

美国载人航天探索的反思与展望

乔 健

(中国科学技术部, 北京 100862)

摘 要: 本文分析了美国载人航天探索的历史与现行政策, 研究了美国国家研究理事会美国载人航天政策的评估报告, 就实现登陆火星的远景目标的不同技术路径进行了可行性与成本分析, 在美国预算受限、政策摇摆的背景下, 为未来的载人航天政策提供了原则性建议。美国对于载人航天政策的反思与展望, 对我国航天事业的发展具有重要参考借鉴意义。

关键词: 美国; 载人航天; 火星; 航天政策

中图分类号: V57(712) **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2015.03.001

自1958年美国国家航空航天局(NASA)成立以来, 美国在载人航天领域取得了阿波罗载人登月计划、航天飞机计划、国际空间站计划等一系列举世瞩目的成就。载人航天科技的发展极大地促进了美国整体的科技进步与创新繁荣, 奠定了美国在航天领域的国际主导地位。但是近年来, 由于预算紧张, 政策摇摆, 美国的载人航天发展势头有所放缓。目前, 美国已经没有将航天员送入太空的现役运载火箭, 美国航天员进入国际空间站完全依赖俄罗斯。而正在开发的下一代重型运载火箭系统SLS又面临诸多不确定因素。美国载人航天的远期目标——载人登陆火星表面能否实现也引起了广泛质疑。在这种情况下, 根据美国国会要求, 美国国家研究理事会(NRC)对美国载人航天的政策目标与技术方向进行了一项长达三年的评估研究, 于2014年5月发表了题为“探索路线图: 美国载人航天的原则与方案”^[1]的研究报告, 对美国载人航天计划进行了全面的反思和展望。

1 美国载人航天的历史和现行政策

1.1 美国历史上的重大载人航天计划

美国1960—1970年代载人航天技术的迅猛发

展在很大程度上是冷战时期美苏竞争的结果。1958年, 前苏联发射了第一颗人造地球卫星, 震惊了整个美国。在此情况下, 美国成立了国家航空航天局(NASA), 集中各领域的资源, 进行航天工程研发。1961年, 前苏联宇航员加加林的首次太空飞行再次刺激了美国人。肯尼迪政府宣布实施阿波罗计划, 目标是在1970年前实现载人登月。在此阶段, NASA的预算一度占到美国联邦政府总预算的4%。1969年7月29日, 阿波罗11号飞船成功实现载人登月, 美国受到了极大的鼓舞。此后, 阿波罗系列飞船又5次成功登月, 直到1972年计划结束。

1972年, 尼克松政府宣布启动航天飞机计划, 开发可以重复使用的往来地球与外层空间的交通工具。由于阿波罗工程耗资巨大, 因此, 航天飞机计划的实施是激烈辩论和妥协的结果。预算受限导致了系统性的安全风险, 这被认为是1986年“挑战者号”和2003年“哥伦比亚号”航天飞机失事的主要原因。虽然这两次失事为美国的载人航天蒙上了一层沉重的阴影, 但美国的航天飞机计划也取得了公认的成就: 共有5架航天飞机进行了135次太空飞行, 承担了组装哈勃望远镜、进行太空实验、向俄罗斯和平号空间站及国际空间站(ISS)运送

作者简介: 乔健(1984—), 男, 工学硕士, 科技部国际合作司副主任科员, 主要研究方向为科技政策及国际科技合作。

收稿日期: 2015-03-13

航天员等一系列重要任务。2011年7月，由于各种原因，美国宣布最后一架航天飞机退役，航天飞机计划终止。此后至今，美国一直没有载人航天运载能力。

1994年，克林顿政府宣布启动“国际空间站（ISS）计划”，这是一个由美国主导，俄罗斯为主要合作伙伴，多国共同参与的近地轨道太空实验平台。自1998年首个模块发射以来，国际空间站不断发展至今，已经接纳过15个国家的航天员，进行了大量的太空科学实验，并推出了多样的商业利用计划。

2014年初，美国宣布将国际空间站至少延续至2024年，以强化美国的载人航天主导地位。虽然NASA将国际空间站视为国际合作的典范，但据测算，国际空间站上千亿美元的成本中，美国承担了约83%^[2]，考虑到国际合作增加的沟通与协调成本，未必比美国单独运营更加划算。国际空间站项目之所以能获得美国国会通过，地缘政治因素是重要的考量。美国需要在前苏联解体后迅速与俄罗斯加强合作，以避免俄罗斯的航天技术扩散到其他国家或组织。

在美国成功实现载人登月后，载人登陆火星一直是美国决策者们考虑的长远目标。1989年，老布什政府提出了“自由空间站（Space Station Freedom）”计划，通过重返月球，最终到达火星。由于预算高昂，这一计划最终没有获得美国国会通过。2004年，小布什政府再次提出“星座（Constellation）”计划，开发新一代运载火箭及航天器，在2020年前实现重返月球，并做载人登陆火星的技术准备。这一计划在2010年再次被奥巴马政府中止，但已在开发中的猎户座（Orion）航天器予以保留，应用于新的太空计划。

1.2 美国的载人航天政策环境

冷战结束后，美国失去了最主要的太空竞争对手，陷入了长期的矛盾心理中：一方面试图不断加强自身的太空霸主地位，另一方面又对高昂的太空预算望而却步。民意调查显示，虽然美国民众长期以来对载人航天活动总体持积极的态度，但在面临其他公共支出选项时，载人航天在重要性方面排名最后。只有不到25%的美国人表示了解载人航天的进展及相关知识^[3]。民意的疏离是美国载人

航天频遭预算掣肘、政策左右摇摆的根本原因。

美国现行航天政策重视国际合作。2014年初，美国国务院举办了国际空间探索论坛，邀请34个国家和国际组织的代表出席，讨论在后国际空间站时代，通过进一步合作开展载人深空探索的可行性^[4]。美国强调，深空探索风险巨大，国际合作伙伴需要共担风险，在合作之初就应设计好预算投入机制。然而，国际合作中不同主体利益诉求千差万别，协调起来困难重重。

在对待中国的态度上，美国也凸显矛盾心态。一方面，美国防范戒备中国的心理极强，国会通过“沃尔夫条款”，禁止NASA同中国的一切官方往来；另一方面，近年来中国航天事业发展迅速，美国又视中国为可以利用的资源，同时担心不接触政策反而会使美国失去控制中国的能力。

美国航天政策的另一主要特点是重视商用航天技术发展。自2006年起，NASA与商业伙伴合作，开发向国际空间站运送货物的商业运载火箭。目前，近地轨道商业货运已经成熟，SpaceX公司和Orbital公司迄今已经执行超过20次的货物运输合同。波音、SpaceX等公司正在开发载人航天技术，预计将于2017年将航天员送至国际空间站，以摆脱对俄罗斯的依赖^[5]。从长远来看，商用航天技术可以提高技术开发效率，促进要素流通，夯实全行业的工业基础，对降低航天工业成本大有裨益。但对于风险巨大的载人深空探索来说，还是需要以国家投入为主体来应对技术和资金挑战。

1.3 美国未来载人航天的主要目标

2010年，奥巴马政府在NASA的再授权法案^[6]中，明确了近期美国载人航天的主要目标：到2020年代中期，将一颗直径10米以内的近地小行星通过无人航天器变轨至绕月轨道，再实现载人交会对接，派航天员对其进行勘测并取样返回地球；到2030年代，实现载人登陆火星的远景目标。

为实现上述目标，美国当前的主要任务是开发下一代重载火箭SLS及猎户座飞船。SLS火箭的初期设计运载能力为70吨，计划于2018年进行第一次无人发射试验（EM-1），2021年进行载人发射试验（EM-2），运送航天员至近地轨道。随后，SLS火箭的运载能力将逐步提高到130吨，以满足载人深空探索的需要。第一代猎户座多任务载

人航天器可乘坐 4 名航天员，进行 21 天的太空飞行，结构包括航天员舱、服务指令舱、发射中止保护等多模块设计，其中服务指令舱由欧洲空间局设计并制造。2014 年 12 月，猎户座飞船进行了第一次无人飞行实验，成功采集了相关飞行数据供进一步研发。

由于小行星不存在引力势阱，这一任务不需要设计登陆月面所必备的进入——着陆——返回装置，从而大大降低了任务风险与难度，比重返月球的目标成本低，更易实现。但从这一步如何过渡到登陆火星的远景目标，现行方案中并无清晰描述，因此受到广泛质疑。

2 美国国家研究理事会对于航天政策的反思与建议

2.1 对于载人航天根本意义的反思

美国国家研究理事会（NRC）隶属于美国国家科学院系统，经常受美国国会委托从科学角度对重大政策议题进行独立的第三方评估，其报告因严谨客观而广受关注。在其发表的“探索路线图：美国载人航天的原则与方案”（以下简称“路线图”）中，首先对人类开展载人航天活动的目的和意义进行了总结和反思。在巨大的技术风险和财政投入的压力下，只有明确了载人航天的根本意义，才能形成政策共识。

关于这一问题的讨论由来已久，早在美国载人航天计划肇始之初，关于是否值得投入大量人力物力把人送入太空就产生过各种观点。

“路线图”报告把支持载人航天的理由归为两类：一类是实用性理由，如发展载人航天可以促进衍生技术创新，加快经济增长，服务于国家安全目标，鼓舞青年人投身科技工程学习的热情，实现更多的科学突破，提升美国整体国际地位与影响力；另一类是启迪性理由，即满足人类的探索欲望和改变人类的最终命运。“路线图”报告指出，无论用何种方法测算，载人深空探索的有形收益都不足以收回其几千亿美元量级的投资，并且前述载人航天的实用性目标或多或少都可以用机器人技术代替。支撑载人深空探索决策的最终理由可能还是人类自身的探索冲动，这也是自古以来引领人类不断拓展生存空间、不断进步的根本动力。

2.2 不同载人航天路径的技术可行性与成本分析

“路线图”报告指出，从现有和可预期的技术条件出发，载人深空探索可选择的目的地其实非常有限，无外乎地月系统、近地小行星、火星及其两颗卫星。其中，登陆火星因其对于人类潜在的科学与社会意义，以及极高的技术难度和风险挑战被国际社会公认为载人航天领域的远景目标。“路线图”报告并没有确定实现火星登陆的最佳技术路径，而是假设了三种具有代表性的方案，分别从技术可行性和成本角度进行了详细分析。这三条路径分别是：

（1）变轨至绕月轨道的小行星（ARM）——火星卫星——火星

（2）月球短期登陆——月球长期基地——火星

（3）地月系统第二拉格朗日点（L2）——原始轨道近地小行星——月球短期登陆——月球长期基地——火星卫星——火星

其中，第一条路径是 NASA 的现行计划方案，第二条路径是国际宇航界普遍设想的计划方案，第三条路径是将人类所有可能到达的外层空间目的地按照难度递增的顺序排序，进行平滑过渡的参考方案。

包括登陆火星的最终目标在内，上述三条路径中共涉及 7 个目的地，称为设计参考任务（DRM）。2009 年，NASA 曾对如何完成上述 7 项任务进行过初步的分析^[7]，讨论了完成这些任务需要哪些任务模块（Mission Element）。在这些任务模块中，有些是为了登陆火星所必需的通用任务模块；有些是只有某些 DRM 需要，但可以继续升级过渡至通用模块的中间任务模块；还有些是仅仅为了完成某些中间 DRM，并且无法继续升级的分支任务模块。这些任务模块概述如下：

2.2.1 通用任务模块（共 11 项）

（1）重型运载火箭：为实现载人登陆火星的目标，需要先后将 900 吨~1 300 吨重的载荷设施运送至近地轨道。考虑到在轨组装难度和风险，单次发射载重需要超过 100 吨。目前设计初期的 SLS 火箭载重可达 70 吨，此前美国运载火箭的发射能力为 23 吨。

（2）先进空间推进系统：目前用于远距离载人深空探索的推进装置尚未开发。低温燃料推进器

因需携带大量液体燃料，在复杂的深空环境中面临巨大风险；正在研发的太阳能电力推进器（SEP）因推力有限，到达火星的时间超过了人类所能承受的极限；核动力热能推进器（NTP）因安全风险在1973年中止试验；核动力电能推进器（NEP）尚处于设想状态。

（3）机器人漫步车：用于星体表面的机器人辅助操作。

（4）星体表面核反应堆：据估算，登陆火星表面后需要功率为30千瓦的不间断稳定供电系统，太阳能发电难以满足这一要求，因此最可行的方案是利用核反应堆解决能源问题。

（5）舱外操作防护服：用于深空探索舱外作业的防护服需要比现有技术水平更高的安全性和灵活性。

（6）星体表面机动系统：承载着增压居住舱的太空车，需要在星体表面较大范围内活动。

（7）着陆器空气动力学系统：用于进入火星，穿越火星大气层，并实现精确定点着陆，要求载重至少达到40吨，着陆误差范围在100米以内。此前的“好奇号”火星车着陆器只能达到载重1吨、误差10公里的技术水平。

（8）深空飞船：包括宇航员生活舱、服务舱、指令舱等模块，第一代猎户座飞船正在设计开发中。

（9）深空居住舱：由于火星和地球的公转周期长，因此实现载人火星登陆的时间窗口相对固定。实现火星着陆需经过约6个月的太空飞行，在火星表面停留约500天，再经过6个月的太空飞行返回地球。长期深空飞行由于没有地磁场的保护，对宇宙射线防护要求非常高；同时居住舱无法补给，需要实现完全的循环利用；此外，长期失重对人的生理和心理影响尚未得到充分评估，可能需要开发人造重力系统。

（10）星体表面长期居住舱：在月球或火星表面的长期居住舱要适应弱重力环境以及恶劣的自然条件。

（11）火星返回舱：从火星表面升空返回空间轨道所需燃料恐无法直接从地球运输过去，一个可行的方案是先期将火星返回舱送至火星表面，利用火星大气中二氧化碳成分生产液态氧。

2.2.2 中间任务模块（共3项）

（1）低温燃料空间推进系统：用于地月系统内

空间运输，但不适用于至火星的长距离运输。许多关键技术可以作为核动力热能推进器（NTP）的基础。

（2）月面舱：适用于月面环境，可以向火星表面舱进行技术过渡。

（3）月球轨道舱：适用于绕月飞行，可以向深空居住舱进行技术过渡。

2.2.3 分支任务模块（共5项）

（1）小行星捕获系统：仅适用于ARM任务。

（2）超长期深空居住舱：因登陆火星卫星任务需要连续2年以上的太空飞行，对于宇宙射线防护的要求甚至超过了登陆火星。

（3）月面降落舱：因月球表面没有大气层，降落舱的技术与火星降落舱不同。

（4）火星轨道变轨舱：仅适用于火星卫星登陆。

（5）火星卫星对接舱：仅适用于火星卫星登陆，因火星卫星无重力势阱，不需着陆技术，仅需对接技术。

就三条具体的路径而言，虽然第一条路径（ARM——火星卫星——火星）实现第一个目标的门槛最低，但后期技术风险巨大，因为前两个目标只解决了11项通用任务模块中的5项，登陆火星面临“技术悬崖”；同时这一路径中还含有4个分支任务模块，从整体经济性来讲并不划算。相比较而言，第二条路径（月球短期登陆——月球长期基地——火星）的技术过渡更加平滑，只含有1项分支任务模块，并且月球资源的开发具有更加现实的战略意义，因此是国际上载人深空探索的主要规划路径。第三条路径的技术过渡更加平滑，风险更低，但因其任务量巨大，投入远超可以承受的范围，仅仅作为参考。

从预算角度来看，近年来美国载人航天的年度预算稳定在80亿美元的水平，并且预计到2018财年每年增长1%。考察NASA载人航天的预算结构，41%是生产维护等运行费用，15%是地面通信等辅助支持费用，33%是SLS、猎户座飞船等较为成熟技术的开发费用，仅有11%用于未来战略新技术的研究。考虑到通胀因素，如果继续维持这一预算水平，NASA在ARM项目后将无力进行任何新技术的研发，因此，登陆火星的目标必将失败。

3 美国载人航天计划现存主要问题及政策建议

“路线图”报告指出了美国载人航天计划现存的主要问题，并对美国未来的载人航天政策提出了一些基本的原则性建议。

3.1 主要问题

(1) 美国近期的深空探索目标与传统的国际合作伙伴不一致，这意味着美国只能单干。国际上的主流目标是重返月球，并在月面拓展活动空间，而美国却关注小行星重定向（ARM）计划。美国的选择既有预算上吃紧的原因，也有不愿重复已经完成的任务的心理因素。但正如人类开发新大陆的历史所证明的：从新大陆的发现中获益最多的人不是第一个登上新大陆的人，而是对新大陆进行精耕细作的后来者。

(2) 国际空间站占用了美国进行深空探索的宝贵资源。但从长期看，进军火星的一些关键性问题，如长期微重力环境对人体的影响，又不可避免地需要国际空间站这样的长期研究平台。美国在国际空间站的后续运营中应尽可能与商业伙伴和国际伙伴分摊成本。

(3) 美国现行的在航天领域对中国进行限制的法律实际上使美国自我孤立。中国正在稳健而富有战略性地成为航天领域的国际领导者——美国与苏联冷战时期进行的太空竞赛存在很多技术失误，而中国深思熟虑的太空计划却一步一个脚印，几乎没有失败。美国现在一方面需要与中国的作，另一方面又需要提防中国的竞争，但与现实不协调的一刀切政策却使美国的传统合作伙伴与中国越走越近。

3.2 政策建议

(1) 坚持进行载人深空探索计划，确立登陆火星远景目标，从而不断拓展人类生存进步的疆域。

(2) 根据国际伙伴的能力和意愿，在任务初期就让其参与深空探索路线的设计，并制定可行的成本分担机制。

(3) 确定切实可行的阶段性目标，不断取得进步，最终实现远景目标。

(4) 保持开放心态，寻求与新的伙伴进行合作，努力解决合作过程中存在的技术性障碍。

(5) 制定备案，以应对难以意料的技术或政

治经济风险。

(6) 具体的深空探索路径应将科学、文化、经济、政治、教育等各方面的利益最大化。因此，深空探索的路径应具有如下特点：阶段性目标应符合以上各方面的价值；阶段性目标能让利益相关各方，特别是纳税人看到实实在在的进展，从而对最终目标的实现具有信心；路径的各项任务在技术能力上应是逻辑连贯的；尽量不进行对后续无贡献的任务；探索路径中不包含不可承受的风险；预算应保证进展的节奏，使基础设施、人员技术熟练程度等都保持在一个比较完善的水平。

4 各界讨论与反馈

“路线图”报告发布后，引起了美国航天界广泛的关注和讨论。NASA 在第一时间对报告进行了书面回应^[8]，称对报告中坚持将火星作为载人航天的远景目标表示欢迎。NASA 已经在 SLS、猎户座飞船等关键环节上取得了显著进展，并将按照计划稳步推进这一目标的实现，但并没有对路线的选择做更多的评论。

2014 年 6 月 25 日，美众议院科学、空间与技术委员会就此报告举行了专门听证会。委员会主席 Lamar Smith 在发言中^[9]说，自从 2010 年重返月球的“星座”计划取消以来，美国的航天政策经历了严重的倒退，许多专家质疑现任政府航天计划的严肃性。美国曾经在航天史上取得辉煌的成就，但现在，美国最先进的飞船和火箭却只放置在博物馆里。

另一方面，NASA 航天专家 Louis Friedman 和 Thomas Jones 于 2014 年 6 月 30 日发表文章^[10]，为现行的 ARM 目标进行辩护。文章称，在现有的种种条件制约下，将航天员送至一颗重定向到绕月轨道的近地小行星是目前唯一的选择。只有这样，美国才能保证在可预期的未来取得实实在在的成果。同时，这也是一项非常具有意义的任务，可以验证通向火星的终极目标的许多关键性技术。由于现在尚无法预测 10 年后的技术进展和财政状况，因此必须基于现实进行动态规划。

综上所述，美国的载人航天目标与紧张的财政现实将会是一对长期存在的矛盾，在此过程中，必然有更多的争论和政策反复。美国在实现

其载人登陆火星的远景目标过程中，将会面临严峻的挑战。■

参考文献：

- [1] National Research Council. Pathways to Exploration—Rationales and Approaches for a U.S. Program of Human Space Exploration[M]. Washington D.C: NRC,2014-05.
- [2] Claude LaFleur. Costs of U.S. piloted programs[N]. The Space Review, 2010-3-8.
- [3] Launius.R.D. Public opinion polls and perceptions of U.S. human spaceflight.Space Policy, 2003, 19:163-175.
- [4] US Department of State. International Space Exploration Forum Summary[EB/OL]. (2014-01-10)[2015-01-30]. <http://www.state.gov/r/pa/prs/ps/2014/01/219550.htm>.
- [5] Harwood W. Boeing, SpaceX on track for commercial crew flights to station in 2017. [EB/OL]. (2015-01-27)[2015-01-30].<http://spaceflightnow.com/2015/01/27/boeing-spacex-on-track-for-commercial-crew-flights-to-station-in-2017/>.
- [6] US Congress. Public Law 111-267 :An Act To authorize the programs of the National Aeronautics and Space Administration for fiscal years 2011 through 2013, and for other purposes. Washington DC: 111th Congress, 2010-10.
- [7] Drake. B. Design Reference Architecture 5.0. (2009)[R/OL]. http://www.nasa.gov/pdf/373665main_NASA-SP-2009-566.pdf.
- [8] NASA. NASA Statement on National Research Council Report on Human Spaceflight[EB/OL].(2014-06-04) [2015-01-30]. <http://www.nasa.gov/press/2014/june/nasa-statement-on-national-research-council-report-on-human-spaceflight/#.VQ4NuvzF8h0>.
- [9] US House of Representative. Statement of Chairman Lamar Smith (R-Texas) Hearing on Pathways to Exploration: A Review of the Future of Human Space Exploration[R/OL]. (2014-06-25) [2015-01-30].<http://docs.house.gov/meetings/SY/SY00/20140625/102404/HHRG-113-SY00-20140625-SD004.pdf>.
- [10] Friedman L, Jones D.NRC’s “Pathway to Exploration” should start with the Asteroid Redirect Mission[R/OL]. (2014-06-30) [2015-01-30]. <http://www.thespacereview.com/article/2545/1>.

Outlook of the U.S. Manned Space Exploration

QIAO Jian

(The Ministry of Science and Technology of People’s Republic of China, Beijing 100862)

Abstract: This article analyzes the historical and present policies of the U.S. manned space exploration, studies the assessment report on the U.S. human spaceflight by the National Research Council, which conducts a feasibility and affordability analysis of the different pathways to realize the horizon goal of human landing on mars and provides fundamental suggestions on the human space exploration policy under the budget-limiting and policy-swaying circumstances. The U.S. human space exploration shed a light on the development of China’s human space exploration course.

Key words: United States; manned space exploration; mars; space policy