

空间电力绳系电流峰值点变化规律研究^{*}

于 博^{1,2}, 王仲远³, 乔彩霞², 康小录², 赵 青¹

(1. 电子科技大学 资源与环境学院, 四川 成都 611731; 2. 上海空间推进研究所, 上海 201112;
3. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201108)

摘 要: 为研究电流峰值点在几种影响因素下的变化规律, 建立一种能够捕捉绳系电子发射与收集自洽平衡过程的新算法——电路空间耦合算法。为验证该方法的计算精度, 以1.35kW霍尔推力器为等离子体源, 在真空舱内开展绳系的电荷收集试验, 在电路参数方面, 计算精度约为12.8%, 在场参数方面, 计算精度约为3.6%。在此基础上, 针对不同偏置电压、绳系长度以及绳系直径, 对绳系的绳上电流分布、电势分布以及空间电势分布等参数进行数值计算。结果显示: 电力绳系的电流峰值点会随着偏置电压升高、绳系长度增加及绳系直径增大而发生比例上的向阳极端漂移, 揭示了电子轨道运动限制的机制在各类壁面电荷输运机制中占优, 导致电流峰值点漂移的产生。

关键词: 电力绳系; 电流峰值点; 耦合算法; 数值计算

中图分类号: V439+.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2020) 02-0469-12

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.180653

Investigation on Change Laws of Current Peak Position in Electrodynamic Space Tether

YU Bo^{1, 2}, WANG Zhong-yuan³, QIAO Cai-xia², KANG Xiao-lu², ZHAO Qing¹

(1. 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. Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201108, China)

Abstract: In order to precisely study the self-consistent process between the collection and emission of electrons in a whole electrodynamic tether system, a new hybrid model named 3D circuit and space coupling calculation (3D-CSC) has been established. This model can help to study the change law of peak position under several influencing factors. In order to verify the feasibility and accuracy of 3D-CSC model, experimental tests of current collection using a bare tether have been conducted, and a 1.35kW class Hall thruster is employed as the plasma generator in the vacuum chamber. Comparisons between calculation and measurement results show that the error of calculation in circuit is about 12.8%, while in space is about 3.6%. Based on 3D-CSC, we simulated the steady-state operating characteristics of an on-orbit electrodynamic tether including the current and potential distribution on tether, as well as the plasma potential distribution in space, under the working conditions of different bias voltages, different tether lengths or diameters. The calculation results showed that, the current peak position would move to the anode end with the bias voltage increasing, the tether length increasing or the tether diameter increasing. The present study revealed that the difference of the three types of charge transportation, which are the orbital motion limit, the thermionic emission and the secondary electron emission, respectively, was the

^{*} 收稿日期: 2018-10-18; 修订日期: 2019-05-26。

通讯作者: 于 博, 硕士, 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, 王仲远, 乔彩霞, 等. 空间电力绳系电流峰值点变化规律研究[J]. 推进技术, 2020, 41(2): 469-480. (YU Bo, WANG Zhong-yuan, QIAO Cai-xia, et al. Investigation on Change Laws of Current Peak Position in Electrodynamic Space Tether[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(2): 469-480.)

reason of the current-peak-position change.

Key words: Electrodynamic space tether; Current peak position; Coupling model; Numerical simulation

1 引 言

空间电力绳系是一种利用金属电路与空间等离子体环境进行电荷交换,在长达数百米到数千米的金属绳系上形成绳载电流,在地球磁场提供 10^{-5}T 量级的磁感应强度下,产生推力的推进装置。由于地球磁场的限制,空间电力绳系主要应用在近地轨道(高度在 $300\text{km}\sim 500\text{km}$),可实现多次往返的降轨或升轨任务,这其中包括空间碎片清理^[1-2]、在轨电池充电^[3]、包裹传递^[4]、寿命末期卫星离轨^[5-6]以及纳星变轨^[7-9]等任务。在很多空间推进任务中,通常采用无工质的场发射或热发射阴极来作为电子发射装置,打破了推进系统受推进剂比冲的限制。因此,空间电力绳系最大的优势在于其高比冲、低成本的特性,是目前近地轨道电推进应用中最有前景的推进技术之一。

在 1993 年, Sanmartin 等首次提出以金属裸绳来作为电子收集装置^[10],由于其特征尺寸低于当地空间等离子体的德拜长度,使得电荷收集机制从 Langmuir 限制机制(收集能力主要取决于近壁等离子体能量)进入到轨道运动限制(Orbital motion limit, OML)机制^[11-12](收集能力主要取决于壁面-等离子体的电势差),实现绳系对电荷收集能力的显著提高,这一创新在后来的多次空间任务中都得到了验证,现阶段几乎所有的电力绳系都是以裸绳来作为收集器^[13-15],以空心阴极作为电子发射器^[16-20]。但是,当以裸绳作为收集器时,会出现新的工作特性:裸绳并不都是作为收集器工作,在绳上会同时存在电子收集区域(靠近阳极端)和电子发射区域(靠近阴极端),于是,在电子收集区的绳上电流是逐渐增大的,反之,在发射区是逐渐下降的,两者之间的临界位置,称为电流峰值点。目前,对电流峰值点位置的理论求解是基于基尔霍夫的节点电流公式^[10],该方法可以在试验给出的输入条件下,定性求解出电流峰值点的位置。

一方面,电流峰值点的存在是绳系利用率低的一种表现(绳系,在本文泛指金属裸绳),通常用绝缘层来包裹电子发射区的裸绳,仅留出小部分电子收集区裸绳来收集电子,但绳系的未来发展趋势一定用较短的绳系来产生较大的推力,这种方法就会限制绳系的性能,因为全部绳系都用作收集才能达

到最好效果,能够通过调整裸绳长度、直径来控制电流峰值点尽量靠近阴极端是设计关键。另一方面,由于在轨环境的影响因素复杂,例如地磁场、引力场的不均布等因素,绳系在轨所受洛伦兹力并不是一个恒定值,会时刻出现微小量的转矩变化,从而影响绳系的飞行姿态,通常采取收放绳系等策略,但收放绳系对绳系的动力学稳定性有影响,如果能够直接通过偏置电压(偏置电压:在电子发射器与收集器之间的电动势,用以维持绳系与等离子体环境之间的载流电荷输运)在短时间内来调整绳上电流峰值点位置,改变绳上电流分布,将是更好的选择。综合以上两个问题,研究电流峰值点的变化规律对绳系的工作性能会有显著的优化效果。

由此,该项研究必须基于该点位置的精确计算能力。由于电力绳系工作机制在于绳系电路与空间等离子体之间的电荷交换作用,这种电荷交换可以导致等离子体空间电势分布与电路电势分布形成自洽平衡,从而产生绳系上的电流峰值点,因而对电流峰值点的精确计算必须建立满足上述条件的计算方法。显然,节点电流公式是无法满足这一条件的。

本文将针对绳系与空间环境的电荷输运自洽平衡问题建立数值模型(电路空间耦合算法),并针对该算法进行相应的精度验证试验,在此基础上,通过电路空间耦合算法计算几种重要因素(偏置电压、绳长及绳直径)对电流峰值点变化的影响规律,并分析了相关物理机制以及绳系的设计策略。

2 数值模型

前文有述,对电流峰值点的精确捕捉必须基于空间等离子体与绳系电路所产生的电荷流通的自洽平衡过程的模拟。而绳系与等离子体之间的电荷输运的自洽过程主要源于电子发射过程和电子收集过程的自洽平衡,在稳态电势分布的作用下,等离子体在近壁输运过程会形成明显的取向性:当空间电势低于壁面电势时,壁面作电子发射机制;反之,壁面作电子收集机制。于是,在绳系工作的物理过程中,空间等离子体参数分布和电路中的参数分布一直处于一种相互影响的机制,为此,本文建立一种三维坐标下的电路空间耦合算法(3D Circuit and space coupling algorithm, 3D-CSC),求解绳系电子发射与电子收集的自洽过程。

图1给出了该算法涉及的几何计算域和部分物理模型。这里,对计算的唯一性进行说明:当绳系的长度、直径、偏置电压以及等离子体环境参数确定后,首先会对绳系产生一个电子的输运分配(或OML电子收集,或二次电子发射),然后会在阴极发射端计算输出所需要的阴极鞘层电势降,该电势是连接电路电势和空间电势的枢纽,假如该电势较高,说明阴极附近电势高于阴极端电位较多,在求解整体空间电势后,会产生绳系附近的电势升高,此刻会调整绳系对电子输运的分配,即在绳系某个位置形成电流峰值点,在大量迭代计算后,该峰值点会逐渐收敛于确定的位置,并且这个位置是唯一的。

图2给出一个时间步长内的计算逻辑过程,所调用的物理模型如下:

(1)模型A:单元粒子模型(PIC),该模型主要处理等离子体的输运和空间电势求解;

(2)模型B:基于化学动力学的碰撞模型,该模型主要捕捉电子-中性粒子间的碰撞过程;

(3)模型C:二次电子发射模型,以该模型求解正离子轰击绳系所产生的二次电子电流;

(4)模型D:OML收集电流模型,以该模型求解OML机制下的收集电流;

(5)模型E:电路电势求解模型,以该模型计算绳系电路的电势分布;

(6)模型F:鞘层模型,以该模型计算阴极附近鞘层电势降。

2.1 PIC模型(模型A)

PIC模型主要是指在求解粒子的运动过程后,在网格节点处要进行描述该网格内的粒子参数的权重统计,这种统计包括数密度、温度、电势等物理参数,以网格节点参数来代表整个网格的状态,具体权重统计的分配方法见文献[21]。PIC算法的优势:一

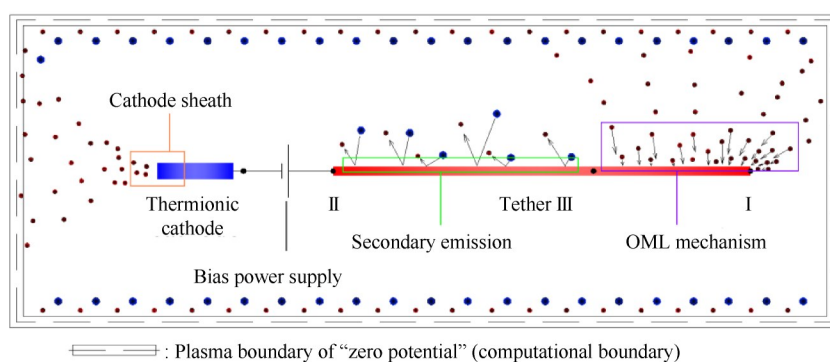


Fig. 1 Physical models involved in 3D-CSC

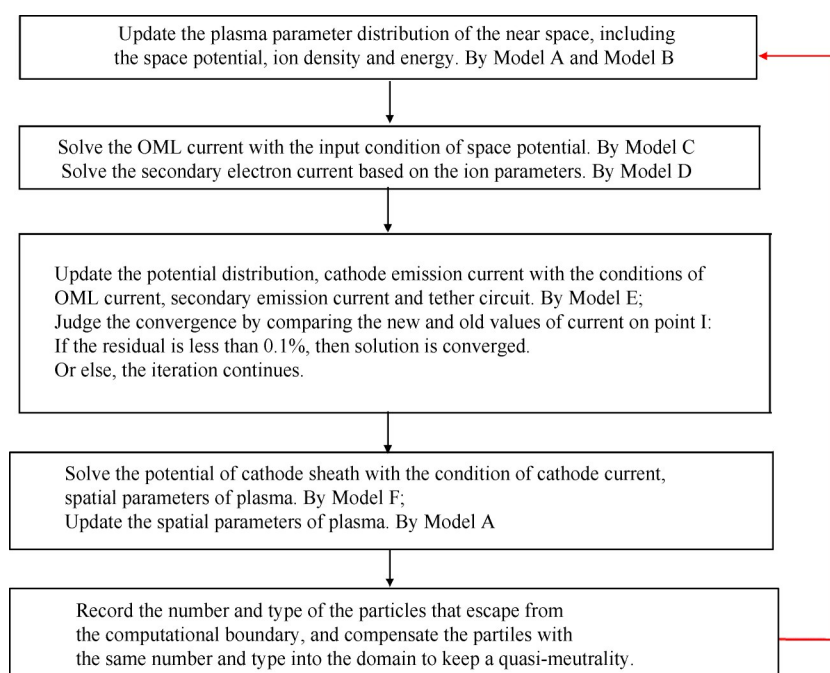


Fig. 2 Computational procedures in one time step in 3D-CSC

方面为输出计算结果提供了方便;另一方面为求解过程中影响运动状态输入条件的更新提供了快速的计算方法。PIC算法是一种非常适合同计算稀薄流体的方法,例如文献[22-23]给出2D的PIC方法用于绳系径向截面等离子体参数分布的计算。

数值计算下的等离子体输运行为是指:等离子体在外力作用下的运动,以及所形成的等离子体参数分布对空间电势的影响,进而反馈更新等离子体的外力作用的过程。作为广义双极扩散运动,本文等离子体在输运中主要进行两种运动:包括带电粒子在电场中的受力运动和粒子间的扩散运动。带电离子在运动中持续受到的总合外力为

$$\mathbf{F}_{\text{Total}} = \mathbf{F}_{\text{E,AF}} + \mathbf{F}_{\text{E,P}} + \mathbf{F}_{\text{d}} \quad (1)$$

式中方程右边第一项和第二项分别为外加电场和等离子体所产生的电场力,第三项为浓度梯度力。

在对等离子体空间电势的求解中,由于忽略磁场的影响,可以直接求解泊松公式来获得电势场求解,这样可以大幅度地减少计算量。值得说明的是,在逐次的迭代求解中, $\mathbf{F}_{\text{E,P}}$ 的绝对值会逐渐向 $\mathbf{F}_{\text{E,AF}}$ 逼近,并且两者在符号上通常相反,因为等离子体对外加电场会形成屏蔽作用,所以等离子体所形成的电势总会反作用于外加电势场。

除带电粒子在电磁场中的迁移运动外,扩散是等离子体的双极扩散的另一个方面,扩散过程是一种对浓度梯度的响应过程,尤其在绳系附近的环境中,等离子体数密度变化极大,这种机制就必须要考虑,由于电子的荷质比极高,所以电子在电场中的迁移机制要远远大于扩散机制,扩散运动相对于迁移运动变得不敏感,这里基于提高计算效率考虑,给予忽略电子的扩散运动。

因此,重点考虑正离子在等离子体环境中的扩散过程,微元空间某点对另一点的定向扩散力 F_{dis} 为

$$F_{\text{dis}} = -k_{\text{dis}} \cdot \frac{dN_{\text{cell}}}{dl} \quad (2)$$

式中 k_{dis} 为扩散系数,在数值计算中,这是一个经验参数,一般量级在 $10^{-38} \text{N} \cdot \text{m}^4$ 左右, N_{cell} 为网格节点

的浓度(数密度, m^{-3}), l 为两点间距离(m)。

2.2 粒子碰撞模型(模型B)

在轨道高度为200km~300km的空间,等离子体参数一般为:温度0.1eV,数密度 10^{11}m^{-3} ,可视作平衡态等离子体,那么,这里存在一些碰撞概率较低的碰撞类型:(1)带电粒子间的库伦碰撞;(2)重粒子(离子、中性粒子)之间的弹性碰撞;(3)重粒子之间的电荷交换碰撞。因而本文对上述碰撞给予忽略。此外,还有一些碰撞概率较高的碰撞类型,这些碰撞主要发生在电子-中性粒子之间,因为在绳系的近壁范围内,电子温度较高,所产生的电离、激发碰撞对电子能量的消耗影响较大,对电子的OML收集过程有显著的削弱作用,不能忽略。因此,本文主要对以下碰撞进行判断:(1)电子-中性粒子电离碰撞;(2)电子-中性粒子激发碰撞。

为此,本文提出一种基于化学动力学的碰撞模型,具体的碰撞判断过程如下:

气体放电中的化学反应率系数 $R_{j,c}/(\text{cm}^3/\text{s})$ 表征单位时间内化学反应(碰撞)发生的体积率变化,该系数与电子温度 T_e 有关。以此为基础,那么在一个时间步长内,某网格内的一个电子发生的类型为 j 的碰撞概率为

$$P_{j,\text{cell}} = \frac{R_{j,c} \times 10^6 \cdot dt}{V_{\text{cell}}} \quad (3)$$

式中 $R_{j,c}$ 为 j 类型碰撞的反应率系数, dt 为时间步长(s), V_{cell} 为网格的体积(m^3)。式(3)的数学思想为网格内发生化学反应的体积与网格总体积的比例,可以等价于网格内发生反应的电子数量与网格内总电子数量的比值,进而可以视作电子发生该碰撞反应的概率。关于本文所考虑的所有碰撞类型以及对应的 $R_{j,c}$ 见表1,其中*表示激发态,在电子与粒子发生电离或激发碰撞后,电子将减少碰撞阈值所对应的能量,而激发态的中性粒子只考虑能级的变化,运动状态不变。

2.3 二次电子发射模型(模型C)

在绳系正常工作时,绳系附近的空问电势与电

Table 1 Electron-Neutral collisional reaction coefficient^[24]

j	Reaction equation	Reaction velocity/ (cm^3/s)	Collision threshold/eV	Reaction type
1	$\text{e} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{e} + \text{O}_2^+$	$9.0 \times 10^{-10} \cdot T_e^{0.5} \exp(-12.6/T_e)$	12.60	Ionization
2	$\text{e} + \text{O}_2 \rightarrow \text{e} + \text{O}_2^*$	$1.7 \times 10^{-9} \cdot \exp(-3.1/T_e)$	0.98	Excitation
3	$\text{e} + \text{O}_2 \rightarrow \text{e} + 2\text{O}$	$4.2 \times 10^{-9} \cdot \exp(-5.6/T_e)$	6.40	O-O bond broken
4	$\text{e} + \text{O} \rightarrow 2\text{e} + \text{O}^+$	$9.0 \times 10^{-9} \cdot T_e^{0.7} \exp(-13/T_e)$	13.62	Ionization
5	$\text{e} + \text{O} \rightarrow \text{e} + \text{O}^*$	$4.2 \times 10^{-9} \cdot \exp(-2.25/T_e)$	1.97	Excitation

路电势的分布会产生较大差值,当绳系电势低于空间电势时,就会触发正离子(O^+)对绳系(金属W)的轰击作用,进而产生二次电子发射(又称次级电子发射)。所谓二次电子发射,是指具有一定能量的粒子(原子、离子或电子)轰击材料表面时,使得靶材原子的壳层电子发生激化,进而激化后的电子向表面运动并突破势垒而向真空逃逸的过程。对于低能离子($<500\text{eV}$)轰击金属而言,由于入射离子能量较低,可以忽略透射型二次电子发射,仅考虑反射型二次电子发射,即二次电子都是从被轰击的一侧表面发射,而忽略另一侧表面的穿透型发射。

关于低能 O^+ 离子在 10^{-4}Pa 真空环境下,对钨电极的二次电子发射系数的测量数据,见图3,该系数表征一个 O^+ 正离子所能够触发的二次电子数量。

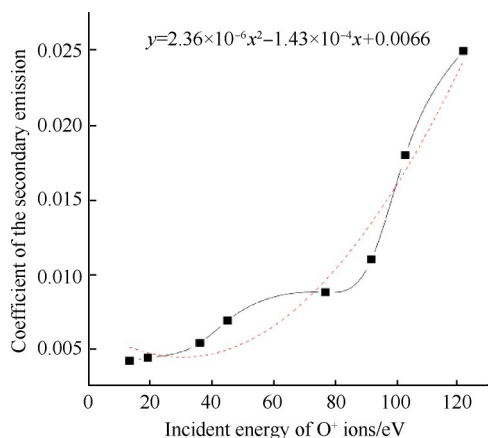


Fig. 3 Secondary electron yield by O^+ onto tungsten plate electrode

在获得二次电子发射系数 γ 关于正离子能量的耦合函数后,要引入随机数来实现计算过程中的二次电子发射的判断为

$$r \leq \gamma \quad (4)$$

r 为 $[0,1]$ 区间的随机数,如果式(4)成立,则绳系当地面网格向外发射1个电子,初始动能为壁面温度 T_b 所对应的热速度能量 $kT_b/2$, T_b 取 200K 。这样的处理方式可以实现大量二次电子发射概率的数学期望恰好等于 γ 。

2.4 OML收集电流模型(模型D)

如果绳系电势高于空间电势时,就会发生绳系对电子的收集作用。由于绳系特征尺寸小于当地等离子体的德拜长度,所以电子收集遵循OML限制,即收集能力将会随着壁面与等离子体的电势差的增大而增加,绳系微元面积上的收集电流为

$$dI_{\text{omle}} = dA_t \cdot n_p \cdot e \sqrt{\frac{2e|V - V_p|}{\pi^2 m_e}} \quad (5)$$

式中 dA_t 为绳系微元面积(m^2), n_p 为当地等离子数密度(m^{-3}), e 为元电荷。

2.5 电路电势求解模型(模型E)

在绳系进行升轨或降轨任务中,整个电路系统的电势降等于外加总偏置电压

$$V_{\text{bias}} = V_{\text{emf}} + V_{\text{power}} = V_{\text{anode}} + \int_0^{L_{\text{AB}}} I(x) \cdot \frac{\rho_{\text{resis}}}{A_t} \cdot dx + V_{\text{cathode}} \quad (6)$$

式中 V_{anode} 为绳系阳极端I点的电势降(V), $\int_0^{L_{\text{AB}}} I(x) \cdot \frac{\rho_{\text{resis}}}{A_t} \cdot dx$ 为绳系上由不均匀分布电流所导致的电势降(V), L_{AB} 是绳系长度(m), ρ_{resis} 为绳系电阻率($\Omega \cdot \text{m}$), A_t 为绳系的截面面积(m^2), V_{cathode} 为阴极电势降(V), V_{power} 为外加电源电压(V), V_{emf} 为绳系切割地磁场所产生的感生电动势(V)。

由于降轨任务中的 V_{emf} 是有利于降轨运动的电压,所以取正号,如果是升轨运动,则取负号。对于 V_{cathode} 来说,有两部分组成,一部分为阴极鞘层电势降,一部分为用于电子发射的放电电势降,关于阴极鞘层电势降计算见2.6节,而阴极发射的放电电势降可以通过不同发射电流来估算,表2为本文所采用阴极伏安特性的试验测量结果,与文献[25]相似,在电流过低或过高的情况下,阴极自持放电能力都会发生削弱(低电流下的发射体利用率不够,高电流下的电离率不足),导致羽状模式的出现,值得说明的是,在绳系正常工作中,阴极在等离子体环境中的工作模式多处于点状模式,除非阴极的气体流率低于其设计的额定值。

2.6 阴极鞘层电势模型(模型F)

等离子体对悬浮壁面鞘层的模型建立,主要基于离子通量等于电子通量的设定^[26]。但本文电极壁面存在电荷流通,所以两者不完全相等。离子对壁面的通量密度为

$$\Gamma_i = n_p c_b \quad (7)$$

式中 c_b 为离子入射波姆速度(m/s)。而电子对子对壁面通量密度为

$$\Gamma_e = \frac{1}{4} n_p \bar{c}_e e^{eV_s/T_e} \quad (8)$$

式中 $\bar{c}_e$ 为电子平均速度(m/s),取 $\bar{c}_e = (8T_e/(\pi m_e))^{1/2}$, m_e 为电子质量(kg), V_s 为鞘层电势降(V)。

对于表面有电子流通的电极而言,除考虑 Γ_i 和 Γ_e 之外,还要考虑电极的发射电子通量 Γ_e ,于是

Table 2 Voltage-ampere characteristics of the hollow cathode at different operating conditions

Current/A	Voltage/V	Operating mode	Plume pattern
2.5	19.1	Plume	Violet, visual divergence angle: 57°
3.5	15.8	Spot	Blue, visual divergence angle: 52°
4.5	14.7	Spot	Glaucous, visual divergence angle: 41°
5.5	15.1	Spot	Blue, visual divergence angle: 43°
6.5	16.3	Spot	Blue, visual divergence angle: 47°
7.5	18.9	Plume	Violet, visual divergence angle: 50°
8.5	20.7	Plume	Violet, visual divergence angle: 55°
9.5	23.6	Plume	Purple, visual divergence angle: 62°
10.5	26.8	Plume	Magenta, visual divergence angle: 71°

$$\Gamma_e + \Gamma_i = \Gamma_i \tag{9}$$

将波姆速度代入,有

$$\Gamma_e + \frac{1}{4} n_p (8T_e / (\pi m_e))^{1/2} e^{eV_s / T_e} = n_p (T_e / m_i)^{1/2} \tag{10}$$

式中 m_i 为离子质量(kg)。整理后,有

$$V_s = \frac{T_e}{e} \cdot \ln \left(\frac{n_p (T_e / m_i)^{1/2} - \Gamma_e}{\frac{1}{4} n_p (8T_e / (\pi m_e))^{1/2}} \right) \tag{11}$$

该模型与一般的悬浮壁面的鞘层模型不同,考虑了电子发射的作用,因此,等离子体对壁面的通量取正号,壁面对等离子体的通量取负号,所以 Γ_e 取负号,即 $\Gamma_e = -I_{\text{cathode}} / (A_e e)$, A_e 为发射体面积(m^2), I_{cathode} 为阴极发射电流(A)。

3D-CSC 算法所包含物理模型较多,计算周期较长,为提升计算速度,采取了一系列假设:

- (1)假设绳系为理想刚性金属直绳,在洛伦兹力作用下不会有形变;
- (2)忽略地球磁场(磁感应强度: 10^{-5}T 量级)对等离子体运动的影响;
- (3)假设空间等离子体环境一直处于平衡态,保持温度和数密度恒定;
- (4)忽略除电子-中性粒子外的粒子碰撞过程;
- (5)忽略阴极与偏置电源间的电路所带的电阻;
- (6)忽略阴极发射所需要的电路电势降,仅考虑阴极鞘层电势降。

2.7 模型验证

电路-空间耦合算法主要包含两大部分:(1)电路内电势、电流分布的计算;(2)空间等离子体场参数分布的计算。在进行算法的精度验证时,考虑试验无法测量非常细节的数据,只能选择某些具有代表性的可测参数进行验证。本文以流过偏置电源的收集电流 I_{ap} 和近绳系处的电子数密度,来分别验证电路和空间部分的算法精度,以此来综合验证 3D-CSC 算法的精度。

以地面真空舱内 Hall 推力器为等离子体源所制造的环境是无法真实模拟在轨环境的。例如,在地面真空舱内,绳系附近的等离子体具有稍不均匀性,通过诊断试验测得:在绳系的 1m 长度中,从右到左三个测点(每 0.5m 布置一个探针)的电子数密度依次为 $2.4 \times 10^{15} \text{m}^{-3}$, $2.1 \times 10^{15} \text{m}^{-3}$ 和 $1.5 \times 10^{15} \text{m}^{-3}$,电子温度依次为 1.42eV, 1.38eV 和 1.31eV,在模型验证的数值计算中,取三个测点的平均值作为模型 B 中等离子体环境的背景参数。虽然将绳系周围的稍不均匀等离子体视作均匀等离子体会产生计算误差,但考虑数值模型是基于一种电路内电子输运与空间电子输运的耦合,所以这种耦合作用是影响计算精度的关键,故假设以地面试验环境(10^{15}m^{-3})对数值模型耦合作用的验证效力与在轨环境(10^{11}m^{-3})相同,至少可以保证后文计算结果在定性规律上具有正确性。

在直径 2.5m,长 6m 的真空舱内进行绳系电荷收集试验,等离子体源为 1.35kW 的霍尔推力器,绳系平台距离推力器 2.5m,具体试验平台布置见图 4。试验共布置 3 根金属绳(钨)作为绳系,1 根进行正常工作,其它 2 根为备用;共布置 2 个热发射阴极,同样以其中 1 个为备用,阴极正常工作的额定电流为 0.2A;阴极与绳系间布置绝缘板,以防止绳系对阴极形成空间电弧;以 3 个 Langmuir 探针来测量绳系附近三个位置的电子数密度。

图 5 给出了试验系统的电路简图以及仿真所使用的简化几何模型。针对电路部分的电源收集电流进行计算与试验的对比,见图 6。

由图 6 可知,计算结果一直高于试验结果,平均误差在 12.8% 左右,趋势上可形成一致。造成误差的原因主要有三点:(1)3D-CSC 算法对等离子体边界是采取无阻力的流动假设,意味着,只要计算域有等离子体进入或离开,就会在边界自然消失或补充,但实际上这两个过程必然存在一定阻力,而这种阻力

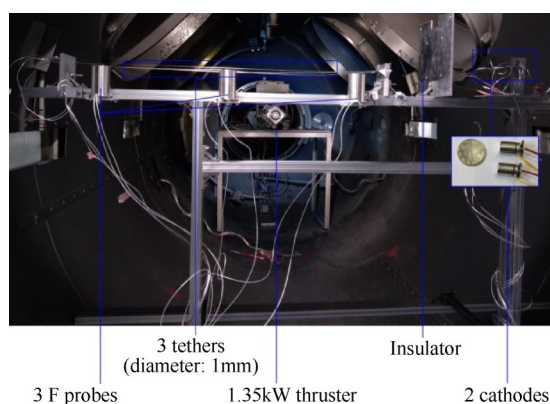


Fig. 4 Photograph of the experimental test system

会降低绳系的电子发射和收集,这是试验测得收集电流较低的主要原因;(2)3D-CSC算法忽略了电路中的一些电阻,这也是导致试验结果比计算低的另一因素;(3)绳系周围羽流等离子体环境的均匀性假设也会产生一些计算偏差,该假设所产生的误差较为复杂,与当地等离子体环境的分布特点以及绳系的具体位置有关,就本文工况而言,绳系右端(图4)是收集最强烈的区域,均摊这部分的羽流参数(数密度、温度)会使得电子收集能力下降,意味着计算收集电流将略低于试验收集电流(但这个影响因素较弱,因此,试验中测得的收集电流值依然高于计算值)。

对绳系附近空间电子数密度进行计算与试验的对比,见图7。在验证试验中的绳系系统的几何模型可参考图5,图7所显示的坐标系与图4、图5是一致的。图7不仅给出计算与试验的对比,还给出绳系轴向和径向的截面云图,以展示3D-CSC算法的仿真能力。单从计算结果来看:随着偏置电压的升高,绳系 X 方向的电子数密度蓝区越来越大(见图7各 Z - X 平面云图),这说明绳系对电子收集的能力越来越强;此外,由于等离子体羽流以高速横掠绳系,导致迎风

面和背风面的电子数密度空间分布不一致,具体参见图7的 X - Y 平面云图。上述两个规律与客观物理事实相符,可从一定程度上证明3D-CSC算法的准确性。

从计算与试验对比结果说明:电子数密度的场分布结果的计算精度较高,平均误差已经达到了3.6%。事实上,场参数的计算误差要比电路参数的计算误差容易控制,因为场参数一旦有微小变化,将会导致收集和发射电流机制较大的变化,所以3D-CSC算法的特点就是对场参数的计算精度要高于电路参数。

3 在轨计算结果与讨论

本节在3D-CSC数值方法基础上,通过改变不同影响因素(偏置电压、绳系长度和绳系直径),对在轨电力绳系的绳上电流分布、电势分布以及空间电势分布进行数值计算,以揭示电流峰值点在上述变化因素中的移动规律,并且在后面的“讨论”小节中介绍相关的物理机制。电力绳系在轨工作状态下的计算输入条件如表3所示。

3.1 计算结果

针对绳系长度为1000m、直径为0.5mm,偏置电压在1kV~5kV变化下的工况进行计算,见图8和图9。

图8给出不同偏置电压下,绳上电流分布的趋势,包括峰值点的电流值、阴极端($z=0$)位置的电流值(即电源的收集电流),该趋势与文献[10]所阐述的趋势基本一致。图9给出电流峰值点的漂移趋势以及峰值点在绳系上距离阳极端的比例,可见随着偏置电压升高,电流峰值点会逐渐向阳极端漂移。

针对偏置电压为1kV,绳系直径为0.5mm,绳系长度在3km~9km变化下的工况进行计算,见图10和图11。

图10的绳上电流整体分布趋势与常规形态(图

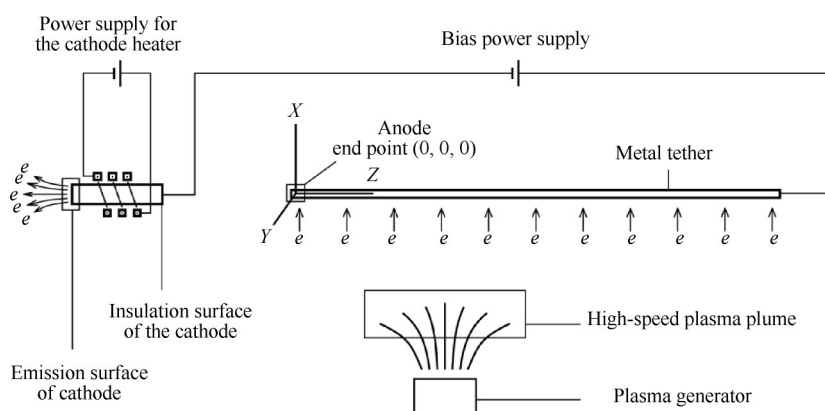


Fig. 5 Circuit diagram and simplified model of the tether for simulation

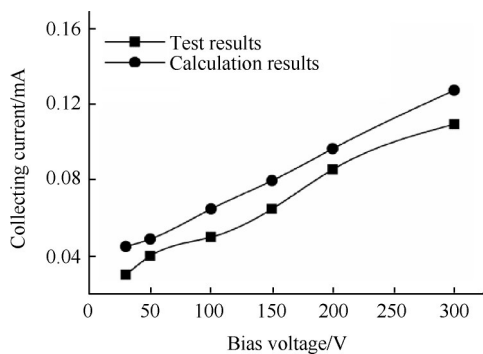


Fig. 6 Comparison of calculation and measurement results of the collecting current

Table 3 Input conditions of the calculation

Condition items	Value
Moving velocity of tether/(km/s)	8
Orbital altitude/km	350
Components of space plasma	O ₂ , O, O ⁺ , e
Parameters of space plasma	Temperature: 0.1 eV; Number density: 5×10 ¹¹ m ⁻³
Work function of the emitter	2.12eV (BaO-W emitter)
Operation temperature of the emitter/℃	1100
Geometry of emission surface	Round, Φ=2.5cm
Reference plane of “zero potential”	Sphere surface of infinity
Time step	2×10 ⁻⁷ s

8)一致;图 11 的电流峰值点随着绳系长度的增加,在线性比例上,依然向阳极端漂移。

针对偏置电压为 1kV、绳系长度为 1km,绳系直径在 0.75mm~1.50mm 变化下的工况进行计算,见图 12 和图 13。由图 12 和图 13,电流分布和电势分布对于绳系直径的改变并不是很敏感,至少较偏置电压和绳系长度来说,变化程度较小,但依然满足电流峰值点随绳系直径增大而向阳极端漂移的趋势。

3.2 讨 论

通过对计算结果的分析,电流峰值点随着各类影响因素增益,都会表现出向阳极端漂移的趋势。关于这种现象的内在机理,本小节将进行进一步讨论。这里,对影响电子收集和发射能力的相关物理参数进行说明:由于热发射阴极在支取阳极电流时,会产生空间电荷对电子发射的影响,形成虚阴极电势,而该电势取决于阴极鞘层电势,所以,阴极鞘层电势是表征热发射能力的最有效指标^[27];以入射正离子的能量和数量来表征影响二次电子发射电流的物理参数;OML 电流收集机制主要受限于绳系电势和空间电势的差值 $|V_i-V_p|$ 。关于不同工况下电子收集和发射能力的相关物理参数变化规律见表 4,表中,第 1 行为标准工况,而第 2,3,4 行都会有一个影响因素发生改变,发生改变的影响因素用☆标注,下标“t-e”表示热电子发射,“s-e”表示二次电子发射,“oml”表示 OML 收集。

表 4 结果显示:只要偏置电压、绳系长度或绳系直径增大,都会导致电子发射或收集的相关物理参数得到增益(与第 1 行的标准工况相比),但是,所导致各项贡献电流的增益是不相同的(括号内的数字表示如果峰值点没有移动时所计算得到的电流值),如果峰值点没有移动,前两项发射电流之和总会小于收集电流,无法形成电荷输运的自洽平衡。因此,电流峰值点必然要向阳极端移动才能形成自洽平衡。这说明,OML 机制是 3 种壁面电荷输运机制中最强的机制,仅需要较少的收集区域就可以和另外两个机制的联合作用相抵消。

然而,OML 机制的占优导致峰值点向阳极端移动有一个重要的前提:绳系和空间对 OML 占优所带

Table 4 Relevant physical parameters at each cases

Parameter	Potential of the cathode sheath/ V	O ⁺ ion number density/m ⁻³ and average ion kinetic energy/eV	Average $ V_i-V_p $ in the collection region/V	Contribution ratio of each current $I_{t-e}/I_{s-e}/I_{oml}$
Bias voltage: 1kV Tether length: 1km Tether diameter: 0.5mm	16.9	2.1×10 ¹⁴ 34.2	356.9	1.37/0.18/1.55
☆Bias voltage: 2kV Tether length: 1km Tether diameter: 0.5mm	22.8	1.6×10 ¹⁴ 48.8	424.7	1.99/0.20/2.19 (1.92/0.19/2.34)
Bias voltage: 1kV ☆Tether length: 3km Tether diameter: 0.5mm	23.3	2.0×10 ¹⁴ 36.5	405.4	2.02/0.16/2.18 (1.95/0.14/2.37)
Bias voltage: 1kV Tether length: 1km ☆Tether diameter: 0.75mm	17.5	2.0×10 ¹⁴ 35.3	367.1	1.46/0.19/1.64 (1.45/0.18/1.75)

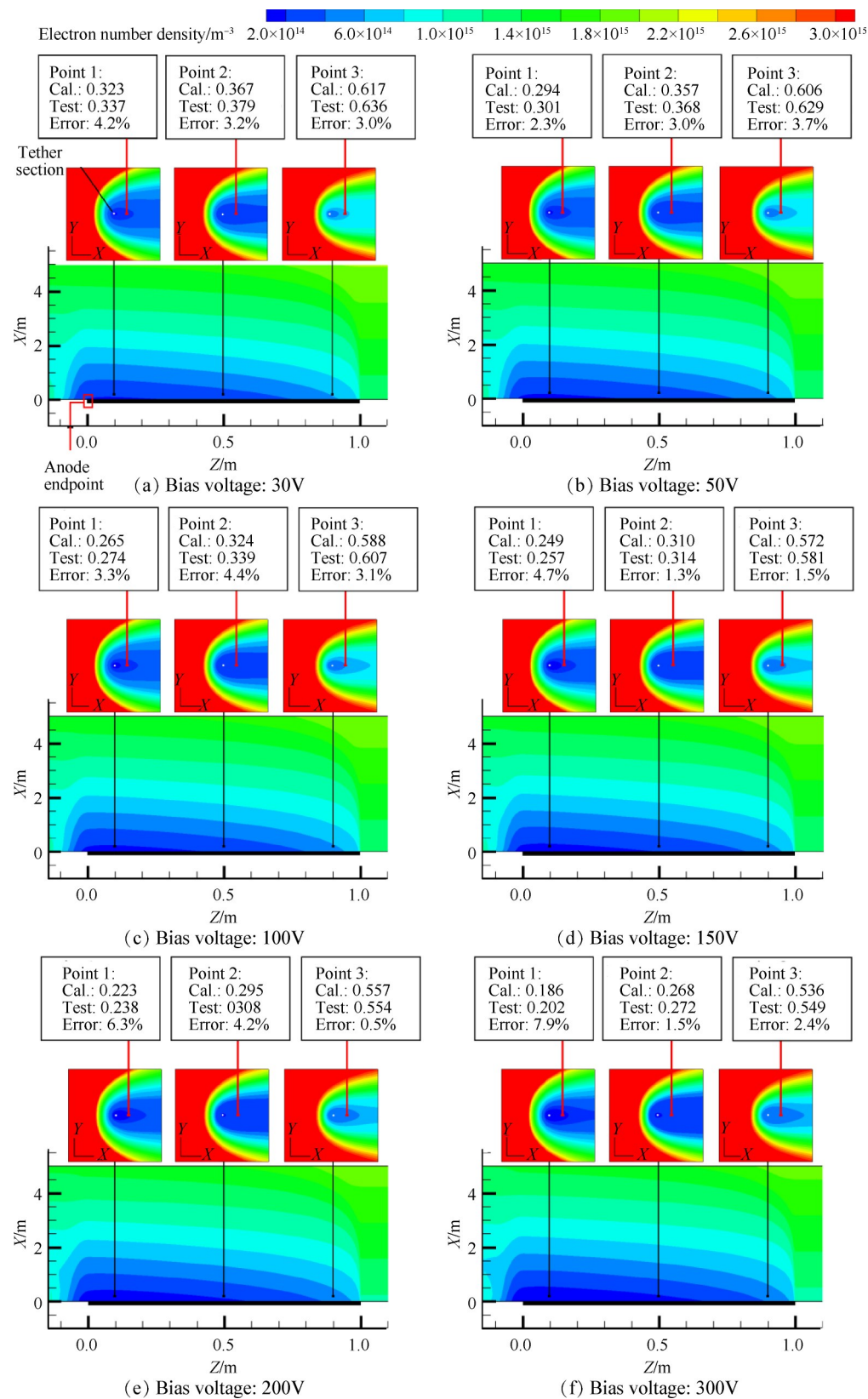


Fig. 7 Comparisons of calculation and measurement results of the electron number density (the term “Cal.” denotes the term “calculation results” and “Test” denotes the “test results”)

来的壁面电荷输运的调整能力是不相同的。如果两者对壁面电荷输运的调整能力相同,则会发生两种现象:(1)如果绳系内的电子和空间内的电子对壁面

电荷输运所产生的影响都有着足够强的自洽调整能力(类似真空中的电荷输运),会出现图 14(a)的情况,即绳系所有位置都可进行电荷收集,绳系电势在

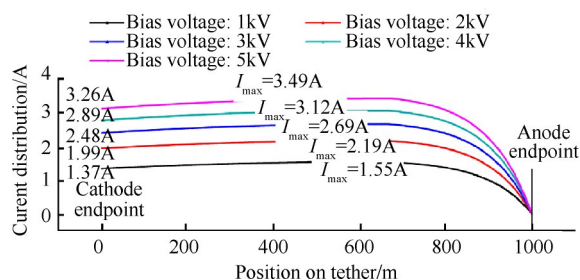


Fig. 8 Distribution of the current on the tether at different bias voltages

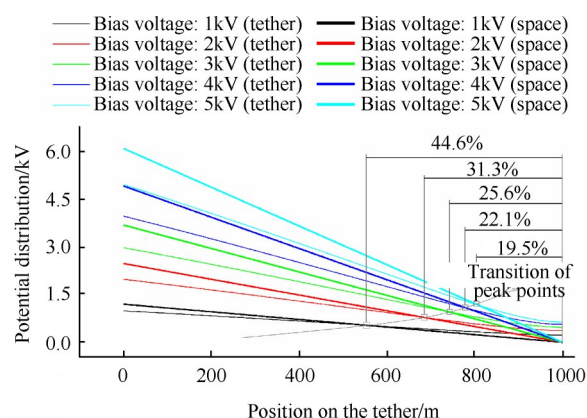


Fig. 9 Potential distribution of both tether and plasma at different bias voltages

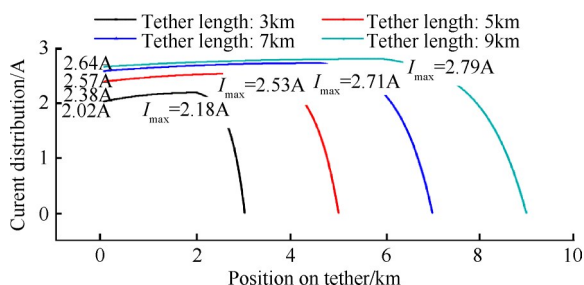


Fig. 10 Distribution of the current on the tether at different lengths

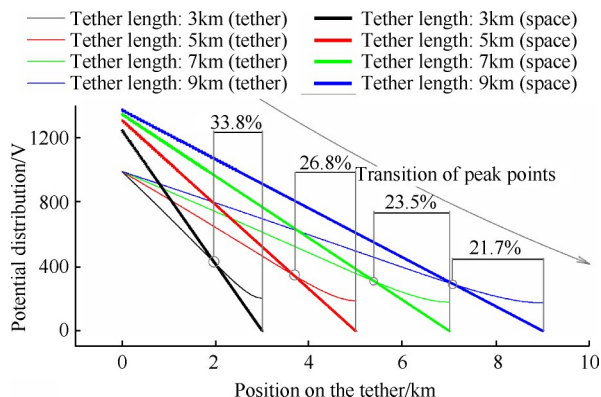


Fig. 11 Potential distribution of both tether and plasma at different tether lengths

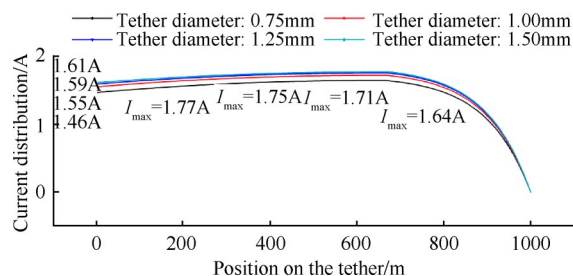


Fig. 12 Distribution of the current on the tether at different tether diameters

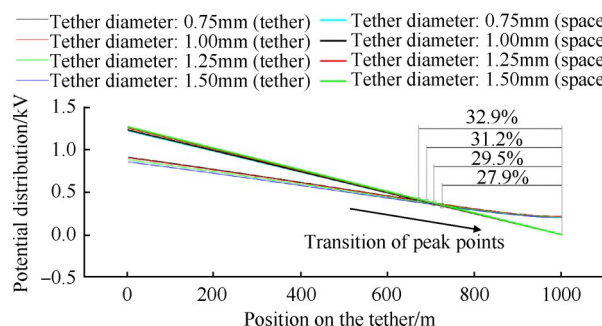


Fig. 13 Potential distribution of both tether and plasma at different tether diameters

每一个位置都刚好高于空间电势微小量,这个微小量所产生的阴极端 OML 收集总电流恰好与热发射电流对等;(2)如果绳系和空间对壁面电荷输运都几乎没有自洽调整能力时(类似金属导体中的电荷输运),会出现图 14(b)的情况,只有接近阴极端附近的绳系与空间才进行电荷收集,而较远的空间和绳系都处于闲置状态,绳系电势在收集区大幅度高于空间电势,而闲置区域则与空间电势几乎相等。因而,无论出现以上哪一种情况,都意味着绳系上不会存在电子发射区,而只有收集区。

实际上,如图 9、图 11 和图 13 所示,绳系与空间对电子输运的自洽调整能力是不同的:电子在固体内的自洽调整能力是非常弱的,而电子在真空中的自洽调整能力是非常强的,两者的本质在于电子散射传导的灵活性较低,而电子双极扩散输运的灵活性极高。即电子在固体内受电阻的影响,不能随意调整电势分布,但电子在真空中可以通过双极扩散作用来反作用于空间电势,这是真空电子输运与固体电子输运的本质差别。正因为存在这种差别,壁面电荷输运机制的差别会导致两种电子输运过程对电势变化的自洽调整情况不同,会有峰值点的存在,才会在 OML 机制占优时出现峰值点的漂移现象。

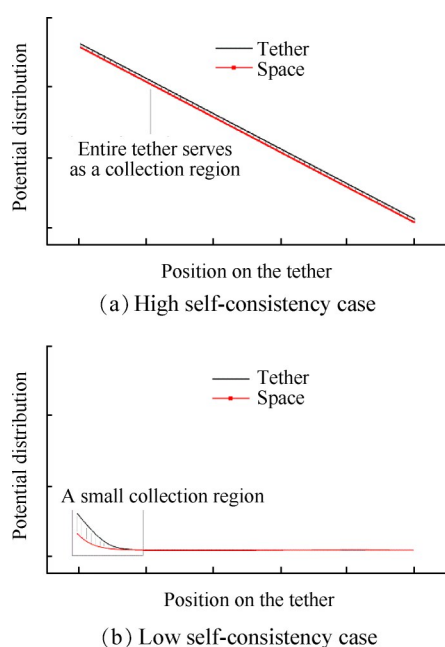


Fig. 14 A diagrammatic sketch of the tether and plasma potential distribution in two typical cases

4 结 论

本文通过建立空间电力绳系电子收集与发射的自洽平衡算法,对在轨工况下的绳系相关物理参数的分布进行了数值模拟,主要结论如下:

(1) 3D-CSC算法建立了空间等离子体与绳系电路之间的电荷、电势场自洽平衡的耦合模型,在收集电流方面的计算精度约为12.8%左右,在场参数方面的计算精度约为3.6%,具备对绳系工作特性仿真的能力,同时,为电子在固体-真空中的相关输运过程仿真提供了数值方法。

(2) 电子在真空与固体中运输形式的差别,以及OML电子收集机制在各类壁面电荷输运机制中占优,是导致绳系出现电流峰值点的原因。并且,随着偏置电压、绳系长度或绳系直径的增大,绳系的电流峰值点均会在长度比例上向阳极端移动。

参考文献

- [1] Ohkawa Y, Kawamoto S, Okumura T, et al. Preparation for On-Orbit Demonstration of Electrodynamic Tether on HTV [C]. Japan: 34th International Electric Propulsion Conference, 2015.
- [2] Ohkawa Y, Kitamura S, Kawamoto S, et al. A Carbon Nanotube Field Emission Cathode for Electrodynamic Tether Systems [C]. Wiesbaden: 32nd International Electric Propulsion Conference, 2011.
- [3] Bilen S, McTernan J, Gilchrist B, et al. Harnessing the

“Orbital Battery” for Propulsion via Energy-Harvesting Electrodynamic Tethers [C]. Wiesbaden: 32nd International Electric Propulsion Conference, 2011.

- [4] Bonometti J, Sorensen K. 2006 State of the Momentum Exchange Electrodynamic Re-Boost (MXER) Tether Development [C]. Sacramento: 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2006.
- [5] Ahedo E, Sanmartin J. Analysis of Bare-Tether Systems for Deorbiting Low-Earth-Orbit Satellites [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2002, 39(2): 198-205.
- [6] Sanmartin J, Estes R, Lorenzini E, et al. Efficiency of Electrodynamic Tether Thrusters [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2006, 43(3): 659-666.
- [7] Zhu Z H, Larouche B, James G. Design of a Electrodynamic Tether Nanosatellite Mission [C]. Long Beach: AIAA SPACE 2011 Conference & Exposition, 2011.
- [8] Zhong R, Zhu Z H. Dynamics of Nanosatellite Deorbit by Bare Electrodynamic Tether in Low Earth Orbit [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2013, 50(3): 691-700.
- [9] Zhong R, Zhu Z H. Optimal Control of Nanosatellite Fast Deorbit Using Electrodynamic Tether [J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2014, 37(4): 1182-1192.
- [10] Sanmartin J, Martinez-Sanchez M, Ahedo E. Bare Wire Anodes for Electrodynamic Tether [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1993, 9(3): 353-360.
- [11] Sanmartin J, Estes R. The Orbital-Motion-Limited Regime of Cylindrical Langmuir Probes [J]. *Physics of Plasmas*, 1999, 6(1): 395-405.
- [12] Mott-Smith H, Langmuir I. The Theory of Collectors in Gaseous Discharges [J]. *Physical Review*, 1926, 28: 727-763.
- [13] Fuhrhop K, Gilchrist B. Electrodynamic Tether System Analysis Comparing Various Mission Scenarios [C]. Tucson: 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2005.
- [14] Janeski J, Hall C, Scales W. Effects of Local Plasma Environment on Dynamics of Electrodynamic Tether Systems [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2015, 52(2): 496-505.
- [15] Arriaga G, Bombardelli C, Chen X. Impact of Nonideal Effects on Bare Electrodynamic Tether Performance [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2015, 31(3): 951-955.
- [16] Xie K, Martinez R, Williams J. Current-Voltage Characteristics of a Cathodic Plasma Contactor with Discharge Chamber for Application in Electrodynamic Tether Propulsion [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(15).
- [17] Xie K, Xia Q, Williams J, et al. Extracted Current, Bi-

- as Voltage, and Ion Production of Cathodic Hollow-Cathode-Driven Plasma Contactor [J]. *Journal of Spacecraft and Rocket*, 2015, 52(4): 1181–1192.
- [18] Xie K, Farnell C, Williams J. The Plasma Properties and Electron Emission Characteristics of Near-Zero Differential Resistance of Hollow Cathode-Based Plasma Contactors with a Discharge Chamber [J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(8): 353–360.
- [19] Qin Y, Xie K, Guo N, et al. The Analysis of High Amplitude of Potential Oscillations Near the Hollow Cathode of Ion Thruster [J]. *Acta Astronautica*, 2017, 134(1): 265–277.
- [20] Qin Y, Xie K, Ouyang J. Self-Pulsing in a Low-Current Hollow Cathode Discharge: From Townsend to Glow Discharge [J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23(2).
- [21] Santos R, Ahedo E. Accuracy Improvements in a Hall Thruster PIC/Fluid Code [C]. *Denver: 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2009.
- [22] Onishi T, Martinez-Sanchez M, Cooke D. Computation of Current to a Moving Bare Tether [C]. *Kitakyushu: 26th International Electric Propulsion Conference*, 1999.
- [23] Onishi T, Martinez-Sanchez M, Cooke D, et al. PIC Computation of Electron Current Collection to a Moving Bare Tether in the Mesothermal Condition [C]. *Pasadena: 27th International Electric Propulsion Conference*, 2001.
- [24] 潘 杰. 大气压 Ar、N₂ 和 Ar/O₂ 气体脉冲介质阻挡放电等离子体机理及特性的数值模拟 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [25] Shunsuke S, Toshiyuki K, Junichiro A, et al. Discharge Modes and Characteristics of Hollow Cathode [C]. *Flornence: 30th International Electric Propulsion Conference*, 2007.
- [26] Boltachev G, Zubarev N. Space Charge Influence on the Angle of Conical Spikes Developing on a Liquid-Metal Anode [J]. *Physical Review E*, 2012, 77: 1–10.
- [27] 林祖伦, 王小菊. 阴极电子学 (第一版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.

(编辑: 朱立影)