

美国国家航空航天局 2016 技术路线图再评估

概要

历史上，在航空航天领域，美国政府机构和商业部门一直是全球的引领者。保持这一领导地位的关键因素是不断研发先进技术，这对实现美国的太空梦想，包括载人火星探索任务，都至关重要。NASA 正在实施一系列航空和航天技术计划，通过制定路线图流程，确定技术需求，并改善整个技术研发管理能力。2010 年，NASA 制定了 14 个技术领域路线图草案，以指导航天技术的研发。这些路线图经过国家科学、工程和医学院的外部评审^①。相关评估报告参见 2012 年国家研究委员会报告《NASA 航天技术路线图和优先排序：重振 NASA 技术优势与辅平航天新纪元之路》，该报告指出：“随着美国航天任务的扩展，所需技术的研发变得更为模糊，因此应加倍努力，制定和评估具有前瞻性的技术研发计划^②。

2015 年，NASA 发布经过修订的技术路线图。来自载人探索和运行任务部及科学任务部的一个重大变化是，根据特定设计参考任务(DRMs)，把技术分为使能技术和增强技术，并对技术与

^① 从 2015 年 7 月 1 日起，该机构被命名为国家科学、工程和医学院，在此之前从事该活动的机构在本报告中沿用其历史上的国家研究委员会这一说法。

^② 国家研究委员会主编，《美国国家航空航天局空间技术路线图和优先事项》，2012 年，p. 11。

任务的相关性进行了评估^①。同年，NASA 要求国家研究委员会对 2015 年技术路线图中新引入技术的优先级进行评估^②。负责组织上述评估任务的 NASA 技术路线图委员会还被要求就未来技术路线图的更新提出独立评估的方法建议，每 4 年进行一次评估。

技术领域分解结构

2015 年 NASA 路线图采用 4 级技术领域分解结构进行组织。第一层级为技术领域(TA)，也是各个技术路线图的名称：

- 技术领域 1：发射推进系统；
- 技术领域 2：空间推进技术；
- 技术领域 3：空间动力和储能；
- 技术领域 4：机器人与自主系统；
- 技术领域 5：通信、导航和轨道碎片的跟踪和表征系统；
- 技术领域 6：人类健康、生命保障及居住系统；
- 技术领域 7：载人探索目的地系统；
- 技术领域 8：科学仪器、观测站和传感器系统；
- 技术领域 9：再入、下降及着陆系统；
- 技术领域 10：纳米技术；
- 技术领域 11：建模、仿真、信息技术和信息处理；
- 技术领域 12：材料、结构、机械系统及制造；
- 技术领域 13：地面及发射系统；
- 技术领域 14：热管理系统；
- 技术领域 15：航空技术。

每个路线图还包含第二层级(技术分领域)、第三层级(相关

① NASA《技术路线图：引言，跨学科技术及附录》，华盛顿特区，2015 年，7 月，从 i-61 到 i-67 页。

② 本项研究并未对航空技术进行评估。航空技术首次列入 2015 年路线图，因此 2012 年国家研究委员会报告没有给出进行评估的基准。

技术)和第四层级(研究任务)。2012 年国家研究委员会报告重点关注对层级 3 技术的评估。2010 年 NASA 路线图草案的技术领域分解结构包含了 320 项三级技术。2012 年国家研究委员会评估报告建议修改为包含 295 项三级技术。2015 年 NASA 路线图技术领域分解结构包含 340 项三级技术。不同版本中技术领域分解结构数量的净增加源于多种因素:增加、删除、修订、合并了许多技术。通过对比 2010 年、2012 年和 2015 年技术领域分解结构(参见附录 B)可以发现,42 项技术符合本报告定义的“新”技术标准,这些新技术所在技术领域如下:

- 技术领域 1: 发射推进系统(11 项新技术);
- 技术领域 4: 机器人和自主系统(11 项新技术);
- 技术领域 5: 通信、导航和轨道碎片的跟踪和表征系统(4 项新技术);
- 技术领域 7: 载人探索目的地系统(1 项新技术);
- 技术领域 9: 再入、下降及着陆系统(3 项新技术);
- 技术领域 11: 建模、仿真、信息技术和信息处理(8 项新技术);
- 技术领域 13: 地面及发射系统(3 项新技术);
- 技术领域 14: 热管理系统(1 项新技术)。

高优先级技术

委员会沿用了 2012 年评估报告采用的优先级制定程序,对上述新技术进行了评估,其中,5 项新技术被列为高优先级。

发现 1: 根据对 2015 年 NASA 路线图列为三级的 42 项新技术的评估分析,其中 5 项新技术被增加到 2012 年国家研究委员会确立的 83 项高优先级技术列表(按编码排序)中,分别是:

- 4.3.7 抓取技术;
- 4.4.8 远程交互;

- 9.2.7 地形相关传感和表征；
- 9.2.8 自主目标锁定；
- 14.3.2 热防护系统建模和仿真。

技术 4.3.7 抓取技术

抓取系统被列为高优先级技术，因为此类技术可以实现对小行星及源于小行星天体的物理捕获，还可以实现在上述天体上固定无人航天器，以及捕捉自由飞行的航天器。因此，抓取技术有助于将小行星由原来轨道上转移至绕月轨道、人工收集绕月轨道天体的采样并送返、缓解轨道碎片、保护地球免于小行星碰撞，并帮助在轨装配大型航天器，支撑未来探索任务。潜在的商业应用包括安全地对巨石大小的小行星上进行细致采样和处理，以进行商业航天资源开发，以及把失效卫星安全带返、处理、营救或修复。近期签署的美国《商业航天发射竞争法案》赋予美国公民相关权利，即可享有从任意小行星上获取(抓取并带回地球)太空资源的权利，这一法案可能引发人们对小行星进行商业开采的兴趣。即便如此，NASA 仍把抓取技术视为高优先级，这是因为国家其他政府机构和行业的相关研究工作很可能无法满足 NASA 的特定需要，尤其是即将面临小行星重定向任务时间节点。

4.3.7 节“抓取技术”与 4.6.3 节“对接和捕捉机构及接口”存在部分重复。但是，4.6.3 节“对接技术”更注重两个航天器之间的对接，而 4.3.7 节“抓取技术”还涉及两个自然物体的相互作用，例如小行星或小行星上的石块抓取。小行星属于大质量翻滚目标，具有结构不规则的物理特性，需要新的抓取技术以实现抓取小尺寸的小行星，或从大尺寸小行星上抓取岩石。

从小行星表面抓取、装载前机动、样品送返是 NASA 无人和载人探索从未面临的新任务，难以从国防部或其他机构的航天航空研究中借鉴相关经验。可以实现对石块、其他自然天体和空间飞行器可靠物理捕捉的抓取技术研发将大大简化对抓取系统机器

控制指令的需求。人们对技术领域 4 的路线图中这一技术的缺失表示了关注，其中仅包含了一项四级研究任务，也没有像三级技术那样给出细致描述。另一项 4 级任务可以是非刚性抓取方式，从而捕捉大型旋转的物体（例如探讨固定在可调节系绳上的抓手），以阻止旋转并将物体可靠固定在航天器上（或将航天器及其发动机可靠固定在该物体上）。

技术 4.4.8 远程交互

远程交互被赋予高优先级，因为根据定义，远程交互是指人们利用控制和通信方法远程操控自主系统和机器人系统。监督式控制需要利用较高的目标指令而非低端命令控制对机器人，这要求机器人系统具有全自主或半自主能力。这一技术有助于实现颠覆性科学和探测任务，例如在遥远星球的无人任务及很少需要人工监督的同步无人任务。远程交互所涉及技术还包括对远程系统的人工控制、对系统状态的人工监控、评估任务进展、观察遥远环境以及进行操作决策，如战术规划等。

技术 9.2.7 地形相关传感和表征

近期继新地平线到冥王星探索任务成功完成后，NASA 完成了对整个太阳系的探索。NASA 正继续着行星探索任务，更加注重在行星表面进行探索。该项技术将实现“对科学关注区域或预先部署资产安全精确着陆的高速、高精度测量算法。”^①因此，9.2.7 技术将在这方面实现许多关键任务，可能会引起很多惊人的发现。对技术领域 9 的三级技术所做的评估中，地形相关传感和表征技术最有发展前景。该项颠覆性技术有助于未来 20 年实现目前尚无法完成的新任务。在载人和无人探索领域，该技术将对多项任务产生较大影响。该技术对航空航天领域具有广泛意义，

^① 2015 年 NASA 技术路线图：技术领域 9：再入、下降和着陆系统，华盛顿特区。p. TA9-25.

且已为商业和军用自主车辆，如快速发展的无人机所运用。

技术 9.2.8 自主目标锁定

自主目标锁定与 9.2.7 节“地形相关传感和表征”关联度极高，也被视为需要优先发展的技术门类，原因是这一技术具有颠覆性潜力，可以帮助实现数项新任务，例如新疆界任务。通过改善车辆着陆点和探测点地形评估和表征能力，该项技术有助于实现下一步目标自主锁定，这一技术能力十分关键，因为遥远的星际间距离令远程引导变得十分困难甚至完全没有可能。即便对载人任务，该项技术对确保安全着陆也十分关键。与技术 9.2.7 一样，该项技术对航空界很多商业和军用自主车辆具有中度影响。

技术 14.3.2 热防护系统建模和仿真

热防护系统(TPS)建模和仿真被定为高优先级技术，原因是在高速进入地球、火星和其他星体大气层过程中，有效热防护层的设计面临的一个主要局限性在于较高辐射震动建模存在不确定性。早期热防护系统的设计大多基于经验，或在地球大气层中进行的全面直接(费用不菲)试验。由于大气层再入面临极端环境，因此建造地面测试设施既昂贵又困难。基于物理模型的计算方法，包括建模材料，正在改善实验室试验和飞行试验热防护系统的验证方法，上述模式可以更可靠地预测热防护系统性能。但是还应进行进一步研发，以便大幅度降低设计余量，从而为降低重量树立更大信心。提升再入冲击物理建模的精度、热辐射建模精度，以及精确评估热冲击、热辐射和热烧蚀层之间的相互作用，均面临重大挑战。借助这一技术，可有些应对上述挑战。目前，火星往返任务的不确定性范围在+80%至-50%之间，其他目的地探索任务的不确定性也各有不同^①。对所有行星探索任务来说，技术 14.3.2 的建议研究目标是将不确定性降低至 25% 以下。不确定性

^① 2015 年 NASA 技术路线图，技术领域 14：热管理系统，p. TA14-32。

的降低将能够使热防护层重量减少，从而降低空间飞行器重量和/或增加有些载荷重量。该类技术与 2012 年被认定为具有高优先级的 X.5 再入、下降和着陆热保护系统关系密切，而前者包含刚性和柔性系统。为推动该类技术发展和实现其最大潜力，必须改善其建模技术。如技术领域 14 路线图所述，“该技术发展面临的重大挑战是，此类技术的飞行和地面试验数据的不足”（第 TA14-93 页）。

最高优先级技术

2012 年，国家研究委员会报告根据相关技术对下述三大技术目标的重要程度，确定了最优先发展的技术门类：

- 技术目标 A，载人太空探索：将载人太空探索的范围扩展到近地轨道以远。该目标主要关注载入探索任务。

- 技术目标 B，现场测量：探索太阳系的演变以及地外生命的可能性。这一目标包括无人和载人探索任务。

- 技术目标 C，远程测量：增加人类对地球和宇宙的认识。该目标主要关注无人探索任务。

NASA 进行的空间科学、地球科学和宇宙探索任务均针对上述三大目标。2012 年国家研究委员会报告并未评估或论述上述技术目标的相对优先程度。

2012 年报告给出了 16 项最高优先级技术。但是其中 5 项是相关技术群，分别命名为 X.1 至 X.5。因此这 16 项最高优先级技术（单项技术或技术群）总共包含 31 项单项技术^①。

在 2012 年国家研究委员会报告的基础上，委员会将新增加的 5 项高优先级技术中的 3 项列为最高优先级技术。新的最高优先级技术群构成如下，其中还引入了 2012 年国家研究委员会报告中建议的两项技术，新的最高优先级技术情况如表 S.1 所示。在上

^① 如表 S.1 所示，16 门类技术分别针对不同的技术目标。

述相关列表中，新增加的技术项用阴影表示。

- X. 1 载人太空飞行的辐射缓解
 - 6. 5. 1 辐射风险评估和建模
 - 6. 5. 2 辐射缓解^①
 - 6. 5. 3 辐射防护系统
 - 6. 5. 4 辐射预测
 - 6. 5. 5 辐射监视技术
- X. 2 轻质和多功能材料及结构
 - 10. 1. 1(纳米)轻质材料及结构
 - 12. 1. 1 材料：轻质结构
 - 12. 2. 1 结构：轻质概念
 - 12. 2. 2 结构：设计及验证方式
 - 12. 2. 5 结构：创新、多功能概念
- X. 3 环境控制和生命维持系统(ECLSS)
 - 6. 1. 1 环境控制和生命维持系统：空气净化
 - 6. 1. 2 环境控制和生命维持系统：水回收和管理
 - 6. 1. 3 环境控制和生命维持系统：垃圾管理
 - 6. 1. 4 环境控制和生命维持系统：居所
- X. 4 引导、导航和控制(GN&C)^②
 - 4. 6. 2 相对引导算法(用于自主机动和对接)^③
 - 5. 4. 3 机载自主导航和机动(用于定位、导航和授时)
 - 9. 2. 7 地形相关传感和表征(用于下降和目标锁定)

① 在 2015 年技术领域分解结构中，该类技术被重新命名为辐射缓解和生物应对措施。

② 技术 9. 4. 7 引导、导航和控制传感器及系统(用于再入、下降和着陆)在 2012 年国家研究委员会报告中被分为 X. 4 类，但由于缺少技术内容，在 2015 年 NASA 技术路线图技术领域 9 中被删除。

③ 在 2015 年技术路线图中被重新命名为引导、导航和控制。

- 9.2.8 自主目标锁定(用于下降和目标锁定)
- X.5 再入、下降和着陆(EDL)热防护系统(TPS)
 - 9.1.1 刚性热防护系统
 - 9.1.2 柔性热防护系统
 - 14.3.1 上升/再入热防护系统
- X.6 抓取、对接和处理
 - 4.3.6 样品采集和处理(之前的机器人钻探和样品处理)
 - 4.3.7 抓取技术
 - 4.6.3 对接和捕捉机构及接口

表 S.1 委员会 2016 年报告最优先技术门类最终列表
(基于技术目标, 包含 17 项单项和群技术, 每个技术目标包含 9 项技术)

技术目标 A 对应的最高优先级技术——载人太空探索	技术目标 B 对应的最高优先级技术——现场测量	技术目标 C 对应的最高优先级技术——远程测量
载人太空飞行的辐射缓解(X.1)	引导、导航和控制(X.4)	光学系统(仪器和传感器)(8.1.3)
长期任务航天员健康(6.3.2)	太阳能发电(光伏和热能)(3.1.3)	高对比度成像和光谱技术(8.2.4)
环境控制和生命维持系统(X.3)	电推进(2.2.1)	探测器和焦平面(8.1.1)
引导、导航和控制(X.4)	核裂变发电(3.1.5)	轻质和多功能材料及结构(X.2)
(核)热推进(2.2.3)	再入、下降和着陆热防护系统(X.5)	低温系统的主动热控制(14.1.2)
轻质和多功能材料及结构(X.2)	现场仪器和传感器(8.3.3)	电推进(2.2.1)
核裂变发电(3.1.5)	轻质和多功能材料及结构(X.2)	太阳能发电(光伏和热能)(3.1.3)

续表

技术目标 A 对应的最高优先级技术——载人太空探索	技术目标 B 对应的最高优先级技术——现场测量	技术目标 C 对应的最高优先级技术——远程测量
再入、下降和着陆热保护系统(X.5)	极端地形的移动性(4.2.1)	
抓取、对接和处理(X.6)	抓取、对接和处理(X.6)	

发现 2：在评估分析的基础上，5 项新的三级技术列为高优先级技术，其中 3 项(分别为 4.3.7、9.2.7 和 9.2.8)和出现在 2012 国家研究委员会报告临时最高级优先技术清单中的 2 项(分别为 4.3.6 和 4.6.3)技术，被列入了 16 项最高优先级技术清单中，分别是：

- 技术群 X.4，即引导、导航和控制被扩充至 9.2.7 节技术“地形相关传感和表征”(用于下降和目标锁定)及 9.2.8 节“自主目标锁定”(用于下降和目标锁定)。技术 9.4.7“引导、导航和控制传感器及系统”(用于再入、下降和着陆)，因无技术内容，在 2015 年 NASA 技术路线图技术领域 9 中被删除。

- 增加了一个新的技术群：X.6 抓取、对接和处理。该类技术包括 4.3.6 技术“样品采集和处理”(之前的机器人钻探和样品处理)、4.3.7“抓取技术”和 4.6.3“对接和捕捉机构及接口”。由于技术目标 A(载人太空探索任务)和技术目标 B(现场测量)，X.6 技术群被新增为最高优先级技术。