

· 专题:双清论坛“月球科研站的关键科学问题” ·

月球重力场的确定与月面重力测量*

李斐^{1, 2**} 郑翀¹ 郝卫峰² 叶茂¹
邓青云¹ 鄢建国¹ Jean-Pierre Barriot¹

1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079
2. 武汉大学 中国南极测绘研究中心, 武汉 430079

[摘要] 本文简要介绍了月球重力场的获取历程及其在月球研究中的作用, 包括具有代表性的月球重力场模型和在内部结构反演中的代表性成果。并针对目前月球重力场模型存在的一些问题, 阐述了进行月面重力测量的重要性与必要性。通过对国内外重力仪的分析, 结合我国的探月工程, 对月面重力测量的可行性及前景进行了展望。

[关键词] 月球重力场模型; 重力仪; 月面重力测量

重力场是研究地球及行星内部结构的主要信息源, 也是构建高程基准的重要物理量。在地球物理反演中, 地震、重力、磁场、电场等数据各具优势, 在探求地球内部结构中发挥着重要作用。但是, 在月球上, 由于人类还难以开展大范围的就位测量, 使得各类地球物理数据的获取受到极大的限制。月球上的月震数据主要来源于阿波罗时期布设的地震仪, 但已于1977年停止工作。月球本身是一个弱磁体, 基于电磁场的反演方法难以有效发挥作用。人类为数不多的月球着陆, 曾经也携带过雷达探测器, 但雷达的穿透深度有限, 能够获取浅层物态, 对一公里深度以下的物性结构则无能为力。就目前而言, 由绕月卫星轨道摄动解算的月球重力场数据, 由于其空间覆盖日趋完整, 分辨率持续改进, 一直是月球内部结构研究的主要数据源^[1, 2]。

类似于地球重力场的表达方式, 月球重力场也是以球谐级数的形式给出, 称之为“月球重力场模型”。模型的球谐项系数是通过跟踪绕月卫星轨道摄动量解算得到。随着对绕月卫星的跟踪技术的不断进步, 月球重力场模型经历了一个从低阶次到高阶次, 从低分辨率到高分辨率的发展过程^[3, 4]。应用月球重力场模型数据, 人们在研究月球内部结构



李斐 武汉大学教授, 中国绕月探测工程科学应用专家委员会委员, 教育部地球物理学类专业教学指导委员会主任。长期从事月球和行星重力场及内部结构研究, 承担及完成国家自然科学基金重点项目、科技部重点研发计划课题等多项科研项目, 发表科研论文180余篇, 曾获国家科技进步奖二等奖。

中取得了一系列的进展和成果, 促进了对月球内部结构及演化过程的认识。

阶次最高的重力场模型可达1500阶次^[5], 其最大分辨率可达3.6 km, 已超过了地球重力场模型的分辨率。尽管如此, 由于模型系数来源于轨道摄动数据, 当将其用于月球表面形态和内部结构的研究时, 其可靠性成为人们最为关注的问题之一。原因在于: 绕月卫星轨道摄动量反映的是卫星高度处的重力值, 将其向下延拓到月球表面时, 其高频信息的衰减、各类噪声的抑制与放大、解算方法的不同导致的模型之间的系统偏差等, 目前尚缺乏有效的方法予以解决。这成为了困扰月球重力场模型充分发挥其作用的重要瓶颈。

借鉴地球重力场模型可靠性分析的思路, 卫星获取的重力场数据, 往往是通过地面实测重力予以

收稿日期: 2022-02-17; 修回日期: 2022-04-16

* 本文根据第302期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者, Email: lfi@whu.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(42030110, 41874010)的资助。

检核和修正。据此,本文通过对月球重力场的获取历程及代表性模型的特征、月球重力场在月球表面形态及内部结构研究中的作用和主要成果进行综述的基础上,在归纳月球重力场模型精度评价和应用所面临的主要问题的同时,提出进行月面重力测量的必要性,并通过对现有各类重力仪及相关技术的分析,结合我国“嫦娥”探月工程具备的基础和条件,阐述了月面重力测量的可行性,以期为我国“嫦娥”探月工程四期载荷的规划与设计提供参考。

1 月球重力场的获取及代表性模型

地球重力场可以借助各种重力测量手段来获取,如地面、船载、航空与卫星重力测量等。对于月球而言,人类尚无法有效开展就位重力测量,主要是通过绕月卫星的轨道跟踪,通过对轨道摄动量的解算,构建重力场模型。

与地球卫星的运动规律类似,月球卫星主要受到月球引力的影响,还包括月球的非球形摄动、太阳和地球的三体引力、太阳光压、地球固体潮等。在上述各种摄动力的综合作用下,绕月卫星的运动微分方程可以表示为:

$$\ddot{\vec{r}} = -\mu \frac{1}{r^3} \left(\frac{\vec{r}}{r} \right) + f_e \quad (1)$$

式中 \vec{r} 是月球表面单元到卫星的单位矢量, r 是月球表面单元到卫星的距离, f_e 是各种轨道摄动力之和, μ 是万有引力常数与月球质量的乘积。基于给定的先验力模型,利用上述微分方程可以积分得到一条参考轨道,结合实际观测数据,就可以进行月球重力场参数求解,其主要流程如图1所示:首先

根据先验月球重力场理论模型,同时考虑大气校正、地球自转以及测站坐标改正等因素的影响,结合行星历表等,应用理论模型对探测器进行轨道预报,获取观测值的理论计算值,将此理论计算值与实测数据进行对比,得到两者之间的残差。再根据残差迭代对理论模型进行修正,直至通过理论模型获取的观测值与实测值符合程度满足期望值,从而获得最终的重力场模型^[6]。

月球重力场模型的发展与人类探月计划息息相关。从1959年到1972年,美国和前苏联共发射了数十个月球探测器,其中美国的阿波罗任务实现了载人登月。科学家利用这一阶段积累的地面对绕月卫星跟踪数据对月球重力场进行了解算,得到了一系列低阶次月球重力场模型。

美国于1993年发射了Clementine月球探测器,将月球重力场和月面地形作为主要的探测目标。Clementine任务最终得到了70阶次的重力场模型GLGM-2^[7]。由于Clementine飞行器是一个大偏心率轨道的卫星,近月点和远月点轨道高度分别为400 km和2940 km,因此其无法进一步获取月球重力场的中、高频信息。

在Clementine之后,月球勘测者(Lunar Prospector, LP)任务于1998年发射,它采用了平均轨道高度约为100 km的圆形极轨和更为稳定的轨道调整策略,更有利于重力场模型的解算。LP任务解算的月球重力场模型最高达165阶^[8]。

为了直接获取绕月卫星在月球背面的轨道摄动数据,日本于2007年实施了SELENE探测任务。该任务同时发射了3颗卫星,分别是位于高轨的中

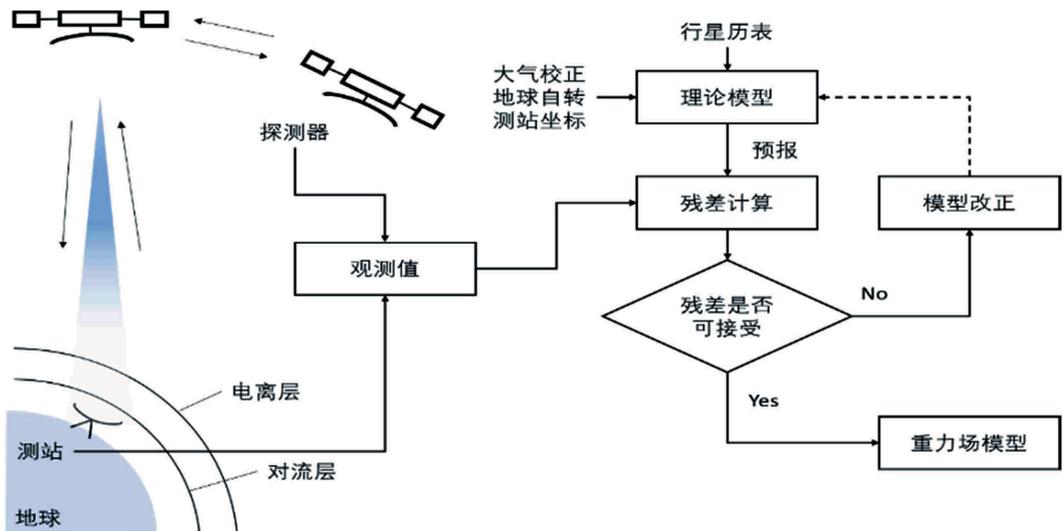


图1 确定月球重力场的基本原理

继星(100 km × 2 400 km 的轨道)、位于低轨的轨道器(100 km 圆轨道)以及用于中继定位的 VLBI 星(100 km × 800 km 的轨道)。通过高低卫星之间的跟踪测量,实现了对月球背面重力场的直接探测^[9]。

2011年,美国实施了 GRAIL 探测任务,该任务采用了低—低卫星跟踪模式,两颗卫星平均轨道高度为 50 km,在其扩展任务阶段,平均轨道高度进一步降低至 30 km 左右。随着 GRAIL 任务数据的积累,解算得到的月球重力场模型阶次从 420 阶^[10]一直到 1 200 阶^[11],最高达 1 500 阶。表 1 给出了不同时期具有代表性的月球重力场模型,图 2 给出了基于 GRGM1200b RM1 模型绘制的全球自由空气重力异常分布。可以看出,最大值约为 2 100 mGal,最小值约为 -1 300 mGal,均位于 Korolev 盆地附近(202°E, 2°S)。月球重力场最为显著的特征是由正面质量瘤产生的正—负—正“牛眼”模式结构。

表 1 不同阶段重力场模型与其特点

代表任务	典型模型	模型特点
Apollo 探月时代	Sagitov16×16	低阶次大尺度重力场
Clementine/LP	GLGM-2, LP100K	正面高阶次重力场
SELENE	SGM100h	包含背面重力场信息
GRAIL	GRGM1200b	全球高精度重力场

2 月球重力场的重要作用

随着重力场模型的不断进步,应用重力场进行反演,结合地震数据和大地测量数据,人们对月球内部结构的认识也在不断深化。以下所列举的研究成果可以充分反映出重力场在月球内部结构研究中的重要作用。

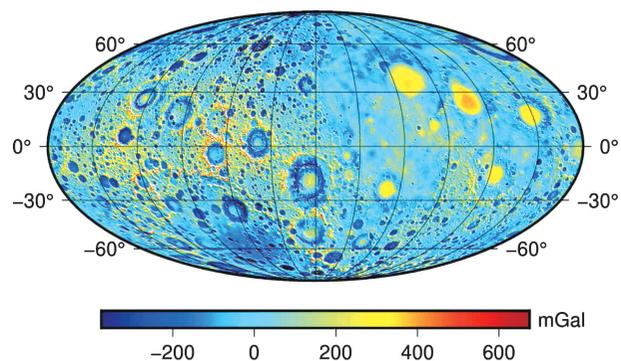


图 2 月球自由空气重力异常(绘图时采用 Mollweide 投影,中央经线为 270°,左侧为远月面,右侧为近月面。)

Muller 和 Sjogren^[12]应用早期得到的低阶重力场模型计算了月球正面的概略重力异常分布,由此发现了月球浅表层的“质量瘤”及其主要分布。

基于 Clementine 卫星得到的 70 阶重力场模型,Zuber 等^[13]反演得到月壳的平均厚度大约为 61 km;应用更好的 LP150Q 重力场模型与月球地形数据,Wieczorek 等^[14]解算的月壳平均厚度为 49 ± 16 km;基于 LP100K 重力场模型,通过重力地形导纳,李斐等^[15]计算了几个具有代表性的月球盆地处的月壳厚度,其中 Smythii 盆地为 72 km, Crisium 盆地为 70 km, Oriental 盆地为 60 km, Imbrium 盆地为 57 km;GRAIL 任务实施之后,月球重力场模型的分辨率与精度取得了长足的进步,基于 GRAIL 数据,Wieczorek 等^[16]计算出月壳的平均厚度为 34~43 km。

同时,月球重力场模型低频信号可以用来研究月核的状态。以 LP 解算得到的重力数据为主,并结合月球质量与惯性矩,Konopliv 等^[17]认为,如果月球拥有一个固态铁核,则月核半径为 220~370 km;如果月球拥有一个铁或者是硫化铁的液态核,则月核半径为 330~590 km。柯宝贵等^[18]把圈层结构与对称形态作为月球结构假设,以平均密度与无量纲惯性矩为约束,得到月核密度为 $4.7 \sim 7.0$ g/cm³,半径为 356~704 km。基于 GRAIL 重力数据,Yan 等^[19]计算得到的月核半径大约为 370 km。

月球重力场还记录了月球的演化历史。通过研究重力异常的特征值,Andrews-Hanna 等^[20]在月球上找到了一些线状的特征,并认为这些特征代表了侵入月壳的火山物质,进而发现在月球演化的早期,其半径扩张了 0.6~4.8 km。结合 GRAIL 数据与地形数据,Huang 等^[21]在近月面 Gardner 地区发现了迄今为止最大的盾形火山,并且该区域经历了一个长时间的火山活动,并为宁静海提供了月海玄武岩来源。

除了在月球内部结构研究中发挥重要作用之外,月球重力场的作用还体现在以下方面:依据物理大地测量学原理,月球重力场是确定月球高程基准及大地水准面的重要物理量;依据天体力学的原理,月球重力场影响着绕月卫星的运行,高精度的重力场对精密定轨至关重要。

3 精化月球重力场面临的主要问题

尽管随着空间跟踪技术的发展,月球重力场模

型在不断改进,并在月球表面形态及内部结构研究中发挥着越来越重要的作用。但是,由于获取方式(轨道摄动反演)单一性的限制,模型的可靠性方面仍然存在一些问题有待解决,包括:

(1) 重力场模型低阶项的不确定度。由 GSFC 和 JPL 分别解算的 900 阶次月球重力场模型 GRGM900C 模型和 GL0900D 模型,虽然被认为是较为权威的高精度高分辨率月球重力场模型,但两者二阶项 C20 差值达 5.369×10^{-9} ,远大于该项系数的误差值。虽然两个机构使用了相同的数据与力学模型,但分析认为,两者的差异主要是由于数据处理策略和方法的不同所致。一个可能的解决途径是加入嫦娥 5T(大倾角)数据进行联合解算,因为嫦娥 5T 数据与 GRAIL(极轨)数据的相关性较小,可以抑制数据误差的传递。

(2) 重力场模型高阶项噪声突出。理论上,重力场模型的高阶项包含的是重力场中高频的信号,主要反映浅层形态及其物质分布,这些信号与地形高度相关。相较于低阶项而言,高阶项更容易包含观测噪声。图 3 为 2019 年由美国 GSFC(Goddard Space Flight Center)发布的 GRGM1200b RM1 重力场模型球谐系数功率谱^[11]。我们可以看到,当球谐系数的阶次小于 100 时,误差的功率仅在 $10^{-10} \sim 10^{-9}$ 之间;当阶次达到 600 时,误差功率也达到了 10^{-5} 量级;当阶次超过 1000 以后,误差功率接近 10^{-3} 量级;而 1000 阶次以上的系数本身的功率也就在这一量级,这导致了模型高阶的信噪比已十分接近 1。这说明当应用月球重力场模型的高阶项反演月球浅层形态及结构时需要特别慎重,对高阶项的可靠性问题需要有效的评价方法。

(3) 向下延拓的误差控制问题。月球重力场模型系数均由轨道跟踪数据解算得到,当应用重力场

模型进行月表形态及内部结构反演时,通常将模型值向下延拓到月球表面。然而向下延拓计算属于不适定问题。重力位在物体内部与外部分别满足拉普拉斯方程与柏松方程,因此在计算向下延拓问题时,计算结果受地形影响较大,且稳定性不足;向下延拓还具有高通滤波的特性,这也会放大原来信号中的局部干扰和误差。即便是平均轨道高度较低的 GRAIL 任务,重力场由卫星轨道向下延拓至地面时,也会放大其系统噪声。

4 月面重力测量及其可行性分析

综上所述,尽管月球重力场在月球研究中具有显著优势和重要作用,但是,由绕月卫星的轨道摄动解算得到的重力场模型的可靠性问题也显得日益突出。除了需要在数据处理和解算方法进行深入研究之外,借鉴地球重力场模型的地面约束和精度评价方法,一个直接且有效的方法就是在月面上进行重力测量,以月面重力值对重力场模型进行约束和标定,从而提高模型的精度和可靠性。

4.1 月面重力测量实验

阿波罗时期曾经尝试过进行月球表面重力测量。在阿波罗 11 号、12 号、14 号任务中,宇航员通过携带的加速度计(Pulsed Integrating Pendulous Accelerometer, PIPA)在登陆舱内测量了月球表面重力值^[22-24]。而阿波罗 17 号则同时携带了 2 种不同原理的重力仪—振动弦重力仪(Vibrating String Accelerometer, VSA)与 L&R 公司生产的双防概念的 D 型弹簧重力仪。阿波罗 17 号的宇航员使用 VSA 在月面上完成了一次完整的重力导线测量,遗憾的是其同时携带的弹簧重力仪却并没有完成重力测量任务。在使用弹簧重力仪实施测量时,因为配重块的设计问题,重力仪不能成功调零,导致了测量实验的失败^[25]。

我们把各个重力场模型的值与阿波罗时期的观测值进行比较后发现(表 2),模型向下延拓值与月面实测值之间差别较大,尤其是被认为精度最高的重力场模型 GRGM660PM 与实测值符合度最差,而被认为观测精度最高的阿波罗 17 号进行的重力实测值反而与重力场模型值差距最大。这一结果表明,早期的月面重力观测值并不具有可靠性,不足以在解算重力场模型时提供约束。

我国的“嫦娥”四号着陆器“玉兔”二号上携带了两台惯性加速度计,其目的是用于导航控制(图 4)。理论上,惯导数据是可以解算重力值的。我们在处

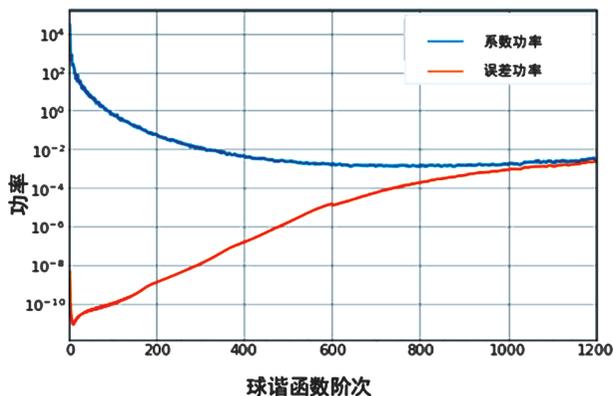


图 3 GRGM1200b_RM1 模型功率谱

理数据时,把读数超过 1 000 次的位置当作一次观测(以此为标准的共有 18 次观测),并用一个测点上所有读数的算数平均值作为该点的测值进行重力计算。遗憾的是,我们将解算结果与重力场模型的结果进行比较后发现:1 号加速度计观测值与模型值存在大约 -100 mGal 的差距,这有可能是系统误差带来的;2 号加速度计结果较差,与模型值的差异在 700 mGal 到 3 000 mGal 之间变化,说明该尝试并不成功,原因有待进一步分析。

4.2 实施月面重力测量的可行性分析

尽管早期的月面重力测量并不成功,而且自阿波罗计划之后,各国再未实施实质性的月面重力测量。但是,随着相关技术的发展,在地球上进行重力测量的仪器得到了长足的发展,高精度、便携式、小型化成为重力仪研制的趋势,这为月球重力测量仪器的研制提供了基础。目前,具有参考意义的地球重力仪有如下几类(表 2):

(1) 钟摆式重力仪:它是用来进行绝对重力测量测量的重力仪。在 20 世纪 30 年代的石油勘探中,钟摆式重力仪的测量精度达到了 0.25 mGal。它通过精确测量摆长与摆时,然后通过单摆公式计算重力值。目前,钟摆式重力仪因为测量精度与稳定性并不能满足科学研究与工业应用的需求,已经逐渐退出了市场。

表 2 Apollo 任务实测重力值与各重力场模型差值 (单位:mGal)

	Sagitov16	LP100K	SGM100h	GRGM660PM
Apollo 11	20	26	19	81
Apollo 12	56	8	31	35
Apollo 14	87	10	41	16
Apollo 17	257	104	100	26

(2) A10 型重力仪:其通过激光干涉获取自由落体的精确距离,原子钟获取自由落体的高精度时间,然后根据自由落体中距离与时间的关系计算重力值。A10 重力仪总重约 105 kg,组装后高度约为 90 cm,三分钟内就可以完成安装,只需十分钟就可完成一次测量工作。尽管较之其他的自由落体式绝对重力仪(如:FG5),A10 的体积和重量都大为减少,操作也更为方便,但在载荷限制及运输安全等方面仍然不适应月面重力测量的条件。

(3) 原子重力仪:原子重力仪是目前绝对重力仪研究的热点。其原理是通过测量物质波的干涉相位计算测点的重力值。1992 年,朱棣文教授^[26]研制出了世界上第一台原子重力仪,在此之后,世界各国的众多团队都投入了原子干涉重力仪的研制当中。目前,原子重力仪的测量精度可达 0.03 μ Gal/Hz。但是,其在成熟度和小型化面临许多问题。

(4) gPhone 弹簧重力仪:它是用于进行相对重力测量的重力仪。gPhone 重力仪通过记录金属弹簧的长度变化来测量重力值的变化。它总重约 50 kg,约 30 cm 高,分辨率高达 0.1 μ Gal,而漂移率仅为 1 mGal/月,远小于其他弹簧型重力仪。因此,gPhone 重力仪十分适合进行重力连续观测,也经常用于固体潮的观测中。

(5) CG 系列弹簧重力仪:它是用来进行相对重力测量的重力仪。它通过测量弹簧在不同观测点位的长度变化来计算重力值的变化,然后根据基准点的重力值来推算测点的重力值。CG 系列采用了石英弹簧,具有更好的野外适应性,其对于运输条件、测量环境等的要求均大大降低,最新的 CG-6 型重力仪仅有 21.6 cm 高、5.2 kg 重,动态测量精度优于 5 μ Gal。

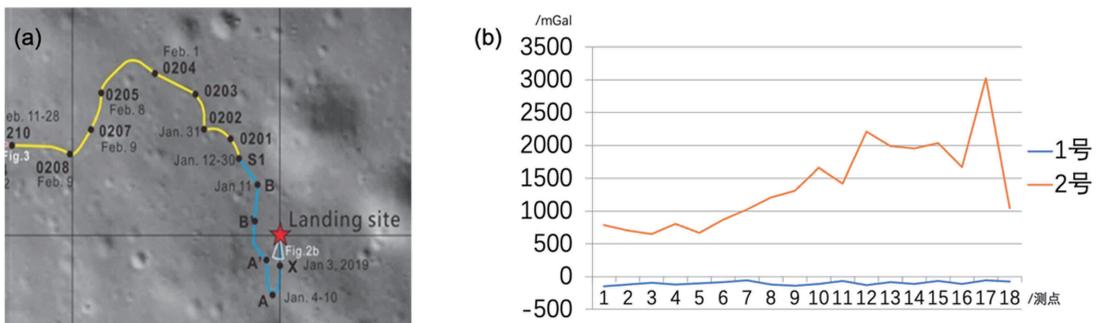


图 4 玉兔二号行走路线(a)与惯导测量结果(b)(从实施过的月面重力测量实验可以看出,月球重力测量成败的关键之一就是重力仪的设计,只有高精度、高稳定性的月面重力仪才可以保障实验的顺利完成。)

(6) 超导重力仪: 超导重力仪也是用于相对重力测量的重力仪, 分为用于台站固定测量的 OSG 超导重力仪和可移动的 iGrav 超导重力仪。相对弹簧重力仪而言, 超导重力仪用磁场中悬浮的小球代替弹簧, 通过观测磁性小球在磁场中的位置变化来计算重力值的变化。超导重力仪的测量精度优于微伽级, 是目前精度最高的重力仪。超导重力仪的总重量接近 130 kg, 较适合于固定台站的连续重力观测, 或者在观测条件良好的测点进行野外观测。

根据实施月球重力测量的特殊需求和载荷限制, 月球重力仪应该具备体积小、量程合适、操作简便等特点。目前, 主要使用的绝对重力仪的体积与重量都不太满足探月工程的载荷需求, 而且它们组装过程较复杂, 对运输过程中的稳定性需求较高, 对观测环境也有很高的要求, 并不适用于月面重力测量; 在相对重力仪这一块, 超导重力仪虽然精度高, 但是也存在着体积、质量等客观条件等制约; 而弹簧重力仪虽然具有体积小、质量轻、测量操作简便、便于运输等优势, 但是, 其量程的把控、基准的传递同样面临问题。因此, 要进行月面重力测量, 其测量仪器的设计既要借鉴地球重力仪的特点, 同时, 也需要创新与突破, 乃至另辟蹊径。

我国在重力仪的研制方面虽然起步晚, 但进步快, 21 世纪以来呈现出投入大、参与单位多、水平迅速提升的态势。例如: 由计量科学院自主研发的 NIM-3C 型绝对重力仪现已投入使用, 并于 2019—2020 年在南极中山站进行了 30 天以上的连续观测^[27]。中国科学院精密测量科学与技术研究院研制(原中国科学院测量与地球物理研究所)的 CHZ-II 海洋重力仪, 其静态分辨率可以达到 0.01 mGal, 动态分辨率优于 1 mGal, 测量精度已经达到国际先进水平^[28]。

中国计量科学研究院在 2017 年举办了第 10 届全球绝对重力仪国际比对(ICAG-2017), 标志着我国在重力精密测量领域获得了国际认可。我国共有 7 台自主研发的绝对重力仪参与国际重力比对, 其中有 1 台光学干涉式重力仪和 6 台量子重力仪, 展示了我国在量子重力仪研制领域的实力。最后, 来自浙江工业大学(ZAG-Atom)、中国科学院精密测量科学与技术研究院(原中国科学院数学与物理研究所)(WAG-H5-1)、中国计量科学研究院(NIM-AGRb)和华中科技大学(HUST-QG)的量子重力仪测量结果获得此次国际比对主办单位的认可和

采用^[29]。

表 3 列举了国内主要重力仪研制单位。除了超导重力仪, 研制的产品涵盖了目前所有主流的重力仪类型。这些研究为我国开发月面重力仪提供了丰富的技术储备。

综上所述, 在月球表面进行重力测量, 直接获取月面重力值, 虽然面临许多挑战, 但已经具备了必要的条件与基础。人类已经实现了载人和非载人的月球着陆, 着陆器携带重力测量载荷已具备条件; 从测量原理和方法上讲, 现有地球重力仪的各类传感器可以为月球重力测量仪器的研制提供丰富的借鉴和参考。同时, 针对月球的特殊环境要求, 如温度控制、能源供应等, 从已有的着陆设备及仪器的工作情况来看, 已经得到有效解决。因此, 实施月面重力测量不仅具有重要意义, 而且具有可行性。

5 结论与展望

随着各国新探月任务的实施和跟踪技术的进一步提高, 绕月卫星的轨道摄动数据会越来越丰富, 由此获得的重力场模型将得到持续改善, 这意味着重力场在月球形态和内部结构研究中仍有着极大的潜力。然而, 基于绕月卫星轨道摄动解算的月球重力

表 3 国内重力仪研制单位

编号 *	单位	产品
A		
1	中国地质装备集团(原地质部)	移动式绝对重力仪
2	华中科技大学	HUST-QG
3	浙江工业大学	ZAG 系列
4	精密测量研究院(原中国科学院武汉数学与物理研究所)	WAG-H5-1
5	中国计量研究科学院	NIM 系列
6	中船重工七〇七研究所	
7	国防科技大学	
8	中国科学技术大学	
9	清华大学	
R		
11	中国地质装备集团	ZSM-6, Z400
12	精密测量研究院(原中国科学院测量与地球物理研究所)	CHZ, CHZ-2
13	中国地震局地震研究所	DZW

* A 代表绝对重力仪, R 代表相对重力仪。

场模型依然存在一些问题,为充分有效的发挥重力场的潜力,月面重力测量则显得至关重要。一方面,有助于提升重力场模型的可靠性;另一方面,为构建月面高程基准创造条件。

美国计划于2024年10月发射的Artemis III任务,就包含了建立重力测站的目标。而我国的嫦娥三、四、五号任务都实现了月面软着陆,并携带了多种观测设备,完全具备携带重力仪进行月面重力测量的条件,“嫦娥”四期任务还包括了建立月面基地的计划;我国在重力仪的研制上也已有较大的投入,国内有多家单位成功研制重力仪,积累了丰富的经验。因此,我们需要把握机遇、乘势而上,尽早开展月面重力测量的立项与论证,丰富我国嫦娥工程的科学产出。

参 考 文 献

- [1] 陈俊勇, 宁津生, 章传银, 等. 在嫦娥一号探月工程中求定月球重力场. *地球物理学报*, 2005, 48(2): 275—281.
- [2] 郝卫峰, 李斐, 鄢建国. 基于新近数据的月球地形、重力场及内部构造研究进展. *地球物理学进展*, 2010, 25(6): 1926—1934.
- [3] 李斐, 郝卫峰, 鄢建国, 等. 空间跟踪技术的发展对月球重力场模型的改进. *地球物理学报*, 2016, 59(4): 1249—1259.
- [4] 郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 月球重力场模型研究进展和我国将来月球卫星重力梯度计划实施. *测绘科学*, 2012, 37(2): 5—9.
- [5] Park RA, Konopliv AS, Yuan DN, et al. A high-resolution spherical harmonic degree 1200 lunar gravity field from the GRAIL mission. [2022-02-17]. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014AGUFM.G22A..01P/abstract>.
- [6] 叶茂, 李斐, 鄢建国, 等. 深空探测器精密定轨与重力场解算系统(WUDOGS)及其应用分析. *测绘学报*, 2017, 46(3): 288—296.
- [7] Lemoine FGR, Smith DE, Zuber MT, et al. A 70th degree lunar gravity model (GLGM-2) from Clementine and other tracking data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1997, 102(E7): 16339—16359.
- [8] Konopliv AS, Asmar SW, Carranza E, et al. Recent gravity models as a result of the lunar prospector mission. *Icarus*, 2001, 150(1): 1—18.
- [9] Namiki N, Iwata T, Matsumoto K, et al. Farside gravity field of the moon from four-way Doppler measurements of SELENE (Kaguya). *Science*, 2009, 323(5916): 900—905.
- [10] Zuber MT, Smith DE, Watkins MM, et al. Gravity field of the Moon from the Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) mission. *Science*, 2013, 339(6120): 668—671.
- [11] Goossens S, Sabaka TJ, Wicczorek MA, et al. High-resolution gravity field models from GRAIL data and implications for models of the density structure of the moon's crust. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, 125(2): e2019JE006086.
- [12] Muller PM, Sjogren WL. Mascons: lunar mass concentrations. *Science*, 1968, 161(3842): 680—684.
- [13] Zuber MT, Smith DE, Neumann GA, et al. Gravity, topography and the geophysics of the moon from the clementine mission. [2022-02-17]. https://www.researchgate.net/publication/234347504_Gravity_Topography_and_the_Geophysics_of_the_Moon_from_the_Clementine_Mission.
- [14] Wicczorek MA. The constitution and structure of the lunar interior. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 60(1): 221—364.
- [15] 李斐, 柯宝贵, 王文睿, 等. 利用重力地形导纳估计月亮厚度. *地球物理学报*, 2009, 52(8): 2001—2007.
- [16] Wicczorek MA, Neumann GA, Nimmo F, et al. The crust of the Moon as seen by GRAIL. *Science*, 2013, 339(6120): 671—675.
- [17] Konopliv AS. Lunar Prospector: Gravity Mapping. 1997. [2022-02-17]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Lunar-Prospector%3A-Gravity-Mapping-Konopliv/1b5da0a92ac7bfee8b4ff2f753ea45ed21eb75d5>.
- [18] 柯宝贵, 李斐, 王文睿, 等. 应用 Lane-Emden 方程分析下月幔厚度与月核半径大小. *地球物理学报*, 2009, 52(5): 1208—1213.
- [19] Yan JG, Xu LY, Li F, et al. Lunar core structure investigation: implication of GRAIL gravity field model. *Advances in Space Research*, 2015, 55(6): 1721—1727.
- [20] Andrews-Hanna JC, Asmar SW, Head JW 3rd, et al. Ancient igneous intrusions and early expansion of the Moon revealed by GRAIL gravity gradiometry. *Science*, 2013, 339(6120): 675—678.
- [21] Huang Q, Zhao JN, Wang XM, et al. A large long-lived central-vent volcano in the Gardner region: implications for the volcanic history of the nearside of the Moon. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 542: 116301.
- [22] Nance RL. Gravity: first measurement on the lunar surface. *Science*, 1969, 166(3903): 384—385.

- [23] Nance RL. Gravity measured at the Apollo 12 landing site. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1971, 4(3): 193—196.
- [24] Nance RL. Gravity measured at the Apollo 14 landing site. *Science*, 1971, 174(4013): 1022—1023.
- [25] Talwani M. The Apollo 17 gravity measurements on the moon. *The Leading Edge*, 2003, 22(8): 786—789.
- [26] Kasevich M, Chu S. Measurement of the gravitational acceleration of an atom with a light-pulse atom interferometer. *Applied Physics B*, 1992, 54(5): 321—332.
- [27] 粟多武, 王启宇, 张川, 等. 利用国产绝对重力仪进行南极中山站重力校准. *计量科学与技术*, 2021, 65(8): 36—41.
- [28] 涂海波, 何建刚, 刘雷钧, 等. CHZ-II 海洋重力仪重力敏感结构的性能测试与分析. *大地测量与地球动力学*, 2015, 35(4): 711—714.
- [29] 翁堪兴, 周寅, 朱栋, 等. 小型化量子重力仪高精度重力测量. *中国科学(物理学 力学 天文学)*, 2021, 51(7): 36—49.

Gravity Field of the Moon and Gravity Survey on the Lunar Surface

Fei Li^{1,2*} Chong Zheng¹ Weifeng Hao² Mao Ye¹
 Qingyun Deng¹ Jianguo Yan¹ Barriot Jean-Pierre¹

1. *State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping, and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079*
2. *Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079*

Abstract This paper firstly introduces the history of the acquisition of the lunar gravity field and its role in lunar research, including main lunar gravity field models and representative results in the inversion of the internal structure. The importance and necessity of conducting lunar surface gravity measurements are also explained to address some existed shortcomings of the current lunar gravity field models. Finally, the feasibility and prospect of gravity measurement on the lunar surface are prospected through the analysis of domestic and foreign gravimeters and combined with China's lunar exploration project.

Keywords lunar gravity field model; lunar surface gravity survey; lunar gravimeter

(责任编辑 魏鹏飞 姜钧译)

* Corresponding Author, Email: fli@whu.edu.cn