

14. 脉冲等离子体推力器(PPT)

14.1. 引言	2
14.2. TPPT 系统的基本组成	3
14.3. TPPT 的工作原理	4
14.4. 运行机理分析	7
14.5. 基本性能参数	10

14.1. 引言

脉冲等离子体推力器 PPT (Pulsed Plasma Thruster) 是一种等离子体推力器。

烧蚀型脉冲等离子体推力器(简写成 APPT)

太氟隆脉冲等离子体推力器(简写成 TPPT):

- 推进剂为固体氟塑料(主要是聚四氟乙烯, 俗称太氟隆, 英文名为 Teflon)

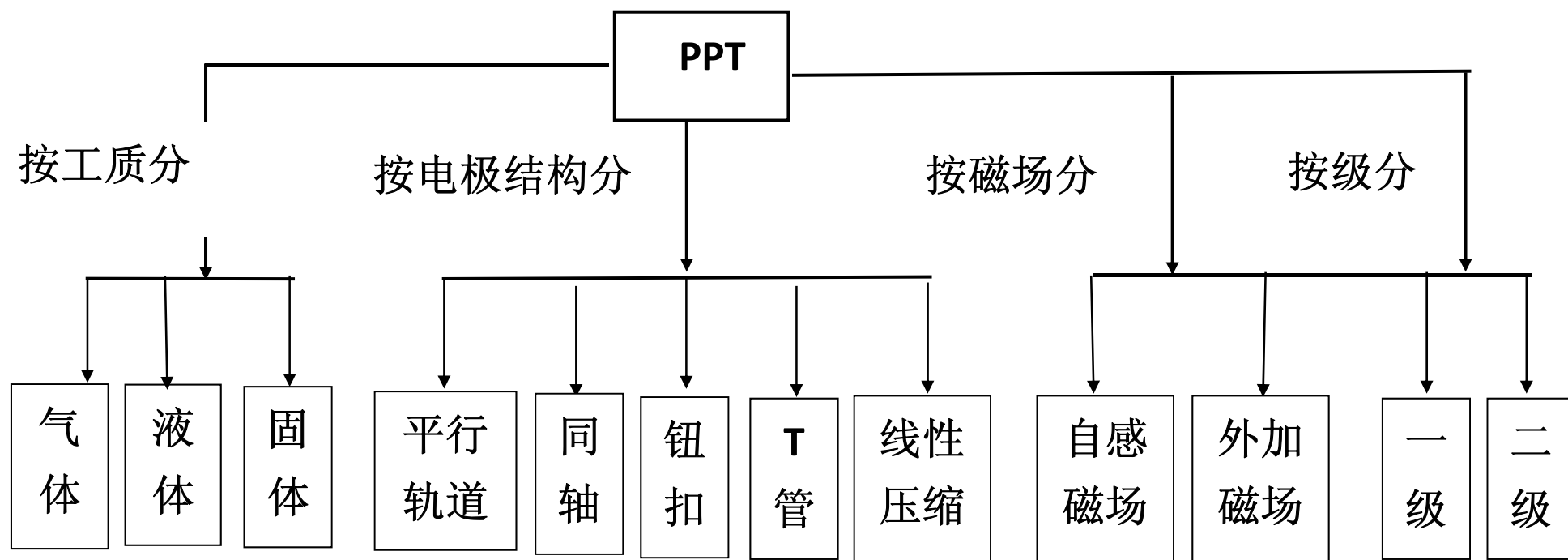


图 1 PPT 分类

14.2. TPPT 系统的基本组成

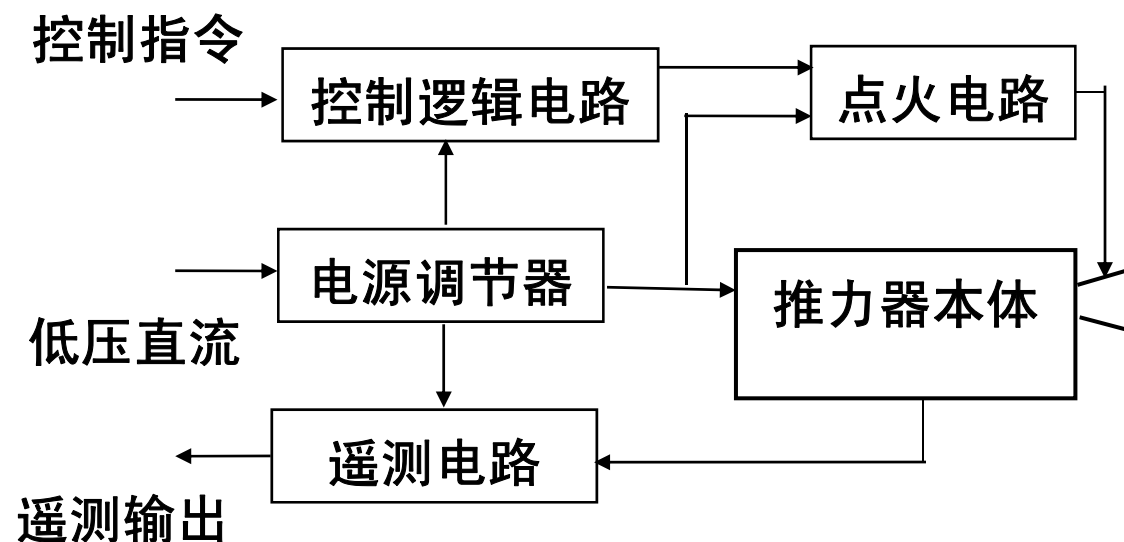
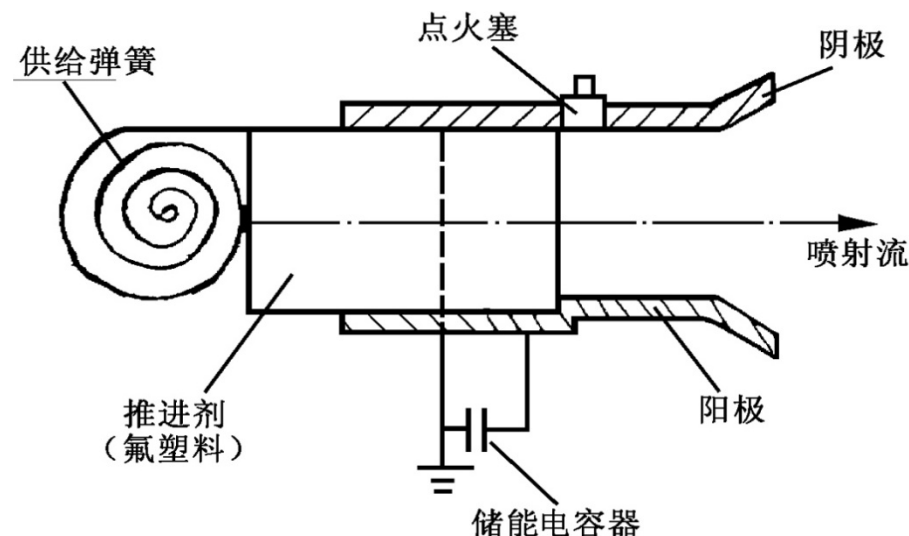


图 2 TPPT 系统组成框图

推力器本体

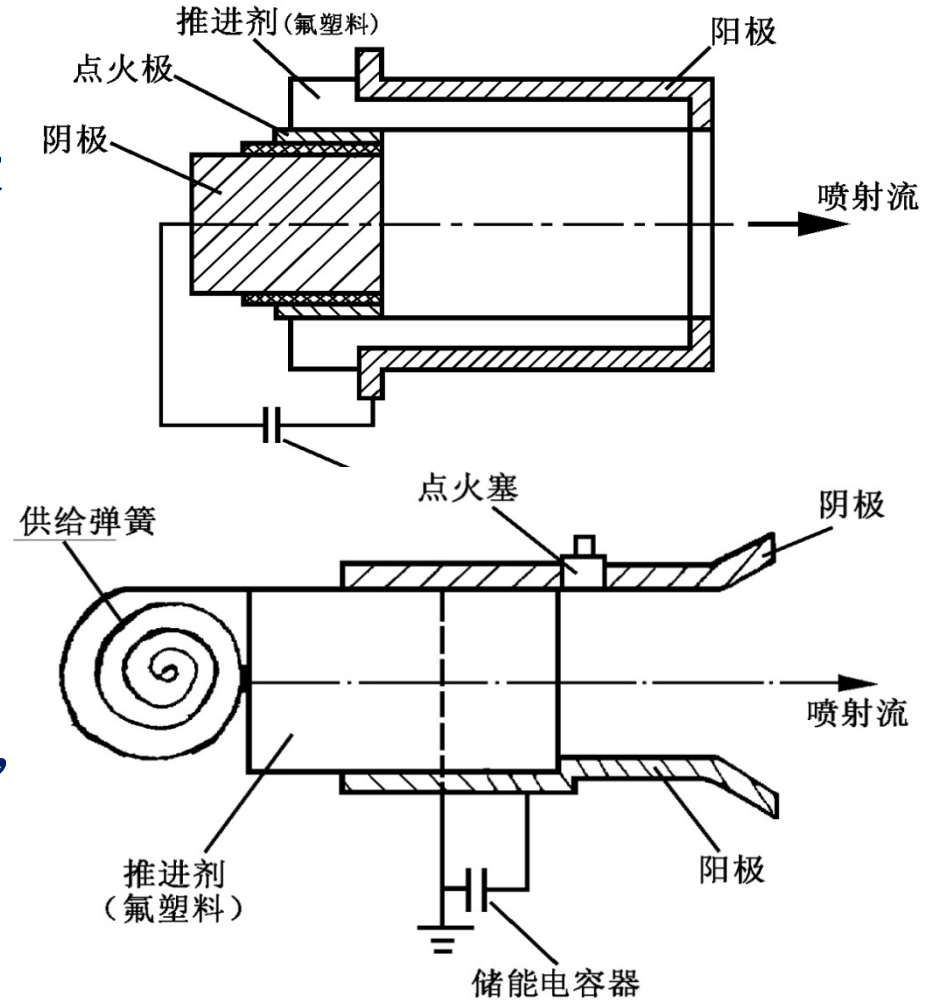
- 放电室(电极与喷口)
- 工质, 常用太氟隆
- 供给弹簧, 恒力弹簧
- 储能电容器&电极及引线
- 壳体与固定支架



14.3. TPPT 的工作原理

结构形式:

- 同轴电极型
 - 推进剂包围着电弧，烧蚀量大，推力大
 - 电热比电磁加速作用显著，比冲稍低
- 平行轨道电极型
 - 推进剂供给结构简单
 - 电磁比电热加速作用大，比冲高
 - 电极直接与储能电容器相连
 - 呈矩形截面的太氟隆推进剂在供给弹簧的作用下，通过两电极之间的空间，定位于阳极的支承肩上
 - 阴极上装有一个用于引发放电的点火塞，电极两侧是绝缘侧壁



工作原理:

- 使储能电容器充电到工作电压（1~3kV），该电压加到推力器的电极上
- 按要求放电点火电路使点火塞点火，在电极与推进剂表面之间产生一微量放电
- 微量放电产生的电子在电极间的电场力作用下向阳极加速并获得能量
- 具有相当能量的电子与推进剂表面碰撞，分解和离化一些工质，生成更多的电子
- 新生的电子又被加速和碰撞工质，…如此下去，呈现雪崩过程，使储能电容器在两电极之间产生沿工质表面的大电流(10^3 - 10^4 A)电弧放电
- 放电形成的高温电弧烧蚀掉工质表面很薄的一层并把它分解、离化成等离子体
- 在热力和自感磁场产生的电磁力作用下，等离子体沿平行轨道电极加速喷出，产生一个脉冲的推力
- 电容器放电后，工作随即停止或进行下一循环
- 工质端面一经烧蚀，无需外界干予，供给弹簧自动把工质送到规定的位置

四个阶段： 推力器在十几微秒内的时间完成的工作过程

- 电容器充电-储能
- 点火塞点火
- 放电-形成电弧烧蚀工质产生等离子体
- 等离子体加速和喷射

力的作用：

- 电磁力， 自感应磁场使等离子体沿电极出口方向加速
- 气动压力， 等离子体受热膨胀
- 电场力， 只对放电和维持放电产生作用， 对产生推力的加速没有影响

14.4. 运行机理分析

- 利用不稳定磁流体动力学(MHD)方程描述电磁加速过程
- 用数值积分方法进行计算研究
- 引用一种对平行轨道电极型PPT电磁加速过程的“横杆模型”进行简化分析
- 被加速的等离子体为不变形的、但可在力的作用下沿电极表面运动的“横杆”
- 上下极板厚度为 b
- 极板中心线的距离为 h

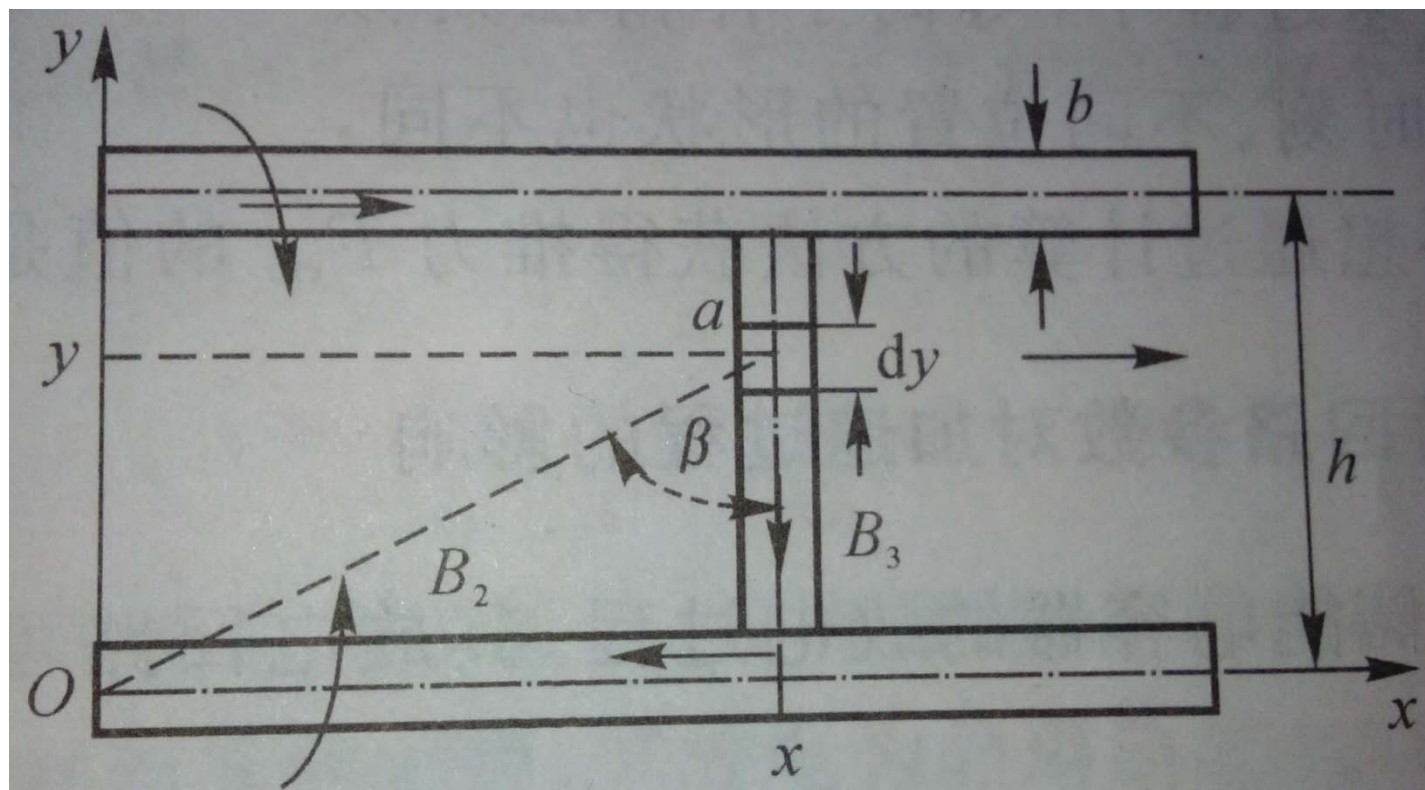


图 3 横杆模型示意图

推力器放电——>流过电流——>产生磁场——>产生电磁力——>横杆运动
作用在横杆微元线段上的力(安培定律):

$$d\mathbf{f}_{em} = i d\mathbf{y} \times \mathbf{B}_a$$

直线电流磁场的毕奥-沙弗尔-拉普拉斯定律:

$$B_1 = \frac{\mu i}{y} \sin \beta = \frac{\mu i}{4\pi} x / \left(y \sqrt{(x^2 + y^2)} \right) \quad B_2 = \frac{\mu i}{4\pi} x / \left\{ (h - y) \sqrt{[x^2 + (h - y)^2]} \right\}$$

i 为放电回路电流; μ 为介质磁导率。 \mathbf{B}_a 是上下电极板上的电流在 a 点产生

的磁感应强度的总和。 $\mathbf{B}_a = -(\mathbf{B}_{1a} + \mathbf{B}_{2a})\mathbf{k}$

整个横杆上的电磁力(洛仑兹力) \mathbf{F}_{em} 为:

$$\mathbf{F}_{em} = \int_{0.5b}^{h-0.5b} d\mathbf{f}_{em} = \frac{\mu i^2}{2\pi} \ln \frac{(h - 0.5b) \left[x + \sqrt{x^2 + (0.5b)^2} \right]}{0.5b \left[x + \sqrt{x^2 + (h - 0.5b)^2} \right]}$$

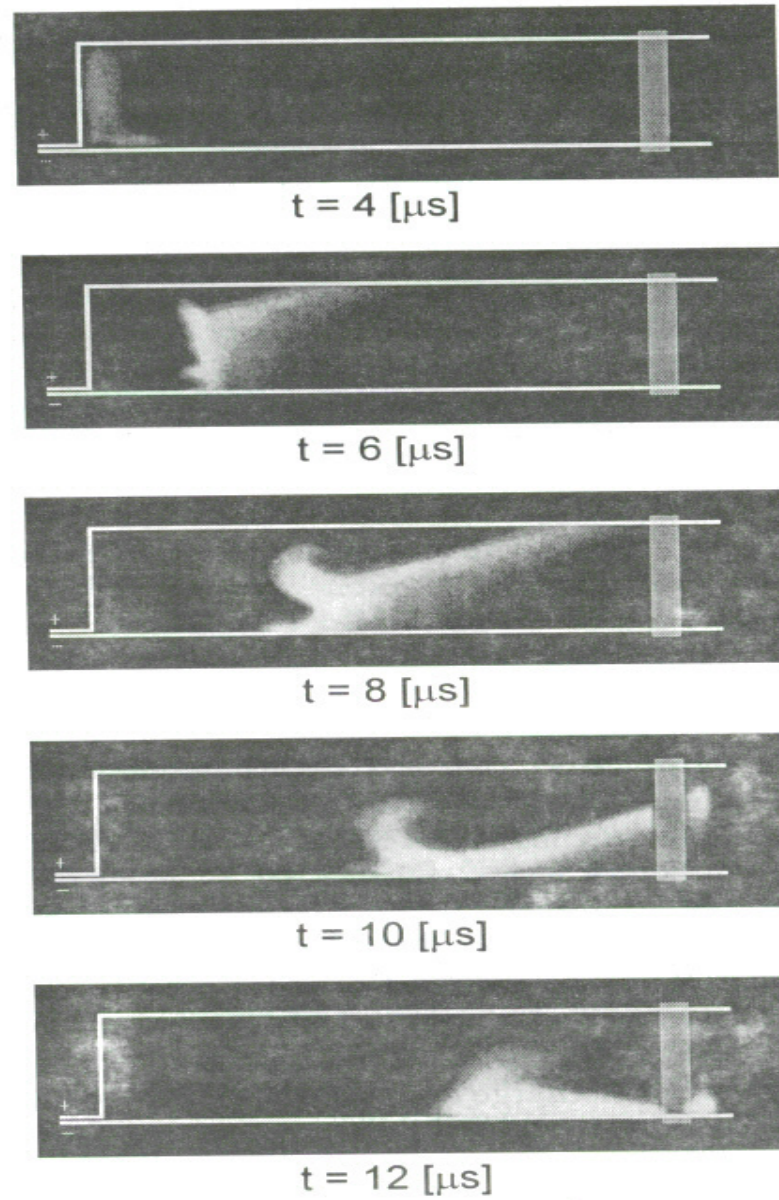


图 4 等离子体片的加速过程(实际情况非常复杂)

14.5. 基本性能参数

- 脉冲频率 f , 推力脉冲产生的频率
- 元冲量 I_b : 每个脉冲产生的推力冲量
- 等效稳态推力 F $F=fl_b$
- 等效稳态电功率 $P=fE$ (E 为储能电容器储存的能量)
- 等效稳态质量流量 $\dot{m} = fm$ (m 为每次脉冲烧蚀的工质量)
- 推力功率比 $F/P = I_b/E$
- 比冲 I_s , $I_s = (F/f)/m = I_b/m$
- 输入的电功率, $P_B = P/\eta_{pc} = fE/\eta_{pc}$
- 推进效率, $\eta_t = I_b^2/2mE$
- 推进系统效率 η , $\eta = \eta_{pc} \eta_t = \eta_{pc} I_b^2/2mE$
- 稳态推力与脉冲频率成正比, 具有线性调节的特性;
- 比冲和效率与脉冲频率无关, 可以在恒定的比冲和效率情况下, 调节推力;

主要特点:

- 小功率下的高比冲能力，比冲 3000m/s(5W); 8000-12000m/s(20W)
- 结构简单
 - ◆ 推进剂是固体氟塑料，贮存供给方便
 - ◆ 整个系统体积小、重量轻、安全可靠
- 脉冲工作（脉冲时间为微秒到十多微秒量级）
 - ◆ 运行时不需要预热时间，控制(数字和自主控制)方便灵活
 - ◆ 脉冲功率很大，但消耗的平均功率不多，降低了对电源和结构的要求
- 推力可以很小（微牛顿量级）
 - ◆ 能提供单个推力脉冲也可提供等效稳态推力，可以实现高精度的控制
 - ◆ 推力调节范围宽，而且能在恒定的比冲和效率下调节推力
- 效率较低（功率愈小效率愈低，几瓦时只有百分之几）；推力小

固体聚四氟乙烯塑料(太氟隆)。性能:

- 蒸汽压很低, 化学性质非常稳定性, 能在空间环境下长期存放
- 在常温、常压下无毒、无臭味
- 足够的机械强度和良好的加工性能
- 在 300-500°C 的温度作用下, 直接从固体升华成气体, 不熔化、不碳化
- 价廉、容易获得

脉冲储能电容器:

- 电容器及其引线的电阻和电感要尽可能小(电容器本身的损耗要小)
- 电容器要有尽可能高的能量密度, 以保证系统的体积小、重量轻
- 能在真空环境下长期可靠工作
- 脉冲寿命长(>10⁷ 次)

点火电路及点火塞

- 推力器的启动靠点火电路和点火塞组成的点火系统来完成
- 点火系统包括点火塞和点火电路两部分
- 点火塞是一个由正负电极组成的火花间隙
- 靠沿面放电而不是靠间隙击穿工作的

电源调节电路

- 把输入的电源电压变换成给主放电储能电容器和点火电路电容器充电到其工作电压

逻辑控制电路

- 使推力器根据任务的要求, 按一定的时间间隔(频率)产生推力脉冲

遥测电路

- 表征推力器正常运行和性能指标的参数(如储能电容器和点火电容器的工作电压、放电电流、工作频率等)变换成标准的遥测电压值(一般为 5V), 送到控制中心, 掌握推力器的运行状况并得到其性能数据