

文章编号:1006-2793(2004)03-0184-06

自由分子流微电热推力器数值模拟计算

韩先伟^{1,2}, 唐周强¹, 陶文铨², 张贵田¹, 张恩昭¹

(1. 陕西动力机械研究所, 西安 710100; 2. 西安交通大学, 西安 710059)

摘要:基于微机电系统技术的自由分子流微电热推力器(FMMR)是一种微型电热推力器,它具有集成化程度高、体积小、质量轻、响应速度快、推质比高、可靠性高和易于集成为推进阵列等特点,它在军事和民用微/纳航天器方面有广阔的应用前景。通过建立合理的数学模型,如分子与壁面相互作用模型采用 CLL 模型,分子模型采用变径硬球模型,分子碰撞对的选取采用取舍方法。采用直接模拟蒙特卡罗方法结合信息保存法对 FMMR 的流动特性进行了数值模拟计算和性能计算,并对影响推力器性能的各种因素进行分析。计算和分析结果表明,当采用氩气和水作为推进剂工质,薄膜电阻温度为 600 K,工作滞止压强为 500 Pa 时, FMMR 推进单元的比冲分别为 47.900 s ($1\text{s} = 9.8\text{N} \cdot \text{s}/\text{kg}$) 和 68.163 s, 推力为 0.158 mN, 效率为 25.8%。通过优化设计、系统集成等可以进一步提高推力器的比冲、推力和效率。

关键词:微推进;自由分子流微电热推力器;数值模拟

中图分类号:V439

文献标识码:A

The numerical simulation of free molecular micro-resistojets

HAN Xian-wei^{1,2}, TANG Zhou-qiang¹, TAO Wen-quan², ZHANG Gui-tian¹, ZHANG En-zhao¹ 1. Shaanxi Power Machine Design and Research Institute, Xi'an 710100, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710059, China.

Abstract: Free molecular micro-resistojet (FMMR) is a novel type of electrothermal microthruster based on microelectromechanical systems (MEMS) technology. It possesses many advantages, such as high integration, small volume, light weight, fast response, high thrust mass ratio, high reliability, and being easy to integrate thruster array. FMMR has wide application prospect for on-orbit maneuvers on military and civil micro/nanospacecrafts. Various mathematical models are built which include the model of propellant gas molecular interaction with solid surface Cercignani-Lampis-Lord model, variable hard sphere model, and randomly sampled frequency methods. In this study numerical simulation is performed and the characteristics of a typical FMMR thruster pre-

dicted by using direct simulation Monte Carlo method incorporating with information preservation method. Using argon as propellant, when the FMMR propulsion unit operating temperature is 600 K, and the plenum stagnation pressure is 500 Pa, the calculation and analytical result shows that $I_{sp} = 47.900\text{s}$ ($1\text{s} = 9.8\text{N} \cdot \text{s}/\text{kg}$), $F = 0.158\text{mN}$ and $\eta = 25.8\%$. And under the same conditions, using water as propellant, $I_{sp} = 68.163\text{s}$, $F = 0.158\text{mN}$ and $\eta = 25.8\%$. The performance of FMMR can also be improved through design optimization and system integration.

Key words: micropropulsion; free molecular micro-resistojet; numerical simulation

1 引言

微推进系统具有集成化程度高、体积小、质量轻、响应速度快、推质比高、功率小、可靠性高和易于集成为推进阵列等特点。将微机电系统(MEMS)技术应用于微推进系统,可以降低成本、减少风险,并可满足微型航天器对性能、体积和质量等的特殊要求。微推进系统在军事和民用方面有广阔的应用前景,可广泛应用于微型航天器的姿态控制、精确定位、位置保持、阻力补偿、轨道提升、重新定位,卫星星座系统的编队飞行等,以及作为微型飞行器、微型发电机、微型马达和微型机器人等的动力装置^[1]。

现代微/纳卫星具有诸多优点,在国外其研究和应用越来越广泛^[2],同时对微推进系统的要求也越来越高。MEMS 微推进系统的提出是与微型航天器密切相关的,微型航天器的技术核心就是 MEMS。1991 年 Mitterauer 提出了基于场效应发射等离子体推力器的 MEMS 微推进设想,1994 年宇航公司的 Janson 扩展了基于电阻加热推力器和离子发动机的微推进概念。目前已有多个大学、研究所和航天专业实验室,以及多家私人企业开展了基于 MEMS 的微推进技术研究,如微电热推力器、数字固体及液体推力器、微型双组元推力器、微型脉冲等离子推力器、微型胶体推力器、微型离子推力器等。

收稿日期:2004-04-02。

作者简介:韩先伟(1969—),男,博士后,从事航天推进研究。

自由分子流微电热推力器(FMMR)是一种微型电热推力器,其工作原理是采用薄膜电阻加热器,通过推进剂分子与薄膜加热器和固体表面的碰撞,将能量传递给推进剂分子,再经过喷管喷出,产生推力。它的工作压强为 50~500 Pa,推力器尺寸很小(通道宽度 1~100 μm),推力器内以分子状态流动。FMMR 采用 MEMS 技术进行加工,通过光刻加工、封装和集成技术形成微推力器结构。目前,宇航公司、美国空军实验室、南加利福尼亚大学和喷气推进实验室都在致力于 FMMR 的研制^[3,4]。微推进系统并不是将现有的微推进系统微型化,其内部流动涉及多相稀薄气体流,其流动控制方程为 Boltzmann 方程。为了对微推进的性能进行精确的预估,就需要对微通道内部的流动进行求解。但为求解这一积分-微分方程以获得速度分布函数,采用传统的有限元和有限差分方法非常困难,因为独立变量的数目同时包含物理空间和速度空间内的变量。避免这些困难的方法是采用直接模拟方法,它利用气体的分子结构并能处理较宽克努森数。其中的直接模拟蒙特卡罗(DSMC)方法是通过计算分子碰撞求解 Boltzmann 方程的数值模拟技术,它可以模拟分子尺寸下的稀薄气体流动。参考文献[4]~[6]等采用不同的方法对 FMMR 的内部流动和性能进行了探索研究,通过实践证明 DSMC 对于微通道内的流动问题非常有效且适用,此方法已经广泛应用于微通道的流动和传热。

2 理论分析

在自由分子状态下,流经喷管缝隙的数密度 N_i 见式(1):

$$N_i = \frac{n_0 c}{4} A_s \quad (1)$$

式中 c 为热适应系数,它表示反射分子在多大程度上适应了 FMMR 壁面的温度,它与壁面温度有关,当薄膜电阻壁面温度在 300~700 K 之间时, $c = 0.90 \sim 0.54$; n_0 为分子数密度; A_s 为喷管缝隙面积。

$$n = \frac{p}{kT} \quad (2)$$

分子的平均热运动速率 c 见式(3):

$$c = \sqrt{\frac{8kT_0}{m}} \quad (3)$$

由推进剂工质的分子量 m ,可以得到流经喷管缝隙的质量流量 \dot{m} :

$$\dot{m} = m N_i = m \frac{n_0 c}{4} A_s = m A_s \frac{n_0}{4} \sqrt{\frac{8kT_0}{m}} \quad (4)$$

推力器产生的推力 F 通过推进剂工质的动量确定:

$$F = A_s \frac{n_0}{4} \left(\frac{8kT_0}{m} \right)^{1/2} \left(\frac{kT_0}{2} \right)^{1/2} = \frac{n_0 k T_0}{2} A_s \quad (5)$$

根据推力器的工作滞止温度 T_0 ,其比冲 I_{sp} 为

$$I_{sp} = \sqrt{\frac{kT_0}{2m}} / g \quad (6)$$

3 数值模拟计算

FMMR 的数值模拟计算采用 DSMC 方法,当采用氩气为推进剂工质时,要求网格尺寸 h 为工质分子平均自由程的 25%,即 $h = \frac{1}{\sqrt{2} n d^2} = 20.3 \mu\text{m}$,网格的宽度和长度 $h = 5 \mu\text{m}$,流动进入自由分子流区域,模拟计算对计算机的内存和速度要求过高。同时,中低速流动中遇到的最难克服的问题是 DSMC 得出结果的巨大统计散布。为此采用信息保存(IP)方法^[7],它基于 DSMC 方法,假设模拟分子包含两种速度信息,即第一种为分子速度,用于计算分子的运动、碰撞和表面反射,并遵循 DSMC 方法;第二种为模拟分子所代表极大数目真实分子的集团速度,它对分子运动不产生影响,仅用于求和得到宏观速度。其原始信息来源于工质来流和物体表面,而当分子从表面反射、相互碰撞、受到力作用,以及从边界进入时,IP 所读获得新值。通过建立合理的数学模型(气体分子与固体壁面相互作用模型、分子碰撞模型和碰撞对选择等)和设置合理的输入参数,可以准确地预估 FMMR 的性能。

DSMC-IP 为随机取样方法,它可以计算任意流场截面(典型的喉部截面和缝隙出口截面)的分子质量、动量和能量,这些参数可以在所有截面取样。通过这些数据,可以计算不同结构单元的推力和损失分布,如缝隙壁面、入口和出口等。

DSMC 方法的准确度取决于两个因素:DSMC 方法约束的满足程度和合理的模型与假设。对于 FMMR,流场采用 120 \times 300 的网格单元,单元的尺寸要远小于 25% 的当地平均自由程,名义时间步长约为分子碰撞频率的一半。前者很容易满足,因此模拟计算的关键是建立合理的数学模型。

3.1 FMMR 计算模型

根据 FMMR 的结构特点,它为二维平面对称结构,由多个结构相同的推进单元组成。为进行方案论证,仅对单个推进单元进行模拟计算。FMMR 喷管型面为扩张型面,计算模型采用二维模型,通过计算单个

推进单元,可以获得 FMMR 的各项参数。FMMR 推力的结构图像见图 1。FMMR 推进单元的结构简图和计算区域见图 2。

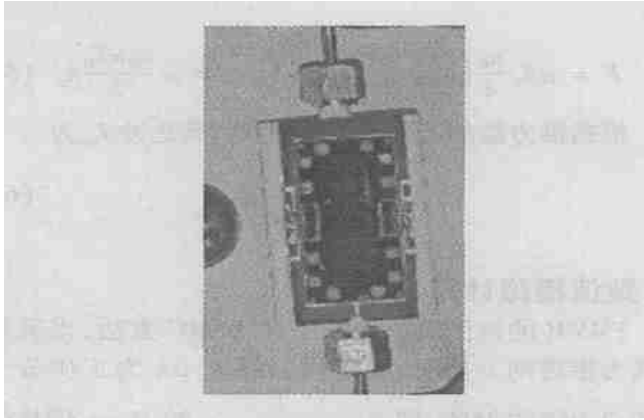


图 1 FMMR 推力器结构图像

Fig. 1 Photo of integrated FMMR

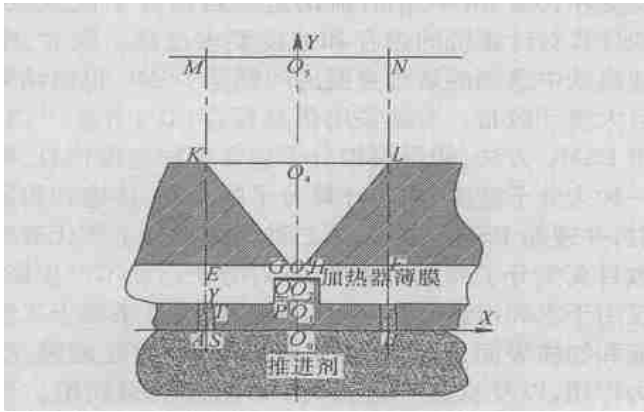


图 2 FMMR 的结构简图和 DSMC 计算区域

Fig. 2 Sketch of FMMR and DSMC computational domain

3.2 FMMR 分子与壁面相互作用模型

分子与固体表面相互作用采用 CLL (Cercignani-Lampis-Lord) 反射模型,它是由 Cercignani 和 Lampis 引入的一种唯象论模型, Lord 将其发展并在 DSMC 计算中实现。该模型满足分子在表面反射应该遵循的互易性定理,能借助引入有直观物理意义的参数而产生出多种物理上合理实用的反射分子分布,容易在 DSMC 方法中实现,并包括不完全能量适应的完全反射模型和分子间断能量反射模型。

分子碰撞模型采用变径硬球模型,它具有计算碰撞后的速度方向散射分布简单,分子的散射方式对流动的影响小的特点。将碰撞截面取为成正比于分子间相对速度的一定的逆幂次,可以使导出的粘性系数随温度的一定的幂次变化,即可以表现真实气体的规律。

分子碰撞对的选取采用取舍方法,当最大碰撞概率接近 1 时,该方法十分有效。选取一个随机数 $Rand(0 \sim 1)$,当碰撞几率大于 $Rand$ 时,表明发生碰撞,否则不发生碰撞。根据分子截面的模型不同,分子

碰撞后的散射不同。

3.3 初始条件

采用 DSMC 模拟计算主要研究 FMMR 流场参数分布,以及影响推力器性能的各种因素,并对其性能进行预估,初始参数包括:加热器元件表面积 A_h ;薄膜电阻加热器温度 T_{hw} , K;喷管缝隙扩张半角;推进剂种类(氙气或水);滞止压强 p_0 ;缝隙宽度 w , μm ;缝隙长度 l , mm;推进剂入口温度 $T_i = 300\text{ K}$;环境温度 $T_a = 300\text{ K}$;热适应系数为。

4 数值模拟计算结果与分析

模拟计算需要 2 000 个非稳态时间步长,在流场取样过程中,需要 10^4 个额外的稳态时间步长。根据气体的平均热运动速率和缝隙宽度,非稳态部分的求解大约需要 2 000 次,在稳态条件下,计算区域内包括 10^5 个粒子。网格单元的样本数为 2×10^5 量级,流通截面的样本数为 10^6 ,由于取样的样本数很大,计算所得的比冲统计分散度小于 1%。同时,对计算机的性能要求也很高,采用 P4 2.4 GHz, 5.0 G 内存计算机, CPU 的计算时间需要 100h 以上。

4.1 推进单元流场分子数密度分布

FMMR 推进单元流场分子数密度分布和等值线分布分别见图 3 和图 4。FMMR 整个流动区域均为过渡流或自由分子流,推进剂工质分子与薄膜电阻碰撞加热,从喷管喉部喷出,在喷管喉部截面,分子数密度最大 ($0.603\ 58 \times 10^{23}$ 个/ m^3);经过喷管膨胀后,分子数密度呈对称分布,随着膨胀的加大,分子数密度越来越小。

4.2 推进单元流场速度分布

FMMR 推进单元流场 Y 方向速度分布和等值线分布分别见图 5 和图 6。在喷管喉部以前速度呈均匀分布,经过薄膜电阻加热后,工质分子与薄膜电阻表面和硅基材料固体壁面相互碰撞交换能量,分子平均动能增加,热运动速度加大。在经扩张喷管加速, Y 方向速度继续增加,在喷管出口处达到最大。当喉部尺寸为 $100\mu\text{m}$,薄膜电阻加热温度为 600 K ,喷管扩张半角为 45° 时, Y 方向速度为 441.345 m/s 。

4.3 推进单元流场温度分布

FMMR 的工作原理是薄膜电阻加热推进剂工质,通过推进剂工质分子与薄膜电阻表面的碰撞交换能量。随着薄膜电阻温度的升高,由于热传导、对流和辐射作用,硅基材料的温度也有一定升高。同时推进剂工质分子与薄膜电阻和固体壁面的碰撞频率增大,推进剂工质分子的温度也相应增加。在薄膜电阻表面处温度最高 (600 K),环境温度为 300 K 。

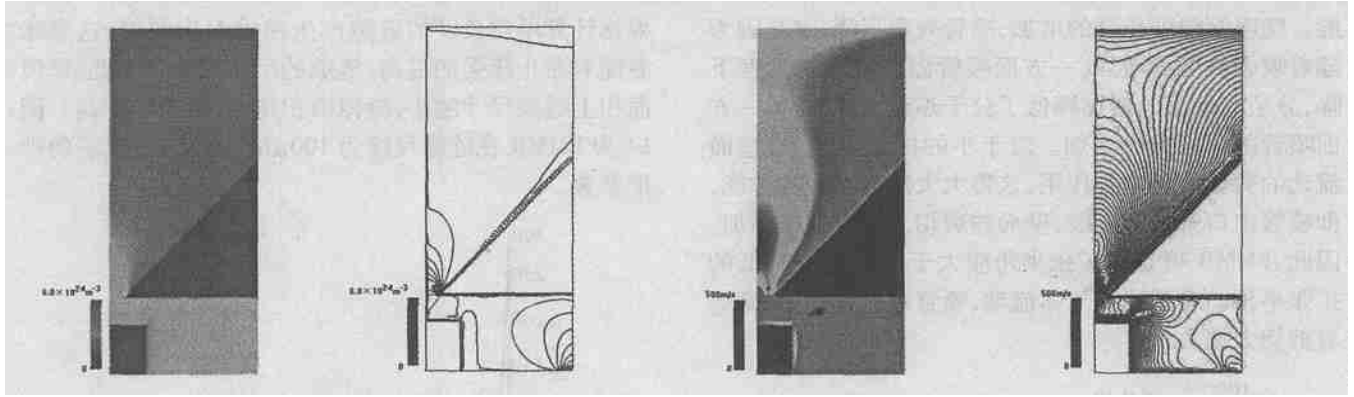


图 3 分子数密度分布

Fig. 3 Distribution of molecular number density

图 4 分子数密度等值线

Fig. 4 Isoline of molecular number density

图 5 Y 方向速度分布

Fig. 5 Distribution of Y axial direction velocity

图 6 Y 方向速度等值线

Fig. 6 Isoline of Y axial direction velocity

FMMR 推进单元流场温度分布和等值线分布分别见图 7 和图 8。

4.4 推进单元流场压强分布

FMMR 推进剂集液腔的滞止压强为 500Pa,在喷管喉部以前,压强呈均匀分布,由于固体壁面附面层和

温度的影响,壁面处的压强略高于流动中心区的压强。经过薄膜电阻加热后,分子的热运动速度增加,压强逐渐降低。再经喷管膨胀加速,压强呈对称分布,并逐渐减小,环境压强为真空状态。FMMR 推进单元流场压强分布和等值线分布分别见图 9 和图 10。

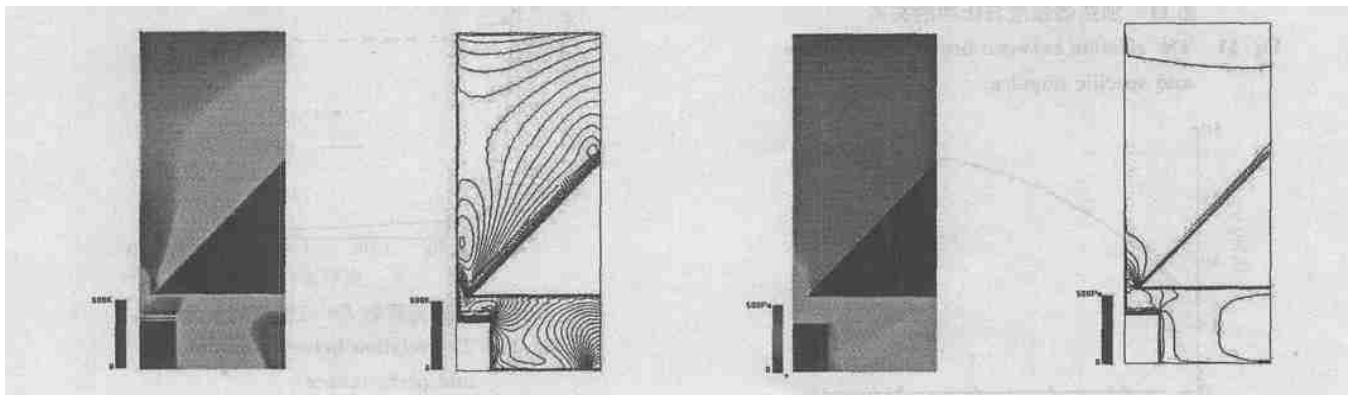


图 7 温度分布

Fig. 7 Distribution of flowfield temperature

图 8 温度等值线

Fig. 8 Isoline of flowfield temperature

图 9 压强分布

Fig. 9 Distribution of flow field pressure

图 10 压强等值线

Fig. 10 Isoline of flowfield pressure

4.5 加热器温度与比冲的关系

由于氩气为单原子分子,计算简单,因此采用 Ar 作为计算的推进剂工质,但 Ar 本身不是最佳的推进剂。当 Ar 为推进剂时,薄膜电阻加热器表面温度与比冲的关系见图 11。随着温度的增加,比冲增加比较缓慢。而理论分析见式(6), I_{sp} 与 $\sqrt{T_0}$ 成正比,引起比冲上升缓慢的原因可能是由于 FMMR 喷管固体壁面温度相对较低($< 600\text{ K}$),随着分子热运动速率的增加,推进剂工质分子与喷管固体壁面的碰撞频率增加,降低了比冲。

计算结果表明,在相同温度下,通过 DSMC 方法获得的比冲高于理论分析(式(6))获得的比冲值,这是由于理论分析式(6)是按自由分子流状态下喷孔获得的,没有考虑 FMMR 喷管扩张段型面的影响。DSMC

以 FMMR 实际结构为基础,对于 FMMR 加热后的推进剂工质分子在喷管固体扩张壁面的作用下速度进一步提高,使得比冲增加。

4.6 喷管扩张角与比冲的关系

对于 FMMR 来说,随着薄膜电阻加热器温度的增加,较高温度的推进剂分子与较低温度的喷管固体扩张段壁面的碰撞频率增加,引起分子能量损失增加,导致 FMMR 比冲下降。喷管扩张半角与比冲的关系见图 12。

当扩张半角大于 30° 时,喷管扩张段壁面将膨胀流的切向动量转换为轴向动量,这将提高 FMMR 的性能。随喷管缝隙长度的增加,喷管效率下降,这是因为随着喷管长度的增加,一方面喷管固体壁面的温度下降,分子与壁面的碰撞降低了分子热运动速率;另一

方面喷管的摩擦损失增加。对于小的扩张角(0°),壁面流动的剪切力起主导作用,这将大大降低喷管的性能,即喷管出口壁面为直线,壁面的剪切力损失大幅增加。因此,FMMR 喷管的扩张半角应大于 30° ,这是最低的扩张半角。对于稀薄气体流动,喷管的扩张角小,意味着剪切力损失大。

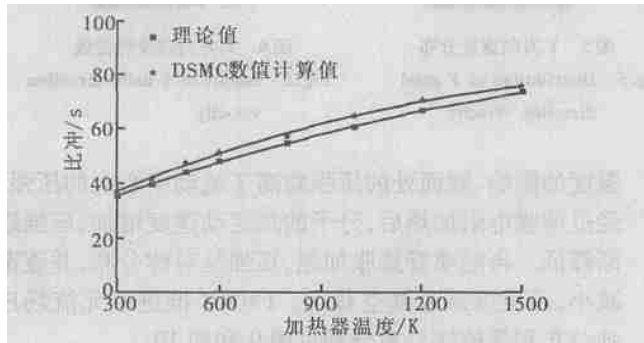


图 11 加热器温度与比冲的关系

Fig. 11 The relation between heater temperature and specific impulse

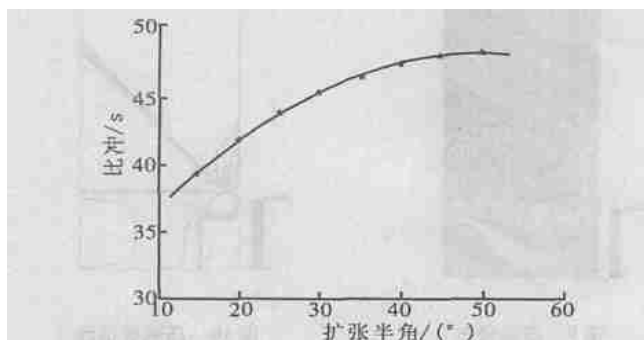


图 12 扩张半角与比冲的关系

Fig. 12 The relation between half divergence angle and specific impulse

4.7 推进剂种类与比冲的关系

由式(6)可知,FMMR 的比冲与推进剂分子量的 $\sqrt{1/m}$ 成正比,推进剂种类与比冲的关系见图 13。推进剂分子量越小,其膨胀做功能力越强,所以相对应的比冲就越高。对于多原子气体,假定推进剂的内能为零,气体与壁面的相互作用对性能的影响较大。考虑到推进剂贮箱的尺寸和质量,以及 FMMR 的工作压强低等因素,采用液体 H_2O 为推进剂工质,其比冲为 $68.163s$ 。

4.8 FMMR 尺度与比冲的关系

如果提高 FMMR 的滞止压强,就可以增加推力。根据计算单位长度的缝隙产生的推力为定值,这意味着随着滞止压强的提高,缝隙的尺寸减小。因此,单位面积上缝隙尺寸越小,缝隙面积越大,推力也越高。图

14 为 FMMR 在缝隙尺度为 $100\mu m$ 时额定工况下的性能参数。

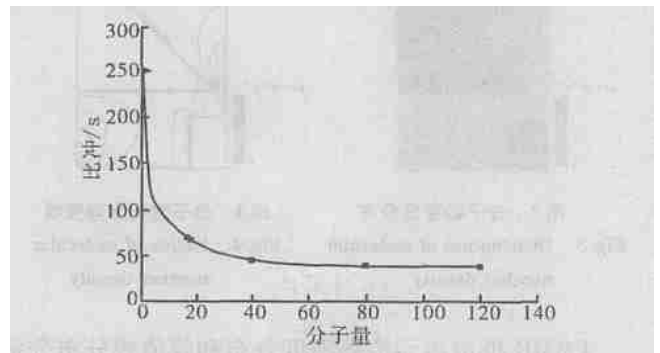


图 13 推进剂种类与比冲的关系

Fig. 13 The relation between propellant category and specific impulse

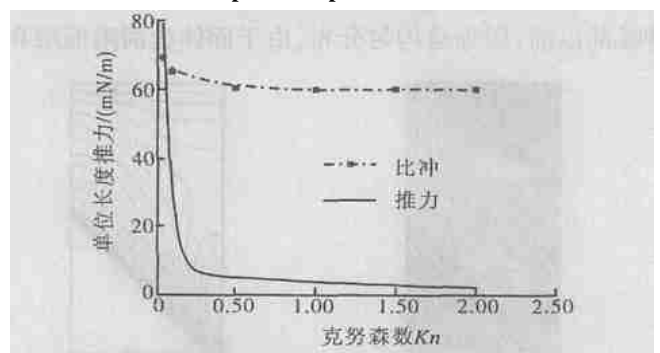


图 14 克努森数 Kn 与性能的关系

Fig. 14 The relation between Kn number and performance

由图 14 中可以看出,随着推力的下降,比冲变化不大,这一点对小推力工作十分重要。当航天器进行增量机动和临界定点时,需要很小的推力,此时可以通过降低工作压强的方法减小推力,而比冲变化不大。并且通过简单的阀门响应控制,可以获得任意小脉冲冲量。由于推力调节方便,表明 FMMR 可以完成航天器的多种机动任务。

4.9 FMMR 性能估算

通过计算,当采用氩气为推进剂工质,薄膜电阻温度为 $600K$,工作滞止压强为 $500Pa$ 时,FMMR 推进单元的比冲为 $47.900s$,推力为 $0.158mN$,效率为 25.8% ;当采用 H_2O 作为推进剂工质,薄膜电阻温度为 $600K$,工作滞止压强为 $500Pa$ 时,FMMR 推进单元的比冲为 $68.163s$,推力为 $0.158mN$,效率为 25.8% 。

输入功率除了加热推进剂分子外,其它以热损失形式消耗,即热传导、热辐射。将淀积薄膜加热器的硅基材料通过绝热性能好的陶瓷与 FMMR 的基座相连,可以将通过基座热传导损失减至最小,这正是 MEMS 技术的特点。采用绝热陶瓷作为 MEMS 的加工材料,采用作为绝热材料聚四氟乙烯隔热基座,可以

降低热损失。如果进一步提高薄膜电阻的温度,可以提高 FMMR 的比冲;如果提高工作滞止压强,可以提高 FMMR 的推力;当 FMMR 在真空环境条件下工作时,由热传导和对流引起的能量损失将进一步减小,FMMR 的效率将得到提高。

由于 FMMR 的特点是便于集成,可以通过将多个推进单元集成为 FMMR 推力器。目前,研究将 30 个推进单元进行集成,这样当采用 H_2O 作为推进剂工质,薄膜电阻温度为 600 K,工作滞止压强为 500 Pa 时,FMMR 推进单元的比冲为 68.163 s,推力为 4.725 mN。

5 结束语

由于微推进具有许多优点,它在微型航天器与其它微系统领域有着广阔的应用前景。与其它微推进相比,FMMR 具有结构简单、质量轻;缝隙式微喷管出口,不容易被堵塞;绿色液体可贮存推进剂,系统结构简单、无泄漏;推质比高、效率较高、成本低、便于集成等优点。通过数值模拟计算表明,当采用 H_2O 作为推进剂工质,薄膜电阻温度为 600 K,工作滞止压强为 500 Pa 时,FMMR 推进单元的比冲为 68.163 s,推力为 4.725 mN。如果进一步优化设计,如提高薄膜电阻温度、减小结构尺寸、降低热损失等,其性能还可以提高。

目前,试验系统建设和试验研究正在进行,通过对基于 MEMS 微型阀和集成控制电路的研究,完成

FMMR 系统集成,其结构将更加紧凑,性能将更加优良,它将是微/纳卫星的首选微推进系统。

参考文献

- [1] Micci Michael M, Ketsdever Andrew D. Micropropulsion for small spacecraft [M]. Progress in Astronautics and Aeronautics, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Vol. 187.
- [2] 林来兴. 现代小卫星与纳卫星技术发展 [J]. 国际太空, 2002, (8).
- [3] Green Amanda A. Demonstration and quantitative characterization of a MEMS fabricated propulsion system for the next generation of microspacecraft [R]. AIAA 2001-0009.
- [4] Hammel Jeffrey Robert. Development of an unstructured 3-D direct simulation monte carlo/particle-in-cell code and the simulation of microthruster flows [R]. Degree of Master in Worcester polytechnic institute, 2002, 8.
- [5] Wong J, Ketsdever A, Reed H. Numerical modeling of the free molecule microresistojet prototype and next generation designs evaluation [R]. AIAA 2003-3581.
- [6] Reni Raju, Subrata Roy. Modeling single component fluid transport through micro channels and free molecule microresistojet [R]. AIAA-2004-1342.
- [7] 沈青. 稀薄气体动力学 [M]. 国防工业出版社, 2003, 1.

(编辑:薛永利)