

SGM100i 月球重力场特征分析

孙 玉^{1,2} 常晓涛³ 郭金运¹ 柯宝贵²

(1 山东科技大学测绘学院,山东省青岛经济技术开发区前湾港路 579 号,266510)

(2 中国测绘科学研究院大地测量与地球动力研究所,北京市海淀区莲花池西路 28 号,100830)

(3 卫星测绘应用中心,北京市海淀区莲花池西路 28 号,100830)

摘 要:基于 SGM100i 和最新月球重力场模型 GLGM-3 比较,分析了月球自由空气重力异常和月球大地水准面起伏。利用 SGM100i 绘制了月球垂线偏差及其分量的全月分布图,并分析了垂线偏差与月球地形特征、质量分布之间的相关性,发现利用垂线偏差反演得到的月球地形、质量分布均与实际情况一致。

关键词:SELENE;SGM100i;GLGM-3;月球重力场;垂线偏差

中图分类号:P128.1;P223.0

月球重力场是研究月球演化和深部构造的基本物理量,也是研究地月系空间力学环境的时空结构与作用机理的基本依据之一,同时也是月球空间基准的重要内容。作为环月飞行器的中心力场和主要摄动力源,月球重力场是月球卫星精密定轨的核心。高精度、高分辨率的月球重力场模型是顺利执行探月任务的关键^[1-6]。

2007-09 日本首个大型探月任务 SELENE (Kaguya) 将 3 颗卫星送入月球极轨轨道,当主星进入月球背面时,位于高轨的中继卫星可作为多普勒信号的转发器,实现了对月球背面重力场的直接观测^[3,7]。基于 SELENE Doppler 观测量 (2W、3W、4W), 14 个月 (2008-01~2009-02) 差分 VLBI 数据,并结合历史已有测月数据 (不包含 LP 扩展任务阶段跟踪数据), 研制了完全至 100 阶次的 SGM100i 月球重力场模型。与之前的 SGM100h 相比,SGM100i 使定轨误差由几百 m 降至几十 m^[7]。

GLGM-3^[8] 是 Mazarico 等人为弥补现有重力场模型模拟重力场短波信息不足,以适应 Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) 定轨的需要,研制了 150 阶次月球重力场模型。GLGM-3 模型融合了 NASA 历史探月任务数据,包括 Lunar LO I-V, Apollo15、16, Clementine, LP 及部分 LRO 跟踪数据 (多普勒追踪数据、单程激光数据

和 LOLA 测高交叉点数据)^[7], 是最新研制成功的月球重力场模型。本文使用该模型与 SGM100i 进行多方面的比较分析,说明 SGM100i 在月球全球范围,尤其是背面能够很好地反映月球重力场信息,适用于月球重力场特征分析。

1 SGM100i 模型质量分析

月球重力场球谐函数展开模型位系数的阶方差可以反映重力场空间频谱信号的强度^[9]。图 1 中 Kaula 曲线为 $2.5 \times 10^{-4}/n^2$ (n 为阶数), 分别绘制了 GLGM-3、SGM100i、LP150Q 和 SGM90d 等 4 个模型的位系数阶方差和误差阶方差曲线。对比 GLGM-3 和 SGM100i 的阶方差曲线,SGM100i 自 30 阶起开始偏离 Kaula 曲线,说明背面直接观测数据减弱了模型解算对约束准则的依赖。SGM100 系列模型可不加约束解算至 70 阶次而不出现较大误差。误差阶方差曲线显示 SGM100i 前 60 阶位系数精度明显好于 GLGM-3, 尤其是 15~30 阶,精度提高超过一个量级;15 阶的误差阶方差 SGM100i 为 0.29×10^{-8} ,GLGM-3 为 0.19×10^{-6} ,两者相差达 66 倍之多,充分说明加入月球背面重力场直接观测数据的重要作用。

SGM100i 与地形相关性 (图 2) 在 20~95 阶较 GLGM-3 高,尤其是在 50~70 阶,相关性系数

高达 0.9 左右,而后者相关性系数仅为 0.6~0.7 左右;但是自 80 阶之后相关性急剧降低,100 阶时与地形几乎没有相关性。图 2 中两个模型的相关性系数曲线在 2~15 阶非常一致,相关性系数数值变化剧烈,甚至有些为负值(负相关)。一般认为重力场低阶位系数与地形相关性比较差,可能是由于质量瘤的过度补偿所致^[10]。

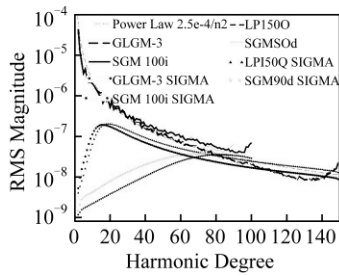


图 1 不同月球重力场模型阶方差及误差阶方差

Fig.1 Coefficient Degree Variance and Degree Sigma Error of Several Lunar Gravity Models

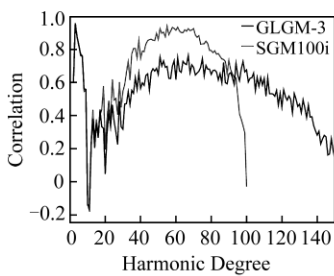


图 2 重力场模型位系数与地形模型(CLTM-s01)位系数相关性

Fig.2 Correlation Between Lunar Gravity Model Coefficients and Lunar Topography Model CLTM-s01

2 重力场特征分析

2.1 重力异常与大地水准面的分布特征

本文计算了基于 SGM100i 和 GLGM-3(截断至 100 阶次)的月表自由空气重力异常^[10]及两者差值在月球全球的分布(图 3)。图 4 相应给出了月球大地水准面起伏的情况。两个模型计算的重力异常及月球大地水准面起伏的差别主要集中在月球背面,具体的数值统计信息见表 1。图 5(a)中 5 个主要的质量瘤(Mascon)^[12]:A(Imbrium)、B(Serenitatis)、C(Crisium)、D(Humorum)和 E(Nectaris)在图 5(b)中清晰可见。这些质量瘤的重力异常值均在 300 mGal 以上,内部变化不大,没有明显的峰值,形成重力异常高原。在质量瘤的边缘,重力异常骤降为负值,形成重力异常峭壁。质量瘤是由于质量集中所形成的,但它们却

恰好对应着月球表面撞击盆地所在区域,与地形呈现强烈的负相关,这种奇特的现象,一般认为是火山岩流入盆地所致^[7, 13]。质量瘤的存在对于环月飞行器,尤其是低轨飞行器有着强烈的影响。

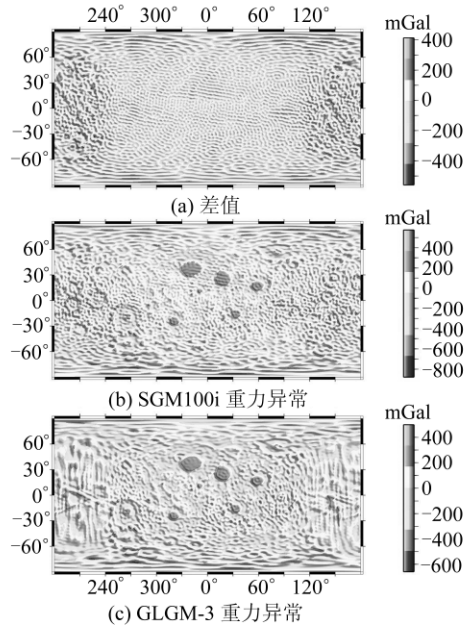


图 3 月球自由空气重力异常

Fig.3 Lunar Free-air Gravity Anomalies and the Difference

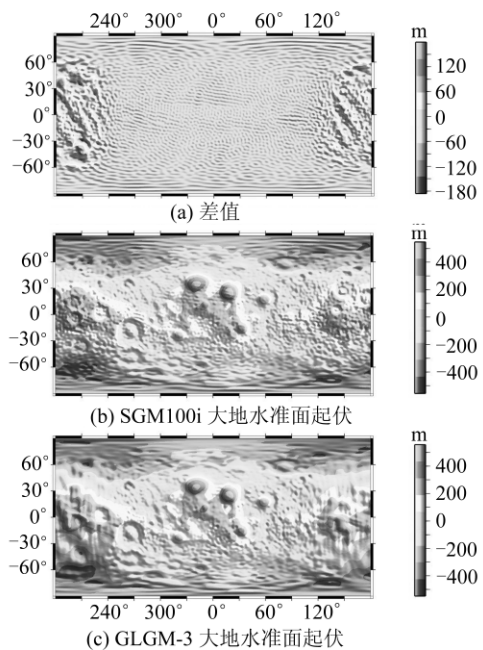


图 4 月球大地水准面起伏

Fig.4 Selenoid Undulations and the Difference

SGM 系列月球重力场模型(SGM90d、SGM100h、SGM100i 等)均使用了月球背面重力场直接观测数据(图 5),对月球背面的重力信息(图 5(b))表达较好,图中所表现出来的重力异常环形特征与背面实际地形符合得很好,如 F(Lorentz)、G(Orientalis)、H(Mendel-Ryd-

berg), I (Hertzprung), J (Dirichlet-Jackson), K (Korolev), L (Apollo), M (Freundlich-Sharounov), N (Moscoviense), O (Mendeleev), P (Planck), Q (Schrodinger)等。上述环形山中除 J 和 Q 仍未确定其性质外,其余均为质量瘤存在

区域^[3]。月球背面质量瘤与正面质量瘤有明显的不同,均是由数值较大的正重力异常环包围内侧的负重力异常环,而在负重力异常环中部又出现正重力异常峰。月球正面与背面质量瘤的二分性和产生机制一直是探月科学的热点问题。

表1 月球大地水准面及自由空气重力异常统计信息表

Tab.1 Statistical Information of Selenoid Undulations and Free-air Gravity Anomalies

模型	自由空气重力异常/(mGal)				月球大地水准面起伏/m			
	SGM100i		GLGM-3		SGM100i		GLGM-3	
	数值	位置(经、纬)	数值	位置(经、纬)	数值	位置(经、纬)	数值	位置(经、纬)
最大值	575.62	(33.28, -84.94)	499.92	(34.19, -84.69)	547.61	(198.86, 3.975)	557.02	(194.02, 0.39)
最小值	-879.39	(273.28, -79.69)	-659.08	(-86.56, -79.61)	-556.60	(-187.02, -69.11)	-549.11	(198.61, -60.11)
全球平均值		-7.47		-7.27		-84.14		-83.95
正面平均值		-0.47		-0.77		-31.07		-31.05
背面平均值		-7.00		-6.51		-53.06		-52.90
最大差异(正)		413.09		(208.86, -38.03)		179.55		(208.27, -38.19)
最大差异(负)		-558.96		(208.69, -29.60)		-186.19		(208.77, -29.61)
平均差异	-0.396	标准差	67.311		-0.373	标准差	20.100	
正面平均差异	0.594	标准差	37.050		-0.047	标准差	4.298	
背面平均差异	-0.990	标准差	87.678		-0.326	标准差	28.010	

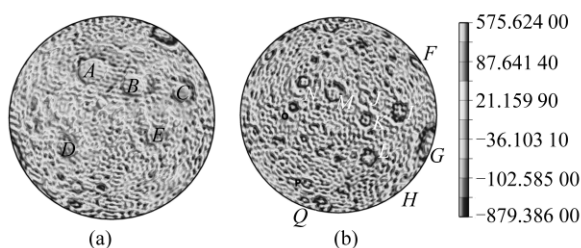


图5 基于 SGM100i 自由空气重力异常 (Lambert 等面积投影)

Fig.5 Lunar Free-air Gravity Anomaly from SGM100i (Lambert Equal-area Projection)

2.2 垂线偏差分布特征

垂线偏差的物理定义为正常椭球力线方向与实际重力方向之间的差异,不仅有数值属性,而且有方向属性,所反映的地学信息往往比重力异常

更为丰富,因此,具有一定的地学意义和用途。利用重力场模型可以计算任一点垂线偏差,弥补了其他方法测量垂线偏差分辨率不高的缺陷。

图6给出了基于 SGM100i 的全月垂线偏差及其分量。其中图6(a)、6(b)分别为垂线偏差卯酉(南北)分量和子午(东西)分量在月球全球的分布,单位为 $''$;图6(c)为垂线偏差在月球全球的分布,单位为 $''$;图6(d)为基于 CLTM-s01 模型所绘制的月球地形,单位为 m。图7以直方图的形式给出了月球垂线偏差不同数值分别在月球全球、正面和背面所占比例。垂线偏差取值范围约为 $0 \sim 680''$ (图6(c)),但约 90%集中在 $0 \sim 200''$,数值大于 $500''$ 的非常少且集中在某些特征区域。垂线偏差在月球正面和背面的分布基本一致。在

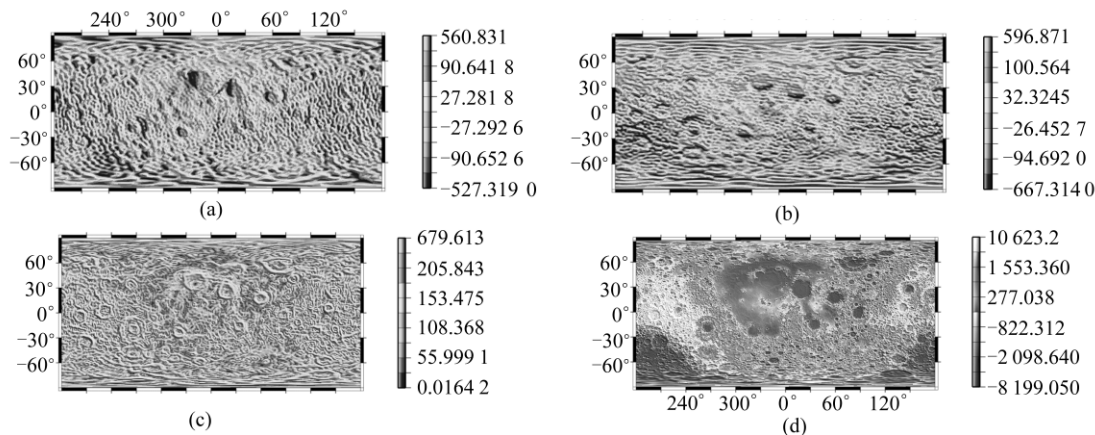


图6 基于 SGM100i 的垂线偏差及其分量在全球的分布

Fig.6 Distribution of the Deflection of the Vertical and Its Components from SGM100i

月球正面,垂线偏差在 $25 \sim 125''$ 之间非常集中;月球背面,数值较大的垂线偏差(大于 $200''$)所占比例增大。这与月球正面地势较低、较平缓,背面地势较高、起伏较大的事实比较吻合。

2.3 垂线偏差与月球地形特征和质量分布的相关性分析

由垂线偏差的分布以及月球地形可知,数值较大的垂线偏差所形成的环状特征与月表撞击盆地(环形山)的位置十分吻合。垂线偏差较大的区域仅集中在盆地(环形山)的边缘附近,这些地区地形变化剧烈;而在盆地(环形山)内部和周围,虽然高程有显著差别,但垂线偏差值却比较接近,数值比较小。说明垂线偏差与地形的变化有较大的相关性,而与地势高低关系不紧密。月球正面和背面垂线偏差较大区域均为环状,但仍有明显的区别(图 7)。正面 5 个质量瘤处垂线偏差环明显较宽,尤其是 Imbrium 和 Serenitatis。Imbrium 处的垂线偏差环带宽度相差比较大,图 7 中,上宽下窄,也即数值较大的垂线偏差在盆地北侧边缘覆盖的区域大于南侧。可以推测,盆地北侧由边缘到底部坡度较缓,地形变化在较大范围内变化剧烈,因此,大数值的垂线偏差覆盖范围较大;而南侧边缘坡度较大,垂线偏差环带较窄。正面的盆地区域仅有一圈数值较大的垂线偏差,而背面的环形山区域则由两圈数值较大的垂线偏差构成同心圆环,说明环形山内壁应该是“陡-平-陡”的台阶式结构,数值较大的垂线偏差环对应着峭壁,而两者之间的垂线偏差数值较小,存在一圈地势

平缓的平台。在探月任务中,科学家希望避开表层月壤获得月球尤其是其背面的月岩样本,因此,一个较好的方法就是将宇航员安置在背面环形山中。环形山中的这些平台则提供了比较理想的着陆点。图 7(a)、7(b)两图为垂线偏差卯酉、子午分量在全球的分布,两者表现出相似的特征。垂线偏差卯酉分量是垂线偏差在卯酉圈上的投影,向东为正,向西为负。以月球正面的撞击盆地区域为例,盆地所在区域垂线偏差卯酉分量与周围呈现明显不同。盆地被纵向(东西方向)对半分,西侧为负,东侧为正,绝对值都比较大;中部交界处数值较小,接近于零。说明这些盆地区域实际重力力线都是指向盆地中央的,这也反映了盆地内部越靠中间质量越大,与重力异常反映的信息较为吻合。背面环形山处垂线偏差情况较为复杂。由西向东,垂线偏差卯酉分量的正负关系为正、负、正、负。可见内外圈垂线偏差指向不同。由环形山的边缘到内壁中间的平台,实际重力力线指向环形山外侧边缘;由内壁平台至底部,垂线偏差卯酉分量的分布于正面撞击盆地处基本相同,说明实际重力力线指向环形山中央。因此,在环形山外缘和中部具有质量集中,也与重力异常所反映的信息相符。垂线偏差子午分量也表达了同样的信息。综上所述,垂线偏差及其分量反演得到的月球地形特征和质量分布与实际情况相符。因此,分析垂线偏差及其分量在特征区域的分布可以揭示包括地形、质量分布在内的大量地学信息,应在日后加以应用。

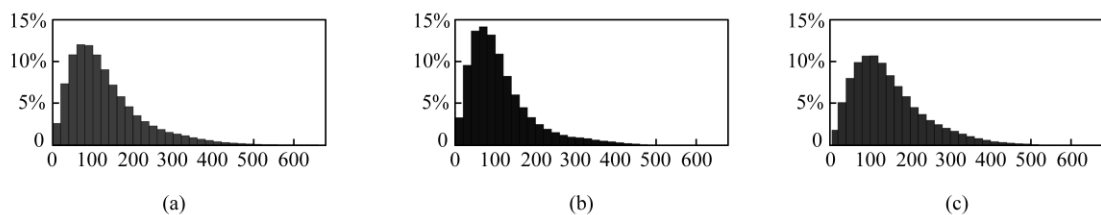


图 7 垂线偏差数值统计

Fig. 7 Statistical Information for the Deflection of the Vertical

3 结 语

本文对比分析了 SGM100i 和 GLGM-3 月球重力场模型的位系数阶方差、误差阶方差,两者位系数与地形的相关性。SGM100i 在前 60 阶次位系数误差阶方差优于 GLGM-3,尤其是在 $15 \sim 30$ 阶,精度提高超过一个量级。通过比较分析基于两者的重力异常及月球大地水准面起伏,认为

SGM100i 在月球全球范围内可较好地表达重力场信息。利用 SGM100i 计算了垂线偏差及其分量在月球全球的分布。通过分析垂线偏差及其分量在质量瘤存在区域的特征,表明 SGM100i 所反演的月球地形特征和内部质量分布情况与实际情况相一致,应该在后续的地学研究中广泛应用。

参 考 文 献

- [1] Chen J Y, Ning J S, Zhang C Y, et al. On the Determination of Lunar Gravity Field in the Chinese

- First Lunar Prospector Mission[J]. *Chin J Geophys*, 2005, 48(2):275-281
- [2] Lemoine F, Rowlands D, McGarry J, et al. Precision Orbit Determination for the Lunar Reconnaissance Orbiter[C]. *Proceedings of the Conference Held, Nice, France*, 2008
- [3] Namiki N, Iwata T, Matsumoto K, et al. Farside Gravity Field of the Moon from Four-way Doppler Measurements of SELENE (Kaguya)[J]. *Science*, 2009, 323(5 916):900-905
- [4] Rowlands D, Lemoine F, Chinn D, et al. A Simulation Study of Multi-beam Altimetry for Lunar Reconnaissance Orbiter and Other Planetary Missions[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(8):709-721
- [5] 王威, 鄢建国, 史弦, 等. 绕月飞行器近圆形轨道演化的数值分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2007, 32(1): 19-23
- [6] 鄢建国, 李斐, 平劲松, 等. 利用 LP 多普勒数据解算月球重力场模型的分析[J]. *测绘学报*, 2009, 38(1):6-11
- [7] Goossens S, Matsumoto K, Liu Q, et al. Lunar Gravity Field Determination Using SELENE Same-beam Differential VLBI Tracking Data[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(4):205-228
- [8] Mazarico E, Lemoine F, Han S C, et al. GLGM-3: A Degree-150 Lunar Gravity Model from the Historical Tracking Data of NASA Moon Orbiters[J]. *J Geophys Res*, 2010, 115.doi:E05001
- [9] Kaula W M. *Theory of Satellite Geodesy*[M]. New York: Blaisdell Publishing, 1966
- [10] Neumann G A, Zuber M T, Smith D E, et al. The Lunar Crust: Global Structure and Signature of Major Basins[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(E7):16 841-16 816
- [11] Ping J S, Huang Q, Yan J G, et al. Lunar Topographic Model CLTM-s01 from Chang'E-1 laser Altimeter[J]. *Science in China Series G: Physics Mechanics and Astronomy*, 2009, 52(7):1 105-1 114
- [12] Muller P M, Sjogren W L. Mascons: Lunar Mass Concentrations[J]. *Science*, 1968, 161(3 842):680-684
- [13] Konopliv A S, Asmar S W, Carranza E, et al. Recent Gravity Models as a Result of the Lunar Prospector Mission[J]. *Icarus*, 2001, 150(1):1-18

第一作者简介:孙玉,硕士生,研究方向为重力场解算及低阶位数变化。

E-mail:sunyuwoody@126.com

The Analysis of Lunar Gravity Field Characters from SGM100i

SUN Yu^{1,2} CHANG Xiaotao³ GUO Jinyun¹ KE Baogui²

(1 College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, 579 Qianwangang Road, Qingdao 266510, China)

(2 Institute of Geodesy and Geodynamics, Chinese Academy of Surveying and Mapping, 28 West Lianhuachi Road, Beijing 100830, China)

(3 Satellite Surveying and Mapping Application Center, 28 West Lianhuachi Road, Beijing 100830, China)

Abstract: Lunar gravity field plays a key role of researching the interior structure of the Moon. SGM100i can well reveal the lunar characters in a global sense owing to the SELENE data. In this research, comparison has been made between SGM100i and the latest model GLGM-3 in aspects like free-air gravity anomalies and selenoid undulations. The distribution of deflections of the vertical(DOV) and their components have also been shown, and relations between the DOV and lunar terrain and mass distribution have been analyzed. The lunar terrain features and mass distribution recovered from there quantities are consistent with the facts, which means DOV and its components should be used in revealing lunar features as well.

Key words: SELENE; SGM100i;GLGM-3; lunar gravity model; deflections of the vertical

About the first author: SUN Yu, postgraduation, majors in lunar gravity model.

E-mail: sunyuwoody@126.com