

新概念推进技术及其应用前景

刘红军

(陕西动力机械设计研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 综合评述了到目前为止人们所提出的几种新概念推进系统(包括核热能推进、反物质推进、束能推进、微推进、绳系推进和太阳能推进等)技术方案的特点, 分析了所存在的主要技术难点, 并简要论述了其未来的发展和应用前景。

关键词: 新概念推进; 关键技术; 应用前景

中图分类号: V43

文献标识码: A

文章编号: (2004)04-0036-05

New Concept Propulsion Systems and Their Application Prospect

Liu Hongjun

(Shaanxi Engine Design Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Some of the new concept propulsion systems such as nuclear propulsion, antimatter propulsion, beamed energy propulsion and micro propulsion are presented. Features of these new concepts are synthetically introduced. The key technologies which baffle the realization of these new concept propulsion systems are analyzed and their future application prospect is discussed.

Key words: new concept propulsion; key technology; application prospect

1 引言

从第一枚 V2 火箭升空到人类成功实现载人登月和空间站、航天飞机的在轨运行, 航天运载技术得到了长足的发展。作为航天运载的核心技术, 常规化学能推进已日趋成熟。利用化学能的固体或液体推进系统在性能和工作可靠性上得到了大幅度的提高, 且已广泛地应用于各种航天运载系统之中。但是, 随着空间技术的不断进步, 人

类探测空间、利用和开发空间的需求日益增强, 常规化学能推进的局限性逐步显现出来。其局限性表现在:

- (1) 性能偏低, 理论真空比冲一般不高于 5000m/s;
- (2) 可利用的能量有限, 不适用于远距离的深空探测任务;
- (3) 能量密度低, 规模庞大。

鉴于常规化学推进的局限性, 长期以来, 人

收稿日期: 2004-04-06; 修回日期: 2004-06-22。

作者简介: 刘红军(1966—), 男, 博士, 研究员, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。

们不断地提出了进入空间和探测空间的新的推进方案与途径,并开展了不懈的探索性研究,部分已取得了可喜的成果。本文主要介绍迄今为止人们所提出的几种新概念推进系统的基本特点,分析存在的技术难点,并讨论未来的发展和应用前景。

2 几种新概念推进系统的基本原理与技术难点

2.1 高能推进剂火箭发动机

提高推进剂的能量可以在现有常规推进技术的基础上提高推进系统的性能。在高能推进剂的研究方面,从能量的角度来看,远期可能最有潜力的要数自由原子氢。 $\text{Be-O}_2/\text{H}_2$ 与 $\text{Li-F}_2/\text{H}_2$ 组合高能推进剂理论比冲只能达到 7000m/s 左右,且燃烧效率较低($85\%\sim 90\%$)。自由原子氢的热值可以达到 $2.19\times 10^5\text{kJ/kg}$ (氢气的热值只有 $1.34\times 10^4\text{kJ/kg}$),其理论比冲可以达到 $2\times 10^4\text{m/s}$ 以上。根据只有外层电子旋向相反的氢原子才能结合成氢分子的原理,利用粒子轰击固态氢分子,使氢分子分解为氢原子,然后用超强磁场分离出外层电子旋向相同的氢原子的方法可以获得自由原子氢。自由原子氢则可以储存于矩阵排列的固态氢分子中或超流液体氢单分子膜中。

目前看来,自由原子氢制备与储存技术极为复杂,且长时间维持超低温极其困难,使用自由原子氢作为推进剂的高能推进剂火箭发动机技术离实际应用相距甚远。目前对自由原子氢的研究仅限于实验室中。

2.2 利用地球或空间资源实现轨道推进——绳系推进与太阳能推进

绳系推进的原理如图1所示。绳系推进是利用大气层到轨道空间中游离的带电粒子与端头裸露的电缆线形成闭合回路,在电缆线中通电,则电缆线切割地球磁力线而产生推力,实现轨道上升;将飞行器上的离子导体屏蔽,断开回路即可实现轨道保持;而当需要轨道下降时,只要取消屏蔽,则由于闭合回路上的电缆线切割地球磁力线而产生阻力,同时电缆线中产生的感应电流又可以给飞行器上的电池充电。实现轨道上升所需的电能则可以由飞行器上的太阳能电池阵提供。

绳系推进具有结构简单、无需携带推进剂和可长期在轨运行等特点。绳系推进技术的可行性已得到了轨道飞行试验的初步验证。在上一世纪以来人们进行的亚轨道和低地球轨道的绳系结构展开、电磁学特性与结构动力学特性试验中,最长的绳系成功展开长度达到了 20km (最终由于空间垃圾碎片碰撞而折断)。绳系推进的主要技术关键在于高强度轻质结构材料电缆线的研制、长电缆线的展开技术和结构稳定性控制技术。

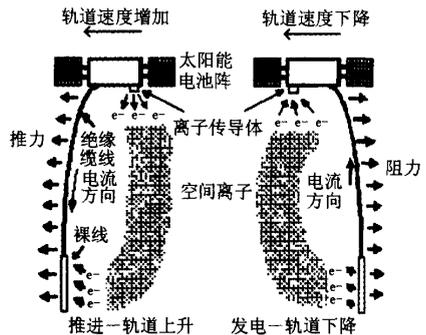


图1 绳系推进系统原理

Fig.1 Sketch of tether propulsion

太阳能推进包括直接利用太阳能的光帆推进、间接利用太阳能的太阳能发电—电推进和太阳能加热工质化学推进等方式。其中太阳能发电—电推进已得到实际应用;光帆推进是直接利用光子的动量产生推力,无需推进剂,可实现长期太空飞行。但是,光子的动量极小,在地球至太阳的距离下,太阳光所产生的光压仅 9N/km^2 ,因此需要超大面积的光帆才能产生有实际意义的推进效果。这就需要解决超薄超轻的薄膜材料制备技术、超大面积薄膜的空间展开与结构支撑技术以及推力矢量的控制技术等。太阳能加热工质推进也需要较大面积的太阳聚光镜,同样需要解决结构的轻质化、空间结构展开与推力矢量控制等技术问题。

2.3 核热能推进与反物质能推进

核热能推进和反物质推进是利用核反应或反物质湮灭产生能量加热工质从而产生推力的原理实现推进的。核热能推进根据核反应的形式又可

分为核裂变热能推进和核聚变热能推进。其中采用固态核裂变反应堆的核裂变热能推进技术目前已接近实用化。以液氢为工质的固态反应堆的核裂变热能推进系统原理如图 2 所示。将富含核燃料和一定比例中子减速剂的反应堆材料制成具有较大换热面积的多孔材料,液氢流过其中,在冷却反应堆堆芯材料的同时吸收大量热能变成高温气氢,高温气氢经喷管喷出从而产生推力。反应堆的起停和堆芯温度则通过调节控制棒(中子吸收剂)的插入深度来实现。

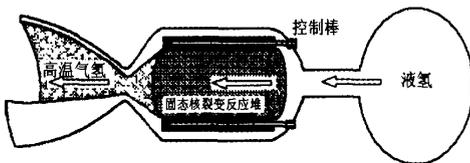


图 2 固态反应堆核裂变推进

Fig.2 Schematic of the solid core fission propulsion

核裂变热能推进系统具有性能高(比冲可以达到 $2 \times 10^4 \text{ m/s} \sim 1 \times 10^5 \text{ m/s}$)、易于起动和停止运行、可长时间工作等特点。核裂变热能推进系统的主要技术关键在于结构热防护技术和辐射防护技术。

核聚变热能推进目前处于概念研究阶段。要产生核聚变,需要将聚变材料保持或约束在高压下足够长的时间,并加热到近亿度。目前主要有两种实现方案,一种是惯性约束核聚变(ICF),也称为脉冲式核聚变推进系统(PFPS);另一种是磁约束核聚变推进系统(MCF)。ICF推进系统利用燃料本身的惯性来约束它,并用激光束或中子束将核聚变物质压缩到发生聚变所需的密度和温度,超高温聚变产物通过磁喷管喷出从而产生推力(图3)。MCF则采用强磁场来约束氢,并用微波等手段将其加热到发生聚变所需的温度。核聚变推进理论上可达到 $1 \times 10^6 \text{ m/s}$ 以上的高比冲性能,且具有很低的辐射水平。

与核聚变推进相比,反物质推进在性能上更具优势。反物质与物质湮灭产生的能量高于核聚变所产生能量的两个数量级以上。1克反氢原子

与等量氢原子湮灭所产生的能量相当于 23 个美国航天飞机外挂贮箱所装液氢与液氧反应产生的能量。文献[1]给出了一种利用反物质实现推进的方案(见图4)。该方案是将反物质在超低温条件下制备成固态反氢分子储存于磁约束容器中,利用交变磁场将反氢物质运输到推力室与从贮箱供应的液氢发生湮灭,产生的能量加热液氢形成高温物质从而产生推力。通过控制反物质与推进剂的比例和利用磁约束喷管,理论上反物质推进系统的比冲性能可以达到 10^8 m/s 量级。如未来能在反物质的制备、储存和运输等技术上取得重大突破,则将带来推进系统的革命性变化。

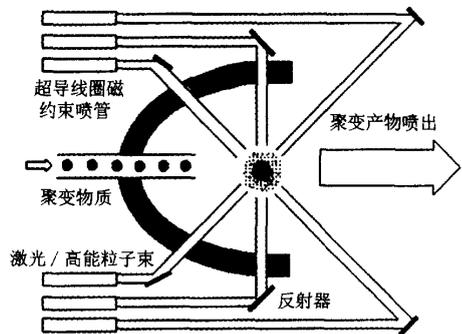


图 3 惯性约束核聚变推进

Fig.3 Sketch of the inertial confinement fusion propulsion

2.4 束能推进——激光推进与微波推进

束能推进是将能量聚焦成能量束,利用地基或空间站上的发射器远距离传输到飞行器上的接收器,接收器将能量转化为电能或热能从而产生推力的一种推进方式(图5)。能量束可以是激光束或微波束。束能推进最大的优点是能源与飞行器是分离的,结构重量较大的能源发射系统可以置于地面或大型空间站上。由于受激光器与微波发射器功率的限制,目前对束能推进的研究仅限于实验室,且所能推动的飞行器重量很小(几克至几十克)。

束能推进的技术难点除大功率激光器或大功率微波发射器的研制之外,还存在激光或微波的超远距离传输与聚焦技术、飞行器精确跟踪和瞄准技术等。

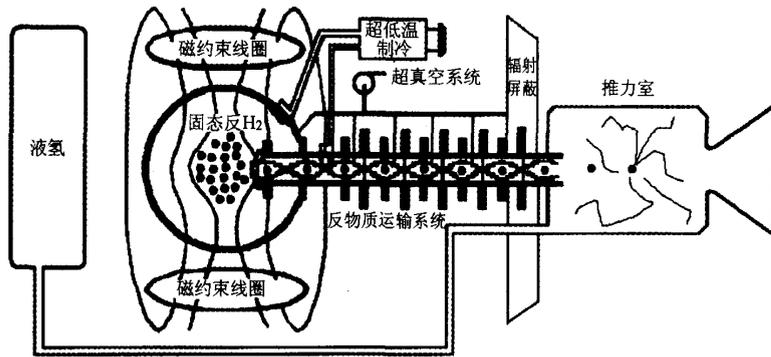


图 4 反物质推进系统

Fig.4 Sketch of antimatter propulsion

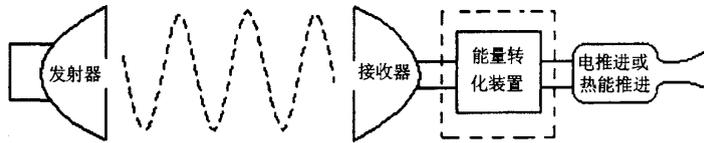


图 5 束能推进原理

Fig.5 Sketch of beamed energy propulsion

2.5 推进系统的微型化与集中化

微型推进器是利用微机电加工技术将推进剂供应贮箱、阀、推力室、控制电路等集中制造于硅片或其它基体材料上的一种推进系统。微推进器可以采用化学推进或者电推进。图 6 为一种化学微型推进器的推力室单元结构示意图。微型推进器的单个推进单元所提供的推力虽然很小，但通过集中数十万个乃至上百万个推进单元则可以得到可观的推力。

微推进在推进原理上并未突破常规化学推进或电推进的范畴，因此在比冲性能方面并无优势。由于微尺度效应的影响难以避免，微推进的比冲性能或者推进效率甚至低于常规化学推进或电推进。微型推进器最大的优点在于结构质量轻，可以使飞行器小型化。微型推进器主要的技术难点在于微机电加工技术。目前，随着微机电加工技术的发展，对微型推进器的研究已开始得到工业

界的关注。

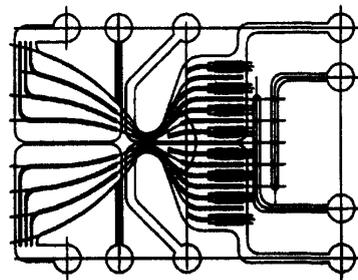


图 6 微推进器推力室单元

Fig.6 Thruster unit for a micro propulsion system

3 新概念推进系统发展与应用前景综合分析

使用高能推进剂作为推进系统的推进工质可

以提高推进系统的推进效率,同时在技术上又具有较好的继承性,只要解决制备、储存和使用上的经济性和方便性,高能推进剂则可以广泛地应用于各种不同形式和不同推力大小的需要使用推进工质的推进系统中。

利用地球或者空间资源的推进系统虽然所能提供的推力大小受到空间尺寸规模的限制,但由于能量由自然环境提供,在不携带推进剂或只需携带少量的推进剂的条件下,利用地球或者空间资源的推进系统可以长期运行,因此可以应用于长期轨道驻留飞行器(如星球通讯与资源勘察卫星、星球空间站等)的姿态与轨道机动控制上或者恒星系内长期飞行的太空探测器的主推进上。

核能推进和反物质推进具有高的比冲性能且易于达到较高的推力水平,作为未来星际飞行和深空探测的主动动力系统将具有一定的优势。固态反应堆核裂变推进目前基本具备技术基础,其可实现性已得到了试验验证(美国和俄罗斯已进行过样机试验),只需进一步解决安全性和结构可靠性问题,利用核裂变推进实现太空飞行已为时不远。对于核聚变推进和反物质推进,除非未来在物理方法和技术上取得重大突破,目前看来几乎没有可实现性。但从能量的利用方面来看,核聚变推进和反物质推进是未来实现星系之间航行最有可能的途径。

对于束能推进,从目前看来,要实现有实用意义的轨道器推进难度很大。但如将来能大幅度提高微波和激光的发射功率,并建立庞大的地基或天基微波束和激光束发射网,则利用束能推进实现地球轨道飞行或太空飞行也是可能的。

微推进的应用价值主要在于可以使飞行器小型化,因而更适合于作为一些具有军事作用的微型或小型飞行器的动力系统。

4 结束语

在上述几种新概念推进系统中,核裂变推进最具现实意义而又能对人类太空活动产生深远的

影响。反物质推进和核聚变推进虽然极具吸引力,但目前的技术水平离实际应用相距遥远。利用地球或空间资源实现推进和使推进系统微型化具有一定的技术基础,但在未来的应用领域上具有一定的局限性。束能推进具有较广泛的应用前景,但仍有待于技术上取得重大突破。不管采用什么推进系统,只要使用推进剂,无论是目前还是将来,提高推进剂的能量密度仍然是保证推进系统性能的一种途径。

科学技术的发展是人类不断探索、不断创新的结果。美国核动力太空飞船计划的启动使人们看到了人类登陆火星的曙光。随着人们在新的推进领域研究上的不懈努力,可以预期,人类更快捷地进入和利用空间、实现更远距离的载人航行与深空探测并不遥远。

参考文献:

- [1] Holzscheiter M, Lewis R, Rochet J, et al. Trapping Antimatter for Space Propulsion Applications[R]. AIAA 95-2891.
- [2] Frisbee R H, Sargent M G, Blandino J J, Sercel J C, et al. Advanced Propulsion Options for the Mars Cargo Mission[R]. AIAA 90-1997.
- [3] Frisbee R H, Blandino J J, Leifer S D. A Comparison of Chemical Propulsion, Nuclear Thermal Propulsion and Multimegawatt Electric Propulsion for Mars Missions[R]. AIAA 91-2332.
- [4] Smith G A, et al. Production and Trapping of Antimatter for Space Propulsion Applications[R]. AIAA96-2786.
- [5] Leifer S D, Frisbee R H, Brophy J R. The NASA Advanced Propulsion Concepts Program at the Jet Propulsion Laboratory[R]. AIAA97-2792.
- [6] Mueller J. Thruster Options for Microspacecraft[R]. AIAA97-3058.