

稳态等离子体发动机磁场设计的发展及其展望

于达仁¹, 武志文¹, 鄂鹏¹, A. I. Bugrova²

(1. 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 哈尔滨 黑龙江 150001;

2. Ring (MIREA), Prospect Vernardskogo, 78, Moskow, 117454, Russia)

[摘要] 论述了稳态等离子体发动机对于我国空间发展战略的重要意义和作用, 指出磁场设计是提高稳态等离子体发动机性能的关键技术之一; 分析了稳态等离子体发动机通道内磁场设计的发展过程, 在此基础上提出了用于稳态等离子体发动机磁场设计的体系化构想, 并且指出了其中存在的一些关键问题和拟采取的解决措施以及磁场体系化设计对稳态等离子体发动机带来的预期效益和影响; 最后展望了稳态等离子体发动机磁场设计体系的进一步发展和应用。

[关键词] 空间电推进; 稳态等离子体发动机; 磁场设计; 发展趋势

[中图分类号] V439+.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)04-0022-08

1 前言

考虑空间发展战略的需求, 我国加快了空间开发利用的进度, 相继开始了微小卫星群、深空探测等系列空间计划的论证和实施。微小卫星具有体积小、重量轻、转动惯量小的特点, 用于卫星轨道与姿态控制所需的推力和力矩就小, 要求精度高。在空间开发领域我国已经启动了以“探月工程”为标志的深空探测系列计划。由于深空探测的飞行器飞行距离长, 为了提高有效载荷率, 就需要高比冲的推进器。因此, 从我国空间发展战略的需求来看, 研制高比冲(1 000 s~3 000 s)、高效率(50%~70%)、长寿命(>10 000 h)、小推力(几十毫牛顿)的稳态等离子体发动机(SPT)将具有重要的战略意义。

如图1所示, 在稳态等离子体推进器通道内存在由内外线圈产生的大致沿径向的磁场和阴阳电极之间产生的大致沿轴向的电场。工质氙气注入通道后被由磁场束缚的电子碰撞电离, 产生的离子在电场加速下以大于15 km/s的高速喷出产生反作用力, 为小卫星等飞行器提供动力^[1]。可见, SPT是以等离子体为工作介质的, 因此与很多等离子源

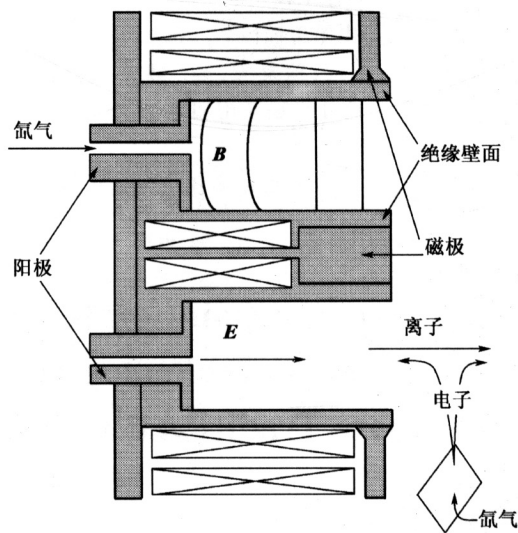


图1 SPT示意图

Fig.1 The SPT sketch map

一样, 为了提高电离率, 增大等离子体密度, SPT需要设计磁场来约束等离子体。所以, 磁场位形的设计对于控制SPT通道的等离子体运动参数, 进而提高SPT的工作性能和技术水平有着至关重要的作用。纵观SPT的发展历史就会发现每一次

SPT 通道磁场设计的改进都会带来性能上的大幅度提高, 磁场位形特点也成了每一代 SPT 的最主要标志特征之一。

2 SPT 磁场设计发展简要回顾

2.1 径向磁场的建立标志着 SPT 概念设计的形成

前苏联从 20 世纪 60 年代起开始着手研制 SPT, 从最初的概念设计起磁场设计就一直在 SPT 的设计中起着至关重要的作用。如图 1 所示, 离子的加速力是由安培力 $F = I_j \times B$ 提供的, 要增大该加速力, 就需要大的加速电流 I_j , 但同时放电电流还要尽量小, 以减少焦耳耗能。为了解决这一难题, 第一代 SPT 发明人 A. I. Morozov 提出了磁场方向沿环形通道径向, 以与轴向电场配合来产生电子沿周向的闭环霍尔漂移的设计思路。在该径向磁场位形下, 电子周向霍尔漂移运动形成的电流可以很大, 以满足离子加速的安培力需求, 同时, 由于电子的轴向运动被径向磁场约束, 沿轴向的放电电流就可以很小, 减小了焦耳耗能。因此遵循这一设计原则, 在轴对称的结构下, SPT 在磁路结构上采用了 4 个缠在圆柱铁芯上的外线圈和 1 个内线圈来产生这种径向磁场位形^[2,3]。可见, 建立电子周向霍尔漂移运动是 SPT 概念形成的关键, 所以, 直到现在很多西方国家都把 SPT 称作霍尔发动机 (Hall Thruster)。而径向磁场位形的提出是电子周向霍尔漂移运动建立的前提, 因此可以说径向磁场位形的构思是 SPT 概念设计形成的标志。

2.2 正梯度磁场强度的建立标志着第一代 SPT 的真正诞生

但是, 在上述正交电磁场位形下, 由等离子体物理中的 Bohm 传导公式, 可预计到 SPT 通道中由于等离子体振荡而产生很高的轴向放电电流而无法正常工作, 因此, 在 SPT 研制初期遭到了很多物理学家的反对。后来, 这一问题的解决仍然得益于磁场设计的改进。A. I. Morozov 教授经过实验和理论推导证实了设计磁场强度沿通道轴向以正梯度变化就会抑制这种高放电电流^[4]。为了实现这种磁场位形, 在磁路结构上, 采用了将宽磁极改成窄磁极的设计思路。A. I. Morozov 教授提出了磁力线载荷的概念可以很好的说明这一问题。定义沿着磁力线方向的磁力线载荷 W 为

$$W = \int \frac{n dl}{H} \quad (1)$$

其中: n 为沿磁力线的等离子体密度,
 H 为该磁力线处的磁场强度。

又由等离子体物理学中磁流体动力学可得 $\kappa = \frac{n}{H} = \text{const}$, 所以当磁场强度沿着 SPT 通道轴向正梯度变化时, 随着磁场强度的增加, 等离子体密度逐渐增大, 也即意味着沿着通道轴向, 电离逐渐增强, 加速离子的电势逐渐降低。根据这一原理可知, 当设计采用窄磁极代替宽磁极以后, 在接近通道出口的地方, 磁场强度的梯度就会很大, 等离子体密度也就会在出口区域迅速增大, 这就意味着电离和电势降落主要发生在接近出口处的很窄区域里。因而, 从加速离子的电势负荷加载的角度来讲, 我们把这种磁场位形设计概念称作“后部加载”的磁场设计理念。在这样的磁场设计位形下, 离子加速主要发生在接近通道出口的窄区域中, 减小了加速后的高能离子与壁面碰撞的几率, 因此该磁场位形在抑制 Bohm 电流的同时, 也将 SPT 的效率从以前的 45 % 提高到 50 %^[4]。窄磁极磁场设计的重要改进, 真正促使 SPT 从概念设计走向成品设计。1971 年底前苏联在流行号卫星上安装了第一台 SPT 并成功发射, 标志着第一代 SPT 的真正诞生。因此, 第一代 SPT 的磁场设计原则可以总结为如下要求: a. 磁场方向沿径向; b. 磁场强度沿通道轴向的分布满足正梯度要求, 即: $(\nu \cdot \nabla) H_r > 0$ 。可见, 第一代 SPT 的磁场设计基本上处于一维设计阶段。在该磁场设计理念下, 得到的 SPT 效率约 50 %, 羽流发散角约 45°, 比冲约 1 500 s。

第一代 SPT 从前苏联设计成功起已经在 100 多颗卫星上使用^[5]。鉴于磁场对于 SPT 设计的重要作用, 各国学者针对 SPT 的磁路结构又作了大量细致的研究工作。美国 Michigan 大学开发了高速往复探针系统 (HARP), 测到了大量 SPT 相关参数的实验数据, 获得了 SPT 通道内的磁场分布结构。在此基础上, 通过改变磁极长度、位置以及增加磁屏的方法优化了磁路结构, 给出了一些磁极和磁屏设计的定性原则^[6~8]; 法国在与俄罗斯合作研究的基础上, 采用实验和数值模拟相结合的方式对 SPT 通道的磁场位形进行了研究, 通过对 SPT 本体建立二维混合模型研究了不同磁场对 SPT 性能的影响, 得到了一些有意义的定性化结论, 指出磁场梯度会通过影响电势在通道内外降低的比值影响发动机的羽流发散角、壁面腐蚀和寿命等性能, 验证了大的正向磁场梯度对提高发动机性

能的重要作用^[9,10]。可见,在俄罗斯第一代 SPT 设计之后的几十年各国对于 SPT 通道内磁场的设计理念都没有太大的改进和提高。

2.3 弯曲磁场的提出是第二代 SPT 诞生的重要标志之一

到了 20 世纪 90 年代,在法国 SEP 公司资助下, A.I.Morozov 和 A.I.Bugrova 教授又于 1996 年发布了一种新设计的 SPT—ATON, 被称为第二代 SPT^[11,12]。与第一代相比, ATON 发动机最大的改进除了结构上在阳极前增加了一个缓冲腔, 以均匀进气以外, 就是通道内的磁路结构和磁场形状的设计理念有了大的改进和提高。ATON 发动机采用了 1 个缠在圆周方向上的外线圈和 2 个内线圈来产生磁场位形, 其特点有: a. 在阳极附近产生零磁场区域; b. 沿通道轴向产生大的磁场正梯度; c. 产生凸向阳极的弯曲磁场。可见, 与第一代 SPT 相比, ATON 的磁场除了梯度要求以外, 最重要的改进就是提出了凸向阳极的弯曲磁场位形要求, 因此 ATON 的磁场是基于二维设计基础之上的。在该设计磁场位形下, ATON 发动机的效率达到了 68%, 羽流发散角小于 10°, 在技术水平上达到了目前绝对国际领先地位。从 SPT 的最初概念设计到目前最新型号的诞生, 每一次技术指标的提升都是磁场设计改进带来的效果, 我们在表 1 中总结了这一历史发展过程。

ATON 发动机弯曲磁场设计带来性能大幅提升的主要原因在于凸向阳极的弯曲磁场会产生出近似凸向阳极形状的弯曲等电势面, 进而产生出指向通道中心区域的径向电场, 并使打向通道壁面的离子向通道中心迁移, 从而减少了壁面的离子溅射腐蚀, 提高了效率, 减小了羽流发散角。但是俄罗斯目前在弯曲磁场的设计中只是提出了凸向阳极的定性要求, 然后通过大量正交实验来优化曲率, 直到等离子射流满足要求为止。可见, 其磁场设计是建立在大量实验基础之上的, 还远没有形成相对比较完整的设计理论体系来指导通道的二维磁场设计。这不仅在工程应用中带来不便, 而且也很难形成磁场控制等离子体平行射流的具有普适性的科学结论, 从而为其他等离子源的设计提供一般化理论指导。所以, 在此基础上, 我们意图提出一套较完整的 SPT 通道二维磁场设计的理论化体系, 以指导 SPT 的磁场设计。

表 1 SPT 技术指标的发展简表

Table 1 The development process of some important parameters about SPT

| 磁场位形的特征 | 效率/% | 比冲/s | 羽流发散角/(°) |
|---------|------|--------|-----------|
| 径向磁场位形 | 45 | ~1 600 | ~45 |
| 正梯度磁场位形 | 50 | ~1 700 | ~45 |
| 弯曲磁场位形 | 68 | ~2 000 | <10 |

3 SPT 弯曲磁场设计理论体系的提出和构成

3.1 SPT 内离子径向二次流概念的提出及产生原因分析

如图 1 所示, 在理想情况下, 希望离子以轴线方向平行喷射, 这时推进器具有最佳的比冲和效率, 羽流发散角几乎为零。但是在实际推进器中, 发现在沿径向的直磁场位形下, 离子在沿轴向形成射流的同时还存在从通道中心区域向两个壁面沿径向的串流(见图 2)。在叶轮机中, 由气体的三元流动理论可知, 气体的流动可以分解为沿叶片通道方向的主流以及相对于主流而言分别沿叶片径向和叶轮周向的二次流运动。主流运动是产生功能转换的主方向运动, 而气流的二次流运动则会带来能量的损失^[13]。从流体流动的角度而言, SPT 通道中离子的运动也可以做类似分解。相对于离子沿通道轴向加速的主流运动而言, 我们定义如图 2 所示的离子径向串流为离子的径向二次流运动。具体来讲, 如果忽略磁场对离子的作用力, 离子的动力学方程可以写作如式(2)的形式。

$$nm_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = en\vec{E} - \nabla P_i \quad (2)$$

将式(2)沿通道轴向分解, 可得式(3)和式(4), 这两个方程分别描述了离子的轴向主流运动和径向二次流运动。可见, 矢量方程的可分解性使得我们可以将离子径向二次流运动从主流运动中分离出来单独考虑其控制手段和方法。

$$nm_i \frac{dv_{iz}}{dt} = enE_z - \nabla P_{iz} \quad (3)$$

$$nm_i \frac{dv_{ir}}{dt} = enE_r - \nabla P_{ir} \quad (4)$$

从离子径向二次流运动方程(4)可以看出, 离子径向二次流运动的产生原因可以从离子的初速度和通道内的电场分布这两方面来分析。

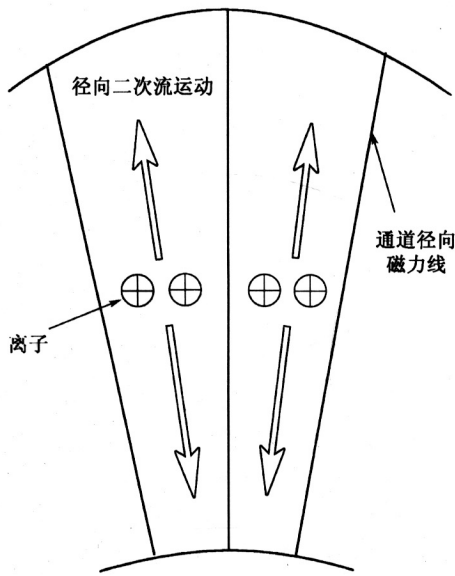


图 2 SPT 通道离子径向二次流运动示意图
Fig.2 The sketch map of ion radial motion in the channel of SPT

首先，从离子的径向初速度来源分析。离子的初速度继承于被电离的原子，如果原子具有打向壁面的宏观定向速度，那么离子也必然会具有指向壁面的径向分速度。第一代 SPT 的工质氙气流是通过均布在 SPT 阳极径向中心处的若干小孔进入放电通道的（如图 1 所示），所以中性原子气体在通道的径向方向会存在密度差异，从而会产生径向的定向扩散运动。可见，在第一代 SPT 的结构下，中性气体密度沿径向的不均匀性会使得离子具有径向初速度。其次，从 SPT 通道中的电场分布分析，认为外加电极在 SPT 通道内只产生轴向电场，对径向离子的运动不产生影响。径向电场的产生将是等离子体自身自恰产生的一种结果。如果忽略电子的惯性力，由电子沿径向磁力线的运动方程式 (5) 可以看出电子沿径向的压力梯度会自恰产生出径向电场 E_r 。在认为电子温度沿磁力线恒定的前提下，

$$0 = -enE_r - \nabla P_e \quad (5)$$

电子的径向压力梯度是由电子的径向密度梯度引起的。从电子运动的控制方程而言，沿着磁力线的电子运动是自由运动，因此密度差异不是控制方程作用的结果，这种结果可能来源于 2 种物理效应。一是电子产生源的影响，在电子产生的电离区里，电子密度沿径向就可能是不均匀的，这样在没有外加力扰动的情况下，这种不均匀性会一直维持。另外一种情况就是壁面鞘层的影响，为了满足 SPT 通

道壁面鞘层形成条件，在预鞘层区域需要有电势降以加速离子向壁面运动，这个径向电势降的形成需要由电子密度沿径向分布不均匀来产生。例如在无碰撞的近似条件下，形成加速离子的预鞘层电势需要等离子体的密度降约为 60.5%^[14]（见图 3）。可见，等离子体自恰产生的径向电场是促使离子向壁面加速的主要原因，对于其产生的详细物理机理还有待于对电离区和壁面鞘层区的物理过程做进一步具体研究。

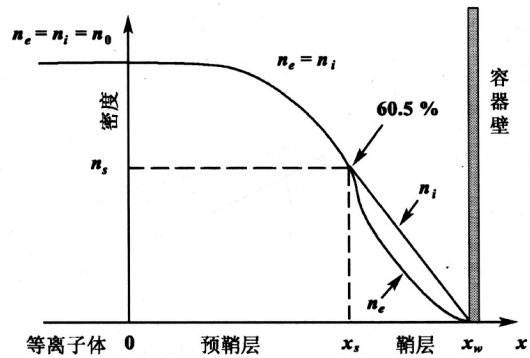


图 3 容器壁前形成的预鞘层和鞘层示意图
Fig.3 The sketch map of presheath and sheath in front of wall

3.2 弯曲磁场控制离子径向二次流的基本原理

离子径向二次流运动会使得高能离子打向壁面，不仅引起强烈的壁面溅射腐蚀现象，降低 SPT 寿命，而且高能离子在壁面处复合成中性原子，造成能量损失。另外喷射出去的离子由于径向二次流运动会使得 SPT 羽流发散角增大，通常可以达到 30~40°（半角），这对推进器的效率和比冲以及星载器件均具有显著影响。在叶轮机械中同样有此问题存在。叶片通道中的气体二次流运动是低能流体，在端壁处容易产生分离，增加损失。为了控制该端壁损失，王仲奇院士首先提出了弯曲叶片的成型技术，成功控制了端壁低能流体向中心区域迁移，降低了端壁损失，提高了叶轮机械的效率^[13]。从流动控制的类比而言，为了控制 SPT 通道内离子的径向二次流运动，在 SPT 的磁场位形设计中就相应提出了弯曲磁场的设计概念，来控制离子沿径向由端壁向中心区域迁移，从而减小 SPT 的端壁腐蚀和羽流发散角，提高 SPT 的性能。

设计弯曲磁场以控制离子径向二次流运动的基本原理是基于磁力线就是等电势面的假设。如果忽

略电子的质量惯性力, 电子的运动方程可以写作:

$$0 = \frac{\nabla P_e}{en_e} - (\vec{E} + \vec{V} + \vec{B}) \quad (6)$$

又由 $E = -\nabla\Phi$, 再令 $W = \int \frac{dP(n)}{n}$ 可得沿着磁力线有:

$$\nabla \left(\Phi + \frac{W_e(n)}{e} \right) = 0 \quad (7)$$

再令热化电势 $\Phi_T = \Phi + \frac{W_e(n)}{e}$, 则沿着磁力线有 $\Phi_T = \text{const}$, 也即磁力线就是等热化电势面^[14]。根据该基本原理可以设计出弯曲磁场位形, 这样就可以形成近似与磁场位形相同的弯曲等电势面(之所以是近似相同, 是因为存在由电子沿磁力线方向的压力梯度带来的干扰项 $W_e(n)$), 从而形成指向通道中心区域的径向电场力来控制离子的径向二次流运动。具体来讲, 弯曲磁场设计相当于在原直的径向磁场位形上增加了轴向磁场分量 B_z , 此时将电子运动方程(6)在通道径向展开, 可以得到电子径向平衡方程(8), 在 A.I.Morozov 电子等漂移的假设下^[15] ($V_{e\theta} = \frac{E_z}{B_r} = \Omega r, \Omega = \text{const}$), 电子径向平衡方程(8)可以写作式(9)。

$$0 = -enE_r - en(V_{e\theta} \times B_z) - \nabla P_{er} \quad (8)$$

$$E_r = -\Omega r B_z - \frac{\nabla P_{er}}{en} \quad (9)$$

从式(9)可以看出描述离子径向二次流运动的方程(4)中的径向电场 E_r 直接受到了轴向磁场分量 B_z 的控制。因此, 通过设计 B_z 就可以改变径向电场 E_r 的大小和方向, 从而可以控制离子的径向二次流运动, 减小离子与壁面的溅射腐蚀, 满足近似平行喷射的设计要求。

3.3 弯曲磁场工程化设计的几个问题

如前所述, 目前 SPT 通道弯曲磁场位形的设计是在磁力线与等电势面重合的假设基础之上通过大量的正交实验来实现的, 这种方法显然大大制约了 SPT 磁场的工程化设计, 也无益于继续研究 SPT 性能提高的途径。为了建立起较为完整的弯曲磁场工程化设计体系方法, 作者从几个方面给出建立 SPT 弯曲磁场设计体系的构想:

首先, 从数学上需要给出描述弯曲磁场位形的特征参量以便于磁场优化。从几何构型的角度来讲, 当提出磁力线沿 SPT 通道的弯曲要求时, 除了磁场梯度这样一个表征磁场大小的特征参量以外, 还需要从数学上给定描述磁场弯曲程度的特征

参量。为便于实际应用, 我们提出表征弯曲磁场的—个基本特征参数弯曲角 α 。其定义为 $\alpha = 180^\circ - \beta$ (如图4所示)。其中 β 角是弯曲磁力线在通道内外壁面处切线所形成的夹角。可见, 弯曲角 α 基本表征了弯曲磁场的弯曲程度, α 越大表明磁力线向阳极的弯曲程度越大。可以由弯曲磁场控制离子径向二次流的基本物理过程得到 α 角与离子径向二次流运动的关系。然后在设计弯曲磁场时, 可以由所要控制的离子径向二次流运动的行为选定弯曲角 α , 再由磁场位形自身的特性构造弯曲磁场的具体弯曲型线类型。这样就可以将用数学上描述出的弯曲磁场位形的特征参数 α 与离子径向二次流运动直接联系起来, 便于根据工程设计的具体要求通过优化磁场位形的弯曲角 α 来设计出符合要求的最优弯曲磁场。

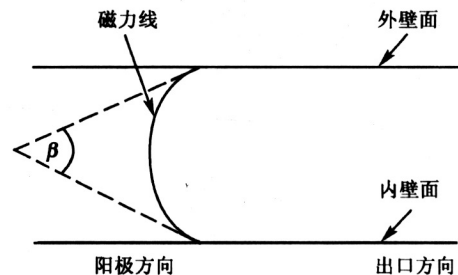


图4 弯曲磁场参数表征示意图

Fig.4 The sketch map of parameterized bend magnetic field

其次, 需要设计弯曲角 α 沿轴向的分布。弯曲磁场的设计主要是为了实现通道内离子的平行射流。在磁力线与等电势面重合的假设前提下, 磁力线弯曲程度沿轴向的设计需要根据离子在通道内的理想运动轨迹来实现。理想的离子运动轨迹虽然最终表现为在出口处平行射流, 但是在通道内的轨迹却是随着离子产生区域距离出口的不同而有所不同的。若离子产生于电离区之前, 那么其在后续运动中受到电场力的作用时间较长, 而在电离区以后产生的离子在后续运动中受电场力作用时间则短, 显然要使得出口处的不同离子的运动方向都能近似平行于射流两侧的磁力线而所需的弯曲角 α 应该是不同的, 否则可能会有“过聚焦”的情况出现(如图5的a处所示), 即离子可能会从一个壁面沿径向迁移而打向另外一个壁面, 这样仍然会带来壁面溅射损失。因此, 需要根据离子动力学的要求设计磁场弯曲角 α 沿通道轴向 Z 的最优分布。近阳极

区磁场较弱，基本可以忽略；从电离加速区开始，离子大量产生且在该区急剧加速，能量较高，需要设置较大的弯曲角；在接近出口处校正离子近平行射流，弯曲角基本为零。即沿通道轴向弯曲角 α 的定性变化基本要满足图 6 的要求。

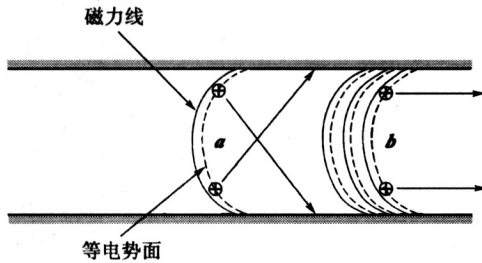


图 5 SPT 通道内弯曲磁场下离子运动示意图

Fig.5 Ion motion of channel of SPT in the case of bened magnetic field

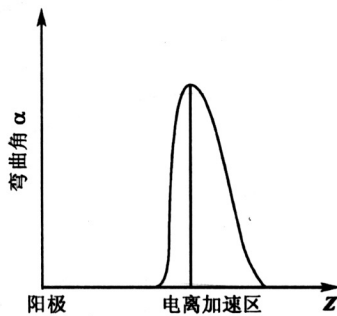


图 6 SPT 通道弯曲角的轴向分布曲线

Fig.6 The current distribution in MHD

最后是热化电势的干扰分析以及抑制措施设计。上述的分析是基于磁力线与等电势面重合的假设，实际上它们二者之间并不相同，差别在于等离子体密度沿磁力线分布不均匀所带来的干扰项，如式 (7) 所示。分析干扰项具体表达形式为 $W = \int \frac{dP(n)}{n}$ ，可见干扰项的大小与热压力和等离子体密度的关系 $P = P(n)$ 有关，从微观角度来讲， $P(n)$ 决定于电子分布函数的具体形式。当认为电子为 Maxwellian 分布的时候有 $P(n) = nkT$ ，此时 $\Phi_T = \Phi - (kT_e/e)\ln(n_e/n_0)$ ，显然在壁面处 $n_e \rightarrow 0$ 的时候， $\ln(n_e/n_0) \rightarrow \infty$ ，这样磁力线与等电势面重合的假设就不可能实现。但是，A. I. Bugrova 教授通过实验发现在 SPT 通道中电子是非 Maxwellian 分布的^[16,17]，因此，为了减小干

扰项的影响，需要研究 SPT 通道内电子分布函数形成的机理和影响因素，从而从工程设计的角度提出一些抑制干扰影响的措施，实现磁力线与等电势面的近似重合。

3.4 弯曲磁场设计的效果评估

由于磁场是 SPT 的关键设计因素，因此设计了弯曲磁场位形后，需要从几方面来评估弯曲磁场设计的效果和影响。

首先，分析发动机的性能影响。设计了优化的弯曲磁场位形以后，可以通过控制径向电场分布来控制离子的径向二次流运动，使之近似平行喷射，这样就可以大大减小 SPT 的羽流发散角，如第一代 SPT 羽流发散角近 45° ，而采用了凸向阳极的弯曲磁场以后，第二代 ATON 型稳态等离子体发动机的羽流发散角 $< 10^\circ$ 。随着弯曲磁场弯曲角 α 沿通道的分布设计体系的提出，优化设计后的磁场位形将会使羽流发散角进一步减少，从而将会大大降低对星载器件的干扰。羽流发散角的减少还会使得出口离子径向速度减少，在相同的电压降加速离子的前提下，离子出口的轴向速度就会增加，因此表现为 SPT 的比冲将会进一步提高。另外，弯曲磁场对离子径向二次流的控制使得在通道内打向壁面的离子数目将会减少，从而大大降低离子壁面溅射腐蚀效应，减少端壁损失，提高 SPT 的效率和寿命。如第一代 SPT 的效率为 50%，而 ATON 发动机的效率已达近 68%，效果显著。

其次，分析发动机的工作过程影响。磁场对电子运动有着强烈的约束作用，在外加电磁场作用下电子整体将作霍尔漂移运动。当鞘层和壁面与霍尔漂移的电子发生相互作用时，在破坏和重新建立霍尔漂移运动的过程中电子就会有一定的轴向位移产生，表现为电子轴向电导机制。因此，与径向磁场的情况相比，在弯曲磁场下，电子霍尔漂移运动的方向将会有所改变，与壁面和鞘层发生相互作用时，电子的轴向导电情况也会有所不同，具体影响还有待于进一步研究。

4 SPT 磁场设计问题的进一步讨论和展望

由于磁场是约束等离子体运动，提高 SPT 性能的最关键设计因素，因此，磁场设计将在未来不同用途的新型 SPT 设计中起到至关重要的作用，这里我们试图提出一些在未来发展中的磁场设计

问题。

1) SPT宽通道效应时的磁场设计问题 由于未来深空探测,空间轨道转移等任务对于推进器都提出了大功率、高效率、高比冲的要求,所以要满足这些空间任务的需求,就需要研制大功率的SPT。功率的提高必然伴随着通道质量流率的加大,SPT的通道宽度也必然随之加大,此时沿径向的环形通道宽度也将成为不可忽略的设计因素。通道的环形几何形状决定了沿着径向磁场强度是不均匀的,内壁面的磁场强度大,外壁面磁场强度小。在该径向磁场梯度的作用下,电子和离子都会出现磁镜效应,因此,引起离子径向二次流运动的原因也变得复杂起来。对于要控制离子径向二次流运动的磁场设计而言,就不仅要考虑弯曲磁场的弯曲角在通道轴向上的分布要求,而且需要考虑弯曲角沿通道宽度方向上的设计要求。

2) SPT非正常工作情况下的磁场设计问题 稳态等离子体发动机的工作电源虽然是直流,但是在实验中发现它在很宽的频带范围内都存在着电流的自发振荡,大幅值振荡的发生频率为几kHz到几十kHz之间^[18]。在该振荡状态下,SPT的非正常效应就会凸现出来,可能会使等离子体出现更复杂的运动行为,相应的引起离子径向二次流运动的原因也会变得复杂,所以此时用于控制离子径向二次流运动的磁场设计也会有一些特殊的问题出现。

3) 弯曲磁场设计应用于磁流体发电机(MHD) SPT是用于将电能转换成等离子流机械能的装置,弯曲磁场的设计可以使得这种能量转换的效率提高;而如图7所示的MHD是将等离子流机械能转换成电能的装置,磁场设计在其中仍然起着至关重要的作用。目前,MHD装置在近壁面处的流体速度变化剧烈,流体切割磁力线产生的反电动势明显小于中心流场,边界层内的电流密度较大,发热量大,温升高,这种现象被称为哈特曼效应。哈特曼效应的存在严重地影响了通道壁面处的摩擦系数,增大了加速通道中的摩擦损失,成为磁流体加速器设计的技术壁垒^[19]。因此可以考虑将SPT弯曲磁场的设计体系应用到未来MHD的磁场设计中,以有效控制其边界层的电荷向通道中心的主流区迁移,减小边界层的电流密度,将有可能成为控制哈特曼效应,设计出高性能MHD的一种有效途径。

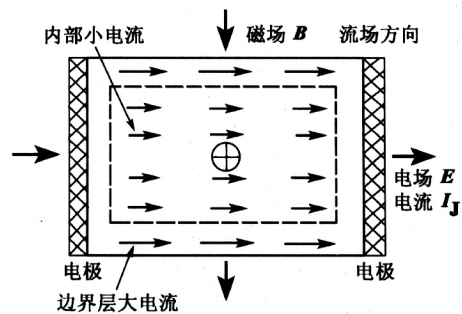


图7 MHD中的电流分布

Fig.7 The current distribution in MDH

参考文献

- [1] Zhurin V V, Kaufman H R, Robinson R S. Physics of closed drift thrusters[J]. Plasma Sources Sci Technol, 1999, 8(1): R1~R20
- [2] Morozov A I, Esipchuk Y V, Tilinin G N, Trofimov A V, Sharov Y A, Shshepkin G Y. Plasma accelerator with closed electron drift and extended acceleration zone[J]. Soviet Physics-Technical Physics, 1972, 17(1): 38~45
- [3] Morizov A I, Esipchuk Y V, Kapulkin A M, Nevroskii V A, Smirnov V A. Effect of the magnetic field on a closed-electronic-drift accelerator[J]. Soviet Physics-Technical Physics, 1972, 17(3): 612~619
- [4] Morozov A I. The Conceptual development of stationary plasma thrusters [J]. Plasma Physics Reports, 2003, 29(3): 235~250
- [5] Bober N, Maslennikov N, Day M, Popov G, Rylov Y. Development and application of electric propulsion thrusters in Russia [A]. 23rd International Electric Propulsion Conference [C]. Seattle WA: Electric Rocket Propulsion Society, 1993. IEPC-93-001
- [6] Peterson P Y, Gallimore A D, Haas J M. Experimental investigation of hall thruster internal magnetic field topography[R]. AIAA 2001-3890 1~15
- [7] Haas J M, Hofer R R, Gallimore A D. Hall Thruster discharge chamber plasma characterization using a high-speed axial reciprocating electrostatic probe[R]. AIAA-99-2426 1~14
- [8] Hofer R R, Haas J M. Optimization of hall thruster magnetic field topography [A]. 27th IEEE International Conference on Plasma Science[C]. New Orleans LA: Institute for Electical and Eletronic Engineers, 2000

- [9] Garrigues L, Hagelaar G J M, Bareilles J, Boniface C, Boeuf J P. Model study of the influence of the magnetic field configuration on the performance and lifetime of a Hall thruster[J]. *Physics of Plasmas*, 2003, 10(12): 4886~4892
- [10] Hagelaar G J M, Bareilles J, Garrigues L, Boeuf J P. Two-dimensional model of a stationary plasma thruster[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(9): 5592~5598
- [11] Morozov A I, Bugrova A I, Desyatskov A V. ATON-thruster plasma Accelerator [J]. *Plasma Physics Reports*, 1997, 23(7): 587~597
- [12] Bugrova A I, Lipatov A. S, Kharchevnikov V K, Churbanov D V, Morozov A I. SPT-ATON Tests at Kurchatov Institute Stands [A]. 24th International Electric Propulsion Conference[C]. Moscow Russia: Electric Rocket Propulsion Society, 1995. IEPC-95-067
- [13] 王仲奇, 郑 严. 叶轮机械弯扭叶片的研究现状及发展趋势[J]. *中国工程科学*, 2000, 2(6): 40~48
- [14] 菅井秀郎, 等离子体电子工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 56~58
- [15] Morozov A I, Svelyev V V. Fundamentals of stationary plasma thruster theory[M]. In: Kadomtsev B, Shafranov, eds. *Reviews of Plasma Physics*. New York: Consultants Bureau, 2001, 21: 244
- [16] Bugrova A I. Electron distribution function in the channel of an electron-ring plasma accelerator[J]. *Zh Tekh Fiz*, 1987, 57: 1852~1854
- [17] Bugrova AI, Desyatskov AV, Morozov A I. Electron distribution function in a Hall accelerator[J]. 1992, *Sov. J. Plasma Phys*, 18(8): 501~507
- [18] Darnon F, Garrigues L, Boeuf J P, Bouchoule A, Lyszyk M. Spontaneous oscillations in a Hall thruster [J]. *IEEE Trans. Plasma Science*, 1999, 27(1): 98
- [19] Chase R L, Mehta U B, Bogdanoff D W, *et al.* Comments on an MHD energy bypass engine powered spaceliner[R]. AIAA-99-4975

Research Status and Development of the Magnetic Field Design for Stationary Plasma Thruster

Yu Daren¹, Wu Zhiwen¹, E Peng¹, A. I. Bugrova²

(1. Harbin Institute of Technology, School of Energy Science and Technology, Harbin 150001, China;
2. Ring(MIREA), Prospect Vernardskogo, 78, Moscow 117454, Russia)

[Abstract] The Stationary Plasma Thruster (SPT) will play a very important role for China's future space developing plan. And the magnetic field is the key to improve the performance of SPT. The evolvement of the magnetic field character applied to the two generations SPT has been reviewed. Then a set of engineering method used in the magnetic field design for SPT is set up in the paper. Besides, some possible problems existing in the method and the corresponding ways to resolve them are respectively put forward. And the expectant results are also anticipated when the set of method is applied to the magnetic field design for SPT. At last, more advanced development and application of the magnetic field design method is imaged.

[Key words] space electric propulsion; stationary plasma thruster; magnetic field design; development trend