

论文

# 利用嫦娥一号卫星受控撞月过程的影像数据进行撞月点定位

刘建军<sup>①\*</sup>, 任鑫<sup>①</sup>, 邹小端<sup>①</sup>, 王文睿<sup>①②</sup>, 牟伶俐<sup>①</sup>, 李春来<sup>①</sup>

① 中国科学院国家天文台, 北京 100012;

② 武汉大学测绘学院, 武汉 430079

\* E-mail: liujj@nao.cas.cn

收稿日期: 2011-02-13; 接受日期: 2011-08-10

国家自然科学基金(批准号: 10903017)和 863 计划(编号: 2010AA122202)资助

**摘要** 许多月球探测任务都实施了撞月实验. 撞月点位置的预报和确定主要数据来源是地面测控提供的外推轨道预报数据、实测轨道数据和地基望远镜观测数据. 由于大部分月球探测任务都携带有相机, 利用撞月过程中获取的影像数据, 结合月表地形数据, 提出一种计算卫星撞月点的新方法, 并利用该方法验证了已发布的撞月点位置.

**关键词**  
嫦娥一号  
撞月  
定位

2007年10月24日18时5分在西昌卫星发射中心, 长征三号甲运载火箭将嫦娥一号卫星成功送入太空, 拉开了我国首次月球探测工程的序幕. 经过1年多的在轨运行, 2009年3月1日嫦娥一号卫星实施受控撞月, 16时13分(北京时间)降落于月球正面丰富海的预定撞击区域, 为我国探月一期工程画上了圆满的句号<sup>[1]</sup>.

迄今, 包括 Lunar Prospector, SMART-1, Chang'E-1, KAGUYA 和 Lcross 在内的许多月球探测任务都实施了撞月实验, 其目的主要是进行飞控试验和检测月球表面有没有水存在, 并尽量减少月球轨道的空间碎片. 在撞月过程中, 对撞月点位置的确定是非常有意义的环节, 目前主要数据来源是地面测控系统提供的外推预报轨道数据、实测轨道数据以及地基光学观测数据. 此外, 在卫星撞月的瞬间, 地面与卫星之间的通讯由于硬件的损毁而中断, 以此来判断卫星撞上月球的时间, 然后结合轨道预报和实测数据, 进一步精确确定落点的位置, 是目前判断卫星撞

击月球位置的常用方法.

据欧洲航天局<sup>[2]</sup>报道([http://www.esa.int/esaSC/SEMWX03VRRE\\_index\\_0.html](http://www.esa.int/esaSC/SEMWX03VRRE_index_0.html)), 2006年9月3日 SMART-1 实施了撞月试验, 05:42:21.759(格林尼治时间)卫星向地球发出了最后一帧信号, 05:42:22.394 位于澳大利亚塔斯马尼亚州霍巴特的 JIVE 射电望远镜测量到信号丢失, 实际撞月时间与根据 SMART-1 轨道力学预报的时间 05:42:20 非常接近. 计算出的撞月点坐标为 46.20°W, 34.4°S, 与夏威夷 CFHT 望远镜观测到的红外撞击闪亮点位置非常接近.

据日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)报道([http://www.kaguya.jaxa.jp/en/communication/position\\_e.htm](http://www.kaguya.jaxa.jp/en/communication/position_e.htm)), 当地时间 2009年6月11日3时25分, KAGUYA 实施了撞月试验, 撞月点经纬度为 65.5°S, 80.4°E, 位于月球吉尔撞击坑附近. 澳大利亚的 AAT 望远镜和印度的阿布山天文台利用近红外望远镜观测到的月面撞击闪亮点, 与报道的时间和撞月点位置也比较吻合.

根据美国航空航天局(NASA)报道, 2009年10月7日, LCROSS 实施了撞月实验. 11:31:19(UTC), Centaur 火箭降落在月表指定撞击点, Shepherding 飞行器上的科学仪器拍摄到了 Centaur 的降落和撞击过程; 4分钟后, 11:35:45(UTC), Shepherding 飞行器沿相同轨迹降落在月表, 并利用搭载的科学仪器对 Centaur 撞击形成的烟雾进行了物质分析.

据探月与航天工程中心报道([http://210.82.31.82/index.asp?modelname=2009\zt\\_luoyue\index\\_zt\\_cely1](http://210.82.31.82/index.asp?modelname=2009\zt_luoyue\index_zt_cely1)), 北京时间2009年3月1日16时13分10秒 CE-1 卫星实施了撞月, 撞月点经纬度为 52.36°E, 1.5°S, 位于月球正面丰富海内. 但遗憾的是, 由于地面天气原因, 以及预定撞月点位于光照区, 地面未能观测到撞击点附近的撞击闪亮现象, 也就无法用地基观测来进行印证.

本文利用撞月过程中, CE-1 搭载的 CCD 相机获取的星下点影像数据, 结合已经发布的全月球影像数据和地形图数据, 量测近 1500 km 飞行路径上可识别的撞击坑大小和飞越该撞击坑的时间, 计算卫星在月球引力状况下的月球参考球面上的切向速度, 来确定撞月点的月面坐标.

## 1 相机技术指标和撞月过程图像特点

### 1.1 主要技术指标

嫦娥一号卫星上搭载光学传感器是一台推扫相机, 每行线阵的像元数为 512 列, 相机的扫描速度设为  $11.89 \text{ f s}^{-1}$ , 以保证卫星在 200 km 高的轨道上能够获得连续的图像数据. CCD 相机的主要技术和性能指标见表 1<sup>[3]</sup>.

表 1 CCD 相机的主要技术指标

名称	指标
帧频(帧 $\text{s}^{-1}$ )	11.89
光谱范围( $\mu\text{m}$ )	0.5~0.75
量化等级	8 bit
曝光时间(ms)	3.2, 7, 20, 84
成像宽度	60 km(@200 km 轨道)
像元空间分辨率(星下点)(m)	120
线阵像元数	512
像元尺寸	$14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$
线阵数	3
线阵间夹角	$16.7^\circ$

### 1.2 撞月过程图像数据的特点

根据飞控计划, 2009年3月1日15时36分, 嫦娥一号卫星从南向北飞行, 进行点火制动, 开始减速; 15时58分8秒, 卫星制动结束, 开始在月球的引力作用下降落, 撞击月球. 嫦娥一号卫星下传图像数据时间码记录的相机开始工作的时间为北京时间 15:58:06.858, 最后一行图像数据的时间为北京时间 16:13:06.463, 因此嫦娥一号受控撞月期间, 在撞击月表前扫描成像的时间共计 14 分钟 59.605 秒.

CCD 立体相机设计是在 200 km 高的圆轨道上, 采用线阵推扫的方式, 以固定的帧频( $11.89 \text{ 帧 s}^{-1}$ )获取月面图像, 图像数据的空间分辨率为 120 m. 这种设计使得 CCD 相机在 200 km 高的轨道上恰好能实现相邻扫描行间对月表无缝、连续的覆盖. 由于 CCD 相机的视角、帧频和 CCD 大小都不能改变, 当轨道降低时, 卫星相对月面的速度发生变化, 图像的空间分辨率提高, 此时沿星下点轨迹方向相邻两扫描行对月表的覆盖不再是连续的, 轨道越低, 卫星地速越大, 两扫描行之间的距离越大, 漏扫的面积越大.

因此, 撞月过程 CCD 图像数据的特点(图 1, 表 2)如下:

- (1) 行扫描数据.
- (2) 相邻两行之间不相接, 间隔扫描, 月面覆盖

表 2 CCD 相机典型轨道高度的图像成像情况

轨道高度(km)	成像幅宽(km)	分辨率(m)	成像情况
200	60	120	每行连续成像
100	30	60	约每 2 行成像 1 行
50	15	30	约每 4 行成像 1 行
20	6	12	约每 10 行成像 1 行

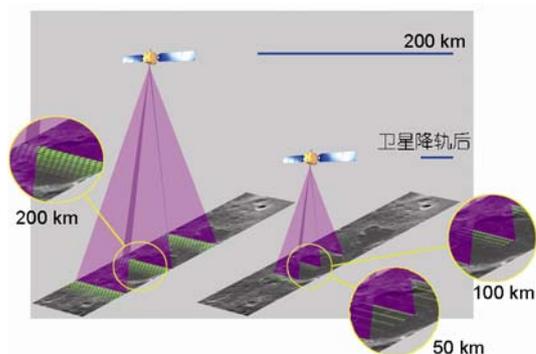


图 1 嫦娥一号 CCD 立体相机线阵扫描示意图

不连续, 轨道越低, 间隔越大。  
 (3) 像元分辨率是变化的。  
 (4) 幅宽是变化的。

## 2 数据处理方法

嫦娥一号 CCD 立体相机在受控撞月过程中获得的图像数据与在 200 km 轨道高度上的数据有明显的差异, 随着卫星轨道高度的降低, 原始影像数据的空间分辨率虽然提高了, 但是漏扫现象越来越严重, 影像质量也明显下降, 在卫星接近月面的时候, 月面纹理信息已经很难分辨。

为了提高影像质量, 需要对影像数据进行辐射校正和几何校正, 特别是对月面漏扫区域的数据补齐, 尽可能恢复月面纹理原貌。CCD 立体相机在受控落月过程中, 随着轨道高度的降低, 获取的影像数据在处理方法上与 200 km 高获取的图像数据既有相似的地方, 也有特殊要求, 数据处理过程主要包括: 辐射校正、光度校正、行补齐处理、几何校正等。撞月过程影像数据经过处理后, 与已发布的全月球影像图数据和 DEM 数据<sup>[4,5]</sup>进行图像分析, 提取同名撞击坑, 分析嫦娥一号卫星的落月位置。

### 2.1 影像数据处理

对受控撞月过程中获得的图像数据, 主要进行了以下处理:

- (1) 辐射校正. 使用地面定标试验获得的相对定标系数, 对图像进行相对定标处理。
- (2) 光度校正. 利用测控系统提供的星历数据, 解算每行线阵的光度校正参数. 采用 Lommel-Seeliger 模型<sup>[6,7]</sup>, 对每个像素进行光度校正, 将所有像元的辐射值归一化到同一光照条件下。
- (3) 行补齐处理. 根据两相邻扫描行在月面的距离, 当前时刻月面空间分辨率, 计算出漏行的个数,

漏行上每个像素值根据相邻行上对应像素位置上的灰度值采用两阶拉格朗日插值计算得到该像素的灰度值, 在插值计算各行灰度值的同时采用相同的方法插值计算各行的时间码信息. 主要包括漏扫距离计算、空间分辨率计算、行补齐等步骤。

(4) 几何校正. 利用相机参数和卫星撞月过程的轨道、姿态数据, 同时考虑月球自转、形状以及各坐标系之间的转换, 计算像元点对应的月面位置, 进行相对定位; 然后, 将上述处理的影像配准到已发布的全月球影像图数据底图上。

### 2.2 撞月点经纬度解算

#### 2.2.1 撞击坑信息提取

撞击坑的识别和测量, 是嫦娥一号卫星飞行高度、速度以及星下点识别的最重要信息. 我们利用经过图像处理后的撞月影像图提取撞击坑信息, 识别出的撞击坑用于两个目的, 一是用于计算卫星沿参考球面经线和纬线方向上的速度, 二是用于确定撞月点坐标的起算点。

撞击坑信息的提取包括识别撞击坑边缘, 提取撞击坑沿轨道方向的直径, 找出直径端点与撞击坑边缘对应的图像数据行数, 并确定卫星获取该行数据的时间码信息。

识别撞击坑边缘时选取了降落轨道影像上能够清晰分辨且形状规则的撞击坑, 取该坑体的外切圆作为撞击坑的边缘. 采用 DEM 和影像数据叠加的办法, 提取撞击坑的剖面, 在撞击坑边缘地形最高处, 做坑体的外切圆, 然后测量该外切圆沿飞行方向的直径, 再根据该直径(飞行方向)与外切圆的交点(切点 A 和 B), 找出对应图像数据的行数, 得到卫星获取该行数据的时间码信息(如图 2). 为计算、核实嫦娥一号卫星受控撞月无动力段的速度, 我们选取了 2 个撞击坑(如表 3)。

表 3 用于速度计算的撞击坑信息表

序号	时间码		撞击坑名称	撞击坑中心经纬度	对应的行序号		直径 <sup>a)</sup> (m)
	撞击坑下缘	撞击坑上缘			撞击坑下缘	撞击坑上缘	
1	2009-03-01	2009-03-01	Watt E	(55.068°E, 49.865°S)	902	1261	9800
	15:58:22.013	15:58:28.052					
2	2009-03-01	2009-03-01	Rheita G	(54.305°E, 40.820°S)	11510	12140	14449
	16:01:11.273	16:01:20.103					

a) 直径数据来源于利用 DEM 测量的撞击坑剖面边缘最高点间的距离

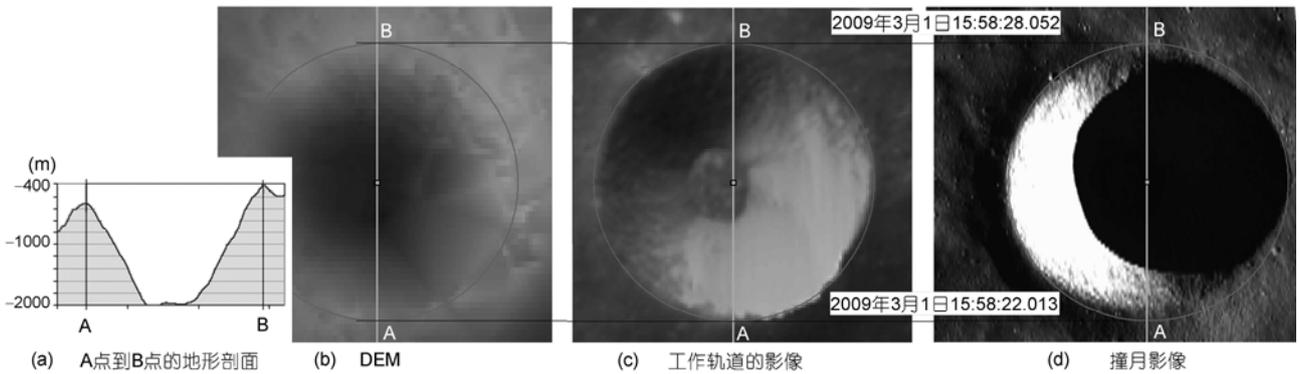


图2 撞击坑信息提取和量测图

(a) 撞击坑地形剖面; (b) 撞击坑 DEM 高程数据; (c) 200 km 工作轨道获取的影像图; (d) 撞月轨道的影像图. A 和 B 分别为撞击坑的下缘和上缘

为了计算、确定、追踪嫦娥一号卫星受控撞击过程星下点的位置, 最终确定嫦娥一号的撞击点, 我们通过人工识别, 将撞月影像与 200 km 高轨道获取的全月球影像进行匹配, 找出所有能识别的同名撞击坑, 提取撞击坑中心对应的经纬度和时间码信息. 在受控撞月图像中, 共计识别出了 27 个同名撞击坑(如表 4), 其位置和时间信息用于追踪嫦娥一号的星下点轨迹, 并计算撞月点坐标.

### 2.2.2 卫星在参考球面上切向速度的计算

利用第一类的两个撞击坑, 计算得到卫星在月球表面的切向速度, 然后归算到月球参考球面上, 并分解为沿参考球面经线和纬线方向上的速度.

(1) 根据撞击坑的直径以及星下点经过撞击坑所用的时间, 计算卫星在月球真实表面的速度, 计算公式如下:

$$v = \frac{D}{\Delta t}, \quad (1)$$

其中,  $D$  为沿星下点轨迹方向的撞击坑直径;  $\Delta t$  为星下点经过撞击坑所用的时间.

利用表 3 撞击坑的数据计算, 嫦娥一号卫星经过两个撞击坑的速度分别为  $1.6228$  和  $1.6364 \text{ km s}^{-1}$ .

(2) 由已有月表 DEM 量测月表相对于参考球面的高差  $\Delta h$ , 即可将速度  $v$  归算到半径为  $R$  的参考球面上(如图 3), 计算公式如下:

$$\frac{v}{v_h} = \frac{R + \Delta h}{R}, \quad (2)$$

其中,  $v$  为卫星在月球真实表面的速度;  $v_h$  为卫星

表4 受控撞月图像和全月影像图中识别出的同名撞击坑的位置和时间码信息

序号	撞击坑中心经度(E)	撞击坑中心纬度(S)	对应的时间码信息	撞击坑直径(m)
1	53.339°	25.081°	16:06:03.345	650
2	53.386°	24.697°	16:06:10.410	836
3	53.218°	23.718°	16:06:28.835	1398
4	53.327°	23.546°	16:06:31.333	1215
5	53.180°	23.045°	16:06:40.205	1130
6	53.050°	20.608°	16:07:24.821	800
7	53.043°	19.463°	16:07:46.694	733
8	53.009°	18.973°	16:07:54.606	533
9	52.976°	18.337°	16:08:06.194	1273
10	52.976°	17.794°	16:08:16.065	1066
11	52.879°	16.554°	16:08:39.266	713
12	52.869°	15.483°	16:08:58.105	562
13	52.847°	15.419°	16:08:59.283	350
14	52.853°	14.736°	16:09:11.359	766
15	52.770°	14.201°	16:09:21.331	9000
16	52.754°	13.970°	16:09:25.489	859
17	52.741°	12.298°	16:09:56.753	899
18	52.718°	12.232°	16:09:57.025	1036
19	52.715°	12.233°	16:09:57.138	1200
20	52.720°	11.555°	16:10:09.000	2342
21	52.684°	11.281°	16:10:14.300	918
22	52.680°	11.062°	16:10:18.028	385
23	52.647°	10.641°	16:10:26.136	1334
24	52.542°	8.153°	16:11:10.168	566
25	52.504°	7.628°	16:11:20.245	1583
26	52.530°	7.453°	16:11:23.000	333
27	52.411°	6.337°	16:11:43.625	300

在参考球面上的速度;  $R$  为参考球面半径( $R=1737.4$  km);  $\Delta h$  为月表相对于参考球面的高差.

由表 3 中两个撞击坑的计算结果, 得到参考球面 ( $R=1737.4$  km) 上嫦娥一号卫星的速度分别为  $1.6238$  和  $1.6374$  km s<sup>-1</sup>, 二者取平均值得到  $v_h=1.6306$  km s<sup>-1</sup>.

(3) 嫦娥一号卫星在撞月过程, 由南向北飞行, 由测控提供的轨道倾角为  $91.1^\circ$ , 因而可以分解计算卫星在参考球面上经线和纬线方向(如图 4)上的速度分量, 计算公式为

$$\begin{aligned} v_{x_0} &= v_h \cdot \sin i, \\ v_{y_0} &= v_h \cdot \cos i, \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $v_{x_0}$  为参考球面的纬线方向上的速度;  $v_{y_0}$  为参考球面的经线方向上的速度;  $v_h$  为星下点在参考球面上的速度;  $i=1.1^\circ$  为轨道面与参考球面的经线方向夹角.

计算结果表明, 嫦娥一号卫星在经过该撞击坑时的纬向速度  $v_{x_0}=0.0313$  km s<sup>-1</sup>, 经向速度  $v_{y_0}=1.6303$  km s<sup>-1</sup>.

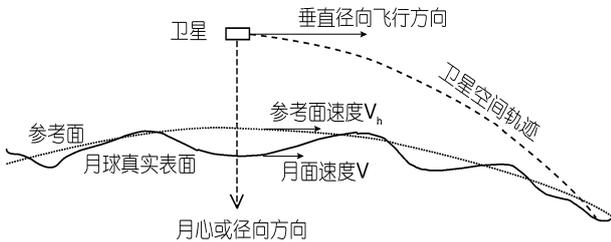


图 3 卫星在不同高程的速度示意图

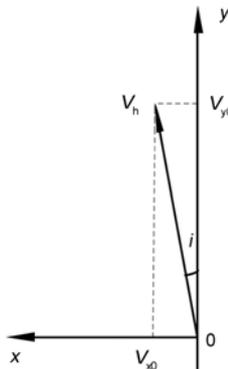


图 4 卫星在参考面的速度分解

其中,  $x$  轴沿纬线方向向西,  $y$  轴沿经线方向向北

### 2.2.3 撞月点经纬度解算

卫星撞月过程可看做有初速度的平抛运动, 星下点投影在参考球面的  $v_{x_0}$  和  $v_{y_0}$  速度保持不变, 一定时间间隔内沿参考球面纬线方向和经线方向的理论位移如下:

$$\begin{aligned} s_x &= v_{x_0} \cdot \Delta t, \\ s_y &= v_{y_0} \cdot \Delta t, \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $s_x, s_y$  分别为沿参考球面的纬线方向和经线方向的位移.

由于月球自转因素的影响, 卫星撞月过程中, 撞月点将发生偏离. 根据卫星在  $x$  轴,  $y$  轴方向的动力学方程, 可计算科里奥利力引起的  $x$  轴和  $y$  轴方向上的落点偏离分量<sup>[8]</sup>, 偏离公式如下:

$$\begin{cases} \Delta x = -\frac{1}{3} g \omega t^3 \cos \theta - \omega v_{y_0} \sin \theta t^2, \\ \Delta y = v_{x_0} \omega t^2 \sin \theta. \end{cases} \quad (5)$$

撞月过程中, 月球自转本身引起的纬线方向位移如下:

$$\Delta l_s = R \omega t \cos \phi. \quad (6)$$

其中,  $\Delta x$  和  $\Delta y$  分别表示科里奥利力引起的  $x$  轴和  $y$  轴方向上的落点偏离量,  $\Delta l_s$  表示下落过程中月球自转引起  $x$  轴方向上的位移;  $v_{x_0}, v_{y_0}$  为  $x$  轴和  $y$  轴方向上的初始速度;  $\theta$  为起算点纬度的绝对值;  $\omega$  为月球自转角速度, 取  $2.66 \times 10^{-6}$  rad s<sup>-1</sup>;  $g$  为月球重力加速度, 取  $1.62$  m s<sup>-2</sup>;  $t$  为起算点到撞月点的时间, 起算点时间由起算撞击坑确定, 撞月点时间以实际星上上传的最后一帧图像数据记录的时间码来计算, 为北京时间 2009 年 3 月 1 日 16:13:06.463.

(1) 撞月点纬度

$$\phi = \phi_0 + \frac{(s_y - \Delta y)}{R}. \quad (7)$$

其中,  $\phi_0$  为起算点纬度.

(2) 撞月点经度

$$\lambda = \lambda_0 - \Delta \lambda. \quad (8)$$

其中,  $\lambda_0$  为起算点经度;  $\Delta \lambda = \frac{s_x - \Delta x + \Delta l_s}{R \cdot \cos \phi}$ .

利用上述提取的 27 个同名撞击坑, 分别作为起算经纬度, 计算得出的撞月点位置如图 5 中空心圆标示.

### 2.2.4 撞月点位置改正

理论上,所有起算撞击坑计算得到的撞月点经纬度应该是同一点,但实际上,随着起算点和起算时间的变化,起算点推算的距离越远、时间越长,撞月点经纬度偏离公布的“撞月点”位置越远,表现为误差累积的状况,主要原因是速度的量算误差。

(1) 撞击坑上下缘对应的图像总行数统计误差,由于两个撞击坑的地形起伏在 1~1.5 km 左右,导致图像总行数统计存在误差。

(2) 撞击坑直径量算采用了 3 km 分辨率的 DEM 数据和 120 m 分辨率的影像数据,量算过程存在误差。

(3) 真实月表速度归算到参考椭球面速度时,高差  $\Delta h$  是用撞击坑高程的平均值计算的,归算后产生误差。

(4) 参考椭球面速度是两次量测的平均值,两个初始速度调整了约  $6.8 \text{ m s}^{-1}$ ,从第一个起算撞击坑到撞月点累积时间约 7 min,可能导致位置偏差约 3 km。

为了减小上述速度累积误差,对所有起算点计算得到的撞月点经纬度进行了统计分析,通过最小二乘法拟合计算得到撞月点坐标为  $x=52.229^\circ \pm 0.071^\circ$ ,  $y=-1.800^\circ \pm 0.040^\circ$ 。上述撞月点经纬度的改正量分别为  $\Delta x=0.00138\Delta t$  和  $\Delta y=0.00134\Delta t$ ,改正后撞月点位置分布如图 5 中“+”标示。

### 3 撞月点定位讨论

李金岭等<sup>[9]</sup>利用 2009 年 3 月 1 日嫦娥一号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(表 5)。结果表明,CE-1 卫星的落月时刻(最后信号的发出时刻)为 8:13:06.514(UTC),落月点在月球主轴系中的月面经纬度和高度分别为  $52.2732^\circ \text{E}$ ,  $1.6440^\circ \text{S}$ ,  $-3.56 \text{ km}$  (月球参考半径取为 1738 km),误差分别为  $0.0040^\circ$ ,

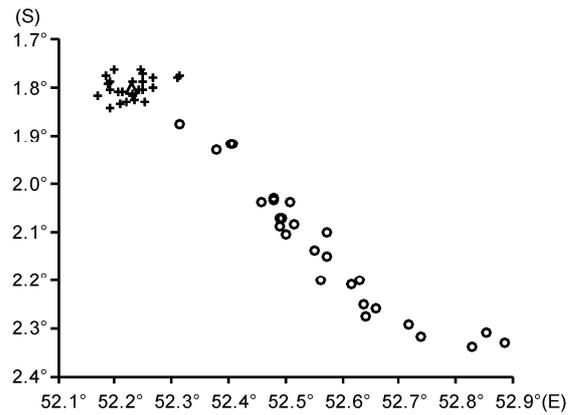


图 5 撞月点的位置分布图

空心圆为改正前的撞月点;十字为改正后的撞月点;三角形为拟合计算得到的撞月点

$0.0168^\circ$ ,  $0.18 \text{ km}$ . 对应的月面切向误差为  $0.52 \text{ km}$ , 三维定位误差为  $0.55 \text{ km}$ 。

曹建峰等<sup>[10]</sup>利用统计定轨方法,联合 USB 和 VLBI 数据确定嫦娥一号卫星撞月点的位置(表 5)。通过对撞月前  $100 \text{ km} \times 15 \text{ km}$  环月轨道的测轨数据进行分析,确定了测距系统误差及光压系数参数,并应用于撞月段的短弧轨道计算。将地面接收到卫星信号的最后时刻判定为撞击时刻 8:13:07.020(UTC),根据撞月轨道计算了该时刻嫦娥一号在月固系中的位置,得到 CE-1 撞击点  $52.255^\circ \text{E}$ ,  $1.657^\circ \text{S}$ , 高程  $-2562 \text{ m}$  (相对于 1738 km 球面),保守估计落点计算总误差优于 300 m。

李培佳等<sup>[11]</sup>以测站最后一点接收信号扣除光行时间后的时刻 8:13:07.020(UTC)作为 CE-1 撞击月面的时刻(表 5)。利用 5 阶多项式、USB 测距+VLBI 时延+VLBI 时延率数据的定轨策略定轨,计算得到 CE-1 撞击点为  $52.2549^\circ \text{E}$ ,  $1.63091^\circ \text{S}$ , 高程  $-2575.4 \text{ m}$  (相当于 1738 km 球面)。

与这些撞月点位置比较,本方法解算的撞月点位置存在差异的原因主要有:

表 5 不同方法获得的撞月点时间和位置信息

	本方法解算值	李金岭等 <sup>[9]</sup>	曹建峰等 <sup>[10]</sup>	李培佳等 <sup>[11]</sup>	新闻发布值
撞月时间	BT 16:13:06.463	UTC 8:13:06.514	UTC 8:13:07.020	UTC 8:13:07.020	BT 16:13:10
经度(E)	$52.229^\circ \pm 0.071^\circ$	$52.2732^\circ \pm 0.0040^\circ$	$52.255^\circ$	$52.2549^\circ$	$52.36^\circ$
纬度(S)	$1.800^\circ \pm 0.040^\circ$	$1.6440^\circ \pm 0.0091^\circ$	$1.657^\circ$	$1.63091^\circ$	$1.50^\circ$

(1) 本方法撞月点与新闻发布撞月点的差异主要是撞月时刻相差约 3.5 s, 引起的位置偏差约为 5.7 km, 约  $0.19^\circ$ .

(2) 本方法撞月点量测的底图是全月球影像图数据, 平面定位精度在 100 m 到 1.5 km 左右<sup>[4]</sup>, 约  $0.003^\circ\sim 0.05^\circ$ .

(3) 由于撞月过程中只有推扫成像方式的 CCD 立体相机开机工作, 撞月过程获得的图像不连续, 撞击坑信息提取和量测存在不确定性, 造成卫星速度, 以及起算撞击坑位置和时间不确定性, 经纬度最大偏差分别为  $0.071^\circ$  和  $0.040^\circ$ .

本方法确定的撞月时刻是北京时间 16:13:06.463, 位置为  $52.229^\circ\text{E}$ ,  $1.800^\circ\text{S}$ , 与发布值的偏差在上述误差分析的范围内, 说明利用影像数据确定嫦娥一号撞月点位置的方法是可行的.

**致谢** 衷心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, 感谢审稿专家所提的宝贵意见.

## 参考文献

- 1 欧阳自远, 李春来, 邹永廖, 等. 绕月探测工程的初步科学成果. 中国科学: 地球科学, 2010, 40: 261–280
- 2 Burchell M J, Robin-Williams R, Foing B H. The SMART-1 lunar impact. *Icarus*, 2010, 207: 28–38
- 3 赵葆常, 杨建峰, 汶德胜, 等. 嫦娥一号卫星 CCD 立体相机的设计与在轨运行. 航天器工程, 2009, 18: 30–36
- 4 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
- 5 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
- 6 McEwen A S. A precise lunar photometric function. *Lunar Planet Sci*, 1996, 27: 841–842
- 7 McEwen A S, Eliason E, Lucey P, et al. Summary of radiometric calibration and photometric normalization steps for the Clementine UVVIS images. *Lunar Planet Sci*, 1998, 29: 1466–1467
- 8 张忠厚. 考虑地球自转时的抛物运动. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24: 281–283
- 9 李金岭, 郭丽, 钱志瀚, 等. 嫦娥一号卫星受控撞月轨迹测量与落月点坐标分析. 科学通报, 2010, 55: 752–757
- 10 曹建峰, 黄勇, 胡小工, 等. USB 与 VLBI 联合确定“嫦娥一号”卫星撞月点的位置. 宇航学报, 2010, 31: 1724–1729
- 11 李培佳, 胡小工, 黄勇, 等. 运动学统计定轨法应用于 CE-1 落月轨迹确定. 天文学进展, 2010, 28: 290–300

## 4 结论

许多月球探测任务都实施了撞月实验, 撞月点位置的预报和确定主要数据来源是地面测控提供的外推轨道预报数据、实测轨道数据和地基望远镜观测数据. 本文利用撞月过程中获取的影像数据, 结合月表地形数据, 提出了计算卫星撞月点的方法, 并利用该方法验证了已发布的撞月点位置.

我国探月二期工程嫦娥三号任务将进行月面软着陆探测, 需要对软着陆点进行准确定位. 利用射电测距与 VLBI 跟踪, 再结合探测任务所携带的降落相机, 以及已有的高精度月面影像图和地形图, 进行落月段的轨迹测定和落月点的坐标分析, 有望获得更准确的着陆点位置, 以便进一步的科学研究.