

核航天器：从梦想到现实

(北京航空航天大学 胡佳、孙保华 编译自 Richard Corfield. *Physics World*, 2024, (3): 32)

利用核能进行太空旅行的想法可以追溯到20世纪50年代。当时的人们目睹了广岛和长崎的核爆后，逐渐接受了核能可用于和平目的。数学物理学家戴森是核动力太空旅行最坚定的支持者之一。1958年，他参与了通用原子公司的“猎户座”项目，这一项目是物理学家泰勒(Ted Taylor)的创意，旨在建造一艘重达4000吨的宇宙飞船，利用2600枚核弹助其推进到太空。

从环境的角度来看，在宇宙飞船的后面安装原子弹听起来很疯狂，但戴森计算出，“仅有”0.1—1个的美国人会因此患癌症。该项目甚至得到了火箭专家冯·布劳恩的支持，并进行了一系列非核飞行试验。幸运的是，1963年的《部分禁止核试验条约》终止了该计划，戴森本人也在认识到原子飞船对环境的危害后，撤回了对其的支持。

尽管猎户座计划结束了，核动力推进的诱惑却从未消失，而且某种程度上正在复苏。当然，现在的思路与使用原子弹不同，是将核裂变反应堆的能量传递给推进剂燃料，将其加热至约2500 K后通过喷嘴喷出，这个过程被称为“核热推进”(NTP)。另一思路是利用裂变能能量将气体电离，从航天器的后部发射出来，即“核电推进”(NEP)。那么，核动力太空旅行是一个切合实际的愿景吗？如果是的话，哪种技术会胜出？

核助推

大多数传统火箭使用普通的化

学燃料提供动力。如20世纪60—70年代的土星5号火箭使用的是液体燃料，而1986年发射失败的挑战者号航天飞机使用的是固体燃料。最近的SpaceX的猎鹰火箭使用了煤油和氧气的混合物。这些推进剂的“能量密度”(单位体积储存的能量)和“比冲量”(它们产生推力的效率)都较小，限制了火箭的总推力(比冲量乘以排出气体的质量流量和地球引力)。

使用化学推进剂的远航极限是月球。要想到达更遥远的行星和其他深空目的地，航天器通常利用多个不同行星的引力，导致旅程迂回且时间长。例如，NASA的朱诺号任务需要五年时间才到达木星，而旅行者号飞船花了30多年才到达太阳系的边缘。此类任务还受到窄且少的发射窗口的限制。

核动力航天器将使用裂变能来加热燃料(如低温储存的液态氢)。NASA马歇尔太空飞行中心前副主任、现就职于亨茨维尔亚拉巴马大学的Dale Thomas说：“核动力推进，无论是电推进还是热推进，都能从给定质量的燃料中提取出比燃烧推进更多的能量。”如今最高效的化学推进系统比冲量约为465 s。相比之下，由于核反应的功率密度更高，核热推进的比冲量可以达到近900 s。再结合更高的推重比，核热推进可以在500天内将火箭送

到火星，而不是900天。

“推重比决定了航天器的加速能力，这在诸如逃离地球引力或在深空进行机动等关键任务阶段尤其重要”，英国航天局(UK Space Agency)发射系统负责人Mauro Augelli表示，“另一方面，比冲量是衡量火箭使用推进剂效率的指标。”基本上，对于给定数量的推进剂，核动力航天器可以比化学火箭运行得更快，维持推力的时间更长。这对于载人火星任务来说是非常有利的，宇航员不仅可以快速到达目的地，而且受到的宇宙辐射也会更少。“此外，较短的任务持续时间减少了在后勤和生命保障方面的挑战，使深空探索更加可行和安全，”Augelli补充说。

除了缩短航程时间外，核动力还可以在航天器到达目的地后为其提供动力。NASA的格伦研究中心的相关项目负责人Lindsay Kaldon说到，“核能在太阳能和化学系统无



走向核能。美国的DRACO火箭将利用裂变反应堆的热量将其推进太空

核太空旅行简史

核动力航天的想法可以追溯到20世纪50年代。当时，物理学家戴森提出使用原子弹将火箭推进至太空。20世纪六七十年代，美国国家航空航天局和美国原子能委员会启动了火箭飞行器用核引擎(NERVA)计划，利用裂变反应产生的热量推动火箭进入太空。虽然从未进行过该任务，但NERVA在反应堆设计、制造、涡轮机械和电子方面取得了若干进展。在20世纪80年代，美国斥资2亿美元设立了太空核热推进(SNTP)计划，开发核动力火箭。SNTP是美国战略防御计划的一部分，应对来袭的核导弹。由于燃料元件容易受力破裂，且推进系统测试成本过高，到20世纪90年代初终止了SNTP。现在NASA再次着眼于核太空旅行。



按需提供能源。像这样的裂变动力系统可以在月球和火星上提供安全、高效和可靠的电力

法满足长期运行需求的极端环境和空间区域中，具有巨大的优势”。

重新开始行动

2020年，美国政府向通用原子公司、洛克希德·马丁公司和蓝色起源公司三家公司拨款近1亿美元，开展“敏捷地月行动示范火箭”(DRACO)项目，将核航天器重新提上了议程。第一阶段将致力于展示核热推进可以用于近地轨道上的火箭飞行，目标是实现与现有化学火箭系统媲美的推重比。

该项目负责人 Tabitha Dodson 认为，核空间反应堆若能成功发射和飞行，将彻底改变太空飞行。与已经达到极限的化学系统不同，核技术在理论上可以进化到核聚变等系统，甚至更远，从而使人类飞得更远，在航天任务中有更高的生存和成功几率。

通用原子公司将设计核热推进

反应堆并为推进子系统绘制蓝图，而蓝色起源公司和洛克希德·马丁公司将规划航天器本身。只有在飞船到达“核安全”轨道之后，才会启动反应堆，也就是说，即使发生极小概率的事故，任何污染都将无害地消散到太空中。裂变反应堆将使用一种特殊的高含量低浓缩铀(HALEU)，可以从反应堆回收的燃料中提取。洛克希德·马丁公司已经与BWX技术公司联手开发反应堆并生产HALEU燃料，最早可能于2027年发射一枚DRACO火箭。

爱达荷国家实验室的研究人员正在帮助NASA开发和测试核火箭所需的材料，从长远来看，其目标是确定哪些材料、复合结构和铀化合物在核热推进反应堆的极端高温条件下工作最好。

来自反应堆的热量将加热氢燃料，在给定质量下提供最大的速度变化，即 Δv 。氢的缺点是密度很低，需要大型箱体储存。其他推进剂，如氨，每千克的 Δv 较低，但密度要大得多。Thomas表明，氨是将天文学家从围绕月球运行的空间站送达火星的理想燃料。

往返旅程准备就绪

Thomas在2020年关于核热推进技术的综述中总结道：常规的核

热推进系统可以为大约50分钟的短期燃烧提供大量推力，将是飞越和交会任务的理想选择。但也有“双模式”系统，将核热推进与核电推进结合起来，前者提供快速爆发的高推力，而后者产生较长时间的低推力，非常适合长途的往返任务。

BWX技术公司的空间和工程主管 Kate Haggerty Kelly 表示，核热推进系统的效率是化学推进系统的两到五倍，提供了大推力。相比之下，“核电推进系统可以提供更高的效率，较低的推力，但通过核裂变产生的能量可以转化为电能，为航天器上的子系统提供动力。”

核热推进和核电推进哪个更适合于深空作业？根据 Thomas 的说法，这取决于任务的类型，“对于特定类别的任务，如超过一定质量的科学航天器、载人或特定目的地任务，核热推进将是最佳选择；而对于其他任务，核电推进将更加合适。就像一次汽车旅行一样，这取决于行程距离、携带多少行李以及行程安排等等。”

NASA已经在考虑几个核动力太空任务。根据2021年6月发布的一份报告，这些任务可能包括围绕天王星和木星的各种卫星运行的航天器，以及围绕并着陆在“海卫一”的其他航天器。该报告还设想了一枚进入太阳极地轨道、甚至进入星际空间的核动力火箭。

归根结底，某种类型的核推进，无论是单独还是结合使用，都将成为人类未来进行太空探索的重要组成部分。NASA、英国航天局和欧洲航天局都在研究核动力太空飞行技术，到21世纪30年代，有望在首批载人火星任务上使用某种形式的新技术，戴森的梦想可能很快就會实现。