

# 同心嵌套式霍尔推力器参数设计方法研究

熊森<sup>1,2</sup>, 程谋森<sup>3</sup>, 王墨戈<sup>3</sup>, 杭观荣<sup>1,2</sup>, 康小录<sup>1,2</sup>

(1. 上海空间推进研究所, 上海 201112; 2. 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112;  
3. 国防科学技术大学 航天科学与工程学院, 长沙 410073)

**摘要:** 结合未来国内外对大功率场霍尔推力器的需求, 论述同心嵌套通道式霍尔推力器研究现状, 技术优势。针对嵌套通道式霍尔推力器参数设计方法的空白, 介绍了一种可行的嵌套通道式霍尔推力器的结构和磁路; 提出了一种以阳极功率和比冲为输入, 确定嵌套通道式霍尔推力器通道数目、各通道结构参数和工作参数的方法; 结合磁路设计和热设计, 给出了优化嵌套通道式霍尔推力器的参数的路径; 填补嵌套通道式霍尔推力器参数设计和优化的空白, 为其工程应用提供参考。

**关键词:** 嵌套通道式霍尔推力器; 参数设计; 磁路设计

**中图分类号:** V439+.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-7777(2017)03-0238-07

**DOI:** 10.15982/j.issn.2095-7777.2017.03.006

**引用格式:** 熊森, 程谋森, 王墨戈, 等. 同心嵌套式霍尔推力器参数设计方法研究[J]. 深空探测学报, 2017, 4(3): 238-244.

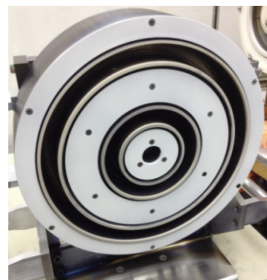
**Reference format:** Xiong S, Cheng M S, Wang M G, et al. Research on parameter design method of concentric nested Hall thruster[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(3): 238-244.

## 0 引言

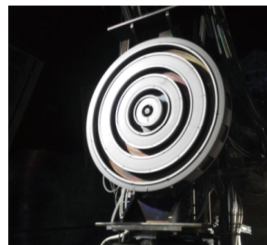
近年来, 随着深空探测和行星取样等长航时任务的提出, 电推力器既需要实现高比冲以降低运输成本, 又需要提供大推力以降低时间成本, 还需要保证较高的效率以降低能量需求<sup>[1]</sup>。目前, 在轨电推力器的推力大多是几十毫牛, 主要应用于姿态控制和南北位置保持, 若作为主推进器完成深空探测任务, 则需要很高的时间成本<sup>[2-3]</sup>。随着太阳能电池阵功率质量比的提高(130~240 W/kg), 太空中电推力器功率水平可达几十千瓦, 甚至上百千瓦<sup>[4]</sup>。目前, 各国均在研制高功率电推力器, 以期完成从LEO到GEO的轨道转移任务, 以及在月球和行星探测过程中的货物运输任务, 降低任务的资金成本和时间成本<sup>[5-6]</sup>。

目前成熟的电推力器是离子推力器和霍尔推力器, 综合权衡, 霍尔推力器应作为近期我国实现大功率、高推力功率比优先选择的途径<sup>[7]</sup>。霍尔推力器实现大推力方案主要有3种: ①是单通道方案, 如功率为50 kW的NASA 457Mv1; ②是并联小功率推力器方案; ③是多通道同心嵌套方案, 如图1, 也称为嵌套通道式方案。嵌套通道式霍尔推力器在保证高比冲和高效前提下, 可以明显地降低推力器的质量和空间尺寸, 降

低高功率霍尔推力器产生的转矩, 实验证明该方案还可以提升推力器功率工作范围和推力功率比<sup>[8-9]</sup>。



(a) 霍尔推力器X2



(b) 霍尔推力器X3

图1 嵌套通道式霍尔推力器<sup>[10-11]</sup>

Fig. 1 Nested channel Hall thruster<sup>[10-11]</sup>

密歇根大学自2011年以来公开的X2、X3, 几乎是文献中能见到的仅有的嵌套通道式霍尔推力器。Liang

主要完成了X2试验工作<sup>[10]</sup>, X2的定位是验证嵌套通道式方案的可行性, 其试验功率为6 kW。Florenz主要完成了X3的设计和试验工作<sup>[11]</sup>, X3的设计功率为240 kW, 最高实验功率为60 kW, 推力达到3 N。

## 1 设计概述

嵌套通道式设计主要包含两个部分: 一是工作参数和结构参数的确定, 称为参数设计问题; 另一部分是磁极构型配置, 励磁线圈设置以及放电室内磁场构型设计, 称为磁路设计问题。此两类问题的设计方法在单通道霍尔推力器比较成熟, 但在嵌套通道式霍尔推力器中研究尚少。

### 1.1 结构设计

嵌套通道霍尔推力器空心阴极应设置在推力器中心线处, 各放电室可共用空心阴极<sup>[10-11]</sup>。参考单通道霍尔推力器电源系统, 以降低系统结构复杂度为原则, 给出嵌套通道式霍尔推力器电源系统, 如图2所示。电源主要有4组, 其中, 给推力器供电的电源有2组, 分别是阳极电源E1、励磁线圈电源E2。

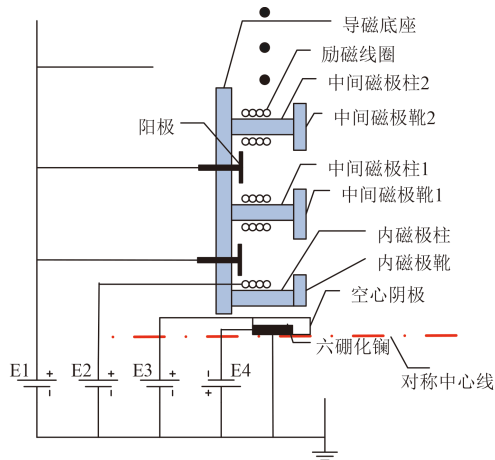


图2 嵌套通道式霍尔推力器结构与电源配置

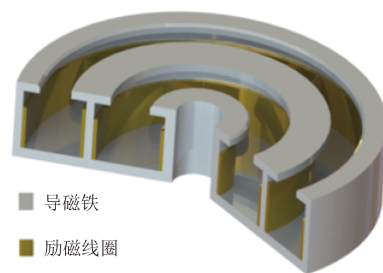
Fig. 2 Nested channel Hall thruster structure and power supply configuration

### 1.2 磁路设计

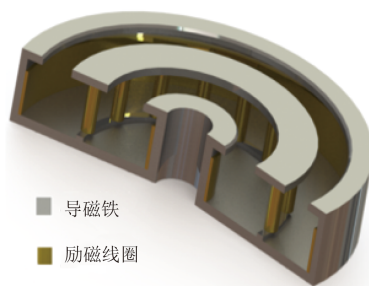
与单通道霍尔推力器磁路结构不同, 嵌套通道式霍尔推力器的磁路除配置内、外磁极之外, 还须配置中间磁极。

如图3所示, 以嵌套两通道霍尔推力器磁路设计为例, 中间磁极构型方案有两种: ①圆环构型, 励磁线圈通过绕线板环绕在中间磁极柱两边, 励磁线圈需要两组; ②圆柱构形, 每一组励磁线圈分别缠绕在圆柱形磁极柱上, 励磁线圈组数与圆柱数相同。方案一的中间磁极两边励磁电流可不同, 缺点是结构重量较大; 方案二虽可明显降低磁路重量, 但中间磁极两边

的安匝数相同, 难以保证内、外放电通道内磁场强度和磁场构型同时符合设计要求。



(a) 圆环构型



(b) 分立磁柱

图3 圆环构型与分立磁柱构形中间磁极

Fig. 3 The middle pole of annular and discrete magnetic column configuration

嵌套两通道霍尔推力器励磁线圈配置如图4。在沿着推力器径向方向上, NH-2内放电室的两个励磁线圈分别记为NI1、NI2; 外放电室的两个励磁线圈分别记为NI3、NI4。内、外放电室内的磁场方向相反, 内、外通道产生的附加扭矩方向也相反, 推力器整体附加扭矩降低, 相比单通道霍尔推力器方案, 嵌套通道式方案在降低附加扭矩方面优势明显。

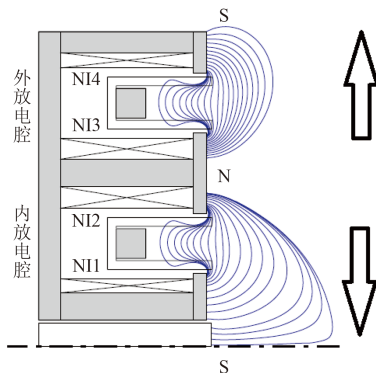


图4 NH-2励磁线圈配置示意图

Fig. 4 Configuration diagram of the NH-2 excitation coil

### 1.3 效率模型

嵌套通道式霍尔推力器的阳极效率模型<sup>[10]</sup>为

$$\eta_a = \eta_m \eta_q \eta_I \eta_V \eta_\theta \quad (1)$$

其中:  $\eta_m$  为质量利用效率;  $\eta_q$  为电荷利用效率;  $\eta_I$  为电流利用效率;  $\eta_V$  为电压利用效率;  $\eta_\theta$  为羽流效率。

因各放电通道内部共用空心阴极和电源E1, 则各放电通道出口处的电势分布规律差距不大, 如图5所示, 则各放电通道的电压利用效率均相同。

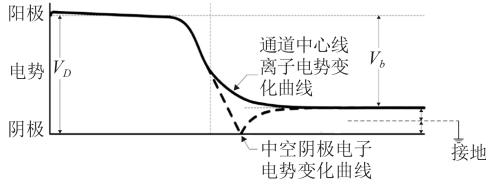


图5 放电室电势分布图

Fig. 5 Distribution of potential in discharge chamber

嵌套通道式霍尔推力器的电流分布如图6所示, 各放电室共用空心阴极和电源E1, 各放电室的放电电压均相等, 电势差为  $V_d$ 。合理的磁路结构设计可实现优化某一放电室内磁场时, 不改变其他放电室的磁场。基于此磁路结构设计, 可对各放电室磁场构型逐个优化, 使各放电室的泄漏电流值与放电电流值接近0.2。如此各放电室内部电流效率均相近, 近似等于推力器电流效率为

$$\eta_I \approx \eta_{I1} = \frac{I_{ib1}}{I_{d1}} = \frac{I_{ib1}}{I_{ec1} + I_{ib1}} \approx \eta_{I2} = \frac{I_{ib2}}{I_{d2}} = \frac{I_{ib2}}{I_{ec2} + I_{ib2}} \approx \dots \quad (2)$$

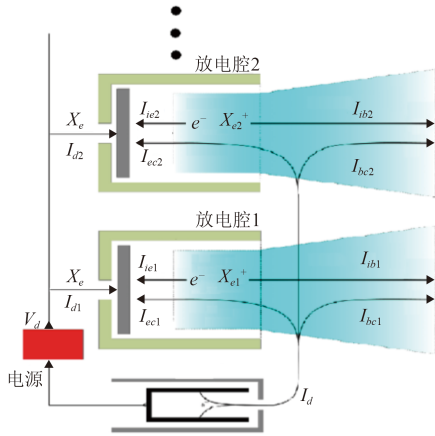


图6 嵌套通道式霍尔推力器电流分布图

Fig. 6 Current distribution of nested Hall thrusters

嵌套通道式霍尔推力器所有放电室在同时工作时, 因各放电室的阳极效率模型仅与该放电室的工质利用效率、电荷效率、电流效率、电压利用效率、羽流效率相关, 因上述各效率均可近似认为不受其他放电室工作状态参数的影响, 可近似认为嵌套通道式霍尔推力器各放电室之间的阳极效率均互不影响。基于此结论, 各放电室的工作参数和结构参数均可单独设

计, 设计方法可参考单通道霍尔推力器设计方法。

## 2 参数设计与优化流程

嵌套通道式霍尔推力器的目标是实现大推力, 其典型设计指标是推力和比冲, 一个特殊的设计参数是放电通道数目。基于设计推力和比冲, 按最小结构质量原则, 可设计推力器的工作参数和结构参数。嵌套通道式霍尔推力器需要设计的工作参数包括放电室的放电电压  $V_d$ 、总放电功率  $P_d$ 、总放电电流  $I_d$ 、总放电电流  $P_{d,n}$ 、各放电室的放电电流  $I_{d,n}$ 、各放电室阳极工质质量流率  $\dot{m}_{a,n}$ , 结构参数包括同心嵌套放电室数目  $N$ 、各放电室的外径  $D_n$ 、宽度  $W_n$ 、长度  $L_{c,n}$ 。

### 2.1 放电电压确定

推力器工质除大部分进入放电室外, 还有小部分进入空心阴极中。进入空心阴极的工质并不产生冲量, 可用阴极效率,  $\eta_c$  描述这部分损失, 为

$$\eta_c = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_p} = \frac{\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} + \dots}{\dot{m}_c + \dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} + \dots} \quad (3)$$

其中:  $\dot{m}_{a1}$ ,  $\dot{m}_{a2}$  是放电室一、二的阳极质量流率;  $\dot{m}_c$  是空心阴极质量流率;  $\dot{m}_p$  是供应推力器总质量流率。

对于推力器比冲  $I_{sp}$ , 其计算式为

$$I_{sp} = \frac{T}{\dot{m}_p g} = \frac{T}{\dot{m}_a g} \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_p} = I_{spa} \eta_c \quad (4)$$

其中:  $I_{sp,a}$  表示阳极比冲。

在霍尔推力器中, 阳极比冲与放电电压之间满足<sup>[9-10]</sup>关系为

$$I_{sp,a} = \eta_{ql} \eta_m \gamma_\theta \gamma_E \sqrt{\frac{2eV_d}{Mg^2}} \quad (5)$$

其中:  $I_{sp,a}$  为阳极比冲;  $\gamma_\theta$  为离子发散角修正系数;  $\gamma_E$  为离子速度修正系数;  $g$  为重力加速度, 9.81 m/s;  $\eta_{ql}$  为阳极比冲修正系数。

若放电室的工质选用氙, 则  $\eta_{ql}$  与放电电压<sup>[12-13]</sup>满足关系式为

$$\eta_{ql} = 1.091 \times 10^{-7} V_d - 3.971 \times 10^{-5} V_d + 1.038 \quad (6)$$

对于  $\gamma_\theta$ , 如若放电功率大于 500 W,  $\gamma_\theta$  可取值 0.94<sup>[13-14]</sup>, 且  $\gamma_E$  与放电电压之间近似满足<sup>[12-13]</sup>关系式为

$$\gamma_E \approx 0.95 \left[ 1 - e^{(-\sqrt[3]{V_d}/2)} \right] \quad (7)$$

工质利用效率可取 0.9<sup>[10]</sup>, 可计算出霍尔推力器中不同放电电压下的阳极比冲, 结果如图7所示, 其中横坐标是放电电压, 纵坐标是阳极比冲。

嵌套通道式霍尔推力器的阴极效率可以近似取值 0.9<sup>[13]</sup>, 参考式 (3) ~ (7), 可由设计比冲确定放电

室需要达到的阳极比冲，再参考图 7，可确定推力器的放电电压。

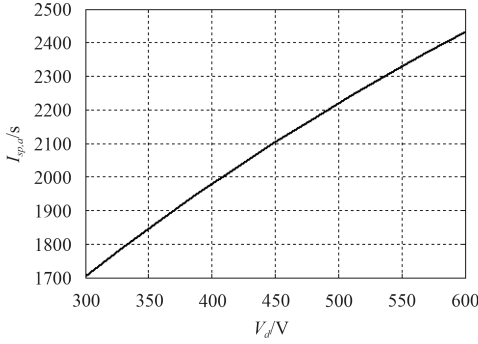


图 7 氙工质下阳极比冲随放电电压变化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the change of the anode specific impulse with discharge voltage on Xe

## 2.2 总放电功率确定

在放电电压确定后，推力器的推力功率比<sup>[12-13]</sup>为

$$\frac{T}{P_d} = C_q \eta_I \sqrt{\eta_V} \sqrt{\frac{2M}{eV_d}} \quad (8)$$

其中： $C_q$ 表示电荷修正系数。

$$C_q = \frac{\sum_{k=1}^3 \sqrt{k} \mu_k}{\sum_{k=1}^3 k \mu_k} \quad (9)$$

价态为 $k$ 的离子所占总离子数量的比率为

$$\mu_k = n_i^k / n_i \quad (10)$$

对于氙工质， $\mu_k$ 满足<sup>[10-11]</sup>的条件为

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 1 - \mu_2 - \mu_3 \\ \mu_2 &= 1.756 \times 10^{-4} \times V_d \\ \mu_3 &= 3.306 \times 10^{-5} \times V_d \end{aligned} \quad (11)$$

由式(8)~(11)可得到电荷修正系数随着放电电压变化的关系如图 8 所示，其中横坐标表示放电电压，纵坐标表示电荷修正系数。

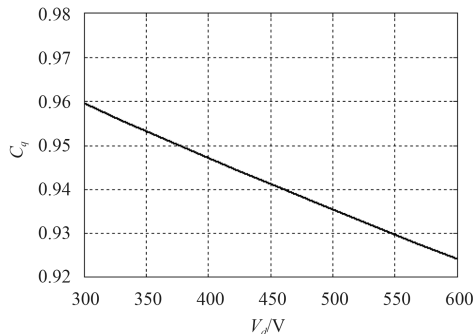


图 8 电荷修正系数随放电电压变化曲线

Fig. 8 The charge correction coefficient varies with the discharge voltage

由图 8 可知： $C_q$ 随着放电电压的升高而降低，但是变化不大。设计时，可近似认为 $C_q$ 数值上与放电电压无关，可取 0.95。

电流效率 $\eta_I$ 可取值 0.75<sup>[13]</sup>，电压利用效率 $\eta_V$ 可取值 0.9<sup>[13]</sup>，结合式(8)~(11)和电荷修正系数，可得到在氙工质条件下，放电室的推力功率比随放电电压变化的关系图，计算结果如图 9 所示，其中横坐标表示放电电压，纵坐标表示推力功率比。

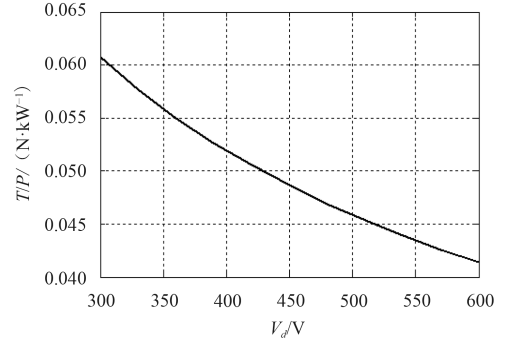


图 9 霍尔推力器推力/功率比随放电电压变化曲线

Fig. 9 Hall thrust power thrust ratio vs. discharge voltage variation curve

在保证电流效率的前提下，霍尔推力器各放电室的推力功率比均只与放电室的放电电压有关，放电电压越大，推力功率比越小。因嵌套通道式霍尔推力器各放电室在同时工作时，放电电压均相等，则设计时可认为各放电室的推力功率比均相等。参考图 9，可得到不同放电电压下嵌套通道式霍尔推力器的推力功率比。在已知设计推力后，通过确定设计电压确定推力器的推力功率比，以此确定推力器的总放电功率。

## 2.3 总阳极质量流率确定

在确定嵌套通道式霍尔推力器总放电电压和总放电功率后，可确定总放电电流为

$$I_d = \frac{P_d}{V_d} \quad (12)$$

对于价态为 $k$ 的离子，其产生的电流值， $I_i^k$ 为

$$I_i^k = n_i^k k A_e e \sqrt{\frac{2\eta_V V_d k e}{M}} \quad (13)$$

价态为 $k$ 的离子产生的电流比率为

$$\Omega_i^k = \frac{I_i^k}{I_b} = \frac{k \sqrt{k} u_1}{u_2 + 2 \sqrt{2} u_2 + 3 \sqrt{3} u_3} \quad (14)$$

则阳极质量流率与放电电流之间满足的关系式为

$$\dot{m}_a = \frac{\eta_I I_d M}{e \eta_m} \left( \frac{6\Omega_i^1 + 3\Omega_i^2 + 2\Omega_i^3}{6} \right) \quad (15)$$

由式(11)计算出设计电压下各价态离子比率，由

式(14), 计算各价态离子电流比率, 再由式(12)计算总放电电流。 $\eta_I$ 可取值0.75<sup>[13]</sup>,  $\eta_m$ 可取值0.9, 可通过式(15)由总放电功率确定总阳极质量流率。

在对某个放电室进行参数设计时, 若已知该放电室的放电电流, 也可参考式(15)确定该放电室的工质阳极质量流率。

## 2.4 各放电室放电电流和阳极质量流率确定

对嵌套通道式霍尔推力器各放电室内磁场优化后, 电流效率和工质利用率趋近某一常数。在保证电流利用效率的前提下, 放电电压的变化, 只是改变了放电功率以及各价态的电荷比率, 从而改变了各价态离子比率, 间接地改变了放电电流, 但作用效果很弱。放电电流值主要随着阳极质量流量的改变而改变, 因此可近似认为阳极质量流率与放电电流满足关系为

$$\dot{m}_a = CI_d \quad (16)$$

其中:  $C$ 表示某一常数。

在霍尔推力器放电室中, 工质数密度不能过高, 存在较优的范围<sup>[15]</sup>。参考式(15), 放电室内的电流密度也存在较优范围值。设计时, 放电室电流密度值可取某一数值, 则放电室的通道截面和放电室的放电电流之间满足的关系为

$$S = \frac{I_d}{j} \quad (17)$$

放电通道的截面积与放电通道的外径和放电通道宽度满足的关系式为

$$S = \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - w)^2] \quad (18)$$

文献[12]给出了电流密度 $j$ 的较优范围: 0.1~0.15 A/cm<sup>2</sup>。由式(17)~(18), 选定放电通道的外径和宽度, 则可确定放电室的通道截面积, 且可确定该放电室的放电电流范围。选定电流密度, 则该放电室对应的放电电流唯一确定。

参考式(15)描述的放电电流与阳极质量流率的关系, 已知各放电室的放电电流, 则可确定该放电室的阳极质量流率。

## 2.5 放电通道宽度设计

在霍尔推力器中, 要求放电通道内部的等离子体宽度与放电室的宽度近似相等, 这样所有的工质均会通过等离子体区域而被电离<sup>[13]</sup>。决定等离子体宽度的参数是放电通道磁镜比, 数值上等于放电室的壁面处磁感应强度值与中心线处磁感应强度值之比。当磁镜比超过某一数值时, 等离子体区域的宽度开始小于放电室

的宽度, 导致工质电离率下降, 放电室的阳极效率就会降低。霍尔推力器放电通道的宽度越大, 放电通道出口处的磁镜比就越大, 可见通道宽度存在上限值。因放电室内工质数密度和放电通道的宽度值存在上限值, 所以, 在提升放电室的截面积时, 必须同时增大放电通道的内、外径。

放电室的结构参数不同, 放电通道宽度上限值则不同。推力水平为一百毫牛的P100, 设计时设定磁镜比上限为3, 仿真确定放电室通道宽度上限为60 mm; 推力水平在1牛的NASA-457Mv1, 设计时设定磁镜比上限为2, 其放电通道设计宽度值为64 mm, 但是其放电通道最大磁镜比为1.7, 综上所述, 放电通道宽度上限值和放电室的放电功率息息相关。提升放电室的放电功率, 需要提高放电通道的截面积, 需要提升放电通道的外径, 也可认为放电通道外径越大, 则放电室的通道宽度上限值越大。

SPT系列型号中, 其放电室中放电通道宽度与放电通道外径之间满足关系为

$$w = 6 + 0.113D \quad (19)$$

因SPT型号系列的磁镜比设计值在2左右, 则各放电通道的宽度值可参考式(18)选取。在设计嵌套通道式霍尔推力器时, 初步设计的放电通道宽度须接近式(19)的计算值, 但是实际的放电通道磁镜比值必须经过磁路仿真验证, 甚至优化。

## 2.6 参数设计步骤与优化

1) 由设计比冲选定放电电压, 由设计推力确定放电功率的下限, 确定总放电电流下限。

2) 由总放电电流确定空心阴极的规格和数目, 基于空心阴极外径设计出推力器中心线处放置空心阴极区域的结构尺寸。

3) 结合磁路设计, 确定内磁极的宽度, 确定内磁极在推力器中的结构尺寸和区域面积。

4) 开展放电室1的结构参数设计。初选放电室截面电流密度, 合理地选择放电室1的放电通道宽度和外径。由式(18)计算放电室的截面积, 再由式(12)计算出放电室1的放电电流。适当调整放电室截面电流密度, 修正各参数数值。各参数设计合理后, 确定放电室1的放电功率。

5) 结合磁路设计中间磁极1, 确定中间磁极1在推力器中的结构尺寸。

6) 类似于步骤4, 确定放电室2的参数。

7) 验证此时各放电室放电功率之和是否大于总放电功率。若大于总放电功率, 则设计外磁极; 若略小

于总放电功率,则修正放电室2参数使各放电室功率之和略大于设计功率后,设计外磁极;若远小于总放电功率,则设计中间磁极2。

8) 若设计外磁极,则最终确定的放电室的数目和各放电室的结构参数,各方腔的放电功率即为最终的功率分配方案。若设计中间磁极2,则设计放电室3的过程可参考步骤5、6、7,直到各放电室的放电功率之和略大于推力器总设计放电功率。

9) 选定工质,由式(15)计算各放电室的阳极工质质量流率。

10) 选定合适的阳极构型,基于放电室的工作参数,可估算出各放电室中等离子区域长度,以此数值为基础,可确定各放电室的放电通道的长度。

11) 确定磁路构型,设计励磁线圈匝数,优化放电通道内磁场构型,确定各磁路参数。

12) 计算热载,确定各部件材料,开展热仿真,验证各材料温度均在使用上限以下。

优化的主要参数是结构参数,优化过程中可不改变放电室的数目和各个放电室的设计功率。优化后的磁路参数必须通过磁路仿真和热仿真验证。若满足磁场设计要求,可采用一维磁等离子放电模型验证各个放电通道性能。若仿真结果满足设计要求,则各参数设计合理。嵌套通道式霍尔推力器设计与优化流程如图10所示。只要给定出设计推力和设计比冲,即可初步确定嵌套通道式霍尔推力全部参数,但因在设计过程中各磁路参数均是初设,且初设磁路参数均比最优值大,因此在确定完磁路设计参数后有必要对各个参数开展优化设计。

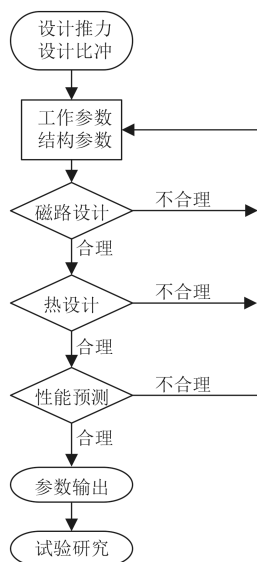


图10 嵌套通道式霍尔推力器设计流程

Fig. 10 The design flowchart of the nested channel Hall thruster

### 3 结论

本文基于嵌套通道式霍尔推力器的工作机理和效率模型,假设:各放电室设计放电电压相同,则嵌套通道霍尔推力器的各放电室的工作状态均互不影响,各放电室可单独设计,给出嵌套通道式霍尔推力参数设计方法和优化步骤。希望对各参与电推进研究的单位在研究嵌套通道式霍尔推力设计方面有所启发。

### 参考文献

- [1] 杨福全,赵以德,李娟,等. 主带小行星采样返回任务中的离子电推进应用方案[J]. 深空探测学报, 2015, 2(2): 168-173.  
Yang F Q, Zhao Y D, Li J, et al. Application scheme of ion electric propulsion system for main-belt asteroid sample and return mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2015, 2(2): 168-173.
- [2] 郑茂繁,耿海,梁凯,等. 用于小行星探测的离子推力器技术研究[J]. 深空探测学报, 2015, 2(3): 236-240.  
Zheng M F, Geng H, Liang K, et al. Research on ion thruster technology for asteroid exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2015, 2(3): 236-240.
- [3] Koppel C R, Marchandise F, Prioul M, et al. The SMART-1 electric propulsion subsystem around the Moon: in flight experience[C]// proceedings of 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Tucson: AIAA, 2005.
- [4] Brophy J R, Gershman R, Strange N, et al. 300 kW Solar electric propulsion system configuration: ion for human exploration of near-Earth asteroids[C]//47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. San Diego, California: AIAA.
- [5] Manzella D, Hack K. High-power Solar electric propulsion for future NASA missions[C]//50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Cleveland: AIAA, 2014.
- [6] Bérend N, Cliquet E, Ruault J M, et al. How fast can we go to Mars using high power electric propulsion[C]//48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Atlanta, Georgia: AIAA, 2012.
- [7] 杭观荣,康小录. 国外大功率等离子体推力器研究概况及对我国的发展建议[C]//第九届中国电推进技术学术研讨会. 北京: 中国宇航学会, 2013.  
Hang G R, Kang X L. The research of high power plasma thrusters abroad and the development suggestions for our country[C]// The Ninth China Electric Propulsion Technology Symposium. Beijing: Chinese Society of Astronautics, 2013.
- [8] 张天平,陈娟娟,李兴坤. 中高功率离子推力器的性能参数分析研究[J]. 真空与低温, 2012, 18(1): 9-20.  
Zhang T P, Chen J J, Li X K. Performance parameter analysis of the moderate and higher power ion thruster[J]. Vacuum and Cryogenics, 2012, 18(1): 9-20.
- [9] 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(05): 385-392.  
Wu H J, Jiang Y D, Zhang Z Y. Application and development trend of electric propulsion technology[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(05): 385-392.
- [10] Liang R. The combination of two concentric discharge channels into a



- nested Hall-effect thruster[D]. Michigan: The University of Michigan, 2013.
- [11] Florenz R E. The X3 100-kW class nested-channel Hall thruster: motivation, implementation and initial performance[D]. Michigan: The University of Michigan, 2014.
- [12] Shagayda A. On scaling of Hall effect thrusters[J]. Plasma Science, IEEE Transactions, 2015, 43(1): 12-28.
- [13] Shagayda A A, Gorshkov O A. Hall-thruster scaling laws[J]. Journal of Propulsion and Power, 2013, 29(2): 466-474.
- [14] Morozov A I, Savelyev V V. Fundamentals of stationary plasma thruster theory[M]. Germany: Springer US, 2000.
- [15] Manzella D. Scaling Hall thrusters to high power[D]. USA: Stanford University, 2005.
- 作者简介:  
熊森(1990-), 男, 硕士, 主要研究方向: 大功率霍尔推力器设计, 电推进系统贮控单元设计。  
通信地址: 上海市闵行区万芳路801号(201112)  
电话: 18621291162  
E-mail: 2060793600@qq.com

## Research on Parameter Design Method of Concentric Nested Hall Thruster

XIONG Sen<sup>1,2</sup>, CHENG Mousen<sup>3</sup>, WANG Moge<sup>3</sup>, HANG Guanrong<sup>1,2</sup>, KANG Xiaolu<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China;

3. Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** According to the future demand for high power Hall thruster at home and abroad, the research status and technical advantages of concentric nested channel Hall thrusters are discussed. The structure and magnetic circuit of a feasible nested channel Hall thruster are introduced. A method is proposed to determine the structure of the Hall thruster. The method of optimizing the parameters of the nested Hall thruster is given. The process of the nested channel is expected to be filled with the channel design and the thermal design. It will provide reference for engineering application in the future.

**Key words:** nested channel Hall thruster; parameter design; magnetic circuit design

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 朱鲁青]