

月球探测中若干问题的研究及进展

王文睿, 李 斐

(武汉大学测绘学院, 武汉 430079)

摘 要 本文主要介绍了在第二次探月高潮中对于月球重力场、月球天平动、月球耗散效应等月球物理特性的研究成果, 以及建立月球参考框架以及布设月面控制网等月球大地测量方面的方法和进展, 并探讨了月球探测过程中应用到的相关技术, 最后, 对月球探测的进一步发展做出展望。

关键词 月球重力场, 物理天平动, 耗散效应, 月球参考框架

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)06-1751-07

Research and development of the Lunar exploration

WANG Wen-rui, LI Fei

(School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract In this paper, the studies on the Lunar physics such as the Lunar gravity field, the physical libration, the dissipation and so on are discussed, the techniques and development of constructing the Lunar reference frame and the Lunar control network are introduced, also some relevant techniques such as LLR are mentioned. At the end of the paper, the author also looks forward to the further development of the Lunar exploration.

Keywords Lunar gravity field, physical libration, dissipation, Lunar reference frame

0 引 言

目前, 深空探测已进入第二次高潮。深空探测是人类走出地球, 进入深空的重要手段, 有利于开发和利用空间资源; 深空探测能够促进行星科学、地球与行星科学、太阳系演化、空间天文学、空间物理学、空间材料科学、空间环境科学与微重力科学等基础学科的交叉、渗透与创新; 深空探测将直接促进航天整体技术水平的提升, 同时还将带动电子、信息、材料、能源等科学技术的发展^[1]。作为距离地球最近的一颗天体, 月球探测处于深空探测的焦点地位。月球探测的主要目标集中于对月球物理性质、化学性质的研究, 对月球表面特征及内部结构的探测, 开发利用月球特有的能源、资源以及空间环境, 进而建立月球基地, 服务于人类的生产生活。针对这些目标, 世界各国已纷纷将探月计划提上日程。

月球自转与公转同速使得远月面数据的获取成为月球探测中最大的难点, 月球表面直接测量数据

的缺乏又让相关研究极大依赖于绕月卫星的测量数据以及 LLR, VLBI 等地基测量手段。因此, 如何实现绕月卫星的精密定轨, 提高星载设备的测量精度以及发展相应的数据处理技术已成为各国探月项目中研究的重点。在绕月卫星精密定轨的研究中, USB, VLBI 以及 Doppler 等观测手段得到发展, 并被用于包括日本的“SELENE”卫星^[2]以及我国“嫦娥一号”卫星的精密定轨中。同时, 精确的地基观测手段 LLR, VLBI 等, 也为月球天平动、月球耗散效应的研究以及月球参考框架的建立提供了可靠依据^[3]。

精密定轨后的绕月卫星获得的测量数据成为后期科学研究的数据源。美国利用其“Clementine”卫星获得的测高及重力数据已解算得到了目前广泛使用的 GLGM 系列重力场模型以及 GLTM 系列地形模型, 而著名低轨卫星“Lunar Prospector”的重力测量数据解算得到的 LP 重力场模型成为迄今可得的阶次和精度最高的模型。这些模型进而在月球表面

收稿日期 2008-03-10; **修回日期** 2008-04-20.

基金项目 国家自然科学基金项目(40674005)资助。

作者简介 王文睿, 女, 1984 年生, 武汉大学硕士研究生, 主要研究方向为月球物理大地测量。(E-mail: wangwruix@163.com)

地形^[4]、月海盆地构造^[5]、月球内部分层结构^[5]、月球极地构造^[6]等研究中发挥了重要作用。另外,探测器上所搭载的立体相机、光谱仪、中子仪等设备,为计算月球表面月壤厚度^[7],研究月球表面矿物反射光谱特性^[8],探测月球水冰等提供了重要信息。

1 月球重力场的研究

月球重力场的研究对于月球形状以及月球大地水准面的确定、绕月飞行器的定轨以及登陆舱的着陆都具有重要意义,同时,月球重力场不仅是确定月球参考框架的基础,有助于确定月球的质心和转动惯量,进一步建立月球大地坐标系,还可根据月球重力场的异常状况反演出月球内部的质量异常,为研究月球内部的结构提供依据。

与地球不同的是,月球重力场的确定主要通过绕月飞行器的轨道摄动来确定而无法在月面进行重力测量。并且由于月球的自转速率与公转速率非常接近使得月球总是一面朝向地球(近月面)而另一面背向地球(远月面),这使月球重力场的确定更加困难。当卫星运行至远月面上空时,地面对卫星的跟踪会中断,因此至今仍无法获取远月面的相关信息。目前所有的月球重力场模型均是根据有限的近月面信息拟和推估得到,因此无法精确推算至与地球重力场相当的高阶次,并且其低阶系数的精度也受到限制。

对月球重力场的研究开始于 1966 年前苏联的 Luna 10 计划。随后,美国连续发射了处于不同倾角和不同偏心率轨道上的 Lunar Orbiter 月球探测器(LO-I~LO-V)。利用这些探测器的数据,科学家们相继发表了对月球重力场的研究成果。根据重力场的球谐展开形式,Lorell 和 Sjogren 于 1968 年计算出 8×4 重力场模型,Liu 和 Laing 于 1971 年计算出 15×8 模型,Michael 和 Blackshear 于 1972 年计算得到 13×13 模型^[9]。

20 世纪 70 年代,Ferrari 和 Bills 将以上利用球谐展开式计算重力场模型的方法做了进一步深化,计算出 16 阶重力场模型。由于受到计算条件的限制,无法得到更高阶次的精确模型。进入 90 年代后,计算机技术的发展为计算高阶月球重力场模型提供了可能性。1993 年,Konoplive 等人利用 LO-I~LO-V 和 Apollo 15,16 子星的历史数据计算得到了 60 阶重力场模型 Lun 60d。这是第一个可以较为准确预测卫星轨道的模型,但在大于 50 阶的高阶项却存在较高噪声。之后,美国喷气动力实验室(JPL)

计算出 75 阶模型 Lun 75f,在保持轨道预测精度的条件下减小了高阶项的噪声^[9]。1994 年,美国发射了用于月球探测的“Clementine”探测器,其轨道为一椭圆轨道,近月点距离 430 km,远月点距离达到 2950 km,倾角接近 90° 。这样的特性决定了它并不适合用于高精度月球重力场,因此 Lemoine 等人于 1977 年综合利用 Clementine 跟踪数据和历史数据计算的模型 GLGM-2 最高只达到了 70 阶次,但它相对于以往的月球重力场模型在中低阶系数上仍有改进^[10]。与“Clementine”相比,1998 年发射的“Lunar Prospector”绕月卫星采用了高度为 100 km,倾角为 90° 的圆形轨道,运行一年后轨道高度降为 40 km,最后 3 个月轨道平均高度只有 30 km,这样的低轨使得卫星对月球信息有更高的分辨率,更有利于采集月球重力数据,因此综合利用 Lunar Prospector 跟踪数据和历史数据计算的 LP 系列模型(LP100J, LP100K, LP165P, LP150Q)最高可达到 165 阶次。

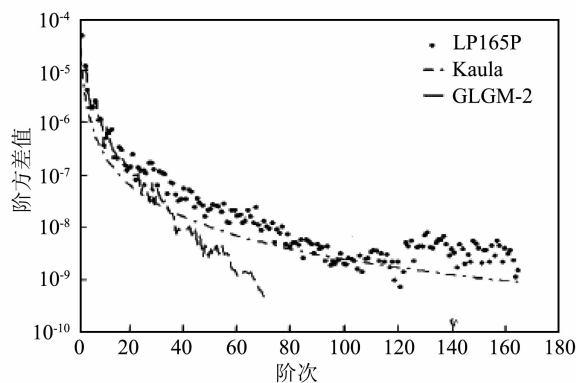


图 1 月球重力场模型阶方差及 Kaula 准则
(鄢建国等,2006)

Fig. 1 Degree-wise rms of the Lunar gravity model and Kaula rule
(after Yan J G et al., 2006)

尽管 LP165P 为迄今使用的阶次和相对精度较高的重力场模型,但由于远月面信息的缺失,模型中 122 阶至 145 阶的系数只能由先验信息估计得到,经过再次估算后得到 145 阶至 165 阶的系数。对于模型合理性及可靠性的分析判断目前依据 Kaula 准则进行。鄢建国等人利用 Kaula 准则对包括 GLGM-2, LP165P 等月球重力场模型进行了分析^[10],结果表明,GLGM-2 模型从 18 阶以后开始大幅偏离 Kaula 曲线,说明 GLGM-2 模型的精度主要集中在中、低阶次;在 LP165P 模型中,中、高阶次位系数有明显改善,而从 110 阶开始与 Kaula 曲线发生偏离,

暗示 LP165P 模型的解算直至 110 阶是可靠的,而后的阶次系数受到噪声影响非常大,不能用来进行精确计算. 其后的模型 LP150Q,采用一步求解的算法,一定程度上改善了分步求解的弊端,但也仅限于数据处理领域的突破. 对于解决原始数据缺失带来的问题还依赖于新的观测手段. 日本已发射升空的“SELENE”卫星以及我国的“嫦娥一号”有望对月球重力场研究带来突破性进展.

2 月球物理天平动的确定

理想状态下,研究月球的自转与公转主要根据卡西尼定则. 1693 年, G. D. Cassini 根据长期观测归纳出三条描述月球自转的经验定则,称为卡西尼定则^[11]:

(1) 月球以等角速度绕固定轴自西向东自转, 自转周期为一个恒星月.

(2) 月球自转轴与黄道的交角不变.

(3) 月球赤道面与黄道面的交线同月球轨道面与黄道面的交线重合, 月球赤道面和月球轨道面分别位于黄道面的两侧.

若将月球作为均匀球体, 则从力学理论上能够证明 Cassini 定则的正确性. 然而, 月球的实际形状并不规则, 质量分布也不均匀, 这样必然会引起月球的实际自转状态与 Cassini 定则描述的理想状态之差. 为适应月球探测的需要, 有必要对月球的自转进行深入研究.

目前, 研究月球自转主要依赖于以下参数: 月球的惯性矩组合 $(\frac{C-A}{B}, \frac{B-A}{C})$, 七个三阶球谐系数, 二阶 Love 数 k_2 , 不同周期的潮汐因子 Q , 核幔边界耦合的耗散参数以及月球物理天平动的振幅与相位.

月球的天平动包括几何天平动与物理天平动两种. 其中几何天平动完全是视觉效果而不存在力学效应, 物理天平动则反映出月球在空间的真实摆动状态, 它导致月球引力场在空间的变化并影响月球卫星的轨道运动. 根据张巍等人的计算^[12], 月球物理天平动本身的量级约为 5×10^{-4} , 它通过月球非球形引力作用于月球轨道的摄动量级约为 10^{-7} . 因此, 若使绕月飞行器的位置精度达到米级, 月球的物理天平动是必须考虑的因素之一.

月球的物理天平动通常用 ρ, τ, σ 三个量表示. 其中 ρ 为纬度天平动, 表示月球自转轴与黄极交角的变化; τ 为经度天平动, 表示月面沿经度方向的摆动; σ 为交点天平动, 反映月球自转的不均匀性.

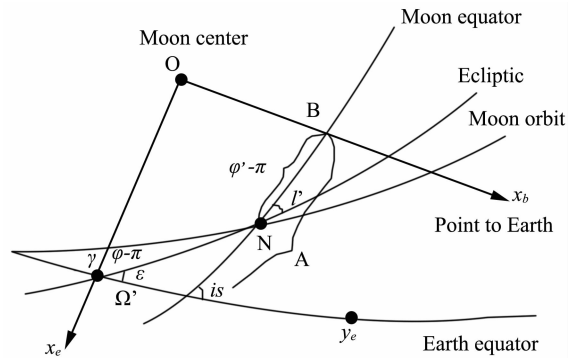


图 2 月心坐标系与物理天平动示意图

Fig. 2 Selenocentric coordination and the physical libration

图 2 中, x_b 为月固坐标系的 X 轴指向; (Ω', i, Λ) 为月球物理天平动的三个欧拉角, 它们可以与 (ρ, τ, σ) 之间建立相应的转换关系; ϵ 为黄赤交角.

20 世纪初, Hayn 曾给出月球物理天平动参数的分析表达式, 其后, Koziel 也推导出类似的解. 但分析表达式形式复杂, 并且受当时计算条件的限制, 精度并不高. 为了适应 LLR 观测以及宇宙飞行的需要, 美国科学家利用计算机给出了较为精确的解, 其首项表达式如下:

$$\begin{aligned} \rho &= -98''.5 \cos l + 23''.9 \cos(l - 2F) - 11''.0 \cos(2F) + \dots \\ I\sigma &= -100''.7 \sin l + 23''.8 \sin(l - 2F) - 10''.6 \sin(2F) + \dots \\ \tau &= 91''.7 \sin l' + 20''.1 \cos(2l - 2F) - 16''.9 \sin l' + \dots \end{aligned}$$

其中, l, l' 分别为月球和太阳的平近点角, F 为月球平黄经 L 与月球轨道升交点平黄经 Ω 之差, I 为月球自转轴与黄极的交角, 即月球轨道的平倾角.

目前用于月球物理天平动研究的主要手段仍为 LLR. 由于月球自转变化引起 LLR 测距的变化, 利用较高精度的 LLR 观测数据, 通过数值积分的方法即可求得月球自转相应的三个欧拉角, 为研究月球的物理天平动提供了有利途径. 利用 LLR 确定物理天平动参数的精度已能达到 10^{-4} arcsec.

3 月球耗散效应的研究

在研究地球自转、地球重力场以及卫星运行轨道时, 耗散效应是不能忽略的因素. 大气耗散、固体潮耗散以及核幔边界耦合造成的耗散均会影响地球的转动速率以及地球卫星的运行状况. 同样, 耗散效应也是影响月球研究的重要因素.

J. G. Williams 等人最早发现了月球自转的耗散效应,并将探测到的耗散效应的起源归结于固体潮耗散与核幔边界耦合耗散^[13].月球自转的综合耗散效应会引起其自转轴指向发生 $0''.26$ 的微小偏转,其中约 $2/3$ 来源于固体潮耗散的影响,另外 $1/3$ 来源于核幔边界耦合耗散效应的影响.

其中,对固体潮耗散效应的研究主要着眼于对二阶 Love 数和潮汐耗散因子 Q 的解算.

Love 数反映出月球对于引潮力的响应状况.一般而言,对于弹性月球,Love 数应为实数.但从目前的研究成果看出,月核与月幔边界(CMB)同样存在核幔边界耦合,使得潮汐形变滞后于引潮力位,因此 Love 数表现为复数形式且与潮波分量有关.

二阶 Love 数 k_2 可由多种探月手段求得,其中以 LLR 灵敏度较高. Konopliv 等人曾于 2001 年利用绕月飞行器 Lunar Prospector 探测的月球重力场数据解得 $k_2 = 0.026 \pm 0.003$ ^[9],两年后,Williams 等人又利用 LLR 探测数据解得 $k_2 = 0.0257 \pm 0.0025$ ^[14].

同时,LLR 数据还反映出潮汐耗散因子 Q 与潮波分量之间较弱的相关性,不同周期的潮波分量对应不同的潮汐耗散因子.周期为一个月 Q 值约为 37,而周期为一年的 Q 值则为 60.

对月球核幔边界耗散效应的研究还为月球的内部结构提供了一些解释.按照月球的分层结构理论,如果月球内部存在一个液态核,液态月核与固态月幔将存在不同的自转轴.当固态月幔发生进动时,液态月核只会受到微弱的影响.因此,二者之间不同的进动速率会产生力矩并造成核幔边界的能量耗散.如果利用 Yoder 于 1995 年提出的湍流边界层理论解释核幔边界耗散效应,还可进一步推知月核可能的结构及成分.

4 月球引力常量 GM_1 的计算

月球的引力常量 GM_1 在绕月探测卫星的运行轨道的计算以及设计中具有重要意义,它是天文学和天体力学的基本常数,也用于确定月球质量、平均密度等定量分析中.

测定引力常量的基本手段是天文测量方法,其基本思想如下:地球的岁差和章动现象除由其本身的物质分布不均匀和不对称以及赤道突起物质的引力影响外,日月引力的影响也是其重要原因^[15].

地球的引力常量 GM_e 已经得到确定,只需确定月球与地球质量的比值即可计算得到月球的引力常量.地球的岁差和章动可分别利用天文经度观测和

天文纬度观测变化量来确定,只要建立起岁差和章动与质量比值之间相应的关系式,问题即可解决.方程式表达如下:

$$p = H \cos \epsilon \left(P + \frac{\mu}{1 + \mu} Q \right),$$

$$N = H \cos \epsilon \frac{\mu}{1 + \mu} R,$$

其中, $\mu = \frac{M_1}{M_e}$ 为地月质量比, $H = \frac{2C - A - B}{2C}$ 为地球的动力学扁率.

然而,重力场的一些理论显示, G 并非常量,变化的 G 会引起天体运行周期的微小变化.目前,LLR 已经测得的变化率 $\bar{G}/G = (4 \pm 9) \times 10^{-13} a^{-1}$, a 为年,由于其量级非常微小,对 G 的影响基本可以忽略^[16].

5 月球参考框架与月面控制网的建立

5.1 月球参考框架的建立

月球参考框架与月球重力场是月球大地测量的基础和前提,是探月计划得以成功实施的基本保障.月球重力场和月球参考框架是密不可分的两个方面,绕月卫星的精密定轨需要同时具备严格定义的参考框架以及高精度的重力场模型,而经过精密定轨后的卫星获得的高质量数据又可以促进月球重力场的研究,进而完善月球参考框架.

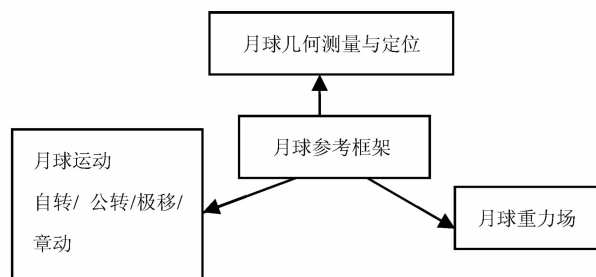


图 3 参考框架在月球探测中的作用

Fig. 3 Reference frame in the lunar exploration

参考框架的建立过程是确定参考坐标系原点的位置、三个坐标轴的空间指向,以及根据被研究天体的具体形状而建立具有一定形状和大小的规则数学体的过程.根据建立地球参考框架的经验,月球参考框架的建立也包括月心天球参考框架和月心月固参考框架的建立.其中,月心天球参考框架可以将地心天球参考框架平移后得到,因此,建立月心月固参考框架成为关键^[17].

建立月球参考体的方法主要有两种:根据几何

测量选取最符合月球地形表面的参考面,通常选取球心与月球质心重合,球半径为月球平均半径的球体作为参考体;或是根据物理测量选取最符合月球大地水准面的参考面建立月球参考椭球体。

常用的月球坐标系是月心直角坐标系,坐标系的原点位于月球质心, Z 轴与月球自转轴重合并正交于月球的赤道面, X 轴指向参考平面与过月球 Sinus Medii(中央湾)子午面上的交线方向, Y 轴与之形成右手坐标系。

以上是月心月固坐标系的一般定义,可以满足精度要求不高的科学计算和分析研究的需要。然而,月球存在物理天平动必然会引起坐标轴指向随时间的变化。因此,与地球坐标系相似,月心月固坐标系也有瞬时坐标系与平坐标系之分。

建立瞬时月球坐标系可选取月球的主惯性轴作为坐标轴,这是一个自然存在的坐标系,因此在此坐标系下可以很方便地进行月球物理天平动的计算,以及确定绕月飞行器的精确轨道和位置。

建立平坐标系可选取月球主惯性轴的平均指向作为坐标轴的指向。平坐标系的优点在于它较为稳定,在平坐标系下一些计算过程可以得到简化。

5.2 月面控制网的布设

坐标系确定之后的主要工作在于测量控制网的布设。迄今,在月球正面的测量控制网已经基本布成。控制网的施测主要采用了三种方式:地月激光测距(LLR),无线电定位法和摄影测量法。

月球上最基本的控制网是利用 LLR 技术测定的。上世纪六、七十年代,美国和前苏联在月球表面安置了 5 个激光反射器,激光反射器之间的间距约为 1000 km,在经纬度方面分布较为理想,其坐标精度也较高,可作为月面控制网的主要控制点,甚至可以测定月球的物理天平动分量。由地面上的 LLR 装置测定了激光反射器与地球上已知坐标点的距离后,就可以推导出激光反射器的月心坐标。LLR 的测距精度可以达到 $\pm 2 \sim \pm 5$ cm,相对精度为 5×10^{-9} [18]。

月球上布设的无线电发射机构成的月面测量控制网点,可以用于补充由激光反射器构成的控制网,两台发射机之间的相对位置可以 ± 1 m 的精度确定。但无线电发射机需要不断提供能量,因此大大缩短了工作时间,目前无线电定位法已停止工作。

利用卫星或航天器所摄的像片或影像可以进一步加密控制点。1971~1972 年美国在 Apollo15、16、17 号飞行任务中,利用摄影机、测高仪、无线电信号

发射机和时钟等仪器,在月球正面赤道两侧建立了控制网,其中每 900 km² 一个控制点,相对位置的精度为 ± 30 m^[19]。

虽然上述三种方法都是在上世纪 70 年代采用的方法,但其原理在现在的月球控制网施测中还可继续使用,只是观测值的精度已有较大提高。这些方法主要是以地球为基准站,将地面点的坐标传递到月球坐标系中,因此主要是几何的方法。随着观测手段的改进以及观测精度的提高,月球的一些物理性质诸如自转参数、惯性矩等已逐渐被了解并用数学模型表示出来。如果将几何方法与物理方法相结合,则有望建立起更完善、更精确的月球参考框架。

目前已经建立的主要月球控制网包括:

- (1)1994 统一月面控制网(1994ULCN).
- (2)1997 Clementine 月球控制网(CLCN).
- (3)2004 统一月面控制网(2004ULCN).
- (4)2004 月球轨道器月球控制网(LOLCN2004).
- (5)2005 统一月面控制网(2005ULCN).

6 月球探测的进展

第一次探月高潮的主角是美国和前苏联。前苏联的主要探月项目包括“探测(Zond)”及“月亮(Lunar)”探月项目,而美国则实施了包括“徘徊者(Ranger)”,“探索者(Surveyor)”,“月轨号(Lunar Orbiter)”在内的探月计划以及“阿波罗(Apollo)”登月计划。

在第二次探月高潮中,美国于 1994 年发射了“Clementine”月球探测器,其承担的主要任务包括:利用激光测高数据求定全月球的数字地形图,利用航天器的 S 波段 Doppler 跟踪数据结合历史数据求解月球重力场,以及利用新的月面地形资料和月球重力场资料理解月球的物理和地质演化过程。“Clementine”探月任务在所用仪器以及探测方法上都是对第一次探月过程的跳跃式改进和发展,利用“Clementine”数据获得高阶月球重力场模型 GLGM-2 在目前的月球研究领域仍然占据重要的地位。

之后,美国又于 1998 年发射了“Lunar Prospector”月球探测器,用以探测月面岩土构成,月球极区是否存在水冰以及量测月球的磁场及重力场。“Lunar Prospector”采用的逐步降低探测器轨道的方案有利于获得高分辨率的影像、磁场及重力场信息,利用“Lunar Prospector”S 波段 Doppler 轨道跟踪数据并结合历史数据求得的 LP165P 及 LP150Q 月球重力场模型是目前已有的阶次与精度较高的月

球重力场模型.

然而,进一步精化月球重力场模型的关键在于获得足够的覆盖整个月球表面的重力场信息.由于月球特殊的自转和公转速率相同的性质使月球始终只有一面朝向地球,这样,当月球探测器运行至远月面上空时,便失去与地面跟踪站的联系,因此至今无法获得足够的远月面信息,无法建立高阶精确的重力场模型.日本通过一系列试验,提出了利用卫星跟踪卫星的方法实现月球全球信息覆盖从而精化月球重力场模型的思想.已于2006年发射升空的日本“SELENE”月球探测器包括一颗主卫星、一颗中继卫星以及一个空间 VLBI 射电源,采用卫星跟踪卫星技术和四向多普勒技术,当卫星进入月球“盲区”时,仍能连续对卫星跟踪定位,从而实现月球远月面信息的获取,以期在重力场模型解算方面获得突破性进展.同时,“SELENE”航天器上还携带了激光测高仪 LALT,两个 VLBI 无线电转发器以及 Doppler 信号接收机,以便对卫星进行全方位跟踪并获得多种形式的测量数据,实现对月球信息的更广泛获取.

中国的“嫦娥”探月工程也是不可忽视的重要部分.“嫦娥”工程分为“环、落、回”三个阶段,分别实现环月卫星探测,月球软着陆器探测与月球车月面巡视勘察,月面软着陆与采样返回的分阶段探月任务.“嫦娥一号”已于2007年发射升空,目前已发回月球表面立体影像等多种类型数据,为综合探测和研究月球的几何、物理以及化学特性提供了质量较高的数据源.

可以看出,人类在月球探测的进程中正一步步走向成熟.从单一的环月飞行器轨道测量发展到多种探月技术综合测量,从地基跟踪卫星测量发展到卫星跟踪卫星测量,有限的测量范围及测量精度正逐步被扩展和提高,月球的未知领域也在逐渐被人类了解和利用.

致谢 感谢测绘遥感信息工程国家重点实验室郗建国博士对本文提出的宝贵意见和建议.

参 考 文 献 (References):

[1] 叶培建,彭兢.深空探测与我国深空探测展望[J].深空探测研究,2007,5(1):1~6.
Ye P J, Peng J. Deep space exploration and its prospect in China[J]. Deep Space Exploration. 2007. 5(1):1~6.

[2] 平劲松,河野裕介,河野宣之,等.日本 SELENE 月球探测计划和卫星间多普勒跟踪的数学模型[J].天文学进展,2001,19(3):354~364.

Ping J S, Kono Y, Kawano N, *et al.* Selene mission: mathematical model for SST doppler measurements[J]. Progress in Astronomy. 2001. 19(3):354~364.

[3] 郑向明,郭锐,李语强,等.我国月球激光测距研究与进展[J].天文研究与技术(国家天文台台刊),2007,4(3):231~237.
Zheng X M, Guo R, Li Y Q, *et al.* Research and experiment on the Lunar laser ranging in China[J]. Astronomy Research & Technology. 2007. 4(3):231~237.

[4] 冯刚顶,陈超,张明皓,等.对月球重力场特征的理解[J].地球物理学进展,2007,22(3):729~736.
Feng G D, Chen C, Zhang M H, *et al.* Preliminary comprehension on the characteristic of Lunar gravity[J]. Progress in Geophysics, 2007. 22(3):729~736.

[5] 占伟,李斐.月球内部构造研究综述[J].地球物理学进展,2007,22(3):737~742.
Zhan W, Li F. The inner structure of the moon[J]. Progress in Geophysics, 2007. 22(3):737~742.

[6] 程安云,王世杰,李耀耀,等.月球南北两极研究进展与发展趋势[J].地球物理学进展,2007,22(4):1070~1074.
Cheng A Y, Wang S J, Li X Y, *et al.* Research on Lunar poles: advances and trends[J]. Progress in Geophysics. 2007. 22(4):1070~1074.

[7] 金亚秋,法文哲,徐丰.月球表面微波主被动遥感的建模拟拟与反演[J].遥感技术与应用,2007,22(2):129~135.
Jin Y Q, Fa W Z, Xu F. Modeling simulation and inversion for microwave active and passive remote sensing of the Lunar surface[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007,22(2):129~135.

[8] 薛彬,杨建峰,赵葆常.月球表面主要矿物反射光谱特性研究[J].地球物理学进展,2004,19(3):717~720.
Xue B, Yang J F, Zhao B C. The study of spectral feature of major minerals on the Lunar surface[J]. Progress in Geophysics, 2004,19(3):717~720.

[9] Konopliv A S, Asmar S W, Carranza E, *et al.* Recent gravity models as a result of the Lunar prospector mission[J]. Publisher: Academic Press, March 2001,150, 1:1~18.

[10] 郗建国,平劲松,李斐,等.应用 LP165P 模型分析月球重力场特征及其对绕月卫星轨道的影响[J].地球物理学报,2007,32(1):6~10.
Yan J G, Ping J S, Li F, *et al.* Character analysis of the Lunar gravity field by the LP165P model and its effect on Lunar satellite orbit[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 32(1):6~10.

[11] 郗晓宁.月球探测器轨道动力学及其设计[D].博士论文,中科院上海天文台,1999.
Xi X N. Lunar satellite orbit dynamics and its design[D]. PhD Dissertation. Shanghai Astronomical Observatory Chinese, Academy of Science. 1999.

[12] 张巍,刘林.月球物理天平动对环月轨道器运动的影响[J].天文学报,2005,46(2):196~206.
Zhang W, Liu L. The effects of physical libration of Moon on Lunar satellite[J]. Acta Astronomica Sinica. 2005. 46(2):

- 196~206.
- [13] Williams J G, Boggs D H, Yoder C F, *et al.* Lunar rotation dissipation in solid body and molten core [J]. *J. Geophys. Res.* 2001,106(25): 27933~27968.
- [14] Williams J G, Dickey J O. Lunar geophysics, geodesy, and dynamics [A]. *Proceedings from the Science Session in 13th International Workshop on Laser Ranging* [C]. 2003: 75 ~ 86. .
- [15] 孔祥元,李建成,郭际明,等. 地心和月心引力常数及月球形心与质心的确定[J]. *大地测量与地球动力学*, 2006, 26(2): 109 ~ 114.
- Kong X Y, Li J C, Guo J M, *et al.* Determination of gravitational constants for Earth and Moon and geometric center and mass center of Moon[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2006, 26(2): 109~114.
- [16] Williams J G, Turyshev S G, Boggs D H, *et al.* Lunar laser ranging science: gravitational physics and Lunar interior and geodesy [J]. *Adv. Space Res.*, 2006, 37: 67~71.
- [17] 刘经南,魏二虎,黄劲松,等. 月球测绘在月球探测中的应用[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2005, 30(2): 95~100.
- Liu J N, Wei E H, Huang J S. Applications of selenodesy to Lunar detection[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(2): 95~100.
- [18] 陈俊勇. 月球大地测量学的进展[J]. *大地测量与地球动力学*, 2004, 29(6): 7~10.
- Chen J Y. Progress in Lunar Geodesy[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2004, 29(6): 7~10.
- [19] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 中国宇航出版社, 2005.
- Ouyang Z Y. Introduction to Lunar science[M]. China Astronautics Publishing House. 2005.
- [20] 李斐,鄢建国,平劲松,等. 月球探测及月球重力场的确定[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(1): 31~37.
- Li F, Yan J G, Ping J S, *et al.* Lunar exploration and Lunar gravity field determination [J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(1): 31~37.
- [21] 李斐,鄢建国. 月球重力场的确定及构建我国自主月球重力场模型的方案研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2007, 32(1): 6~10.
- Li F, Yan J G. Principle and method of Lunar gravity field determination and project on self-determinational Lunar gravity field[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(1): 6~10.