LHT-100霍尔推力器放电通道能量损耗数值计算与分析

杨晨^{1*}, 龙建飞², 张天平²

1. 国防科技大学系统工程学院, 长沙 410073;

2. 兰州空间技术物理研究所, 兰州 730000

* E-mail: yangch803@sina.com

收稿日期: 2019-12-12; 接受日期: 2020-01-13; 网络版发表日期: 2020-08-03

摘要 为了对LHT-100霍尔推力器开展热分析及热设计优化, 根据放电通道能量平衡关系, 建立各项能量损耗微观表达式, 采用PIC-MCC法对推力器工作过程进行了数值模拟, 通过统计等离子体微观参数获得各项能量损耗并进行了实验验证. 研究结果显示: 激发损耗为51.1 W, 电离损耗为66.2 W, 阳极损耗为55.4 W, 束流损耗为815.4 W, 内壁面损耗为144.7 W, 外壁面损耗为170.5 W; 推力器稳定工作时有效能量损耗所占比为61.7%, 耗散能量中带电粒子在壁面的能量沉积最大, 等离子体产生成本次之, 电子在阳极的能量沉积最小; 仿真结果与测试数据具有较好的一致性, 最大误差小于4.6%. 研究结果为霍尔推力器放电通道能量损耗计算提供了一种新思路.

关键词 霍尔推力器, 放电通道, 能量损耗, PIC-MCC

1 引言

霍尔推力器具有高可靠、高推功比等优势, 已经广泛应用于航天器的轨道维持等空间任务. LHT-100推力器为兰州空间技术物理研究所自主研发的千瓦级霍尔推力器^[1], 目前正在开展性能优化研究. 在该推力器热设计优化研究中发现^[2], 工作过程中, 放电通道内壁面能量损耗引起的内极靴热量累积, 是导致霍尔推力器寿命及可靠性衰退的重要原因. 同时推力器性能优化研究表明^[3], 放电通道能量损耗对推力器的工作效率具有直接影响. 因此, 准确获得放电通道内各项能量损耗具有重要意义.

霍尔推力器工作过程中, 放电通道内等离子体产生的能量辐射以及等离子体与壁面相互碰撞作用过程中均会产生能量损耗. 1998年俄罗斯火炬局的Archipov等人^[4]在SPT-100推力器热分析过程中, 基于实验测试参数估算了放电通道壁面能量损耗, 在分析过程中忽略了激发和电离等能量损耗. 美国的Brophy等人^[5]、Goebel和Katz^[6]建立了放电室性能零维模型, 通过对等离子体密度、粒子能量等参数均一化处理, 并结合放电室能量平衡等式, 推导出各项能量损耗经验表达式. 俄罗斯的Kim^[7]采用网络法对SPT-100推力器放电通道壁面能量损耗进行求解, 获得了壁面能量损耗值. 兰州空间技术物理研究所的龙建飞等人^[8]建立

引用格式: 杨晨, 龙建飞, 张天平. LHT-100霍尔推力器放电通道能量损耗数值计算与分析. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 99–107

Yang C, Long J F, Zhang T P. Numerical study on energy loss in discharge channel of LHT-100 Hall thruster (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 99–107, doi: 10.1360/SST-2019-0358

了通道内能量损耗与工作参数、性能参数和结构参数的相关函数,结合实验测试出束流密度等关键参数,进而计算出通道内各项能量损耗,并进行了实验验证.上海交通大学的严立等人^[9]在霍尔推力器热分析研究中,采用数值模拟方法对SPT-70推力器通道壁面热流量进行计算,模型中主要考虑离子与壁面相互作用,忽略了电子影响.由于霍尔推力器放电通道内等离子体参数具有较大离散性,难以对通道内等离子体参数进行有效估算,从而给经验模型计算带来误差.另外以往研究者采用数值方法仅是计算通道壁面能量损耗,对通道内工质气体电离、激发等其他能量损耗缺乏关注.

为准确获得放电通道内各项能量损耗,本文采用数值仿真方法对LHT-100推力器通道各项能量损耗进行计算.建立基于微观粒子参数的能量损耗模型,采用PIC/MCC法对通道内工质气体的电离、激发过程进行数值仿真模拟,跟踪微观粒子运动轨迹,通过统计获得各项能量损耗,并在此基础上开展实验验证,确保模型计算的准确性.

2 计算模型

2.1 基于微观粒子能量损耗模型

霍尔推力器稳定工作时,放电通道能量平衡满足如下关系式^[10]:

$$P_d = P_{\text{exc}} + P_{\text{ion}} + P_a + P_b + P_w + P_{\text{oth}}, \quad (1)$$

式中, P_{exc} 为激发损耗, P_{ion} 为电离损耗, P_a 为阳极损耗, P_b 为束流损耗, P_w 为壁面损耗, P_{oth} 为其余损耗.

(1) 激发和电离损耗

放电通道内等离子体形成过程中,电子与中性原子发生非弹性碰撞产生能量损耗.根据碰撞模型^[11],激发碰撞产生平均能量损耗为8.31 eV,电离碰撞产生平均能量损耗为12.1 eV.因此,分别统计单位时间内放电通道内所有激发碰撞次数(n_{exc})和电离碰撞次数(n_{ion}),进而计算出激发损耗和电离损耗:

$$\begin{aligned} P_{\text{exc}} &= (8.31 \text{ eV})n_{\text{exc}}, \\ P_{\text{ion}} &= (12.1 \text{ eV})n_{\text{ion}}. \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 阳极损耗

放电通道中阳极为金属材料且具有高电势,由于离子很难碰到因而忽略^[12],因此,主要收集等离子体中的电子.电子与阳极相互作用过程中,电子必须克

服鞘层电势才能到达阳极,单个电子轰击阳极损失能量约为 $2T_{\text{eV}}$ ^[6],假定单位时间入射阳极的电子数量为 $n_{\text{e-w}}$,则阳极能量损耗表达式如下:

$$P_a = \sum_{j=1}^{n_{\text{e-w}}} (2T_{\text{eV}})_j. \quad (3)$$

(3) 壁面损耗

在外加电磁场作用下,通道内等离子体粒子与壁面相互作用过程中将产生能量损耗,由于二次电子逸出能量很低,因此,忽略二次电子能量损耗.本文计算中,主要考虑壁面电子能量损耗和离子能量损耗,计算表达式如下:

$$\begin{aligned} P_w &= \sum_{j=1}^{n_{\text{e-w}}} \left(q_{\text{e,kinetic}} + \frac{3}{2} k T_{\text{e}} - e\phi \right)_j \\ &\quad + \sum_{j=1}^{n_{\text{i-w}}} \left(q_{\text{i,kinetic}} + \frac{3}{2} k T_{\text{i}} + e\phi \right)_j, \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $n_{\text{e-w}}$ 为单位时间入射壁面电子数量, $q_{\text{e,kinetic}}$ 为电子动能, k 为玻尔兹曼常数, e 为电子电荷, T_{e} 为电子温度, ϕ 为鞘层电势, $n_{\text{i-w}}$ 为单位时间入射壁面离子数量, $q_{\text{i,kinetic}}$ 为离子动能, T_{i} 为离子温度.

(4) 束流损耗

放电通道内离子在加速电场的作用下获得速度增量,从通道出口喷出并形成束流进而产生推力.束流损耗表现为单位时间从通道出口喷出离子所有动能之和,计算表达式如下:

$$P_b = \sum_{j=1}^{n_{\text{i}}} \left(\frac{1}{2} m v_{\text{i}}^2 \right)_j, \quad (5)$$

式中, n_{i} 为单位时间从通道出口喷出的离子数量, m 为离子质量, v_{i} 为离子速度.

(5) 其他损耗

其他损耗主要为模型简化以及计算过程中所带来的误差.其中模型简化主要包括二次电子逸出能量损耗和阳极壁面离子入射能量损耗等,计算误差主要来源于放电通道内等离子体数值仿真过程产生的误差.

2.2 PIC/MCC数值仿真

(1) 计算区域及边界

由于霍尔推力器放电通道具有轴对称结构,通道内参数在周向的变化相对较小,因此,可采用二维柱坐标进行模拟,具体包括轴向(z)和径向(r)的二维空间

和三维速度(v_z , v_r , v_θ)表示轴向方向(θ 表示周向方向). 图1为计算区域及边界示意图, 计算区域主要为推力器放电室加速通道, 左侧边界为推力器阳极, 上边界为外壁面, 下边界为内壁面, 右边界为通道出口. 根据LHT-100推力器尺寸, 加速通道长度取26 mm, 内壁面位于 $r=35$ mm位置处, 外壁面位于 $r=50$ mm位置处. 采用正交等距划分网格, 长度为0.5 mm. 因此, 通道网格划分为 52×30 的等距网格.

(2) 数值模型

本文采用PIC/MCC法对放电过程进行数值仿真. 其中粒子网格模拟(PIC)用于对通道内带电粒子运动及空间自洽电场求解, 蒙特卡罗碰撞(MCC)主要用于描述电子与原子碰撞和电荷交换碰撞.

在采用PIC粒子模拟方法建模时, 均采用静电模型. 因此, 电场采用泊松方程求解.

$$\Phi = -\frac{e}{\epsilon_0}(n_i - n_e), \quad (6)$$

式中, Φ 为电势; ϵ_0 为真空介电常数; n_i 为离子密度; n_e 为电子密度.

泊松方程求解采用有限差分法, 所使用的格式为中心差分五点格式. 为了提高电场计算收敛的速度, 文中采用逐次超松弛(SOR)方法.

由于原子的速度远小于离子和电子, 因此在模型中, 认为原子的分布是背景场. 原子数密度分布近似地可表示为

$$n_a = \frac{\dot{m}}{sv_0} \left(1 - \frac{z}{L}\right)^2, \quad (7)$$

式中, n_a 原子密度; $\dot{m}$ 为阳极流量; s 为推力器出口端面积; v_0 为原子速度, 原子速度在放电室内处处相等.

在模型中, 模拟粒子的加速采用牛顿-洛伦兹力求解:

图1 (网络版彩图)计算区域示意图
Figure 1 (Color online) Schematic calculation area.

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (8)$$

模型中认为粒子之间只有电子-原子碰撞才能生成离子, 进一步认为只产生单电荷离子. 电子和原子的碰撞概率表示为

$$p = 1 - \exp(-n_a v_e \sigma_i \Delta t), \quad (9)$$

式中, v_e 为电子速度; σ_i 为电子与原子间的碰撞截面, 其值与电子能量有关.

基于上述数值模型, 仿真过程描述如下: 首先进行模型初始化, 根据计算区域采用正交等距法进行网格划分, 并确定边界处理准则, 磁场根据仿真软件计算并导入, 采用面积权重法将带电粒子电量权重到周围网格节点, 通过求解Poisson方程计算各节点电势和电场, 根据周围节点电场对带电粒子所在位置的电场强度进行插值, 运用牛顿第二定律对带电粒子进行加速, 再用新的粒子位置求解新的电场分布, 上述过程循环进行, 直至满足收敛条件. 电子和原子碰撞、电荷交换碰撞利用MCC方法进行计算, 碰撞后产生的离子重新参与到PIC计算中. 仿真流程见图2所示.

针对LHT-100推力器, 本研究组开发了该推力器放电过程数值仿真程序^[13], 通过计算得到了放电通道内等离子体密度、电势分布等参数, 并在推力计算中得到应用. 关于霍尔数值模型的详细描述见文献^[12,13], 这里不再赘述.

2.3 参数设置

LHT-100推力器为千瓦级霍尔推力器, 其相关参数如表1所示.

图2 计算流程图
Figure 2 Flow chart of the simulation.

表 1 LHT-100推力器工作参数

Table 1 The parameters of LHT-100 Hall thruster

工作级结构参数	数值
放电电压 V_d (V)	300
放电电流 I_d (A)	4.4
触持电流 (A)	1.2
触持电压 (V)	16
内通道半径 (mm)	35
外通道半径 (mm)	50
放电通道长度 (mm)	25

本文仿真计算在7000个步长时达到稳定状态。仿真过程中,对通道内电子和离子均进行跟踪,结合各能量损耗表达式,对放电通道内等离子体微观参数进行统计与计算,最终获得稳态下的各项能量损耗。

3 分析与验证

3.1 计算结果分析

(1) 激发和电离能量损耗

图3为通道内等离子体激发碰撞和电离碰撞次数统计。数值仿真达到稳定后,共统计了30个时间步长计算区域内的激发碰撞次数和电离碰撞次数,结果显示,放电通道中每秒共发生激发碰撞次数约为 $3.84 \times 10^{19} \text{ s}^{-1}$,共发生电离碰撞次数约为 $3.35 \times 10^{19} \text{ s}^{-1}$,两者较为相近。LHT-100推力器放电通道体积约为 $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3$,进一步可以估算出该推力器平均电离速度为 $3.35 \times 10^{23} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$,可以看出该推力器具有较好的电离特性。

根据以上统计结果,结合式(2)计算得到放电通道内激发碰撞能量损失约为51.1 W,而电离碰撞能量损耗约为66.2 W。进一步分析可知,LHT-100推力器放电通道内用于等离子体产生成本的能量共为117.3 W。

(2) 阳极损耗

图4为电子入射阳极数量统计。从图中可以看出,30个时间步长内统计结果较为稳定,即平均每秒入射电子数量约为 $2.9 \times 10^{19} \text{ s}^{-1}$ 。由于离子很难入射具有高电位的阳极,因此,放电电流主要由电子形成。根据单位时间阳极的入射电子数量,可以计算出阳极电流为4.62 A,LHT-100推力器实验测试结果显示,放电电流为4.5 A,两者较为接近。

图 3 (网络版彩图)激发碰撞和电离碰撞次数统计

Figure 3 (Color online) The number of excitation collisions and ionization collisions.

图 4 电子入射阳极数量

Figure 4 The amount of Electron incidence in anode.

仿真结果显示阳极附近电子温度集中在4.0~4.5 eV范围内,因此,根据单位时间阳极入射电子数量,结合式(3)可以计算出阳极能量损耗约为55.4 W。LHT-100推力器阳极面积为 $4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$,进一步得到阳极平均面能量损耗为 $1.3 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ 。

(3) 束流损耗

图5为推力器放电通道离子喷出数量和喷出速度统计。推力器通过电场将通道内离子加速至高速并引出,从而产生推力。为了准确计算出束流加速能量损耗,分别统计了喷出离子数量和喷出速度。从图5(a)中可以看出,喷出离子数量主要集中在 1.65×10^{19}

图 5 (网络版彩图)放电通道离子喷出数量和喷出速度统计. (a) 喷出数量; (b) 喷出速度

Figure 5 (Color online) The statistics number of ion exhausted amount and velocity. (a) Ion exhausted amount; (b) ion exhausted velocity.

$\sim 1.73 \times 10^{19} \text{ s}^{-1}$ 范围, 根据喷出离子数量, 可计算出束流电流值约为 3.1 A, 相比 LHT-100 推力器束流测试结果 3.2 A^[8] 略低. 图 5(b) 为喷出离子速度统计结果, 统计样本为 2000 个. 结果显示, 喷出离子速度最小低于 $1.5 \times 10^4 \text{ m/s}$, 最大约为 $1.9 \times 10^4 \text{ m/s}$, 而绝大部分 (95% 以上) 离子喷出速度集中在 $1.8 \times 10^4 \sim 1.85 \times 10^4 \text{ m/s}$ 之间. 分析认为, 离子喷出速度主要与离子产生初始位置以及通道电势分布相关, 通道内离子主要形成于电离区, 因此, 所获得加速能量相近. 而当离子产生初始位置靠近放电通道加速区时, 则所获得加速能量较少, 进而导致喷出速度相对较低, 另外, 离子在加速过程中存在电荷交换碰撞, 产生的慢速离子由于二次获得加速能量较少, 也将导致少量离子喷出速度较低.

对推力器通道单位时间内喷出离子的动能进行积分便可计算出束流功耗, 结果显示束流功耗 P_b 约为 815.4 W. LHT-100 推力器放电功率约为 1320 W, 则可

计算出推力器的电效率为 61.7%, 假定二价离子修正系数为 0.9, 进一步可估算出该推力器阳极效率为 55.5%, 与 SPT-100 推力器相近^[14,15].

(4) 壁面损耗

带电粒子与壁面相互作用的能量损耗计算中, 均与鞘层电势以及电子温度密切相关. 因此, 仿真中对通道电子温度分布以及鞘层电势分布进行研究, 计算结果如图 6 所示. 从图中可以看出, 电子温度从阳极沿着轴向先增大后减小分布, 在轴向位置 z 约 21 mm 处有最大电子温度 48 eV, 阳极附近有最小电子温度约为 4.0 eV. 由于电子受磁场约束, 使得其轴向变化与放电通道内磁场变化趋势相一致.

霍尔推力器中等离子与壁面相互作用满足 Space Charge-Limited 模型, 放电通道中鞘层电势 Φ 与电子温度、壁面材料之间关系借鉴文献^[12] 研究结果. LHT-100 推力器壁面材料 BN-SiO₂, 因此, 根据通道内电子温度分布计算得到鞘层电势轴向分布.

图 7 为壁面带电粒子入射数量统计. 仿真中分别对内壁面、外壁面的电子入射数量和离子入射数量进行统计. 结果显示, 电子入射内壁面数量约为 $6.7 \times 10^{18} \text{ s}^{-1}$, 电子入射外壁面数量约为 $9.6 \times 10^{18} \text{ s}^{-1}$, 离子入射内壁面数量约为 $0.8 \times 10^{18} \text{ s}^{-1}$, 离子入射外壁面数量约为 $1.2 \times 10^{18} \text{ s}^{-1}$. 进一步分析统计结果可知, 壁面入射电子数量约为离子数量的 8 倍, 分析认为, 由于壁面材料存在二次电子发射效应 (二次发射系数平均值约为 0.9), 在电量准中性条件下, 入射电子数量远大于入射离子数量.

根据以上统计结果, 结合式 (4) 对壁面损耗进行计

图 6 电子温度和鞘层电势轴向分布

Figure 6 Electric temperature and sheath voltage distribution.

图7 (网络版彩图)带电粒子入射壁面数量统计

Figure 7 (Color online) Statistics number of charged particles incident in wall.

算. 计算结果显示, 内壁面能量损耗为144.7 W, 外壁面能量损耗为170.5 W, 相比而言, 外壁面能量损耗略大于内壁面. 分析认为, 放电通道中等离子体密度、电势等参数径向分布较为相近, 由于外壁面面积大于内壁面, 使得其沉积能量稍大.

3.2 能量损耗比例分析

表2为数值计算能量损耗与经验模型计算结果对比. 从表中可以看出, 两者结果较为相近. 对比可知, 数值计算中束流损耗略低于经验计算结果, 而其余能量损耗均稍微偏大. 经验模型基于放电通道零维模型建立, 对于离子加速能量、带电粒子与壁面相互作用能量、鞘层电势等均按平均值估算, 因此带来一定误差. 采用数值计算, 通过对等离子体微观参数统计, 可以较好地描述等离子体微观参数的差异性, 同时可以分析

表2 LHT-100推力器能量损耗比例^{a)}

Table 2 Energy loss list in LHT-100 thruster

序号	功率	文献值 ^[8] (W)	计算结果 (W)
1	放电功率 P_d	1320	1320
2	激发功率 P_{exc}	33.6	51.1
3	电离功率 P_{ion}	42.9	66.2
4	阳极功率 P_a	44	55.4
5	束流功率 P_b	889.2	815.4
6	壁面沉积功率 P_w	297.9	315.2*
7	其他功率 P_{oth}	12.4	16.7

a) 外壁面能量沉积为170.5 W, 内壁面能量沉积为144.7 W.

CEX电荷交换碰撞等复杂过程对各能量损耗的影响. 根据本文仿真结果, 可以进一步计算出推力器比冲为1577 s, 与实验测试结果^[16](1600 s)更为相近.

LHT-100推力器放电通道能量损耗比例计算结果表明: 激发能量损耗占放电通道总损耗约3.8%, 电离损耗约为4.9%, 阳极损耗约为4.1%, 束流损耗约为61.7%, 内壁面能量损失约为10.7%、外壁面能量损耗约12.7%. 推力器各项能量损耗中, 用于离子加速的束流损耗为有效能量损耗, 提升束流损耗比例是该推力器的性能优化目标. 其余能量损耗比例分析可知, 等离子体与壁面相互作用产生能量损耗所占比例最大, 等离子体产生成本(激发和电离损耗)次之, 电子在阳极沉积损耗比例相对最小. 通过对放电通道能量损耗研究, 寻求最优能量损耗比例, 从而为推力器性能优化提供支撑.

3.3 实验验证

为了充分验证本文计算结果的准确性, 将各项能量损耗作为热加载边界条件, 采用有限元技术对LHT-100推力器进行热分析, 同时开展热平衡实验进行温度测试, 进而对计算结果进行间接验证.

LHT-100推力器热平衡实验在兰州空间技术物理研究所TS-6真空设备内开展, 实验过程中真空度约为 1.3×10^{-3} Pa, 推力器稳定工作2 h后达到热平衡状态, 温度测试采用E型热电偶测量, 试验平台及推力器温度测试点如图8所示.

根据LHT-100推力器建立有限元模型, 并将表2中通道壁面能量损失和阳极能量损失分别以面热流的形式在有限元分析中作为加载边界条件, 通过计算得到LHT-100推力器温度分布结果如图9所示.

表3为数值计算与测试结果对比. 从表3中可以看出, LHT-100推力器热稳定情况下, 模拟计算下的各项温度与测试结果整体符合较好, 其中最大误差约为4.6%. 通道内陶瓷腔温度分布显示, 在其出口处具有较高温度, 约为470℃~510℃, 而陶瓷腔底端(近阳极区)温度较低, 约为350℃~390℃. 陶瓷腔温度分布与壁面能量沉积轴向分布相一致, 在出口处能量损耗密度最大, 近阳极区损耗密度最小. 等离子体密度主要集中在通道出口处, 同时该处的离子速度最大, 因而造成出口处能量沉积密度最大.

有限元计算得到的温度分布与测试结果具有较好

图 8 LHT-100推力器温度测试
Figure 8 Temperature test of LHT-100 thruster.

图 9 LHT-100推力器温度分布
Figure 9 Temperature distribution of LHT-100 thruster.

表 3 数值计算与实验测试结果对比

Table 3 Simulation results and experimental results

参考点	数值计算结果 (°C)	实验测试结果 (°C)	误差 (%)
外极靴	200~250	200.8	2.5%
电连接器	125	119.5	4.6%
外线圈	161	154	4.5%
内线圈上端	372~379	377~397	4.5%
底座支架	150	156	3.9%
放电通道	374~510	—	—
阳极	401~416	—	—

的吻合度, 说明热分析过程中通道能量损耗热流加载边界合理, 进而验证了本文能量损耗模型的准确性.

4 结论

采用PIC/MCC法对通道进行数值仿真, 通过对微

观粒子参数统计计算而直接获得各项能量损耗, 并完成实验验证. 得到如下结论.

(1) 通过计算获得了LHT-100霍尔推力器通道内各项能量损耗. 其中激发损耗为51.1 W, 电离损耗为66.2 W, 阳极损耗为55.4 W, 束流损耗为815.4 W, 内壁面损耗为144.7 W, 外壁面损耗为170.5 W. 推力器放电

通道各项能量损耗中, 等离子体与壁面相互作用产生能量损耗所占比例最大, 约为23.9%, 等离子体产生成本(激发和电离损耗)次之, 约为8.9%, 阳极损耗比例相对最小为4.2%。

(2) 将通道内能量损耗计算结果作为热流加载边界进行有限元热分析, 并与实验测试对比验证, 计算值与测试值吻合较好, 最大误差约4.6%。相比经验模

型, 采用数值计算方法可以较好地反映出推力器内部等离子体微观参数的差异性, 具有更好的合理性。

(3) 通过大量微观粒子参数统计而直接获得能量损耗, 可为霍尔推力器通道内能量损耗计算提供一种新思路, 基于该数值计算模型, 后续将进一步开展等离子体多组分粒子能量分布等研究, 为推力器效率提升优化等提供支撑。

参考文献

- Long J F, Zhang T P, Sun M M, et al. Studies on key parameters of magnetic engineering design in LHT-100 thruster (in Chinese). *J Propul Technol*, 2015, 36: 1432–1438 [龙建飞, 张天平, 孙明明, 等. LHT-100推力器磁场工程设计的关键参数研究. 推进技术, 2015, 36: 1432–1438]
- Sun M M, Gu Z, Ma Y B, et al. Thermal analysis of a LHT-100 Hall thruster (in Chinese). *J Propul Tech*, 2014, 35: 1715–1720 [孙明明, 顾左, 马永斌, 等. LHT-100霍尔推力器热特性模拟分析. 推进技术, 2014, 35: 1715–1720]
- Tian L C, Guo N, Long J F, et al. Experimental study of LHT-100 Hall thruster operation in the wide power range (in Chinese). *J Propul Tech*, 2014, 35: 1283–1288 [田立成, 郭宁, 龙建飞, 等. LHT-100霍尔推力器宽功率范围工作实验研究. 推进技术, 2014, 35: 1283–1288]
- Archipov B, Krochak L Z, Maslennikov N. Thermal design of the electric propulsion system components. In: 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Cleveland, 1998. AIAA 98-3489
- Brophy J R, Barnett J W, Sankovic J M, et al. Performance of the stationary plasma thruster: SPT-100. In: 28th Joint Propulsion Conference. Nashville, 1992. AIAA-92-3155
- Goebel D M, Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2008. 340–351
- Kim V. Main physical features and processes determining the performance of stationary plasma thrusters. *J Propul Power*, 1998, 14: 736–743
- Long J F, Sun M M, Zhang T P. Thermal model of Hall thruster (in Chinese). *High Power Laser Particle Beams*, 2014, 26: 124002 [龙建飞, 孙明明, 张天平. 霍尔推力器热模型研究. 强激光与粒子束, 2014, 26: 124002]
- Yan L, Wang P Y, Ouyang H. Thermal analysis of Hall thruster by PIC/MCC/DSMC method (in Chinese). *J Propul Tech*, 2015, 36: 953–959 [严立, 王平阳, 欧阳华. 基于PIC/MCC/DSMC方法霍尔推力器热分析. 推进技术, 2015, 36: 953–959]
- Kim V, Kozlov V, Popov G, et al. Investigation of the stationary plasma thruster outgassing and its thermal station impact on thruster performance variation in time. In: 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Cleveland, 1999. IEPC 1999-084
- Szabo J J. Full Kinetic numerical modeling of a plasma thruster. Dissertation for Doctoral Degree. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2001
- Hobbs G D, Wesson J A. Heat flow through a langmuir sheath in the presence of electron emission. *Plasma Phys*, 1967, 9: 85–87
- Long J F, Zhang T P, Sun M M, et al. Numerical simulation of performance in Hall thruster (in Chinese). *J Solid Rocket Technol*, 2015, 38: 514–518 [龙建飞, 张天平, 孙明明, 等. 霍尔推力器工作性能数值模拟研究. 固体火箭技术, 2015, 38: 514–518]
- Ahedo E, Gallardo J M, Martinez-Sánchez M. Effects of the radial plasma-wall interaction on the Hall thruster discharge. *Phys Plasmas*, 2003, 10: 3397–3409
- Bechu S, Perot C, Gascon N, et al. Operating model investigation of a laboratory stationary plasma thruster. In: 35th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Los Angeles, 1999. AIAA 99-2567
- Tian L C, Gu N, Long J F, et al. Experimental study of LHT-100 Hall thruster operation in the wide power range (in Chinese). *J Propul Tech*, 2014, 35: 1283–1289 [田立成, 郭宁, 龙建飞, 等. LHT-100霍尔推力器宽功率范围工作实验研究. 推进技术, 2014, 35: 1283–1289]

Numerical study on energy loss in discharge channel of LHT-100 Hall thruster

YANG Chen¹, LONG JianFei² & ZHANG TianPing²

¹ College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

² Lanzhou Institute of Physics, CAST, Lanzhou 730000, China

Numerical simulations are here used to accurately obtain the energy loss in the discharge channel of a LHT-100 Hall thruster, and to further carry out thermal analysis and performance optimization. These simulations serve as the basis for an analysis and discussion of these critical issues. The energy loss expression, as a function of microscopic particle parameters, is established based on the energy balance relationship in the discharge channel. First, the discharge process is simulated by particles using the Particle-In-Cell-Monte Carlo Collision (PIC-MCC) method. Then the energy loss is calculated directly by statistics of the plasma parameters, and finally a verification experiment is performed. The results show that excitation energy loss is 51.1 W, ionization energy loss is 66.2 W, anode energy loss is 55.4 W, beam energy loss is 815.4 W, inner wall energy loss is 144.7 W, and outer wall energy loss is 170.5 W. the effective energy loss ratio is 61.7%, with other energy dissipation due mainly to three factors: the energy of deposition of charged particles on the wall, the plasma reaction cost, and the energy of deposition of electrons on the anode, which is relatively minimal. There is good agreement between the numerical calculation and a test, with a maximum error less than 4.5%. In sum, this study develops a new idea for calculating energy loss in the discharge channel of a Hall thruster.

Hall thruster, discharge channel, energy loss, PIC/MCC

doi: [10.1360/SST-2019-0358](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0358)