科学通报 2010 年 第 55 卷 第 9 期：752 ~ 757
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

嫦娥一号卫星受控撞月轨迹测量与落月点坐标分析

李金岭, 郭丽, 钱志瀚, 蒋栋荣, 张秀忠, 郑为民, 洪晓瑜

中国科学院上海天文台, 上海 200030
E-mail: jll@shao.ac.cn

2009-06-23 收稿, 2009-09-06 接受
国家自然科学基金(批准号: 10778635, 10973030)、探月工程(嫦娥一号)、上海市科学技术委员会(编号: 06DZ22101)和国家高技术研究发展计划(编号: 2008AA12A209, 2008AA12A210)资助项目

摘要 利用 2009 年 3 月 1 日嫦娥一号(CE-1)卫星受控撞月段的射电测距与 VLBI 跟踪时延, 在定位模式下对落月轨迹和落月点坐标进行了解析. 结果表明, CE-1 卫星的落月时刻(最后信号的发出时刻)为 UTC8h13m6.51s, 落月点在月球主轴系中的月面经纬度和高度分别为 52.2732°E, 1.6440°N, –3.56 km(月球参考半径取为 1738 km), 误差分别为 0.0040°, 0.0168°, 0.18 km. 对应的月面切向误差为 0.52 km, 三维定位误差为 0.55 km. 由定位误差推断, 即使维持当前技术指标, 联合射电测距与 VLBI 观测时延, 能够保障对我国探月二期的着陆器 1 km 的三维定位精度. 对于巡视器月面轨迹测定, 由于仅发送遥测信号, VLBI 将是其唯一的地面跟踪手段. 分析表明, 采用地心距约束等先验信息有利于提高定位精度. 研究同波束 VLBI 技术在巡视器定位中的应用, 以及分析月面地形图和探测器机载测量等的应用, 值得今后重点关注.

关键词
探月工程
嫦娥一号卫星
受控撞月
轨迹测量
VLBI

对太阳系天体的探测是人类认识宇宙的起点, 20 世纪 50 年代以来, 国际上实施了对月球、火星、木星及其卫星等太阳系天体的多批次成功探测, 60 年代末人类登陆月球. 进入 21 世纪以来, 美、欧、日、印等国家又开始了新一轮的月球、火星等太阳系天体的探测热潮, 期待在月球上设置更多、更复杂的探测仪器, 重返月球, 甚至建设月球基地、登陆火星.

我国独立自主的月球探测工程——嫦娥计划于 2004 年 1 月正式立项[1,2]. 于 2007 年 10 月 24 日发射升空的第一颗探月卫星嫦娥一号(CE-1), 已经圆满完成了累计 494 天的飞行, 获取了大量的科学探测数据和研究成果, 并于 2009 年 3 月 1 成功实现了受控撞月, 为探月工程二期积累了宝贵的技术和工程经验. 中国科学院上海天文台组织了 CE-1 卫星 VLBI 测轨分系统对卫星落月过程的测量, 获取了宝贵的跟踪资料.

我国探月工程二期已确定将实现月面软着陆, 释放月球车并对选定的月面区域进行巡视勘察. 目前对着陆器的信标设置包含数传和侧音, 能够同时进行射电测距测速跟踪和 VLBI 跟踪. 对巡视器的设计为仅发送遥测信号而无侧音信号, VLBI 因而将是其唯一的地面跟踪测量手段. 本文将分析 CE-1 卫星落月过程的跟踪资料, 进行轨迹测定和落月点定位. 这对于实现我国探月二期着陆器的月面定位和巡视器勘察轨迹测定, 在方法分析、资料解析软件研发和定位精度预判等环节是有利的铺垫.

1 CE-1 卫星落月轨迹测量与着陆点坐标分析

射电测距测速和 VLBI 技术一直是深空探测器定位测轨的主要观测手段[3]. VLBI 技术具有横向测量精度高的特点[4], 与射电测距测速技术视向测量精度高的特点形成信息互补. 深空目标的轨道分析和定位分析既有相通之处, 也存在显著区别[5~7]. 主要的区别在于, 定轨分析一般要求有足够长的跟踪弧段, 通过状态转移矩阵将整个弧段中不同时刻的观测资

英文版见: Li J L, Guo L, Qian Z H, et al. Determination of the controlled landing trajectory of Chang'E-1 satellite and the coordinate analysis of the landing point on the Moon. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-0093-7

料联系起来统一求解，强调精确模制整个跟踪弧段中飞行器的动力学状态. 而在定位分析中，待求参数是各个给定时刻目标的位置，对跟踪弧段的长度没有苛刻要求，不需要模制飞行器的受力状况，能够从几何角度实时监测跟踪数据的质量和实现快速轨迹测定，较为适用于工程性需求. 尤其是在轨道制动段、软着陆以及月面行进等过程中，由于目标的受力状态不易精确模制，一般可采取定位分析[8~11].

对于2009年3月1日CE-1卫星的受控撞月过程，VLBI跟踪开始于UTC6h21m，并一直持续到8h13m附近的成功落月(测量信号中断)，涵盖了自UTC7h36m至7h56m的轨道机动段以及其后的落月段. 中国科学院上海天文台VLBI中心完成了对卫星VLBI跟踪资料的互相关处理和各项误差修正[5,6]，方法和精度均已经通过了严格的工程鉴定，实测资料检验也证明了能够很好地满足工程需求. 图1显示了UTC7h30m以后经钟差、仪器差和传输介质附加时延修正的1 s积分VLBI跟踪观测时延. 图2为扣除趋势项后的数据点噪声水平示例. 剔除野点后的统计表明，上海站关联基线的时延序列标准偏差约4.5 ns，其他基线约2.8 ns，有效数据点达90%，跟踪数据的整体情况达到了较高水平.

以3 s步长对UTC7h30m以后CE-1卫星落月过程的S波段测距与VLBI跟踪时延进行了定位分析，图3依次显示了月球主轴系中的月面经纬度和月面高度(月球参考半径1738 km[12])随时间的变化. 在地心天球坐标系至月球主轴系的转换中采用了DE405历表及其天平动参数. 从图3可见，在UTC7h45m前后CE-1卫星轨迹的月面经纬度表现出明显的趋势性变化，显示了运行轨道的改变，与轨道机动时段很好对应. 由于各轨迹点均为独立归算得出，彼此的连续性和整体的平滑度表明，对轨迹的跟踪观测与定位

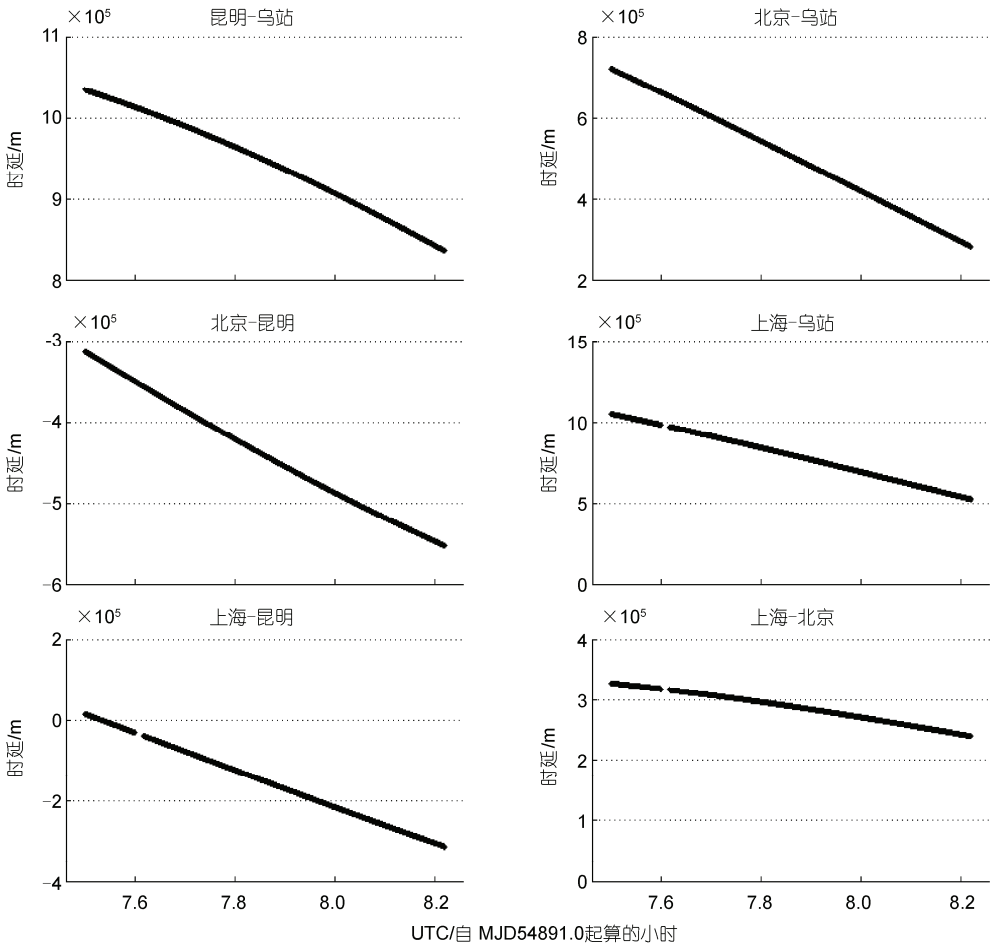


图1　CE-1卫星受控撞月VLBI跟踪1 s积分观测时延

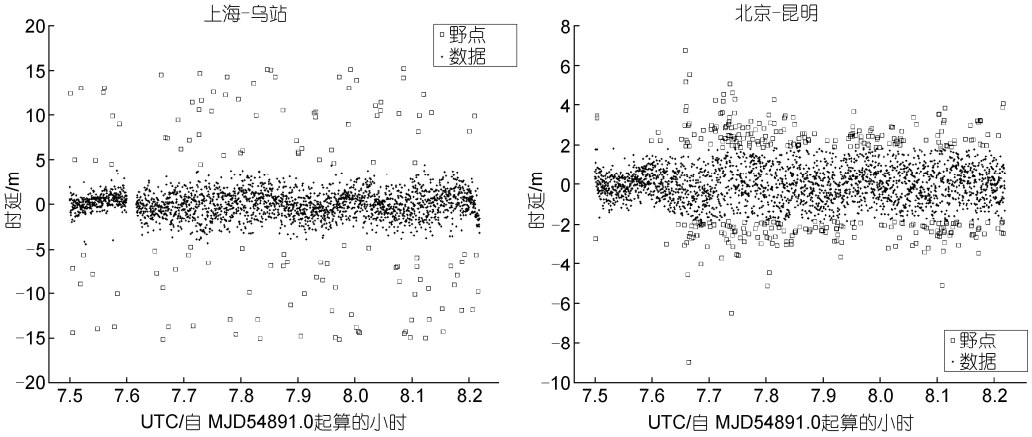


图 2 CE-1 卫星 VLBI 跟踪数据噪声水平示例

分析是相当成功的. 这对于实现探月二期着陆器落月轨迹测定, 从方法、软件到信心等各方面都是有力的支持.

图 3 显示了在 UTC8h6m30s 附近的测量轨迹点存在弥散, 为此以 0.01 s 步长重新分析了 UTC8h7m 之后的跟踪数据, 以确定 CE-1 卫星的落月点坐标. 图 4 显示了归算轨迹点及其拟合情况, 由此得到的 CE-1 卫星落月点坐标如表 1 所示, 其中解算值是指由跟踪资料经定位分析所得最后信号发出时刻的 CE-1 卫星点位坐标, 其误差为一倍形式误差. 平滑值是指对 UTC8h7m 后的定位点坐标序列经平滑拟合后的结果, 其误差为点位坐标序列的标准偏差.

关于撞月时刻, VLBI 跟踪资料互相关处理过程中显示, 测站跟踪信号消失的时刻约为 UTC8h13m7.8s,

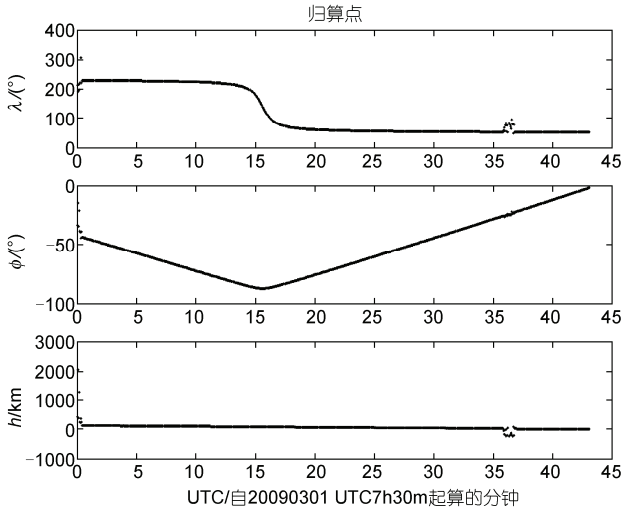


图 3 月球主轴系中 CE-1 卫星落月轨迹分析

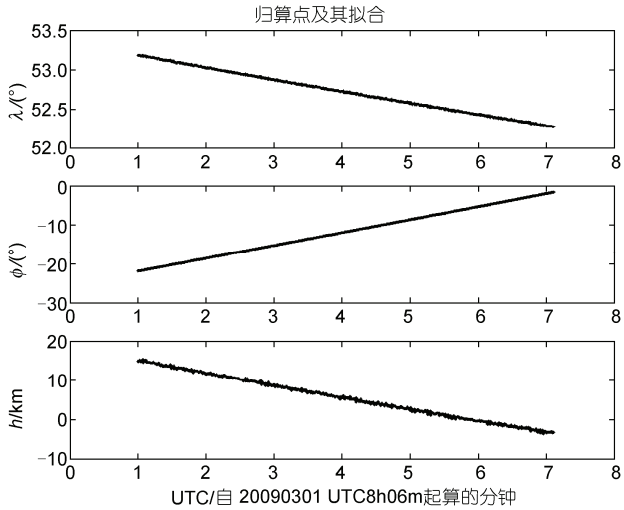


图 4 UTC8h7m 之后的落月轨迹分析

表 1 CE-1 卫星落月点坐标分析

	解算值	平滑值	新闻报道
时刻	20090301 UTC8h13m06.514s		UTC8h13m10s
东经	52.2760°±0.0018°	52.2732°±0.0040°	52.36°
南纬	1.6407°±0.0031°	1.6440°±0.0091°	1.50°
月面高	–3.30 km±0.06 km	–3.56 km±0.18 km	

此时对应的地月距离约为 378336 km, 真空中信号传输时间约为 1.26 s, 由此推断的 CE-1 卫星撞月时刻应在 UTC8h13m6.5s 附近, 这与表 1 中通过定位分析给出的时刻是相符的, 但与新闻报道的时刻存在约 3.5 s 的差异. 时刻上的这一差异很可能是落月点估算坐标之差的主要原因.

另外, 表 1 中平滑值的误差所对应的月面切向误差为 0.30 km, 三维定位误差为 0.35 km. 考虑到定位

分析的步长设置为 0.01 s, 若节点时刻的误差为 3 倍步长, 即 0.03 s, 由平滑序列所得落月点坐标在月面经纬和高度方向上的误差约为±0.0001°, ±0.0017°和±0.00 km. 再有, 本文所用 VLBI 数据的互相关积分时间为 1 s, 各基线最后数据点的时标可能存在约±0.25 s 的偏差, 由平滑序列估算得到的三个方向上的对应变化分别为±0.0006°, ±0.014°和±0.01 km. 综合考虑点位坐标序列的波动、定位分析步长设置和互相关积分时间等因素, 得到落月点坐标分析值的误差在月面经纬和高度方向分别为±0.0040°, ±0.0168°, ±0.18 km. 对应的月面切向误差为 0.52 km, 三维定位误差为 0.55 km. 若 VLBI 互相关时延的时标误差为±0.5 s, 对应的月面切向、三维定位误差为 0.90 km, 0.92 km. 可见, 对于快速运动的目标, 缩短 VLBI 互相关积分时间有利于提高定位精度. 综合以上分析可以推断, 若探月二期中对着陆器的跟踪方式仍然采用射电测距测速和 VLBI 技术, 即使维持目前的技术指标, 仍有保障获得月面 1 km 的定位精度.

2 CE-1 卫星落月段 VLBI 跟踪定位分析

如前所述, 我国探月二期中 VLBI 将是巡视器唯一的地面跟踪技术, 分析 VLBI 技术下的 CE-1 卫星近月面轨迹测定, 有助于探讨巡视器在类似跟踪观测下定位的方法和预估定位的精度. 图 5 为仅利用 CE-1 卫星落月段 VLBI 跟踪资料的轨迹测定, 分析弧段和定位步长设置与图 4 相同. 限定在定位分析时刻所对应的 4 站 6 基线均有资料, 以确保法方程系数矩阵的满秩. 但这一限定很可能导致最后点位的时刻超前于落月时刻(最后信号波前的发出时刻), 因而最后点位的坐标与表 1 所列值缺乏可比性, 此处仅讨论点位序列的波动, 以估算定位的精度. 与图 4 比较可见, 图 5 数据点的弥散度明显增大, 去除野点(大于 3 倍中误差)后的数据序列在月面经纬和高度方向的标准偏差分别为 6.80°, 0.45°和 56 km, 对应于月面切向的定位精度 207 km, 三维精度 214 km, 显然不满足探月二期对巡视器的定位精度需求.

图 6 所示为图 3 的定位分析与预报轨道的比较, 在 UTC7h59m 至 8h06m 段, 二者给出的 CE-1 卫星地心坐标之差在 500 m 水平. 具体计算表明, 若仅利用 VLBI 跟踪以确定该时段 CE-1 卫星的轨迹, 点位坐标序列的标准偏差达 200 km. 但是, 若将 CE-1 卫星的

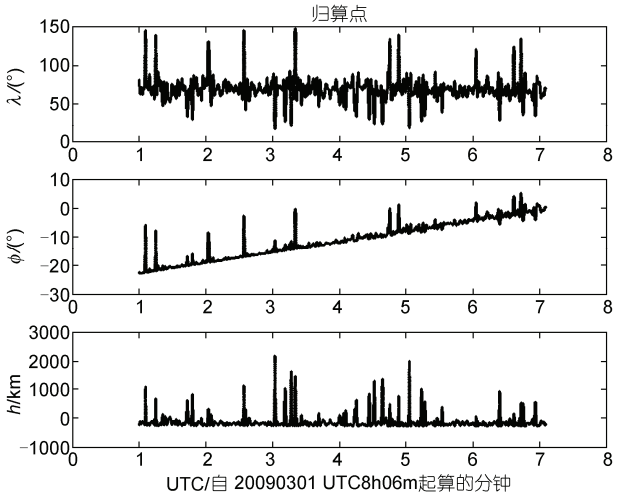


图 5 4 站 6 基线 VLBI 跟踪下 CE-1 卫星落月段轨迹测定

地心距约束到预报轨道上, 误差取为 500 m, 得到的 CE-1 卫星月面经纬和高度方向数据序列的标准偏差依次改进为 0.02°, 0.01°, 0.34 km, 对应的月面坐标误差为 0.71 km, 三维误差为 0.78 km. 图 7 是两种计算模式下的点坐标序列的比较. 可见, 地心距约束的效果是非常显著的. 这也表明有必要继续分析其他先验信息和测量数据在巡视器定位中的应用, 如利用较为精确的着陆器坐标(提供地心距约束信息)、高精度数字月形图, 以及着陆器与巡视器之间的同波束 VLBI 观测或机载测距、照相等信息.

3 结论

定位分析对卫星跟踪弧段的长度无苛刻要求, 主要从几何角度实现解析, 较为适用于轨道机动段、月面行进轨迹等的跟踪测量. 参考于我国探月二期工程规划, 本文利用 CE-1 卫星受控撞月段的射电测距与 VLBI 跟踪, 进行了落月段的轨迹测定和落月点的坐标分析. 结果表明, 在目前技术指标下可以获得着陆器 1 km 的月面定位精度. 但对于巡视器月面轨迹测定, 若仅采用常规 VLBI 跟踪方式, 需要借助于其他先验信息以实现满足精度需求的巡视器月面定位.

考虑到探月二期中能够对着陆器同时进行射电测距与 VLBI 跟踪, 巡视器的月面探测距离在 10 km 以内, 地心角小于 10″. 若经一定的观测积累已经获得了着陆器的月面坐标, 则有望为巡视器的 VLBI 跟踪定位提供地心距约束信息. 同波束 VLBI 技术、高精

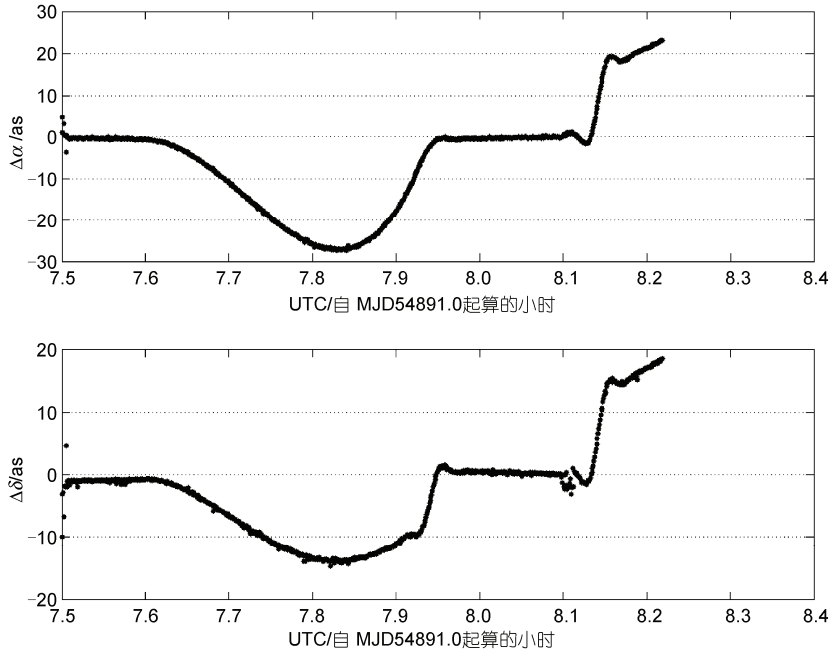


图 6 定位分析和预报轨道的比较

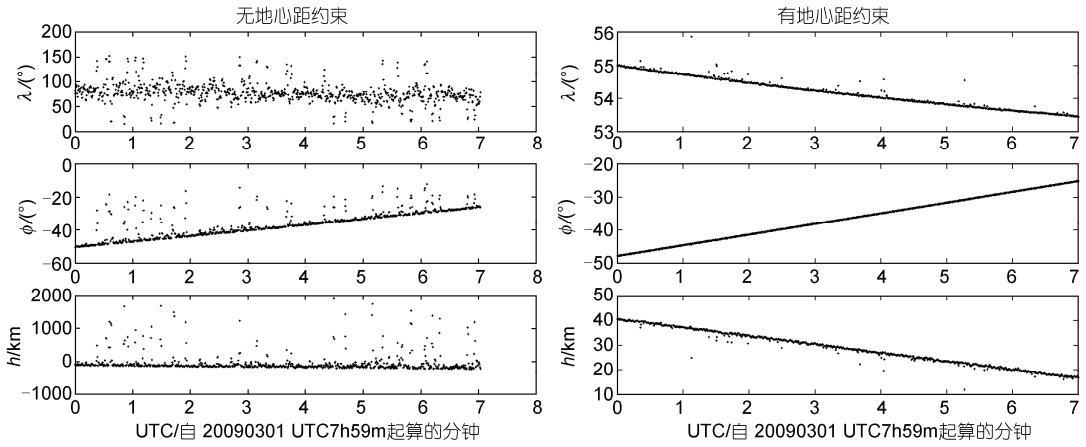


图 7 VLBI 跟踪定位下有无地心距约束的比较

度月面地形图、着陆器与巡视器机载观测以及着陆器近月面轨迹设计和月面特征识别等相关研究[13,14],也有望用于提高巡视器月面定位的精度. 相关问题值得后续工作中予以重点关注.

致谢 感谢 CE-1 卫星 VLBI 测轨分系统 VLBI 中心提供本文分析数据.

参考文献

1 欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略. 地球科学进展, 2004, 19: 355—357
2 欧阳自远. 月球探测进展与我国的探月行动. 自然杂志, 2005, 27: 187—188
3 王家松, 陈建荣, 马鹏斌, 等. USB 与 VLBI 联合确定"探测一号"卫星轨道. 飞行器测控学报, 2006, 25: 31—33

4 Sovers O J, Fanselow J L. Astrometry and geodesy with radio interferometry: Experiments, models, results. Rev Mod Phys, 1998, 70: 1393—1454
5 黄勇. “嫦娥一号”探月飞行器轨道计算研究. 博士学位论文. 上海: 中国科学院上海天文台, 2006
6 郭丽. 基于 VLBI 跟踪观测的空间飞行器瞬时状态参量归算. 博士学位论文. 上海: 中国科学院上海天文台, 2007
7 乔书波, 李金岭, 孙付平. VLBI 在探月卫星定位中的应用分析, 测绘学报, 2007, 36: 262—268
8 Li J L, Guo L, Zhang B. The Chinese VLBI network and its astrometric role. In: Jin W J, Platais I, Perryman M A C, eds. Proceedings IAU Symposium No. 248, 2007, Shanghai. Cambridge University Press, 2008. 182—185
9 Guo L, Li J L, Qiao S B, et al. Monitoring the lunar capture of Chang’E-1 satellite by real-time reduction of the instantaneous state vectors. In: Jin W J, Platais I, Perryman M A C, eds. Proceedings IAU Symposium No. 248, 2007, Shanghai. Cambridge University Press, 2008. 194—195
10 Li J L. The contribution of CVN to the CE-1 mission. In Finkelstein A, Behrend D, eds. Measuring the future. Saint Petersburg: Nauka, 2008. 193—198
11 郭丽, 李金岭. s7123a 观测实验测角归算结果讨论, 飞行器测控学报, 2007, 26: 30—35
12 平劲松, 黄倩, 鄢建国, 等. 基于嫦娥一号卫星激光测高观测的月球地形模型 CLTM-s01. 中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学, 2008, 38: 1601—1612
13 岳宗玉, 刘建忠, 吴淦国. 应用面向对象分类方法对月球撞击坑进行自动识别. 科学通报, 2008, 53: 2809—2813
14 王鹏基, 张熇, 曲广吉. 月球软着陆飞行动力学和制导控制建模与仿真. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39: 521—527

·动 态·

绕月探测工程科学探测成果公布

嫦娥一号是我国发射的第一个月球轨道探测器, 是中国月球探测工程“绕”、“落”、“回”发展战略的第一步. 嫦娥一号于 2007 年 10 月 24 日成功发射, 2009 年 3 月 1 日受控撞月, 得到了大量月球数据产品, 填补了我国在月球和深空探测领域的空白.

在《中国科学: 地球科学》2010 年第 3 期上, 由中国科学院国家天文台李春来研究员担任第一作者撰写的《嫦娥一号图像数据处理与全月球影像制图》与《嫦娥一号激光测距数据及全月球 DEM 模型》论文对上述问题作了初步回答. 主要从以下方面对取得的初步科研成果进行了梳理和汇总: (ⅰ) 数据的处理和初步研究成果; (ⅱ) 产生的知识产权, 建立的标准体系以及已发表的论文和出版物; (ⅲ) 数据发布与数据应用.

两篇论文着重阐述了两项优于国际水平的科研成果和自主知识产权技术. 《嫦娥一号图像数据处理与全月球影像制图》分析了 CCD 图像数据的特点、获取方法和数据质量, 系统探讨了图像数据的处理方法和流程, 对图像镶嵌拼接方法也进行了深入研究, 这些技术是最终制作出了我国第一幅覆盖月球的遥感影像图幕后的基础——“中国首次月球探测工程全月球影像图”. 《嫦娥一号激光测距数据及全月球 DEM 模型》介绍了用于月表地形测量的激光高度计的数据特点, 对数据处理方法进行了解析, 并描述了制作空间分辨率为 3 km 的全月 DEM 的方法以及该模型的作用.

研究结果表明, 利用嫦娥一号 CCD 图像数据制作的“中国首次月球探测工程全月球影像图”, 是迄今为止国际上变形程度最低、位置精度最高、图像色调最一致和空间覆盖最完整的全月球影像图, 将成为新的月球“标准像”——月球基础地图(Lunar Base Map) ; 嫦娥一号激光高度计的全月 DEM 模型采用的测点数最多, DEM 的地形地貌细节表达层次分明、清晰可辨, 在精度和分辨率上明显优于美国, 与日本相当, 也达到了国际先进水平.

不仅如此, 嫦娥一号还成功地利用微波探测仪对月壤特征、厚度进行了探测, 获得多次覆盖的四波段全月球亮度温度数据, 这在国际上尚属首次; 高能粒子探测器和太阳风离子探测器也获得了大量有意义的数据; 对 U, Th, K, Mg, Al, Si, Fe 和 Ti 共 8 类元素的含量分布、其他元素的区域性分布, 月面 KREEP 岩、月海玄武岩和高地斜长岩的分布图也正在绘制中. 以上成果, 均在论文中进行了具体阐述.

嫦娥一号任务的圆满完成, 实现了我国探测器首次到达地外天体的突破, 是继人造地球卫星升空、载人航天飞行之后, 我国航天事业发展的第三座里程碑, 其科学探测成果将为后续月球探测工程奠定坚实的基础.

1. 李春来, 任鑫, 刘建军,等. 嫦娥一号激光测距数据及全月球 DEM 模型. 中国科学: 地球科学, 2010, 40: 281—293
2. 李春来, 刘建军, 任鑫, 等. 嫦娥一号图像数据处理与全月球影像制图. 中国科学: 地球科学, 2010, 40: 294—306

(信息来源: 科学技术部《基础科学研究快讯》)