

一种用于纳米颗粒场致发射推力器的自中和技术^{*}

于 博^{1,2,3}, 黄 浩^{2,3}, 焦 蛟¹, 康小录^{2,3}, 赵 青¹

(1. 电子科技大学 资源与环境学院 信息地学研究中心, 四川 成都 611731;

2. 上海空间推进研究所, 上海 201112;

3. 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

摘 要: 纳米颗粒场致发射推力器(NFET)是一种用于微小卫星的固体工质静电推力器,为促进NFET的工程研制,提出一种新的自中和技术——反向充电中和策略。为研究这种自中和技术的设计方法,建立相应的数值模型以模拟该中和技术下羽流输运过程,并且,在真空舱中开展NFET的羽流测量试验来验证中和模型的正确性。以比色温度计和“打靶法”装置来分别测量羽流温度分布和推力,通过试验与仿真结果的对比,羽流温度变化的试验结果与仿真结果在定性规律上一致,推力的计算误差在9%~10%。在验证模型正确性的基础上,利用该数值模型对关键设计参数进行数值分析。结果表明:引出极与发射极的内径比变化会导致外加电场对剩余电荷颗粒作负功,引起推力下降,该物理参数在0.94附近时,推力达到极大值;而随着颗粒直径的增加,羽流中和区域整体向下游推移,推力升高。本文结论可为NFET的反向充电中和策略提供设计参考。

关键词: 纳米颗粒; 反向充电策略; 自中和; 数值分析

中图分类号: V439+.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2019) 10-2383-11

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 180736

New Self-Neutralization Technology for Nano-Particle Field Extraction Thruster

YU Bo^{1,2,3}, HUANG Hao^{2,3}, JIAO Jiao¹, KANG Xiao-lu^{2,3}, ZHAO Qing¹

(1. Center for Information Geoscience, College of Resource and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;

3. Research Center of the Space Engine Engineering and Technology in Shanghai, Shanghai 201112, China)

Abstract: Nano-particle field extraction thruster is a sort of electrostatic propulsion device with the solid working medium applied on the cube-satellite platform. A new self-neutralization technique has been established to improve the engineering development of NFET, namely the reverse charging strategy for self-neutralization. In order to study the design approach of this neutralization strategy, a relevant numerical model has been investigated to describe the characteristics of the plume transportation. Subsequently, a measurement test of NFET plume in the vacuum tank was conducted to examine the accuracy of the numerical model. The temperature distribution and thrust were measured respectively by the colorimetric thermometer and the target-shooting system. According to the test and calculation results, the temperature solved by the calculation was qualitatively consistent with the test results, and the computational error of the thrust ranged within 9%~10%. After the accuracy of the neutraliza-

^{*} 收稿日期: 2018-11-22; 修订日期: 2019-01-02。

通讯作者: 于 博, 博士生, 工程师, 研究领域为电推进数值计算。E-mail: 441695759@qq.com

引用格式: 于 博, 黄 浩, 焦 蛟, 等. 一种用于纳米颗粒场致发射推力器的自中和技术[J]. 推进技术, 2019, 40(10): 2383-2393. (YU Bo, HUANG Hao, JIAO Jiao, et al. New Self-Neutralization Technique for Nano-Particle Field Extraction Thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(10):2383-2393.)

tion model being examined by the test, the key parameters of design were analyzed numerically. The calculation results indicated that, with the ratio of extractor diameter to emitter diameter changing, the applied electric field would exert a negative work on the excess charges and the thrust would decrease, and the thrust would reach the maximum with the ratio of extractor diameter to emitter diameter around at 0.94 while the plume neutralization region would be pushed to downstream and the thrust would increase with the particle diameter increasing. This paper could provide a reference of the optimizing design for the NFET with the reverse charging self-neutralization technique.

Key words: Nano particles; Reverse charging strategy; Self-neutralization; Numerical analysis

1 引 言

纳米颗粒场致发射推力器(Nano-particle Field Extraction Thruster, 全文简称 NFET)是一种在强电场诱导下,固体颗粒从发射电极表面发射到真空、并在真空中加速产生推力的静电推进技术。NFET的工作原理如下,在发射电极和引出电极之间通常添加 $10^3\text{V}\sim 10^5\text{V}$ 的电压,当纳米颗粒处于强电场中时,会被颗粒所在电极表面充电,当充电达到一定程度时,颗粒会离开发射电极表面向引出电极运动,若引出电极具有孔结构,可令带电纳米颗粒以高速喷出,从而形成大量纳米颗粒的定向运动,产生稳恒推力。通常,NFET的推力范围在 $1\mu\text{N}\sim 100\text{mN}$ 量级,比冲在 $100\text{s}\sim 10000\text{s}$ 量级,与其它推进技术^[1-2]不同的是,NFET可以随时通过改变诱导电压来调节推力,并且比冲较高,是一种推进性能较优越的微推进技术。而近几年来,我国在微小卫星(例如军用的小卫星星座以及民用的小型通讯卫星等)方面急需相匹配的推进技术,因此,对于NFET的工程研制应加快脚步,以应对未来小卫星对微推力器的巨大需求。

NFET的推进概念起源于浸在液体介质中的微小颗粒在静电场作用下的电水动力学行为^[3-5]:电极间的液体介质可以帮助微小颗粒在电极表面更均匀、快速地完成充电,并令颗粒在正负电极间往返运动、传递电荷,形成一种以液体为媒介的特殊放电机制。Louis M等^[6]将上述放电机制与微电子机械技术(MEMS)结合,在2006年首次提出NFET的推进概念。起初,推进工质采用纳米量级的圆柱形颗粒,工质浸于绝缘液滴中,在多级加速电极的电场诱导下,纳米颗粒进行发射和运输,通过试验,发现NFET的发射机制与传统胶体静电推进不同,没有泰勒锥和带电液滴的形成^[7-9],以此将NFET与传统胶体静电推进技术区分开来,形成一种新型的固体颗粒静电推进分支。2007年,Louis M等^[10-11]又建立了从液滴中发射纳米颗粒的引出电压阈值模型,通过试验和

仿真,分析NFET由圆柱形和球形颗粒在发射过程中的液体介质不稳定扰动特性,发现小尺寸颗粒主要受液体表面张力的制约,而大尺寸颗粒主要受重力制约,并且指出圆柱形纳米颗粒更容易引发不稳定扰动特性。因而,在发现液体介质会产生不稳定扰动的问题后,Louis M的团队又提出一种无液体介质的干颗粒发射概念^[12]:在发射电极的多孔储藏通道内放置大量的球形纳米颗粒,在多层引出电极的作用下,这些干纳米颗粒将发射、加速离开引出电极,但这种推进技术会存在新的制约因素:颗粒与电极表面之间的附着作用以及颗粒之间的粘合作用。为此,研究人员建立了相应的数值模型以及开展了模型的验证试验,以分析如何克服这些制约因素。2009年,Louis M等^[13-14]又对影响干纳米颗粒充电时间的因素进行了理论与试验分析,发现颗粒与电极表面的接触电阻以及颗粒表面的氧化层会影响充电时间,但在某些条件下,充电时间的测量值与理论预估值比较吻合。

至2011年,为进一步实现NFET的工程化研制,David L等^[15]利用数值方法研究了两种自中和策略:(1)时间异步策略;(2)空间异步策略。时间异步策略是指:发射极和引出极的电压差会随着固定时间而发生符号上的转置,从而实现推力器交替发射等数量的正电荷和负电荷。空间异步策略是指:在偶数个推力器中,一半为正电荷发射器、一半为负电荷发射器,并且在空间布置上要保证循环对称布局,同样可实现等数量的正电荷和负电荷的发射。然而,时间异步策略会出现转置调节时带电颗粒不能始终进行电场加速的问题,这意味着颗粒的动能会由于电场力作负功而降低,从而降低推力;空间异步策略会出现由个体推力器的性能微小差别所导致的整体中和流场分布不均匀、推力方向存在偏角的问题。

综上所述,为促进NFET的工程研制进度,本文针对NFET的自中和机制提出一种新的策略:反向充电中和策略。为研究这种策略相关的结构尺寸设计

方法,建立相应的颗粒中和模型,进一步地,为验证数值模型精度,开展NFET试验件的中和试验,以相关物理参数的测量值与计算结果对比,分析模型的计算精度。在此基础上,利用数值模型分析反向充电中和策略的羽流特性以及相关结构的优化设计方向。

2 数值模型

本节将逐一介绍反向充电中和策略的基本原理、数值模型及模型的试验验证。

2.1 反向充电中和策略的基本原理

图1所示为反向充电中和策略的原理示意图。推力器为单通道NFET,而此中和策略对于多通道NFET依然适用。纳米颗粒(本文的仿真及试验中均采用Al颗粒)贮藏于发射电极(负电极)通道内,在与引出电极(正电极)的诱导电势差作用下,纳米颗粒会迅速充电至负电饱和(一般在10ns~1000ns的量级^[14]),脱离发射极表面束缚而向外发射。当颗粒运动至引出极位置附近,会有部分负电颗粒撞击在引出极表面而进行反向充电至正电饱和。为避免有负电颗粒在引出极下表面发生碰撞,在发射极和引出极之间填充绝缘材料,以保证电极间不会出现上下振荡的纳米颗粒。因此,离开引出极通道的纳米颗粒会同时出现正电荷和负电荷颗粒。最后,这些互为异号的带电颗粒会在空间环境中完成自中和。

这里,本文给出影响该中和机制性能的3个主要因素:(1)引出极与发射极内径比;(2)两电极间的诱

导电压;(3)纳米颗粒直径。后文将主要围绕这3个因素展开阐述。

2.2 中和模型

反向充电策略的数值模型主要涉及三个物理过程:(1)纳米颗粒的输运过程;(2)纳米颗粒撞击电极壁面的反向充电过程;(3)正负纳米颗粒在空间的中和过程。

对于过程(1):在NFET的工作环境中,纳米颗粒的数密度极低($10^6\text{m}^{-3}\sim 10^8\text{m}^{-3}$ 量级),因此,采用单元粒子法(PIC)较为合理,颗粒间的弹性碰撞采用蒙特卡洛方法(DSMC),算法细节可以参考文献[16-17],这里不再赘述。

对于过程(2):文献[14]曾开展两平行电极板间的纳米颗粒振荡放电试验,试验结果表明:纳米颗粒在接触任何电极表面时,都会在瞬间完成充电至饱和(充电所需时间尺度远小于颗粒与电极表面的接触时间尺度),并且正电饱和和负电饱和的电荷量一致。本文假设纳米颗粒与发射电极表面碰撞为镜面反射,带电量瞬间转为正值。

对于过程(3),纳米颗粒的空间中和过程是自中和过程的最主要部分,该过程是带电颗粒转为中性颗粒的过程,本文需要进行详细介绍。

本文所涉及的带电纳米颗粒的中和问题,与等离子体的正负粒子中和问题不同,由于纳米颗粒本身质量较高、荷质比和数密度较低,具有很强的个体运动惯性,受其它带电颗粒的电场影响较低(在距离不是很近时),与等离子体的集体迁移运动有本质差别,因此,采取单独判断任意两异号带电颗粒中和过程的方法将更加适用。然而,这种两粒子独立判断的过程会遇到输运时间尺度与碰撞瞬间时间尺度的不匹配问题,产生跳跃误差。

2.2.1 跳跃误差

一般地,带电异号两粒子以各自的速度运动时,若最终会中和,在中和前两粒子将一直受相互电场和外加电场的影响。因而,只要两粒子无法克服它们之间的电势能,那么在整体趋势上应是不断接近的,直到最后相撞。但是,如果PIC计算过程中时间步长过大,会出现原本发生中和的粒子相互交错开来,并永远不会再中和(除非有外力因素干扰),这种由于时间步长过大而导致电势能发生跳跃变化的误差本文定义为跳跃误差(Jump error),其误差形式的举例如图2所示,当取时间步长为0.1ns时,可以发现两颗粒能够进行中和(图2(a)),这也是符合客观规律的结果,但如果时间步长增大至2ns(或者更高)

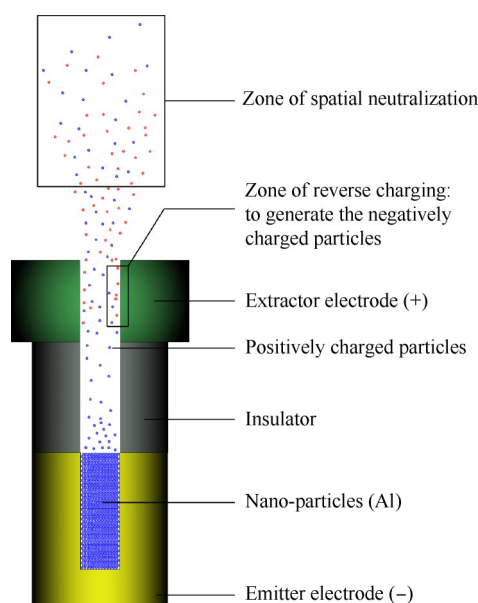


Fig. 1 Operation principle of the neutralization on wall for NFET

时,就会出现两颗粒在一系列交错牵引后,跳跃到两者能够“摆脱电势能的运动状态”而不会发生中和的结果(图 2(b))。

对于本文计算工况,如果要 PIC 计算克服这种误差,只需要将时间步长减小至 0.01ns 左右,就可以保证 99.9% 以上的中和碰撞都不会出现跳跃误差。然而只为解决跳跃误差而将时间步长减小至 0.01ns 是一种得不偿失的做法。那么,从现有计算机性能来看,以减少 PIC 算法的时间步长来规避跳跃误差几乎是不可能的。

2.2.2 中和碰撞判断

为此,需要引入一种可以在大时间步长下应用的中和判断模型。中和碰撞的基本判断思路为:在某个临界时刻,如果两电荷异号颗粒的运动状态无法逃逸它们此刻的电势束缚,则判断两颗粒中和。

这里对中和碰撞的临界时刻进行定义:当两个电荷异号的颗粒运动到非常接近的时刻,此刻两者的静电力已经明显高于其它带电颗粒和外加电场对它们的影响时,两颗粒进行中和碰撞临界时刻判断的距离 l_0 可以描述为

$$\frac{k_e q}{l_0^2} \geq 1.17 \times 10^6 \quad (1)$$

式中 k_e 为静电库伦常数, q 为纳米颗粒的带电量。那么,在每一个时间步长中,只要存在两颗粒达到式(1)的条件,则可以开始对两颗粒进行中和碰撞判断。

在进行两颗粒运动计算时,可选择任一颗粒(参考颗粒,下同)为静止参考系来描述另一个颗粒(目标颗粒,下同)的运动。这样,两颗粒能否中和就取决于目标颗粒能否逃逸参考颗粒的库伦电势。中和判断的逻辑思路如图 3 所示。

为求解目标颗粒速度方向与距离方向为 90° 的点,需要求解两颗粒在库伦静电作用下的运动状态。为此,引入势函数描述球形物体间的静电作用,势函数对空间坐标的偏导数正比于颗粒所受总库仑力的相应分力,于是若以纳米颗粒为质量均匀的质点,有 $\phi = -\frac{k_e q}{r}$, 单位质量体元受的作用力为 $\frac{\mathbf{F}}{m} = -\nabla\phi$ 。根据牛顿第二定律,目标颗粒的运动方程为

$$\frac{d\mathbf{v}_2}{dt} = -\nabla\phi \quad (2)$$

在两颗粒运动平面使用极坐标,以参考颗粒中

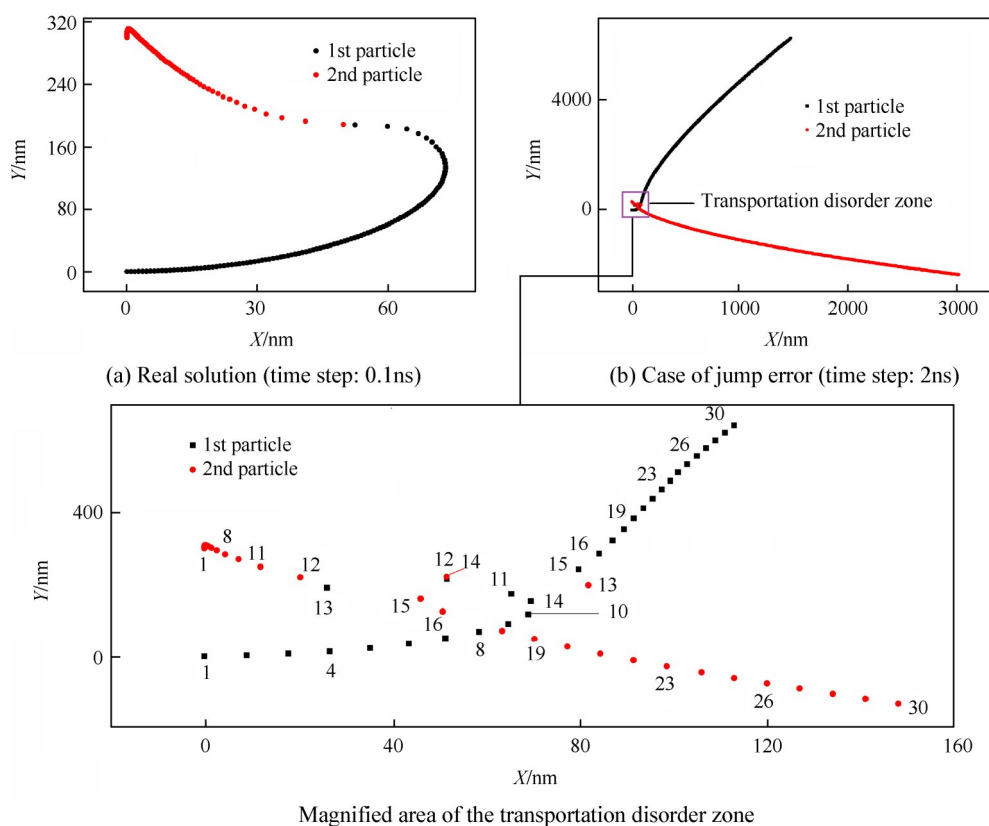


Fig. 2 Example of the jump error

(Input conditions: particle mass (both): 1×10^{-15} kg; particle charge (both): 2.4×10^{-14} C; initial position (1st particle): (0m, 0m); initial position (2nd position): (0m, 3×10^{-7} m); initial velocity (1st particle): (4.5m/s, 0m/s); initial velocity (2nd particle): (0m/s, 3.6m/s))

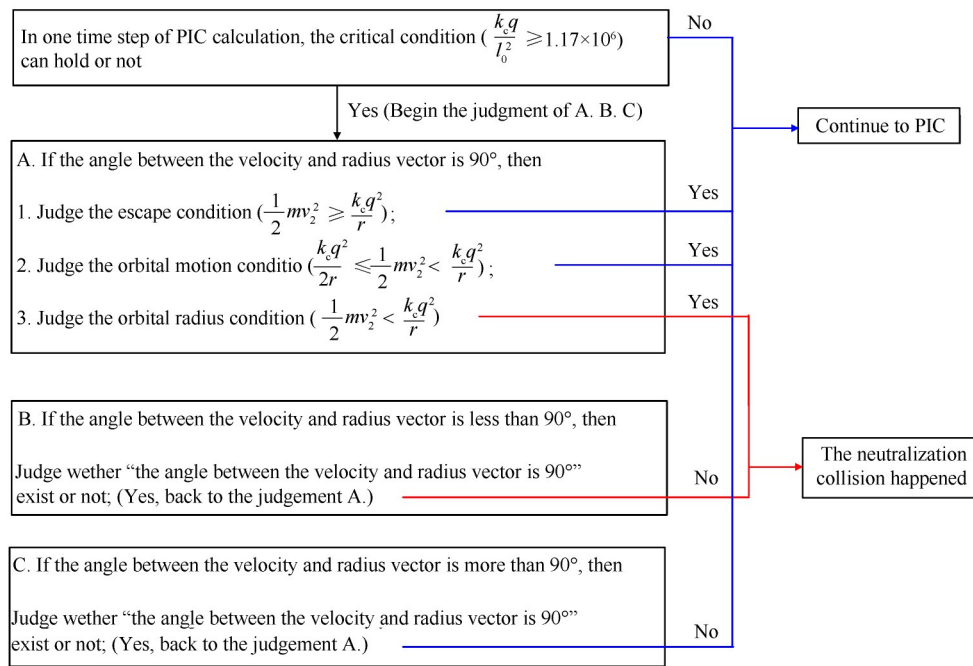


Fig. 3 Flow chart of the judgment logic of two-particle neutralization collision

心为原点。 r 为矢径长度, θ 为矢径角度,则式(2)可以描述为径向和周向的两个方程

$$m(a_r - r\omega^2) = -\frac{k_e q^2}{r^2} \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d(r^2 \omega)}{dt} = 0 \quad (4)$$

式中 a_r 为径向加速度, ω 为角速度。实际上,式(4)是角动量守恒方程。若令 $h = r^2 \omega$,则式(3)和式(4)可以求解为式(5)的形式,

$$r = \frac{mh}{k_e q^2} / (1 + \frac{Amh}{k_e q^2} \cos(\theta)) \quad (5)$$

式中 A 为二阶微分方程求出三角函数解后所产生的常数,可由初始位置的定解条件来反推。

2.2.3 中和碰撞后的状态

在PIC计算的一个时间步长内,如果中和碰撞判断成立,则瞬间认定两颗粒会发生中和,而两质量相同颗粒的运动状态将由完全弹性碰撞来处理,动量守恒方程和能量守恒方程为(质量 m 可约掉)

$$\begin{cases} v_1 + v_2 = v_1' + v_2' \\ v_1^2 + v_2^2 = v_1'^2 + v_2'^2 \end{cases} \quad (6)$$

其中,上标“'”表示碰撞后的物理参数。这里,两球体之间的完全弹性碰撞存在一个隐藏定解条件:两粒子在碰撞点处的法平面发生的是标准镜面反射,即两粒子的入射和反射速度方向恰好关于碰撞点的法线对称。

其次,处于电子吸附能级的颗粒在发生中和碰撞后,应将中和能全部沉积在纳米颗粒中,并转化为

热能。对于Al,根据固体电子学理论^[18],Al原子的电子亲和能级为2.35eV。那么,对于带电量为 q 的正负颗粒来说,完成中和碰撞所沉积的热功率 Q 为

$$Q = q \cdot 2.35 \quad (7)$$

所获得的沉积热能由两颗粒均分,故每个颗粒的温度提升为

$$\Delta T = Q/2mc_p \quad (8)$$

式中 c_p 为Al的定压比热容,取900J/(kg·K)。

2.3 模型验证

为验证数值模型的正确性,在真空罐内开展NFET试验件的中和试验。由于测量手段的限制,仅能从可测得的宏观物理参数来进行验证,为此,本文选择两个有代表性的参数:羽流温度分布和推力。由于纳米颗粒在中和过程中会升高温度,因而羽流温度分布可以间接表征颗粒的中和完成程度,以此参数可以间接验证颗粒中和过程的计算精度;推力可以直接反映颗粒的输运速度,以此参数可以间接验证颗粒输运过程的计算精度。

2.3.1 试验系统与测量方法

如图4所示,真空罐尺寸为:直径0.6m、长2m。NFET试验件为初次设计的原理验证试验件(未经过优化)。在NFET工作时,整个真空罐内的压强可控制在 4.8×10^{-4} Pa。以比色温度计来监测羽流中的温度变化,同时,以“打靶法”测量NFET的推力。

颗粒羽流的推力 F 会对靶材表面产生一个冲击力 P ,由此,可用 P 来描述 F

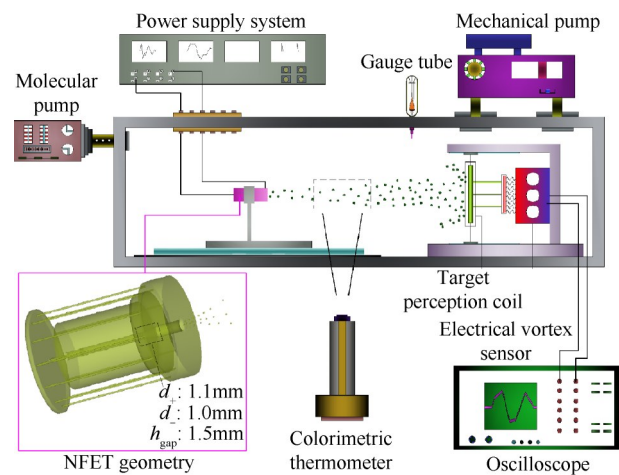


Fig. 4 Schematic diagram of the test system

$$F = \frac{P}{(\sin\beta + 0.0225/\sin\beta)}$$
 (9)

式中 β 为羽流对靶产生的冲击变形角度,由于推力较低,一般可取 90° ,冲击力 P 会对靶产生一个微小位移 l_t ,那么,以 l_t 来描述 P

$$P = \frac{E_t w_t l_t h_t^3}{4L_t^4}$$
 (10)

式中 E_t 为靶的弹性模量(MPa), w_t 为靶的横向宽度(m), h_t 为靶的厚度(m), L_t 为靶的纵向长度(m),那么,只要测得位移 l_t 的数值,就可以推导出有效推力 F 。电涡流传感器的作用就是利用靶与线圈连接柱的微小位移来产生感应电流,然后输出电流值,由示波器进行采集,最终可推算出 l_t 。

2.3.2 试验与仿真的对比

表1给出计算和试验所涉及的输入条件。

Table 1 Input conditions of the calculation	
Parameter	Value
Inner diameter of the extractor/mm	1.1
Thickness of the extractor/mm	2
Inner diameter of the emitter/mm	1.0
Gap distance of the two electrodes/mm	1.5
Particle information	Al,diameter: 250 nm
Particle flow rate/(g/h)	35
Time step/ns	5

(A)温度分布

推力器出口外150mm,300mm和450mm处的温度分布图像与计算结果进行对比(计算工况与试验相同,NFET位于最左侧位置,羽流向右喷射)见图5,比色温度计的成像窗口为25mm(高)×45mm(长)。在每个子图中,上部分结果为带有不同温度的颗粒位置的计算结果,下部分3个黑框图像为比色温度计所测的温度成像图。

据图5,随着诱导电压的升高,试验与计算结果均显示出中和区域在向下游推移,原因为:诱导电压的升高会增大带电颗粒在中和前的运动速度,进而中和碰撞概率降低,导致中和过程在逐渐变慢,中和碰撞的触发时间会延迟。在结果对比方面,从定性层面上,仿真与试验结果基本一致。需要说明的是,由于比色温度计只能给出温度分布的成像,无法给

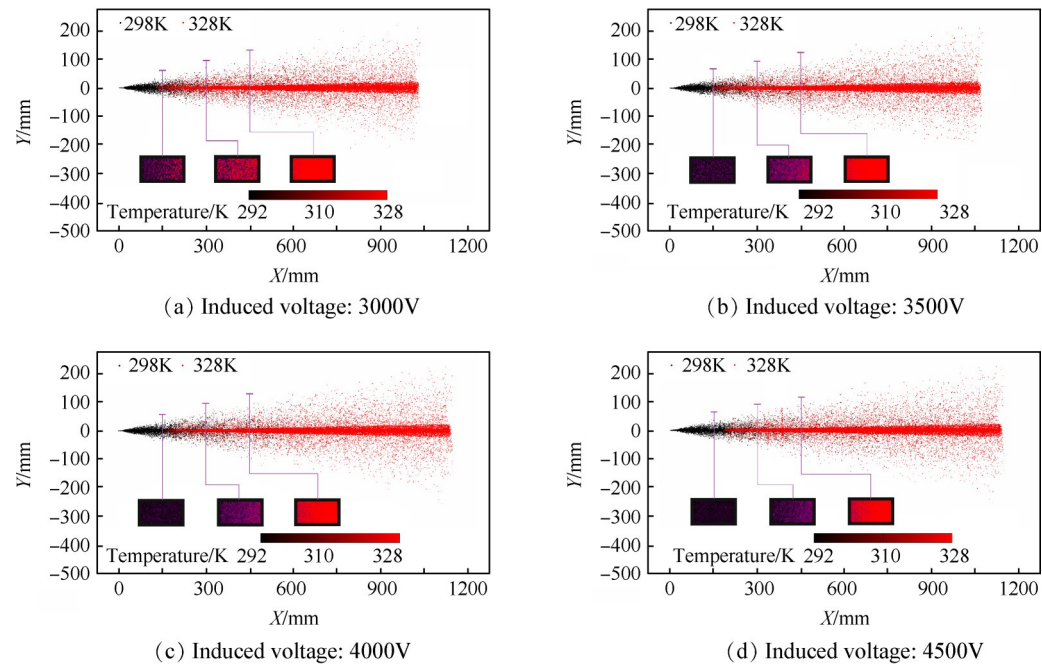


Fig. 5 Comparison of the temperature distribution solved by calculation and test respectively

出更具体的数据,故这部分的验证只能基于定性的层面。

(B) 推力

本小节将对计算与试验所得的推力结果进行对比。首先,这里讨论数值计算中推力的计算方法。根据牛顿第二定律,推力器向环境系统的作用力,可以描述为环境中由推力器导致的粒子动量随时间的变化率,但在数值计算中,这种描述会被数值化处理为:某时间步长内,通过某一截面的颗粒速度的轴向分量 $v_{x,i}$ 与颗粒质量 m_i 乘积在颗粒数量 i 上的加权值与时间步长 dt 的比值

$$F = \sum_i^n m_i v_{x,i} / dt \quad (11)$$

这里会出现一个问题:如何选取截面的位置。在 Louis M 的报道中,由于没有引入中和策略,截面会取在推力器出口位置,这个位置的颗粒尚未完全中和,颗粒的运动状态并没有进入稳定,因此,无法确定这种推力的计算方法是否符合真实情况。图6将图5(a)工况的羽流中和情况以及不同截面位置所计算的推力展示出来。

据图6,在颗粒进行中和过程中,带电粒子的运

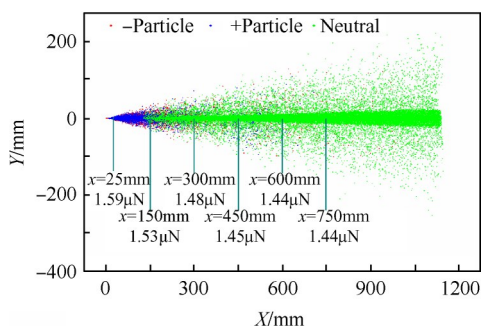
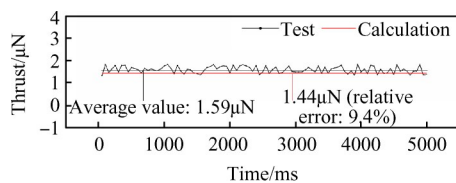
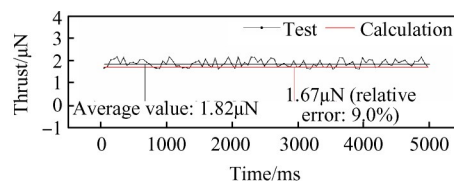


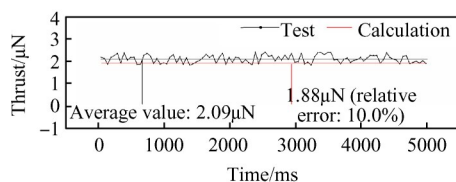
Fig. 6 Computational thrust distribution as a function of axis section position



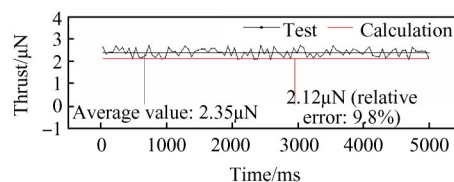
(a) Induced voltage: 3000V



(b) Induced voltage: 3500V



(c) Induced voltage: 4000V



(d) Induced voltage: 4500V

Fig. 7 Comparison of the thrust solved by calculation and test respectively

动状态并不能完全确定,会受到外加电场的做功影响(可能做正功或负功)以及颗粒之间中和碰撞的随机散射影响,而在羽流中性化程度较高的区域($x > 450\text{mm}$),上述两种影响机制会降低,推力计算值的变化幅度明显减小,这说明推力的选取截面应尽量位于羽流中和程度较高的区域。

最后,以“打靶法”对4个不同诱导电压(与前文的电压一致)的工况进行推力的测量,将试验结果与计算结果进行对比,见图7。

图7所示,试验所测得的推力是随时间变化的,一方面可能由于外加环境的干扰(真空泵工作的振动),另一方面可能由于推力器羽流的不稳定性。因此,对试验所测推力的平均值进行统计,以试验平均值和仿真结果对比,相对误差在9.0%~10.0%。并且,两者在变化趋势上吻合:随着诱导电压的升高,推力几乎成线性增长。据前文分析,诱导电压是导致颗粒在中和前运动速度升高的因素,这与推力的变化规律一致。需要说明的是,在以往 Louis M 的研究中,诱导电压与推力并非呈线性关系,但具有同样的变化趋势,这说明两者关系的曲线函数与中和方式有很大关系。

3 计算结果与分析

前文有述,影响 NFET 性能的主要因素有3个,除诱导电压(在2.3.2小节中已作分析)外,引出极与发射极的内径比和颗粒直径也是影响 NFET 中和性能的关键因素。而这两个因素都属于试验优化周期较长、加工难度受限的目标参数。因此,下文将利用前文提出的数值方法,针对 NFET 中和性能随这两个关键因素的变化规律和机理进行研究,以总结出相关结构的优化设计方法。

3.1 引出极与发射极的内径比

引出极与发射极的内径比主要控制负颗粒从发射极离开后,在推力器内部与引出极壁面进行碰撞的频率,该过程会对颗粒后续的输运与中和过程有重要影响。首先,给出两个比较极端的工况,见图8(左侧图为关键区域的放大图,引出电压:3000V,粒径:250nm)。

图8(a)为 d_+/d_- 过大的情况,图8(b)为 d_+/d_- 过小的情况,从推力的计算值来看,两者都属于性能恶劣的状态。在 $d_+/d_-=1.5$ 的案例中,由于引出极内径过大,导致大量负电颗粒直接离开引出极出口而没有发生反向充电,从而形成负电颗粒过剩,部分负电颗粒在运动一段距离后会返回引出极表面进行反向充电而形成正电颗粒,直到达到正负颗粒削减速度平衡的情况,但由于电场对过剩负电荷作负功的缘故,这些纳米颗粒将损失大量动能,并且运动方向不规则,羽流较为发散,因而极大程度导致推力降低。而 $d_+/d_-=0.5$ 案例的情况也类似,引出极内径过小导致大量负颗粒被反向充电为正电颗粒,形成正电颗粒过剩,部分正电颗粒将通过引出极通道返回推力器中的发射极表面进行第二次反向充电,进而成为负电颗粒继续进行颗粒的向外发射,直到形成正负颗粒削减速度平衡的情况,但在此过程中,电场依然会对

这些过剩正电荷的颗粒作负功,导致颗粒动能损失,同样羽流发散作用较显著,因而推力降低。

综上,对于 d_+/d_- 来说,有无剩余电荷或有无束流发散情况是影响推力性能的关键;另一方面,据前文计算数据,当 $d_+/d_-=1.1$ 时,推力可达 $1.44\mu\text{N}$,该推力均大于图8的两个极端结果。这说明 d_+/d_- 在 $0.5 \sim 1.5$ 之间,可能存在最优点,为此,下文给出进一步的数值分析结果,见图9(引出电压:3000V,粒径:250nm)。

据图9, d_+/d_- 的增加是抑制反向充电作用的因素,随着 d_+/d_- 从0.90到1.02的变化,过剩电荷逐渐从正电荷变为负电荷,而在 $d_+/d_-=0.94$ 的位置附近,正负电荷恰好均等,最大程度降低了电场作负功的机制,因而出现推力极大值点($4.49\mu\text{N}$),此刻,羽流的发散程度也较其它工况低,并且,此计算推力值是前文试验所用NFET的3倍以上。

3.2 纳米颗粒直径

根据文献[14],随着颗粒直径的增加,充电所得到的颗粒荷质比呈单调递增趋势。因此,纳米颗粒直径主要产生两方面影响:(1)纳米颗粒本身的质量;(2)纳米颗粒在发射时所具备的电荷量。本小节将针对诱导电压为3000V, $d_+/d_-=0.94$ 时,颗粒直径在300nm~600nm下的推力器中和特性进行研究,计算结果见图10。

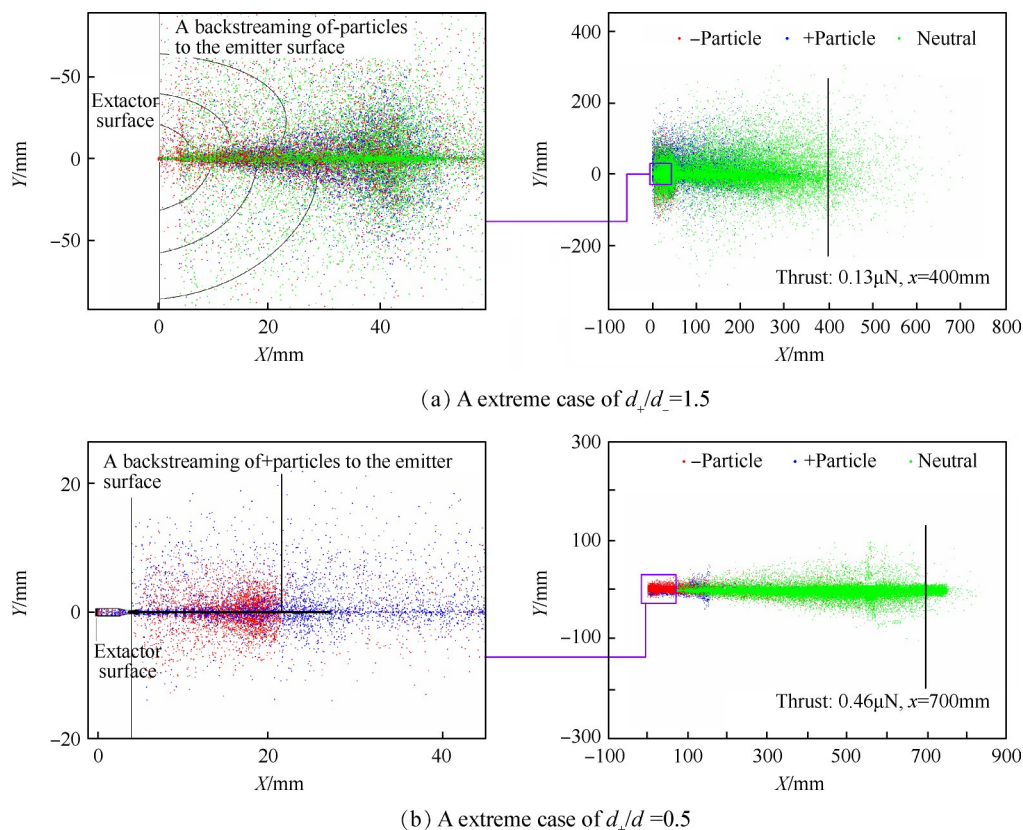


Fig. 8 Two cases with the extreme conditions of " d_+/d_- "

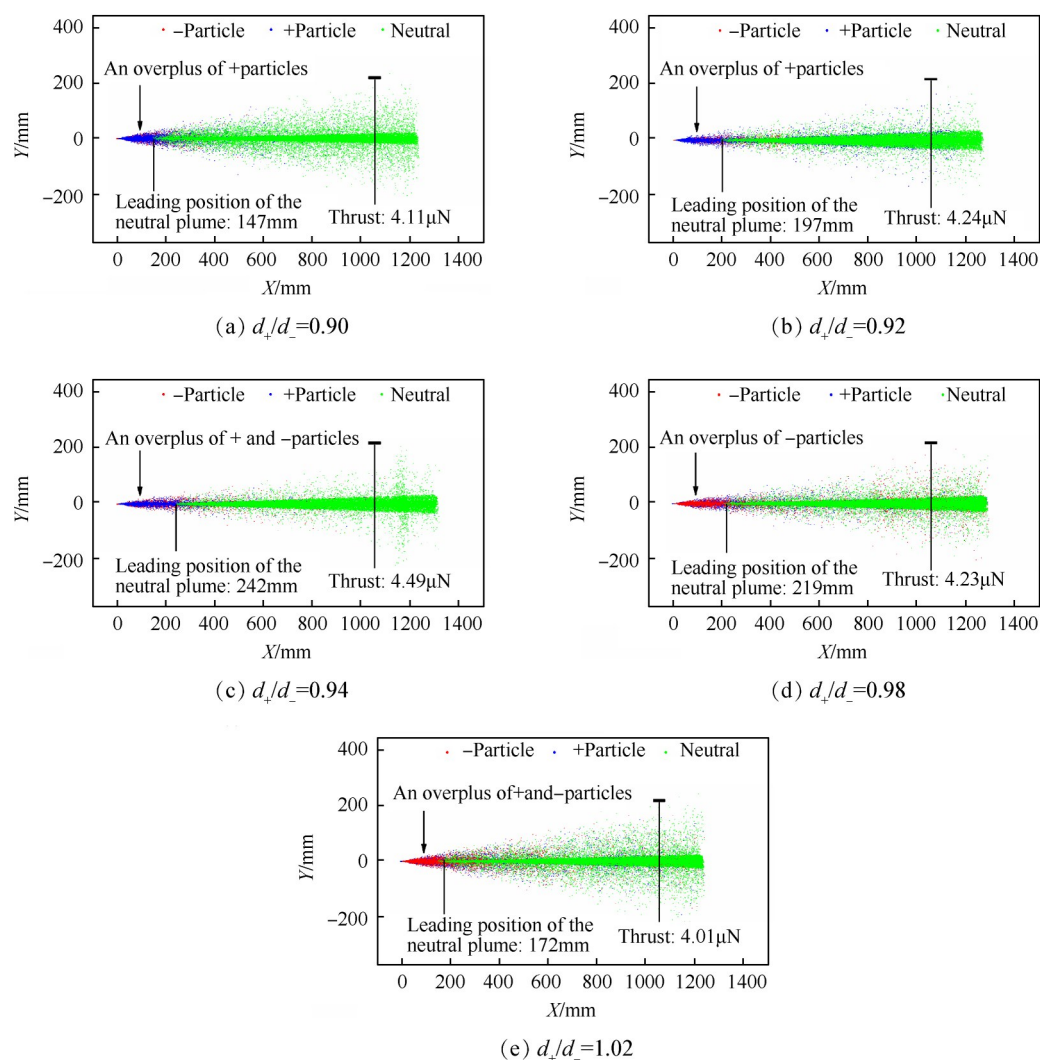


Fig. 9 Change law of the NFET plume characteristics with different conditions of “ d_+/d_- ”

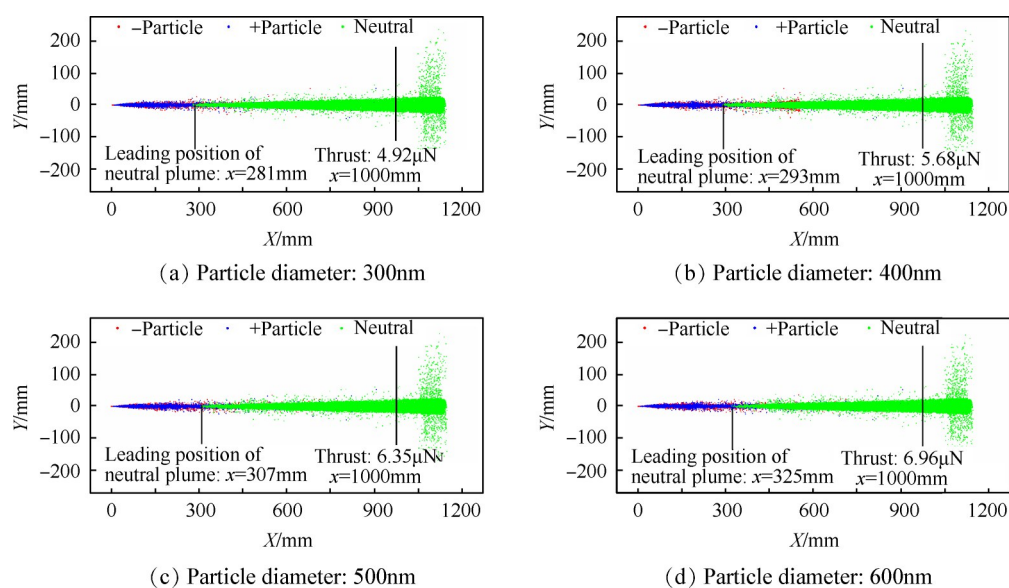


Fig. 10 Plume characteristics with different emitting nano-particle diameters

据图10,随着颗粒直径的升高,由于颗粒荷质比增加,颗粒离开推力器的速度将升高,导致中和碰撞

概率下降,中和区前端向右推移,但羽流发散角并无明显变化。同时,推力随着粒径升高而升高,这意味

着选择大粒径的纳米颗粒有利于提高 NFET 的性能。然而,根据文献[10-11]的理论,当粒径超过 $1\text{ }\mu\text{m}$ 时,3000 V 的诱导电压已无法将颗粒的电荷充电至饱和,这意味着粒径不可无限制增加(除非提高诱导电压,但这对在轨应用会增加难度)。

结合 3.1, 3.2 和 2.3.2 小节的结果,增大诱导电压、调整 d_+/d_- 和增大粒径都可以实现推力的增加,但有所不同的是,增大诱导电压和粒径仅会升高颗粒运动速度,而 d_+/d_- 可以同时改变颗粒运动速度(从中和程度快慢及中和区前端位置可推断)和羽流发散程度,从这方面来看, d_+/d_- 是影响推进性能最显著的因素。

综上,这里给出 d_+/d_- 在 0.9~1.13,粒径在 250nm~600nm 的一些工况的推力计算值分布,见图 11。值得注意的是:前文有述,当粒径为 250nm 时,最优 d_+/d_- 为 0.94,但随着粒径升高, d_+/d_- 最优值会向右漂移;另一方面,图 11 的结果也说明本实验室所研制的 NFET 尚有较大优化空间,明确了提高推进性能的优化方向。

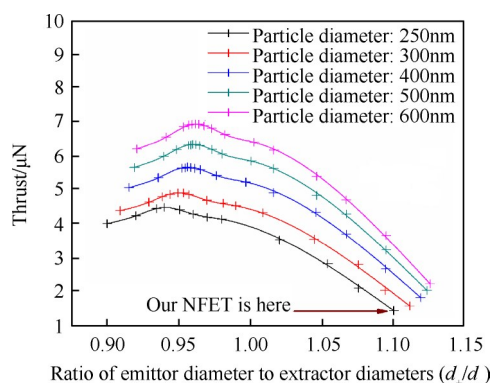


Fig. 11 A profile diagram of the thrust with different conditions

4 结 论

本文针对纳米颗粒场致发射推力器提出一种新的自中和策略,并建立相应数值模型进行了中和特性的仿真分析,主要结论如下:

(1) 诱导电压是 NFET 的可调工作参数,升高该参数可令羽流带电颗粒的运动速度增加、中和位置延后,推力呈线性递增(与 Louis M 的无中和策略的预估结果有一定差别)。

(2) 纳米颗粒直径的升高会增大颗粒在中和前的运动速度,推力增加。

(3) 影响反充电中和策略最显著因素为引出极

与发射极的内径比(d_+/d_-),该参数增加或减少都会导致电荷过剩颗粒受电场作负功影响,一方面运动速度降低,一方面束流发散角升高,导致推力严重下降,在粒径为 250nm 时, d_+/d_- 的最优值为 0.94,且随着粒径升高, d_+/d_- 的最优值会略微升高。

参考文献:

- [1] 于 博, 张 岩, 贺伟国, 等. 超声波电喷推力器羽流中和特性研究[J]. 物理学报, 2018, 67(4): 1-12.
- [2] 于 博, 焦 蛟, 康小录, 等. 一种新型微纳量级的推进概念研究[J]. 推进技术, 2018, 39(6): 1434-1440. (YU Bo, JIAO Jiao, KANG Xiao-lu, et al. Investigation of a New Micro-Nano Propulsion Concept [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(6): 1434-1440.)
- [3] Robert T. Electrohydrodynamic Behaviour of Single Spherical or Cylindrical Conducting Particles in an Insulating Liquid Subjected to a Uniform DC Field[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1996, 29(10): 2595-2608.
- [4] Dascalescu L, Tobazeon R, Atten P. Behaviour of Conducting Particles in Corona Dominated Electric Fields [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1995, 28(8): 1611-1618.
- [5] Asano K, Anno K, Higashiyama Y. The Behavior of Charged Conducting Particles in Electric Fields [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1997, 33(3): 679-686.
- [6] Louis M, Thomas L, Brian G, et al. Nanoparticle Electric Propulsion: Experimental Results [R]. AIAA 2006-4803.
- [7] Kurt J, Lyon B. The Effects of Magnetic Surface Stress on Electro-spray of an Ionic Liquid Ferrofluid [R]. AIAA 2016-4549.
- [8] Grustan E, Manuel C. Microfabricated Electro-spray Thruster Array with High Hydraulic Resistance Channels [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2017, 33(4): 1-8.
- [9] Song W D, Shumlak U. Ultrasonically Aided Electro-spray Source for Charged Particles Approaching Monodisperse Distributions [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(2): 353-363.
- [10] Louis M, Thomas L, Brian G, et al. Experimental Results and Modeling Advances in the Study of the Nanopar-

- tic Field Extraction Thruster[R]. *AIAA* 2007-5254.
- [11] Thomas L, Louis M, Prashant P, et al. Nanoparticle Electric Propulsion for Space Exploration [C]. *Albuquerque: AIP Conference Proceedings*, 2007: 787-794.
- [12] Louis M, Thomas L, Inkyu E, et al. Nanoparticle Field Extraction Thruster (nanoFET): Introduction to, Analysis of, and Experimental Results from the "No-liquid" Configuration [R]. *AIAA* 2008-5097.
- [13] Louis M, Thomas L, Brian G, et al. Electrostatic Charging of Micro- and Nano-Particles for Use with Highly Energetic Applications[J]. *Journal of Electrostatics*, 2009, 67(1): 54-61.
- [14] Louis M. Investigation of a Micro-and Nano-Particle In-Space Electrostatic Propulsion Concept [D]. *Ann Arbor: the University of Michigan*, 2009.
- [15] David L, Brian G, Thomas L. Simulation of Self-Neutralization Techniques for Charged Particle Thrusters [R]. *AIAA* 2011-5814.
- [16] Oh Y. Computational Modeling of Expanding Plasma Plumes in Space Using a PIC-DSMC Algorithm [D]. *Cambridge: Massachusetts Institute of Technology*, 1997.
- [17] Fife M. Hybrid-PIC Modeling and Electrostatic Probe Survey of Hall Thrusters [D]. *Cambridge: Massachusetts Institute of Technology*, 1998.
- [18] 黄 昆. 固体物理学[M]. 北京:北京大学出版社, 2015: 33-34.

(编辑:梅 瑛)