载人小行星探测的总体方案设想

周必磊[1,2]，陆希[1,2]，尤伟[1,2]
(1. 上海市深空探测技术重点实验室，上海 200240；2. 上海卫星工程研究所，上海 200240)

摘　要：载人探测近地小行星的工程规模和技术难度介于载人探月和载人火星探测之间，是人类开展载人火星探测和飞向更遥远深空的跳板，对于航天技术的发展和科学问题的探索有着极其重要的意义。在调研国外载人小行星探测方案设想的基础上，结合我国航天技术现状和发展趋势，提出了一种载人小行星探测的总体方案设想，并梳理了载人小行星探测的关键技术。研究成果可以作为我国载人小行星探测任务论证和设计的有益参考。

关键词：载人航天；小行星探测；总体方案；关键技术
中图分类号：P185.7　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2095-7777(2015)01-0043-05
DOI：10.15982/j.issn.2095-7777.2015.01.006

0 引　言

随着人类科学研究和航天事业的不断发展，人类对宇宙的认知正快速更新，无人探测器已造访过太阳系多数行星并突破太阳系边缘，而载人空间探测活动也逐步从近地空间走向深空。在实现了载人登月及对火星和小行星的无人探测后，人类下一阶段深空探测的目标将是载人深空探测。

载人探测近地小行星的工程规模和技术难度介于载人探月和载人火星探测之间，是人类开展载人火星探测和飞向更遥远深空的跳板，对于航天技术的发展和科学问题的探索有着极其重要的意义。本文在调研国外载人小行星探测方案设想的基础上，结合我国航天技术现状和发展趋势，提出了一种载人小行星探测的总体方案设想，并梳理了载人小行星探测的关键技术。

1 国外载人探测小行星研究现状

从阿波罗时代(20 世纪 60 年代)开始，就有若干项研究陆续提出了面向近地小行星的载人任务理念。Eugene Smith 在 1966 年的时候第一次研究了面向近地小行星(NEO)的载人任务，当时考虑在面向 433 Eros 小行星的后续载人任务中利用阿波罗太空船和“土星 5 号”运载火箭[1]。

20 世纪 80 年代末 90 年代初，NASA 在“空间探索活动”框架下开展了几项有针对性的研究，较为详细探讨了如何将人类送到近地小行星的问题。冷战结束后，虽然仍有研究者坚持开展载人小行星探测的研究[2-5]，但美国对载人近地小行星任务的兴趣越来越低，直到奥巴马航天新政颁布后，载人小行星探测才被重新提上日程。

最近，美国的高级计划办公室(APO)的研究团队正在探索向近地小行星发送载人探索飞行器(CEV)猎户座飞船的可行性：根据飞船和整合组件配置，计划实施多次搭载 2～3 名航天员、太空飞行时间为 45～180 天(其中包括在近地小行星上停留 7～14 天)的载人近地小行星飞行任务[6]。奥巴马政府重新制定的新的载人深空探测发展路线，如图 1 所示。

火星将是未来美国深空探测的最终目的地。为了完成这个雄伟目标，探测近地小行星是其技术达成的跳板，即通过探测近地小行星来演示和验证载人登火的最终目的。

2010 年 4 月 15 日，奥巴马总统在肯尼迪航空中心宣布美国最早将在 2025 年开展面向近地小行星(NEO)的载人任务。同年 8 月，NASA 在华盛顿组织召开了载人探测近地小行星的学术研讨会，与会代表共同回顾了人类在近地小行星研究中的成果，重新定义了近地小行星的概念，探讨了载人探测近地小行星的目的和科学目标，比较分析了载人探测近地小行星与载人登月和载人登火的共性和差异。基于“目前科学家们对于近地小行星的了解相当有限”的共识，与会者一致认为在开展载人近地小行星任务之前，对其进行充分观测和研究十分必要。这标志着美国正式启动载人探测近地小行星的研究[7]。

收稿日期：2014-12-10　修回日期：2015-02-30

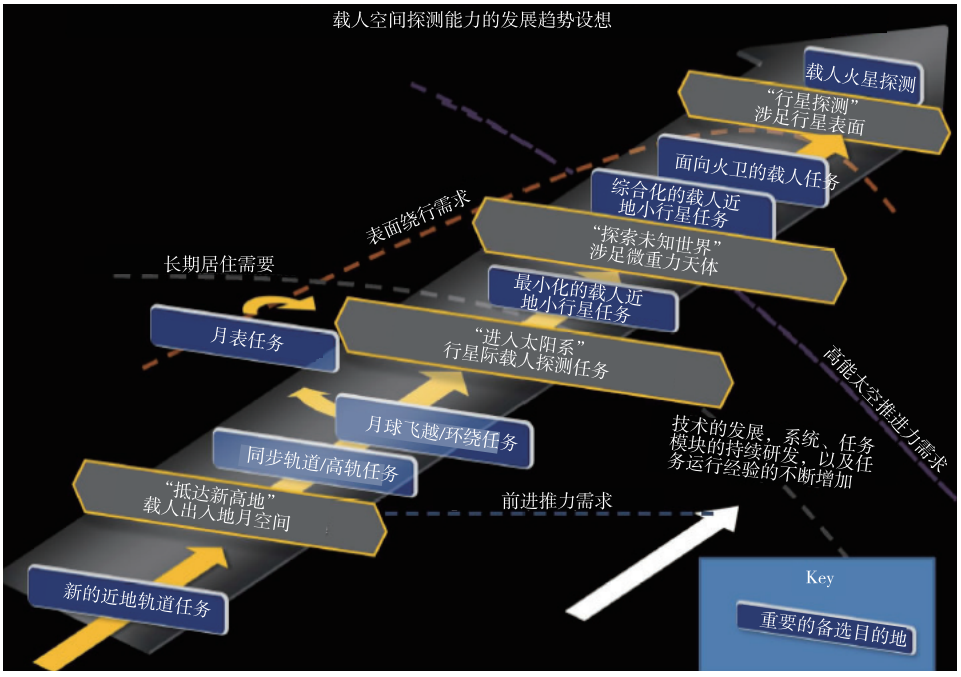

图 1 NASA 未来载人探测能力发展路线图(2011)

Fig. 1 Roadmap of NASA on manned exploration capability development(2011)

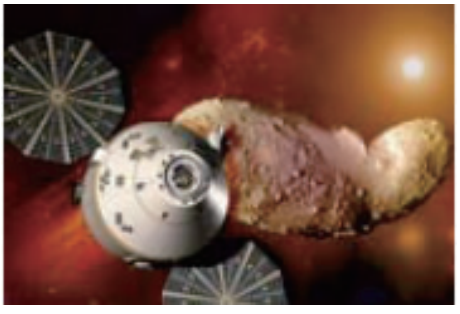

图 2 载人探测小行星示意图

Fig. 2 A schematic scenario of manned asteroid exploration

2 方案概念设想

从任务的顶层规划上来说，有多种载人探测小行星的模式。如将载人飞船组合体一次发射开展探测及多次发射在轨组装的方式，在轨组装又可分为在地球轨道组装和在小行星轨道组装的方式。具体的探测模式，应在满足大系统约束(主要是来自运载火箭发射能力的约束)的条件下，以提高任务实施的可行性、可靠性为原则来选取。

2.1 任务阶段分解

一次完整的载人小行星探测任务应至少包括以下飞行过程：

1)发射段：运载火箭发射将往返飞船送入轨道；

2)地球逃逸段：探测器逃逸地球引力场的过程，可由运载火箭完成或探测器自身变轨完成；

3)巡航飞行段：奔向小行星的过程中进行中途轨道修正、近小行星制动减速；

4)小行星环绕段：绕飞小行星，对其进行遥感探测，以确定附着点和附着实施策略；

5)附着与表面操作段：从小行星伴飞轨道降落到小行星表面，并对小行星进行取样、表面行走等操作；

6)小行星表面起飞段：从小行星表面上升至环绕轨道；

7)返航转移段：从小行星环绕轨道至进入地球轨道；

8)再入－返回段：从再入地球大气层到在地球着陆。

不同的载人小行星探测方案所采用的轨道，可由上述轨道段的不同组合实现。

2.2 探测模式分析

按照上述飞行过程，载人航天器组合体应至少包括以下几个部分(如图 3 所示)：

A：负责近地轨道变轨逃逸地球的推进级；

B：巡航转移飞行器；

C：小行星附着器；

D：行星表面上升飞行器。

根据任务的不同，载人航天器的上述组成部分可能进一步分解或合并。对于载人探测小行星任

务,小行星附着器和表面上升器有可能是同一个飞行器。

为了完成载人小行星探测任务,载人航天器应至少完成如图 3 的轨道机动:

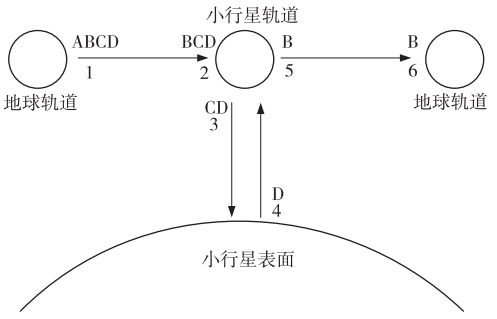

图 3　载人小行星探测任务过程

Fig. 3　Typical processes of a manned asteroid exploration mission

轨道机动 1:载人航天器组合 ABCD 变轨逃逸地球,其后耗尽燃料的推进级 A 被抛弃;

轨道机动 2:航天器组合 BCD 近小行星变轨制动捕获,其后巡航转移飞行器 B 与 CD 分离;

轨道机动 3:着陆器－上升器组合 CD 体变轨降落至小行星表面;

轨道机动 4:航天员乘坐上升器 D 返回小行星轨道;

轨道机动 5:航天员转移至巡航转移飞行器,变轨进入返航轨道;

轨道机动 6:近地球变轨制动捕获或再入地球。

研究载人小行星探测总体方案,本质上是对上述任务过程进行不同的组合,并研究可行的实现方式。

2.3　探测方案设想

1)方案概述

与载人火星探测任务相比,近地小行星的载人探测的速度增量需求、任务周期、探测器规模都要小得多。参考图 3 所示的任务过程,由于小行星的引力很小,着陆器 C 和上升器 D 可以合并为小行星附着器;还可搭载小型无人探测器,对小行星进行更全面的探测。具有一般性的小行星探测总体方案可描述如下。

探测器由如下部分构成:

(1)轨道居住舱:包括环境控制和生命支持系统、动力、物资存储、医疗设施、科研实验室等;

(2)小行星附着器:具备接近小行星并开展相关操作的功能;带有交会对接系统和锚定系统、舱外活动系统、生活区以及用于样本操作和采集的机械臂;

(3)往返于小行星的空间推进舱;

(4)小型地球返回舱;

(5)小型无人探测器;

(6)3～4 名航天员。

利用重型运载火箭和常规运载火箭将探测器的不同组成部分发射至地球轨道,在地球轨道组装后飞往目标小行星。组合后的转移飞行器应具备所有推进、生保系统、探测系统以及地球返回系统,可以完成为期 6～12 个月的近地小行星的往返任务。

在到达目标天体以后,开展为期数天的小行星表面探测。近小行星操作大致可分成四类:载人飞船操作、出舱活动、科研活动、机器人操作。

(1)载人飞船操作

在航天员的操纵下,探测器将执行轨道捕获程序,并且与小行星保持一定距离进行伴飞。在伴飞过程中,首要的工作是完成机器人探测。然后根据这些信息了解相关情况,确定危险,并分析资源。

在航天员充分掌握这些信息之后,将引导空间探索飞行器附着小行星。当最佳附着地点选择后,探测器将与小行星进行交会,并启用锚定机构将其固定。如果锚定系统因故无法工作,启动备份操作固定探测器的位置,然后为航天员的舱外行走做准备。一旦在小行星上的工作完成,小行星附着器离开小行星表面,与母舱对接。

(2)出舱活动

航天员接触近地小行星的表面,进行出舱活动。每次出舱活动至少将由两位航天员来执行,并由舱内航天员负责监控。

出舱活动航天员将使用移动系统,通过绳索系到小行星或飞行器上。让航天员站在空间探索飞行器的机械臂上,并将机械臂和航天员置于最佳位置,执行既定任务,比如采集样本或部署仪器。另一种方法是将一个绳索网络固定到近地小行星,这样航天员可以把自己固定住,并绕着近地小行星移动到各个位置执行既定任务。与绳索网络类似的一种方法是只使用一根绳索,帮助航天员在近地小行星表面移动。

(3)科研活动

出舱活动的大部分时间都将用于表面科研操作,其中包括安放科研工具包、岩心采样、深度钻孔、以及采集大块和选定样本。出舱活动的航天员还将进行技术试验,以评估近地小行星的就地资源利用能力,修改近地小行星轨道参数,并在近地小行星上安放转发器或反射器(信标),以提高未来的跟踪能力。其它活动包括部署在航天员操作过程中和之后

要使用的地震传感器。

(4)小行星机器人操作

机器人可以由舱内活动航天员来操作,也可以在近地小行星航天员离开地球以后从地面远程操作。出舱活动航天员可以使用机器人助手,其包括远程自主出舱机器人摄像机,这样舱内活动航天员就可以参与舱外操作,并监控出舱活动。在安放了科研工具包以后,可以远程操作深度钻孔和就地资源利用试验。

完成所有探测任务后,航天员乘坐小行星着陆器返回轨道居住舱,开始返航。最终到达地球,制动捕获并再入地球。

2)飞行过程

飞行方案可描述为表 1 所示的飞行过程。

表 1 载人小行星探测飞行过程

Table 1 Flight-phases of a manned asteroid exploration mission

序号	阶段	内容
1	发射 1 发射 2	利用重型运载将推进舱、无人探测器、返回舱发射至近地轨道。返回舱分离,停留在地球轨道上。 利用重型运载将轨道居住舱、小行星附着器发射至近地轨道。
2	地球在轨组装	完成载人飞船的组装。
3	巡航转移	飞船推进舱工作,加速,从地球近地轨道进入地球逃逸双曲线轨道,通过巡航转移接近目标小行星。
4	小行星捕获	飞船接近小行星后,推进舱择机工作、制动减速,飞船进入环绕小行星的飞行轨道。
5	小行星轨道调整	飞船轨道调整至最适宜遥感探测的任务轨道,对小行星开展遥感探测,以确定附着点。
6	小行星附着	航天员从轨道居住舱转移到小行星附着器,附着器与轨道居住舱分离,并附着至小行星;附着小行星后,锚定装置固定住小行星,以便航天员开展出舱活动。
7	小行星探测	稳定附着后,航天员出舱,利用探测仪器对小行星进行探测。
8	小行星上升	航天员乘坐登陆舱,择机离开小行星,返回小行星环绕轨道。
9	小行星在轨对接	附着器与轨道居住舱对接,航天员转移至轨道居住舱;附着器与居住舱分离;轨道居住舱与推进舱对接,组成新的载人飞船。
10	返航飞行	载人飞船推进舱工作,加速,从标称任务轨道进入逃逸轨道,并沿返航轨道飞回地球。
11	地球捕获	飞船接近地球后,推进舱择机工作、制动减速,飞船进入地球大椭圆环绕轨道
12	地球轨道调整	载人飞船推进舱工作,调整轨道至地球返回器对接轨道。
13	地球在轨对接	载人飞船与地球返回器对接,航天员转移至地球返回器。
14	地球着陆	地球返回器与载人飞船分离,进入地球着陆弹道,着陆。

3 载人小行星探测关键技术

我国已成功实施了探月工程一、二期任务和多次近地载人航天任务,有效提升了我国航天技术的水平,为开展载人深空探测奠定了基础。尽管如此,载人小行星探测仍是一项极富挑战性的任务,需要事先攻破一系列关键技术。

1)载人小行星探测任务规划技术

载人小行星探测任务规划技术是实施载人小行星探测工程所需要解决的顶层技术,该技术直接影响到任务的形式、成败、成本和综合效益。基于我国目前运载火箭的发射能力和已规划的未来运载能力,可规划多种载人探测小行星的方式。这些方式在实现的难易程度、任务周期、风险、成本等方面存在差异、各有优劣。针对具体的任务目标,有必要研究载人小行星探测任务规划技术,以实现低成本、低风险、高效益的载人小行星探测。

2)先进深空推进技术

载人小行星探测任务所需的速度增量比载人登月任务要大很多。若采用传统的化学推进技术,会导致探测器规模巨大,任务成本急剧上升、任务几乎不可行。因此,为了实现载人小行星探测任务,先进的深空推进技术是至关重要的,有必要开展包括核热推进等先进推进技术的研究,利用高比冲的推进系统,降低探测器规模,减少单次发射质量和发射次数,提高任务的可行性。

3)小行星表面操作技术

小行星表面环境条件特殊,航天员执行表面行走或其它操作的方式将有别于月球表面操作。比如,大多数小行星的表面重力加速度仅在 10^{-3} m·s^{-2}量级或更小,航天员在执行表面操作的过程中不慎脱离小行星表面的风险很高。因此,参考已有的月球探测经验,深入研究小行星表面行走及操作技术,设计一套有针对性的方法和程序是十分必要的。

4)就地资源利用技术

小行星上可能存在的水、金属等资源可为探测任务提供制造推进剂、探测器零部件等的原料。为了有效利用这些资源,需要对小行星上的就地资源利用技术进行研究。就地资源利用技术是一个长期的过程。通过提取和加工小行星现场资源的获取,可以制造氧气、水以维持航天员基本生活,还可以制

造星际航行的推进剂,从而有可能大大减少有效载荷质量、增加运输到小行星表面载荷的质量。

5)长时间深空飞行中的航天员防护与生命保障技术

目前国外已解决了载人登陆月球的航天员生物医学与生命保障技术,我国也已掌握了低地球轨道载人航天活动中的生物医学问题。但对于载人深空探测,由于飞行时间较长,航天员需要长时间在太空中生存,并经历数个环境差异较大的飞行阶段。对于载人小行星探测,姑且先不论在行星上的生活,仅对于长期在地球轨道以外的飞行,就与已有的载人空间飞行有质的不同。对于这些长期飞行任务,有大量未知的风险;有些风险虽然知道,但缺乏有效对策。因此,在执行任务之前,必须了解深空环境对航天员健康的影响,并解决长时间深空飞行中的防护与生命保障问题。

4　结束语

本文在调研国外载人小行星探测方案设想的基础上,结合我国航天技术现状和发展趋势,提出了一种载人小行星探测的总体方案设想,并梳理了载人小行星探测的关键技术,对我国未来开展载人小行星探测任务的工程实施具有借鉴意义。

参　考　文　献

[1] Smith. A manned flyby mission to 433 Eros[R]. Northrup Space Laboratory, 1966.

[2] Landis R R, Korsmeyer D J, Abell P A, et al. A piloted orion flight mission to a near-Earth obejct: a feasility stduy [C] // AIAA Space 2007 Conference & Exposition. California, 2007.

[3] Jones T D, Davis D R, Durda D D, et al. The next giant leap: human exploration and utilization of near-earth object [C]// ASP Conference Series , 2002:2003 - 2013.

[4] Korsmeyer D J, Landis R R, Abell P A. Into the beyond: a crewed mission to a near-Earth object [J]. Acta Astronautica, 2008,63(1 - 4):213 - 220.

[5] Landis R R, Abell P A, Korsmeyer D J, et al. Piloted operations at a near-Earth object (NEO) [J]. Acta Astronautica,2009,65(11 - 12):1689 - 1697.

[6] Wagner S, Zimmerman D, Bong W. Preliminary design of a crewed mission to asteroid apophis in 2029 - 2036[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Canada, 2010.

[7] Foster C, Daniels M. Mission opportunitties for human exploration of nearby planetary bodies[C]// AIAA Space 2010 Conference & Exposition, California, 2010.

作者简介:

周必磊(1982—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:卫星总体技术、通信技术。

通信地址:上海市华宁路 251 号(200240)

E-mail:deepspace509@126.com

陆希(1981—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:深空探测器总体技术、推进技术。

通信地址:上海市华宁路 251 号(200240)

E-mail:ucy-123@163.com

尤伟(1985—),男,在职博士,工程师,主要研究方向:深空轨道设计与优化技术、深空导航与控制技术。

通信地址:上海市华宁路 251 号(200240)

E-mail:deepspace509@126.com

An Overall Scenario for Manned Asteroid Exploration

ZHOU Bilei [1,2], LU Xi [1,2], YOU Wei [1,2]

(1. Shanghai Key Laboratory of Deep Space Exploration Technology, Shanghai 200240, China;
2. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

Abstract: The financial and technical feasibility of manned exploration to a near-Earth asteroid lies between manned lunar exploration and manned exploration of Mars. As a springboard from LEO to Mars or much farther beyond, manned near-Earth asteroid exploration is of great significance on scientific research and space technology development. Based on literature survey on envisaged schemes of manned asteroid exploration, a manned near-Earth asteroid exploration scenario is presented in this paper, taking current level and development trend of China's space technology into account. Key technologies of the recommended mission scheme are sorted out. The outcomes of this study can serve as a useful reference for definition and evaluation for China's practical manned asteroid missions.

Key words: mannned space flight; asteroid exploration; overall scheme; key technology

[责任编辑:高莎]