

文章编号:1671-8860(2005)02-0095-06

文献标志码:A

# 月球测绘在月球探测中的应用

刘经南<sup>1</sup> 魏二虎<sup>2</sup> 黄劲松<sup>2</sup> 张小红<sup>2</sup>

(1 武汉大学校长办公室,武汉市珞珈山,430072)

(2 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路129号,430079)

**摘要:**根据探月历史概述了月球测绘与月球探测的关系、月球探测的焦点和我国探月计划;分析研究了月球测绘的关键技术;论述了月球测绘在月球探测中的应用。

**关键词:**月球测绘;月球探测;关键技术;月球轨道;月球重力场;月球参考框架;月球控制网;月球地形

**中图法分类号:**P221;P223;P228.5;P228.6

为了能够对月球探测器和其他深空探测器连续跟踪测量和接收其发回的观测信号,美国国家航空航天局(NASA)从1958年起开始建立了深空测控网(DSN)<sup>[1]</sup>,俄罗斯也建立了太空测控网。在深空测控网的支持下,月球探测器成功完成了飞越月球、环绕月球和登陆月球的探测活动。

美国曾计划2004年重新登月,2010年将在月球上建立永久基地;欧洲制定了欧洲月球2000探月计划;俄罗斯将发射一个小型的月球轨道站,再从轨道站向月球发射各种探测仪器以研究月球起源;日本SELENE探测器已进入设计与开发阶段;印度预计在2007年前发射月球探测器,星上配置先进的测量仪器。2003年3月1日,我国政府正式启动了月球探测计划,取名为“嫦娥工程”计划。整个探月工程计划分为三期:第一期是“环”,即发射环月飞行的月球探测卫星;第二期是“落”,即月球探测器在月面软着陆,进行月球巡视勘察;第三期工程的目标是“回”,即探测器完成月球巡视勘察及采样工作后返回。

采用探测器绕月、环月和登月进行探测就需要更准确的月球轨道、月球重力场和月球地形的测绘成果,需要更精确地建立和连接测量地球坐标系统、月球坐标系统和天球惯性坐标系统等参考系统。因此,我国要实现月球探测计划,研究月球测绘的关键技术及其在月球探测中的应用具有深远的意义。

## 1 月球测绘的关键技术

### 1.1 射电天文测量技术

射电天文观测是深空探测中使用广泛的观测方法。其基本设施是抛物面射电望远镜,观测技术有甚长基线干涉测量技术(VLBI)、较差甚长基线干涉测量技术( $\Delta$ VLBI)、合成口径射电干涉测量技术、甚长基线干涉测量阵列(VLBA)技术。

在月球观测中,通过射电天文观测测量了月球热辐射的极化现象,有助于研究月球介电常数、月壤厚度和密度。美国在“Apolo12、14、15、16、17”探月任务中,在月球上安置了一些无线电发射器,因此,采用VLBI或 $\Delta$ VLBI技术可以确定月球无线电发射器的坐标、月球自转参数;VLBI技术可以用来测量月球探测器精密轨道,并通过轨道摄动的确定来反演月球重力场。

### 1.2 雷达测量技术

月球和行星等天体自身所发射的射电信号在到达地面后已经非常微弱,对这些射电信号进行观测时,观测数据的信噪比很低,射电图像质量也比较差。为了获得月球和行星等天体的高质量射电观测数据和高亮度的射电图像,深空观测中还采用了一种主动观测技术,即太阳系雷达观测技术。该技术采用了一种特大功率的雷达系统,它向空间发射选定波段的电磁波,电磁波传送到行星或月球,

然后又被反射离开其表面,被地面观测站所接收。目前,对于雷达波测量方法有如下几种。

1) 射电天文观测方法:月球、行星等天体反射的雷达射电波可以被单口射电望远镜、VLBI、VLA 或 VLBA 等射电天线网络所接收,并进行干涉测量或合成口径观测成像。

2) 雷达测距:通过测量雷达波往返天体传播时间来确定月球或探测器到地面观测站的距离。

3) 多普勒测速:多普勒测量基于多普勒效应,通过雷达发射波的频率与接收的反射波频率的变化(多普勒频移),确定月球探测器相对于观测站的运行速度和距离变化。

太阳系雷达观测技术对月球的直接测量,首次有效地描绘了精细的月球图像。该技术目前测得月球极地地形图的空间分辨率达到 30 m。雷达观测技术也是对月球探测器定轨和导航的主要技术手段,多普勒雷达技术测量探测器轨道对测量月球重力场有重要的意义。

### 1.3 激光技术

激光波的频率高达几十到几百 kHz,具有很强的穿透性,激光测距与微波雷达测距相比,具有远、准、快、抗干扰、无盲区等优点。目前,激光在月球探测中主要有两种测量方法。

#### 1) 地月激光测距

从 20 世纪 60 年代开始的第一轮探月活动中,美国和前苏联探测器登月时在月球上建立了 5 个激光反射器(美国安装 3 个,前苏联 2 个),从此产生了激光测月技术(LLR)。激光测月原理是由地面激光测距站向安置在月球上的反射器发射激光脉冲,以该脉冲的往返时间来测量地面站至月球的距离。LLR 从 1969 年正式投入观测,开始只有美国麦克唐纳天文台进行地月距离观测,精度为亚 m 级,还有法国的 CERGA 和美国的夏威夷进行的地月距离观测。1988 年,麦克唐纳天文台用 76 cm 的望远镜代替 2.7 cm 的望远镜,观测精度已经达到 cm 级,预计不久将达到 mm 级。

LLR 可以用于测量月球的轨道参数、改进月球历表、测量月球自转参数和验证广义相对论的强等效原理。

#### 2) 探测器激光测月

探测器激光测月即在绕月探测器上安置激光测高仪(lunar observer laser altimeter, LOLA),LOLA 在飞行过程中向月球发射激光束,激光束到达月球后,有部分被反射回到激光测高仪接收装置,通过测定激光束往返的传播时间,就能确定激光测高仪到月球激光脚点的距离;通过地面深

空网中的 VLBI、多普勒雷达或恒星摄影法等观测获得绕月探测器的位置;通过恒星跟踪器等测量探测器的姿态及激光束的发射角,可以确定出月球上激光脚点的三维坐标。该方法可以提供月球周围绝大部分的栅格地形剖面,基于这些数据就可以构建全月 2 km 空间分辨率的数字高程模型。

### 1.4 摄影测月技术

摄影测月技术就是利用地面或月球探测器上高分辨率的地形测绘摄像机所拍摄的立体像片及多光谱成像仪所获得的月球立体多光谱影像,通过数据后处理来获得所摄影像区域的三维地形数据或其他专业影像图等。

这项技术可以在地面观测月球三维地形图中使用,也可以安装在月球探测器上测绘全月三维地形图。

## 2 月球测绘在月球探测中的应用

### 2.1 月球轨道测量

在探月过程中,地面观测站和月球探测器为了连续跟踪观测月球,就需要知道月球每时每刻的具体位置;月球探测器必须根据月球不同时刻的位置信息来设计其运行轨道。为了给不同时刻观测月球的地面测站和探测器提供月球的位置信息,天文工作者利用对月球观测值求出的月球在地球引力和各种摄动力综合影响下的运行轨道参数,制作成能够标记一段时期内月球在特定时间的位置或坐标的表册——月球历表,使用者可根据观测时间在月球历表中查出计算参数,计算出月球坐标。

早期主要采用光学天文测月的观测量来确定月球历表,最新的月球历表制作已经将雷达测月、射电观测、VLBI、激光测月和探测器等高新技术所获得的最新观测数据加入计算,而且在力学模型上不断改进,以保证积分初值的精确性和理论的先进性;不但与历史上的观测记录进行比较,而且与纯粹用分析方法所得的结果对比,这样可以进一步保证月球历表的稳定性和可靠性,用以制作时间跨度更长的月球历表。目前,最著名的月球历表是由美国喷气推进实验室(JPL)的 Standish 等人研制的 DE 系列星历表。

### 2.2 月球重力场测量

月球重力场制约着月球以外所有物体的运动,探测器从地球轨道变轨进入月球轨道以及进行登月将主要受到月球重力的影响,需要利用月

球重力场的作用才能完成,因此,设计环月探测器和登月探测器轨道必须参考月球重力场资料。同时,研究月球重力场也是建立月球大地坐标系的需要,月球重力场的测量为建立月球大地水准面、月球水准椭球提供了有益的数据资料。

月球重力场的确定与地球重力场的确定有所不同。由于测量手段受到了很大限制,目前无法进行月球重力场的实际测量,主要通过绕月飞行器的轨道摄动来间接获得月球重力场的信息。

### 2.2.1 地面跟踪月球探测器测量月球重力

环月探测器的发射对精确测量月球重力场创造了条件。地面观测站通过多普勒测量技术、VLBI 技术测量绕月探测器的轨道变化来反演月球重力场,特别是月球低轨探测器对恢复月球重力场的精细结构具有非常重要的作用。

在第一轮探月活动中,美国发射的月球轨道探测器 1~5 的观测数据、阿波罗 16 之前的阿波罗系列探测器发射的无线电数据可以用来计算月球重力场模型,NASA 综合利用这些观测数据建立了  $60 \times 60$ (60 阶次)月球重力场模型(LUN60D)。

1994 年 1 月 25 日,美国发射了“克莱门汀”探测器,该探测器没有提供理想的月球重力场模型,但是它首次提供了自阿波罗计划以来的月球正面、高倾角、高质量的卫星跟踪数据,而且该卫星在越过月球极地时也能被跟踪观测。综合利用其观测数据以及早期的数据,建立了一个  $70 \times 70$ (70 阶次)的重力场模型(GLGM-2)。

1998 年 1 月 6 日,美国发射了“月球勘探者”探测器,并利用美国深空网中的射电望远镜,以  $0.2 \text{ mm/s}$  的精度,每  $10 \text{ s}$  测定一次月球勘探者发送的 S 波段无线电波的多普勒频移,以测定探测器的飞行速度,再由地面计算机计算月球上空各处的重力加速度,精度比过去高 5 倍。月球勘探者在月球正面可以分辨出  $50 \text{ km}$  等级的重力异常。由于在月球背面不能进行监测,只能分析它回到正面时轨道有何异常,因此,其分辨率为  $200 \text{ km}$ 。综合利用它与“克莱门汀”探测器及早期的观测数据,实现了 75 阶次的月球重力场展开级数式 LP75G。1999 年建成了 100 阶次的月球重力场模型——LP100 J。由于远区重力场的不确定性,用于其他飞行器定轨时还必须要作适当调整。随后,Konopliv 又确定了一个 165 阶的月球重力场模型。随着新技术的不断出现,月球重力场模型的精度也逐渐得到提高。

### 2.2.2 卫星跟踪卫星测量月球重力场计划

仅仅由地面跟踪探测器来测量月球重力场无

法克服以下问题:① 缺乏覆盖全月球的观测量;② 在大范围的轨道周期中,缺乏对探测器轨道摄动在敏感性上令人满意的高质量观测数据;③ 由于探测器在一定飞行高度上测量,因而需要向下继续推求月面重力位(如关于月球水准面起伏或重力异常),这种向下推算的方法放大了误差,导致诸多不稳定因素;④ 重力场模型还受到由轨道周期所决定的观测量灵敏度以及观测量和动力模型误差的影响。

为了克服以上问题,高精度测量覆盖全月球的重力场、观察月球的元素和矿物质分布、表层结构、月球的运动、磁场以及在月球表面进行软着陆实验等,日本将实现一个 SELENE (selenological and engineering explorer) 绕月飞行的太空计划,由日本国家空间发展局(NASDA)和日本宇宙科学研究所(ISAS)实施,可以高精度地确定月球低阶重力场信息。在该计划中,将首次使用高轨中继卫星(装有多普勒接收机)跟踪观测低轨的月球探测器,再由地面观测站跟踪观测中继卫星的 4 程多普勒观测技术来确定月球重力场。这样,即使月球探测器到了月球背面,也可以保证对其进行跟踪,利用低轨月球探测器位置信息来充分获得全面的中高阶月球重力场信息。另外,该计划将利用深空网<sup>[1]</sup> 中的射电望远镜,采用较差 VLBI 方法测量中继卫星和射电源卫星所发射的载波,获得高精度、高灵敏度观测值,以确定中继卫星的精确位置信息。

### 2.3 月球参考框架及月面控制网的建立

环月和登月探测器轨道都要经过以下几个过程:以地球质心为一个焦点的椭圆轨道和以月球质心为一个焦点的椭圆轨道。因此,需要建立地心地固参考框架和月心月固参考框架。而设计月球探测器还需要月球的位置信息,从月球历表计算出月心在地心天球参考框架的坐标。所以,探测器的轨道和定位坐标还涉及到地心天球参考框架,以及从地心天球参考框架转换到月心月固参考框架所经过的月心天球参考框架。

参考框架的建立过程就是确定参考坐标系统原点的位置、三个坐标轴的空间指向,以及根据研究天体的具体形状(一般根据大地水准面的形状)而建立的具有一定形状和大小的规则数学体(如地球坐标系中的参考椭球体)。人们很早就致力于地心天球参考框架和地心地固参考框架的研究,目前这两个参考框架均已建成,月心天球参考框架是地心天球参考框架平移到月心的天球坐标系,因此,月球参考框架的建立关键在于月心月固

参考框架的建立。

通过多年的天文观测,特别是进行绕月卫星摄动观测后,已经有了有关月球的一些物理量,如引力常数、自转速率等比较精确的数值。基于月球卫星的运动来确定月球的参考框架,建立一个绝对坐标系,需要高精度、长时间的轨道观测量。

### 2.3.1 月球参考椭球的建立

月球不是一个规则的数学体,但根据地球测绘的经验,要顺利地开展月球测绘工作,需要建立一个与月球形状结合密切的规则参考数学体,将空间观测量和月面观测量投影到该数学体的表面上。

1) 根据月球的地形表面来确定<sup>[2]</sup>。根据目前所能采用的光学测月、雷达测月、激光测月、VLBI、摄影和月球探测器对月球地形的测量,初步获得了月球表面地形和月球大地测量的常数。一般选取最佳符合月球地形表面的球面作为月球的大地参考面(球),球半径取月球的平均半径,球心与月球质心重合。

2) 根据月球大地水准面形状确定。月球上的物质分布都受到月球重力的约束,所以月球形状从物理上最接近的是一个重力位等位面——月球大地水准面。一般选取最佳符合月球大地水准面形状的水准椭球面作为月球的大地参考面,从而初步建立了月球参考椭球<sup>[3]</sup>。本文以月球参考椭球作为月球的规则参考数学体来研究月球坐标系统和高程系统。

### 2.3.2 月心月固坐标系的建立

月心月固直角坐标系的原点位于月球质心,Z轴与月球自转轴重合指向北部,即垂直于赤道面。由于月球自转周期约等于其绕地球的公转周期,因此有一面始终朝向地球。将其中从月心指向地球质心的平均方向定义为X轴指向,Y轴与X、Z构成右手正交直角坐标系。

月心月固大地坐标系的原点位于月球质心,参考平面为月球赤道面,经度起点为从月心指向地球质心的平均方向与月球自转轴所形成的半个子午面(朝向地面),月球上任何一个点沿月球参考椭球法线方向到月球参考椭球面的距离就是月球大地高程。

其次,经过长期观测特别是激光测月技术的高精度观测,求定了月心天球坐标系和月固坐标系的转换参数,即三个转换角——欧拉角,并编制了月球历表。

### 2.3.3 月球控制网的建立<sup>[2]</sup>

目前已经采用了三种方法在月球表面建立了

月球控制网。第一种是激光测距。在美国“Apollo 11、14、15”和前苏联“Luna 17”航天任务中,在月球表面安置了一些激光反射镜。由地球上的激光测月站点对月球进行激光测距,利用这些测量结果推算了这些反射镜所在点的月心坐标,这样在月球前表面建立了点距约为1 000 km的基本控制网。第二种是无线电定位法。在“Apolo 12、14、15、16、17”航天任务中,在月球上安置了一些无线电发射机,利用地面接收站通过干涉测量原理就可由相移得出发射机所在点的相对位置,这样就在月球表面建立了补充控制网。在20世纪70年代中期,这两种观测方法的精度可以达到±1 m。第三种方法是摄影测量法。由空间探测器、卫星或空间运载器所摄取的像片用来进一步加密月面控制点。这些点是易于判识的环形山或其他特征点。空间摄影机中心由地面多普勒站的跟踪测量、雷达测距和VLBI技术来确定。

### 2.3.4 月球高程系统的建立和转换

#### 1) 月球高程系统

人类在月球所从事的工程建设工作中,不管是哪一种测量仪器的安置,总是以铅垂线为依据,所观测的高程也是沿垂线方向至月球大地水准面的距离,即月球正高,从而引出月球大地高之外的第二种高程。

月球上某点大地高和正高不完全相等,原因在于:(1)月球参考椭球是规则的旋转椭球体,而月球大地水准面在数学上是不规则的,所以,椭球面与水准面之间有差距,称该差距为月球水准面差距;(2)月球上任何一点的重力方向与椭球体的法线方向之间的夹角不为0,该夹角称作垂线偏差。

#### 2) 高程转换方法

月球上某点投影到月球大地水准面之后,要求得该点相对于水准椭球体的月球大地水准面差距和垂线偏差分量,必须已知月球大地水准面上该点的扰动位。扰动位是重力位和正常位之差,因此,可以通过重力位和正常位来确定月球大地水准面差距和垂线偏差。扰动位又联系到重力异常(月球大地水准面上重力和水准椭球上的正常重力之差),因此,可以通过重力异常来确定月球大地水准面差距和垂线偏差。

人类登月之后,还可以利用天文水准或天文重力水准方法来确定月球大地水准面差距。

#### 3) 月球水准高程的起算点

月球上某点的正高是沿垂线方向至月球大地水准面的距离,所以月球正高的起算面应该是月球大地水准面。目前的探月事实表明,月球上并

没有水,因此无法用能够代表重力位面的平均海平面作为月球大地水准面。

月球上能被精确观测的目标只有 4 个激光反射器(地面观测站无法观测到第 5 个激光反射器的回波)和无线电发射器,通过地面激光测月和 VLBI 技术可以确定月面 4 个激光反射器和无线电发射器的月心坐标(月球经度、月球纬度、月球大地高),它们形成了月球高程控制网。

激光测月和环月探测器对月球重力场的高精度观测,已经建立了比较高精度的月球重力场模型,尤其是 NASA 建立的 LP165P,可以用来确定月面这些控制点的重力位和重力异常,从而进一步确定它们的大地水准面差距和垂线偏差。再利用这些点的月球大地高转换为正高,从此,这些控制点形成了月球正高的控制网络,其中正高精度最高的一个点可以作为月球水准原点。

## 2.4 坐标系统的测量和维持方法

保持坐标系统的稳定性是月球探测的基本需要,稳定可靠的坐标系统也是月球探测器轨道设计、导航、登月等探测月球的最基本的要求和保障。坐标系统的稳定性依靠测量坐标系统原点位置和坐标轴指向及其变化,再通过变化量的转换或改正来维持坐标原点、坐标轴空间指向的稳定性。月球坐标系指向的确定主要通过测量月球自转、月球天平动、月球轨道参数和月面点坐标等及其变化来实现。

在 LLR 或 VLBI 测月时,地面月球激光观测站或 VLBI 观测站严格地固定在地球表面,与已经建立的地固坐标系紧密相关;月球激光反射器或无线电发射器与已经建立的月心月固坐标系紧密联系;VLBI 测量河外射电源时,射电源星表实现了射电天球惯性参考系。LLR、VLBI 测月和 VLBI 测量河外射电源可以求定地球极移和地球自转参数,还可以测定地面测站坐标、月球反射器的月面坐标、月球潮汐位系数以及月球的自由天平动、射电源坐标等。这些观测量可以用来确定月球坐标系的坐标轴指向以及与地固坐标系和射电天球惯性参考系间的转换参数。LLR、VLBI 测量技术是测量、维持月固坐标系,连接月固坐标系、地固坐标系和射电天球惯性参考系的重要技术手段。

## 2.5 月球地形测绘技术及方法

三维的月球地形数据对月球探测器登陆轨道设计、月球登陆点的选择、月球探测车在月球探测路线设计、选择月球实验基地乃至月球深空探测器发射基地的选择都有着非常重要的意义。另

外,研究月球所有的基本地质过程模型(如火山运动、构造运动、碰撞和侵蚀等)也都需要三维的月球地形数据,因为模型中构建边界条件通常会涉及到高程、深度及局部梯度等同地形有关的数据。还有,建立岩石圈结构及密度分布模型也需要完整的长波地形数据,而这种数据只能通过建立全月球的数字高程模型获得。另外,月球地形图对研究月球的形状,精确建立月固大地坐标系的水准椭球、大地原点和月球水准原点都是非常必要的。最后,月球地形图是人类在月球上进行工程建设的基本要求。月球地形测量主要分为地基月球地形测量和探测器月球地形测量。

### 2.5.1 地基月球地形测量

从 1609 年伽利略发明了第一架天文望远镜开始,人们就通过光学测月来绘制月球地形图,后来发展为采用地形测绘摄像机所拍摄的立体像片及多光谱成像仪所获得的立体多光谱影像,通过数据后处理来获得所摄影像月球区域的三维地形数据或其他专业影像图等。

地基干涉雷达(radar interferometry)早在 1969 年就被用于从地球上观测金星,1972 年被用于观测月球的地形,首次获得了最精细的月球地形图。雷达测量月球的三维地形图的方法是利用地面干涉测量的射电望远镜来接收月面雷达波的反射信号,将观测的两组数据进行干涉处理来获得月面三维地形数据。由于雷达测月是主动观测技术,这些高程数据可以弥补没有光学摄影测高数据的区域,主要是月球的南北极地区,目前观测最高分辨率达到 30 m。

但是,地基光波测月、雷达波测月将受到地球大气层的影响,而且,地基测月仅获得面向地球一面的概略月面地形图,无法测量月球侧面和背面的地形图。

### 2.5.2 探测器测量月球地形

从 1966~1968 年,美国的阿波罗系列探测器 1~5 就安装了高分辨率地形测绘摄像机,对月球进行摄影观测,在月球低轨道上,获得了几千张月球的高质量黑白照片,几乎覆盖了整个月球。这些照片被用来绘出全月地形图,用于选择阿波罗探测器首次登月的月球位置。

在 1971~1972 年期间,美国发射的阿波罗 15、16、17 号探测器上安装了型号为 Ruby 的激光测高仪,测量的高程精确达到 400 m;1994 年,美国发射的克莱门汀探测器上安装了 Cr: Nd: YAG<sup>b</sup> 激光测高仪,测量的高程精确达到 90 m。由于受月球探测器轨道的限制,月球激光测高仪