

未来的先进动力装置

30年后,宇航员驾驶核聚变动力的宇宙飞船以3个月就可以绕火星往返一次。稍后,将会发射第一艘以反物质驱动的可飞行50年的探测器。这是NASA先进推进研究计划中的两个雄心勃勃的设想,并由一个授命从事发展21世纪推进概念的小组在研究。

NASA的计划人员和工程技术人员一致认为,未来的许多宇宙飞行任务,包括载人的火星飞行,化学火箭是不能胜任的。化学推进存在的主要问题,一是太重,二是能量低。化学推进剂的比冲(推进剂排气速度的衡量尺度)约 4.5 km/s ,最大极限约 8 km/s 。

要想在2年内往返火星一次,需要大约 12 km/s 飞行速度,并没有考虑在火星上着陆和重新起飞这样的重大问题。若使用低推进剂速度完成该任务,只有采取小有效载荷和大量推进剂的办法。只有提高飞行速度,才能缩短飞行周期。要想在40天内飞达火星,就需要 100 km/s 的飞行速度,要保持宇宙飞船的质量和成本都合理,则推进剂的排气速度将不得不接近 50 km/s 。这样高的性能,化学推进剂不可能达到。

在火箭飞行器应用的核能设计中,反应堆采用固态结构,推进剂排气速度达 8 km/s ,而采用气态芯级发动机,其铀流或其他气体用磁力收集,推进剂排气速度可达 20 km/s 甚至更高,但是,裂变反应堆产生严重的放射性,使防护屏成为有害重量。更重要的是维修必须远距离或在空间进行,因为放射性发动机部件经过大气层是十分危险的。

因此,先进的动力装置考虑以核聚变为宇宙飞船动力的可能性。每单位质量的核聚变比裂变具有更大的能量,而且产生的放射性很少,理论上排气速度可达 200 km/s 甚至更高,3个月就能飞达火星。但是,研究适合于宇宙推进的核聚变形式,技术上相当的困难。

对于更远的将来,即使不载人,飞出太阳系,反物质可能是宇宙飞行的唯一方案,理论上,反物质-物质湮灭可使排气速度接近光速。不过存在的问题很多,需要科学上进行突破。

微波电热推进(MET)和电子回旋加速器共振(ECR)推进,这两种推进技术都是采用以微波能转变为推进剂动能的方法。他们取代了现有的低推力电子推进技术,该技术是用电极加速离子。这类电子推进器不可能产生大推力,而且电极易腐蚀,限制了发动机的使用寿命。

使用MET时,微波能在气体内聚焦,产生等离子体,微波能被等离子体吸收,产生游离的等离子焰,温度高达 $4000\sim 6000\text{ K}$ 。典型推进剂如氦或氢穿过火焰时被加热,接着从喷管喷出。在Lewis研究中心的合同中,由密执安大学的Stanley Whitehair和Jes Amussen完成的最初试验中,喷管有效的经受住 2000 K 的推进剂温度。当输入功率为 1.5 kW 时,推进剂速度达到 6 km/s 。若用磁化喷管使推进剂流动收缩,可使推进剂速度提高到 20 km/s 。

喷气推进实验室研究人员Joel Sercel认为,电子回旋加速器共振可提供高达 100 km/s 的推进剂速度。在该装置中,微波能通过电磁而不是通过加热与推进剂偶合。微波射束在强磁场内撞击推进剂,对微波频率和磁场强度进行调节,以便微波能与围绕磁力线旋转的电子的固有频率共振。由于电子沿轨道旋转并吸收微波能,他们的运动相互作用以及施加的磁场,使他们加速流出喷管,气体中的等离子借助运动电子的电荷不断加速。

Sercel使用 20 kW 微波源作试验,推进剂速度达到 10 km/s 以上,现在的试验目标是 30 km/s ,经计算效率可达到97%。

在大多数聚变研究中,选用氘氚(DT)燃料,其以中子的形式产生出大部分能。先进

的聚变燃料有氘-氦-3 ($D-H_3^3$) 和氢-硼-11, 几乎不产生中子而其能量多以微波形产生出来。这些都产生于反应堆中强磁场捕获的电子。

这些燃料比使用DT要困难得多, 它们的聚变反应需要更高的温度。但是, 它们的低中子产物使得它们对宇宙推进很有吸引力。低的中子产物意味着无需笨重的屏蔽, 而大量生产微波可使聚变能直接和高效地转变为推进功率而不需中间热转换。

然而, 磁聚变在用于宇宙推进之前, 面临许多障碍。能源部门的科学家们相信, 几年内聚变装置将会生产一些纯能。在研究的大多数装置中, 所谓环形磁铁“Tokomaks”用于宇宙空间太重。同时, 对DT燃料上的主聚焦意味着需要大的不切实际的中子辐射屏蔽。

航空喷气推进研究院 Borokowski, S. K. 提出的发展以聚变为动力的宇宙飞船的一种途径是发展小型聚变方案。在这类装置中, 约束聚变等离子体所需的大部分或全部磁场是由等离子体本身内部流动而不是外部磁铁提供的。这从根本上减少了反应堆尺寸, 理论上反应堆可燃烧先进燃料, 于是, 减少或避免了对屏蔽的要求。

Borokowski曾预料, 采用一种称之为Spheromak装置, 使用 $D-H_3^3$ 燃料, 重500t的反应堆可产生5 GW推进功率, 排气速度为500km/s, 足以能把200t有效载荷送到火星并能在77天内返回, 使用推进剂质量为300t, 宇宙飞船总重为1000t。

世界上正在研究的还有其他许多小型装置, 象Z-等离子线柱和等离子体聚束, 这些装置根本不用强大的电流产生强磁场的磁性体, 而且可做成质量极小的推进系统。由于其非常小型化, 它们的试验费用也低——通常不过100万美元甚至更低。

聚变推进的另一种途径是惯性制约。惯性聚变用激光或粒子射束加热燃料颗粒, 使其象一枚微型氢弹那样爆炸。Lawrence Livermore和Jet Propulsion Labs. 的一个小组提出一种设想, 当膨胀的等离子与飞船后部的磁场相撞时, 在宇宙飞船外部引爆燃料颗粒, 从而获得推力。在该方案中, 使用DT燃料, 占总能量75%的中子能量流到空间, 从而减少了屏蔽。研究估算出把100t有效载荷送到火星的激光器、热散热器、屏蔽和有效载荷的总质量为1600t, 有效比冲为170km/s时, 就需要推进剂4000t。

在NASA关于聚变的预先研究中还没有注意到显示制动器, 虽然它的问题重大, 但看来它是载人的太阳系探测唯一可能的途径。就 H_3^3 而言, 燃料的可获性是一个困难问题, 尽管其他聚变燃料是丰富的。关键问题是研究小型化、轻质量反应堆方案, 尤其是那些可使用先进燃料的方案需要做更多的工作。

关于聚变火箭, 工程上和科学上的问题与研究反物质推进所面临的问题相比就算不了什么问题了。这里的确需要基础科学方面的突破。反物质似乎是去外星球的唯一方法, 而生产和使用反物质火箭发动机方面的问题尚无明显的解决办法。

当高能粒子互撞时, 在粒子回旋加速器中便产生反物质。可惜, 基础物理学似乎把反物质的生产效率限制在低水平上。通常, 能转换为反物质的能量低于回旋加速器所用能量的0.1%。可以肯定反物质总产量以10000倍的速度增加, 按这个速率, 可用的反物质数量最早要到2010年。

由于物质与反物质相互彻底湮灭, 所以其吸收能的密致程度是惊人的, 用100t有效载荷围绕火星往返一次仅需30g反物质。送10t有效载荷到附近的恒星上只需25kg, 但燃料贮存困难, 因为只要与物质接触就会引起爆炸。Brown大学研究的一种方案是在大功率磁场中以固

(下转第29页)

无喷射的超音速绕后台阶流动问题得到一个收敛解需迭代1700步左右,而相应的喷流问题则需迭到5100步左右,在VAX-780上独占运行,需分别运行4个CPU小时和12个CPU小时。

五、结 论

1. 用时间相关法求解RANS方程对带横向射流的绕后台阶的超音速干扰流场进行数值模拟是成功的,能基本计算出流场内存在的多个回流涡旋区。

2. 横向射流的存在使台阶底部压力有比较大的回升。

3. 干扰效应对马赫数不敏感,而与喷口宽度的大小有关,喷口越宽,干扰效应越大。

表1 四种计算情况的底部压力

算 例	M_∞	$\theta,$	b	$p_{\text{底}}/p_\infty$
1	2.19	—	0.0	0.37
2	2.19	60°	0.004h	0.73
3	6.00	90°	0.004h	0.70
4	6.00	90°	1.16h	6.00

参 考 文 献

- (1) Drummond J P. AIAA paper 79-1482
- (2) Drummond J P and Weidner E H. AIAA paper 81-0186
- (3) Sullins G A, Anderson J D Jr. and Drummond J P. AIAA paper 82-1001
- (4) Berman H A, Anderson Jr. and Drummond J P. AIAA Paper 82-1002.
- (5) Uenishi K, Rogers R C and Mortham G B. AIAA paper 87-0089
- (6) Stone J S, Baumbach J T and Roberts B B. Ng4-10131
- (7) Shang J S, McMaster D L, Scaggs N and Buck M. AIAA Paper 87-0055
- (8) Baldwin B S and Lomax H. AIAA paper 78-257
- (9) Jameson A, Schmidt W and Turkel E. AIAA paper 85-1259
- (10) Thomas H Pulliam. AIAA Journal, Vol.24, No.12, Dec.1986

(上接第76页)

态形式悬吊反物质。反物质必须超级冷却到接近绝对零度,以便形成反氢冰,这本身就是超级难题。

反物质推进中最糟的是在使用方面,当质子与反质子自身湮灭时,只有1/4的能进入粒子,如 π 介子,可直接产生推力。大部分能以 γ 射线释放掉,产生巨大的屏蔽问题。这些 γ 射线必须设法远离宇宙飞船。

从反物质中得到高比冲也并非易事,当物质与反物质两个颗粒相撞时,彼此并不做功,因为能量释放得太快,颗粒将砰的一声相互跳离,只具有很小的湮灭能。利用单个粒子束则是可能的,但其产生的能量密度和推力都很小。这些障碍如何克服尚不完全清楚。

毛金道摘译自《Aerospace America》1990.5.