

阳极层推力器的研究现状与发展趋势

汪礼胜, 唐德礼

(核工业西南物理研究院, 四川 成都 610041)

摘 要: 通过对阳极层推力器的工作原理、特点、羽流特性以及国内外阳极层推力器的研究现状与发展趋势的介绍和分析, 指出了阳极层推力器是目前应用前景最好的电推进器之一, 并且阳极层推力器正朝着更高功率和/或更高比冲的方向发展。随着空间技术的飞速发展, 对高功率和/或高比冲的阳极层推力器的需求将越来越迫切, 世界各国在这上面的投入也将越来越大。

关键词: 电推进; 霍尔推力器; 阳极层推力器; 离子推力器; 羽流; 述评

中图分类号: V439

文献标识码: A

文章编号: (2006)01-0024-06

The state of arts of thruster with anode layer

Wang Lisheng, Tang Deli

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: In this paper, we introduce the operating principle, characteristics, plume and the state of arts of thrusters with anode layer and the development trend of thruster with anode layer is also involved. In conclusion, we point out that till now, the thruster with anode layer is one of the most promising electric propulsions for application. The present trends for thruster with anode layer applications require the development of higher power and/or higher specific impulse thrusters. With the fast development of space technology, more and more countries will invest more money to the higher power and/or higher specific impulse thruster with anode layer.

Key words: electric propulsion; hall thruster; thruster with anode layer; ion thruster; plume; review

1 引言

电推进是利用电能加热、离解和加速工质,

使其形成高速射流而产生推力的技术。与化学推进相比, 电推进具有比冲高、推力小、能重复启动、重量轻和寿命长等特点, 因而电推进可用于航天器的姿态控制、轨道转移和提升、轨道修正、

收稿日期: 2005-07-08; 修回日期: 2005-08-16。

作者简介: 汪礼胜 (1976—), 男, 硕士研究生, 研究领域为离子源、低温等离子体物理及其应用。

阻力补偿、位置保持、重新定位、离轨处理、宇宙探测和星际航行等任务。

电推进系统种类繁多,其中按工质加热的方式的不同,可把电推进分为电热式、静电式和电磁式三大类。霍尔推力器是介于离子推力器和电磁推力器之间,从加速机理看,应归属电磁(等离子体)推力器一类,但不少学者也把它列为无栅(gridless)离子推力器类型。霍尔推力器主要有两种类型:稳态等离子体推力器(SPT—Stationary Plasma Thruster)和阳极层推力器(TAL—Thruster with Anode Layer)。SPT 又称为延长加速区的等离子体加速器(PAEZA—Plasma Accelerator with Extended Zone of Acceleration)和磁层推力器(Thruster with Magnetic Layer)等,在西方文献中 SPT 也称为“Closed-drift Thrusters”。TAL 又称为“Thruster with External Layer”。霍尔推力器比冲和效率虽低于离子推力器,但其比冲范围(9800~29400N s/kg)正好处于目前近地航天器控制所需的最佳比冲范围内,而且不存在空间电荷限流问题,其推力密度比离子推力器高,其体积也较小,所以霍尔推力器越来越受到航天界的青睐。例如,2003 年 9 月欧洲航天局发射了月球探测器 SMART-1,它上面就安装有 SNECMA 等研制的 PPS-1350G 霍尔推力器;2004 年 3 月,美国洛马公司的 MBSAT 通信卫星采用了 SPT 承担其南北位置保持任务。现在国外许多研究所和高校在研究霍尔推力器,其中研究最多的是 SPT,国内也有单位在研究 SPT。

TAL 是由俄罗斯中央机械制造研究所(TsNIIMASH)的 A.V.Zharinov 教授领导研制成功的。这种推力器虽然在俄罗斯尚未上天,但小功率 TAL 在美国“空间技术试验卫星(STEX)”上成功地进行了首次空间飞行试验。各国对 TAL 的研究相对于 SPT 要少些,可能是同功率水平的单级结构的 TAL 的性能和 SPT 差不多,双级结构的 TAL 其中间电极易烧蚀,设计起来很复杂。但 TAL 的推力密度比 SPT 更高,而且 TAL 的放电室壁是由金属组成的,其二次电子发射系数比 SPT 要低得多,所以 TAL 对于航天器的位置保持、轨道转移和提升等具有很大的吸引力。现在国际上 TAL 研究的模型主要有 D-38, D-55, D-80, D-100,

D-150, TAL-110 和 TM-50 等。

目前,在国内很少有文献公开报道 TAL 的研究,所以本文着重探讨 TAL 的工作原理、特点及国外的研究现状并分析其发展趋势。

2 工作原理及特点

上世纪 60 年代早期, TAL 的研究集中在高功率双级结构。在双级 TAL 中第一级是低压放电,中性气体通过闭合的霍尔电流电子碰撞电离产生离子。第二级是径向磁场产生的阳极层电场加速离子喷出。当时设计这种推力器是为了用于太阳系探测,其比冲范围是 19600~78400N s/kg。以铷为推进剂的 TAL 工作的功率达到 100kW,比冲达到 78400N s/kg,总效率接近 0.8。经过几百到几千小时的耐力测试表明了火箭的寿命达到几千小时。与此同时也研究了铯和氙推进剂。到了上世纪 70 年代,研究人员认识到近期很难实现提供航天器千瓦级的电力供应,所以开始强调发展低(1kW)、中(10kW)功率的推力器,推进剂工质为惰性气体(如氙、氪等)。此时的 TAL 的研究工作集中在单级 TAL。在单级 TAL 中,阳极延伸到推力器的出口平面,径向磁场强度维持在推力器出口平面的几个毫米内。因此电离和加速区主要位于推力器出口平面的后部。随着推力器外面高能离子的产生,推力器元部件的溅射率相对于 SPT 降低了。因此 TAL 的寿命提高了,这使得 TAL 能应用于更高的总冲任务($10^7\text{N}\cdot\text{s}$)。

TAL 放电室的壁是金属组成的,放电室由阳极和内外的磁极构成,放电室的宽度比深度尺寸更大。为了减小磁极的腐蚀,控制推进剂的流量并使电离限制在放电室的一个狭小的区域。因为放电室壁是由金属组成的,所以有很少的二次电子发射,靠近阳极方向电子的温度逐渐增加,导致了在阳极附近等离子体电势急剧增加。这些条件用数学式子表达为:

$$\frac{L_{\text{ch}}}{b_{\text{ch}}} < 1, \quad \frac{L_{\text{ch}}}{L_{\text{b}}} < 1, \quad \frac{b_0}{b_{\text{ch}}} < 1, \quad \frac{b_{\text{ch}} - b_0}{b_0} = 1$$

其中, L_{ch} 是放电室的长度; b_{ch} 是放电室的宽度; L_{b} 是电离和加速区的长度; b_0 是离子束的宽度。

对于相同功率, TAL 的放电室尺寸比 SPT 更

小。例如 D-55 TAL 额定工作功率为 1.35kW，放电室的直径仅 55mm，几乎是 1.35kW 的 SPT-100 放电室直径的一半。由于它们结构的不同，TAL 的腐蚀特性优于 SPT。下面以 D-55 TAL 和 D-80 TAL 为例简单介绍单级和双级结构的 TAL 的工作原理及特征。

图 1 是 D-55 TAL 的实验室模型和原理示意图，单级 D-55 TAL 由环形放电室组成，其阳极延伸到接近推力器出口平面。环形放电室的径向磁场是通过电磁铁产生的。磁场的强度能充分磁化电子而不能磁化离子。这种磁场部分地是通过使

用前后不同材料组成的阳极完成的。阳极的后部是由钨组成的，可以让磁场透过。阳极的前部是由镍-钴组成的，使磁场线在放电室前部末端分流。这样的结构使能够产生 TAL 工作所需的径向磁场。外部的阴极一方面给放电室供应电子，另一方面是中和离子束。在 TAL 正常工作期间，阳极和阴极所加的大部分电势差出现在阳极附近相对薄层中。在现代单级 TAL 中，这个薄层位于推力器出口平面的后部，并且把此推力器称为带有外部薄层的 TAL。通过把电离和加速区安置在放电室的后部，推力器的腐蚀减少到最小。

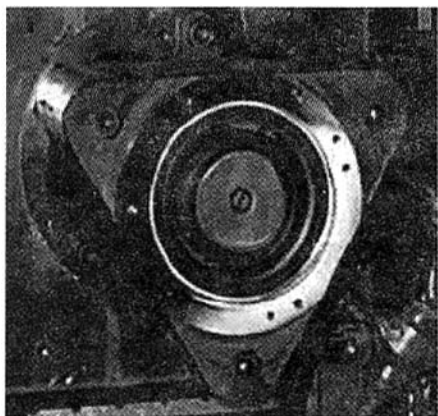


图 1 D-55 TAL 的实验室模型和原理示意图

Fig.1 Laboratory model and schematic of D-55 TAL

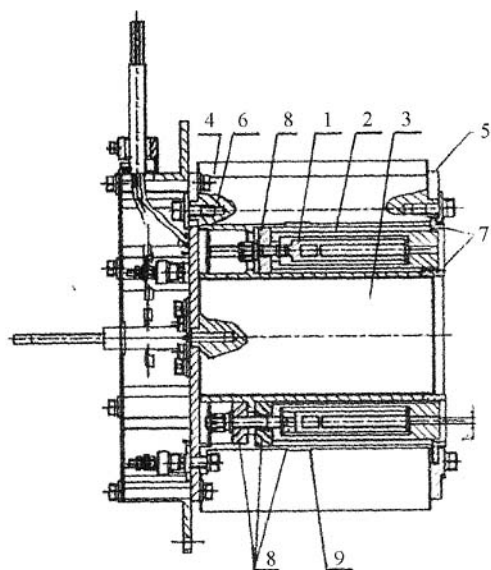
通过性能测试，D-55 TAL 的工作性能和同功率的 SPT-100 相近，比冲为 14700~15680N·s/kg，推力效率 50% 左右。

图 2 是 D-80 TAL 的实物图，图 3 是其结构示意图，从图中可以看出 D-80 TAL 使用了由两个电极组成的分段阳极。这种几何形状使它能工作在单级和双级结构。推力器工作在双级结构时，在两个电极之间加上不同的电势，因此改变了电场的分布。在第一和第二级阳极电极上加上放电电压，在阴极和第二级阳极电极上加上加速电压。在这种结构中，电离发生在第一级区域，离子的加速发生在第二级。对于工作在单级结构，第一和第二级电极是短路的，在阳极和阴极之间加上电势差。D-80 工作在单级结构时，其放电电压范围是 300V~1700V，相应的阳极比冲是 15680~40180N·s/kg。



图 2 D-80 TAL 的实物图

Fig.2 Laboratory model of D-80 TAL



1—第一级阳极；2—第二级阳极；3—内部磁极线圈；
4—外部磁极线圈；5—外部极靴；6—法兰；
7—保护环；8—绝缘体；9—屏蔽板

图 3 D-80 TAL 的结构示意图

Fig.3 Mechanical schematic drawing of D-80 TAL

图 4 表示的是工作在不同功率范围 2~7kW 的单级和双级 TAL 的阳极比冲与推力的关系。图中，在 6、7kW 时仅利用了双级 TAL 的数据。从图中可以看出，对于工作在相同功率，单级和双级 TAL 没有明显的不同，并且这些点基本上位于同一条直线上。这说明了推力器工作在这两种独立结构，其性能特征很相近。

D-80 后来在 NASA GRC 进行了 1200 小时的腐蚀特性的测试，其工作在 700V 和 4A 的单级模式下。尽管在工作 600~900 小时后由于保护环的腐蚀暴露了磁极，但是该推力器还是继续正常工作到测试自动终止。随后 TsNIIMASH 还独立地进行了腐蚀特性的测试，发现在双级模式下中间电极的腐蚀相当严重。

因为 D-80 的双级结构增加了系统设计的复杂性，这可能是使 TAL 工作在千伏以下不受欢迎的原因。这导致了后来更广泛地研究 SPT（磁层推力器）。

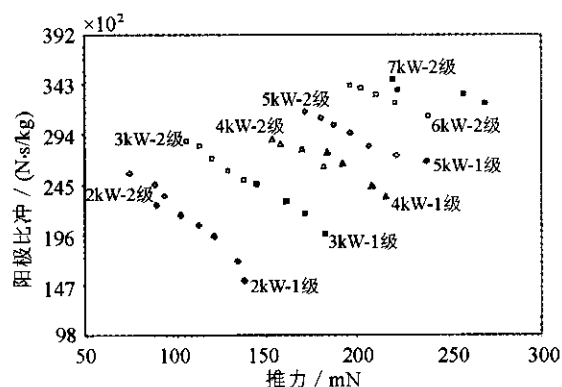


图 4 工作在不同功率范围 2~7kW 的单级和双级 TAL 的阳极比冲与推力的关系

Fig.4 Single and two-stage specific impulse versus thrust for 2~7kW power levels

3 研究现状

霍尔推力器（主要有 SPT 和 TAL）是前苏联首创。苏联解体后，霍尔推进器从俄罗斯走向国际市场。1992 年，美、俄、法合资成立了国际空间技术公司（ISTI），计划在俄罗斯 SPT-100 的基础上改进、提高并用到西方国家的同步卫星上。从 1994 年起，SPT 被用到同步卫星上作为东西、南北位置保持和定位系统，截止 2004 年底，已有 160 多台 SPT 推力器在 37 颗卫星上得到了应用。与此同时，美国、欧洲和日本也逐渐开始研究 TAL。例如，俄罗斯 TsNIIMASH 研制的单级 D-55 推力器被选作美国商用和军用卫星推进系统的候选方案，还制定了一个俄罗斯霍尔推力器技术飞行证实计划（RHETT）。1998 年 10 月，小功率 TAL 推力器在美国 STEX 卫星上成功地进行了首次空间飞行试验。这也是西方国家第一次用自己的卫星进行霍尔推力器的空间飞行试验。

最近，高功率霍尔推力器的研究越来越受到重视。在霍尔推力器技术中，TAL 结构具有更广泛的技术性能和参数范围。如用铯作推进剂的 TAL，工作功率 10~34kW，其比冲范围为 19600~49000N s/kg。为了满足高功率的需求，自上世纪 90 年代以来，TsNIIMASH 又开始逐渐研究双级结构的 TAL，例如 D-80，D-100 和 TM-50 都是设计成双级结构的装置。

霍尔推力器腐蚀性研究很重要,现在对 TAL 腐蚀性能的研究主要有: D-55 在 300V 放电电压下进行了 687 小时的寿命测试; TAL-110 在 350V 放电电压下进行了 1000 小时的测试; D-80 工作在 700V 电压下进行了 1200 小时的腐蚀性能测试。这些研究结果表明由于离子碰撞引起推力器的腐蚀决定了推力器的工作寿命。

磁场是霍尔推力器设计中一个最重要的参数,目前主要通过数值模拟和实验的方法来研究分析霍尔推力器内部的磁场位形。研究表明,霍尔推力器放电通道磁场的最佳形状是:在出口处成棱镜形式,峰值在出口截面附近,在通道内部强度趋近零。

霍尔推力器内部等离子体产生机理以及等离子体与推力器通道壁的相互作用等对推力器性能、寿命等影响很大,但霍尔推力器动力学是十分复杂的,因此在求解问题之前必须进行某些简化的假设。最近,许多研究人员在混合、流体等模型的框架下对霍尔推力器进行了数值研究。在混合(hybrid)单元粒子(PIC)模型中,离子和中性原子被处理为粒子,而电子被看成流动的流体。在流体方程中各种粒子是通过各自的宏观方程来描述的。例如,Boeuf 和 Garigues、Ahedo 等人已经进行了一维霍尔推力器数值模拟; Fife、Keidar 等人验证了二维数值模拟的结果;此外,密歇根大学航空和航天工程系 Michael Keidar 等人研究了高功率 TAL 中各种等离子体流,并提出了二维混合动力学模型、准一维模型和一维 PIC 模型。

TAL 的羽流污染比较严重,其排气羽流和航天器之间的相互作用主要会引起三方面的问题:

(1) 排气羽流的发散角相对较大(大约 60°),这些高能推进剂离子可能会造成航天器表面材料的溅射和剥蚀,从航天器表面溅射出的粒子最终可能沉积在航天器其它表面上,如太阳能电池板,这样会产生更多的问题;

(2) 电荷交换等离子体的形成产生了有害的离子倒流;

(3) 推力器放电室里产生的高能离子引起了加速通道壁(通常由金属组成)的严重腐蚀,并且腐蚀物可能从推力器喷出,并沉积在航天器表

面。现在,有许多物理模型对(1)、(2)两种羽流问题进行了计算机模拟,例如,把 Particle In Cell (PIC) 方法和 Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) 方法结合起来模拟 TAL 的排气羽流特性,其中使用 PIC 方法来模拟等离子体动力学,运用 DSMC 方法模拟碰撞动力学,而对第(3)种羽流问题到目前为止还没有研究。

4 发展趋势

未来,电推进将成为大有希望的轻型、低成本的推进技术之一。新一代电推进正朝着两个方向发展:一方面是研制几十千瓦的大功率推力器;另一方面,继续研制功率为千瓦级以下的推力器,用于小卫星的主推进和常规卫星的精确位置保持和姿态控制。从当前应用来看,霍尔推力器是应用前景最好的电推进之一。人造卫星的发射和即将来临的空间探索任务都将需要高性能的霍尔推力器。目前霍尔推力器正朝着更高功率和/或更高比冲的方向发展。由于 TAL 的推力密度比 SPT 更高,而且其二次电子发射系数比 SPT 要低得多,所以未来 TAL 将越来越受到重视和发展。

优化磁场位形是提高霍尔推进系统性能的关键。为了提高 TAL 的性能,今后要更加深入地研究 TAL 的磁场位形。除了实验外,还可以采用 Ansys 大型有限元分析软件或 MAFIA 大型电磁场仿真软件包等来分析 TAL 的磁场位形,通过对磁场的模拟,获得合适的磁场位形以优化设计 TAL 磁路系统。

目前,国外许多研究所和大学正在研究 TAL 中等离子体动力学,并取得了很大的进展,如有混合模型(hybrid models)和单元粒子模型(particle-in-cell)等,但其数学模型和模拟仍然面临着磁化放电复杂结构的问题。因此,未来还要进一步进行 TAL 等离子体物理数值模拟的研究,以便帮助设计更高功率、更高比冲、更高效率及更长寿命的 TAL。

羽流污染在 TAL 中显得极为重要,目前对大气层中羽流的研究已经取得了较大进展,但对超高空和真空羽流的数值模拟研究还有待完善。

今后,在对 TAL 物理机理研究的同时,还要加强对 TAL 的试验研究,包括推力器腐蚀性能测

试、寿命测试和羽流特性的测试等。随着空间技术的飞速发展,对高功率和/或高比冲的 TAL 的需求将越来越迫切,世界各国在这上面的投入也将越来越大。

5 结束语

通过对 TAL 工作原理、特点以及国内外 TAL 的研究现状与发展趋势的介绍和分析,指出了 TAL 对于航天器的位置保持、轨道转移和提升等具有很大的吸引力,并且 TAL 正朝着更高功率和/或更高比冲的方向发展。随着空间技术的飞速发展,俄罗斯、美国等国又开始重视和研究 TAL。我国目前还很少有单位研究 TAL,所以我国要加强对 TAL 的研究,同时还要加强技术引进,与俄罗斯、美国等国开展合作,综合运用阳极层推力器等离子体物理研究、数值模拟及试验研究,同时结合我国火箭推进系统设计经验,积极开展航天器、推进系统的一体化设计。

参考文献:

- [1] Charles E Garner, et al. Experimental evaluation of Russian anode layer thrusters [R]. AIAA94-3010.
- [2] Colleen M Marrese, et al. The D-100 performance and plume characterization on Krypton [R]. AIAA96-2969.
- [3] Frank S Gulezinski III, et al. Impact of anode layer thruster plumes on satellite communications [R]. AIAA97-3067.
- [4] David T Jacobson, et al. High voltage TAL performance [R]. AIAA2001-3777.
- [5] 吴汉基, 蒋远大, 张志远. 电推进技术的应用与发展趋势[J]. 推进技术, 2003, 24(5).
- [6] Michael Keidar, et al. Modeling of the plasma flow in high-power TAL [R]. AIAA2003-4701.
- [7] Richard R Hofer, et al. The role of magnetic field topography in improving the performance of high-voltage Hall thrusters [R]. AIAA2002-4111.
- [8] Iain D Boyd. A review of Hall thruster plume modeling [R]. AIAA2000-0466.
- [9] John Blandino, Nikolaos Gatsonis, et al. Overview of electric propulsion research in U.S. academia[R]. AIAA2003-4442.
- [10] David T Jacobson, David H Manzella. NASA's 2004 Hall Thruster Program[R]. AIAA2004-3600.
- [11] 廖宏图, 汪兆凌, 等. 稳态等离子体推力器磁场设计与数值分析[J]. 推进技术, 2002, 23(3).

(编辑: 陈红霞)