电帆推进在等离子体环境下推力影响因素分析和试验研究 *

赵博强，李　永，于　洋

（北京控制工程研究所，北京 100190）

摘　要：为了分析电帆推力的影响因素，根据电帆推进原理设计了电帆地面模拟装置。首先分析了真空中带电导线和等离子作用机理，得出了电帆推力公式。利用朗缪尔探针测量了电帆模拟试验环境中等离子体参数，计算产生推力的大小，最后通过微推力测量系统测量电帆产生的推力，与计算结果进行了对比。根据推力公式和仿真结果表明，提高电压、增加带电粒子密度和速度、增加电帆长度均可增加推力。在试验中电帆上电压从300V增加到800V时，推力从9μN增加到26μN。仿真和试验结果表明，电压、带电粒子密度和速度、电帆导线长度都对推力有影响。根据试验结果，电帆推力公式的经验推力系数在1～2取值。

关键词：电帆；等离子体；朗缪尔探针；微推力测量；地面模拟

中图分类号：V433.9　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1001-4055（2022）06-200520-07

DOI：10.13675/j.cnki. tjjs. 200520

Theoretical and Experimental Research on Thrust Factor of Electric Sail Propulsion in Plasma Environment

ZHAO Bo-qiang，LI Yong，YU Yang

（Beijing Institute of Control Engineering，Beijing 100190，China）

Abstract：In order to analyse the influence factors of the electric sail thrust，the electric sail ground simulation equipment is designed according to the electric sail propulsion theory. Firstly，to obtain the thrust formula of electric sail，the interaction mechanism of charged wire and plasma in vacuum is analysed. Langmuir probes are used to measure the plasma parameters in the simulation environment of the electric sail，and the thrust generated by the electric sail is calculated. Finally，the thrust generated by the electric sail is measured by a micro-thrust measurement system and compared with the calculated result. According to the thrust formula and the simulation result，the thrust increases while the voltage，the density and velocity of charged particles，and the length of electric sail increase. When the voltage on the sail increases from 300V to 800V，the thrust increases from 9μN to 26μN. The simulation and experiment results show that the voltage，the density，and velocity of charged particles，and the length of the electric sail wire all affect the thrust. Based on the results，the empirical thrust coefficient of the electric sail thrust formula is between 1 and 2.

Key words：Electric sail；Plasma；Langmuir probe；Micro thrust measurement；Ground simulation

*　**收稿日期**：2020-07-14；**修订日期**：2021-03-09。

作者简介：赵博强，博士生，研究领域为空间核电推进。

通讯作者：李　永，博士，研究员，研究领域为先进空间推进技术。

引用格式：赵博强，李　永，于　洋. 电帆推进在等离子体环境下推力影响因素分析和试验研究[J]. 推进技术，2022，43（6）：200520.（ZHAO Bo-qiang，LI Yong，YU Yang. Theoretical and Experimental Research on Thrust Factor of Electric Sail Propulsion in Plasma Environment[J]. *Journal of Propulsion Technology*，2022，43(6)：200520.）

1　引　言

芬兰气象研究所的 Janhunen[1] 在 2004 年提出了电帆的概念，并提出了矩形电帆结构，它是一种利用太阳风中质子在电场中进行偏转产生推力的推进系统，具有无工质、质量轻的特点。电帆由若干细长、均匀展开的细长导线组成，在空间中通过机构或者离心甩动方式展开。

和太阳帆相比，电帆不需要大面积的薄膜结构，可以节省重量。另外，太阳帆利用太阳光压作为动力，光压按照到太阳距离的平方衰减，因此太阳帆只能在内太阳系使用，而电帆利用等离子体产生推力。根据目前的研究结果[2-3]，太阳风和电离层中的等离子体浓度约为 10^9~$10^{12}\mathrm{m}^{-3}$。等离子体速度在电离层中约为几百米每秒，在太阳风中甚至能达到几百公里每秒。在这种环境中，电帆是可以产生比较可观的推力。因此电帆可利用太阳风或者电离层甚至可以利用宇宙空间中的一定浓度的等离子体产生推力，应用更加灵活。

Janhunen[4-5] 对太阳风作用在单根导线上的作用力进行了理论推导，并进行了一维和二维数值仿真。研究得到了单位长度导线受力与电压的函数关系。Mengali 等[6] 对电帆的推力进行了计算，提出一个质量 100kg，配置了 200 条 10km 导线的电帆，在距太阳 1AU（地日距离）的地方，推力为 1N，航天器可以达到 $1\mathrm{mm/s}^2$ 的加速度。对推力的计算还要考虑太阳风的变化情况。Toivanen 等[7] 对太阳风变化情况下的电帆推力、速度等进行了计算和仿真，指出电帆是适合完成火星探测等深空探测任务的。

电帆推力控制是电帆姿态控制和轨迹规划的基础[8-15]，电帆推进系统的推力理论验证是一项重要的工作。目前的研究大多是利用理论或数值仿真来计算电帆的推力，没有进行实验验证。本文进行带电粒子与通电导线相互作用的实验研究，模拟电帆在空间中的真实工作情况，对电帆设计进行试验验证。

2　推力产生机制和理论分析

2.1　推力产生原理

电帆在真空中产生推力的机理如图 1 所示，离子在带电导线附近受到电场力作用产生偏转，从而对电帆产生推力。

在真空中，长直带电导线的电势可表示为[16]

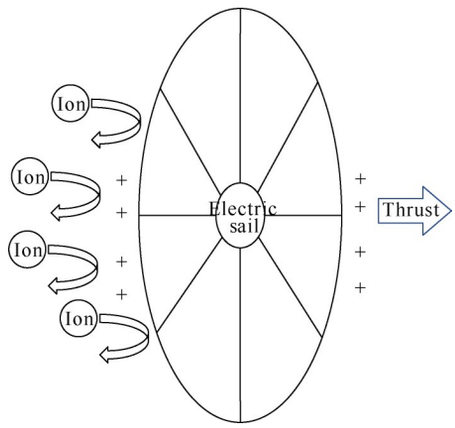


Fig. 1　Thrust generation principle

$$U(r)=\frac{U_0\ln\left(r_\infty/r\right)}{\ln\left(r_\infty/r_\mathrm{w}\right)} \tag{1}$$

式中 r_∞ 是无穷远的零电势处，即 $U\left(r_\infty\right)=0$，r_w 是长直导线的半径，U_0 为长直导线的电势。

由于等离子体的屏蔽作用，当长直带电导线在等离子体中，电势的衰减速度比真空状态下更快，在文献[17]中，根据等离子体仿真的结果，可以将导线在空间中的电势近似修正为[17]

$$U(r)=U_0\frac{\ln\left[1+\left(\dfrac{r_0}{r}\right)^2\right]}{\ln\left[1+\left(\dfrac{r_0}{r_\mathrm{w}}\right)^2\right]} \tag{2}$$

式中 $r_0=2\lambda_\mathrm{D}$，λ_D 是等离子体的德拜长度。

由于构成电帆的导线非常细，认为 $r_\mathrm{w}\ll r_0$，可将公式（2）化简为

$$U(r)=\frac{U_0}{2}\frac{\ln\left[1+\left(\dfrac{r_0}{r}\right)^2\right]}{\ln\dfrac{r_0}{r_\mathrm{w}}} \tag{3}$$

根据高斯定律得到电子密度

$$n_\mathrm{e}=n_0+\frac{\epsilon_0}{er}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left(rU'(r)\right)=n_0\left[1+\frac{eU_0}{2T_\mathrm{e}}\frac{1}{\left(1+\left(r/r_0\right)^2\right)^2\ln\left(r_0/r_\mathrm{w}\right)}\right] \tag{4}$$

当 $r\ll r_0$ 时，电子密度 n_e 比未受到带电导线扰动的等离子体电子密度 n_0 高出 40~60 倍，当 $r\gg r_0$ 时，与 n_e 以 $1/r^4$ 的衰减速度趋近于 n_0。等离子体整体保持电中性，多余的电子对离子有一定的吸引作

用，可以看出带电导线对空间等离子体有吸引的作用。

电帆推力产生的直接原因是电场对离子的偏转，偏转作用在距离导线非常近的鞘层之中发生的，根据文献[17]中对带电导线周围鞘层半径的推导，等离子体在通电导线周围产生的鞘层半径为[4,17]

$$R = \frac{\tilde{U}\sqrt{2\epsilon_0/p_{\mathrm{dyn}}}}{1+\sqrt{1+en_{\mathrm{e}}\tilde{U}/p_{\mathrm{dyn}}}} \tag{5}$$

式中

$$\tilde{U} = \max\frac{\left[0, U_0 - U_{\mathrm{w}} - \left(en_{\mathrm{e}}/\left(4\epsilon_0\right)\right)R^2\right]}{\lg\left(R/r_{\mathrm{w}}\right)}$$

式中太阳风动压 $p_{\mathrm{dyn}} = m_{\mathrm{i}}n_{\mathrm{i}}u^2$，其中 m_{i} 为离子质量，n_{i} 和 u 分别为等离子体离子密度和速度；U_{w} 是太阳风动能的电势，可根据公式 $U_{\mathrm{w}} = m_{\mathrm{i}}u^2/(2e)$ 计算获得。

推力大小可以表示为[17]

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}s} = Kp_{\mathrm{dyn}}R \tag{6}$$

式中 K 为经验推力系数，根据文献[17]中的讨论，K 值和等离子体浓度和离子速度相关，s 为导线的弧长。由于在鞘层之中存在强烈的电场，电子被导线吸引，因此在鞘层中电子密度近似于 0，可得到推力与电压之间的简化关系如下

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}s} \approx \frac{\sqrt{2}\,K}{2\lg\left(R/r_{\mathrm{w}}\right)}\max\left(0, U_0 - U_{\mathrm{w}}\right)\sqrt{\varepsilon_0 p_{\mathrm{dyn}}} \tag{7}$$

2.2　不同因素对推力的影响

为了验证推力公式的正确性，并分析不同因素对推力产生的影响，根据公式(7)，对影响推力的各种因素进行仿真分析。为了和之后实验结果进行对比，这里仿真参数采用了实验室中仿真环境的参数。真实环境下电帆尺寸可以制作的非常巨大。能达到数十甚至数百公里，在低密度等离子体环境下可以产生足够的推力。根据计算在等离子体密度为 $10^9\mathrm{m}^{-3}$ 时计算得到的单位长度导线推力为 0.07μN/m，等离子体密度为 $10^{14}\mathrm{m}^{-3}$ 时单位长度导线推力为 57.13μN/m，可以看出在提高等离子体密度后，单位长度导线产生的推力大大提高，由于在地面试验受到设备条件限制，无法试验真实电帆的尺寸，因此在实验中采用了提高等离子密度、减小电帆尺寸的方法来进行试验。

首先，分析电压对推力的影响。假设等离子体密度 $6.9\times10^{14}\mathrm{m}^{-3}$，等离子体速度 14470m/s，线缆长度 0.106m。线缆上电压的变化为[300V，1200V]。推力仿真的结果见图 2，可以看出随着电压增加，电帆的推力也随之增加，推力和导线电压成线性关系。

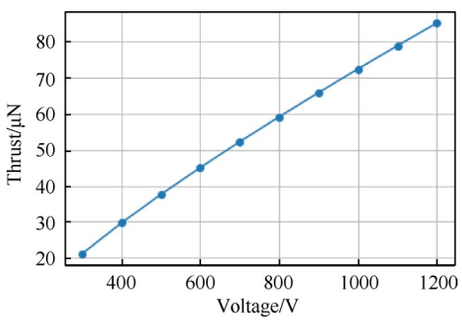


Fig. 2　Thrust and voltage relationship

其次，分析等离子体密度对推力的影响。假设线缆电压 500V，等离子体速度 14470m/s，线缆长度 0.106m。等离子体密度的变化为[$10^7\mathrm{m}^{-3}$，$10^{16}\mathrm{m}^{-3}$]。通过图 3 可以看出等离子体密度增加，电帆推力也随之增加。在等离子体密度小于 $10^{15}\mathrm{m}^{-3}$ 的时候，推力增加很慢，当等离子体密度超过 $10^{15}\mathrm{m}^{-3}$ 推力随着密度增加迅速增加。

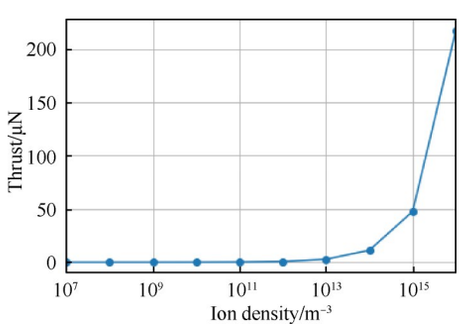


Fig. 3　Thrust and ion density relationship

再次，分析等离子体离子速度对推力的影响，假设线缆电压 500V，等离子体密度 $6.9\times10^{14}\mathrm{m}^{-3}$，线缆长度 0.106m。离子速度变化范围为[1000m/s，10000m/s]。

从图 4 中可以看出电帆的推力随着离子速度的增加而增加。随着离子速度越大，推力的变化量逐渐减小。

最后，分析导线长度对推力的影响，假设线缆电压 500V，等离子体密度 $6.9\times10^{14}\mathrm{m}^{-3}$，等离子体速度 14470m/s，线缆长度变化为[0.1m，1m]。通过图 5 可

以看出电帆推力随着导线长度增加而增加，推力和线缆长度呈线性关系。

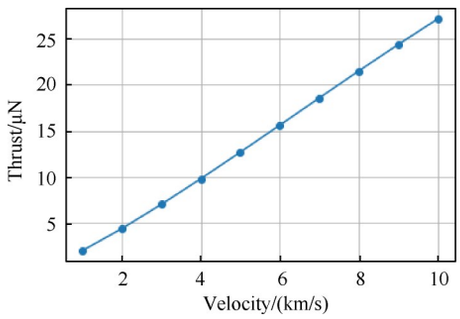


Fig. 4　Thrust and ion velocity relationship

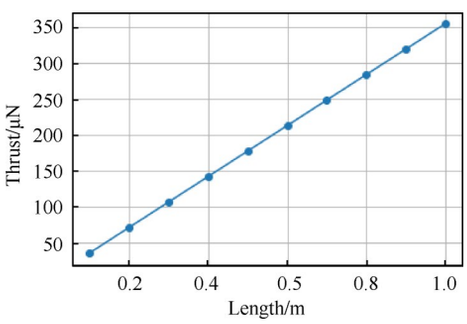


Fig. 5　Thrust and wire length relationship

通过以上仿真结果，可以看出，不同的参数对电帆推力影响不同，其中等离子体的密度对推力的影响较大，随着等离子体密度增大，推力增加速度很快。而等离子体速度对推力影响较小，随着速度增加，推力增加的速度逐渐减小。在 2.1 小节中分析可知，电帆推力主要是通过带电粒子和导线之间相互作用产生，可以看成是带电粒子和导线的一种库伦碰撞，库伦碰撞的次数随着等离子体密度增加快速增加，随着等离子体速度增加碰撞次数迅速减小。而电帆电压和电帆导线长度对推力的影响是线性的。

和文献[16]中电帆推力的 PIC 模拟结果进行对比[16]。文献[10]中仿真了离子速度从 0~800km/s 之间变化，在 0 ~ 400km/s 内推力随着速度的增加而增加，在离子超过 400km/s 之后，推力随着速度增加而减小。由于本文中电帆的尺度较小，对于较大范围的速度仿真不准确，因此只仿真了 1 ~ 10km/s。在仿真的区间内，本文的推力变化趋势和文献中是一致的。

在实际应用中，等离子体参数是环境因素，无法人为控制，同时，电帆的尺寸也是确定的。为了控制电帆推力，可以利用控制电帆上加载的电压来控制电帆产生的推力，在下面的实验中通过控制电帆上加载不同的电压来测量产生的推力。

3　地面模拟试验和结果分析

3.1　测试试验系统和环境参数

图 6 为推力测试台架、模拟电帆的实物照片。按照整体方案设计，改造后的推力测试装置由扭摆式台架结构、电容位移计和计算机数据采集三大部分组成。阻尼系统采用电磁阻尼系统，计算机数据采集系统对位移计的数据进行采集。

按照设计，测力台架放置于固定架平面上，固定架通过地脚螺栓与真空舱底部相连。在推力测试台架对面 2.5m 处放置霍尔推力器，用来产生带电粒子。

试验中使用的模拟电帆的材质为铜和不锈钢丝，并利用铜和不锈钢丝制成网状结构，推力测试系统的测力量程为 1~1000μN，测力精度约为 1μN，分辨率优于 0.5μN。

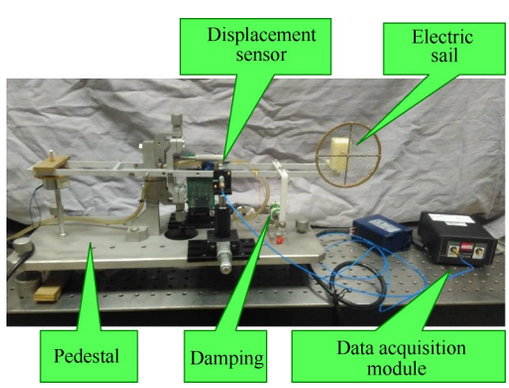


Fig. 6　Thrust measuring bench and electric sail

试验中使用了 2kW 的霍尔推力器，来模拟空间中的等离子环境。表 1 为利用 Langmuir 探针测量得到的霍尔推力器在 0.8m 处测得的参数。

Table 1　Parameters of Hall thruster at 0.8m

Parameter	Value
Space potential/V	13.7054
Saturated electron current/A	7.09×10^{-3}
Saturated ion current/A	4.05873×10^{-4}
Floating potential/V	6.02774
Electron temperature/eV	2.52385

利用测得的参数计算离子浓度

$$n_{\mathrm{i}} = 2.5566 \times 10^{28}\frac{I_{\mathrm{sat}}\sqrt{M}}{A\sqrt{T_{\mathrm{eV}}}} \tag{8}$$

式中I_{sat}为饱和离子电流，A为探针收集有效面积，这里使用的探针可以等效为半径12mm的圆面，M为所测等离子体的原子质量，T_{eV}为电子温度，n_i为离子密度。

计算得离子密度$n_i = 6.7 \times 10^{15}\mathrm{m}^{-3}$，电子温度$T_{eV} = 2.52385\mathrm{eV}$。根据饱和离子电流，电流的微观定义为$I = neSv$，根据离子密度，计算得到离子的平均运动速度为$v_i = 14470\mathrm{m/s}$。

以上结果是推力器在0.8m处的参数，通过在0.8m处的参数来求解在2.5m处等离子体的参数。假设在真空中，离子速度不变，离子密度和距离平方成反比，据此估计出在2.5m处的等离子体密度和离子速度，计算得$n_i = 6.9 \times 10^{14}\mathrm{m}^{-3}$，离子平均速度为$v_i = 14470\mathrm{m/s}$。

模拟电帆为直径106mm的网状导线，其导线为不锈钢材质，直径约为0.5mm，网孔为边长2mm的正方形，见图7所示。

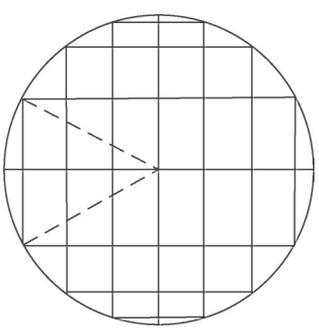


Fig. 7 Experimental electric sail diagram

图8是根据公式(5)得到的在不同电压下带电导线鞘层厚度的计算结果，可以看出等离子体鞘层的厚度大于到导线间的距离，鞘层之间出现重叠。因此在计算模拟电帆导线长度的时候，将电帆的宽度作为电帆的导线长度，为0.106m。

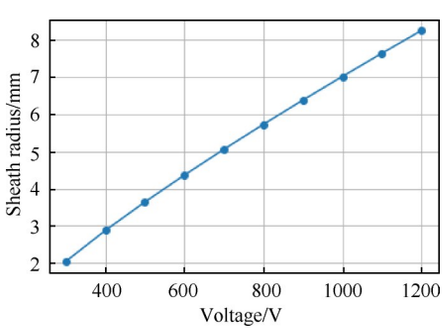


Fig. 8 Thickness of sheath varies with voltage

3.2 试验结果与讨论

下面是在模拟电帆上加载不同电压的试验结果，电压变化范围为[300V，800V]，步长为100V，图9为试验中测得的计算结果。

图9中是加载300~800V电压的情况，图中黑色细线是滤波之前的电压测量值，红色粗线是滤波之后的电压值，由于等离子体环境对信号传输产生一定影响，测量值有一些波动，通过滤波可以更清楚地看出推力测量值。可以看出，加载300V电压下推力大约为9μN，加载400V电压推力大约为10μN，加载500V电压推力大约为12μN，加载600V电压推力大约为15μN，加载700V电压推力大约为23μN，加载800V电压推力大约为26μN。可以看出，随着模拟电帆上的电压增加，在模拟电帆上测量到的推力也随之增大，这和之前理论计算的趋势是一致的。表2为理论计算出的推力和实际测量的推力的对比结果。

图10为理论推力和实际推力的对比图，其中经验推力系数K根据文献[4]的仿真结果取3.09。从图10中可以看出，理论计算的结果是随电压呈线性增长，实际测量得到的推力结果在电压小于700V的时候随电压增长推力增长迅速，接近指数增长，在700V之后推力增长速度放缓。

在文献[4]中认为经验推力系数K受到等离子体浓度、电子温度和离子速度的影响，是一个在2和3附近的数，需要根据具体试验和仿真结果来确定[4]。在文献[16]中，作者通过仿真得到在太阳风环境中K取3.09是一个比较合适的数值[16]。在本文的模拟实验中，由于试验的环境和文献中模拟的环境相差较大，因此K取3.09并不是一个合适的数值，因此出现的误差较大。图11是对不同的K值进行对比的结果，可以看出在K取值为1时，计算结果小于试验结果，取值为2时，计算结果大于实验结果。根据试验结果，在K值选择1~2是比较合适的，文献[4]中取值3.09在本文的试验环境中误差过大。

K值还需要根据更多的实验数据确定。从图11中还可以看出，在选择了合适的系数K以后，理论计算得到的推力值和实测推力之间大约有15%~45%的误差，通过分析实验过程，认为推力误差来源主要有两个方面：首先Langmuir探针测量受到多种因素的影响存在误差[18-19]；其次模拟电帆是网状结构，存在鞘层计算重叠，在计算电帆长度时存在计算不准确的情况。

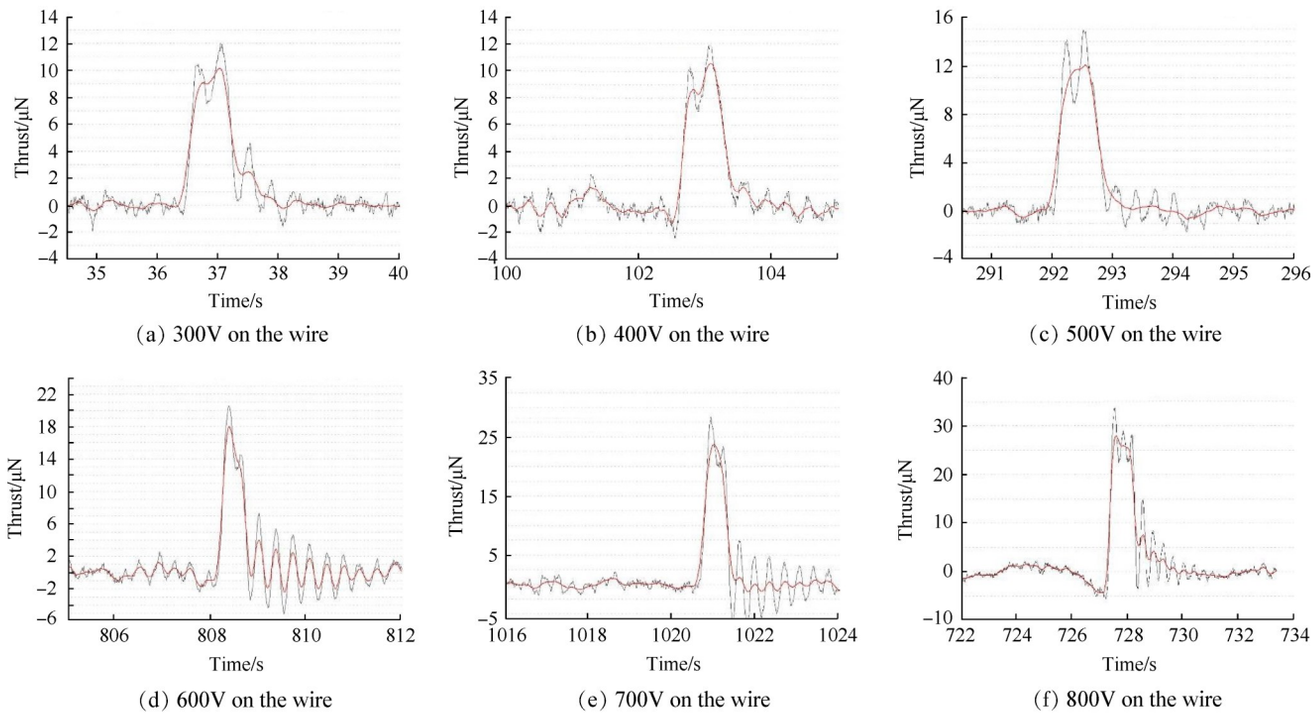


Fig. 9　Thrust in different voltage

Table 2　Results of experiment

Voltage/V	Current/A	Experiment thrust/μN	Calculation thrust/μN
300	2.02	9	21.8
400	2.48	10	29.7
500	3.00	12	37.6
600	3.43	15	45.0
700	3.92	23	52.2
800	4.20	26	59.1

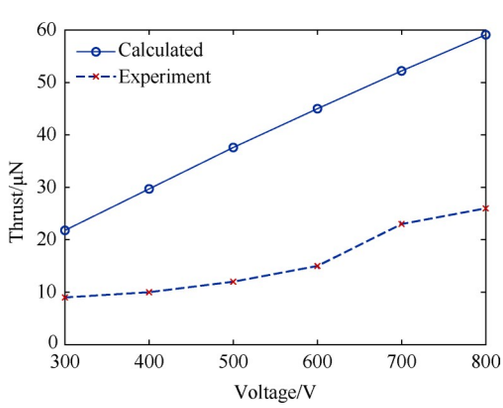


Fig. 10　Theoretical and experimental thrust comparison

根据以上分析，可以看出电帆推力测量值和理论值的误差在等离子体探针测量误差范围内，故可以认为实验的结果和理论计算是一致的，从而验证了电帆理论的正确性。

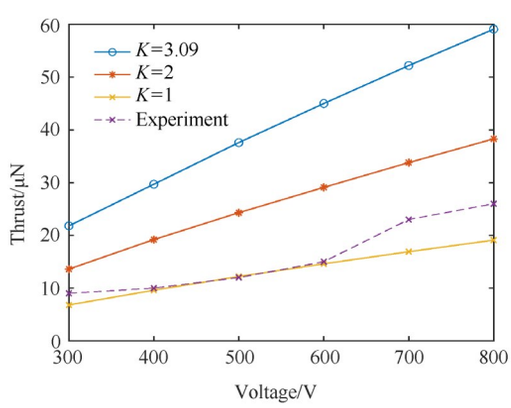


Fig. 11　Theoretical thrust of different *K* value

4　结　论

本文通过对电帆推进系统进行了理论和试验分析，得到如下结论：

（1）通过对电帆推力公式的理论分析，得到电帆的推力随着电帆上加载电压、等离子体密度、等离子体速度、电帆长度的增加而增加。

（2）通过试验研究，电帆上加载的电压在 300～800V 变化过程中，推力从 9μN 增加到 26μN。

（3）分析了经验推力系数对推力计算数值的影响，根据分析，在 *K* 取值在 1～2 计算得到的推力值结果和试验结果比较吻合。

参考文献

[1] Janhunen P. Electric Sail for Spacecraft Propulsion[J].

Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(4): 763-764.

[2] 刘裔文, 徐继生, 徐 良, 等. 顶部电离层和等离子体层电子密度分布—基于GRACE星载GPS信标测量的CT反演[J]. 地球物理学报, 2013, 56(9): 2885-2891.

[3] 涂传诒. 日地空间物理学: 行星际与磁层(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 1988.

[4] Janhunen P. Increased Electric Sail Thrust Through Removal of Trapped Shielding Electrons by Orbit Chaotisation due to Spacecraft Body[J]. *Annales Geophysicae*, 2009, 27(8): 3089-3100.

[5] Janhunen P. Electrostatic Plasma Brake for Deorbiting a Satellite[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(2): 370-372.

[6] Mengali G, Quarta A A, Janhunen P. Considerations of Electric Sailcraft Trajectory Design[J]. *Journal of the British Interplanetary Society*, 2008, 61(8): 326-329.

[7] Toivanen P K, Janhunen P. Electric Sailing under Observed Solar Wind Conditions[J]. *Astrophysics and Space Sciences Transactions*, 2009, 5(1): 61-69.

[8] Niccolai L, Quarta A A, Mengali G. Two-Dimensional Heliocentric Dynamics Approximation of an Electric Sail withFixed Attitude[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 71(12): 441-446.

[9] Mengali G, Quarta A A. Non-Keplerian Orbits for Electric Sails[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2009, 105(1-3): 179-195.

[10] 王 昱, 边炳秀, 李 永, 等. 电帆日心悬浮轨道稳定控制[J]. 航天控制, 2015, 33(5): 39-47.

[11] 王 昱, 边炳秀, 李 永, 等. 电帆深空转移轨迹制导方法研究[C]. 青岛: 第27界中国控制与决策大会, 2015.

[12] 齐乃明, 霍明英, 袁秋帆. 电动帆轨迹优化及其性能分析[J]. 宇航学报, 2013, 34(5): 634-641.

[13] 王 昱, 魏延明, 边炳秀, 等. 基于粒子群算法的电帆轨迹优化设计[J]. 中国空间科学技术, 2015, 35(3): 36-44.

[14] Huo M, Mengali G, Quarta A A. Electric Sail Thrust Model from a Geometrical Perspective[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2018, 41(3): 735-741.

[15] Caruso A, Niccolai L, Mengali G, et al. Electric Sail Trajectory Correction in Presence of Environmental Uncertainties[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 94(10).

[16] Janhunen P, Sandroos A. Simulation Study of Solar Wind Push on a Charged Wire: Basis of Solar Wind Electric Sail Propulsion[J]. *Annales Geophysicae*, 2007, 25(3): 755-767.

[17] Janhunen P, Toivanen P, Polkko J, et al. Invited Article: Electric Solar Wind Sail: Toward Test Missions[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(11).

[18] Demidov V I, Ratynskaia S V, Rypdal K. Electric Probes for Plasmas: The Link between Theory and Instrument[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73(10): 3409-3439.

[19] 叶 超. 低气压低温等离子体诊断原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

(编辑:梅 瑛)