中国科学: 地球科学 2010 年 第 40 卷 第 3 期: 294 ~ 306
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

嫦娥一号图像数据处理与全月球影像制图

李春来[①*], 刘建军[①], 任鑫[①], 牟伶俐[①], 邹永廖[①], 张洪波[①], 吕昌[①], 刘建忠[①], 左维[①], 苏彦[①], 温卫斌[①], 边伟[①], 赵葆常[②], 杨建峰[②], 邹小端[①], 汪敏[①], 许春[①], 孔德庆[①], 王晓倩[①], 王芳[①], 耿良[①], 张舟斌[①], 郑磊[①], 朱新颖[①], 李俊铎[①], 欧阳自远[①]

① 中国科学院国家天文台, 北京 100012;
② 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119
* E-mail: licl@nao.cas.cn

收稿日期: 2009-06-15; 接受日期: 2009-10-09
国家重大专项"绕月探测工程"和国家高技术研究发展计划(编号: 2008AA12A211, 2008AA12A212, 2008AA12A213)资助

摘要 "中国首次月球探测工程全月球影像图"是我国第一幅覆盖月球的遥感影像图, 将成为嫦娥工程后期探测和月球科学研究的重要基础图件. 详细介绍了嫦娥一号 CCD 图像数据的获取、数据特点和数据质量, 描述了图像数据的处理方法和流程, 按制图规范对图像数据进行了镶嵌拼接和处理, 制作了覆盖全月球的 1∶250 万比例尺影像图, 并进行了影像图的定位精度分析. 数据处理和制图结果表明, 嫦娥一号 CCD 数据及其定位精度能够满足 1∶250 万比例尺的制图要求, 制作的"中国首次月球探测工程全月球影像图", 其相对定位精度优于 240 m, 平面定位精度约为 100 m~1.5 km, 定位精度略好于 2005 联合控制网(ULCN2005)和克莱门汀基础地图(2.0 版); 对所有像元进行了逐一光度校正, 大大改善了全球图像的一致性, 是目前覆盖最全、图像质量最好、定位精度最高的全月球影像图.

关键词
嫦娥一号
月球 CCD 数据处理
月球图像定位
全月球影像图

从 20 世纪 50 年代开始, 人类开展了大量无人和载人的月球探测活动. 为了满足人们对月球未知地区的认识, 以及对不太熟悉的月球已有知识的汇总, 月球地图和地图集编制工作一直是月球探测和科学研究最重要的内容之一.

1960 年, 前苏联利用 Luna 3 飞行器获取的数据, 出版了月球背面地图集 *Atlas Obratnoi Storony Luny*[1], 其中共包含了 28 张月球相片. 1969 年 Lewis[2]制作了月球正面(不包括天平动区域)的月球地图集 *The Times Atlas of the Moon*, 图集将月球正面划分为 110 个区域, 囊括了几乎所有月球制图和 Apollo 11 第一次载人登月的内容. 1971 年 Bowker 和 Hughes[3]利用 Lunar Orbiter 获取的约 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, 成为月球科学研究者的重要参考著作.

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 个谱段获

引用格式: Li C L, Liu J J, Ren X, et al. The global image of the moon by the Chang'E-1: Data processing and lunar cartography. Sci China Earth Sci, 2010, doi: 10.1007/s11430-010-0053-8

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[4]. 1999 年, Eliason 等[5]利用 Clementine 750 nm 谱段的影像数据, 制作了月球基本地图(UVVIS 750 nm Basemap). 2002 年, Rosiek 等[6]集成了 Clementine 月球彩色编码地形图、晕渲地貌图和月名图, 制作了一组 1∶1000 万比例尺的 Clementine 彩色编码晕渲图(Clementine Color-Coded Shaded Relief Map), 其中, 地形数据来源于 Clementine 激光高度计(覆盖月面 79°S~81°N)[7], 影像数据来源于 Clementine UVVIS 相机. 2004 年, Bussey 和 Spudis[4]编制了 *The Clementine Atlas of the Moon*, 图集数据主要来源于 Clementine 探测任务, 还包括一部分 Lunar Prospector 获取的数据信息. 2005 年月球统一控制网(the Unified Lunar Control Network 2005, ULCN 2005)[8]的建立为月球制图提供了一个统一的基础. 在此基础上, Hare 等[9]和 Lee 等[10]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; Becker 和 Weller 等[11~13]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*; Byrne[14]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*. 2007 年, Phillip[15]根据 Luna 9 编制了 *The International Atlas of Lunar Exploration*. 随着地理信息系统的发展, 也出现了电子和基于网络的月球地图集, 如 Map-A-Planet (http://www.map-aplanet.org), NASA World Wind lunar map (http://worldwind.arc.nasa.gov), WebGis (http://webgis.wr.usgs.gov/website/maplicity_moon_gen_ie.html), Virtual Moon Atlas, 和 Google Moon 等(http://www. google.com/moon).

综上所述, 现有月球地图和图集的数据主要来源于 20 世纪 50~70 年代前苏联和美国发射的 Luna, Lunar Orbiter, Apollo 系列月球探测器, 以及 1994 年美国发射的 Clementine 探测器, 数据来源、图像质量、空间分辨率和定位精度都存在较大差异, 数据覆盖范围也有限, 除了 Clementine 影像数据(图像数据覆盖月表 99%范围)之外的探测数据都无法实现全月覆盖. 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.

21 世纪伊始, 月球探测进入了又一个活跃期, 各航天大国(组织)开始了以重返月球为目标的新的探月行动, 已经发射的月球探测器包括欧盟的 SMART-1、日本的 Selene (Kaguya)、中国的嫦娥一号和印度的 Chandrayaan-1, 正在研制中的探测器包括中国的"嫦娥"系列、美国的 LRO、日本的 Selene2、俄罗斯的 Luna Glob、英国的 MoonLITE 和 Google 资助的 Google Lunar X-Prize 等. 这些探月计划在测量数据的覆盖范围和分辨率方面较历史数据均有较大的改善, 对月球制图学影响深远.

2007 年 10 月 24 日我国的第一个月球探测嫦娥一号(CE-1)在西昌卫星发射中心成功发射, 11 月 5 日嫦娥一号被月球重力场捕获, 成功进入环绕月球的轨道, 11 月 20 日 16∶49∶00∶222, 三线阵 CCD 立体相机开机, 成功获取了我国的第一轨月表图像. 截至 2008 年 5 月 12 日, CE-1 探测器的 CCD 立体相机成功获取了月球南北纬 70°范围内的影像数据, 完成了工程任务的要求, 之后, 进一步进行了月球南北极图像数据的获取试验, 并于 2008 年 7 月 1 日, 成功完成了全月球数据的获取工作.

本文介绍嫦娥一号全月球影像图的数据源、处理方法和制图, 并对全月影像图的定位精度进行了分析.

1 数据源

用于制作全月球遥感影像图的数据源, 全部是来自于搭载在 CE-1 探测器上的三线阵 CCD 立体相机获取的图像数据, 同时还用到了卫星轨道、姿态测量和 CE-1 激光高度计测高数据等辅助数据.

1.1 成像原理和相机参数

嫦娥一号搭载光学传感器是一台三线阵 CCD 推扫相机, 实际上是在一个大面阵 CCD 探测器上, 分别读取垂直于飞行方向上的第 11 行、第 512 行和第 1013 行, 分别作为前视、正视和后视的影像阵列, 每行线阵的像元数为 512 列, 前视、正视和后视相邻之间视角差均为 16.7°. 根据探测器预定的在轨飞行参数, 相机的扫描速度设为 11.89 f/s, 以保证探测器在 200 km 高的轨道上三条线阵的扫描, 能够分别获得前、正、后三个视角的连续图像数据(图 1). 三线阵 CCD 立体相机的主要技术和性能指标见表 1.

1.2 CCD图像数据

嫦娥一号运行在距月面约 200 km 高的圆轨道上,

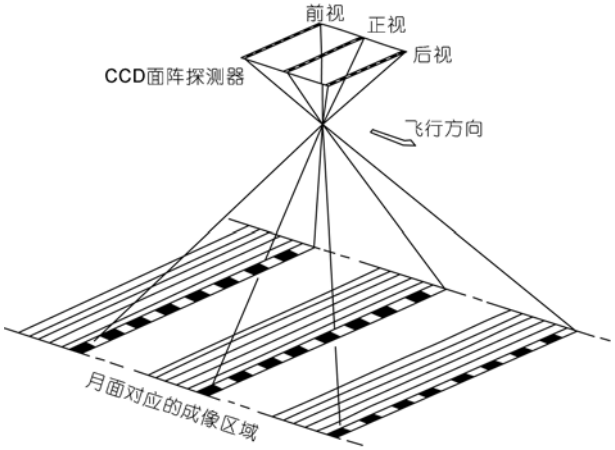


图 1　CCD 立体相机成像过程示意图

表 1　CCD 相机的主要技术和性能指标

名称	指标
帧频(帧/s)	11.89
光谱范围(μm)	0.5~0.75
量化等级	8 bit
相机焦距(mm)	23.33
相对孔径	F/5
曝光时间(ms)	3.2, 7, 20, 84
MTF	≥0.2
S/N(ρ=0.2, θ=60°)	≥100
成像宽度 L(km)	60
像元空间分辨率(星下点)	120 m
线阵像元数	512
像元尺寸	14 μm ×14 μm
线阵数	3
线阵间夹角	16.7°
基高比	≥0.6

倾角约为 90°左右, 轨间距约 35 km, 因此其覆盖周期约为 28 个地球天, 理论上用一个覆盖周期即可完成全月球 CCD 数据的完全覆盖. 但在探测器实际运行中, 由于轨道姿态的调整、成像条件的限制和出现单粒子锁定现象等原因, 相机在 2007 年 11 月 20 日开机后, 直至 2008 年 5 月 12 日才完成了南北纬 70°范围内的数据获取; 到 2008 年 7 月 1 日, 补充拍摄了南北极区的图像, 从而实现了全月球 CCD 图像数据的完全覆盖.

CE-1 探测器 CCD 相机的曝光时间, 在纬度为 45°~90°N, 45°~90°S 时采用 7 ms, 其他采用 3 ms, 增益均采用 1 档. 整体上, CCD 图像清晰、层次丰富, 月表地物界限明显, 但受到太阳入射角度和地形的共同影响, 部分撞击坑边缘有时会出现饱和现象.

通过与已有月表形貌数据的比较和分析, 嫦娥一号 CCD 立体相机图像数据, 信噪比 *S/N* 约为 100(太阳高度 θ=60°及月表反射比 ρ=0.2 时), 像素空间分辨率约为 120 m, 幅宽约为 60 km, 数值的偏差和波动与地形起伏、轨道、姿态以及月表测量对象的精度有关.

嫦娥一号在其寿命期间共获得南北纬 70°以内数据 508 轨, 极区数据 589 轨. 为处理和制作全月球影像图, 本文选用了 589 轨 CCD 相机数据, 其中南北纬 70°范围 313 轨, 南北极区 70°~90°范围 276 轨数据.

1.3　轨道和姿态数据及其特点

CE-1 环月轨道和姿态的设计参数如表 2. CE-1 轨道和姿态测量数据是地面应用系统处理探测数据用到的主要辅助参数, 其精度直接影响到科学探测数据的精度和应用水平. 为了了解探测器的环月期间的真实情况, 我们对事后精密星历和对月姿态测量数据进行了分析, 结果表明其测量精度均满足设计要求.

(1) 探测器在轨运行期间轨道数据的分析. 利用测控系统提供的事后精密星历数据, 分析了探测器轨道高度、轨道倾角、轨道偏心率参数随时间的变化情况.

统计分析表明, 嫦娥一号实际轨道高度动态范围在 195.53~202.07 km 之间, 平均轨道高度为 197.19 km; 轨道偏心率的动态范围在 0.00017~0.012293 之间, 平均为 0.006349; 轨道倾角动态范围在 87.6°~90.0°之间, 平均为 88.20°.

(2) 探测器在轨运行期间姿态数据的分析. 为了全面了解 CE-1 探测器的姿态及其稳定度, 分析了

表 2　CE-1 环月轨道和姿态的设计指标

CE-1 轨道参数	标称值
轨道高度(km)	195.464±25
倾角	90°±5°
偏心率	0
周期(min)	127.164
姿态控制精度(三轴)	优于±1°(3σ)
姿态稳定度(三轴)	优于 0.01°/s(3σ)

424 万个姿态测量数据, 包括轨道坐标系下的 3 个欧拉角(滚动角、俯仰角、偏航角)绝对值的大小和姿态变化率. 分析表明探测器姿态相对稳定, 姿态测量值 95%以上小于 0.03°, 对月姿态角测量值的标准差小于 0.02°; 姿态变化率 96%以上小于 0.0016°/s, 在轨道坐标系下偏航角与滚动角稳定度优于 0.003°/s (3σ), 俯仰角的稳定度优于 0.008°/s(3σ). 探测器平台稳定的姿态, 为获取高质量的图像数据提供了有利条件.

1.4　月表激光测距数据

月面地形起伏是影响图像数据月面定位精度的主要因素之一, 为了提高定位精度, 在全月球制图中, 引入了 CE-1 激光高度计获取的测距数据, 对图像数据进行月表高程修正, 以提高像元的空间定位精度.

本文采用 CE-1 在 2007 年 11 月 27 日到 2008 年 1 月 16 日期间获取的 300 多万个测距数据, 经系统校正、几何定位和高程解算、高程数据滤波后、插值制作了数字高程模型(DEM 模型), 其全球空间分辨率约为 7 km(图 2).

2　数据处理

在嫦娥一号探测器在轨运行时, 立体相机获取的 CCD 原始图像数据在星上被打包成遥测源包, 通过虚拟信道组帧, 进行 RS 编码、加扰码、加同步码后, 形成完整的传输帧发送给地面接收天线.

地面站接收到 CE-1 信号后, 其处理过程实际上是星上数据/信号处理的逆过程, 主要经历信号和基带数据处理、信道处理、辐射校正、几何校正和光度校正, 生成二级数据产品, 用于图像镶嵌和制图.

首先进行基带数据和信道处理. 嫦娥一号采用 S 波段进行数据传输, 地面接收天线收集到 S 波段信号后, 需变频为 70 MHz 中频信号, 进入地面站基带处理系统. 基带接收机对探测器信号进行同步、解扰码和译码后, 生成原始数据. 两个地面站的原始数据需要进行排序、优选和拼接, 通过解包后得到探测仪器获得的有效科学数据, 用于进一步的数据预处理.

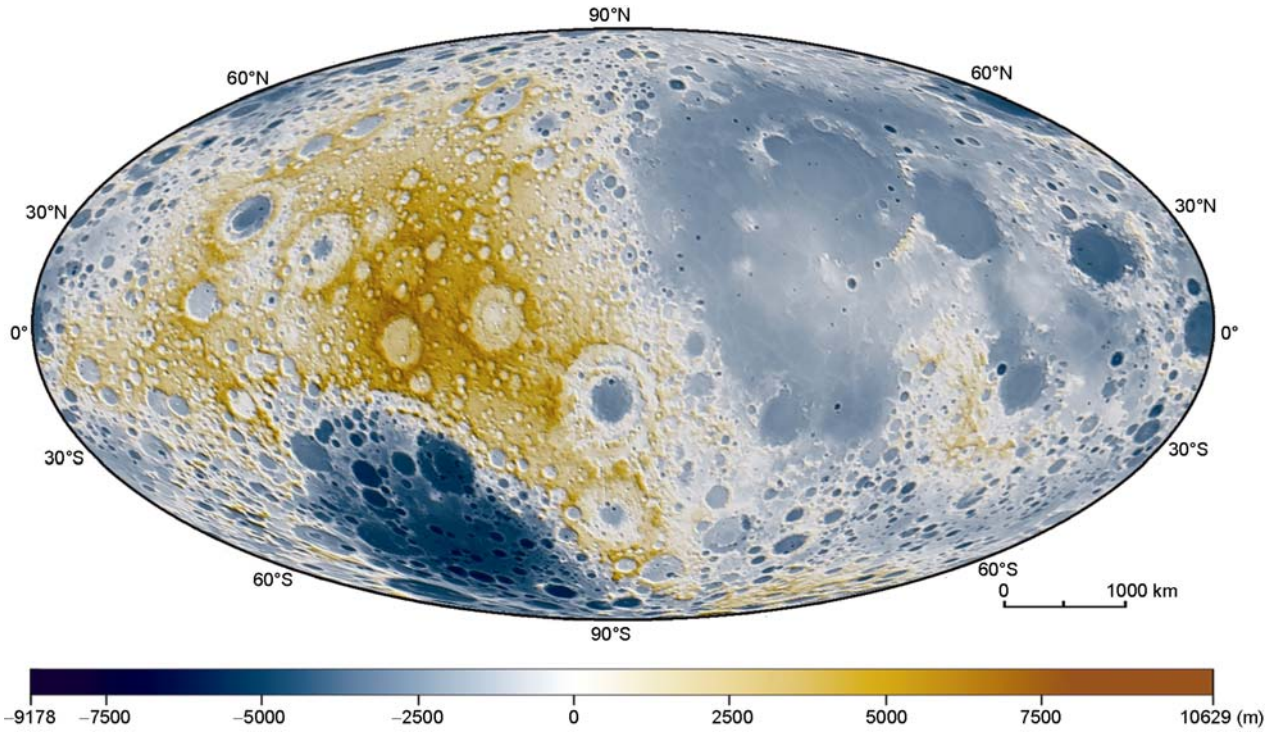


图 2　利用 CE-1 激光高度计探测数据制作的全月面 DEM 模型

原始探测数据获取于 2007 年 11 月 27 日到 2008 年 1 月 16 日, 共约 300 万个探测数据, 覆盖 180°W~180°E, 90°N~90°S 之间的范围; 投影方式采用摩尔维德等面积伪圆柱投影, 中央经线采用 270°W, 左半部为月球背面, 右半部为月球正面; 高程参考面采用半径为 1737.4 km 的月球正球体表面, 参考原点为月球质量中心, 空间分辨率为 7 km

然后进行辐射校正. 由于月球表面没有大气, 因此嫦娥一号 CCD 图像数据的辐射校正主要是利用地面定标的结果进行传感器辐射校正, 包括暗电流校正、相对定标、绝对定标、曝光时间归一化等内容.

以下重点说明几何校正和光度校正.

2.1 几何校正

系统几何校正是在辐射校正的基础上, 利用嫦娥一号的轨道、姿态数据和立体相机参数, 同时考虑月球自转、形状以及各坐标系之间的转换, 计算 CCD 像元点对应的月面位置, 建立输入图像到输出图像的变换关系, 并纠正图像的几何畸变. 几何校正工作主要包括像素点坐标解算和 DEM 修正.

2.1.1 月面坐标解算

因为 CE-1 相机的每一条 CCD 线阵上像素之间的相对位置具有严格的数学关系, 因此为了节省计算资源, 在建立几何定位模型后, 解算像元点对应的月面几何定位信息时, 我们只对图像中一定量的基准点进行精确计算, 其他像元点的位置信息则根据这些基准点进行插值处理.

基准点的密度是根据插值像元点的定位精度来逐级加密控制的, 我们分析了 512 像元×512 像元(每行 2 个基准点)、256 像元×256 像元(每行 3 个基准点)和 128 像元×128 像元(每行 5 个基准点)三种基准点分布格网对图像数据重采样和月面投影处理后几何位置的控制精度. 分析结果表明, 采用 128 像元×128 像元的定位格网密度设置时, 位置控制精度的标准差优于 0.1 个像元, 能够满足定位精度的要求, 每轨影像需要的基准点个数大约为 1300 个, 即保证了重采样后图像数据几何位置的定位精度, 又能保证图像数据处理的效率.

2.1.2 使用激光测距数据对几何校正结果进行修正

月面地形起伏是影响图像数据月面定位精度的主要因素之一, 为了提高定位精度, 在全月球制图中, 我们引入了 CE-1 激光高度计获取的 DEM 数据, 对图像数据进行月表高程修正, 以提高像元的空间定位精度. 由于没有高精度的月面参考点, 根据 CE-1 轨道、姿态实际状态和相机的成像条件, 图 3 计算分析了地形变化对月球影像定位结果的影响, 比较了引入 DEM 和没有引入 DEM 数据情况下, CCD 立体相机图像数据几何定位的结果.

从图 3 可以看出, 几何定位中引入 DEM 进行几何修正后, 定位精度有了显著的提高, 前视线阵定位精度标准差从 923.14 m 提高到 329.32 m, 正视线阵从 447.1 m 提高到 211.6 m, 后视线阵从 872.97 m 提高到 295.96 m, 前视与后视线阵定位精度大约提高了 3 倍, 正视线阵定位精度提高了 2 倍左右.

2.2 光度校正

光度校正是校正由于太阳距离、太阳入射角、出射角和相位角等参数不同而引起的目标物辐射亮度的变化. 嫦娥一号的光学成像探测数据都统一被归一到太阳入射角 i=30°、出射角 e=0°和太阳相角=30°情形下的太阳辐亮度数值.

月球表面反射的太阳辐亮度 $I(i, e, \alpha)$与光照几何参数(入射角 i、出射角 e 和太阳相角α)和表面物质的性质(矿物成分、月壤颗粒形状和大小、月壤致密度、表面崎岖程度等)有关. 行星科学中常用的光学校正模型主要包括 Lommel-Seelinger 模型、Hapke 模型、Helfenstein 模型、McEwen 模型以及它们的衍生模型, 它们之间的不同点主要在于对介质中多重散射和零相角附近相反效应的处理方式. 通过比较和试验, 我们在光度校正模型上, 采用了与美国 Clementine 数据处理中相同的光度校正模型——Lommel-Seeliger 模型, 其计算公式和和参数如下:

$$Cphot(i,e,\alpha)=\frac{\frac{f(30)\times\cos 30}{1.0+\cos 30}}{\frac{f(\alpha)\times\cos i}{\cos e+\cos i}}=\frac{0.25366}{\frac{f(\alpha)\times\cos i}{\cos e+\cos i}}, \quad (1)$$

其中, i 为太阳入射角, e 为出射角, α为相位角, 相位函数 $f(\alpha)=a+b\alpha+c\alpha^2+d\alpha^3+e\alpha^4$(其中, a = 0.988; b= -2.101×10^{-2}; c=2.527×10^{-4}; d=-1.530×10^{-6}; e= 3.367×10^{-9}).

Clementine 图像数据处理时, 每幅影像只采用了一组光度校正参数. 在处理 CE-1 图像数据时, 考虑光度校正处理的效率, 在开始时也只对每一行数据(512 个像元)用一个参数进行校正处理, 结果在镶嵌后出现有规律的明暗条纹. 为得到高质量的全月球图像, 根据轨道、姿态数据和月球星历、太阳星历数据, 对每一行每一个像元都使用独立的光度校正参数进行了逐一校正, 大大提高了图像质量(图 4).

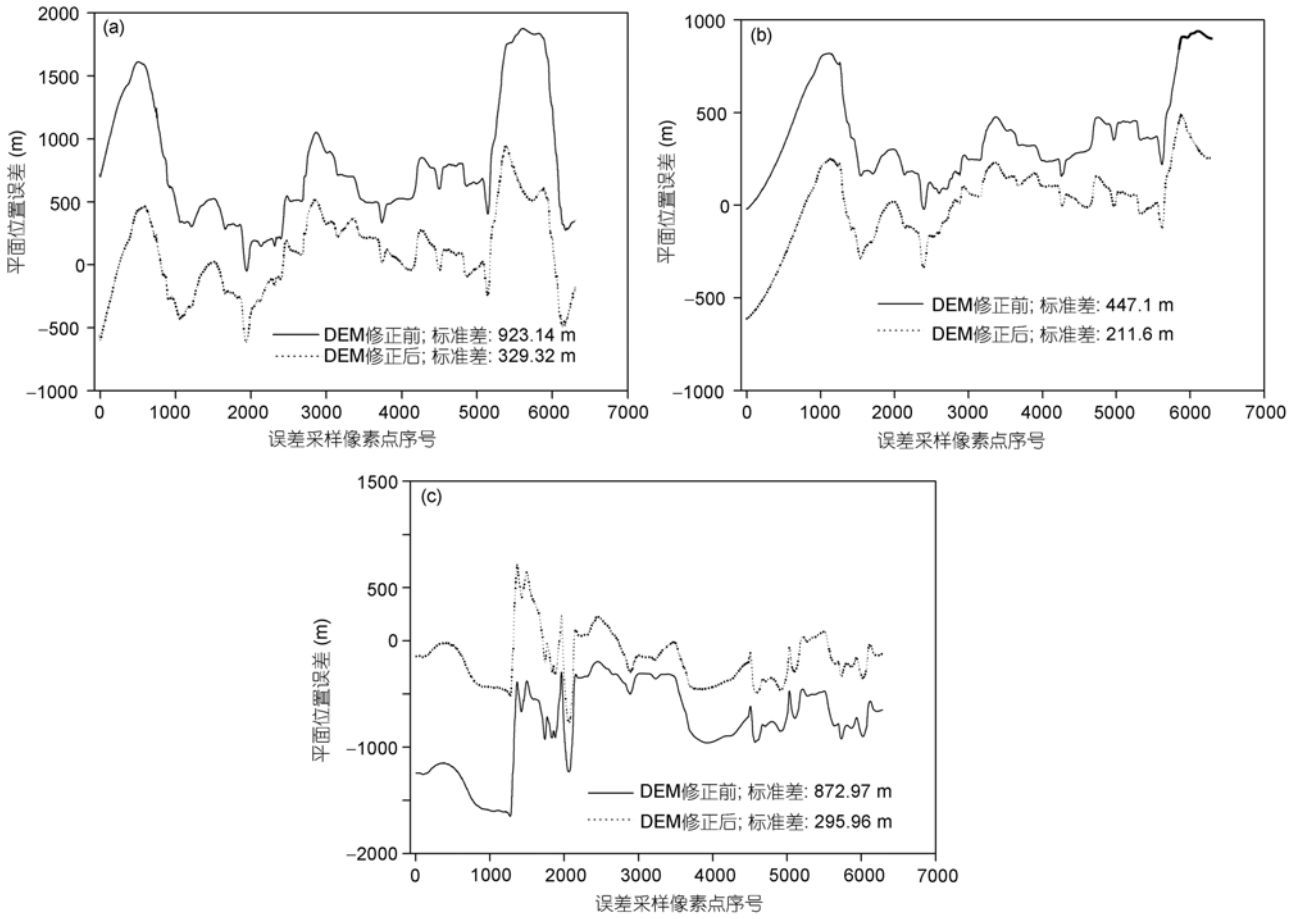


图 3　激光测距数据参与 CCD 像元几何定位前、后的定位结果比较

(a) 前视线阵像素 DEM 修正效果; (b) 正视线阵像素 DEM 修正效果; (c) 后视线阵像素 DEM 修正效果

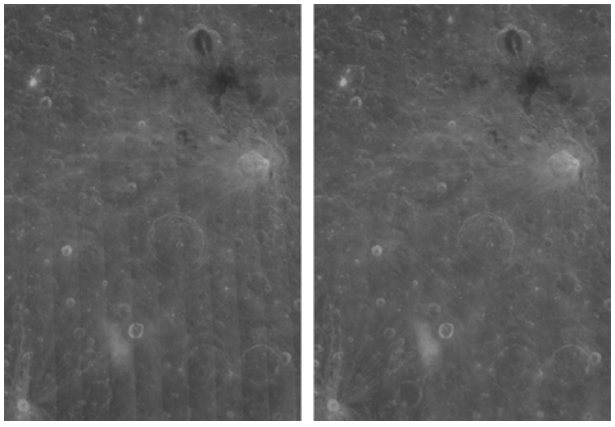


图 4　光度校正采用逐行校正(a)和逐点校正(b)处理的图像质量比较

采用逐行校正的图像存在明显的“瓦片状”结构; 采用逐点校正后, 图像的“瓦片状”结构完全消失

3　全月球影像制图

嫦娥一号 CCD 立体相机的图像数据经过辐射、几何和光度校正后得到预处理数据产品, 这些数据以轨为单位存储, 包括前视、正视和后视三个视场的数据文件. 为使全球影像更接近于正射效果, 我们选取了三个视角中的正视数据进行镶嵌制图.

全月球影像图制作, 分为南北纬 70°以内、南极和北极三个区域, 主要包括拼接与镶嵌、投影与比例尺、影像图设计等内容.

3.1　相邻轨图像的几何配准

由于预处理后的图像数据是以轨为单位的数据文件, 为制作高质量的影像图, 需要进行轨与轨之间的拼接. 相邻轨之间的位置偏差是影响全球影像图制图的重要因素. 嫦娥一号轨间重叠率达 40%

以上, 因此可以通过统计相邻两轨道图像上同名像点的位置偏差, 检查和修正邻轨数据的相对定位误差.

从表 3 和图 5 可以看出, CE-1 相机 90.9%的相邻轨之间 CCD 数据的相对定位偏差在 4 个像元以内, 少量轨次和局部地区的数据相对误差大于 4 个像元, 最大的达 10 个像元. 在制图时, 对于相对位置偏差超过 2 个像元的影像, 都以相邻两轨数据为控制底图, 选取配准点, 将相对位置偏差校正到小于 2 个像元.

3.2 比例尺与投影设计

3.2.1 比例尺设计

影像图的制图比例, 需要综合考虑图像分辨率和相对定位精度的因素.

表 3 相邻轨道影像数据的相对位置偏差统计表

相对位置偏差	影像分段数	百分比(%)
<2 个像元	3276	10.14
2~4 个像元	26088	80.75
4~5 个像元	726	2.25
5~6 个像元	440	1.36
6~7 个像元	498	1.54
7~8 个像元	677	2.09
8~9 个像元	5	0.02
>10 个像元	598	1.85
总计	32308	100

嫦娥一号 CCD 立体相机的星下点空间分辨率为 120 m 左右, 根据成图比例与影像分辨率的关系式(Ps=8.47×10^{-5}×Is, 其中 Is 为月图成图比例分母, Ps 为影像月面分辨率)计算, 嫦娥一号 CCD 影像的成图比例理论上可达到 1∶150 万.

根据成图比例与平面定位精度的经验公式[16] ($RMSp$=3.4×10^{-4}Sm, 其中 $RMSp$ 为均方根平面误差, Sm 为成图比例尺分母), 嫦娥一号 CCD 图像数据的相对定位精度约为 2 个像元(240 m), 成图比例也可达到 1∶150 万.

根据嫦娥工程的任务要求, CCD 影像图的制图比例尺为 1∶250 万, 从以上分析可知, 嫦娥一号 CCD 图像数据的像素分辨率和相对定位精度都能满足制作 1∶250 万全月球影像图的制图要求.

3.2.2 投影及其数学基础

全月球影像图投影的选择主要考虑了三个技术因素: 1) 适合于全月球成图; 2) 能最大限度地保持月表地形地貌形态特征与地物之间相对位置的关系; 3) 适合于小比例尺成图, 并符合读图规范和制图规范等.

月球的形状实际上是一个三轴不等的椭球体, 但在月球大地测绘时, 根据 IAU/IAG 的建议, 本文全月球制图采用球形月固坐标系, 参考椭球体为正球

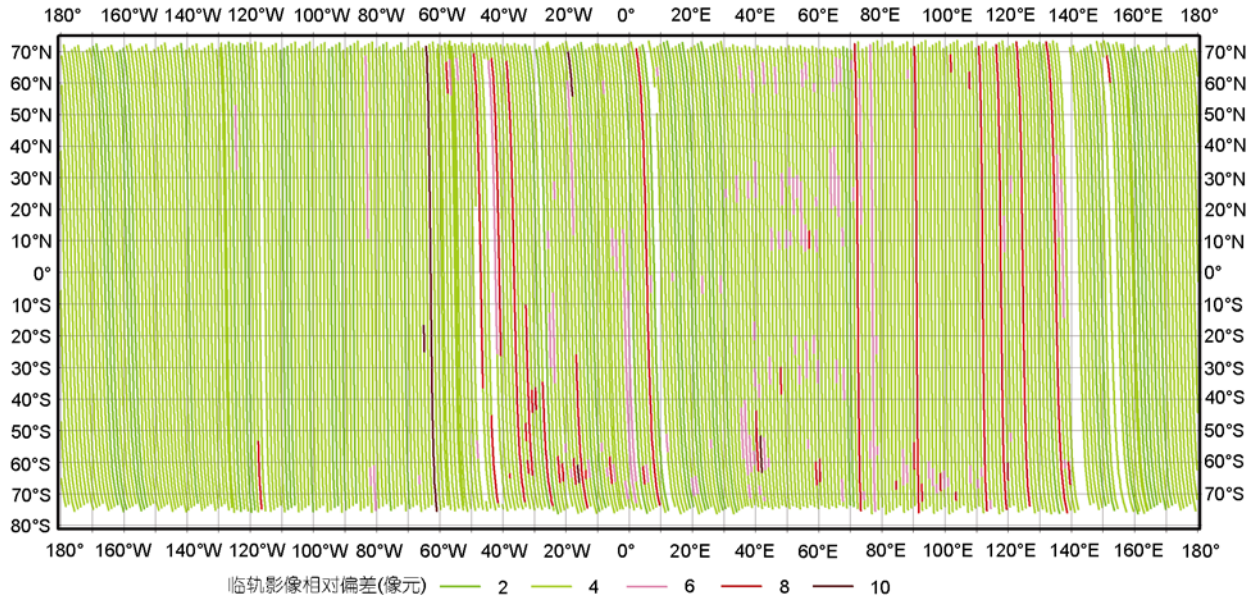


图 5 相邻轨影像定位的相对位置偏差分布图

体, 球形半径为 1737400.0 m, 本初子午线定在月球正面的视中心(中央湾), 经纬度、方向等定义采用与地球相似的方法[17].

由于月球极区的光照度很弱, 工程任务只要求完成南北纬 70°范围的 CCD 成像, 但经过成像试验, 在优化探测器和相机参数后, 嫦娥一号也获得了月球极区的全部图像. 考虑到这一因素和投影变形的影响, 我们将全月球影像图的图幅以 70°为界分成了两部分. 为使平面影像的变形最小, 南北 70°之间的成图区采用了正轴墨卡托割 35°投影, 极区采用了方位等角割 70°投影.

3.3 影像图的镶嵌和编辑

全月球影像图制作过程中, 使用的图像数据很大, 辅助数据繁多. 考虑到文件大小和多人协同工作, 影像图拼接和镶嵌时, 将南北纬 70°制图区分为 4 个拼接区, 加上南北极两部分, 全月球共 6 个拼接区. 轨间影像的拼接, 采用影像最小灰度与梯度变化算法, 绘制拼接线, 进行自动拼接. 拼接区之间影像的拼接, 则利用相邻影像的拼接线和自动色彩均衡算法, 实现相邻影像的拼接和重叠区影像灰度的平滑过渡, 完成全月球影像数据的拼接镶嵌.

全月球影像数据镶嵌完成后, 按选择的投影和比例对图像进行投影转换和缩编, 添加各项成图要素, 按制图规范完成影像图的编辑和整饰. 图 6 为处理制作完成的嫦娥一号卫星 CCD 相机全月球影像图.

4 全月球影像图定位精度分析和比较

影像图的定位精度, 与相机参数、探测器平台内测和外测数据、地形起伏、大地测绘体系以及数据处理和制图过程中的各种误差都有密切的关系. 由于月表缺乏绝对控制点, 嫦娥一号全月球影像图的定位精度分析采用了两种方法: (1) 利用轨道和姿态的测量误差计算分析; (2) 与国外相似影像数据的比较分析.

4.1 嫦娥一号CCD图像数据的定位精度计算分析

在 CCD 数据定位的各种影响因素中, 探测器轨道和姿态测量精度的影响程度, 远远大于其他误差源, 因此轨道和姿态的误差, 实际上决定了 CCD 立体相机数据的月面定位精度.

根据工程技术文件, 嫦娥一号的轨道测量精度, 在国内测控站覆盖区的位置测量精度为 400 m(3σ)(其中相对于月心径向误差为 60 m, 平面位置误差 380 m), 在没有测控站覆盖区间的位置精度为 900 m(3σ)(其中相对于月心径向误差为 180 m). 探测器的姿态测量精度在惯性坐标系下优于 0.03°(3σ), 在轨道坐标系下优于 0.15°(3σ). CCD 立体相机正视线阵对星下点观测, 正视影像月面定位精度与探测器的轨道、姿态测量精度之间存在如下的简单的估算关系:

$$\sigma_p^2 \approx \sigma_r^2 + h^2\sigma_\theta^2,$$

式中σ_p为 CCD 立体相机正视影像月面定位精度, σ_r=380 m (1σ)为探测器平面位置精度, σ_θ=0.15° (3σ)为探测器对月姿态精度, h=200 km 为探测器轨道高度, 因此月面定位精度在有测控弧段为 647 m (3σ), 在无测控弧段为 1041 m (3σ).

另外为了复核上面的定位精度, 我们利用模拟的方法对正视影像的月面定位精度进行评估. 对模拟的轨道、姿态测量数据添加误差值, 分别解算未添加误差和添加误差两种情况下 CE-1 对月面的定位结果, 其差值即为 CE-1 对月面的定位误差.

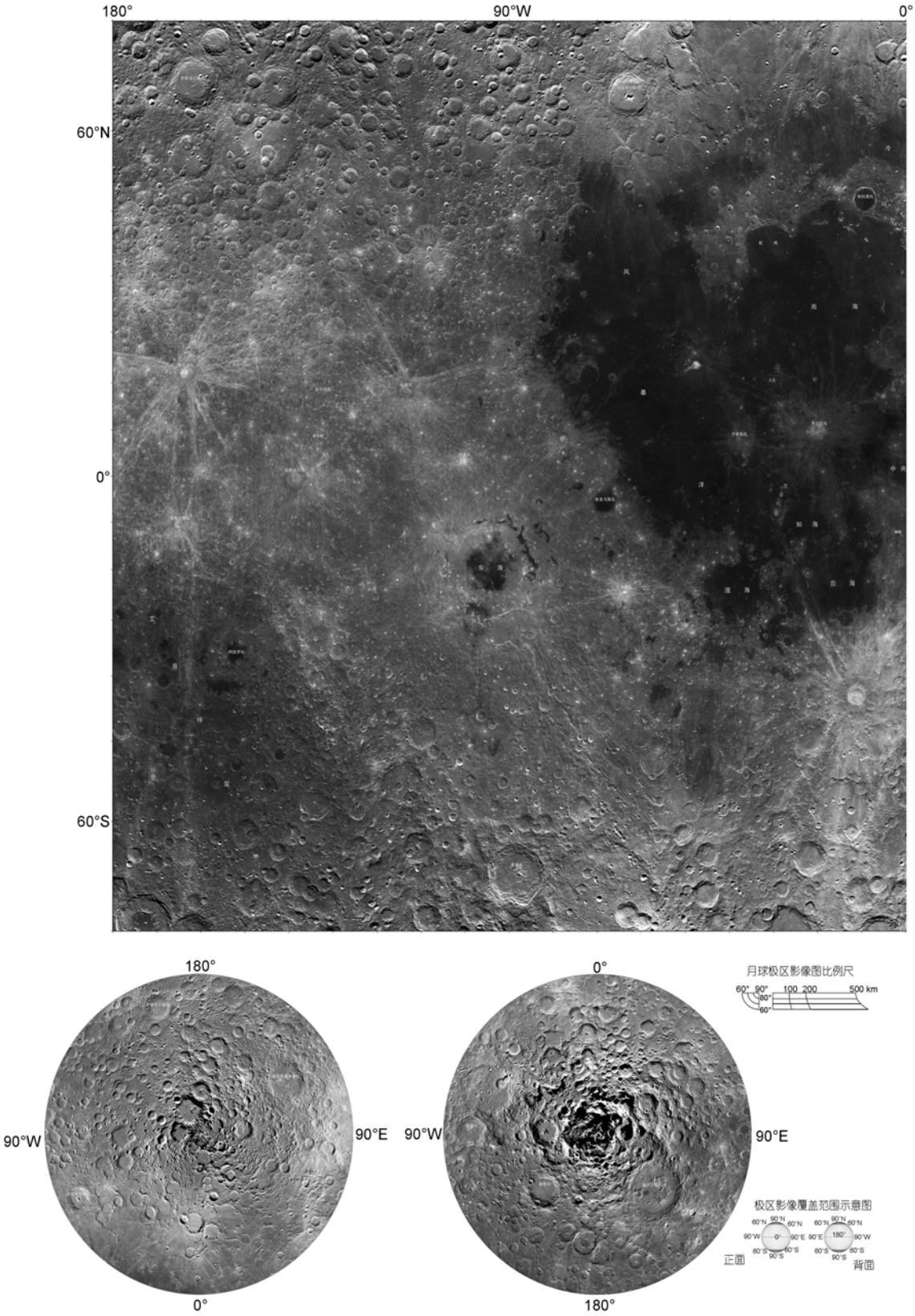
计算结果表明, 在有测控弧段时平面定位精度约为 538 m (3σ), 在无测控弧段时平面定位精度为 1273 m (3σ), 定位精度与上述估算结果相当.

4.2 嫦娥一号CCD影像图平面定位精度的比较分析

为了进一步检查和验证嫦娥一号 CCD 影像数据几何定位的精确, 我们利用已知的月表控制点数据和参考影像图, 与 CE-1 号全球镶嵌影像进行了比对分析.

(1) 控制网和参考影像. 近些年, 由 RAND 公司的 Davies 和 Colvin 等[18]建立的 ULCN(Unified Lunar Control Network)和 CLCN(Clementine Lunar Control Network)月球控制网已被普遍接受. USGS (United States Geological Survey) Archinal 等[19]将这两个控制网进行了整合和改进, 构建了新的月面控制网, 即 ULCN2005, 控制网的平面精度和高程精度如表 4.

1994 年建立的统一月面控制网(ULCN1994), 包括了 1478 个控制点, 其中 1286 个位于月球正面, 192 个位于月球背面. 控制点中有 304 个来自阿波罗探测数据, 911 个来自地基观测照片, 63 个来自水手十号


180°
90°W
0°
60°N
0°
60°S
180°
90°W
90°E
0°
180°
90°W
90°E
月球极区影像图比例尺
60° 90° 100 200 500 km
80°
60°
极区影像覆盖范围示意图
正面
背面

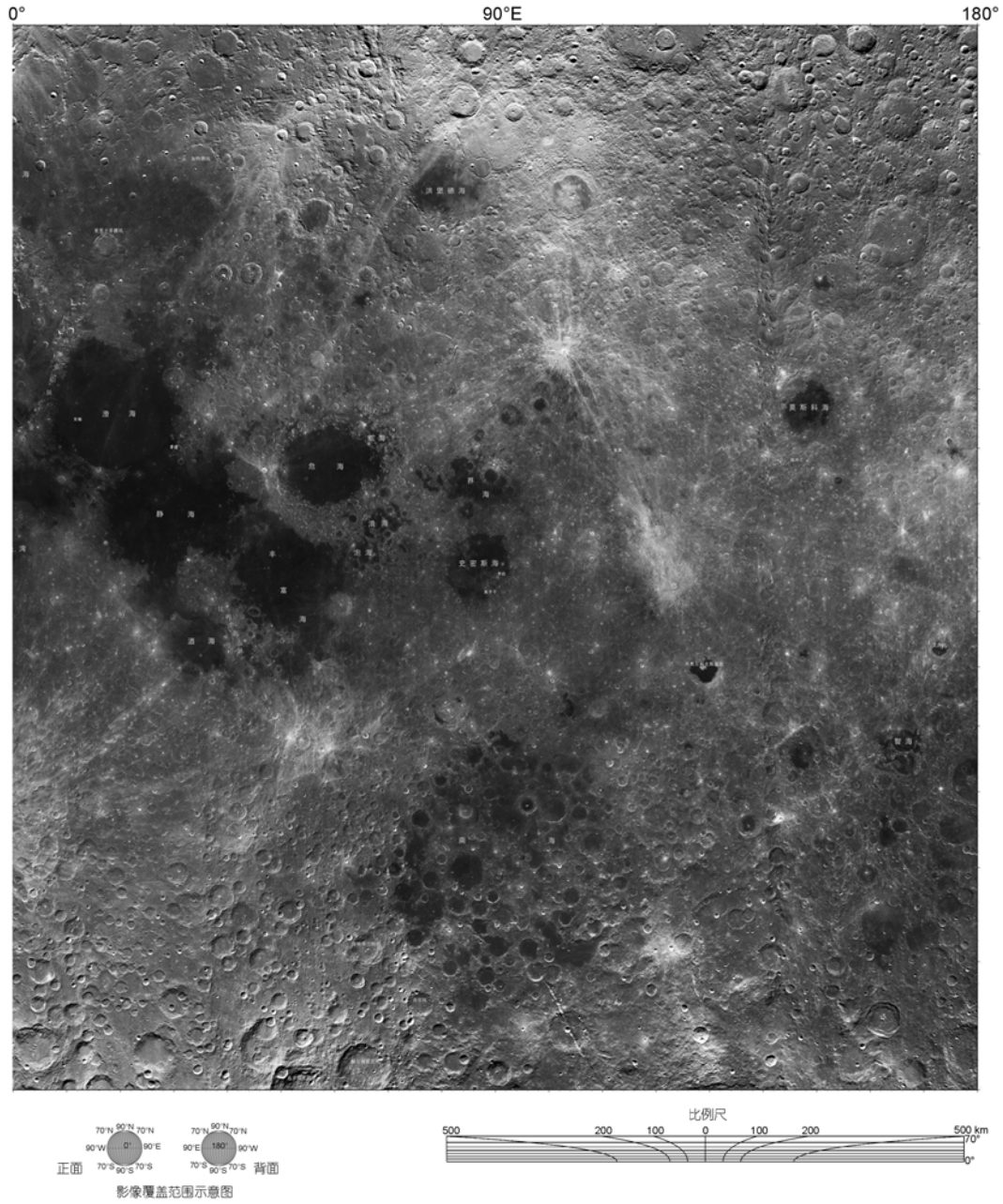


图 6　嫦娥一号 CCD 相机全月球影像图

中国首次月球探测工程全月球影像图是由嫦娥一号 CCD 立体相机拍摄的 589 轨影像数据, 经辐射校正、几何校正、光度校正后镶嵌而成. 嫦娥一号的飞行轨道为 200 km 高的极轨圆轨道, CCD 相机采用线阵推扫方式获取月面图像, 图像幅宽 60 km, 空间分辨率 120 m. 图像数据获取于 2007 年 11 月 20 日至 2008 年 7 月 1 日, 覆盖 180°W~180°E, 90°N~90°S 之间的范围. 图幅左边的影像图为正轴等角割 35°墨卡托投影, 包括 70°N~70°S 之间的区域, 约占全月球面积的 94%. 图幅右边为月球南北极区影像图, 包括 60°N~90°N, 60°S~90°S 区域, 采用等角割 70°方位投影

(Mariner 10)探测数据, 200 个来自伽利略探测数据, 控制网平面位置的精度大约为 100 m~3 km[18].

1997 年建立的克莱门汀月面控制网(CLCN1997) 包括 271643 个月面控制点, 来自于克莱门汀紫外-可见光相机在 750 nm 波段获得的 43871 幅相邻影像的同名点. 这是目前最大的行星控制网, 其主要目的是

作为克莱门汀全球基础镶嵌图的控制框架. 在克莱门汀全月数字影像模型和全月近红外多波谱影像图中采用了这个控制网. 但由于控制网生成的过程中, 仅用了 ULCN1994 中月球正面的 22 个控制点作为月面参考控制点, 相机指向角改正未受约束, 大多数图像连接点都被固定在半径为 1736.7 km 的正球体表面, 控制网平面定位平均误差约 7 km, 误差最大的地方约 15 km, 甚至更大[19,20].

针对 CLCN1997 中存在的问题, Archinal 等[19,21]重新整合了 ULCN1994 月面控制网与 CLCN1997 月面控制网数据, 建立了改进的月面控制网, 形成新的月面控制网 ULCN2005. ULCN2005 月面控制网改进的部分主要表现为: ① 对 Clementine 相机的指向角改正量控制在 1°以内; ② 将绝大部分 ULCN1994 控制点(共 1261 个, 平面误差 0.18~5 km, 高程误差 2~6 km)在 Clementine 图像数据上进行同名像点量测, 并将量测结果纳入到 ULCN2005 中, 与非 ULCN1994 像点进行联合解算; ③ 增加了控制点的高程信息. 改进后的 ULCN2005 控制网的平面精度可以达到 100 m 至几公里.

上述月面控制网虽然已经公开发表并被应用到一些月球探测任务中, 但是这些控制网没有系统配套的控制点影像库, 因此在实际操作中难以使用, 很难将控制点定位到嫦娥一号 CCD 影像图上的像点位置上, 导致很难利用 ULCN2005 控制点对嫦娥一号 CCD 影像图的平面定位精度进行检查.

克莱门汀月球基础地图(Clementine Basemap V1.0), 是利用紫外-可见光相机在 750 nm 谱段获得的 43000 多幅影像数据, 经过辐射校正、几何校正和光度校正后镶嵌制作的全月球灰度影像图[22~24]. 由于几何定位采用的是 CLCN1997 控制网, 因此克莱门汀月球基础地图(1.0 版)月面定位精度较差. 2008 年下半年, USGS 利用最新的月面控制网和月面地形模型 ULCN2005, 对上述图像重新进行了定位, 制作了 2.0 版的月球基础地图(Clementine Basemap V2.0)[9,10].

鉴于以上原因, 我们选用克莱门汀月球基础影像图(Clementine Basemap V2)作为参考影像进行比较, 对 CE-1 全月球影像图进行定位精度的检查.

(2) 比较结果. 利用 CE-1 全月影像图和克莱门汀基础地图 2.0 版, 在全月球均匀地选取了 816 个同名点(图 7), 利用两幅影像图同名点的经纬坐标, 解

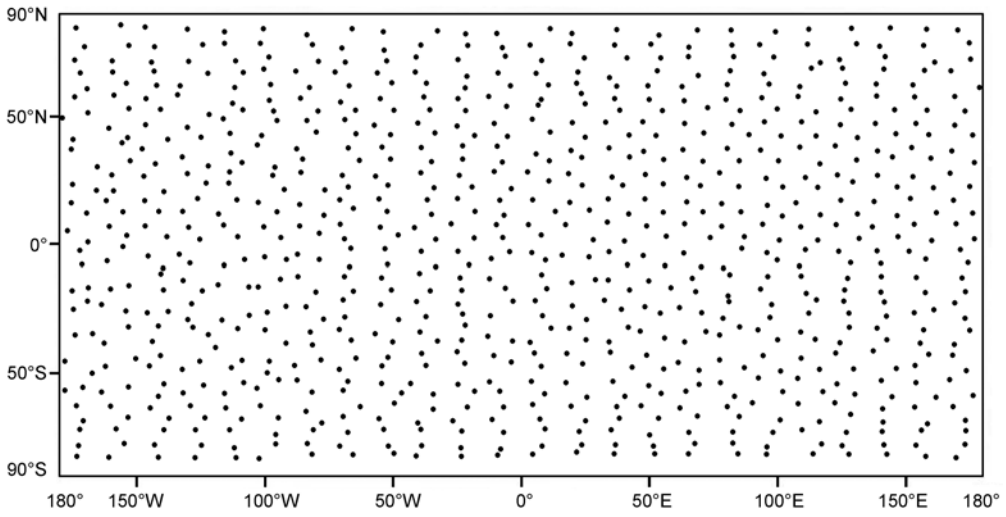


图 7 平面定位比较的同名点分布情况

表 4 月面控制网比较[18,19]

名称	控制点个数	影像数量	平面精度	高程精度
ULCN1994	1478	未知	100 m~3 km	几千米?
CLCN1997	271634	43871	几千米, 有些大于 15 km	没有高程信息
ULCN2005	272931	43866	100 m 至几千米	约百米量级

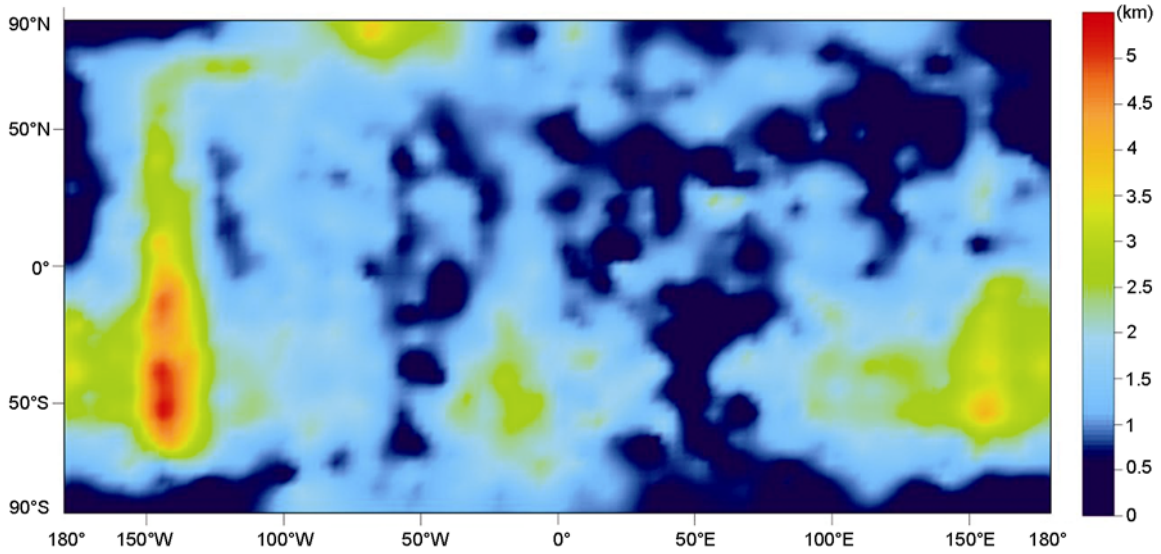


图 8　嫦娥一号全月影像图和克莱门汀基础地图(2.0)同名点位置偏差分布图

算出同名像点的空间位置偏差. 计算、统计的结果表明, CE-1 相对于 Clementine 影像的平面位置最大偏差约 5.5 km, 95.2%的同名点偏差小于 3 km, 平均偏差约为 1.4 km(图 8).

综合嫦娥一号 CCD 图像数据的定位精度计算分析, CE-1 全月影像图平面定位精度在约 100 m~1.5 km 之间. 如表 4 所示, 2005 联合控制网的平面精度约 100 m 至几千米, 而克莱门汀基础地图(2.0 版)是 Hare 等[9]和 Lee 等[10]以 2005 联合控制网作为基础制作的, 因此可以认为, CE-1 全月球影像图的平面定位精度略好于 2005 联合控制网和克莱门汀基础地图(2.0 版).

5　结论

中国首次月球探测工程月球影像图, 全部使用嫦娥一号 CCD 立体相机的正视影像数据制作. CCD 立体相机采用线阵推扫方式获取图像, 具有线中心投影的特点, 像元空间分辨率为 120 m, 幅宽 60 km, 相邻轨道影像数据的重叠率>40%.

全月球影像图全部采用了正视影像中尽量接近投影中心的数据作为影像图的数据源, 数据获取于 2007 年 11 月 20 日~2008 年 7 月 1 日, 并在图像几何定位中引入了 7 km 分辨率的 DEM 数据用于地形校正. 图像数据的轨间相对定位精度在 2 个像元(240 m)以内, 全月影像图的平面定位精度约为 100 m~1.5 km, 略好于 ULCN2005 联合控制网和克莱门汀基础地图(2.0 版). CE-1 影像图色调一致, 图像清晰, 层次丰富, 全月球数据覆盖完整, 分辨率一致, 全月影像图初步具备正射影像的特点, 达到了 1∶250 万比例尺的制图精度.

中国首次月球探测工程全月球影像图是目前覆盖最全、图像质量最好、定位精度最高的全月球影像图. 随着三线阵立体相机探测数据的摄影测量处理, 有望获得更高精度的全月球 DEM 数据和正射影像图, 为我国月球探测科学研究提供更高精度的数据支持.

致谢　感谢绕月探测工程卫星、测控、发射场、火箭系统全体参研人员和地面应用系统全体参研人员; 感谢全月球影像图评审专家陈述彭院士、童庆禧院士、李德仁院士、高俊院士、刘先林院士、王任享院士和陈俊勇院士等对影像图制作提出的宝贵意见; 感谢审稿人提出的建设性意见.

参考文献

1　Akademia N, Barabashov, Nokolai P, et al. Atlas Obratnoi Storony Luny. Moskva: Izd-vo-Akademii Nauk SSSR, 1960

2 Lewis H A G. The Times Atlas of the Moon. London: Times Newspapers, 1969
3 Bowker D E, Hughes J K. Lunar Orbiter Photographic Atlas of the Moon. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1971
4 Bussey B, Spudis P. The Clementine Atlas of the Moon. Cambridge: Cambridge University Press, 2004
5 Eliason E, Isbell C, Lee E, et al. The Clementine UVVIS Global Lunar Mosaic. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1999
6 Rosiek M R, Kirk R, Howington-Kraus E. Color-coded Topography and Shaded Relief Maps of the Lunar Hemispheres. 33rd Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2002
7 Smith D E, Zuber M T, Neumann G A, et al. Topography of the moon from the Clementine lidar. J Geophys Res, 1997, 102(E1): 1591—1611
8 Archinal B A, Rosiek M R, Kirk R L, et al. Completion of the unified lunar control network 2005 and topographic model. 37th Lunar and Planetary Science Conference [CD-ROM]. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2006
9 Hare T M, Archinal B A, Becker T L, et al. Clementine mosaics warped to ulcn 2005 network. 39th Lunar and Planetary Science Conference, Abs.#2337[CD-ROM]. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2008
10 Lee E M, Gaddis L R, Weller L, et al. A new Clementine basemap of the moon. 40th Lunar and Planetary Science Conference, Abs. #2445[CD-ROM]. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2009
11 Becker T, Weller L, Gaddis L, et al. Progress on reviving lunar orbiter: Scanning, archiving, and cartographic processing at USGS. 35th Lunar and Planetary Science Conference, Abs.#1791[CD-ROM]. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2004
12 Weller L, Red-ding B, Becker T, et al. Lunar orbiter revived: Very high resolution views of the Moon. 37th Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2006
13 Weller L, Becker T, Archinal B, et al. USGS lunar orbiter digitization project: Updates and status. 38th Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2007
14 Byrne C J. Lunar Orbiter Photographic Atlas of the Near Side of the Moon. Berlin: Springer, 2005
15 Phillip P J. The International Atlas of Lunar Exploration. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
16 约翰 E. 埃斯蒂斯, 费雷德里克 J. 多伊尔, 著. 张莉, 王长耀, 边馥苓, 等, 译. 遥感手册(第六分册). 北京: 国防工业出版社, 1983. 233—234
17 Seidelmann P K, Abalakin V K, Bursa M, et al. Report of the IAU/IAG working group on cartographic coordinates and rotational elements of the planets and satellites: 2000. Celest Mech Dyn Astr, 2002, 82: 83—110
18 Davies M E, Colvin T R, Meyer D L, et al. The unified lunar control network: 1994 version. J Geophys Res, 1994, 99(E11): 23211—23214
19 Archinal B A, Rosiek M R, Kirk R L, et al. The Unified Lunar Control Network 2005. U.S. Geological Survey Open-File Report, 2006. 1367
20 Rosiek M R, Cook A C, Robinson M S, et al. A revised planet-wide digital elevation model of the moon. 38th Lunar and Planetary Science Conference, Abs.#2297[CD-ROM]. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2007
21 Archinal B A, Rosiek M R, Kirk R L, et al. Completion of the unified lunar control network 2005 and topographic model. 37th Lunar and Planetary Science Conference, Abs.#2310. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2006
22 Eliason E, Isbell C, Lee E, et al. Mission to the Moon: The Clementine UVVIS Global Lunar Mosaic, PDS Volumes USA_NASA_PDS_CL_4001 Through 4078. The U.S. Geological Survey, 1999
23 Eliason E M, Isbell C, Lee E, et al. Clementine Basemap mosaic, PDS Volumes USA_NASA_PDS_CL_3001 Through 3015. The U.S. Geological Survey, 1997
24 Isbell C, Eliason E M, Adams K C, et al. Clementine: A multi-spectral digital image model archive of the Moon. 30th Lunar and Planetary Science Conference, Abs.#1812. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1999