

# 圆柱形 Hall 推力器磁场的设计与数值模拟

赵 杰, 唐德礼, 程昌明  
(核工业部西南物理研究院, 成都 610041)

**摘 要:** 霍尔 (Hall) 推力器的磁场设计是提高其性能的关键技术之一。针对传统环形 Hall 推力器小型化带来的缺点, 提出了圆柱形的 Hall 推力器。简要对比了环形和圆柱形两种推力器, 对圆柱形推力器的工作原理、磁场设计的要求以及利用 ANSYS 有限元软件进行的电磁场数值模拟的结果进行了详细分析。结果表明, 圆柱形推力器磁路设计是合理的, 另外也证明了用 ANSYS 有限元软件进行电磁场模拟的可靠性。

**关键词:** Hall 推力器; 等离子体; ANSYS 有限元软件; 电磁场; 数值模拟

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2007) 05-0032-05

## Magnetic field design and numerical simulation of cylindrical Hall thrusters

Zhao Jie, Tang Deli, Cheng Changming  
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The magnetic field design of a Hall thruster is essential to the engine performance improvement. Cylindrical Hall thruster was proposed in this paper considering disadvantages of traditional ring-shaped Hall thruster minimization. A brief comparison was made between ring-shaped and cylindrical Hall thruster. Detailed analyses on the principles of operation, the magnetic field design requirements as well as the numerical simulation results obtained through ANSYS finite element software of the cylindrical thruster were conducted. The results indicated that this cylindrical booster magnetic circuit design is reasonable, moreover reliability of the ANSYS finite element software which was used to simulate the electromagnetic field is proved.

**Key words:** Hall thruster; plasma; ANSYS finite element software; electromagnetic field; numerical simulation

收稿日期: 2006-10-26; 修回日期: 2007-06-10。国家自然科学基金: 10675040。

作者简介: 赵杰 (1980—), 男, 硕士研究生, 研究领域为离子源、低温等离子体及其应用。

## 1 引言

Hall 推力器是技术较为成熟且已实际应用的推进设备, 针对传统的环形 Hall 推力器小型化带来的缺点, 提出了圆柱形 Hall 推力器。Hall 推力器在较低的功率和小型化时, 圆柱形 Hall 推力器比环形 Hall 推力器要优越得多。特别是在推力器小型化之后, 磁场设计方面圆柱形 Hall 推力器更优于环形的 Hall 推力器。

Hall 推力器有三个基本的组成部分: (1) 环状的阳极和位于推力器外面适当位置的阴极, 在大多数情况下, 阳极也充当推进剂分配器; (2) 内外的磁芯和极靴组成的磁路, 该磁路产生一个垂直于环面的磁场; (3) 在阳极的下部有一个放电区, 注入的推进剂在这里被电离和加速, 推进剂通常采用氙, 但也有使用别的惰性气体的, 如氩和氦。

Hall 推力器有两种类型: 一种是稳态等离子体推力器 (SPT), 属线性 Hall 推力器, 其加速通道的深度比通道的宽度更长, 通道壁由绝缘材料 (一般是陶瓷) 构成。另一种阳极层等离子体推力器 (TAL), 是一种鞘型的 Hall 推力器, 其加速通道的深度比通道的宽度更短, 通道壁由金属导体组成, 并保持阴极电位。他们的基本工作原理相同。

典型的 Hall 推力器的工作原理是: 以交叉电磁场捕获从阴极发射的电子, 这些电子绕磁力线旋转并且在放电区内作角向漂移, 角向漂移的电子电流称为霍尔电流。角向漂移的电子与进入放电室的推进剂分子发生碰撞电离, 形成等离子体, 其中离子在电磁场的作用下沿轴向加速后高速喷出。角向漂移是交叉的径向磁场和轴向电场作用的结果, 称为霍尔效应, 这也是 Hall 推力器命名的原因。我们设计的圆柱形 Hall 推力器应属于阳极层 Hall 推力器。故精确的命名应该是圆柱形阳极层 Hall 推力器, 简称为圆柱形 Hall 推力器。

## 2 Hall 推力器对磁场的要求

Hall 推力器能正常工作, 要求其磁场的强度

必须使电子被约束在放电室中而离子被加速喷出。因此放电区的长度  $L_a$  要大于电子的拉莫尔回旋半径而远小于离子的拉莫尔回旋半径:

$$\frac{\sqrt{2m_e V_d/e}}{B} < L_a \ll \frac{\sqrt{2m_i V_d/q_i}}{B} \quad (1)$$

其中,  $m_e$  为电子质量,  $g$ ;  $V_d$  为放电电压,  $V$ ;  $B$  为磁场强度,  $T$ ;  $L_a$  为放电区域长度,  $m$ ;  $m_i$  为离子质量,  $g$ ;  $q_i$  为离子的电量, 库仑 (上面的关系是推力器尺寸设计的关键)。

经典电子扩散是基于玻尔兹曼方程, 其碰撞项提供了电子穿过磁场线的输运机理。等离子体穿过磁场的经典电导率  $\sigma_{\perp}$  是和磁场平方成反比:

$$\sigma_{\perp} = \left( \frac{n_e e^2}{k T_e} \right) D_{\perp} = \left( \frac{n_e e^2}{k T_e} \right) \left( \frac{1}{3} \mu_e r_L^2 \right) \sim \frac{n_e}{T_e B^2} \quad (2)$$

上式中,  $\sigma_{\perp}$  为经典交叉场扩散系数;  $n_e$  为电子密度,  $\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $T_e$  为电子温度,  $eV$ ;  $\mu_e$  为碰撞频率,  $\text{Hz}$ ;  $r_L$  为拉莫尔回旋半径,  $m$ ;  $k$  为系数。理论上是磁场越大越能有效地约束电子, 但是磁场太大, 放电电压也会随之增大, 所以要根据要求选择合理的磁场强度。

为了能使大部分的电子被磁场所约束, 磁场必须有径向分布, 使得到达阳极的电子减少, 这样既能保证高的电离度, 又能使推力器的比冲得到提高。典型的 Hall 推力器的磁场集中在通道出口截面附近并形成一种磁镜形式的磁场 (如图 2 所示)。该种方式是经过前苏联科学家多方论证和实验, 已经实际应用的一种有效的磁场结构。此时电离区域已移到磁镜内侧附近, 电离出来的离子在电势梯度的作用下穿过磁透镜, 稍微调整方向后从出口引出。又因为电离区靠近出口, 所以减少了散射到通道壁上的高能离子, 一方面提高了推力器的寿命, 另一方面也增加了直接从出口引出的离子数目。因此, 磁镜形式的磁场分布更能有效地约束电子。

对于推力器磁场梯度分布的理解也很重要, 因沿磁场线的磁场梯度对电势分布是有影响的, 进而直接影响离子的动力学行为。由于磁场梯度和电子温度梯度的影响, 使电势的分布可能偏离磁场线的分布, 从下面电子动量方程就可得出:

$$0 = en_e \nabla \varphi - n_e k T_e \frac{1}{B} \nabla B - \nabla (n_e k T_e) \quad (3)$$

式中,  $\varphi$  为电势,  $V$ 。

在较小密度梯度和强磁场区域, 电势如下:

$$\varphi_{\max} - \varphi_{\min} = \frac{k T_e}{e} \ln \frac{B_{\max}}{B_{\min}} \quad (4)$$

上面从磁场大小、分布、梯度方面分析了 Hall 推力器对磁场的要求, 此外还有一些要求, 比如磁场对等离子体流的影响, 磁场对壁鞘层和阳极鞘层的影响等。磁路设计是 Hall 推力器设计的核心, 只有了解它对磁场的要求, 才可能设计出合理、高效的推力器。

### 3 圆柱形 Hall 推力器的磁场

#### 3.1 环形和圆柱形 Hall 推力器的比较

在较小的放电电压和放电电流条件下保持低功率 Hall 推力器的正常工作, 既要保持较高的离子速度, 还要降低推进剂的流量。为了保持较高的电离率, 减小推力器尺寸时, 应保持推进剂的电离能力。而加速通道的长度又由磁场的分布来决定。亦即要考虑在减小推力器尺寸的同时, 还要增加磁场。实验得出: 典型的环形 Hall 推力器尺寸为 20~40mm 时, 其效率为 10%~30%。然而再进一步降低尺寸时, 其效率会更低。这种低效率可能由于磁场的褪磁或电子与壁的碰撞产生大的轴向电流, 磁场的褪磁可能是由于推力器的磁铁过热。因而在推力器小型化时, 环形的结构就不能有效约束等离子体, 使推力器正常工作。

Hall 推力器有赖于相互垂直的电场  $E$  和磁场  $B$  共同作用, 设计合适的磁场位形和大小是这种推力器正常工作的基础, 直接影响到推力器的工作性能。因此磁场的设计是其设计的核心。环形 Hall 推力器的环形通道中被施加于轴向电场和径向磁场, 磁场强度足以约束电子, 使它产生角向  $E \times B$  的角向霍尔漂移, 但是离子几乎不受磁场的影响。准中性中等离子体中的离子在轴向电场的作用下加速离开通道。而这种推力器一般设计工作中在中等功率下。对传统的环形 Hall 推力器,

典型的等离子体参数值如下: 电子密度  $n_e \propto 10^{11} \sim 10^{12} \text{cm}^{-3}$ ; 电子温度  $T_e \propto 10 \sim 20 \text{eV}$ ; 离子温度  $T_i \propto 1 \text{eV}$ ;  $V_i \propto 16000 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

圆柱形的 Hall 推力器能克服环形推力器的不足之处, 它有如下优点: 同环形相比有更大的体积与表面积之比, 室壁的损失减少到最小; 有较低的刻蚀和热效应; 有很高的推进剂的利用率; 由于存在较强的高频电流震荡, 克服了环形 Hall 推力器在小型化时提高磁场强度并不能增强电子密度的缺点, 而圆柱形 Hall 推力器中增加径向磁场能使通道中电子密度也随着增加; 比环形结构的放电等离子体更稳定。基于以上的优点和对小型推力器的需求, 设计了如图 1 所示的圆柱形结构 Hall 推力器。

#### 3.2 圆柱形 Hall 推力器磁场的设计

所设计的圆柱形结构阳极层 Hall 推力器主要由阴极和阳极组成。磁路主要由四列钕钴磁铁、极靴等组成。外径 120mm, 高度 72mm, 内径 40mm, 内圆柱的高度 13mm, 从阳极到出口的圆形通道长 20mm。实验中采用永久磁铁提供磁场, 最大磁场约为 0.12T, 出口附近约是 0.025T; 放电电压范围为 200~3000V; 放电电流范围为 0.1~2A; 离子束流范围为 0.1~1A。永久磁铁选择钕钴磁铁主要是因为它具有较高的磁能积, 极低的温度系数, 并且耐高温, 其使用温度可达 3500°C, 同时具有很强的抗腐蚀性和抗氧化性。此外相比电磁铁而言, 采用永久磁铁增大了推力器的稳定工作范围, 提高了离子束的分布均匀性。永久磁铁的位置及其工作原理如图 2 所示。

适当设计的磁轭合理引导永久磁铁产生的磁场在阳极附近形成磁镜形式的磁场。从阳极到出口有一定的磁场梯度, 电离的离子在磁场作用下被加速引出。由于磁镜式的磁场分布, 使得羽流的发散角较小。如果磁场设计不合理, 在阳极附近和出口处的磁场就达不到要求, 如磁力线和等势面有一定夹角, 就会造成电子在磁力线方向获得速度, 从而降低电离效率, 降低推力器性能。还可能使羽流的发散角增大。故在保证推力器正常工作所需的磁场形状和大小的前提下, 磁场的设计应该使推力器的性能、结构最优。

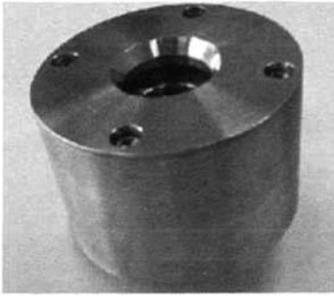


图 1 圆柱形 Hall 推力器  
Fig.1 Cylindrical Hall thruster

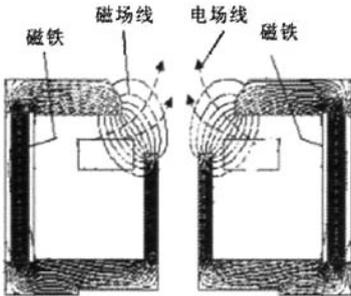


图 2 圆柱形 Hall 推力器工作原理图  
Fig.2 Principle schematic of cylindrical Hall thruster

### 4 电磁场的数值模拟

圆柱形 Hall 推力器电磁场数值模拟是基于如下的麦克斯韦方程组的求解:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{E} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{J} \\ \nabla \times \vec{B} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\vec{E}$  为电场强度,  $V/m$ ;  $\vec{D}$  为电位移,  $C/m^2$ ;  $\rho$  为电荷密度,  $C/m^3$ ;  $\vec{H}$  为磁场强度,  $A/m$ ;  $\vec{B}$  为磁感应强度,  $T$ ;  $\vec{J}$  为电流密度,  $A/m^2$ 。

具体采用 ANSYS10.0 有限元分析软件求解, 对推力器进行二维、三维有限元分析, 给出了圆柱形 Hall 推力器内部的静态电磁场分布。对计算

结果和实验结果进行对照分析, 根据分析结果指导改进设计。

圆柱形 Hall 推力器磁场的分布如图 3 所示, 磁力线在出口附近呈磁镜形分布; 推力器内电势的等值线分布如图 4 所示, 其中电压是 500V。从图 3 和图 4 可见, 磁力线的分布和等势线的分布基本相同, 形成了交叉的电场和磁场线, 达到了 Hall 推力器对磁场的基本要求。

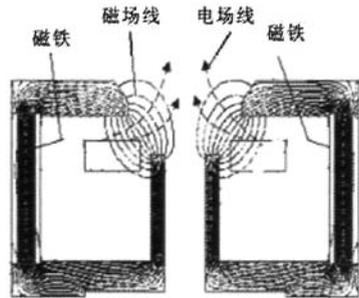


图 3 磁场线的分布  
Fig.3 Magnetic field line distribution

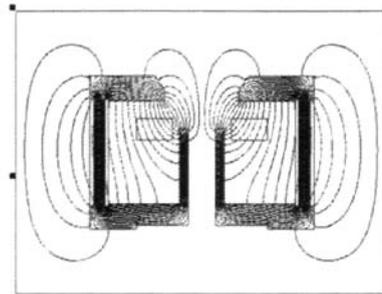


图 4 电势的等值线分布  
Fig.4 Contour distribution of electric potential

对磁力线分布采用二维有限元模拟是合理的。这可以利用二维的磁场等值线的分布 (如图 5) 和三维磁场模拟 (如图 6) 结果比较来验证。从距阳极 8mm 处的三维模拟的一个切面来看磁力线的分布、方向、大小, 可以看出磁力线在圆周方向基本上是均匀分布的, 故可以利用二维模拟其分布; 再比较二维的图 5 和三维的图 6 中磁场的大小, 图 5 中在上极靴下表面附近大约是

0.0855T, 对应图 6 中极靴附近大约是 0.0845T, 可见利用二维模拟的磁力线的分布是可靠的。因为永久磁铁产生的磁场, 经过极靴的导磁在整个推力器中基本上是均匀分布的。

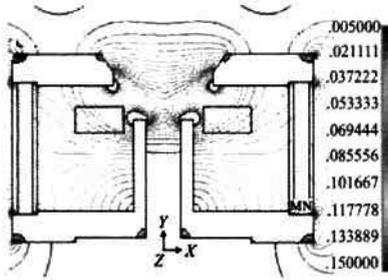


图 5 磁场 B 的等值线分布

Fig.5 Contour distribution of magnetic field B

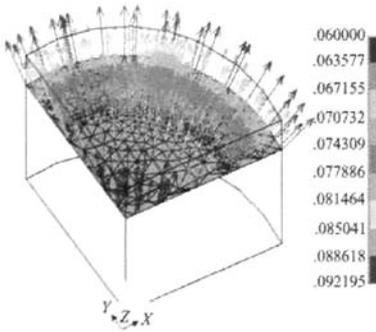


图 6 距阳极 8mm 处磁场 B 的分布

Fig.6 Distribution of magnetic field B 8mm from the anode

为了进一步验证磁场模拟结果的可靠性, 采用高斯计测量了从阳极附近到出口处推力器内轴向方向的磁场强度, 并比较了实验测量结果和模拟值 (如图 7)。取出口处中心为坐标原点, 可知在开始段测量值同模拟值有一定的误差, 在后段测量值和模拟值有很好的吻合。误差是在模拟计算时由模型的简化而引起的, 如把阳极的相对磁导率看作和空气的相同。实际上阳极的材料 (不锈钢) 是有一定磁性的; 另外, 测量本身也带有一定的误差。由图 7 的对比曲线可见实验结果与模拟结果相吻合。ANSYS 软件作为等离子体推力器的电磁场模拟分析是可靠的。

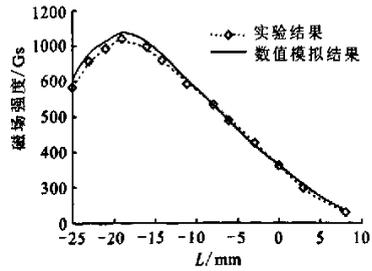


图 7 轴向磁场强度的实验值和数值模拟值的比较  
Fig.7 Magnetic field intensity actual value and simulation value comparison along axis

### 5 结论

根据圆柱形 Hall 推力器设计原理和磁场设计要求, 利用 ANSYS 进行数值模拟, 可知圆柱形 Hall 推力器在阳极和极靴之间的内部磁场成磁镜型分布, 而且从阳极到出口有一定的磁场梯度。电势分布类似于磁力线的分布。这种磁场位形更能有效地约束电子的运动, 减小羽流的发散角, 提高推力器的比冲; 通过电磁场模拟可以清楚推力器内部电磁场准确的分布情况, 进一步优化设计推力器结构。测量值和模拟值的比较结果, 证实了 ANSYS 模拟的可靠性。

### 参考文献:

- [1] Yevgeny Raitses, Artem Smirnov, Nathaniel J Fisch. Performance of a low-power cylindrical Hall thruster [D]. Princeton University Plasma Physics Laboratory (PPPL). The 29th inter-national electric propulsion conference. 2005.
- [2] Edgar Y Choueiri. Fundamenta difference the two variants of Hall thrusters SPT and TAL [R]. AIAA-2001-3504.
- [3] Keidar M, Boyd I D. On the magnetic mirror effect in Hall thrusters[J]. Applied physics letters 87, 2005, 12.
- [4] 杨乐, 李自然, 尹乐, 等. 脉冲等离子体推力器研究综述 [J]. 火箭推进, 2006, 32(2): 32-36.

(编辑: 侯 早)