

空间核动力技术概览与发展脉络初探

廖宏图^{1,2}

- (1. 上海空间推进研究所, 上海 201112;
2. 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

摘 要: 在概略介绍现有技术基础上, 初步探讨空间核动力技术的发展脉络, 并分析其未来发展方向。基于固体核反应堆的空间核电源、核电推进及核热推进, 是经过试验验证可行、具有一定技术基础并可预期实现空间应用的空间核动力技术。更先进的概念方案包括: 基于气体核反应堆的核电源/核热推进、脉冲核爆推进、核裂变碎片推进等, 它们的性能逐代跨越直至逼近理论极限。要充分利用核能的潜力, 一方面需要提高单位质量核燃料的核能释放率, 另一方面也需要减少核反应产物动能转换为无轨热运动的比率。核能潜力的充分利用需要以增加系统质量为代价。为满足未来宽广的空间任务需求, 多物理机制驱动的大深度变工况一体化核能空间动力系统是未来必然发展趋势。

关键词: 空间核电源; 核推进; 技术方案; 先进概念

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 05-0058-08

Survey and venation analysis on space nuclear power

LIAO Hongtu^{1,2}

- (1. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;
2. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China)

Abstract: A preliminary discussion on developing venation of space nuclear power and direction of future development is given on the basis of a survey on state of arts. The space nuclear power source, nuclear electric propulsion and nuclear thermal propulsion based on solid core nuclear reactor, which are validated in experiments and are somewhat technical maturity, can be expected in space application in the near future. More advanced conceptual schemes include: nuclear power source and nuclear propulsion based on gas core nuclear reactor, nuclear pulse propulsion, fission fragment rocket, etc., which represent a stairway of working performances up to theoretical limits. Two aspects must be considered when one wants to explore the potential of nuclear energy: raising the releasing rate of mass specific nuclear energy, and reducing the ratio that the kinetic energy of productions of nuclear reactions is converted into trackless thermal motion. The full use of the potential of nuclear energy in

收稿日期: 2015-10-28; 修回日期: 2016-03-18

作者简介: 廖宏图 (1968—), 男, 博士, 高级工程师, 研究领域为空间先进推进技术

space is unavoidable to take the increase of system mass as a cost. The integrative space nuclear power system, which is driven by various physics mechanisms and can vary performances tremendously to satisfy broad requirements of space missions, will come forth in the future inevitably.

Keywords: space nuclear power source; nuclear propulsion; technical scheme; advanced concept

0 引言

能源在航天领域处于核心地位，人类的航天能力直接取决于所能够驾驭的能量强弱。化学能是目前航天动力的主要能源，其技术已经趋于完美，但也接近了其理论极限。为实现更快、更远、更广、更大规模的目标，需要找到新的更强、更大规模的能源。纵观近、现代科学的当前发展成果，唯有核能有可能成为帮助人类进入更深邃广邀宇宙空间的新一代的强大能源。

自二战末核武器用于实战以来，其巨大威力深深震撼了整个人类，由此也驱动了核能和平利用事业的蓬勃发展，这其中就包括了核能的空间利用技术。

上世纪五十至七十年代是空间核动力技术发展的鼎盛时期^[1-2,6]，其间所开发的小微功率空间核电池已经实现空间应用多年并成为以后各新型号的发展基础；固堆核热火箭原型样机已经研制成功，尽管没有实际空间应用，但已经奠定了坚实基础。进入二十一世纪，随着空间开发需求的不断提高，尤其为了满足载人深空探测的需要，核能的空间利用再次成为发展热点，并以大功率核电源、大推力/大功率核推进为发展重点。可以预期，以现有的发展基础，结合现代科学技术的近期发展，空间核动力技术的大规模应用并非遥不可期。

基于目前的技术发展现状，在空间推进领域有两种核能利用方式^[1]：a) 将核能转换为电能再驱动电推力器转换为推进剂的定向喷射动能；b) 利用核反应释能直接加热推进剂然后导入热喷管转换为喷射动能。前者称为核电推进，后者称为核热推进。

核电推进因为采用了电磁场加速带电粒子的方式，所以加速效率很高，可以实现很高的比

冲，但需要经过核热能-电能-定向喷气动能多重能量转换过程，不仅能源利用率低，而且相应需要更多的组件质量，推重比极低，推力不能太大；与之相反，核热推进则利用热喷管将核能直接转换为定向喷射动能，避免了多重能量转换过程中的能量损失及组件质量要求，所以能源利用率高，可实现很高推重比，获得与化学火箭相当的推力，但热力学原理限制了其加速效率，比冲显著低于核电推进，与化学推进同量级。

无论核电推进还是核热推进，其得以实现的基础是作为核能释放装置的空间核反应堆。核反应堆在前者作为热电源的热源，而在后者作为加热推进剂的热源。所以，不管那种推进方式，核反应堆的工作方式、工作性能直接决定了整个推进系统的总体性能。

固体核裂变反应堆是目前人类掌握的唯一可控核能释放装置，所以目前研制成功或近期内在研的空间核电源、核热推进都采用固堆方式。因为系统工作原理不同，所以对核反应堆的性能要求也有所区别，而决定整个系统性能的要害也有所区别。

固体核反应堆需要将核能释放速率控制在很小的数值上以维持燃料堆的固体形态，远未能充分利用核能的巨大潜力。要进一步提高性能，必需去除固态限制，让反应堆工作于气体（等离子体）形态，此即气体核反应堆，这是未来的必然发展方向；另一方面，核电推进与核热推进的工作性能具有互补性，二者联合工作，乃至研制多物理机制驱动的统一核推进装置，构建一体化联合空间核动力系统，可以满足未来相当宽广的空间任务需求，展现了一幅非常诱人的、也具有可实现性和可操作性的发展蓝图。

本文首先简要介绍目前技术状态比较成熟的基于固体核反应堆的空间核动力技术，以及其它

一些比较先进的典型空间核动力概念方案,然后根据这些内容探讨空间核动力技术的发展脉络。

1 基于固体核反应堆的空间核动力装置

1.1 固体核反应堆^[1-2]

核反应堆是可控核能释放与收集装置。在其中按特定方式放置和约束核燃料,通过适当方式控制核反应的启动、关闭及能量释放功率,并以适当方式及时将核反应释放的能量收集引出后导入其它专门的能量转换装置(芯外转换),或者直接在反应堆内部实现转换(芯内转换),实现核能的可控利用。核反应堆中核燃料的物理和化学形态决定了核反应堆的基本类型,也决定了可资利用的约束方式和能量收集方式。

固体核反应堆中的核燃料为固态,通过核燃料单元的密集堆积实现约束,而可用的能量收集方式就是由流体工质通过换热方式将以热能形式释放的核能带出。因此,此类核反应堆是由多个具有适当几何形状的固体核燃料单元堆栈而成,每个燃料单元内按适当方式和密度凿出若干通孔作为与流体工质的换热流道。固体核反应堆可靠工作的关键在于由核反应强度决定的核能释放功率与由流体换热工质水力特性决定的换热功率的处处匹配。

核能量来源于核反应。有两种激发核反应的基本机制:放射性衰变和粒子轰击核反应。前者是自发且随机的,因此是不可控的;后者则是有条件的,所以可以通过控制这些条件的满足情况实现对核反应的控制。核裂变、核聚变是目前已知的能够释放能量的两类粒子轰击核反应,前者通过分裂核素释放能量而后者通过聚合核素释放能量。基于中子轰击的链式核裂变反应是现代核工业技术的基础,因为此类反应存在一个非常确定的临界体积,通过控制反应堆体积与临界体积的接近程度就可以控制核反应的进行。固体中子轰击核裂变反应堆是目前唯一实现人工控制的核反应装置。通过电磁约束的气体核聚变反应堆是人们努力实现的核聚变控制装置,但目前尚未实现净能量输出,离应用尚有待时日。

1.2 基于固体核反应堆的空间核电源及核电推进^[3]

核电源就是将以热能形式由核反应堆内产生的能量转换成电能。决定核电源类型的要素是:核燃料物理化学形态、热电转换方式、热电转换场所(芯内转换/芯外转换)。

目前在空间固体核反应堆电源中常用的热电转换方式有两类:静态热电转换及动态热电转换。它们都是利用冷端和热端间的温度差将热能转换为电能。其中,静态方式是利用某些热电物理效应直接转换;动态方式需要循环工质在热端和冷端间交换热量的同时驱动运动机械切割磁力线做功而将热能转换成电能。前者结构简单、可靠性高,但效率低,适用于小微功率核电源;后者结构复杂,工作环节多,但效率高,适用于大中功率及以上的核电源。

无论哪种类型的热电转换,都基于热力学中的热-功转换原理,其基本要求是:热源、冷源及二者之间的热功转换装置。转换效率决定于冷/热源间的温差,转换速率(即功率)决定于冷/热源间流过热功转换装置的热流量。热源温度受限于反应堆热载能力,尤其对于固体核反应堆,必须保证核燃料不熔化;在航天器这个特殊场合,宇宙空间是唯一的冷源,而且只能以辐射方式耗散余热,因此必需设计高效的辐射散热器,这是决定空间核电源乃至整个航天器总体性能的关键要素之一。为提高空间核电源的输出功率,需要尽快地、尽可能多地将余热辐射到宇宙空间中,因而需要更大的散热面积和更高的散热温度,但前者意味着需要更多的质量用于散热器,后者意味着更小的冷/热源温差(热源温度受限),因而更小的热电转换效率,为保证足够的输出电功率就需要更大的反应堆,这进一步恶化了系统乃至整个航天器质量特性。因此,设计空间核电源时,需要以系统总质量最小为目标优化热力循环参数及热电转换方式。

美国和前苏联在上世纪中叶分别研制成功的放射性同位素核电池及小功率固体核反应堆电源都采用了芯内静态热电转换方式,系统质量/输出电功率比分别达到 186 kg/kWe 和 200 kg/kWe。更新研制的更大功率空间核电源都是固体核反应

堆类型，并大多采用芯外动态热电转换，极少数采用芯外静态热电转换，输出电功率 100 kWe 到数兆瓦，热电效率 20~30%，个别超过 30%，系统质量/输出电功率比最低能达到 20 kg/kWe 左右。

更先进的核电源采用磁流体效应进行热电转换^[9]。其主要优势就是转换过程中热流体无需与固体表面接触，工作温度高，所以热电效率高且散热器质量低。原理样机试验表明，空间固堆磁流体核电源热电效率达 50%~60%，系统质量/输出电功率比达 2~5 kg/kWe。

核电推进就是利用核电源输出的电能驱动电推力器。空间核电源可以提供充足的电力，而电推进可以获得很高的比冲（数千到数万秒），所以核电推进是一种很理想的工作模式。不过，因为电推力器推力/输入电功率比及推重比很小，而空间核电源的系统质量/输出电功率比很大，所以需要很大的全系统（电源+电推进系统）质量才能获得足够的推力，全系统推重比很小，限制了核电推进的应用范围。

核电推进系统包括 4 个分系统：核反应分系统（核反应堆）、能量转换分系统（热电转换装置）、功率处理与分配分系统和推进分系统。每个分系统相对独立，通过热、电和机械界面相连。各种类型的电推力器，包括静电式和电磁式，都可用于核电推进。前者如栅网离子型（GIT）、霍尔效应型（HALL），后者如磁等离子体动力学型（MPD）、电磁脉冲感应型（PIT）。每种推力器都有自己的优势和劣势，适用的空间任务范围也有所不同；它们的当前研制状态和性能参数离应用要求有一段距离，各自需要突破的技术难点也有所区别。

1.3 基于固体核反应堆的核热推进^[1-2]

固堆核热推进直接以换热工质为推进剂，在获取堆芯热量并引出后直接导入热喷管将热能转换成定向喷气动能产生推力。因为无需任何能量转换装置，所以结构紧凑，推重比远高于核电推进。不过，此类热推力器的理想比冲与喷管入口流体总温的 1/2 次方成正比，但固体核反应堆的最高工作温度受限于核燃料熔点，限制了入口温

度的上升，这是限制其比冲的主要因数；采用分子量最小的氢气为推进剂，可以在受限温度下获得最大比冲。

固体核热推进的关键技术之一是核燃料的物理化学形态^[9]，重点在于研制耐高温、氢腐、强冲刷的高性能固体核燃料。在二十世纪六七十年代美国 ROVER/NERVR 计划期间，以及前苏联的核热火箭计划中，所研制的各种试验和原型样机，采用的核燃料有 4 种类型：石墨基 UC₂，石墨基复合 (U,Zr) C，UO₂-W 金属陶瓷 CERMET，二重 (U,Zr) C 或三重 (U,Zr,Nb) C 碳化金属固溶体，能够达到的反应堆出口温度/理论比冲分别是：2 500 K/850 s，2 700 K/900 s，2 900 K/930 s，3 100 K/975 s。这些样机最小推力 6.8 t、最大推力近 100 t，最长持续工作时间近 2 h。尽管取得这些成果，但燃料爆裂损伤和腐蚀问题始终没有得到很好解决。为解决这些问题，除了寻找更高性能的燃料物理化学形态外，还需要改进堆芯结构。

堆芯结构是固堆核热推进的另一项关键技术，不仅决定了能够达到的最高推重比，也是解决燃料寿命问题的关键因素。尽管推重比远高于核电推进，但因为额外增加了反应堆质量，所以一般情况下，推重比与化学推进相比仍然有较大差距。缩小此差距的根本途径在于：尽可能提高堆芯的热功率密度并让这些释放的热量及时交换给推进剂，从而提高推力/反应堆质量比。要实现此目标，堆芯结构设计是关键。另一方面，已研制成功的核热火箭样机所出现的影响燃料寿命问题，经过分析，根本原因在于堆芯各处的核反应释热功率与换热功率的不匹配，造成在固体域内部出现很高的温度梯度，产生很大的热应力从而导致结构损伤。要解决此类问题，堆芯结构设计也是关键。

经过试验验证的堆芯结构包括：美国 ROVER/NERVR 计划期间所研制的轴流式六棱柱蜂巢堆栈型、美国星球大战期间研制的径流式颗粒床型、前苏联核热火箭样机采用的轴流式交织网堆栈型，这其中后者的效果相对好些。它们能够达到的推重比除颗粒床型>30 外，其余约 6~8。

更新的正在研制的方案包括：径流式槽环堆栈型、径流式薄片卷筒型、泡沫燃料型等。其中的最后一种类型将燃料物理化学形态的形成与堆芯结构的形成同时进行，采用此型核燃料构成堆芯结构的固体核热推进的预期总体性能最高。

通过构建独立的闭式循环，从核热推进的反应堆中引出热能进行热电转换，可以同时实现发电，此即核热推进/核热发电双模式核能空间动力系统；此外，进一步通过在氢喷管的超音速段喷入氧气，可以实现氧增强燃烧型核热推进，此即推进/发电/氧增强三模式核能空间动力系统 (TRITON)^[4]。氧增强燃烧尽管比冲有所降低，但可以大幅提高推重比 (650 s 比冲前提下可将推重比提高 4 倍)，这在脱离/俘获天体重力场的入轨/脱轨任务中，可以有效减少重力损失，提高航天器总体性能。

2 其他先进空间核动力技术概念方案^[6]

2.1 基于气体核反应堆的空间核动力装置

从以上介绍可以看到，无论作为核电源的高温热源，还是作为核热推进的加热热源，核反应堆的工作温度越高，相应的核动力装置的工作性能越高。为摆脱核燃料熔点限制，就必须让反应堆工作于气态/等离子体态，此即气体核反应堆。气体核反应堆的最主要困难在于：1) 如何保护容器壁不受高温环境影响；2) 如何有效约束处于核反应状态的气态 (等离子体态) 核燃料，避免无用损耗并按要求的速率反应。

对于气体核反应堆电源，一种具有独创性的方案是气堆磁流体：直接以适当化学形态 (比如卤化金属态，熔点 1 000 °C 左右) 的铀蒸汽作为循环工质；其中的反应堆仅仅是一个足够体积的空腔，液态铀燃料进入其中后即可达到临界产生链式核反应，释放的能量加热自身并致其气化和离解，形成气态电解质等离子体 (由完全离解的正、负离子组成)，随后在磁流体发电机中发电并液化后返回反应堆。因为是闭式循环，所以无需担心燃料的无用损耗；因为工作温度明显低于容器熔点，所以无需担心热防护问题。此方案结

构简洁紧凑，而磁流体发电能够保证足够高的热电效率，所以可以获得非常低的比质量，达到 0.5 kg/kWe。

对于气堆核热推进，因为需要在燃料与推进剂之间交换热量，而推进剂循环又是开式的，所以必须解决燃料损耗问题；更重要的是：比冲与喷管入口推进剂温度的 1/2 次方成正比，所以，要显著提高比冲，就必须大幅提高反应堆工作温度，这使得热防护问题尤为突出。有两类解决方案：闭式和开式。前者将燃料约束于密闭腔中反应而通过透光石英玻璃以电磁辐射形式与推进剂交换能量。因为工作温度极高 (数万度)，能否找到这种玻璃存疑。后者的气态燃料与推进剂直接接触以交换热量，通过某种方法只约束核燃料而让推进剂自由通过。开式循环的关键是约束方法，研究表明，通过构建合适的流场形态并施以合适的电磁约束，可以实现只约束核燃料的目的。气堆核热推进比冲能达到 2 000 s 以上，上世纪七十年代进行的原理样机试验曾达到 1 350 s。

2.2 脉冲核爆推进

因为无需额外存储推进剂及额外的能量转换过程，以核反应产物为推进剂的核推进方案具有更大的潜力获得更高的比冲和更大的推重比。另一方面，要获得最理想的比冲性能就必须让核燃料瞬间完全反应而产生爆炸，所产生的能量直接驱动反应产物经磁喷管定向喷射产生推力，而非逐步释放。为保证核爆规模在可控制范围内，每次核爆释能必须足够小，即每次只能引爆足够小质量的核燃料，以脉冲方式推动飞船前进，这就是脉冲核爆推进。不同的引爆方法构成不同的脉冲核爆推进方案。因为仍然需要首先将核能转换为热能，再由热喷管转换为推进动能，所以脉冲核爆推进仍然属于核热推进范畴。

核燃料颗粒/粒子团产生核爆炸的条件是内部中子的产生率 (或在聚变反应中发生聚变反应的核子数) 高于从其表面的逸出率。当核燃料被压缩，密度升高后，中子与燃料原子核 (或在聚变反应中的相互反应原子核) 之间的碰撞概率升高而从表面逸出的概率降低，因而内部中子产率

(或在聚变反应中的反应核子数) 的升高幅度将大于从表面逸出率的升高幅度, 压缩到一定程度后将达到临界而爆炸; 或者, 从另一方面说, 压缩比率越高, 所需要燃料的临界质量越小, 只要能够达到足够高的压缩率, 就可获得在允许规模下的可控序列微型核爆炸用于空间推进。不同的引爆方法实质就是不同的核燃料压缩方法。

有多种实验或理论证明有效的核燃料压缩方法, 如: a) 利用瞬间强电流与其诱导的强磁场相互作用产生向内洛伦兹力的固体燃料颗粒的磁致压缩; b) 磁化约束与等离子体射流融合技术相结合的磁化标靶压缩; c) 利用磁化电子云约束并压缩带电燃料粒子团的惯性静电压缩; d) 惯性约束与束流靶标技术相结合的多机制压缩。其中, a) 只能用于核裂爆; b) 至 d) 既可用于核裂爆, 也可用于核聚爆。

脉冲核爆推进可在保证高比冲 ($10^4\sim 10^5$ s 量级) 的同时获得很高推力 (平均数十到数百吨), 可实现大规模的快速行星际飞行以致恒星际飞行。

2.3 核裂变碎片推进

核裂变能量的最初载体就是裂变碎片, 而且以定向动能的方式存在, 如果能够让这些高能碎片直接定向释放, 而不是先转换到无规运动的热能再由热喷管转换为定向喷射动能, 则可以获得比核热推进高得多的比冲, 接近于 10^6 s 的理论极限, 这就是核裂变碎片推进。裂变碎片推进的另一优势就是不必处理棘手的极高温等离子体, 因而极大减轻了系统质量, 所以推重比也极高。

实现核裂片推进的关键是: 只允许指定运动方向的裂变碎片逃逸, 从而产生特定方向的推力, 同时迟滞直至阻停其它运动方向的裂变碎片, 这些方向的碎片动能转换为热释放到宇宙空间中或用于发电。目前提出的裂片碎片推进型式有: 旋转细丝型、裂变帆型及磁约束微尘等离子体型。前两者为固体方案, 后者为气体方案。

固体方案是最早提出的方案, 设计时遇到的最大困难在于: 如何在保证足够空隙度以释放裂变碎片的条件下达到临界, 并以接近逸出表面处的临界指数最高。要实现此目标需要特殊的中子

聚焦结构设计。

磁约束微尘等离子体方案是近年提出的一种更为可行的方案, 其特征在于: 采用磁约束技术将带电纳米燃料颗粒约束于与壁面保持一定距离的空间区域内 (这点类似于磁约束聚变反应堆), 并保证其密度达到临界以引发链式裂变核反应; 设计特殊的两端聚焦磁镜结构, 只允许裂变碎片沿一个维度 (轴线) 的两个方向运动而阻滞其它维度的运动。该两个方向中, 其中一个为喷流方向, 只有沿此方向动量足够高的裂变碎片才能穿过磁颈逃逸到宇宙空间中, 这是产生推力的方向; 另一个方向为电感应方向, 沿此方向的裂变碎片切割磁力线做功, 将动能转换成电能由周围导线输出, 这是发电方向。类似于磁约束聚变反应堆, 该方案的困难在于如何生成足够强大的具有特定磁镜结构的磁场。

3 空间核动力技术发展脉络初探

基于是否直接以核反应产物作为推进剂, 可以将各种核推进形式分成 2 大类: 产物利用类与产物未利用类。脉冲核裂爆/聚爆推进、核裂变碎片/核聚变推进, 属于产物利用类; 固堆核热推进、气堆核热推进、核电推进, 属于产物未利用类。无论哪一类, 比冲和推重比都是决定其性能的两个最重要指标, 但不同类推进方式影响这两项性能的要有所不同。

推进系统本质是一个能量释放/转换装置: 将封存于某种束缚机制下的可用能量释放出来, 并转换成推进剂的定向喷射动能。核推进系统释放的是核能, 但核能的质量密度极高, 为了能够可靠驾驭这些能量, 其释放形式只能有两种: 微小质量的燃料球瞬时全部释放以及以可控的速率缓慢消耗大块燃料内的质量。前者就是脉冲核爆推进, 其它推进方式都属后者。

核裂变能量的最初载体是裂变碎片, 而且以定向动能的方式存在, 在没有任何约束条件下, 这些碎片所携带的定向动能将由于碰撞而迅速耗散成无规运动的热能, 迅速提高燃料本身及其载体的温度; 密度越高, 耗散速率越快, 温度上升越快。对于产物利用核推进类, 可以有 2 种方式

利用核裂变能量：碎片定向动能直接利用以及转换成热能后再利用。前已阐明，碎片推进是一种最理想的核裂变推进方式，拥有接近理论值的比冲，但需要找到规范碎片动量的可靠的约束机制，而要规范拥有如此巨大动量的碎片需要极强的约束，所需要的相关系统质量很大，并随着推力增大而迅速增加，因此其推重比很小。转换成热能后再利用的产物利用核推进类，实际上就是脉冲核爆推进，因为存在热力转换效率（熵效率）及反应效率（参与反应的燃料比率），所以其比冲性能次于碎片推进；另一方面，其系统质量主要来源于（磁）热力喷管及其相关配套装置，所需要的质量较之于用于规范强动量碎片的系统装置质量很少，所以可预期其推重比显著高于碎片推进。

产物未利用类只能利用产物动能耗散而成的热能，并且只能以缓慢消耗大块燃料内的质量的方式进行利用。这其中有两个子类：热力推进及电力推进。热力推进通过热力喷管直接将热能转换成定向喷射动能，因此其比冲直接取决于推进剂能够达到的最高工作温度——对于固堆核热推进受限于燃料及其载体的熔点，因此其提升空间有限，对于气堆核热推进可以更高些，但仍然受限于燃烧室（反应堆）壁能够承受的热载及压载，所以仍然有个上限；电力推进因为直接用电磁力驱动带电粒子，所以可以获得很高比冲，理论上可以接近相对论极限。从推重比方面考虑，热力推进系统的质量主要来源于：燃料、燃料载体、反应容器（统称反应堆）、热力喷管、推进剂存储输送系统，而电力推进系统不仅包含上述诸项（热力喷管除外），还需要有一整套热能到电能转换装置（电源）、电能到定向喷射动能转换装置（电推力器）及相应的电力匹配设备。

对于热力推进，通过加大核能释放速率并改善换热条件，可以用相同质量的燃料加热更多推进剂，获得更大的推力；系统其它部分的质量增量代价主要来源于随工作压力增高而增厚的容器壁，其量是很小的，所以其推重比具有巨大的提升空间。对于电力推进，加大核能释放率、提高推进剂流量意味着更大的电源、更大的电推力器

及更大的电力匹配设备，这些质量代价与推力增量之比很大，尤其对于工作温度很低的固体反应堆电源；并且，该代价比质量随着比冲的增加而增加（因为需要更大的驱动电压，因而更大质量的电力匹配设备）。这些因素决定了核电推进的推重比很小，比核热推进低数个量级，并且所要求的比冲越高，推重比越小。

可以看到，核热推进比冲受限，但推重比大，推力大；核电推进比冲可以很高，但推重比很小，推力很小。为既能实现高比冲以满足大速度增量空间任务需求，又能在各种空间任务环境、任务阶段（如脱离天体重力场阶段、无重力巡航/加速阶段）上都能获得最佳的综合性能，核热-核电联合推进是必然选项。以相同的系统质量代价，联合推进可以在大推力、低比冲和小推力、高比冲之间切换，适应不同的空间任务阶段需求。联合推进的两个工作模式可以用不同的推力器实现，但更佳的选择则是用相同的推力器完成两种工作模式。后者可以实现更高的综合性能，体现在：1) 总体质量更低，因为只需一套推进系统；2) 可实现多于两个的工作模式/工作状态，甚至可以实现不同工作模式/工作状态之间的连续过渡；3) 是实现一体化核能空间动力系统的前提，一体化设计不仅结构紧凑，而且质量特性极佳。这里的关键在于一种既能作为热力推进，也能作为电力推进的推进器。综合考察各种电推力器，可以发现，与热力推力器轮廓结构最为接近的就是磁等离子体动力学推力器（MPD）。通过一系列创新设计，以MPD为蓝本开发出核热-核电统一推力器并不存在原则困难；不仅如此，MPD所涉及的物理原理与磁流体动力学发电（MHD）原理基本相同，都基于磁流体/等离子体的电磁效应，这就为核电源-核推进一体化联合空间动力系统的实现创造了条件。该统一推力器的工况调节有两个自由度：推进剂流量及核反应堆热功率（单位质量核燃料能量释放率），但二者需要满足一定匹配关系，流量确定情况下核反应堆热功率的调节范围有限，因此实际上只需一个调节自由度——推进剂流量，便可实现大推力小比冲工况到小推力大比冲工况之间的连续过渡。

以上核热-核电联合推进针对的是产物未利用核推进类,若进一步考虑产物利用类,其发展趋势目前尚看不清楚,但其中的一些基本规律和基本法则仍然有章可循。目前看,以下 2 个总体法则总是要遵循的:1) 比冲和推重比是一个矛盾统一体,比冲越高,能够达到的推重比越低,反之亦然;2) 能够驾驭的单位质量核燃料的核能释放率越高,比冲和推重比能够达到的水平越高,也就是二者在更高的水平上达成矛盾统一体。遵循此 2 项总体法则的原因是显然的:比冲越高,消耗于推进剂加速及动量约束上的质量代价越大,因而推重比越低;能够驾驭的单位质量核燃料的能量释放率越大,一方面,确定质量流率的推进剂能够获取的能量越高,因而比冲越大,另一方面,能够让更多的推进剂流量获取相同的能量,因而推重比可以越大。固体反应堆到气体反应堆,再到脉冲核爆,质量核能释放率逐代提高直至接近于瞬时完全释放,而基于磁约束的气态/等离子体态反应堆则有望成为一种可实现质量核能释放率连续过渡的方案。

在此,似乎仍然需要一种变工况推进系统,尤其是基于相同推进器的变工况推进系统,以满足更为宽广的行星际乃至恒星际空间任务的需求。该变工况推进系统仍然以调节比冲/推重比为目标,不过其调节自由度可能会多些:除了推进剂流量外,单位质量核能释放率的可调节范围可能会扩大,甚至还有可能将核反应产物(碎片)推进剂占总推进剂的比例纳入可调节范围。通过将气堆核热推进和磁约束微尘等离子体型碎片推进进行某种方式的有机结合,有可能成为此类高性能大范围变工况热/电/碎片多机制统一推力器的一种实现途径。

总之,为尽可能充分利用核能极高质量密度的潜力,一方面需要对更大核能释放率的掌控能力,另一方面,还需要找到让这些强大能源有序释放的可靠途径。前者决定能达到的推力规模,后者决定能达到的最大比冲。为驾驭如此强大能源,需要以增加系统质量为代价,且该代价随比冲升高而升高。为适应宽广的空间任务需求,变工况一体化核能空间动力系统是未来必然发展趋

势。该系统能以相同的质量代价,实现大推力/低比冲工况到小推力/大比冲工况间的分档过渡以致连续过渡。

4 小结

核能的高质量密度特性让其成为下一代空间动力系统能量来源的必然选择。基于固体反应堆的空间核电源、核电推进、核热推进是目前经过试验验证可行、技术状态比较成熟的空间核动力装置,其大规模的空间应用是可以预期的。更先进的一些概念方案也正在进行原理和方案论证中,包括:气堆核电源/核热推进、脉冲核爆推进、核裂变碎片推进等。它们的性能逐代跨越直至逼近理论极限。

单位质量核燃料的核能释放率及核裂变碎片动能的直接利用比率是决定空间核动力装置综合性能的关键指标。前者决定了能够达到的核能使用规模而后者决定核动力装置的热力学效率。为提高核能释放率,必须采用气体核反应堆或者以脉冲核爆方式工作;要提高碎片动能利用率,必须有强大的核碎片动能规范约束机制,由此需要以相当大的系统质量增加为代价。为适应宽广的空间任务需求,变工况一体化核能空间动力系统是未来必然发展趋势。该系统以相同的质量代价,统一的推力器,利用多物理机制驱动实现大推力/低比冲工况到小推力/大比冲工况间的大深度分档过渡以致连续过渡。各种推进机制之间的相容性以及性能参数的依次覆盖性为此类一体化装置的实现提供了可能。

参考文献:

- [1] ROBERT H F. Advanced propulsion for the 21st century: AIAA-2003-2589[R]. USA: AIAA, 2003.
- [2] GUNN S V, EHRESMAN C M. The space propulsion technology base established four decades ago for the thermal nuclear rocket is ready for current application: AIAA-2003-4590[R]. USA: AIAA, 2003.
- [3] DUNNING J W. An overview of electric propulsion activities at NASA: AIAA-2004-3328[R]. USA: AIAA, 2004.

(下转第 81 页)

- 1996-4567[R]. USA: AIAA, 1996.
- [35] CHEN F F, TAM W F, SHIMP N R. An innovative thermal management system for a Mach 4 to Mach 8 hypersonic scramjet engine: AIAA-1998-3734[R]. USA: AIAA, 1998.
- [36] KILLACKEY J J, KATINSZKY E A, TEPPER S, et al. Thermal-structural design study of an airframe-integrated scramjet final report: NASA-CR-159039[R]. USA: NASA, 1979.
- [37] SEMENOV V L. The possibility investigation of strut fuel feed system use in scramjet combustors on results of tests with hydrocarbon fuel: ADA-332687[R]. USA: ADA, 1997.
- [38] 陈同银, 仲峰泉, 王晶等. 超声速燃烧辅助喷油支板的主动冷却结构设计研究[C]// 第三届高超声速科技学术会议论文集, 无锡: [S.n.], 2010.
- [39] 蒋劲, 张若凌, 杨样, 刘伟雄. 超燃冲压发动机典型部件热防护[J]. 航空动力学报, 2013, 28(9): 1921-1926.
- [40] MOTOYAMA N, MIHARA K, MIYAJIMA R, et al. Thermal protection and drag reduction with the use of spike in hypersonic flow: AIAA-2001-1828[R]. USA: AIAA, 2001.
- [41] 熊宴斌, 祝银海, 姜培学, 等. 单相液体发汗冷却规律试验[J]. 航空动力学报, 2013, 28(9): 1956-1961.
- [42] XIONG Y B, ZHU Y H, JIANG P X. Numerical simulation of transpiration cooling for sintered metal porous strut of the scramjet combustion chamber[C]//Proceedings of International Workshop on Heat Transfer Advances for CFD and Numerical Heat/Mass Transfer. [S.l.: s.n.], 2011: 111-121.

(编辑: 马杰)

(上接第65页)

- [4] JOYNER C R, PHILLIPS J E, FOWLER R B, et al. A tri-modal capable, thrust optimized, nuclear propulsion and power system for advanced space missions: AIAA-2004-3863[R]. USA: AIAA, 2004.
- [5] WILLIAM J C, HUSSER D L, HALFINGER J A, et al. Review of nuclear fuel options for NEP and bi-modal concepts: AIAA-2004-4230[R]. USA: AIAA, 2004.
- [6] SCHMIDT G R. Nuclear systems for space power and propulsion: IAC-11.C4.7-C3.5.2[R]. [S.l.]: IAC, 2011.

(编辑: 王建喜)