

文章编号: 1001-2486(2003)01-0007-05

离子发动机关键技术分析*

吴建军, 张传胜

(国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要:介绍了离子发动机的基本原理与结构,分析了离子发动机系统主要部件包括离子光学系统、空心阴极、电离室、中和器等工作原理与特性,指出了离子发动机的发展趋势。

关键词:离子发动机;离子光学系统;空心阴极;电离室

中图分类号:V475.1 **文献标识码:**A

Analysis of the Key Technology and Construction of Ion Thruster

WU Jian-jun, ZHANG Chuan-sheng

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The fundamental principle and construction of ion thruster are introduced. The operating principle and characteristics of the main components and subsystems of ion thruster, including the ion optic system, hollow cathode, ionization chamber, neutralizer etc. are analyzed and discussed. The development trend of ion thruster and its key technology is indicated.

Key words: ion thruster; ion optic system; hollow cathode; ionization chamber

离子推进属于比冲相当高的一种电推进方式,只要加速电压提高,其比冲可进一步提高。离子推进系统稳定、安全、无污染,推力范围较宽,应用范围较广,既可以用于大、中卫星,又可以用于小卫星;既可以用于定点卫星的姿态控制,又可以用于星际航行的主推进系统;既可以用于地月系统,又可以用于深空探测^[1,4~6]。正因为有这些优点,NASA才把离子推进系统选为NSTAR工程的首选推进系统。离子发动机还特别适合于小卫星,NASA正在开发功率为0.1~0.3kW的小型离子发动机^[7],直径只有8cm。离子发动机非常适合于星际航行^[8],目前比较成功的型号有休斯公司的XIPS-13、XIPS-25以及NASA与休斯的XIPS-30(或NSTAR-30)。

我国在1992年已研制出来了Xe离子推进系统的原理样机,表明我国在离子推进技术方面已经有了一定的技术基础。当前,正在进行更加广泛深入的理论与应用研究,但是较难看到相应的公开研究报告与文献。离子推进具有较强的技术优势与先进性,在航天领域具有广阔的应用前景,值得研究。

1 离子发动机基本原理与结构

离子发动机的基本原理是:采用一定的方法,将原子分解为离子与电子,离子在1000V以上的静电场的作用下,加速喷射而出;加速后的离子流由中和器释放出来的电子中和。

可以按照产生离子的方法,将离子发动机分成三类:电子碰撞电离式离子发动机、射频电离式静电离子发动机(RF)、场发射电离式静电离子发动机。目前,还有几类新概念发动机。例如,电子回旋加速器共振/微波放电电离式静电发动机,离子接触式静电发动机等^[1,2]。离子发动机也可以按照所采用的推进剂、能量输入水平、发动机尺寸(径向直径)等进行分类。但是,无论哪种离子发动机,都需要有效的方法电离推进剂。因此,离子发生器显得尤为重要,一般要求其产生单位离子所需能耗低、能产生较大的离子流、推进剂电离效率较大、有很长的工作寿命等。

可以按功能将复杂的离子发动机分为四个有机的组成部分:

* 收稿日期:2002-10-28

基金项目:国家863青年基金资助项目

作者简介:吴建军(1967-),男,副教授,博士。

- (1) 推力器: 电离室(Ionization Chamber)、空心阴极(Hollow Cathode)、环尖磁铁(Ring Cusp)、离子光学系统(Ion Optic System)、中和器(Neutralizer);
- (2) 电源控制单元(PPU: Power Processing Unit);
- (3) 推进剂供给系统(PFS: Propellant Feeding System);
- (4) 数字控制接口单元(DCIU: Digital Control Interface Unit)。

离子发动机的主要缺点是系统太复杂。例如,早期的 Hg 离子发动机的 PPU 系统有 4000 多个零件。采用 Xe 为推进剂后,仍有 600 多个零件,这还不包括约 200 个遥控用的零件。

2 主要部件功能和关键技术

离子发动机的推力器由电离室、离子光学系统、空心阴极、中和器四个部分组成。其工作过程是:空心阴极发射大量的电子,这些电子在电离室内电场的加速作用下,去撞击中性原子,使中性的原子电离为离子,离子通过光学系统得到加速,被中和器发射的电子中和。

2.1 电离室

图 1 为典型的电离室结构^[13]。有一个圆柱形外壁,一个圆形底面,二者均有磁性并保持在阳极电势上,空心阴极与点火电极位于电离室内,周围无防护结构。磁场一般由三个环形永磁铁(SmCo₅)产生。三个磁铁中一个位于底面,另两个位于侧壁上,从而在电离室内形成了三个磁场尖环。磁铁是一个可变换磁极方向的圆环,磁力线终止于阳极表面。

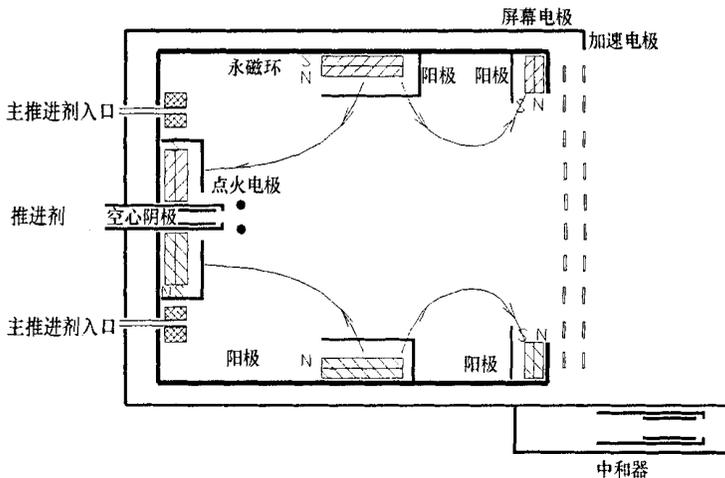


图 1 磁尖环离子发动机电离室结构图^[13]

Fig. 1 The construction of ionization chamber for ring cusp ion thruster^[13]

没有磁场的电离室几乎是不能工作的,磁场是电离室的关键部分,主要用来约束电离室内由气体放电形成的放电等离子体。阴极发射的电子叫做初级电子(Primary Electrons),电离室内还有热电子。并不是每个初级电子都会电离一个中性原子。实际上,初级电子的平均自由程远远大于电离室的尺寸,如果不采取措施,极大部分的初级电子会直接撞击在阳极表面上。另外,少数能量很高的电子会将推进剂原子剥去两个电子,这种带两个单位电荷的离子将会破坏加速网栅。为了克服这个困难,人们在电离室内引入了磁场来使初级电子沿着螺旋轨道回到阳极。这样就使初级电子碰撞中性原子的机会大大增加,大大提高了电离效果。这时,阳极只负责收集热电子。磁场强度要与电子运动半径相适应。从阴极释放出来的初级电子大约为电离室内电子总数的 10%,剩下的电子主要来自离子的电离过程。初级电子更为活泼,参与 50% 的离子生成。

电离室的重要性能指标是离子生成能 ϵ_p ,通常为 100eV/ion 左右。离子生成能 ϵ_p 对磁环的位置、磁场的分布、电离室的几何形状很敏感。电离室内“三场”(电场、磁场、流场)的相互影响很复杂,因为电荷的运动将会激发附加的电磁场,将反过来改变电荷的运动。等离子体的不稳定性是众所周知的

问题。因此,较准确地估计放电腔内的离子、电子、中性原子的空间与能量的分布显得格外重要,特别是等离子体鞘内的分布。在20世纪60~80年代,人们针对Hg离子发动机进行了研究。80年代中后期开始,基本上以Xe为研究对象。

2.2 光学系统

光学系统的原理与结构如图2所示(尺寸来自XIPS-30)^[10,11],主要由屏幕电极与加速电极组成。电离室内的离子通过等离子体鞘进入加速区,离子将在电场的加速作用下,沿着孔径轴线高速喷射而出。屏幕电极和加速电极都是上面打孔的薄板电极,位于电离室的出口。屏幕电极和加速电极之间加上强电场,电极板间相互绝缘。一部分离子流到电极和电离室其它表面上,会导致推进效率的降低。大部分离子通过网栅飞向加速电极,通过网栅和加速电极的离子流变得较为平行。

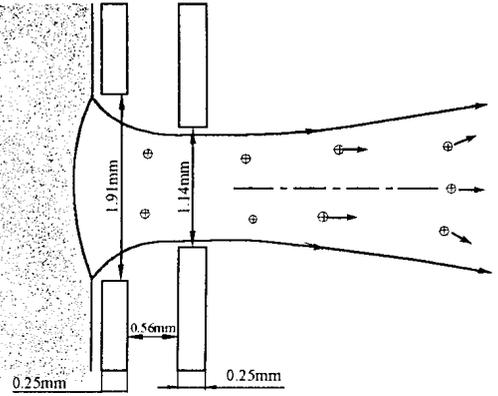


图2 离子发动机光学系统原理图^[11]

Fig. 2 Operating principle of ion optic system^[11]

加速电压(屏幕与加速电极间的电势差)根据空间电荷限和其它因素选定。对Xe而言,一般为700~1200V。实际上,加速电压不能太高,否则将会导致电极

之间放电击穿。另外,网栅的热变形会使网眼轴线偏斜,使得离子直接撞击在网栅上,从而大大降低了寿命。电极之间的距离只有0.5mm,很容易碰在一起,引起短路。目前的发展趋势是采用C-C复合材料代替Mo^[3,4,16]。因为C-C复合材料几乎具有负的热膨胀系数,并且击穿电压高于5000V/mm。据此,网栅可以制成平面,极大地降低了工艺要求。由于栅距减小,流量可以增大,推力可以提高。

电极的几何外形(包括孔的直径、数量)和电极间距的确定,应使离子流基本不碰撞,达到理想的离子流分布密度和透射率,获得高推进效率和长工作寿命。离子流在减小径向速度和减少对电极冲击的条件下应提高出射速度。网栅经常设计成盘形以减少弯曲变形,过多的弯曲变形将引起网栅静电吸引而导致短路。对大直径网栅电极来说,长期保持适当的极间距十分困难,已有几种电极设计出来缓解这些困难,包括:穿有圆孔的平板结构;几排平行的六角形蜂窝状丝网电极板组。目前离子发动机采用一套两个(或三个)多孔薄平板电极,67%的面积上打有孔。

2.3 空心阴极

自从有了离子发动机的概念,人们就在寻找一种可以提供电离推进剂所需的高能电子的阴极。它要求用尽可能小的能量消耗、在尽可能低的工作电压下产生5A以上的电子射流,至少可以稳定工作10000小时以上,而且启动、关闭、调节方便。20世纪80年代以前的阴极均是螺旋状的耐高温的钨电极或氧化物电极,靠表面热电子发射。由于放电形成的等离子体中的离子对这种阴极产生很强的冲击损耗,其工作寿命通常不长,容易烧毁,不能满足离子发动机长时间工作的要求。人们转向一种独特的辉光放电——空心阴极放电,又叫Schuler放电。这是一种特殊形式的辉光放电,其维持电压只有10V左右,与其它形式的气体放电相比,在相同的放电电压下,其放电电流可以很大,阴极的发热也不是很严重^[9]。

空心阴极是离子发动机的关键部件,其工作参数与结构的选择将很大程度上决定离子发动机的性能好坏。空心阴极通常放置在电离室内提供初级电子。空心阴极一般比固体棒状阴极寿命长,主要由耐高温的圆柱管(如掺有钨和某些化合物Al₂O₃、CaO、BaO的钽或钼管)、点火电极、电阻加热器等组成,如图3所示。其核心结构是钽、钼等耐高温的导体材料制成的直径只有7mm的圆管,管的一端里面套有一个直径稍小的由钽或钨制成的长度为20mm的多孔的圆筒。圆筒材料中掺入了一定的低功函数组份,如Al₂O₃、CaO、BaO或LaB₆。电子主要由这些低功函数材料产生。阴极的该端前面焊接一个中心有一个小孔的钽钨合金罩。在钽管的外表面缠绕热电阻,用于阴极放电启动前的加热。大多数空心阴极都要在阴极前面很近的地方装上点火电极。点火电极位于阴极前端。点火电极更易启动阴极放

电,其作用相当一个阳极。

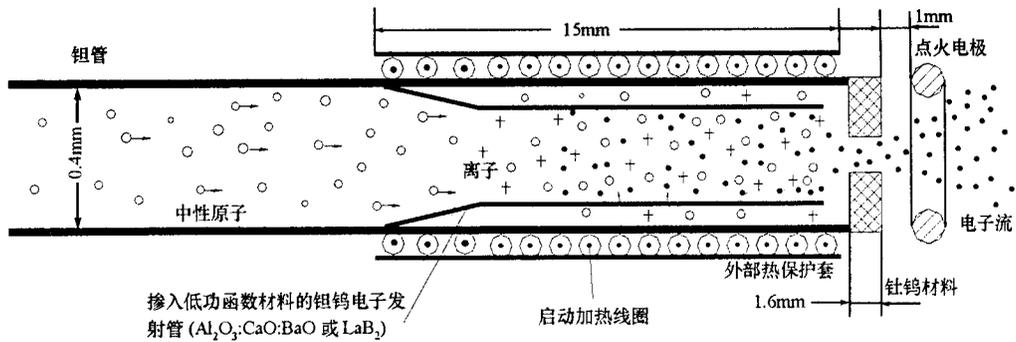


图3 空心阴极原理图^[17]

Fig. 3 Operating principle of hollow cathode^[17]

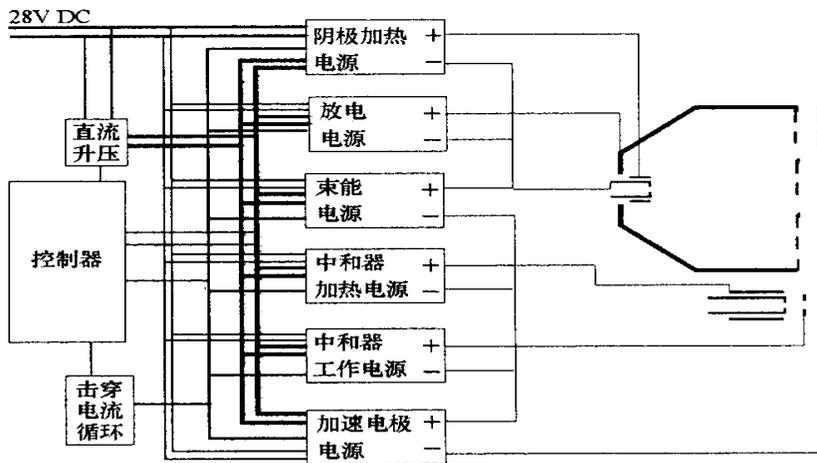


图4 典型的离子发动机外围电路结构图^[15]

Fig. 4 The typical construction of the peripheral circuit for ion thruster^[15]

推进剂通过空心阴极进入推力室,从空心阴极出来的基本是电子,也包括一些离子和中性粒子。

空心阴极的工作过程比较复杂。推进剂首先进入空心阴极,到达一定的压强后,热电阻开始对阴极进行加热。到达 1000°C 以上时,在阴极与点火电极间加上瞬时高压脉冲启动辉光放电过程,阴极即可释放出大量的电子。一旦持续的气体放电形成,停止对热电阻的供电,点火电极电压维持在 10V 左右,这时,电子将源源不断地从阴极流向电离室,参与对推进剂的电离过程。

2.4 中和器^[12]

中和器发射出电子以进入离子流中和离子。这非常必要,因为如果尾流带走了大量正离子,那么飞行器将带负电,使离子流减速,甚至反弹回来,影响发动机工作。中和器应放在适当位置以减少尾流中离子的飞溅,并保证有效的中和。中和器的原理与空心阴极基本一样。

加速电极必须维持足够低的电压以防止电子流逆流到电极上,一旦流过加速电极,电子就会进入电离室。

2.5 PPU 单元^[14,15]

PPU 单元绝非人们想象的那样简单与成熟,图4为典型的离子发动机外围电路结构图。电离室的放电电流可达数十安培,这样大的放电电流,只要有 1Ω 的线路电阻,就会产生相当大的热效应。由于太阳能帆板一般提供 $110\sim 180\text{V}$ 的直流电压,而需要 1500V 的直流电压。PPU 单元要求达到 90% 以上的能量转换效率。PPU 单元还存在一个协调动作的问题。启动与关机时必须要有防止冲击电流烧毁设备的保护措施。PPU 也存在可靠性、寿命的问题。PPU 单元的发展趋势是进一步减轻重量,减少零件

的数量,提高能源的转换效率,提高可调节性,并与 DCIU 良好配合。

2.6 DCIU 单元^[14,15]

DCIU 单元通常由微处理器、接口电路、自动器以及相应的程序组成。DCIU 是离子发动机的神经中枢。其任务是接收来自地面控制信号,PPU、PFS、电离室的反馈信号,然后进行综合判断,发出控制 PPU、PFS、电离室的信号。DCIU 要求可靠性高,具有智能化故障自我排除能力。早期的一个 DCIU 控制一个发动机,现在的发展趋势是一个 DCIU 控制多个发动机,这样可以减少零件的数量。

3 结束语

离子发动机最主要的性能指标之一是发动机的工作寿命。因此,从基础研究来看,目前仍主要集中在进一步研究电极损耗的机理以及减少损耗的各种措施。例如,用实验与数值仿真相结合的方法,分析电荷交换离子的形成机理,冲击电流的形成情况^[1,3],以及寻找抗损耗性能更加优良的空心阴极与光学系统材料。电离室内的等离子体物理过程的研究也是人们感兴趣的方面。

离子发动机的主要技术困难是要使两个加速电极长时间保持非常短而均匀的间距(只有 0.5mm 左右)非常困难,主要依靠材料技术的进步与控制系统设计。例如,使用如前述的 C-C 复合材料以及用硬件方式消除电弧放电等。这是必须首先克服的技术难题。

从应用研究来讲,目前主要趋势是开发功率小于 0.5kW、工作时间大于 14 000h、总冲大于 $3 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{s}$ 的离子发动机,以用于小卫星的姿态控制与机动飞行。由于磁场的约束长度变短,小尺寸、小功率的离子发动机实现起来更加困难,这要比研制大功率的发动机难得多。

参考文献:

- [1] Filliben J D. Electric Thruster Systems- Technical Report [R]. AD-A 327009, 1997, 6.
- [2] Martinez-Sanchez M, Pollard J E. Spacecraft Electric Propulsion- An Overview [J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14 (5): 688- 699.
- [3] Wilbur P J, Rawlin V K, Beattie J R. Ion Thruster Development Trends and Status in the United States [J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14 (5): 708- 715.
- [4] Eckstein M C. Station Keeping of Geostationary Satellites by Electric Propulsion [R]. N85-24337.
- [5] Oleson S R, et al. Advanced Propulsion for Geostationary Orbit Insertion and North-south Station Keeping [R]. N95-32917.
- [6] Oleson S R, Sankovic J M. Electric Propulsion for Low Earth Orbit Constellations [R]. N1999-0009563.
- [7] Patterson M J, et al. Scaling of Ion Thrusters to Low Power [R]. N1998-0201340.
- [8] Brophy J R, et al. Electric Propulsion System Technology [R]. N94-13055.
- [9] Rovang D C, Wilbur P J. Ion Extraction Capabilities of Two-grid Accelerator Systems [A]. Proceedings of the 20th International Electric Propulsion Conference, 1984, 636- 646.
- [10] Beattie J R, Matossian J N. High Power Ion Thruster Technology [R]. N92-18948.
- [11] Wilbur P J, Beattie J R, Hyman J. Approach to the Parametric Design of Ion Thrusters [J]. Journal of Propulsion and Power, 1990, 6(5): 575- 583.
- [12] Patterson M J, Mohajeri K. Neutralizer Optimization [R]. N92-21976
- [13] Matossian J N, Beattie J R. Characteristics of Ring-Cusp Discharge Chambers [J]. Journal of Propulsion and Power, 1991, 7(6): 968 - 974.
- [14] Sovey J S. Development of Ion Thruster and Power Processor for New Millennium's Deep Space 1 Mission [R]. N1998-0017550.
- [15] Pifero L R, Patterson M J, Bowess G E. Development of Power Electronics for 0.2kW-class Ion Thruster [R]. NASA-TM C113180.
- [16] Hedges D E, Meserobe J S. Demonstration and Evaluation of Carbon-Carbon Ion Optics [J]. Journal of Propulsion and Power, 1994, 8 (2): 255- 261.
- [17] Kameyama I. Characteristics of Ions Emitted from High-current Hollow Cathodes [R]. N94-37764.
- [18] 张传胜. 离子发动机工作过程分析及若干关键问题的初步研究 [D]. 国防科技大学, 2000.
- [19] 吴建军, 张传胜. 离子发动机工作原理及其关键技术 [C]. 中国宇航学会液体推进专业委员会 2000 年空间推进会议论文集, 浙江宁波, 2000, 11.