

# 用于脉冲等离子体推力器烧蚀过程仿真的 新型机电模型\*

张华<sup>†</sup> 吴建军 张代贤 张锐 何振

(国防科技大学, 航天科学与工程学院, 长沙 410073)

(2013年5月12日收到; 2013年8月5日收到修改稿)

用于脉冲等离子体推力器(PPT)工作过程仿真的一维机电模型, 具有模型简单、计算周期短等优点, 在PPT设计过程中得到了广泛应用. 本文针对机电模型假设工质烧蚀质量为常数和考虑烧蚀过程这一局限, 提出了一种采用Teflon一维烧蚀模型计算工质烧蚀质量的改进模型, 并以LES-6 PPT为研究对象进行了仿真. 通过与LES-6 PPT实验数据进行对比, 仿真结果与实验数据符合, 充分验证了模型的可靠性. 此模型能够对Teflon工质在PPT工作过程中的温度变化和烧蚀过程进行仿真, 弥补了机电模型忽略烧蚀过程对仿真结果所造成的影响, 同时, 此模型依然保持了机电模型简单易于实现的优点, 对于脉冲等离子体推力器的设计具有重要意义.

**关键词:** 脉冲等离子体推力器, 机电模型, 烧蚀模型, 数值仿真

**PACS:** 02.60.Cb, 52.75.Di, 36.40.Gk, 05.70.-a

**DOI:** 10.7498/aps.62.210202

## 1 引言

近年来, 微小卫星以其体积小、成本低、研制周期短等优点, 在通信、遥感、军事侦察等领域得到了广泛应用. 电推进系统的比冲范围特别适合用作微小卫星的推进系统, 目前, 我国已经对电推进系统进行了大量的相关研究<sup>[1-9]</sup>. 采用固体推进剂的烧蚀型脉冲等离子体推力器是电推进的一种, 具有结构简单、可靠性高、推力范围广、比冲高等优点, 特别适合用于微小卫星的位置保持、阻力补偿、星座编队飞行等空间飞行任务<sup>[10-14]</sup>. 如今, 脉冲等离子体推力器已经在多个空间飞行任务中得到成功应用, 虽然其结构简单, 但工作过程涉及多种电热、电磁的复杂反应, 很多过程的内在机理尚未完全清楚. 现在和未来的一段时间内, 为了探寻其工作机理还需要大量的研究工作. 对脉冲等离子体推力器的研究主要有数值研究和实验研究, 虽然目前已经有高精度三维仿真模型应用于脉冲等离子体推力器的研究<sup>[15,16]</sup>, 但是为了降低成本和缩

短设计周期, 精度稍低的一维数值模拟手段依然是必要的.

目前, 针对PPT数值研究的一维数值模型主要是机电模型. 如图1和图2所示, 机电模型将PPT等效成一个LRC电路和等离子体加速过程的动力学系统来模拟PPT的工作过程<sup>[17]</sup>. 虽然其模型简单, 但仿真结果和实验结果符合较好, 结合实验数据可以预测PPT工作参数对其性能的影响, 对于推力器设计具有很大的指导作用, 是PPT研究的一种重要手段.

1970年, Vondra在保持机电模型不变的基础上, 考虑气动力的影响, 在运动方程中加入了气动力项<sup>[18]</sup>. 1982年, 魏荣华考虑到放电通道内等离子体的实际行为, 将通道内电流片厚度视为随放电电流改变的, 在机电模型的基础上建立了“扩散模型”<sup>[19]</sup>. 2004年, Gatsonis和Demetriou为了优化PPT的喷气速度, 在机电模型的运动方程中加入了阻尼和控制项建了一个反馈控制器<sup>[20]</sup>. 2005年, Laperriere更加详尽地对等离子体电阻以及通道内电感模型进行了推导, 建立了一种改进的机电模

\* 国家自然科学基金(批准号: 11172327)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: zhann10000@163.com

型 [21]. 2011 年, Yang 假设工质烧蚀质量随时间变化, 并采用经验公式 [22] 进行计算, 对机电模型进行了改进 [23]. 在上述的机电模型中, 工质烧蚀质量一般采用常数或者经验公式进行计算, 而在 PPT 的实际工作过程中, 工质烧蚀质量与推力器的具体工作过程密切相关, 工质烧蚀质量是不断增加的, 不同时刻烧蚀的工质所受到的加速过程也完全不同 [24]. 并且, 工质的烧蚀过程对推力器的性能具有很大的影响 [25]. 因此, 上述机电模型与物理事实差别较大, 无法反映推力器工作过程中工质烧蚀的具体过程, 存在一定的局限性.

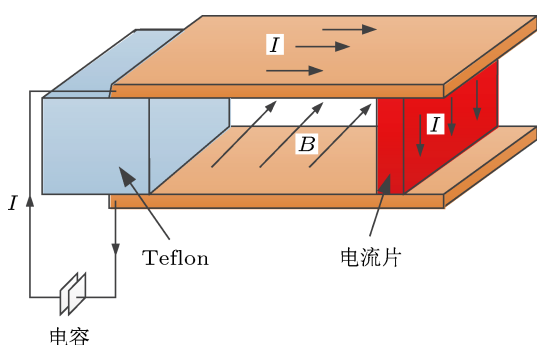


图 1 PPT 结构示意图

聚四氟乙烯 (PTFE, 通常称为 Teflon) 具有优良的介电特性、热力学特性、真空环境下的稳定性以及价格便宜等优点, 是 PPT 的理想推进剂, 目前, 已经有很多关于 Teflon 烧蚀过程的数值和实验研究 [26-30]. 1972 年, Clark 进行了 Teflon 的烧蚀实验, 并建立了一维烧蚀模型, 数值仿真结果与实验结果符合 [31]. 在 Clark 的基础上, Arai 考虑结晶项和非结晶项的光学透射率, 建立了处在强辐射和对流环境中的 Teflon 一维烧蚀模型 [32]. 2007 年, Nikolaos 在 Clark 的基础上将 Teflon 的烧蚀过程分为三个阶段建立改进的一维烧蚀模型, 并对烧蚀过程进行了仿真 [26]. 上述针对 Teflon 烧蚀过程的数值研究都是脱离 PPT 工作过程的单纯的烧蚀过程的研究, 没有与 PPT 工作过程相耦合, 无法直观地体现烧蚀过程对 PPT 工作过程及其性能的相互影响. 基于磁流体动力学 (MHD) 模型对 PPT 工作过程进行仿真可以反映 PPT 工作过程中工质烧蚀的具体过程, 是目前较为常用的 PPT 工作过程仿真方法. 肖立杰等人建立了带一维烧蚀模型的 MHD 仿真模型, 并对 PPT 的工作过程进行了仿真 [33]. Zhou 提出了一种组合式计算方法, 提高了二维 MHD 模型的计算精度和计算稳定性 [34]. 杨乐 [35] 和尹乐 [15] 则用三维

MHD 模型对 PPT 工作过程进行了仿真. 但是, 相对于机电模型, 基于 MHD 模型的 PPT 工作过程仿真成本大、计算周期长.

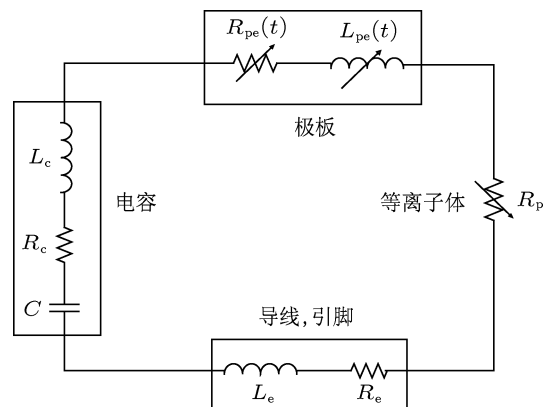


图 2 PPT 等效电路图

针对如今机电模型和烧蚀模型的局限性, 本文提出了一种带一维烧蚀模型的机电模型, 将 PPT 工作过程和 Teflon 工质烧蚀过程相耦合进行数值仿真, 贴近物理事实, 能更加准确的反映物理现象, 揭示 PPT 工作过程的内在机理, 同时具备原机电模型结构简单、计算周期短等优点.

## 2 数学模型

### 2.1 机电模型

机电模型将电路理想化为一个离散的、可运动的 LRC 电路, 认为电感和电流是时间的函数, 而电路电阻在等离子体加速过程中保持不变, 用基尔霍夫电压定律来描述等效电路. 假设工质烧蚀的全部质量在工作之初就已全部产生, 集中在电流片中被洛伦兹力加速喷出产生推力, 在加速过程中电流片质量为常数, 用牛顿第二定律来描述电流片的动力学过程. 同时配合等离子体的电阻模型得到一个耦合的非线性积分 - 微分二阶方程组的机电模型方程:

$$\begin{aligned}
 &V_0 - \frac{1}{C} \int_0^t I(t) dt \\
 &= I(t)(R_C + R_e + R_p) + \frac{d}{dt} [(L_C + L_e + L_{pe})I(t)], \\
 &m_0 \ddot{x}(t) = \frac{1}{2} L'_{pe} [I(t)]^2, \\
 &R_p = 8.08 \frac{h}{T_e^{3/4} w}
 \end{aligned}$$

$$\times \sqrt{\frac{\mu_0 \ln \left[ 1.24 \times 10^7 \left( \frac{T e^3}{n_e} \right)^{1/2} \right]}{\tau}}, \quad (1)$$

其中,  $V_0$  为电容器的初始充电电压,  $C$  为电容容量,  $I(t)$  为回路电流,  $R_C$ ,  $R_e$  和  $R_p$  分别为电容器、导线及电容器引脚和等离子体的电阻,  $L_C$ ,  $L_e$  和  $L_{pe}$  分别为电容器、导线及电容器引脚和平行板电极的电感,  $m_0$  为电流片质量,  $\dot{x}(t)$  为电流片的加速度,  $L'_{pe}$  为电极的电感梯度,  $h$  为平行板电极间距,  $w$  为平行板电极宽度,  $n_e$  为电子密度,  $k$  为波尔兹曼常数,  $T_e$  为等离子体温度,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\tau$  为特征脉冲时间.

通过对机电模型方程组的求解, 可以得到电容器两端电压、回路电流随时间的变化以及电流片的运动状态, 进而可以得出推力器的性能参数.

推力器的比冲

$$I_{sp} = \frac{\dot{x}(t)}{g}, \quad (2)$$

其中  $\dot{x}(t)$  为电流片在推力器出口的速度,  $g$  为重力加速度.

推力器的元冲量

$$I_{bit} = \int_0^t \frac{1}{2} \mu_0 \frac{h}{w} [I(t)]^2 dt. \quad (3)$$

## 2.2 改进的机电模型

机电模型假设工质烧蚀质量在计算之初就全部产生, 在等离子体加速过程中没有质量积累, 质量为常数, 这一假设与实际 PPT 工作过程差别较大. 本文摒弃这一假设, 认为烧蚀质量是随放电过程逐渐累积的, 并采用 Teflon 一维烧蚀模型进行计算.

如果考虑工质烧蚀质量随时间的变化, 则运动方程为

$$m(t)\ddot{x}(t) + \dot{m}(t)\dot{x}(t) = \frac{1}{2} L'_{pe} [I(t)]^2, \quad (4)$$

则改进的机电模型方程相应地变化为

$$\begin{aligned} & V_0 - \frac{1}{C} \int_0^t I(t) dt \\ & = I(t)(R_C + R_e + R_p) \\ & \quad + \frac{d}{dt} [(L_C + L_e + L_{pe}) I(t)], \\ & m(t)\ddot{x}(t) + \dot{m}(t)\dot{x}(t) = \frac{1}{2} L'_{pe} [I(t)]^2, \\ & R_p = 8.08 \frac{h}{T_e^{3/4} w} \end{aligned}$$

$$\times \sqrt{\frac{\mu_0 \ln \left[ 1.24 \times 10^7 \left( \frac{T e^3}{n_e} \right)^{1/2} \right]}{\tau}}, \quad (5)$$

式中  $\dot{m}(t)$  为在每一个时间步长内工质烧蚀质量, 采用下文建立的一维烧蚀模型进行计算,  $m(t) = m(t)_0 + \dot{m}(t)$  为在  $t$  时刻工质烧蚀的累积质量, 其中  $m(t)_0$  为  $t$  时刻的上一计算时间步的工质烧蚀累积质量.

## 2.3 Teflon 一维烧蚀模型

为了保持原机电模型结构简单、计算周期短的优点, Teflon 烧蚀模型采用最简单的一维烧蚀模型. 如图 3 所示, 假设 Teflon 在烧蚀过程中由于温度不同分为两种状态, Teflon 温度  $T > T_m$  的区域为无定形态, 工质的烧蚀全部发生在此区域中,  $T < T_m$  的区域为结晶态, 其中  $T_m = 600$  K 为相变界限.  $s$  为烧蚀端面,  $s_m$  为相变界面,  $\dot{m}$  为工质烧蚀的质量流量,  $q$  为放电产生的热流密度.

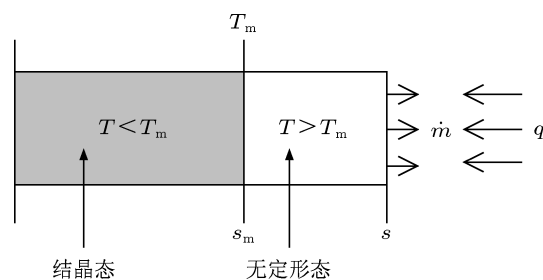


图 3 Teflon 烧蚀过程示意图

考虑相变吸热, 由能量守恒得控制方程. 当 Teflon 为无定形态时为

$$\rho_a C_a \frac{\partial T_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_a \frac{\partial T_a}{\partial x} \right) + Q. \quad (6)$$

当 Teflon 为结晶态时为

$$\rho_c C_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_c \frac{\partial T_c}{\partial x} \right), \quad (7)$$

其中  $Q$  为相变吸热, 由 Arrhenius 公式推得

$$Q = -A_p \rho_a H_p(T) \exp \left( -\frac{B_p}{T_a} \right), \quad (8)$$

式中,  $\rho_c$ ,  $\rho_a$  分别为结晶态和无定形态时的密度,  $C_c$ ,  $C_a$  分别为结晶态和无定形态时的比热容,  $k_c$ ,  $k_a$  分别为结晶态和无定形态时的导热系数,  $T_c$ ,  $T_a$  分别为结晶态和无定形态时的温度,  $A_p$  为解聚频率因子,  $B_p$  为解聚活化温度,  $H_p(T)$  为单位质量 Teflon 解聚所需能量.

烧蚀端的边界条件

$$-k_a \frac{\partial T_a}{\partial x} \Big|_{x=s} = q, \quad (9)$$

其中  $q = \eta \frac{|V(t)I(t)|}{A}$ , 另一端采用绝热边界条件, 即  $-k_c \frac{\partial T_c}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0$ .

初始条件为  $T(x, 0) = 300 \text{ K}$ .

工质烧蚀的质量流量可用下式进行计算:

$$\dot{m} = A_p \int_{sm}^s \rho_a \exp\left(-\frac{B_p}{T_a}\right) dx. \quad (10)$$

### 3 仿真结果和讨论

LES-6 PPT 是一种发展成熟并经过多年飞行验证的平行板电极型 PPT, 针对 LES-6 PPT 已展开了大量的理论和实验研究, 积累了许多研究成果. 本文以 LES-6 PPT 为研究对象对此改进模型进行验证, 仿真过程中系统参数的选取如表 1 所示, 仿真所得放电波形如图 4 所示.

表 1 LES-6 PPT 相关参数

初始电压/V	1360	电极宽度/mm	10
电容容量/ $\mu\text{F}$	2	电极长度/mm	6
电容电阻/ $\text{m}\Omega$	30	特征脉冲时间/ $\mu\text{s}$	0.4
初始电感/nH	34	等离子体温度/eV	1.5
电极间距/mm	30	电子密度/ $\text{m}^{-3}$	$10^{21}$

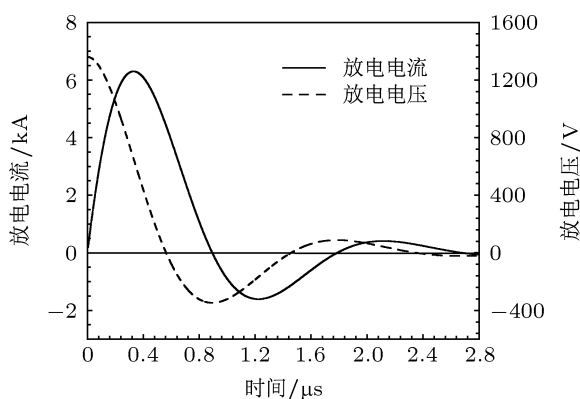


图 4 仿真放电波形

图 5 为 LES-6 PPT 实验测量的放电电流和电压波形, 由图 4 和图 5 可以看出, 仿真结果和实验结果符合较好, 计算得到的放电电压和电流波形和实验测得的波形存在稍许差异, 主要是因为模型中将等离子体电阻视为常数, 而在实际推力器中, 等离子体电阻随等离子体的形成以及电子温度和电子数密度变化.

表 2 比较了 LES-6 PPT 出口速度、比冲和元冲量的实验结果与仿真结果. 由表可以看出, 采用改进模型计算得到的 PPT 出口速度、比冲和元冲量与实验获得数值符合较好, 计算得到的烧蚀质量与实验测量烧蚀质量稍有差别.

图 6 为 LES-6 PPT 能量分布的仿真结果, 如图所示, 96.67% 的能量以欧姆热的形式损失, 只有 3.33% 转换成动能, 而 Vondra 等 [18] 对 LES-6 PPT 的实验研究结果也表明, 仅有 3% 的能量转化为动能, 进一步验证了模型的可靠性.

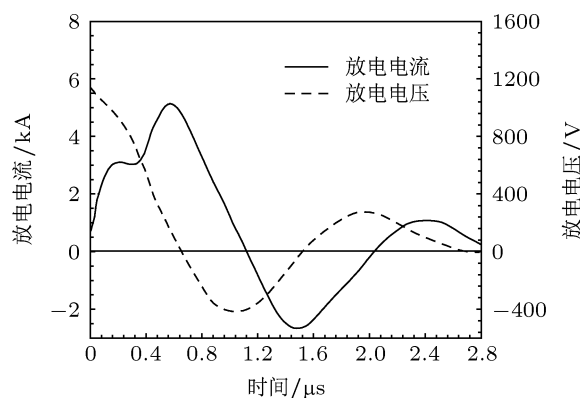


图 5 LES-6 PPT 实验测量数据

表 2 LES-6 PPT 实验与机电模型计算结果比较

	实验	仿真
出口速度/m/s	3000	2925
比冲/s	300	298
元冲量/ $\mu\text{N}\cdot\text{s}$	31.2	33.6
烧蚀质量/ $\mu\text{g}$	10	13.5

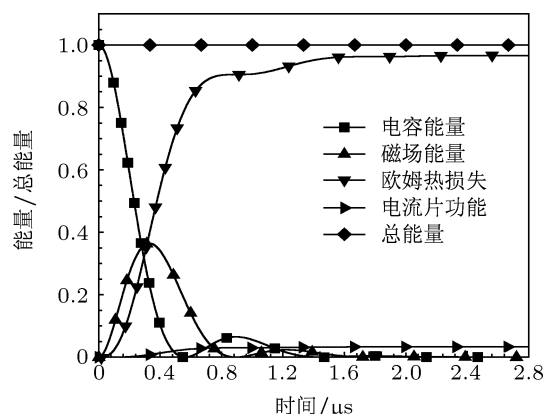


图 6 仿真得到的能量分布

图 7 为烧蚀工质微团的位置和速度曲线, 在放电开始之后, 等离子体微团在电磁场的作用下逐渐加速, 由于电流的逐渐增加, 加速度也随时间增长, 当电流和电压反向后, 等离子体依然在加速, 但是

加速度逐渐降低,直到电压和电流再次同向后,等离子体的加速度又逐渐增加,随着放电能量逐渐耗尽,加速度逐渐减小.在放电周期的后半段,电流片的速度几乎不再增加,因此,优化的推力器构型和工作参数可以得到优化的推力器性能.

图 8 为 Teflon 表面由于放电所受的热流密度和温度随时间变化曲线,如图所示,热流主要集中在放电开始后很短的时间内, Teflon 烧蚀表面温度也相应地迅速上升到 1300 K 以上,随着热流密度的变化略有波动.

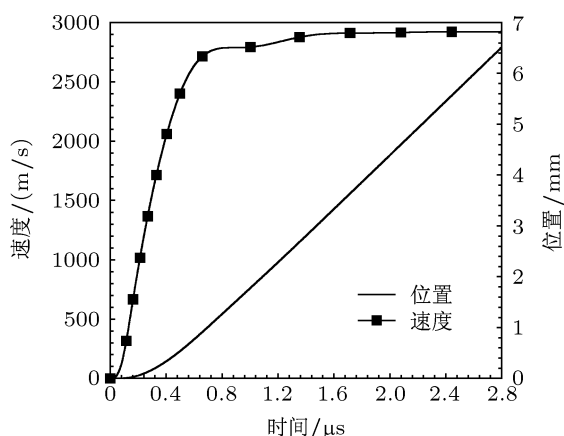


图 7 等离子体微团位置和速度

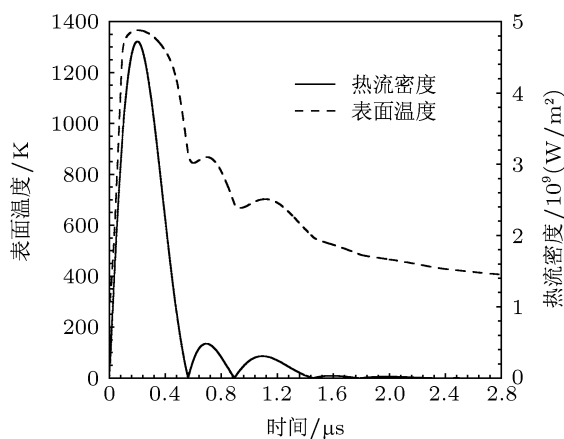


图 8 Teflon 表面热流密度和温度变化

图 9 为不同时刻 Teflon 距离烧蚀表面的不同位置上的温度分布,放电开始后,靠近 Teflon 烧蚀表面的很短的一段距离内的工质温度急剧上升,很快就超过相变温度.当热流密度减小时,其烧蚀表面附近的温度又逐渐下降并向温度较低的区域导热.在 0.6  $\mu\text{s}$  时, Teflon 烧蚀表面温度只有 840 K,且大于相变温度的区域深度不到 3  $\mu\text{m}$ ,此时的烧蚀质量流量很小,工质的烧蚀过程主要集中在放电开始后的很短的时间内.

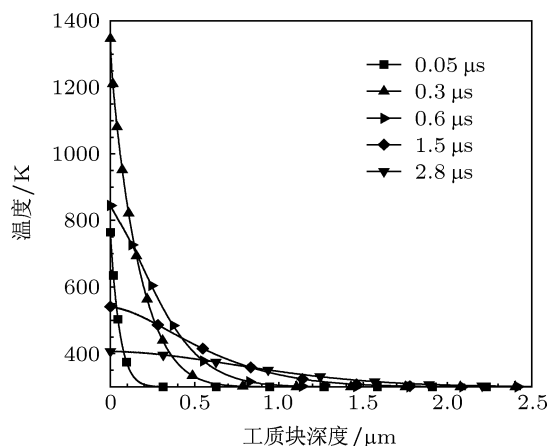


图 9 不同时刻 Teflon 温度分布

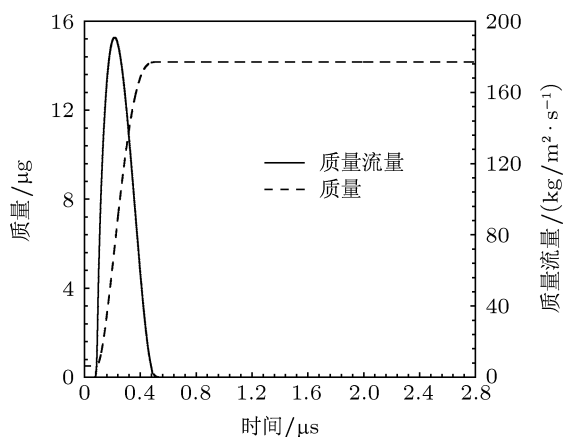


图 10 质量流量和烧蚀质量变化曲线

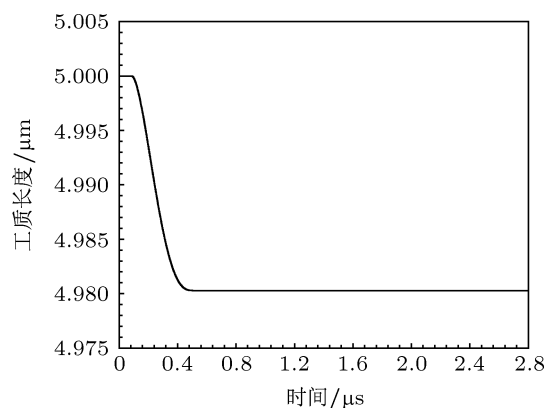


图 11 工质长度的变化曲线

图 10 为工质烧蚀质量和工质烧蚀质量流量随时间的变化曲线,如图所示,工质的烧蚀过程主要发生在放电开始后 0.6  $\mu\text{s}$  的时间内,整个放电脉冲内总烧蚀质量为 13.5  $\mu\text{g}$ .如图 11 所示,随着 Teflon 被烧蚀蒸发,工质块的长度不断减小,工质块长度由初始的 5  $\mu\text{m}$  减小到 4.98  $\mu\text{m}$ ,整个过程工质块的总烧蚀长度为 0.02  $\mu\text{m}$ .

## 4 结论

针对机电模型的固有缺陷, 本文提出了一种包含 Teflon 一维烧蚀模型的改进模型, 并以 LES-6 PPT 为研究对象进行了仿真, 仿真结果与实验结果符合, 验证了模型的可靠性. 本模型摒弃了机电模型中工质烧蚀质量为常数的这一假设, 其烧蚀质量由 Teflon 一维烧蚀模型计算得到, 更加贴近物理事实, 同时保持了机电模型结构简单和易于实现的优

点. 另外, 此改进模型拓展了机电模型的功能, 不仅可以对 PPT 工作过程进行仿真, 而且可以用于 PPT 工作过程和烧蚀过程相互影响的研究.

虽然此改进模型对机电模型有较大改进, 但依然无法体现出不同时刻被烧蚀工质的具体加速过程. 但是对推力器电参数和结构参数等对烧蚀过程影响规律的研究, 烧蚀过程对推力器整体性能影响规律的研究, 以及推力器的设计具有一定的指导意义.

- [1] Zhang F K, Ding Y J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 065203 (in Chinese) [张凤奎, 丁永杰 2011 物理学报 **60** 065203]
- [2] Pan W X, Li T, Wu C K 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 125201
- [3] Zhang F K, Ding Y J, Qing S W, Wu X D 2011 *Chin. Phys. B* **20** 125201
- [4] Qing S W, E P, Duan P, Xu D G 2013 *Chin. Phys. B* **22** 085203
- [5] Qing S W, E P, Duan P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 055202 (in Chinese) [卿绍伟, 鄂鹏, 段萍 2013 物理学报 **62** 055202]
- [6] Yu D R, Qing S W, Wang X G, Ding Y J, Duan P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 025204 (in Chinese) [于达仁, 卿绍伟, 王晓钢, 丁永杰, 段萍 2011 物理学报 **60** 025204]
- [7] Deng L Y, Lan H M, Liu Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 025213 (in Chinese) [邓立赞, 蓝红梅, 刘悦 2011 物理学报 **60** 025213]
- [8] Han K, Jiang B H, Ji Y C 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 075209 (in Chinese) [韩轲, 江滨浩, 纪延超 2012 物理学报 **61** 075209]
- [9] E P, Duan P, Wei L Q, Bai D Y, Jiang B H, Xu D G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8676 (in Chinese) [鄂鹏, 段萍, 魏立秋, 白德宇, 江滨浩, 徐殿国 2010 物理学报 **59** 8676]
- [10] Rayburn C D, Campbell M E, Mattick A T 2005 *J. Spacecr. Rockets* **42** 161
- [11] Burton R L, Turchi P J 1998 *J. Propul. Power* **14** 716
- [12] Dali H, ZhaoWansheng, Xiaoming K 2008 *Acta Astronaut.* **62** 404
- [13] Niu L, Wang H W, Yang W 2004 *Aerospace Shanghai* **5** 39 (in Chinese) [牛禄, 王宏伟, 杨威 2004 上海航天 **5** 39]
- [14] Wu H J, Jiang Y D, Zhang Z Y 2003 *Journal of Propulsion Technology* **24** 385 (in Chinese) [吴汉基, 蒋远大, 张志远 2003 推进技术 **24** 385]
- [15] Yin L 2009 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [尹乐 2009 博士学位论文 (长沙: 国防科学技术大学)]
- [16] Qian Z, Wang P Y, Du C H 2009 *Journal of Astronautics* **30** 680 (in Chinese) [钱中, 王平阳, 杜朝辉 2009 宇航学报 **30** 680]
- [17] Jahn R G 1968 *Physics of Electric Propulsion* (New York: McGraw-Hill) 263
- [18] Vondra R J, Thomassen K, Solbes A 1970 *J. Spacecraft* **7** 1402
- [19] Wei R H 1982 *Chinese Journal of Space Science* **2** 319 (in Chinese) [魏荣华 1982 空间科学学报 **2** 319]
- [20] Gatsonis N A, Demetriou M A 2004 *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit* Fort Lauderdale, Florida, July11-14, 2004 AIAA 2004-3464
- [21] Laperriere D D, Gatsonis N A, Demetriou M A 2005 *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit* Tucson, Arizona, July10-13, 2005 AIAA 2005-4077
- [22] Ahedo E 1997 *Phys. Plasmas* **4** 4419
- [23] Yang L, Liu X Y, Wu Z W, Wang N F 2011 *47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit* San Diego, California, July31-August03, 2011 AIAA 2011-6077
- [24] Keidar M, Boyd I D, Antonsen E L, Gulczinski F S, Spanjers G G 2004 *J. Propul. Power* **20** 978
- [25] Schönherr T, Abe Y, Okamura K, Koizumi H, Arakawa Y, Komuraaki K 2012 *48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit* Atlanta, Georgia, July30-August01, 2012 AIAA 2012-4278
- [26] Gatsonis N A, Juric D, Stechmann D P 2007 *43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit* Cincinnati, OH, July 8-11, 2007 AIAA 2007-5227
- [27] Stechmann D P 2007 *M. S. Dissertation* (Worcester: Worcester Polytechnic Institute)
- [28] Keidar M, Boyd I D, Beilis I I 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 5420
- [29] Keidar M, Boyd I D, Beilis I I 2001 *J. Phys. D Appl. Phys.* **34** 1675
- [30] Zhang R, Zhang D X, Zhang F, He Z, Wu J J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 025207 (in Chinese) [张锐, 张代贤, 张帆, 何振, 吴建军 2013 物理学报 **62** 025207]
- [31] Clark B L 1972 *J. Heat Transfer* **94** 347
- [32] Aral N 1979 *Aiaa J.* **17** 634
- [33] Xiao L J, Liu X Y, Yang L, Wu Z W, Wang N F 2011 *Journal of Propulsion Technology* **32** 788 (in Chinese) [肖利杰, 刘向阳, 杨磊, 武志文, 王宁飞 2011 推进技术 **32** 788]
- [34] Zhou Y F, Feng X S 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 094703
- [35] Yang L 2007 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [杨乐 2007 博士学位论文 (长沙: 国防科学技术大学)]

# A modified electromechanical model with one-dimensional ablation model for numerical analysis of the pulsed plasma thruster\*

Zhang Hua<sup>†</sup> Wu Jian-Jun Zhang Dai-Xian Zhang Rui He Zhen

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 12 May 2013; revised manuscript received 5 August 2013)

## Abstract

The electromechanical model is used widely in simulating the operation process of pulsed plasma thrusters, because of its simplicity. Considering the limitation of the model that the late time ablation mass is assumed to be constant and the ablation process is ignored, we propose a modified mechanical model to serve a one-dimensional ablation model, and then the operation process of LES-6 PPT was simulated by this modified electromechanical model. Simulation results show excellent agreement with experimental data from the LES-6 PPT. This modified model can simulate the ablation process which cannot be completed by using the original electromechanical model. So, this modified model can better reflect the real operation mechanism than the electromechanical model. Besides, this modified model is as simple as the original model, it is of great significance for PPT design.

**Keywords:** pulsed plasma thruster, electromechanical model, ablation model, numerical simulation

**PACS:** 02.60.Cb, 52.75.Di, 36.40.Gk, 05.70.-a

**DOI:** 10.7498/aps.62.210202

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11172327).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: zhann10000@163.com