

文章编号 1004-924X(2015)10-2761-07

基于深空探测器的在轨天体合影成像及应用

邹 昕*, 顾 征, 陈丽平, 王 彤, 薛 博
(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要:提出了基于深空探测器对太空中的目标天体合影成像的新策略。首先,基于相机的性能参数建立视场模型,然后对天体和探测器轨道动力学模型、探测器姿态数据以及光照条件进行综合分析,最终确定了拍摄用相机以及成像时刻与成像姿态等成像策略。以探月三期月地高速再入返回飞行任务的设计为例,研究计算了对地月合影的拍摄相机、成像时刻与成像姿态,并利用在轨探测效果仿真系统进行了仿真实验。结果表明:该成像策略能够根据预定的天体合影的构图要求便捷地计算出拍摄条件,结果准确、角度偏差在 1° 范围内。该成像策略还成功应用于探月三期月地高速再入返回飞行器的实际任务中,在距离月球 1.40×10^4 km和距离地球 3.91×10^5 km处,获得了我国航天史上首张地月合影图像,为后续深空探测器在轨天体合影提供了参考依据。

关键词:深空探测器;天体合影成像;在轨成像;空间相机

中图分类号:V248.1;V557 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152310.2761

On orbit imaging of two celestial bodies based on deep space explorer and its application

ZOU Xin*, GU Zheng, CHEN Li-ping, WANG Tong, XUE Bo

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: zouxin501@163.com

Abstract: The new imaging strategy based on a deep space explorer was proposed for two celestial bodies on-orbit operation. A field of view model was established based on the performance parameters of a camera. Then, the orbit dynamic model of celestial bodies and the explorer, attitude data of the explorer, and illumination condition were analyzed synthetically. Finally, the camera of shooting, the time of imaging and the attitude of imaging were defined. By taking the design of circumlunar return and reentry spacecraft of the 3rd phase of China lunar exploration program as an example, the camera, imaging time, and the attitude of imaging were calculated. The imaging strategy was verified using the on-orbit exploration effect simulation system. The results show that the strategy can obtain imaging conditions expediently and accurately based on the requirement of composition of projected celestial body and the angular deviation is in the range of 1° . The imaging strategy for two celestial bodies was successfully applied to circumlunar return and reentry spacecraft. By accurate imaging, the earth-lunar images are achieved at lunar distance of 1.40×10^4 km and at earth distance of 3.91×10^5 km for

收稿日期:2015-04-14;修订日期:2015-05-26.

基金项目:国家中长期科技发展规划重大专项资助项目

the first time in space history in China. This imaging strategy might be used as a reference for two celestial bodies based on the deep space explorer on-orbit operation.

Key words: deep space explorer; two celestial bodies imaging; on-orbit operation; space camera

1 引言

对未知宇宙空间的不断探索是人类社会发展进步的不懈追求。为了获得宇宙空间所展示的壮丽的太空图景,人们将深空探测器发射到太空中,以其独特的视角对天体合影。这虽然不是相关探测器的主要任务,但却是人类对未知深邃宇宙探索的必经之路,所以其影响力和关注度很高。这些探测器获取的天体合影图片堪称经典,不仅大大提高了工程展示度,也让人类对地球、月球乃至整个太空的认知提高到一个新的层次。

早期大多数航天领域采用的天体合影成像策略是先分别对单个天体成像,然后在地面合成为天体合影图像^[1-2]。这种成像策略的缺点是不在同一时刻对天体合影成像,得到的图像不是天然的太空图像,而是经过地面合成处理的,不能真实地反应天体间的运行轨道、位置、光照等关系,而且地面处理工作繁琐。此外,用于拍摄天体的相机大都是望远镜或者长焦相机,相机的视场角较小,在拍摄天体合影图像时,往往需要通过相机配置的转动机构多次调整光轴指向或用探测器多次调整姿态等方式来扩大相机视场,拍摄多幅图像,然后在地面将这一系列的图像拼接成为天体合影图像^[3-5]。这种成像策略的缺点是探测器的在轨动作频繁、地面操作复杂,存在风险,而且地面得到的图像还需进行拼接处理。

随着深空探测技术的发展,探测器在轨对天体合影成像的趋势是一台相机一次拍照即可完成。这样可简化在轨飞行的探测器和地面的图像处理工作,但是探测器要在预定拍摄位置一次性成功获取天体合影的图像,时机、姿态、光照等所有拍摄条件均需要提前确定且准确可靠,以保证对多个天体合影的正确性,因此提前进行多个天体合影的成像分析就显得尤为重要^[6]。

目前,我国对深空探测器在轨天体合影的成像策略研究都集中在探测器轨道动力学仿真层面,更关注探测器及其轨道,比如 AGI 公司提出

的 STK 系列软件,其目的都是要在计算机屏幕上形象而逼真地模拟任务轨道过程^[7-8];而探测器上相机天体合影的成像分析只是基于 STK 软件先预定一个时间段,然后调整探测器的姿态,使在探测器上相机的光轴正确指向需拍摄的某个目标天体或者其中间位置,最后进行相机成像仿真^[9-11]。由于此策略的成像效果不能直观呈现,若一次成像仿真效果不佳,就要更换拍摄时间,反复迭代分析和重复工作,直到成像仿真效果满足要求为止。

目前,国内外公开文献中尚未见到关于深空探测器对天体合影成像策略的技术报道。为了准确、系统、直观地确定和分析深空探测器对在轨天体的合影成像,本文提出了一种适用于深空探测器在轨天体合影的成像策略,简化了传统的反复迭代的分析过程,可以根据预先设定的天体合影构图要求,便捷地计算出对应的拍摄条件,进而最终确定最佳的成像方案,具有灵活性好、准确度高等特点。

2 天体合影成像策略

2.1 成像任务分析

目标天体是指除太阳外的宇宙空间的物质形体,主要包括行星、卫星、小行星、彗星、流星、其他星系的恒星等。由于太阳的光亮度会对普通相机的光电敏感器件造成损伤,所以一般相机若不使用滤光片,则不能直接对太阳成像。

进行天体合影成像时,首先要基于深空探测器上相机的性能参数,探测器的任务特点及飞行轨道,针对目标天体、探测器、太阳的位置关系,计算目标天体在相机视场内所占的像素个数。同时也要考虑光照条件,确定能拍摄到的目标天体。若要利用探测器上的一台相机一次成像完成天体合影,则需要在预定拍摄位置一次性成功获取天体合影图像,因此所有拍摄条件包括相机、时刻、光照、姿态等均需要提前确定且准确可靠,以保证天体合影的正确性。

2.2 拍摄相机的选取

根据相机的性能参数建立视场模型,如图 1 所示。根据探测器既定的飞行轨道、目标天体和太阳的位置关系,通过计算目标天体在相机视场内所形成的张角和光照情况,结合拍摄相机的视场角,选取拍摄天体合影的相机。

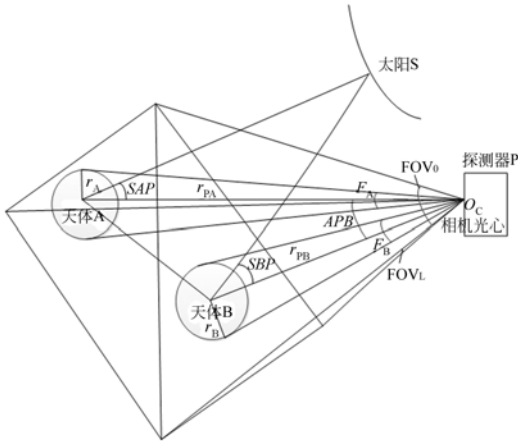


图 1 相机视场模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of field of view model of camera

在探测器既定的飞行轨道下,基于目标天体 A、天体 B 和探测器三者的位置关系,分别计算出天体 A 和天体 B 在相机视场内所形成的张角 ϕ_A 和 ϕ_B 。具体公式为:

$$\phi_A = 2\arctan\left(\frac{r_A}{r_{PA}}\right); \quad \phi_B = 2\arctan\left(\frac{r_B}{r_{PB}}\right), \quad (1)$$

其中: r_A 为天体 A 的半径, r_B 为天体 B 的半径, r_{PA} 为探测器到目标天体 A 的距离, r_{PB} 为探测器到目标天体 B 的距离。

拍摄相机的圆视场角 FOV_0 应满足:

$$FOV_0 > \phi_A + \phi_B. \quad (2)$$

根据上述计算得到的张角以及拍摄相机的圆视场角,选取合适的拍摄相机。

2.3 成像时刻的选取

基于相机的视场模型,分析探测器与目标天体间的夹角与相机视场的匹配关系;同时考虑光照条件,计算成像时刻。

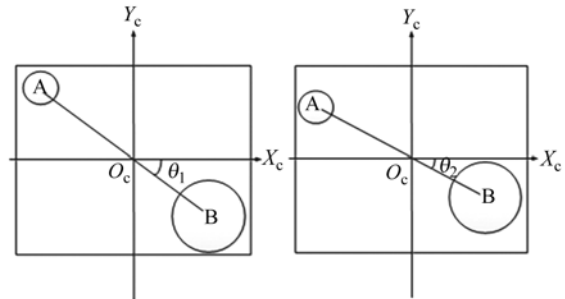
由于天体 A 和天体 B 本身占据了 $(\phi_A + \phi_B)$ 的相机视场,为保证它们在图像中的完整性,相机成像时天体 A-探测器-天体 B 的夹角 APB 应满足:

$$APB \leq FOV_0 - \frac{\phi_A + \phi_B}{2}. \quad (3)$$

同时,为了达到良好的成像效果,还需考虑成像过程中的光照条件。对太阳-天体 A-探测器 (SAP) 及太阳-天体 B-探测器 (SBP) 的夹角进行分析,为使成像目标光照充分,角 SAP 和 SBP 均应小于 90° ,且越小越好。综合考虑上述两个条件,选取最佳的成像时刻。

2.4 成像姿态的确定

在相机视场模型中进行天体合影构图,分析探测器姿态的调整要求,最终计算得到探测器姿态。在相机拍摄天体合影时,天体 A 和天体 B 在相机图像内可能的位置关系如图 2 所示。



(a) APB 为最大值工况 (b) APB 为最小值工况

(a) APB in maximum condition (b) APB in minimum condition

图 2 天体 A 和天体 B 在相机图像中位置关系示意图

Fig.2 Schematic diagram of position relation of celestial bodies A and B in camera's image

相机图像坐标系定义如下:原点 O_c 为图像中心点, X_c 轴为过图像中心点的横坐标轴, Y_c 轴为过图像中心点的纵坐标轴。为了构图美观,限定天体 A 和天体 B 对称分居于图像中心的两侧。因此,天体 A, B 连线在相机图像坐标系 $X_c O_c Y_c$ 内的投影需过中心点 O_c 。

设天体 A, B 连线的投影与 X_c 轴的夹角为 θ , 则:

$$\theta = \arccos \left[\frac{FOV_L}{APB + \frac{\phi_A + \phi_B}{2}} \right], \quad (4)$$

其中 FOV_L 为相机的水平视场角。

要保证天体 A, B 完整出现在图像内,且构图美观, θ 需取 $\max(\theta_1, \theta_2)$ 。其中:

$$\theta_1 = \arccos \left[\frac{FOV_L}{APB_{\max} + \frac{\phi_A + \phi_B}{2}} \right];$$

$$\theta_2 = \arccos \left(\frac{FOV_L}{APB_{\min} + \frac{\phi_A + \phi_B}{2}} \right),$$

其中: APB_{\max} 为天体 A-探测器-天体 B 间夹角的最大值, APB_{\min} 为天体 A-探测器-天体 B 间夹角的最小值。因此, 要保证相机对多个天体合影的成像效果, 探测器需调整姿态满足以下两个要求:

(1) 天体 A, B 连线在像平面内的投影经过图像中心点, 即相机的光轴与天体 A, B 连线在同一平面内, 相机的光轴与天体 A 中心的夹角 α_A 满足:

$$\left(APB - \frac{FOV_0}{2} + \frac{\phi_B}{2} \right) \leq \alpha_A \leq \left(\frac{FOV_0}{2} - \frac{\phi_A}{2} \right). \quad (5)$$

(2) 天体 A, B 连线在像平面内的投影与 X_c 轴的夹角 θ 取 $\max(\theta_1, \theta_2)$ 。

根据以上 2 个调整要求计算出探测器的姿态。已知地心惯性坐标系 $O_i - X_i Y_i Z_i$ 下, 探测器-天体 A 中心连线确立的矢量为 \mathbf{M}_{PA} , 天体 A-天体 B 中心连线的矢量为 \mathbf{M}_{AB} , 探测器-天体 B 中心连线的矢量为 \mathbf{M}_{PB} , 相机的安装矩阵为 Δ 。在地心惯性坐标系 $O_i - X_i Y_i Z_i$ 下, 相机光轴的矢量为 \mathbf{C}_i , 探测器本体 3 个坐标轴在地心惯性系下的矢量分别为: $\mathbf{X}_{Bi}, \mathbf{Y}_{Bi}, \mathbf{Z}_{Bi}$ 。

根据成像姿态要求(1), 相机光轴与天体中心的夹角应满足:

$$\alpha_A = \arccos \frac{\mathbf{C}_i \cdot \mathbf{M}_{PA}}{|\mathbf{C}_i| |\mathbf{M}_{PA}|}. \quad (6)$$

根据成像姿态要求(2), 由 $\mathbf{M}_{PA}, \mathbf{M}_{PB}$ 确立的平面法向向量 \mathbf{M}_{Norm} 满足 $\mathbf{M}_{\text{Norm}} = \mathbf{M}_{PA} \times \mathbf{M}_{PB}$ 关系。 \mathbf{M}_{Norm} 在相机成像平面 $X_c O_c Y_c$ 内, 且与 X_c 轴的夹角为 $90^\circ - \theta$, 由此可以得到:

$$\arccos \frac{\mathbf{M}_{\text{Norm}} \cdot \mathbf{C}_i}{|\mathbf{M}_{\text{Norm}}| |\mathbf{C}_i|} = 90^\circ, \quad (7)$$

且有:

$$\arccos \frac{\mathbf{M}_{\text{Norm}} \cdot \mathbf{X}_c}{|\mathbf{M}_{\text{Norm}}| |\mathbf{X}_c|} = 90^\circ, \quad (8)$$

$$\arccos \frac{\mathbf{C}_i \cdot \mathbf{X}_c}{|\mathbf{C}_i| |\mathbf{X}_c|} = 90^\circ. \quad (9)$$

由式(6)和式(7)可唯一确定相机光轴矢量 \mathbf{C}_i , 由式(8)和式(9)可唯一确定相机成像平面的轴矢量 \mathbf{X}_c , 即可得到相机本体 3 个坐标轴在惯性系下的位置矢量。

已知相机本体坐标系可以由探测器本体坐标

系分别绕 X 轴旋转角度 φ , 再绕 Y 轴旋转角度 δ , 再绕 Z 轴旋转角度 ψ 得到, 则相机的安装矩阵表示为:

$$\Delta = \mathbf{C}_{xi}(\varphi) \cdot \mathbf{C}_{yi}(\varphi) \cdot \mathbf{C}_{zi}(\varphi). \quad (10)$$

进一步根据相机本体 3 个坐标轴在惯性系下确定的位置矢量和相机的安装矩阵, 可以计算得到探测器本体 3 个坐标轴在地心惯性系下的矢量: $\mathbf{X}_{Bi}, \mathbf{Y}_{Bi}, \mathbf{Z}_{Bi}$, 即确定探测器的成像姿态。

根据预先设定的不同的天体合影构图要求, 便捷地计算出对应的拍摄条件, 进而最终确定最佳成像姿态, 这种成像策略灵活性好。

3 仿真验证

以我国探月三期月地高速再入返回飞行器拍摄地月合影成像设计为例。探测器在近月点附近时, 太阳、月球、地球和探测器的位置关系如图 3 所示。

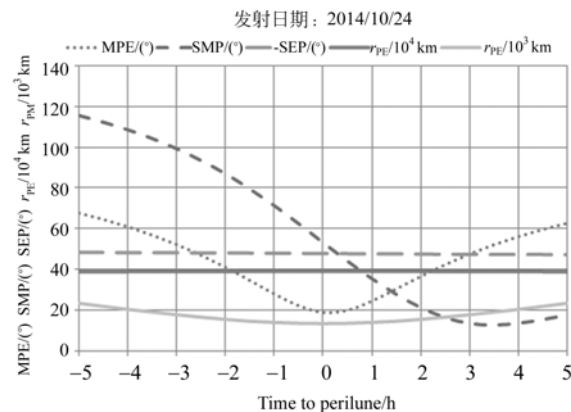


图 3 太阳、月球、地球和探测器的位置关系图

Fig. 3 Position relation of the sun, the moon, the earth and explorer

从图 3 可知, 近地点时探测器与地球的距离为 3.91×10^5 km, 探测器与月球的距离为 1.33×10^4 km, 计算得到地球所形成的张角为 1.87° , 月球所形成的张角为 14.89° 。因此, 拍摄地月合影的相机圆视场角 FOV_0 应大于 16.76° 。根据探测器上配置的所有相机, 选取圆视场角为 56.56° (方视场为 $40^\circ \times 40^\circ$) 的相机进行拍摄。

由于月球和地球本身占据了 16.76° 的视场, 为保证它们在图像中的完整性, 相机成像时的 MPE 应小于 39.80° 。从图 3 可知, 探测器到达

近月点前 1.5 h 至离开近月点后 1.5 h 的时间段内, MPE 均满足要求。同时, 为了达到良好的成像效果, 还需考虑成像过程中的光照条件, 对太阳-地球-探测器 (SEP) 及太阳-月球-探测器 (SMP) 的夹角进行分析。为使成像目标光照充分, SEP 和 SMP 均应小于 90°, 且越小越好。因此, 相机拍摄地月合影的最佳拍摄时机为探测器离开近月点 1 h 至 1.5 h 的时间段内。

在相机拍摄地月合影时, 地球和月球在相机图像内可能的位置关系如图 4 所示。

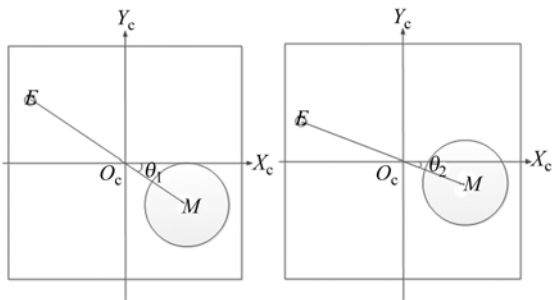


图 4 地月合影成像视场分析图

Fig. 4 Analysis of field of view for earth-lunar imaging

为了构图美观, 限定月球和地球对称分居于图像中心的两侧。因此, 地月连线在相机图像坐标系 $X_c O_c Y_c$ 内的投影需过中心点 O_c 。设地月连线的投影与 X_c 轴的夹角为 θ , 则:

$$\theta = \arccos \left[\frac{FOV_L}{MPE + \frac{\phi_E + \phi_M}{2}} \right], \quad (11)$$

其中: FOV_L 为相机的水平视场角, ϕ_E 为地球的张角, ϕ_M 为月球的张角。

要保证地球、月球都完整出现在图像内, 且构图美观, θ 需取 $\max(\theta_1, \theta_2)$ 。计算得到 θ_1 为 29.00° , θ_2 为 22.27° 。因此, 要保证地月合影的成像效果, 探测器需调整姿态满足以下要求: (1) 地月连线在像平面内的投影经过图像中心点, 即相机的光轴与地月连线在同一平面内, 相机的光轴与月心的夹角为 18° , 角度偏差小于 1° ; (2) 地月连线在像平面内的投影与 X_c 轴的夹角为 29° , 角度偏差小于 1° 。

根据以上探测器地月合影的姿态调整要求, 计算出在近月点后 1 h 时探测器的姿态四元数, 见表 1。

表 1 拍摄地月合影时探测器的姿态四元数

Tab. 1 Attitude quaternion numbers of explorer when capturing earth-lunar image

成像时刻	姿态四元数(相对 J2000 惯性坐标系)			
	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
近月点后 1 h	-0.654 626	0.232 668	0.011 896	0.719 158

在天体合影成像设计和分析完成后, 为了确定成像时机、飞行器姿态等参数是否准确无误和满足任务需求, 需要通过视景仿真技术对天体合影成像效果进行仿真验证。将探测器的模型、轨道参数、姿态参数、相机参数等导入在轨探测效果仿真系统, 得到目标天体在相机视场内的成像效果, 如图 5 所示(彩图见期刊电子版)。



图 5 相机拍摄地月合影成像视场仿真图

Fig. 5 Simulation of field of view of camera for earth-lunar imaging

由图 5 可知, 月球和地球对称分居于相机图像中心的两侧, 月球为图像右下角的大圆, 地球为图像左上角的小圆。仿真结果与视场分析结果一致, 角度偏差在 1° 范围内, 由此验证了所提出的目标天体合影成像策略的正确性。

4 在轨应用

在月地高速再入返回飞行试验任务过程中, 2014 年 10 月 28 日 4 点 40 分探测器距离月球和地球分别为 1.40×10^4 km 和 3.91×10^5 km。在月球近旁转向段, 相机拍摄了国内首张地月合影, 如图 6 所示(彩图见期刊电子版)。相机性能稳定, 视场内能观测到完整的地球和月球, 拍摄的画面清晰, 目标天体色彩真实, 成像效果良好。



图 6 相机在轨实拍地月合影像图像

Fig. 6 Earth-lunar image captured by camera on-orbit operation

比较图 5 和图 6 可以看出,实拍结果与仿真结果几乎完全一致,在轨天体合影像策略得到了在轨验证。

参考文献:

- [1] SU M SH, HWANG W L, CHENG K Y. Analysis on multiresolution mosaic images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(7): 952-959.
- [2] 苗立刚. 视频监控中的图像拼接与合成算法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(4): 857-861.
MIAO L G. Image mosaicing and compositing algorithm for video surveillance [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(4): 857-861. (in Chinese)
- [3] 黄静, 刘朝晖, 谢友金, 等. 月基光学天文望远镜反射镜转台设计 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2173-2179.
HUANG J, LI ZH H, XIE Y J, *et al.*. Design of 2-D reflection mirror gimbal for lunar based astronomy optical telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2173-2179. (in Chinese)
- [4] 王智, 李朝辉. 月基极紫外相机光机结构设计 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2427-2433.
WANG ZH, LI CH H. Design of optical-mechanical structure for lunar-based extreme ultraviolet camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2427-2433. (in Chinese)
- [5] 宁永慧, 郭永飞. 星上时间延迟积分 CCD 拼接相机图像的实时处理 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 508-516.
- NING Y H, GUO Y F. Real-time image processing in TDICCD space mosaic camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 508-516. (in Chinese)
- [6] 叶培建, 黄江川, 孙泽洲, 等. 中国月球探测器发展历程和经验初探 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44(6): 543-558.
YE P J, HUANG J CH, SUN Z ZH, *et al.*. The process and experience in the development of chinese lunar probe [J]. *Scientia Sinica: Technology Science*, 2014, 44(6): 543-558. (in Chinese)
- [7] 杨颖, 王琦. STK 在计算机仿真中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 5-12.
YANG Y, WANG Q. *Application of STK in Computer Simulation* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 5-12. (in Chinese)
- [8] 刘夫成, 刘朝晖, 刘文, 等. 基于 STK/matlab 的空间目标序列星图仿真 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(9): 19-24.
LIU F CH, LIU ZH H, LIU W, *et al.*. Space target sequence image simulation based on STK/matlab [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 19-24. (in Chinese)
- [9] 赵玉晖, 王素, 胡寿村, 等. 嫦娥二号飞越图塔蒂斯成像策略预期成像结果研究 [J]. *天文学报*, 2013, 54(5): 447-454.
ZHAO Y H, WANG S, HU SH C, *et al.*. A re-

5 结 论

本文基于深空探测器在轨天体合影像需求,提出了一种基于相机性能参数建立的视场模型。综合天体和探测器轨道动力学模型、探测器姿态数据以及光照条件进行分析的成像策略,简化了传统的反复迭代的分析过程,计算简便,并可准确地分析和确定拍摄相机、成像时刻与成像姿态。通过仿真证明了该天体合影像策略的正确性,其角度偏差在 1° 范围内,并成功应用于探月三期月地高速再入返回飞行任务中,获取了距离月球和地球分别为 1.40×10^4 km 和 3.91×10^5 km 处,我国航天史上首张地月合影像图像。同时,该成像策略还为后续月球、火星等深空探测任务的天体合影像设计、分析与验证奠定了基础,可作为后续工作的参考与依据。

search on imaging strategy and imaging simulation of toutatis in the Change 2 flyby mission [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2013, 54 (5): 447-454. (in Chinese)

- [10] 王卫东, 张泽旭, 朱圣英, 等. 一种小天体绕飞轨道及目标天体参数确定方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(9): 19-24.
WANG W D, ZHANG Z X, ZHU SH Y, *et al.*.

An algorithm of around orbit and parameters determination for small body [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2011, 43(9):19-24. (in Chinese)

- [11] LIU F CH, LIU ZH H, LIU W. A research on navigation star catalog selection algorithm based on SVM [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 706: 613-617.

作者简介:



邹 昕(1984—),女,湖南永州人,硕士,工程师,2009年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事航天器总体设计以及深空探测载荷总体设计方面的研究。E-mail:zouxin501@163.com



顾 征(1981—),男,安徽固镇人,博士,高级工程师,2008年于四川大学获得博士学位,主要从事航天器总体设计以及工程参数测量设计方面的研究。E-mail:guzhbird@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)