘特征

小行星表面的山丘往往呈小型的穹窿形,一般 只出现在直径大于 100 km 的小行星上,可能是由 于星体内部能量散发作用和表面质变作用而形成



图 4 Itokawa 小行星表面影像 Fig. 4 Images of surface of Itokawa asteroid

的。下面列举出 Vesta 小行星表面的山丘特征,如图 5 所示。



(a) Aricia山丘区域影像(b) Lucaria山丘区域影像图 5 Vesta 表面山丘特征标绘Fig. 5 Sign tholus features on the surface of Vesta asteroid

Vesta 小行星的大小约为 578 km×560 km× 458 km, IAU 在其表面已标绘出 3 个小型的山丘特 征。其中,图 5(a)与图 5(b)分别为其表面 Arica 和 Lucaria 山丘特征的影像,前者直径为 39.5 km,后 者直径为 24.75 km。

1.5 脊线特征

小行星的脊线是指突出的地形线,如连续的环形山脉、褶皱而突起的地形等,多数是由陨石撞击和地形挤压造成的。下面列举出 Ida 与 Vesta 小行星表面的脊线特征影像,如图 6 所示。

图 6(a)亦是 Galileo 探测器在星际旅行中所拍 摄的 Ida 小行星影像,其大小约为 58 km×23 km, IAU 已为其标绘的脊线特征名为 Townsend,其长 度为 40 km;图 6(b)是 Vesta 小行星的局部影像,包 含有 Neptunalia 脊线特征,其长度为 83.33 km, IAU 已为其标绘的脊线特征共有 3 个。

在上述 5 种典型的小行星形貌特征中,前 4 种 是局部独立的面状特征,而脊线是线状特征,主要用 来简化相对复杂的环形山、褶皱地形等形貌特征。 因为脊线作为一种线状特征,已经能够很好地显示





小行星表面突起形貌的走势,其脊线与脊线的关系 本身也可以作为一种特征来应用于深空探测实践 中。目前,在IAU官方网站上已经列出了9颗小行 星表面的部分形貌特征,但是这些特征均为人工观 测方式得到的,具有主观性强、工作量大等缺点。为 了能够满足小行星空间目标探测的需求,就需要为 上述特征建立规范的特征描述,以便于计算机智能、 客观地处理小行星数据。

2 特征描述

特征描述是指采用规范的特征参量来定量描述 各个典型特征,既可由特征对象来提取相应的特征 参量,又可由特征参量反向生成相应的特征对象。 在 IAU 和 NASA 官方网站上都有已探测小行星的 特征信息参量,如凹坑的半径、深度、中心坐标等,但 并不能完整、全面地描述形貌特征,需要我们进一步 归纳和完善现有的特征描述。本文主要从形貌特征 的空间结构、属性特点等角度来完善特征描述,以凹 坑的形貌特征为例,进一步细分特征提取参量和特 征识别参量^[12-13]。

2.1 普通凹坑的特征描述

20世纪80年代,NASA(SP-8023)报告就提出 采用普洛克鲁斯(proclus)坑模型来模拟凹坑,该模 型将凹坑的坑口视为理想圆形,而实际上陨石倾斜 撞击、冲击波及地震等因素的影响可能会造成凹坑 的坑口呈近似椭圆形。因此,本文在普洛克鲁斯 (proclus)坑模型基础上,提出了一种坑口为椭圆形 状的凹坑模型,其坑口形状如图7(a)所示,而其切 面形状如图7(b)所示。

依据图 7 的图形与符号,坑口的长半径 A、短半径 B,坑唇的直径为 d、高度 h,凹坑的深度为 H。 下面给出新的凹坑模型公式

z(x,y) =

$$\begin{cases} H\left(\frac{(x-x_{c})^{2}}{(A/2-d)^{2}} + \frac{(y-y_{c})^{2}}{(B/2-d)^{2}} - 1\right) + H' \\ h\left(1 - \left[\frac{\sqrt{(x-x_{c})^{2} + (y-y_{c})^{2}} - d/2 - l}{d/2}\right]^{2}\right) + H' \\ H' \end{cases}$$
(1)

式中

$$l = (A/2 - d) (B/2 - d) \times$$

$$\sqrt{\frac{(x - x_{c})^{2} + (y - y_{c})^{2}}{(x - x_{c})^{2} (B/2 - d)^{2} + (y - y_{c})^{2} (A/2 - d)^{2}}}$$

第1方程成立的条件是

$$\sqrt{\frac{(x-x_{\rm c})^2}{(A/2-d)^2} + \frac{(y-y_{\rm c})^2}{(B/2-d)^2}} \leqslant 1$$

第2方程成立的条件是

$$2\sqrt{\frac{(x-x_{\rm c})^2}{A^2} + \frac{(y-y_{\rm c})^2}{B^2}} < 1$$

以凹坑的拟合底点来确定凹坑的空间位置,应 用经纬度(x_c,y_c)来表示其在球面坐标系中的绝对 空间方位,应用高度H[']来表示其高程信息。应用上 述凹坑模型、设置相关特征参量,可以生成一组模拟 的凹坑形貌模型,如图 8 所示。



2.2 凹坑中央峰的特征描述

相关文献[13-15]指出,深空星体中少数大型 凹坑会存在中央峰特征,即凹坑底部中央的突起部 分。通过观测多个中央峰发现,它们形似尖尖的小



图 8 模拟凹坑的形貌模型 Fig. 8 Topography model of simulate-crater

山峰,而侧面可以用二次抛物线来拟合。下面给出 该类型凹坑的侧面图如图 9 所示。



Fig. 9 Profileschematic diagram ofcrater central peak

依据上图图形与符号,该凹坑中央峰的高度为 h₁,半径为 D₁,其周围平坦区半径为 D₂,其他未知 数含义与上节中定义一致。下面给出凹坑中央峰的 模型公式

$$Z(x,y) = \frac{4h_1}{D_1^2} \left(\frac{D_1}{2} - r\right)^2 - H$$
 (2)

式中

$$r = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}$$

结合上述凹坑及中央峰的模型公式,设置相关 特征参数,可生成一组模拟的带有中央峰的凹坑形 貌模型,如图 10 所示。

虽然结合上述特征提取参量可以生成相应的凹 坑模型,但是其并不具备较好的特征识别性能。为 了提高凹坑的识别性能,本文建议用坑唇厚度 h_{厚度}、 坑口高程变化曲线 q_{曲线拟合}、凹坑表面拟合度 q_{曲面拟合} 等参量来区别不同的凹坑,并将其归入特征识别参 量中。

3 实验情况

Mimas 小行星是天文学家威廉 · 赫歇尔于



图 10 带中央峰的凹坑模型 Fig.10 Crater model with central peak

1789年发现的,是环绕土星的一颗较大的卫星。其 平均直径达到 397.2 km,而整体形状并不呈完美的 球形,长半轴约为短半轴的 1.1 倍。2012年,Jim Alexopoulos 教授用"旅行者号"探测器获取的其影 像与激光点云数据进行处理,得到了优化后的多颗 卫星表面模型数据,如图 11 所示。



图 11 Mimas 小行星的形貌模型 Fig. 11 Topography model of Mimas asteroid

由图 11 可见, Mimas 小行星表面存在一个巨 大而古老的凹坑—Herschel Crater, 且坑中存在— 个较为明显的中央峰, 如图 12(a)所示。经过人机 交互测量, 测得该凹坑的长半径为 66.49 km, 短半 径为为 63.99 km, 直径接近该小行星半径的 1/3, 而 其高程差最大达到 8.21 km; 凹坑的中央峰峰高为 6.72 km, 其范围的半径约为 16.29 km; 坑底平坦区 域的半径为 37.08 km。另外, 该凹坑具有明显的坑 唇, 经过测量得到其厚度约为 0.31 km, 而宽度约为 8.32 km。

结合凹坑的特征描述,应用前文所提出的带有 中央峰的凹坑模型公式可生成相应的凹坑,并在此





(a) 真实高程模型
 (b) 模拟高程模型
 图 12 Herschel 坑的真实高程模型与模拟模型
 Fig. 12 Ture topography model and simulate model of Herschel crater

基础上加入高斯随机噪声、套合相应的拟合地形,其 结果如图 12(b)所示。为了进一步验证凹坑模型的 拟合度,本文实验截取了真实模型和拟合模型的切 面线并进行了比较,如图 13 所示;同时,解算出其平 均误差为 0.298 km,中误差为 0.362 km。与其他 凹坑模型相比,本文所提出的凹坑模型具有更好的 拟合度,能够较好地反映出凹坑的特征形态。



图 13 Herschel 模型坑与真实坑的切面比较图 Fig. 13 Comparison between the profile of ture topography model and simulate model of Herschel crater

由图 13 可知, Herschel 凹坑经过长时间的退 化作用,使得其实际切面线变得更为平滑,中央峰已 经没有棱角且近似成倒抛物线形状;坑壁的整体坡 度也较为平缓,其中央峰的左侧坑深小于右侧,疑似 有过坑壁坍塌现象。

4 结束语

本文通过现已探测、获得的小行星数据,分析了 其表面常见的5种典型特征,提出了规范的凹坑、岩 石特征描述参量并依据特征参量生成相应的特征模 型,最后通过仿真生成 Mimas 小行星表面的 Herschel 凹坑模型,并比较了其与实际凹坑的切面 线特征,进一步说明了本文思路、方法的正确性。 当然,本文也存在以下几点不足:

 1)没有明确给出裂沟、山丘和脊线特征的描述 参数,生成相应的形貌模型;

2)实验仿真了 Herschel 凹坑的局部区域模型, 但模型较为理想并没有反映出其更为细致的形貌特征,如凹坑周围的溅射物等。

下一步,进一步分析、运用形貌特征的识别参量,以求更好地模拟小行星相关区域的模型、提取和 识别实际数据中的典型特征。

参考文献

- [1] Melosh. Planetary surface processes [M]. Cambridge, Cambridge Planetary Science: Cambridge University Press, 2011.
- [2] 徐伟彪,赵海斌.小行星深空探测的科学意义和展望[J].地球 科学进展,2005,20(11):1183-1190. [Xu W B, Zhao H B. Deep space exploration of asteroids: the science perspectives
 [J]. Advances in Earth Science, 2005,20(11):1183-1190.]
- [3] Zuber M T, David E S, Andrew F C, et al. The shape of 433 Eros from the NEAR-Shoemaker laser rangefinder[J]. Science, 2000:2097 - 2101.
- [4] Archinal B A, Bowell E, Conrad A, et al. Report of the IAU working group on cartographic coordinates and rotational elements: 2009 [J]. Celestial Mechanics & Dynamical Astronomy, 2011(109):101-135.
- [5] Preusker F, Scholten F, Matz K D, et al. Global shape of (4) Vesta from Dawn FC stereo images [J]. LPI Contributions, 2014(1773):2027.
- [6] 蓝朝桢,耿迅,徐青,等. 基于序列影像的小天体三维形状重 建方法研究[J]. 深空探测学报,2014,1(2):140-145. [Lan C Z, Geng X, Xu Q, et al. 3D shape reconstruction for small celestial body based on sequence images[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014,1(2):140-145.]
- [7] 崔祜涛,崔平远. 软着陆小行星的自主导航与制导[J]. 宇航学 报,2002,23(5):1-4. [Cui H T, Cui P Y. Autonomous navigation and guidance for soft-landing asteroid[J]. Journal of Astronautics, 2002,23(5):1-4.]
- [8] Taylor G J, Warren P, Ryder G, et al. Lunar sourcebook: a user's guide to the Moon [M]. London: Cambridge University Press, 1991.

- [9] 吴伟仁,王大轶,宁晓琳. 深空探测器自主导航原理与技术 [M]. 北京:中国宇航出版社,2011. [Wu W R, Wang D Y, Ning X L. Principle and technology of autonomous navigation for deep space detector [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2011.]
- [10] Helfenstein P, Veverka J, Thomas P C, et al. Galileo photometry of asteroid 951 Gaspra [J]. ICARUS, 1994: 37-60.
- [11] 杨剑峰,盛英华,徐博. 我国小行星探测发展趋势研究[C]// 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第九届学术年会论 文集. 杭州:中国宇航学会深空探测技术专业委员会,2012: 1196-1120.[Yang JF, Sheng JH, Xu B. Research on the development trend of the asteroids in China[C]// The Ninth Academic Annual Meeting of the Professional Committee of Deep Space Exploration Technology in Chinese Space Exploration Technology, Hangzhou: CDSET-CSA, 2012: 1196-1120.]
- [12] Salamuniccar G, Loncaric S, Grumpe A, et al. Hybrid method for detection of Lunar craters based on topography reconstruction from optical images[C] // The 7th Image and Signal Processing and Analysis (ISPA) Conference. Dubrovnik: IEEE, 2011.
- [13] 贺力. 基于 DEM 的月球撞击坑判识方法研究[D]. 南京:南京师范大学,2012. [He L. DEM-base identification of Lunar crater[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2012.]
- [14] Kim J R, Muller J P, Gasselt S V, et al. Automated crater detection: a new tool for Mars cartography and chronology
 [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005,71(10):1205 1217.
- [15] 刘字轩,刘建军,牟伶俐,等. 撞击坑识别方法综述[J]. 天文研 究与技术,2012,9(2):203-212. [Liu Y X, Liu J J, Mou L L, et al. A review of impact-crater detection [J]. Astronomical Research & Technology, 2012,9(2):203-211.]

作者简介: **王栋**(1986—),男,博士研究生,主要研究方向:深空遥感测绘,摄影测量与遥感。 通信地址:河南省郑州市二七区陇海中路 66 号(450052) 电话:13526827796 E-mail:jfj_dongfeng@126.com

Analysis and Description of the Asteroid Topography Features

WANG Dong¹, XU Qing¹, XING Shuai¹, LIU Zhongrui²

(1. Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China;
 2. Military Equipment Branch of Liaison and Service Department Jinan Command, Jinan 250022, China)

Abstract: Analysis of the asteroid topography features is of great significance to deep space probe's navigation and selection of landing site. Most analysis and description of deep space topography features are focused on Mars, the moon and other earth-like planets. The asteroids which has great numbers and rich information in the universe are rarely introduced about its topography features in details. Taking Vesta, Eros, Mimas and other detected asteroids as an example, we listed topography surface features of several typical asteroids, improved description parameters of topography features such as craters, and use simulation experiment to generate crater model of Herschel from the Mimas surface. The experimental results show that the method to describe topography features in this paper has great simulational efficiency and practical value.

Key words: asteroid sphere-like; feature description; feature model; impact crater; ridge line

[责任编辑:杨晓燕]