

月球光学遥感与制图研究进展

刘建军, 任鑫, 王奋飞, 牟伶俐, 王文睿, 谭旭

中国科学院 国家天文台, 中国科学院月球与深空探测重点实验室, 北京 100012

摘要: 在月球探测活动中, 光学成像探测是任务重点, 也是信息量最大的数据源。航天技术和传感器技术的发展促进了月球光学遥感的发展, 月球科学研究也越来越依赖于高分辨率遥感数据, 对月球光学遥感与制图的研究是月球探测的关键问题之一。本文扼要论述了其中的几个方面, 包括月球光学遥感数据获取系统、月球遥感立体测绘和制图, 以及月球控制网构建等方面的研究进展。

关键词: 月球; 光学遥感; 制图

中图分类号: P184 文章编号: 1007-2802(2015)03-0461-10 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2015.03.002

Progress in the Lunar Optical Remote Sensing and Mapping Research

LIU Jian-jun, REN Xin, WANG Fen-fei, MU Ling-li, WANG Wen-rui, TAN Xu

Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, National Astronomical Observatories,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: Optical imaging detection is the key task and the largest information source in lunar exploration activities. The development of space technology and sensor technology has promoted the development of lunar optical remote sensing. Lunar science is increasingly dependent on the high-resolution remote sensing data. Research on lunar optical remote sensing and mapping is one of the key steps of lunar exploration. This paper briefly discussed research progresses in lunar optical remote sensing data acquisition system, lunar topography surveying and mapping, and lunar control network construction.

Key words: Lunar; optical remote sensing; mapping

月球是地球唯一的天然卫星, 是距离地球最近的天体, 也一直是人类探测研究的对象。从 20 世纪 50 年代以来, 发射了上百个月球探测器, 获取了大量探测数据。近二十年来, 美国、欧空局、日本、中国、印度等相继发射月球探测器, 获得了海量月球探测数据, 谱段范围覆盖 γ/X 射线、紫外、可见光、近红外、红外和微波, 有利地支撑了月球地形地貌、物质成分、地质构造、重力场、月表辐射环境等方面的研究, 形成了一大批月球科学研究成果, 拓展了人类对未知领域的认知。每一次月球探测活动中, 光学成像探测都是任务重点, 也是信息量最大的数据源。航天技术和传感器技术的发展促进了月球光学遥感的发展, 月球科学研究也越来越依赖于高分辨率遥感数据, 对月球光学遥感与制图的研究已成

为月球探测的关键问题之一。这方面的研究近年来取得了明显进展, 本文扼要地论述了其中的 3 个方面: ①月球光学遥感数据获取系统; ②月球遥感立体测绘和制图; ③月球控制网构建。

1 月球光学遥感数据获取系统

发射月球探测器, 开展光学遥感探测任务, 最早可以追溯到 1959 年 10 月, 苏联探测器月球 3 号 (Luna 3) 拍摄了第一批月球像片, 制作了第一幅月球背面图。从 1959 年至 1976 年的 18 年中, 发射了与月球相关的探测器 108 次, 到达月球 (附近) 并直接开展对月球的成功探测活动 45 次, 其中美国 22 次, 前苏联 23 次, 主要包括美国的先锋 (Pioneer)、徘徊者 (Ranger)、勘测者 (Surveyor)、月球轨道器

收稿日期: 2014-10-28 收到, 2014-11-25 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41371414)

第一作者简介: 刘建军 (1976-), 男, 研究员, 研究方向: 行星遥感与制图。获第 15 届侯德封奖。E-mail: liujj@nao.cas.cn.

(Lunar Orbiter)以及阿波罗(Apollo)系列月球探测器;前苏联的月球号(Luna)和探测器(Zond)系列的月球探测器(陈俊勇,2004;欧阳自远,2005)。这些探测活动在早期月球遥感数据获取中发挥了重要作用。但是早期制作的月面地图主要是分辨率在千米量级、小比例尺的全月球图,或者是中等分辨率(100 m 量级)的局部区域月面影像。另外,为了选取月面着陆点也获取了一些高分辨率(米级)月面影像,但是覆盖月面的区域很小。这个时期最具代表性的光学遥感数据获取系统是“月球轨道器”(Bowker and Hughes,1971),它是绕月轨道上的月球测绘探测器。“月球轨道器”实施于1966年至1967年间,共发射5次,探测器使用了一个带有双镜头的专用胶片相机系统,高分辨率相机焦距610 mm,视场角 $20.4^{\circ}\times 5.16^{\circ}$,而中等分辨率相机焦距80 mm,视场角 $44.4^{\circ}\times 38^{\circ}$,获取了分辨率达到60 m 和部分地区更高分辨率月表影像数据。“月球轨道器”的实施促进了月球卫星摄影测量技术的发展(葛之江等,2005)。用这些绕月飞行中得到的数据,选择了阿波罗飞船的月球着陆区,并取得了月球卫星三角测量的实践经验,是第一次加轨道限制条件来进行加密控制点测图的解析三角测量,对具有科学价值的环形坑和重点地区进行解析空间三角测量。

进入20世纪90年代,经历了近二十年的低潮后,美国于1994年发射了克莱门汀探测器(Clemen-

tine),开启了月球探测的新起点,月球探测又迎来了新一轮的热潮。美国、欧空局、日本、中国和印度等先后共开展了十余次月球探测活动,实现了对月球全球性与综合性的勘察探测。欧空局的智慧一号(Smart-1)、日本月亮女神号(Selene/Kuguya)、中国嫦娥一号(CE-1)和嫦娥二号(CE-2)、印度月船一号(Chandrayaan-1)和美国月球勘察轨道器(LRO)等,均对月面进行了不同分辨率和不同覆盖程度的光学成像,返回了海量的科学探测数据,进行了全面系统的月球遥感制图(Nozette,1995;McEwen and Robinson,1997;Foing *et al.*,2003;Sasaki *et al.*,2003;Bussey and Spudis,2004;Foing *et al.*,2006;Chin *et al.*,2007;Goswami and Annadurai,2008;Haruyama *et al.*,2008a,2008b;赵葆常等,2009;Ouyang *et al.*,2010;Zhao *et al.*,2011;Zuo *et al.*,2014)。这些月球探测,光学遥感数据是主要数据源。由于各国及各个探测器的探测目标不同,任务重点各有侧重,各国光学探测器的技术指标也有差异(表1)。

从目前的月球光学遥感数据获取系统来看,可概况为以下几点:

- (1) 光学传感器的空间分辨率已经达到10 m 以内,可用于比例尺为1:10万的全月地形图测绘,也可以制作局部区域更大比例尺的测绘地图;
- (2) 传感器技术已比较成熟、稳定,线阵推扫式传感器被广泛应用;
- (3) 传感器立体成像能力明显增强,可利用单

表 1 各国月球探测光学遥感探测仪器
Table 1 Optical remote sensing instrument on lunar probes

探测器	发射时间	仪器名称	成像高度/km	空间分辨率/m	成像波段和立体能力/nm	成像区域
Clementine (美国)	1994.1.25	紫外-可见光相机 UV/Vis	400~ 2940	100~325	415、750、900、 950、1000	80°S~20°N 和 20°S~80°N; 其中,90°S~80°S 和 80°N~90°N 成像试验
		高分辨率相机 HIRES		7~20	415、560、650、750	局部区域成像
Smart-1 (欧空局)	2003.9.27	高级月球微型成像仪	300~1800	27~162 45@500 km	450、750 和 950	局部区域成像
Selene (日本)	2007.9.13	立体相机 TC (两线阵)	100	优于 10	430~850 立体: 前/后两线阵	30°S~30°N 60°S~30°S 和 30°N~60°N; 90°S~60°S 和 60°N~90°N
CE-1 (中国)	2007.10.24	三线阵 CCD 立体相机	200	120	500~750 立体:前/中/后三线阵	全月球
Chandrayaan-1 (印度)	2008.11.8	三线阵 CCD 立体相机	100	5	500~750 立体:前/中/后三线阵	局部区域成像
LRO (美国)	2009.6.19	两台窄视场相机	50 150	0.5 1.5	400~750 nm 立体:异轨或姿态调整	极区和 Apollo 着陆区局部区域成像
		宽视场相机	50	可见波段 100 紫外 400	315~680 nm7 个谱段 立体:异轨	全月球
CE-2 (中国)	2010.10.1	两线阵 CCD 立体相机	100 15	7 优于 1.5	450~520 nm 立体: 前/后两线阵	全月球 着陆区局部高分辨率成像

一传感器获取同轨立体,或通过平台姿态调整获取异轨立体;

(4) 立体测绘的方式多样化,在光学传感器进行立体成像时,为提高高程测量精度,同时配置了激光高度计。

2 月球遥感立体测绘和制图

2.1 早期的月球测绘与制图

20 世纪 60 年代,随着前苏联 Luna 系列、Zond 系列,以及美国 Ranger 系列、Surveyor 系列、Lunar Orbiter 系列和 Apollo 系列等探测任务的实施,各国开始了月面地形图测绘工作,在早期月球遥感制图中均发挥了重要的作用(Heiken *et al.*,1991)。

1960 年,前苏联利用 Luna 3 获取的数据,出版了月球背面地图集《Atlas Obratnoi Storony Lunny》(atlas of the far side of the Moon)(Barabashov *et al.*,1960)。

1971 年,Bowker 和 Hughes 利用 Lunar Orbiter 获取的 675 张平面影像编制了月球地图集《Lunar Orbiter Photographic Atlas of the Moon》,这些平面图覆盖了月球的正面和背面,是当时覆盖最全、精度最高的全月球地图(Bowker and Hughes,1971)。

在阿波罗任务中,采用摄影测量技术制作了覆盖南北纬 26° 之间,空间分辨率为约 500 m 的月表规则格网 DEM 数据(Sherman and Wu,1985)。

总体上,这个时期光学遥感主要采用胶片相机或摄像机成像,图像质量相对较差,空间分辨率较低,几何定位精度不高,地形图大多为小比例尺(1:100 万、1:200 万、1:500 万、1:1000 万等)的概貌图,为早期的月球探测任务规划、区域性研究等提供了数据基础。尽管制作了一些大比例尺(1:25 万、1:10 万、1:1 万、1:2000、1:1000、1:400 等)地形图,但仅覆盖了月面少数区域,主要服务于美国 Apollo 登月计划。

2.2 近二十年月球测绘与制图的进展

1994 年美国 Clementine 探测器对月球进行了为期 71 天的探测,利用紫外-可见光相机的 5 个波段获得了平均空间分辨率 200 m/像元、覆盖 99% 月表范围的影像数据(Bussey and Spudis,2004);同时配置的激光测高计,获取了 72548 个有效测高数据,覆盖范围为 79° S ~ 81° N (Smith *et al.*,1997)。Eliason 等(1999)利用 Clementine 750 nm 谱段的影像数据,制作了 1.0 版月球基本地图(UVVIS 750 nm Basemap)。Rosiek 等(2002)利用激光高度计获得的数据,结合 Clementine UVVIS 相机图像数

据经摄影测量处理得到的两极地区 DEM 数据,制作完成了空间分辨率为 0.25° (相当于 7.5 km)的全月球 DEM 数据,编制了 1:1000 万比例尺的 Clementine 彩色编码晕渲图(Clementine Color-Coded Shaded Relief Map),其中,79° S ~ 81° N 范围的高程测量精度为 130 m 左右,两极地区 1 ~ 2 km。2004 年,Bussey 和 Spudis(2004)编制了《The Clementine Atlas of the Moon》。在此基础上,Hare 等(2008)和 Lee 等(2009)利用月球统一控制网(the Unified Lunar Control Network 2005, ULCN 2005)对 Clementine 紫外-可见光相机的图像重新进行了定位,制作了 2.0 版的月球基础地图。

2005 年,美国地调局(USGS)采用摄影测量技术,联合处理了 Clementine 图像数据、地基观测数据、Apollo、Mariner 10 和 Galileo 等获取的图像数据,解算了 272 931 个月面控制点的平面坐标与高程值,建立了月球联合控制网 ULCN 2005。利用这些控制点数据制作了空间分辨率为 1.895 km 的规则格网月表 DEM 数据,高程测量精度在百米量级(Archinal *et al.*,2006a)。

2004 年至 2007 年,Becker 和 Weller 等人利用 Lunar Orbiter 3,4,5 数据建立了基于 ULCN2005 的月球地图产品《the Lunar Orbiter Global Mosaic》(Becker *et al.*,2004;Weller *et al.*,2006,2007);2005 年,Byrne 使用 lunar Orbiter 4 获取的影像数据,制作了月球正面地图集《Lunar Orbiter Photographic Atlas of the Near Side of the Moon》(Byrne,2005)。2007 年,Stooke 根据 Luna 9 编制了《The International Atlas of Lunar Exploration》(Stooke,2007)。随着地理信息系统的发展,出现了电子和基于网络的月球地图集,如 Map-A-Planet,Virtual Moon Atlas,Web-GIS,Google Moon 和 NASA World wind lunar map(Bell *et al.*,2007)。

2007 年,日本月球探测卫星 Kaguya(Selene)成功发射,探测器由一个轨道器、一个 Doppler 中继卫星和一个 VLBI(Very Long Baseline Interferometry)电波源组成,主卫星上搭载了激光高度计(LALT)和地形相机(TC)。激光高度计进行了测高,共获得了 677 万个测距数据。Araki 等(2009)利用 Selene 激光高度计测距数据,制作了空间分辨率为 0.0625° (相当于 1.895 km)的全月球 DEM 模型,靠近极点附近的分辨率可以达到 0.015625° (相当于 474 m),高程测量精度为 5 m,平面位置精度为 77 m。地形相机采用两线阵推扫方式成像,2010 年,Hoshino 等对 Selene 地形相机的图像数据进行

了定位和镶嵌处理,制作了空间分辨率为 7.4 m 的全月镶嵌影像图 (Hoshino *et al.*, 2010)。Haruyama 等(2014)利用 Selene 地形相机采用摄影测量的方法,同时融合处理了 Selene 多光谱相机、美国 LRO 激光高度计点云数据,制作了空间分辨率为 7.4 m 的全月 DEM 和 DOM 数据,高程精度优于 10 m。

2007 年,中国发射的 CE-1 号卫星上搭载了激光高度计和三线阵 CCD 立体相机。CE-1 激光高度计总共获取了约 912 万个有效探测数据,数据覆盖了全月面。Li 等(2010b)利用这些探测数据制作了空间分辨率为 3 km 的全月 DEM 模型,平面定位精度为 445 m (1 σ),高程测量精度为 60 m (1 σ)。利用 CE-1 三线阵相机的图像数据进行镶嵌处理和摄影测量处理制作了空间分辨率为 120 m 的全月镶嵌图、正射影像图和数字高程模型 (Liu *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2010a; 李春来等, 2010, 2013; 李春来, 2013)。

2009 年,美国发射的 LRO 月球探测器,搭载的 LROC (lunar reconnaissance orbiter camera) 相机系统用于获取月面影像数据,由窄角相机 (narrow angle cameras, NACs) 和宽角相机 (wide angle camera, WAC) 2 个成像系统组成。WAC 为多波段相机,在可见光近红外波段空间分辨率为 100 m@50 km,在 UV (紫外) 波段空间分辨率为 400 m@50 km, WAC 相机影像数据对月表的空间覆盖为 100%。2011 年,Speyerer 等利用 LRO 宽角相机的图像数据进行了摄影测量处理,制作了空间分辨率为 100 m 的正射影像图和数字高程模型数据 (Speyerer *et al.*, 2011)。NAC 窄角相机共有两台,并排安装在垂直卫星飞行方向的左侧和右侧,均朝正视方向观测,

月面幅宽 2.5 km,空间分辨率 0.5 m@50 km 或 1.5 m@150 km,目前 NAC 相机对月表的空间覆盖率约为 55.9%。虽然 LRO NAC 相机影像数据空间分辨率达到了“米”级,但未制作全月球影像图,目前仅发布了几何定位产品。

2010 年,中国发射的 CE-2 号卫星上搭载了两线阵 CCD 立体相机,获得了全月球影像数据。在数据预处理和质量评估基础上 (刘建军等, 2013), 利用 CE-2 两线阵相机的影像制作了空间分辨率为 7 m 的全月镶嵌图 (李春来等, 2012)。随后 Ren 等 (2014) 利用两线阵立体相机数据进行摄影测量处理,制作完成了 7 m 分辨率全月球 DEM 和 DOM,平面定位精度数十米,高程精度 10 m。

综上所述,来源于 20 世纪 50~70 年代前苏联和美国发射的 Luna, Lunar Orbiter, Apollo 系列的月球遥感数据和地图产品,其数据来源、图像质量、空间分辨率、定位精度都存在较大差异,数据覆盖范围也有限。因此,月球地图和地图集虽然从某一方面反映了月球表面地形、地貌及地质信息,但仍存在一些局限性。近 20 年来,各航天大国 (组织) 发射的探月卫星在探测数据的覆盖范围和分辨率方面较历史数据均有较大改善,对月球制图学影响深远。

2.3 全月影像图和地形数据产品比较

目前主要有 Lunar Orbiter、Clementine、Selene、CE-1、LRO、CE-2 等探测任务获得了全月球影像和全月球地形数据产品,本文分别对其有效载荷配置、空间分辨率、数据覆盖、镶嵌精度和数据质量情况进行了比较 (表 2 和表 3)。

表 2 几种全月影像图的对比
Table 2 Comparison of Lunar Global image maps

影像图名称	探测任务	有效载荷	空间分辨率 /m	数据覆盖率 /%	镶嵌精度
LO DIM	Lunar Orbiter (美国, 1966. 8~1967. 8)	宽角相机 与窄角相机	60	99	存在拉伸、挤压与错位; 存在色调不一致
CLM DIM	Clementine (美国, 1994. 1)	紫外-可见光相机	100	~100	存在拉伸、挤压与错位; 赤道有明显的瓦片状纹理
SLN DOM	Selene (日本, 2007. 9)	形貌相机多光谱相机	~7.4	~92. 4	存在明显错位, 中低纬度明显条带漏缝; 极区色调明显不一致
CE1 DIM	CE-1 (中国, 2007. 10)	三线阵 CCD 立体相机	120	100	无缝镶嵌, 色调均匀
CE1 DOM	同上	同上	同上	同上	无缝镶嵌, 色调均匀
LRO DOM	LRO (美国, 2009. 6)	宽角相机	100	100	无缝镶嵌, 色调均匀
CE2 DIM	CE-2 (中国, 2010. 10)	两线阵 CCD 立体相机	7	100	无缝镶嵌, 色调均匀
CE2 DOM	CE-2 (中国, 2010. 10)	两线阵 CCD 立体相机	7	100	无缝镶嵌, 色调均匀

注:表中 DIM 表示数字镶嵌影像图 (digital image mosaic map),采用图像镶嵌技术制作;DOM 表示数字正射影像图 (digital orthophoto map),采用摄影测量技术制作;LO、CLM、SLN、LRO 分别代表 Lunar Orbiter、Clementine、Selene 和 Lunar Reconnaissance Orbiter 探测任务。

表 3 几种全月地形数据产品的对比

Table 3 Comparison of Lunar Global topography maps

地形数据 产品名称	探测任务	有效载荷	空间 分辨率	数据 覆盖率	数据质量情况
ULCN2005 DEM	Clementine (美国,1994.1)	紫外-可见光相机/ 激光高度计	1.8 km	~100%	存在明显高程奇异点;地形条纹明显;两极和中 低纬度间存在明显的地形不一致条带
SLN LAIT-DEM	Selene (日本,2007.9)	激光高度计	1.8 km	100%	数据质量较好
CE1 CCD-DEM	CE-1 (中国,2007.10)	三线阵 CCD 立体相机	500 m	100%	同上
CE1 LAM-DEM	同上	激光高度计	3 km	同上	同上
SLN DEM	Selene (日本,2007.9)	地形相机 多光谱相机	7.4 m	~100%	存在拉伸、挤压、位置错切、异常地形纹理等痕 迹;融合处理了美国 LRO 激光高度计数据
LRO WAC-DEM	LRO (美国,2009.6)	宽角相机	100 m	94.5%	数据质量好
LRO LAM-DEM	同上	激光高度计	30 m	100%	存在地形条纹
CE2 DEM	CE-2 (中国,2010.10)	两线阵 CCD 立体相机	7 m	100%	数据质量好

这些全月影像图和地形数据准确的刻画了月球表面形貌特征,使得人类对月球的认识跨上了一个新的台阶,被用于月球探测工程和月球科学研究的地理基准。为了对这些全月影像图和地形数据之间的平面位置和高程的偏差进行比较,选取月面上已放置的 5 个激光反射器(Apollo 11,Apollo 14,Apollo 15,Lunokhod 1 和 Lunokhod 2)的平面位置和高程值作为绝对控制点,对全月影像图的绝对位置精度和全月地形数据的绝对高程精度进行评价(表 4 和表 5),计算了平面位置和高程值与 5 个激光反射器月面位置之间的误差,分析绝对定位精度,影像图的平面位置精度达到百米量级,地形数据的高程值精度几米至几十米。

表 4 几种全月 DOM 数据与 5 个绝对控制点的平面位置误差

Table 4 Horizontal differences between Lunar Global DOM with five control points

控制点	CE2 DOM			LRO WAC-DEM			SLN DOM		
	位置误差/m			位置误差/m			位置误差/m		
	经线 方向	纬线 方向	综合 误差	经线 方向	纬线 方向	综合 误差	经线 方向	纬线 方向	综合 误差
Apollo 11	48	36	60	-149	191	259	-148	186	254
Apollo 14	21	95	97	19	223	237	18	218	232
Apollo 15	-40	-35	53	125	-409	530	147	-402	537
Luna 17	-4	-20	21	17	64	67	496	-772	918
Luna 21	-55	-60	81	104	0	104	15	-63	65

3 月球控制网构建

全月图像数据和地形数据能准确的刻画月球表面地形地貌特征,使得人类对月球的认识跨上了

表 5 几种全月 DEM 数据与 5 个绝对控制点的高程误差

Table 5 Altitude differences between Lunar Global DEM with five control points m

控制点	CE2 DEM	LRO LOLA-DEM	LRO WAC-DEM	SLN DEM
Apollo 11	-2	0	1	2
Apollo 14	2	9	4	8
Apollo 15	8	-1	-3	-4
Luna 17	10	-4	-16	-5
Luna 21	-19	-25	1	4

一个新的台阶,常被用作月球探测工程和月球科学研究的地理基准。但这些数据在空间位置上存在明显偏差,即使是同一国家、同一探测序列的数据之间也存在此类现象,严重影响了月球探测数据的综合利用。近年来高精度月面遥感制图,月球探测数据应用与科学研究,月面软着陆与巡视勘察、月球采样返回和建立月球永久性基地等探测计划对建立高精度的月球地理基准提出了迫切需求,要求建立统一、标准和唯一的高精度月球地理参考基准,规范月球探测数据的使用。在月球测绘工作中,建立类似地球上大地控制网的月面控制网是基础,月面控制点的数量、分布和精度决定了月球测绘的精度。

由于月球的不易抵达,高精度的月面控制点数量很少。高精度月面控制点的获取来源和方法,主要是人类在月球表面开展以有人或无人的月球车探测器为平台的探测任务后,对成功着陆在月球表面的探测器或布设的激光反射棱镜进行识别和地

面观测定位,使其成为具有较高位置精度的月面控制点。测量的手段包括月球激光测距、甚长基线干涉测量、地基望远镜观测等,其中以月球激光测距为精度最高的观测手段。

目前建立的月面控制网主要有 Apollo 月球控制网、地基望远镜月球控制网、Mariner 10 月球控制网、统一月球正面控制网、ULCN1994、CLCN1997、ULCN2005 和激光反射器月球控制网等 (Davies *et al.*, 1987, 1994; Eliason *et al.*, 1999; ArChinal *et al.*, 2005, 2006b; 夏金超等, 2012)。

3.1 控制网国内外研究现状

月球控制网的构建工作从人类开展月球探测活动便开始了,贯穿了整个月球探测过程,主要存在以下几种:

3.1.1 Apollo 月球控制网 在 Apollo 15, 16 和 17 月球探测任务中均携带了 3 台相机:米级制图相机、星传感器和高精度全景相机 (Light, 1972)。利用这 3 次任务获取的图像数据 (分辨率为 30~60 m), 采用解析摄影测量的方法,先后制作了 3 个月球控制网, DMA/A15, NOS/USGS 和 DMA/603。DMA/A15 和 DMA/603 由美国国防地图局航空中心 (Defense Mapping Agency Aerospace Center, DMAAC) 制作, NOS/USGS 由国家海洋调查局 (National Ocean Survey, NOS) 和地质调查局 (U.S. Geological Survey, USGS) 联合完成。DMA/A15 用到了 1287 幅图像,解算了 4933 个控制点坐标, NOS/USGS 用到了 1242 幅图像,解算了 5324 个控制点坐标, DMA/603 用到了 603 幅图像,解算的控制点数量比前两者少很多。在解算过程中 NOS/USGS 引入与 DMA/A15 的连接条件作为控制, DMA/603 引入了与 DMA/A15 和 NOS/USGS 的连接条件作为控制,因此这 3 个控制网的一致性比较好 (Defense Mapping Agency Aerospace Center, 1973, 1975, 1976)。早期的月球制图主要采用该控制网,但是其控制点数据只分布在北纬 26° 之间的带状区域。

3.1.2 地基望远镜月球控制网 基于地基光学望远镜拍摄的月盘图像解算的月球控制网很多,覆盖月面最广、精度最好的是 Meyer 建立的控制网 (Meyer, 1979)。Meyer 在整个月盘图像上选择了 30 个均匀分布点,确定了月盘的旋转、平移和比例尺等常数,用于改进月球物理天平动参数。该控制网共有 1156 个控制点, Meyer 量取了这些控制点在月盘图像上的像素坐标,根据月盘的旋转、平移和比例尺参数计算这些控制点的坐标。望远镜控制网和 Apollo 控制网之间存在较大偏差,平均约 2 km,

而且只分布在月球正面,只适用于位置精度要求不高的地基对月观测项目。

3.1.3 Mariner 10 月球控制网 Mariner 10 是在 1973 年 11 月 3 日发射的,主要目标是开展金星和水星探测,为了验证该探测器上携带摄像机的性能,在奔赴这 2 颗行星的过程中获取了一些地球和月球图像。在其飞越月球时,月球的东半球处于白昼,所携摄像机摄取了月球正面和月球北极地区的一些图像。Davies 等 (1975) 从这些图像中选取了 29 幅,在地基望远镜控制网和 Apollo 控制网中选取了一些连接控制点,采用解析摄影测量的方法,制作了 Mariner 10 月球控制网,共有 1126 个控制点。

3.1.4 统一月球正面控制网 Davies 等 (1987) 在 Apollo 月面控制网、望远镜控制网和 Mariner 10 控制网的基础上,引入了月面激光反射器 (Lunar ranging retroreflector, LRRR) 和 Apollo 月面服务包 (Apollo lunar surface experiment packages, ALSEP) 的绝对坐标 (King *et al.*, 1976; Schirmerman, 1976), 将这些控制网中的控制点坐标统一转换到了均地/极轴坐标系下,建立了统一的月球正面控制网,其坐标原点位于月球质心,月球质心由 LRRR 地基观测结果确定。DMA/603 的转换精度为 58 m (1σ), DMA/A15 的转换精度为 73 m (1σ), NOS/USGS 的转换精度为 76 m (1σ), 相对于原控制网中的 ALSEP 坐标, DMA/603 平均偏移了 308 m, DMA/A15 平均偏移了 333 m, NOS/USGS 平均偏移了 2110 m。

Davies 等 (1987) 实现 Apollo 控制网转换后,选取了 130 个在地基望远镜图像和 Apollo 图像上均能辨识的撞击坑作为两个控制网的连接条件,解算了望远镜控制网到平地球/极轴坐标系的转换参数,转换精度为 808 m (1σ), 控制点坐标转换后相对于转换前平均平移了 1352 m。采用相同的方法,解算了 Mariner 10 控制网到平地球/极轴坐标系的转换参数, Mariner 10 在月球北极地区扩展了 10 个控制点。

3.1.5 1994 年统一月球控制网 (ULCN1994)

1994 年的统一月球控制网是将早期的控制网数据整合起来构建的一个新控制网,由美国 RAND 公司和 USGS 联合完成。ULCN1994 共有 1478 个控制点, 1286 个为月球正面点和 192 个为月球背面点,采用均地/极轴坐标系,坐标原点是月球质心。ULCN1994 用到了 Apollo、Mariner 10、Galileo 和地基望远镜等 4 种数据源, 304 个控制点来自 Apollo 控制网,其位置在整合过程中固定不变, 911 个控制点来

自地基望远镜控制网,63 个控制点来自 Mariner 10 控制网,另外还在 Galileo 任务的图像上量取了 200 个点(Davies *et al.*,1994),使得月球背面也增加了控制点。ULCN1994 的平面位置精度大约为 100 ~ 3 km,高程精度约几公里,控制点主要集中分布在月球正面,月球背面只有少量几个点,没有提供这些控制点的月面影像信息,使用不便。

3.1.6 Clementine 控制网 (CLCN1997)

CLCN1997 月面控制网由 RAND 公司和 USGS 联合完成(Edwards *et al.*,1996;Malin and Revine,1998;Cook *et al.*,2000,2002)。该控制网利用 Clementine UVVIS 相机在 750 nm 波段上获取的 43871 幅图像,采用摄影测量的方法制作,共有 271643 个月面控制点。该控制网由于约束点选择(仅有 22 个点)、相机指向误差、采用半径为 1736.7 km 的月球模型等方面的原因,许多地方与 ULCN1994 控制网之间存在平均约 15 km 的水平误差。

3.1.7 2005 年统一月面控制网(ULCN2005) 为了解决 CLCN1997 控制网与 ULCN1994 之间的位置偏差,ArChinal 等(2005,2006b)对 Clementine UVVIS 相机获取的 43866 幅 750 nm 图像重新进行了摄影测量处理,同时联合处理了 Apollo 图像、地基望远镜图像、Mariner 10 图像和 Galileo 图像,建立了 ULCN2005 控制网,它是目前最完善、最大的行星大地控制网。ULCN2005 共有 272931 个控制点,包括平面和高程控制信息,也提供了与控制点相关的图像信息,平面位置精度为 100 m 至几千米,高程精度为几百米,在全球范围内具有较好的一致性。

3.1.8 激光反射器月球控制网 1969 年 7 月 16 日 Apollo11 成功发射,美国宇航员 Neil Armsfrong 在月面上安放了第一块月面激光发射器(Apollo 11 Mission Report)。随后,美国的 Apoll 14、Apoll 15、苏联 Luna 17 和 Luna 21 等在月面上安放了激光反射器,这 5 个激光反射器在月面上的位置见表 6。

表 6 5 个月面激光反射器的位置
Table 6 Position of Five Lunar Ranging Retroreflectors

激光 反射器	安放 时间	月面经度 /(°)	月面纬度 /(°)	月心距 /km
Apollo11	美国,1969.07.21	23.473073	0.673440	1735.472732
Apollo14	美国,1971.04.05	-17.478648	-3.644170	1736.336135
Apollo15	美国,1971.07.31	3.628507	26.133396	1735.477340
Luna 17	苏联,1970.11.17	38.315158	-35.007964	1734.928720
Luna 21	苏联,1973.01.15	30.922149	25.832307	1734.63900.9

激光测月(LLR)技术正式投入观测是 1969 年,

当时只有美国的麦克唐纳(McDonald)天文台进行地月距离观测,随着观测设备的不断更新和完善,美国的 Haleakala、APO(Apache Point Observatory),法国的 CERGA 等天文台,也进行了地月距离观测,测量精度从 20 世纪 70 年代的 10 cm 提高到 90 年代的 3 cm(黄乘利等,1996;Murphy *et al.*,2008)。利用这些测量数据,并通过美国 LRO 卫星 0.5 m 分辨率影像识别出安放激光反射器的位置,获得了在月面的高精度位置,位置精度达到了米级(Williams *et al.*,1996;Williams,2004;Murphy *et al.*,2008;Williams *et al.*,2008)。早年没有 Luna 17 的观测数据,2011 年 Murphy 等根据 LRO 图像找到了 Luna 17 的月面位置,并进行了激光测距观测,获得了其位置数据(Murphy *et al.*,2011)。这 5 个激光反射器的月面位置构成了激光反射器月球大地控制网,是目前位置精度最高的月球控制网。

从月球控制网的发展分析,可以看出:

(1)早期月球控制网,诸如 Apollo 月球控制网、地基望远镜月球控制网、Mariner 10 月球控制网、统一月球正面控制网等,控制点数量稀少且主要分布在月球正面,控制网整体定位精度不高;

(2)ULCN1994 控制网整合了早期月球控制网,其控制点分布不均且主要分布在月球正面,月球背面仅有少量点,其整体精度不高且存在明显的局部差异,配套的影像信息难以获取,使用不便;

(3)ULCN2005 是近年最新的月球控制网,是公开发表的目前最完善、最大的控制网;ULCN2005 平面位置精度为 100 m 至几千米,高程精度为几百米;

(4)激光反射器月球控制网是目前精度最好的控制网,月面位置精度可以达到米级,可被用作控制网建设过程中所需的绝对位置数据;

(5)目前存在的全月图,诸如 Clementine 2.0 版全月镶嵌图、CE-1 全月正射影像图、CE-2 全月镶嵌图、SELENE 全月镶嵌图和 LRO 全月镶嵌图,均可作为基础影像库使用,但是这些数据在空间位置上的不一致性,需要统一和标准化,迫切需要构建控制点更密集、精度更好的月面控制网。

3.2 CE-3 月面控制点

2013 年 12 月 14 日 21 时 11 分,嫦娥三号(CE-3)探测器成功着陆在月球表面,CE-3 着陆器作为一个人类在月球上的永久标志,地球上不断对其地理位置进行观测,测定 CE-3 号着陆器位置,使其成为一个月面控制点具有重要的意义。

2014 年 Wang 等(2014)利用 CE-3 降落相机下

降过程中获取的影像序列及 CE-2 卫星影像,采用影像自动匹配的方法建立降落相机序列影像间的转换关系,计算了着陆器在卫星影像底图中的地理位置;然后,通过影像几何配准确定了着陆器在 CE-2 号 1.5 m 原始影像上的位置,进而确定其在 CE-2 号 7 m 和 CE-1 号 120 m 分辨率影像上的位置;给出了着陆器在月面的地理位置和其他的属性数据,构建了一个新的月面控制点,包括:①控制点的地理位置信息 19.5124°W, 44.1196°N, 高程 -2638.5 m;②描述地理坐标的辅助信息,包括采用的坐标系、椭圆参数和位置精度等;③描述控制点图像数据的辅助信息,如图像宽高、图像分辨率、控制点影像数据在 CE-1、CE-2 号原始卫星影像上的轨道号和行列号位置,以及影像获取时间等。

CE-3 号着陆点成为一个新的高精度月面控制点后,该位置与已有高精度控制点构成了一个新的月球控制网,它成为了地理位置最北端的高精度月面控制点,有效的扩大了目前高精度月面控制网的控制范围,控制面积从约 123 万 km² 增加到约 150 万 km²,增加了 22%。结合已有的全月球高分辨率影像,以高精度控制网为控制基准,采用摄影测量方法来加密高精度月面控制网,建立新的覆盖全月球的高精度月面统一控制网。这不仅能为高精度月球制图提供有效的控制,也能为月球大地测量方面的研究与应用提供基准,具有非常重要的意义。

4 展望

综上所述,月球光学遥感和制图研究取得了重要进展。目前月球研究热点和主要科学问题,如月表年轻的地质和构造活动、年代学研究、撞击模型研究、月球重力场、月球形成与演化研究,都迫切需要利用高分辨率影像和大比例尺月球地形图开展工作,对数据质量、精度、一致性、使用便捷等方面提出了更高的要求。未来以下 5 个方面需要继续关注。

(1) 优化卫星轨道和姿态,研究高精度传感器在轨几何标定技术,推动立体测绘无月面控制点的高精度摄影测量能力;

(2) 多源遥感影像复合式立体测图和定位是发展趋势之一,利用不同传感器获取的影像构成复合式立体像对进行定位,来代替传统的单类型传感器立体定位技术;

(3) 将月球地形地貌测量和月球重力场测量结合起来进行研究,利用月球重力场的最新探测成果,建立月球坐标系的空间定位框架,精确定义月

面海拔高程的起算参考面(基准面),提高月球三维数字化的精度;

(4) 进一步开展月球控制网和基础影像库的建设,目前现有的月球控制网和基础影像库在空间位置上存在明显的不一致性和较大的绝对误差,没有真正起到“位置基准”的作用。近年来高精度月面遥感制图、月面软着陆与巡视勘察、月球采样返回和建立月球永久性基地等探测任务,月球科学综合研究,对月面空间位置的定位精度和一致性要求越来越高,需要建立高精度月球控制网和多尺度的月面基础影像库,以满足不同的应用和研究需求;

(5) 开展月球光学遥感与制图相关标准规范的制定,建立数字月球,实现月球信息的数字化和数据共享。

参考文献 (References):

- Araki H, Tazawa S, Noda H, Ishihara Y, Goossens S, Sasaki S, Kawano N, Kamiya I, Otake H, Oberst J. 2009. Lunar global shape and polar topography derived from Kaguya-LALT laser altimetry. *Science*, 323(5916): 897-900
- ArChinal B A, Rosiek M R, Redding B. 2005. Unified Lunar Control Network 2005 and topographic model. *Lunar and Planetary Science Conference XXXVI*, Lunar and Planetary Institute, Houston, abstract No: 2106
- ArChinal B A, Rosiek M R, Kirk R L, Redding B L. 2006a. The unified lunar control network 2005. <http://pubs.usgs.gov/of/2006/1367/>, U.S. Geological Survey Open-File Report 2006-1367
- ArChinal B A, Rosiek M R, Kirk R L, Redding B. 2006b. Completion of the Unified Lunar Control Network 2005 and topographic model. *Lunar and Planetary Science Conference XXXVII*, Lunar and Planetary Institute, Houston, abstract No. 2310
- Barabashov N P, Milkhallov A A, Lipskii I N. 1960. *Atlas obratnoi storony Luny*. Moskva: Izd-vo Akademii nauk SSSR
- Becker T, Weller L, Gaddis L, Soltesz D, Cook D, Bennett A, Galuszka D, Redding B, Richie J. 2004. Progress on reviving lunar orbiter: Scanning, archiving, and cartographic processing at USGS. *Lunar and Planetary Science Conference XXXV*, Lunar and Planetary Institute, Houston, abstract No. 1791
- Bell D G, Kuehnel F, Maxwell C, Kim R, Kasraie K, Gaskins T, Hogan P, Coughlan J. 2007. NASA world wind: Opensource GIS for mission operations. In: *Aerospace Conference, 2007 IEEE*, paper #1048
- Bowker D E, Hughes J K. 1971. *Lunar orbiter photographic atlas of the moon*. Houston: Lunar and Planetary Institute
- Bowker D, Hughes K. 1971. *Lunar orbiter photographic atlas of the moon*. Langley Research Center
- Bussey B, Spudis P D. 2004. *The clementine atlas of the moon*. United Kingdom: Cambridge University Press
- Byrne C J. 2005. *Lunar orbiter photographic atlas of the near side of the moon*. Berlin: Springer

- Chin G, Brylow S, Foote M, Garvin J, Kasper J, Keller J, Litvak M, Mitrofanov I, Paige D, Raney K, Robinson M, Sanin A, Smith D, Spence H, Spudis P, Stern S A, Zuber M. 2007. Lunar reconnaissance orbiter overview: The instrument suite and mission. *Space Science Reviews*, 129: 391–419
- Cook A C, Watters T R, Robinson M S, Spudis P, Bussey D. 2000. Lunar polar topography derived from clementine stereo imagery. *Journal of Geophysical Research*, 105(E5): 12023–12033
- Cook A C, Robinson M S, Semenov B, Watters T. 2002. Preliminary analysis of the absolute cartographic accuracy of the clementine UVVIS mosaics. American Geophysical Union, Fall Meeting 2002, Abstract no. P22D–09
- Davies M E, Batson R M. 1975. Surface coordinates and cartography of Mercury. *Journal of Geophysical Research*, 80: 2417–2430
- Davies M E, Colvin T R, Meyer D L. 1987. A unified lunar control network: The Near Side. *Journal of Geophysical Research*, 92: 14177–14184
- Davies M E, Colvin T R, Meyer D L, Nelson S. 1994. The unified lunar control network: 1994 version. *Journal of Geophysical Research*, 99(E11): 23211–23214
- Defense Mapping Agency Aerospace Center. 1973. Development of the Apollo 15 Control Network
- Defense Mapping Agency Aerospace Center. 1975. Development of the Apollo 17 Control Network
- Defense Mapping Agency Aerospace Center. 1976. Development of the Apollo 16 Control Network
- Edwards K E, Colvin T R, Becker T L, Cook D, Davies M, Duxbury T, Eliason E, Lee E, McEwen A, Morgan H. 1996. Global digital mapping of the Moon. Lunar and Planetary Science Conference XXVII, Lunar and Planetary Institute, Houston, abstract No. 335
- Eliason E, Isbell C, Lee E, Becker T, Gaddis L, McEwen A, Robinson M. 1999. The clementine UVVIS global lunar mosaic. Houston: Lunar and Planetary Institute
- Eliason E, Isbell C, Lee E, Becker T, Gaddis L, McEwen A, Robinson M. 1999. The Clementine UVVIS Global Lunar Mosaic. http://www.lpi.usra.edu/lunar/tools/clementine/instructions/UVVIS_DIM_Info.html
- Foing B H, Racca G D, Marini A, Heather D, Koschny D, Grande M, Huvelin J, Keller H, Nathues A, Josset J. 2003. SMART-1 mission to the Moon: Technology and science goals. *Advances in Space Research*, 31(11): 2323–2333
- Foing B H, Racca G D, Marini A, Evrard E, Stagnaro L, Almeida M, Koschny D, Frew D, Zender J, Heather J. 2006. SMART-1 mission to the Moon: Status, first results and goals. *Advances in Space Research*, 37(1): 6–13
- Goswami J N, Annadurai M. 2008. Chandrayaan-1 mission to the Moon. *Acta Astronautica*, 63: 1215–1220
- Hare T M, ArChinal B A, Becker T, Gaddis L, Lee E, Redding B, Rosiek M. 2008. Clementine Mosaics Warped to ulen 2005 network. Lunar and Planetary Science Conference XXXIX, Lunar and Planetary Institute, Houston, abstract No: 2337
- Haruyama J, Matsunaga T, Ohtake M, Morota T, Honda C, Yokota Y, Torii M, Ogawa Y, Group L W. 2008a. Global lunar-surface mapping experiment using the Lunar Imager/Spectrometer on SELENE. *Earth Planets Space*, 60: 243–255
- Haruyama J, Ohtake M, Matsunaga T, Morota T, Yokota Y, Honda C, Hirata N, Demura H, Iwasaki A, Nakamura R. 2008b. Planned radiometrically calibrated and geometrically corrected products of lunar high-resolution Terrain Camera on Selene. *Advances in Space Research*, 42: 310–316
- Haruyama J, Ohtake M, Matsunaga T. 2014. Data products of Selene (Kaguya) terrain camera for future lunar missions. Lunar and Planetary Science Conference XXXV, Lunar and Planetary Institute, Houston, abstract no. 1304
- Heiken G H, Vaniman D T, French B M. 1991. *Lunar Sourcebook: A user's guide to the moon*, Cambridge University Press, ISBN: 0–521–33444–6
- Hoshino H, Yamamoto Y, Sobue S, Yonekura K, Ogawa M, Iwana Y, Matsui K, Okumura H, Kato M. 2010. Data processing at Kaguya operation and analysis Center. *Space Science Reviews*, 154(1–4): 317–342
- King R W, Counselman III C C, Shapiro I I. 1976. Lunar dynamics and selenodesy: Results from analysis of VLBI and laser data. *Journal of Geophysical Research*, 81: 6251–6256
- Lee E M, Gaddis L R, Weller L, Richie J, Becker T, Shinaman J, Rosiek M, ArChinal B. 2009. A new clementine basemap of the Moon. Lunar and Planetary Science Conference XXXX, Lunar and Planetary Institute, Houston, abstract no. 2445
- Li C L, Liu J J, Ren X, Mou L L, Zou Y L, Zhang H B, Lu C, Liu J Z, Zuo W, Su Y, Wen W B, Bian W, Zhao B C, Yang J F, Zou X D, Wang M, Xu C, Kong D Q, Wang X Q, Wang F, Geng L, Zhang Z B, Zheng L, Zhu X Y, Li J D, Ouyang Z Y. 2010a. The global image of the Moon obtained by the Chang'E-1: Data processing and Lunar cartography. *Science China-Earth Sciences*, 53(8): 1091–1102
- Li C L, Ren X, Liu J J, Zou X D, Mu L L, Wang J Y, Shu R, Zou Y L, Zhang H B, Lu C, Liu J Z, Zuo W, Su Y, Wen W B, Bian W, Wang M, Xu C, Kong D Q, Wang X Q, Wang F, Geng L, Zhang Z B, Zheng L, Zhu X Y, Li J D and Ouyang Z Y. 2010b. Laser altimetry data of Chang'E-1 and the global lunar DEM model. *Science China-Earth Sciences*, 53(11): 1582–1593
- Light D L. 1972. Photo geodesy from Apollo. *Photogrammetric engineering*, 38: 574–584
- Liu J J, Ren X, Mu L L, Zhao B C, Xiangli B, Yang J F, Zou Y L, Zhang H B, Lu C, Liu J Z, Zuo W, Su Y, Wen W B, Bian W, Zou X D, Li C L. 2009. Automatic DEM generation from CE-1's CCD Stereo Camera Images. Lunar and planetary science conference XXXX, Lunar and Planetary Institute, Houston, abstract no. 2570
- Malin M, Ravine M. 1998. Clementine high resolution camera mosaicking project. San Diego: Malin Space Science Systems
- McEwen A S, Robinson M S. 1997. Mapping of the moon by clementine. *Advances in Space Research*, 19(10): 1523–1533
- Meyer D L. 1979. Selenocentric Control System. St. Louis: Defense Mapping Agency Aerospace Center, DMA Technical Report 80–001
- Murphy T W, Adelberger E G, Battat J B R, Carey L N, Hoyle C D, LeBlanc P, Michelsen E L, Nordvedt K, Orin A E, Strasburg J D,

- Stubbs C W, Swanson H E, Williams E. 2008. The apache point observatory lunar laser-ranging operation; Instrument description and first detections. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 120(863): 20–37
- Murphy T W, Adelberger E G, Battat J B R, Hoyle C, Johnson N, McMillan R, Michelsen E, Stubbs C, Swanson H. 2011. Laser ranging to the lost Lunokhod 1 reflector. *Icarus*, 211(2): 1103–1108
- Nozette S. 1995. The clementine mission: Past, present, and future. *Acta Astronautica*, 35(suppl.): 161–169
- Ouyang Z Y, Li C L, Zou Y L, Zhang H B, Lu C, Liu J Z, Liu J J, Zuo W, Su Y, Wen W B, Bian W, Zhao B C, Wang J Y, Yang J F, Chang J, Wang H Y, Zhang X H, Wang S J, Wang M, Ren X, Mu L L, Kong D Q, Wang X Q, Wang F, Geng L, Zhang Z B, Zheng L, Zhu X Y, Zheng Y C, Li J D, Zou X D, Xu C, Shi S B, Gao Y F and Gao G N. 2010. The primary science result from the Chang'E-1 probe. *Science China-Earth Sciences*, 53(11): 1565–1581
- Ren X, Liu J J, Wang F F, Wang W R, Mu L L, Li H H and Li C L. 2014. A new lunar global topographic map products from Chang'E-2 stereo camera image data. *European Planetary Science Congress*, Vol. 9, EPSC2014–344
- Rosiek M R, Kirk R, Howington-Kraus E. 2002. Color-coded topography and shaded relief maps of the lunar hemispheres. *Lunar and Planetary Science Conference XXXIII*, Lunar and Planetary Institute, Houston, abstract no.1792
- Sasaki S, Iijima Y, Tanaka K, Kato M, Hashimoto M, Mizutani H, Takizawa Y. 2003. The Selene mission: Goals and status, *Advances in Space Research*, 31(11): 2335–2340
- Schirmer L A. 1976. The expanding apollo control system. St. Louis: Defense Mapping Agency Aerospace Center
- Sherman S, Wu C. 1985. Topographic mapping of the Moon. *Earth, Moon, and Planets*, 32(2): 165–172
- Smith D E, Zuber M T, Neumann G A, Lemoine F G. 1997. Topography of the Moon from the Clementine lidar. *Journal of Geophysical Research*, 102(E1): 1591–1611
- Speyerer E J, Robinson M S, Denevi B W. 2011. Lunar Reconnaissance Orbiter camera global morphological map of the moon. *EPSC-DPS Joint Meeting 2011*, Nantes
- Stooke P J. 2007. The international atlas of lunar exploration. UK: Cambridge University Press
- Wang F F, Liu J J, Li C L, Ren X, Mu L L, Yan W, Wang W R, Xiao J T, Tan X, Zhang X X, Zou X D, Gao X Y. 2014. A new lunar absolute control point: Established by the landing camera images of Chang'E-3. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 14(12): 1543–1556
- Weller L, Redding B, Becker T, Gaddis L, Sucharski R, Soltesz D, Cook D, ArChinal B, Bennett A, McDaniel T. 2006. Lunar orbiter revived: Very high resolution views of the Moon. *Lunar and Planetary Science XXXVII*, Lunar and Planetary Institute, Houston, abstract no. 2143
- Weller L, Becker T, ArChinal B, Bennett A, Cook D, Gaddis L, Galsuska D, Kirk R, Redding B, Soltesz D. 2007. USGS lunar orbiter digitization project: Updates and status. *Lunar and Planetary Science XXXVIII*, Lunar and Planetary Institute, Houston, abstract no.2092
- Williams J G, Newhall X X, Dickey J O. 1996. Lunar moments tides, orientation, and coordinate frames. *Planetary and Space Science*, 44(10): 1077–1080
- Williams J G. 2004. Lunar laser ranging science: Gravitational physics and lunar interior and geodesy. 35th COSPAR Scientific Assembly, Paris, France
- Williams J G, Boggs D H, Folkner W M. 2008. DE421 Lunar Orbit, Physical librations, and surface coordinates. In: 16th International Workshop on Laser Ranging, Poznań
- Zhao B C, Yang J F, Wen D S, Gao W, Chang L Y, Song Z X, Xue B, Zhao W. 2011. Overall scheme and on-orbit images of Chang'E-2 lunar satellite CCD stereo camera. *Science China-Technological Sciences*, 54: 2237–2242
- Zuo W, Li C L, Zhang Z B. 2014. Scientific data and their release of Chang'E-1 and Chang'E-2. *Chinese Journal of Geochemistry*, 33(1): 24–44
- 陈俊勇. 2004. 月球地形测绘和月球大地测量(1). *测绘学报*, 29(2): 1–5
- 葛之江, 殷礼明, 林宗坚. 2005. 月球遥感立体测绘技术的发展. *航天返回与遥感*, 26(2): 11–21
- 黄乘利, 金文敬, 许华冠. 1996. 激光测月中的地球和月球参考架. *中国科学院上海天文台年刊*, 17: 169–175
- 李春来, 刘建军, 牟伶俐, 任鑫. 2010. 嫦娥一号全月球影像图集. 北京: 中国地图出版社
- 李春来, 刘建军, 牟伶俐, 左维, 任鑫. 2012. 嫦娥二号高分辨率月球影像图集. 北京: 中国地图出版社
- 李春来. 2013. 嫦娥一号三线阵 CCD 数据摄影测量处理及全月球数字地形图. *测绘科学*, 42(6): 853–860
- 李春来, 刘建军, 牟伶俐, 任鑫, 左维. 2013. 嫦娥一号全月球地形图集. 北京: 中国地图出版社
- 刘建军, 任鑫, 谭旭, 李春来. 2013. 嫦娥二号 CCD 立体相机数据预处理与数据质量评价. *武汉大学学报*, 38(2): 186–190
- 欧阳自远. 2005. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社
- 夏金超, 任鑫, 刘建军, 牟伶俐, 李春来. 2012. 月面高精度控制点在嫦娥一号和嫦娥二号原始影像上的定位. *吉林大学学报*, 42(S2): 460–468
- 赵葆常, 杨建峰, 汶德胜, 高伟, 阮萍, 贺应红. 2009. 嫦娥一号卫星 CCD 立体相机的设计与在轨运行. *航天器工程*, 18(1): 30–36

(本文责任编辑: 龚超颖)