

15. 静电式离子推力器(IT)

15.1. 前言	2
15.2. 基本组成	5
15.2.1. 推力器	6
15.2.2. 供配电子系统	10
15.2.3. 推进剂储供子系统	12
15.2.4. 数字接口与控制子系统	13
15.3. 工作原理	14
15.3.1. 中性原子的约束	17
15.3.2. 电子的约束	19
15.3.3. 离子光学系统的原理与要求	20
15.4. 性能参数	24

15.1. 前言

静电式离子推力器(Ion Thruster IT)分类

- 工质气体放电电离推力器， $F=1\text{mN}-1\text{N}$

- ◆ 电子轰击式离子推力器 (Electron Bombardment Ion Thruster EBIT)
(**Kaufman 离子推力器**)

- ◆ 射频离子推力器 (Radiofrequency Ion Thruster, RIT)

- ◆ 电子回旋谐振离子推力器
(Electron Cyclotron Resonance Discharge Ion Thruster, ECR)

- 场致发射离子推力器， $F=0.01\text{mN}-1\text{mN}$

- ◆ 场致发射电推力器 (Field-Emission Electric Propulsion, FEEP)

- ◆ 胶体推力器 (Colloid Thruster)。



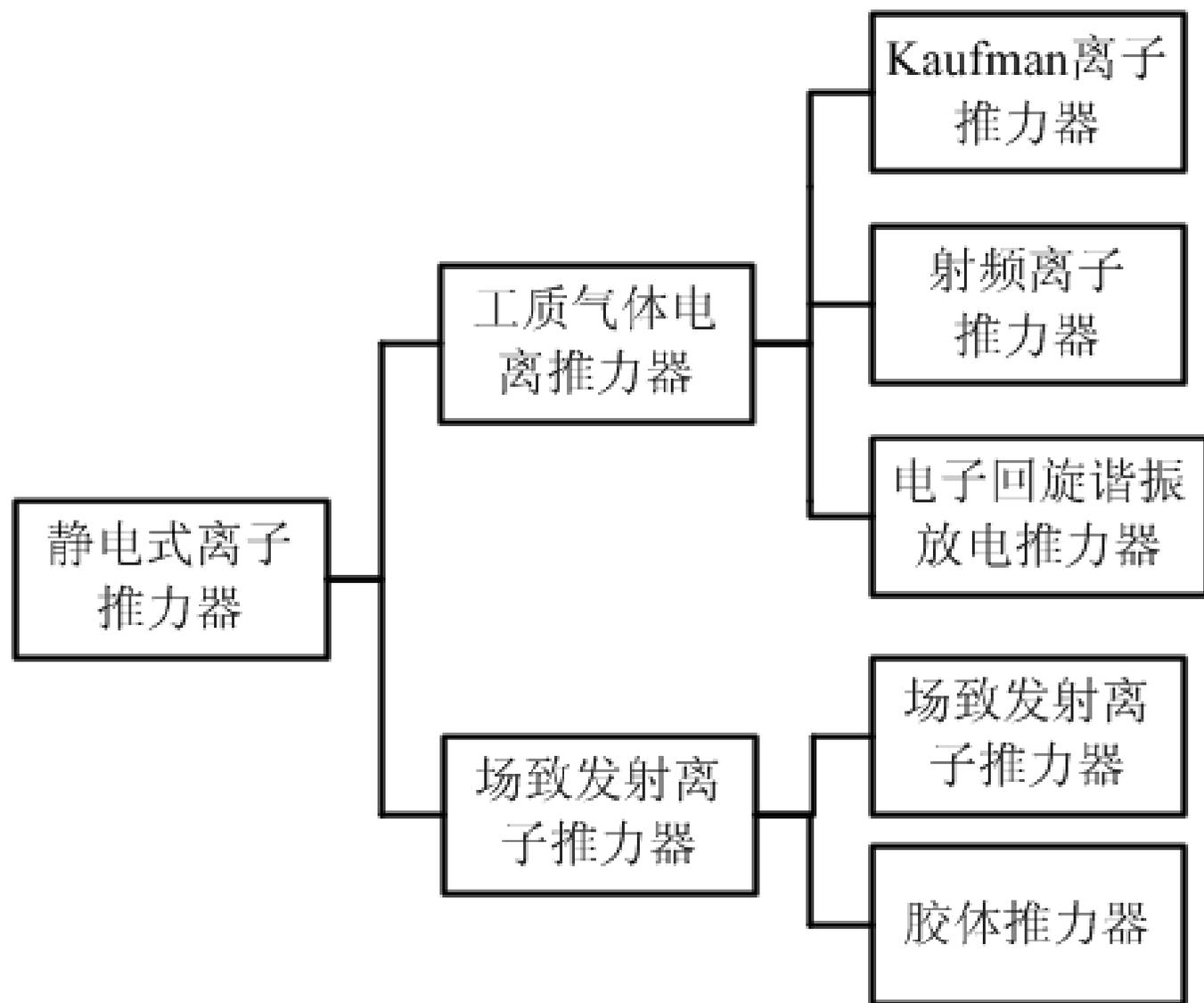


图 1 静电式离子推力器分类

IT 一般使用原子量大、一次电离电位低、二次电离电位高的元素作为推力器的推进剂工质。

表 1 离子推力器常用原子质量和电离电位

元素	原子量	q/m 荷质比[10^5C/kg]	一次电离电位[eV]	二次电离电位[eV]
Cs	132.9	7.25	3.89	25.1
Hg	200.6	4.80	10.44	18.75
Xe	131.3	7.34	12.13	21.21
Kr	83.80	11.50	14.0	24.36
Ar	39.95	24.13	15.80	22.63

氙离子推力器 (Xenon Ion Thruster, XIT)

- 选用氙气作为推进剂的 Kaufman 离子推力器

15.2. 基本组成

静电式离子发动机组成:

- 离子推力器 (Ion Thruster, IT)
- 供配电子系统 (Power Processing Unit, PPU)
- 推进剂供给子系统 (Propellant Feed System, PFS)
- 数字接口与控制子系统 (Digital Interface and Control Unit, DICU)

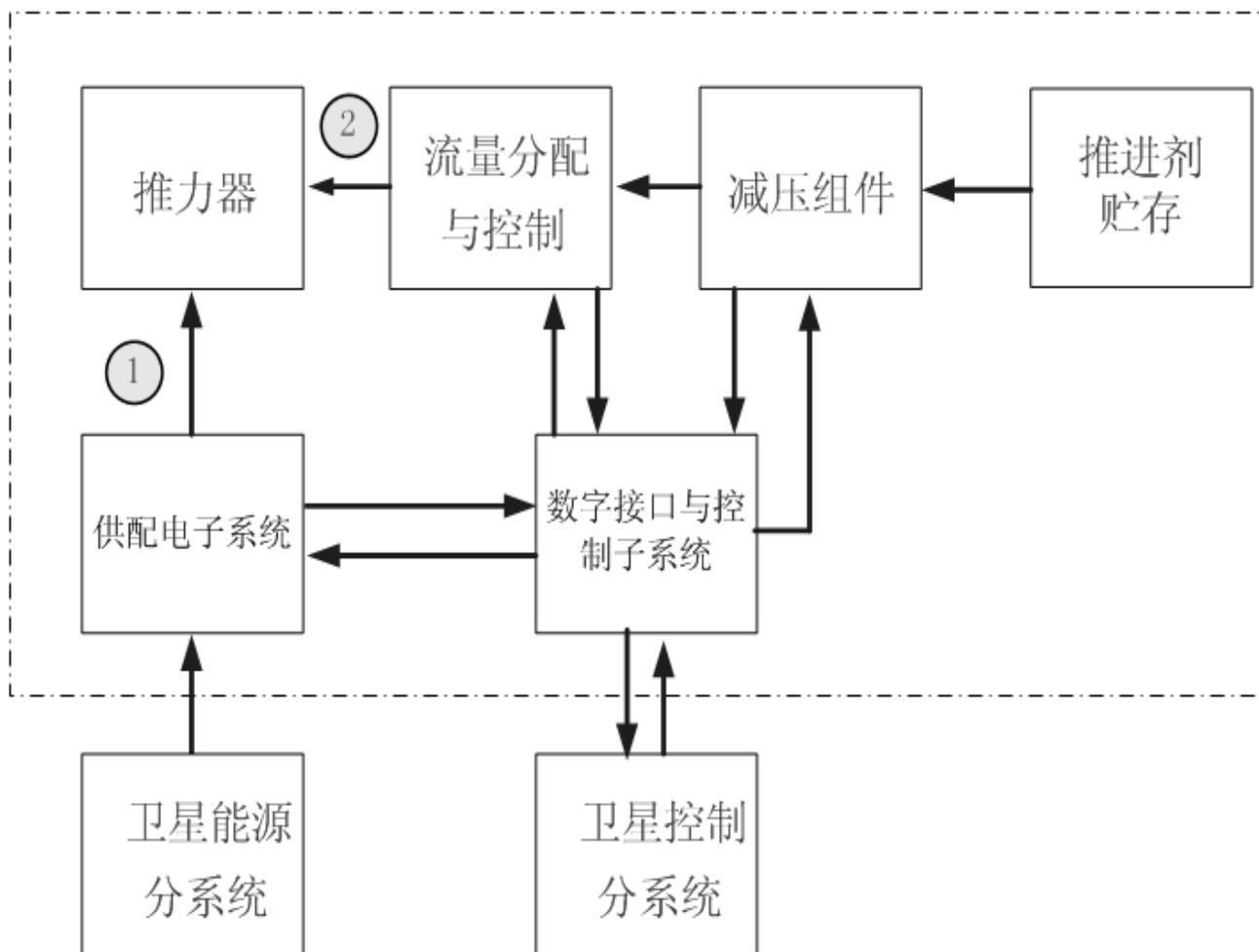


图 2 氙离子推力器系统组成

15.2.1. 推力器

推力器组成:

- 主阴极（空心阴极）
- 阳极
- 磁铁
- 放电室
- 离子光学系统（即屏栅极和加速栅极组成的静电场离子加速系统）
- 中和器

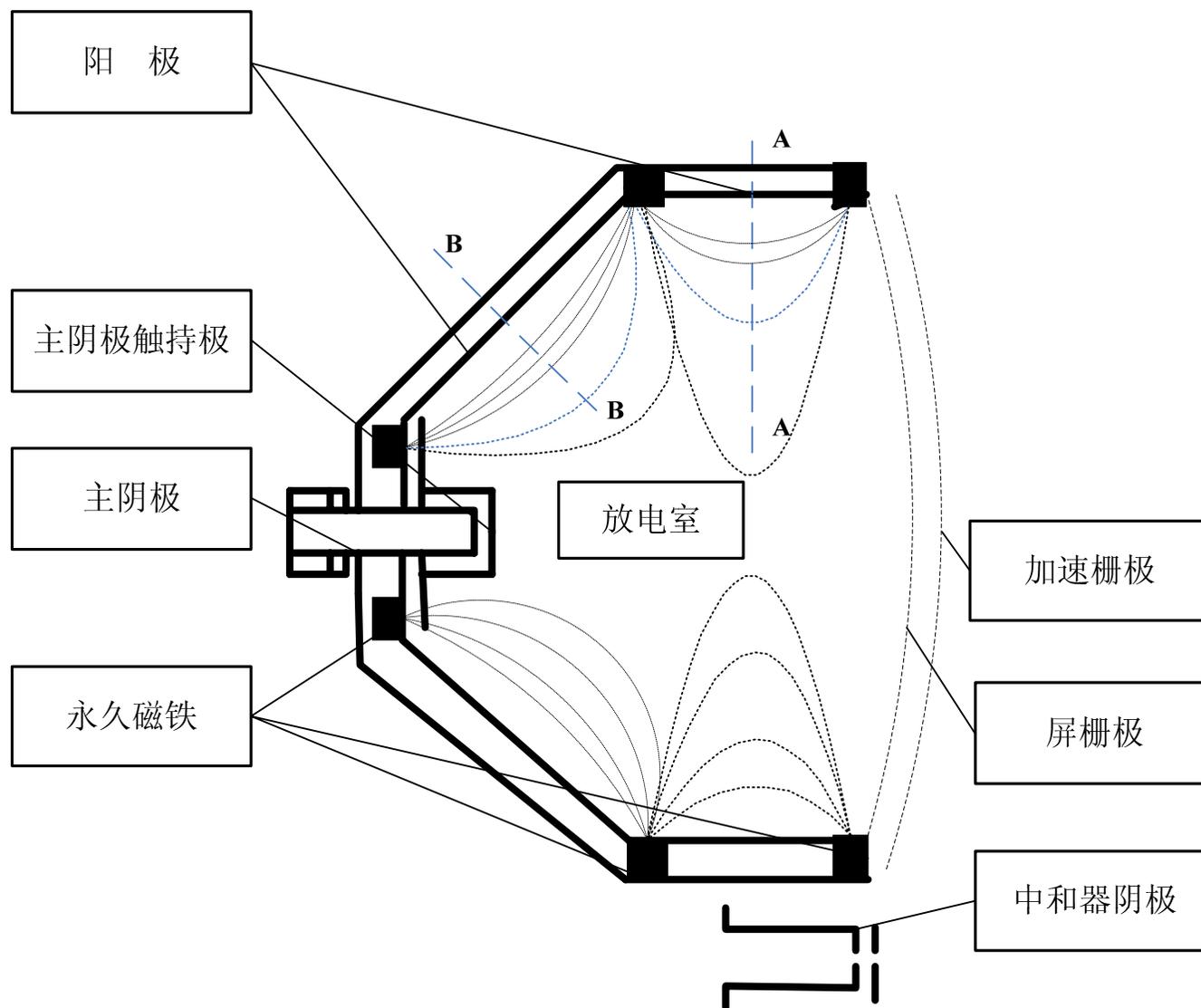
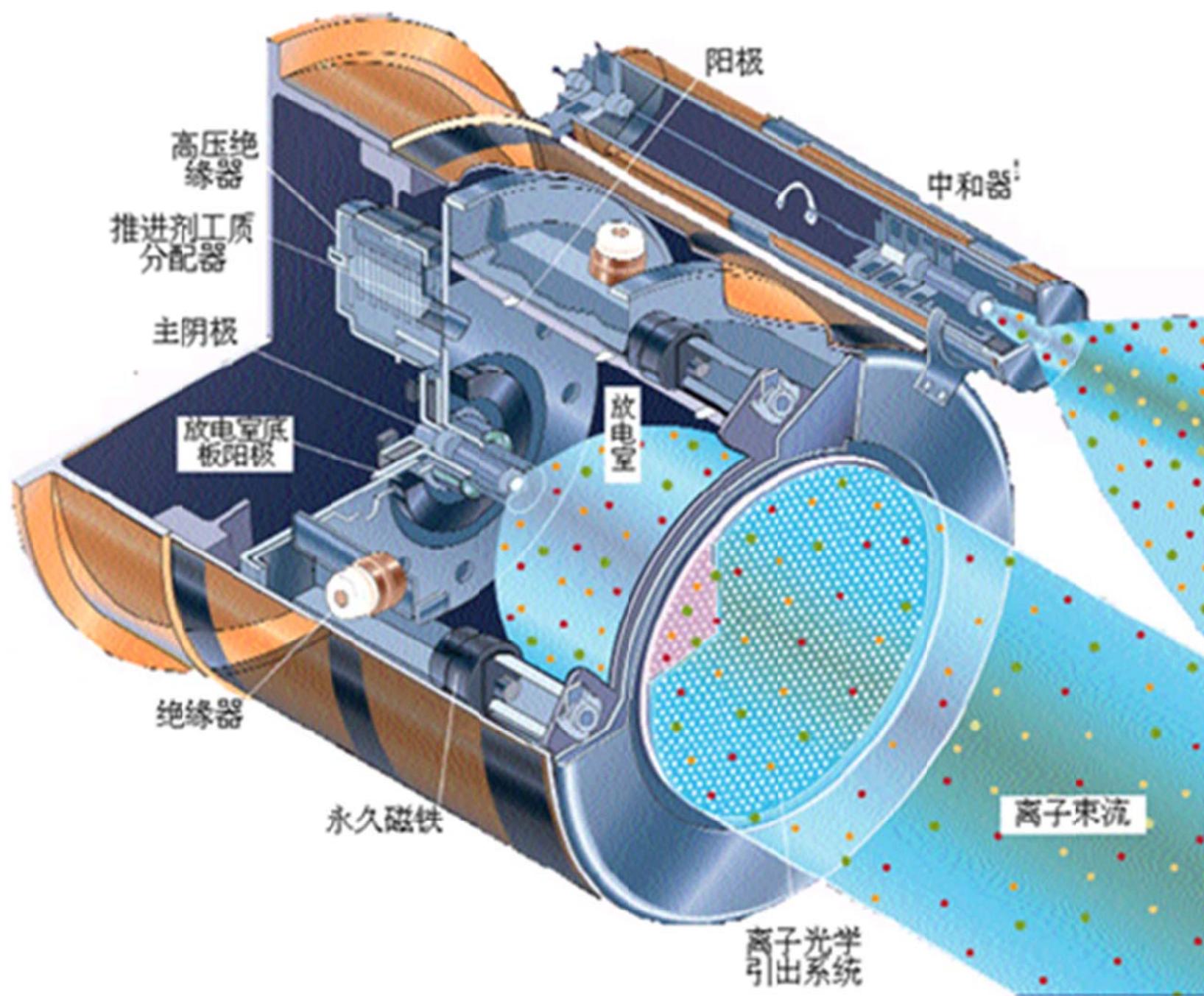
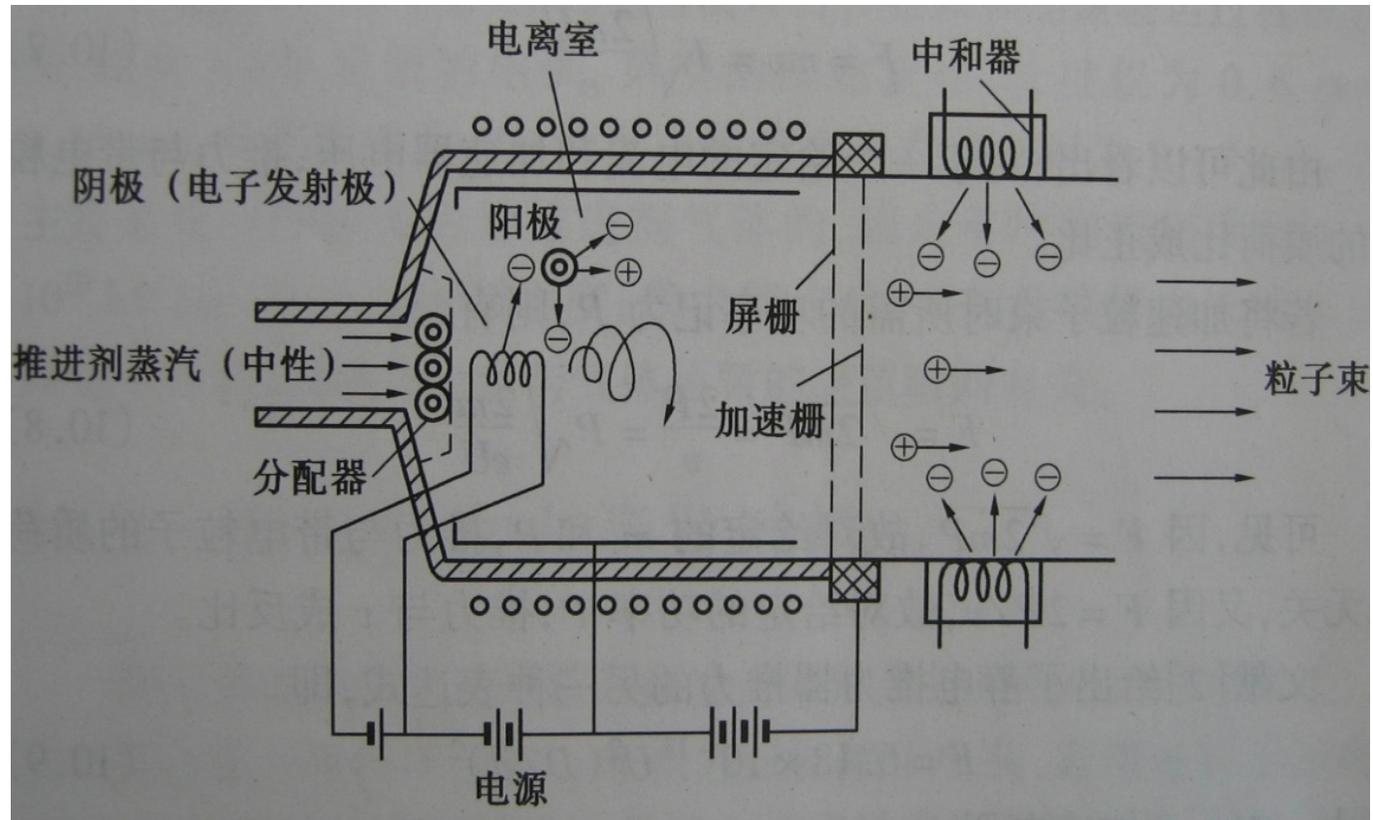


图 3 环形会切场离子推力器



工作过程:

- 氙气通过绝缘器进入空心阴极
- 氙气受到阴极内部发射的电子的轰击而电离
- 在阴极和触持极之间点火放电
- 接通阳极电源，放电扩展到整个放电室
- 电子作螺旋式振荡运动
- 形成放电等离子体
- 使屏栅极孔中的电位低于屏栅极电位
- 屏栅极电位低于等离子体电位（约3~5V），电子不能逃出，由阳极收集
- 离子在离子光学系统的作用下，聚焦、加速并引出，产生推力，离子引出速度一般可达30000m/s
- 与中和器发射的电子中和，形成准中性粒子束流



电子在电场作用下，通过磁场时，回旋半径为：

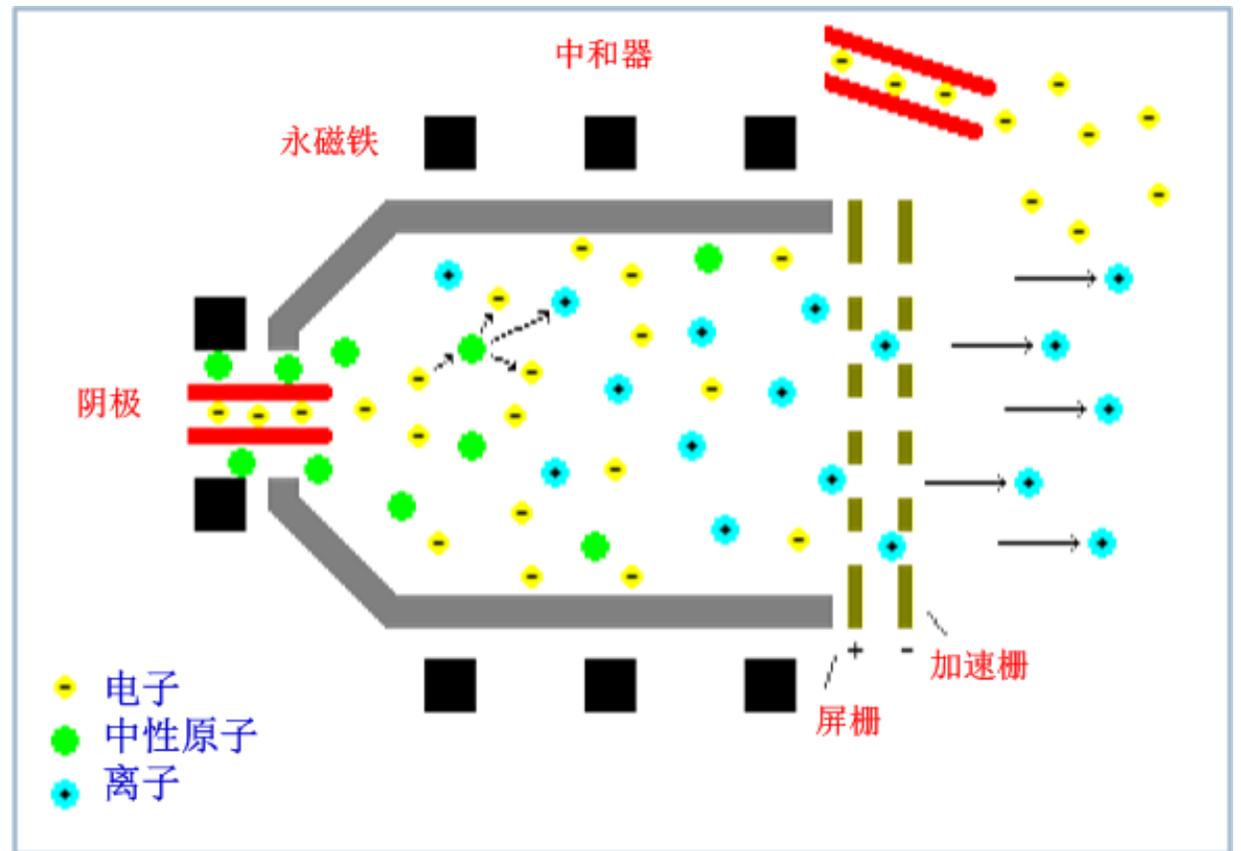
$$R_e = \frac{m_e v_e}{eB}$$

电子运动速度为： $v_e = \sqrt{2eV_e/m_e}$

式中， m_e 为电子质量， v_e 为电子运动速度， e 为元电荷， B 为电子所处位置的磁场强度， V_e 为电子所处位置的电位

回旋半径不能大于阳极半径，对于 9cm 离子推力器， $R_e < 1\text{cm}$

为了增加中性原子被电离的概率，放电室的长度需详细设计



15.2.2. 供配电子系统

供配电子系统作用是把一次电源提供的电源形式变换成推力器所要求的几种电源，并采用相应的过载、电弧、故障和误动作保护。

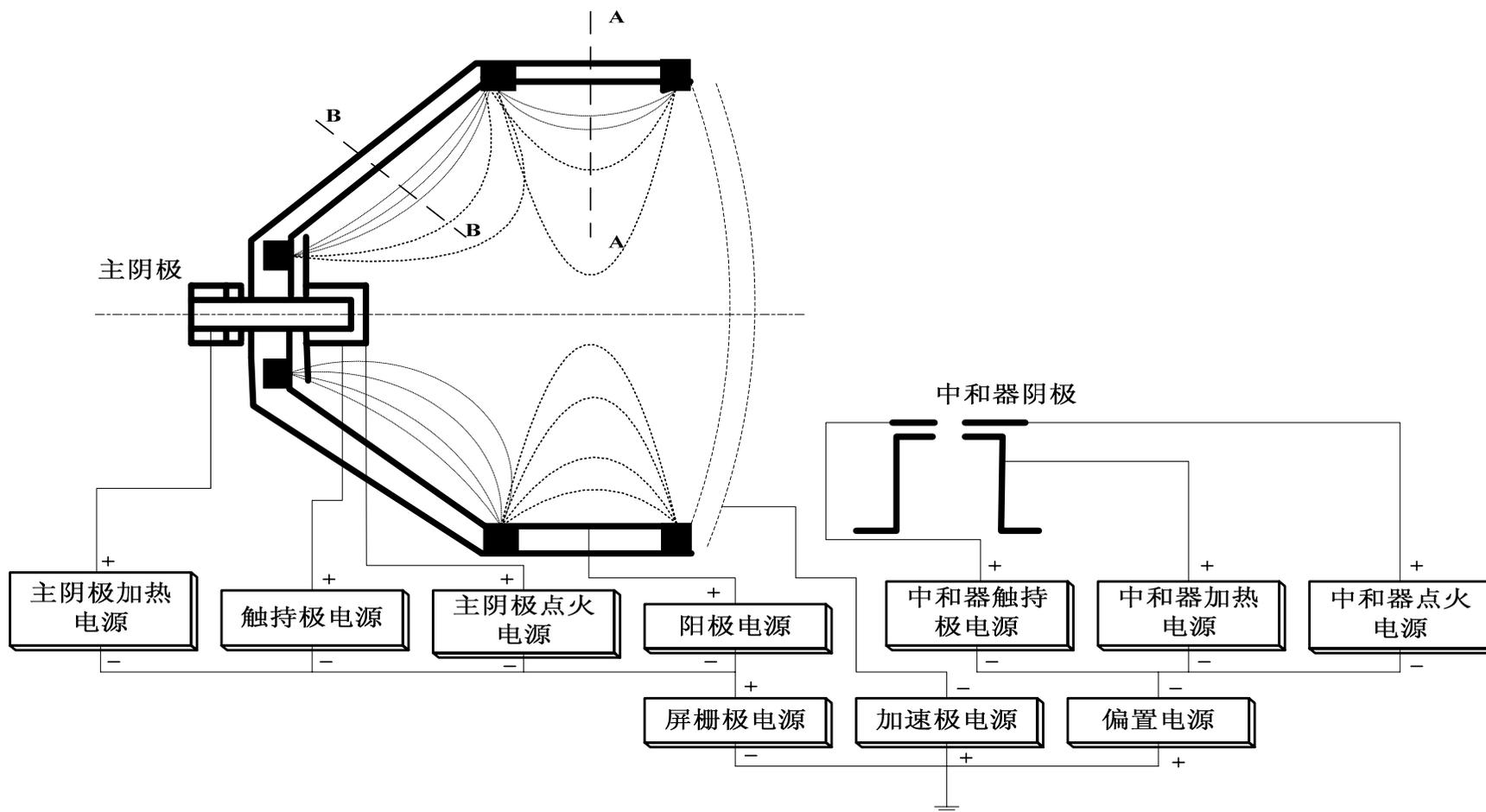


图 4 Kaufman 离子推力器配电组成图

- 点火和放电过程发生在异常辉光放电到弧光放电阶段
- 主要特征是**负阻特性**，当放电达到自持的弧光放电时，电流急剧上升，电压急剧下降
- 当空心阴极加热到足够高的温度(1100℃)时，逐渐升高点火电源电压，触持极电流逐渐增高(从几微安到几十微安)，当电压上升到某一点时，触持极电流突然升到几百毫安
- 触持极电压降到很低，降到氙的电离电位以下，也能维持较大的放电电流
- 点火和触持极电源要选用有限流电阻的直流高压电源和直流稳流电源
- 当阴极点火后，点火电源自动关闭，由低压触持极电源维持放电
- 放电阳极电源、中和器触持极电源、中和器点火电源和触持极电源特性一致
- 主阴极和中和器阴极加热器电源是输出端串有 2 欧姆电阻的稳压电源

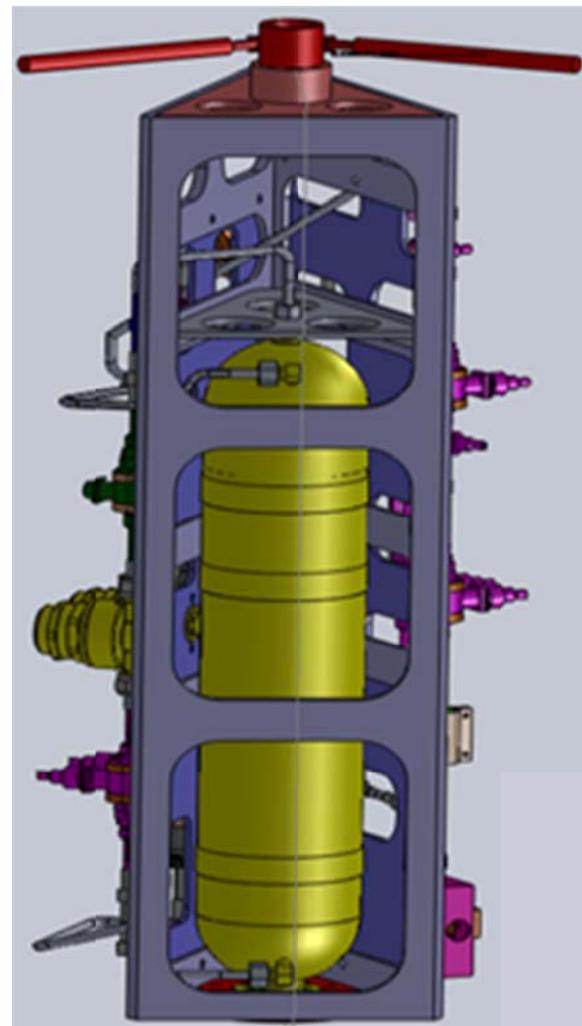
15.2.3. 推进剂储供子系统

储供系统：用来储存工质并定量向推力器输送工质。

组成：工质储存、节流、调节与分配模块。

功能：

- 在指定条件下，从填充时刻到推力器使用结束期间工质的储存；
- 调节推力器工质压强；
- 按要求维持工质的流量；
- 输送工质到推力器。



15.2.4. 数字接口与控制子系统

控制子系统:

- 对电源单元提供控制
- 按一定的程序使离子推力器完成启动、点火、放电、加高压、引出束流、稳定运行、关机等工作

控制单元和电源单元**功能**:

- 提供启动时序逻辑
- 为推力器关键工作参数提供闭合回路控制
- 提取遥测信号。

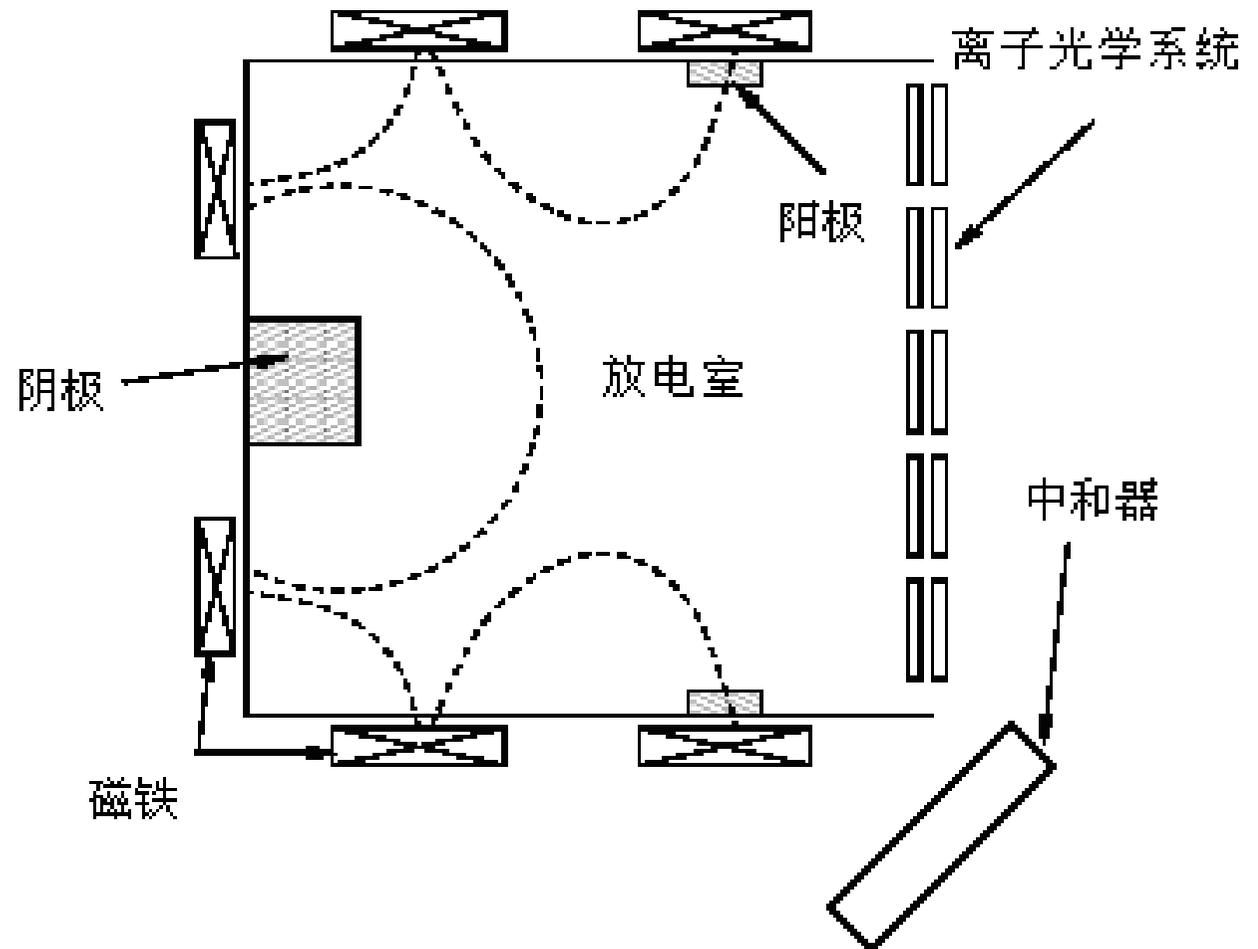
数字接口与控制子系统**组成**:

- CPU
- 数据采集卡
- 阀门驱动卡

15.3. 工作原理

离子推力器的基本工作原理是：

- 由储供子系统将推进剂送入推力器的放电室
- 在放电室中，通过热阴极发射并被电场加速的高能电子电离推进剂原子形成等离子体
- 等离子体中的离子经由栅极系统引出、聚焦并加速，产生推力
- 中和器发射的电子与引出的离子束中和
- 准中性束流排出



阳极

阴极

~1000V

~-200V

屏栅

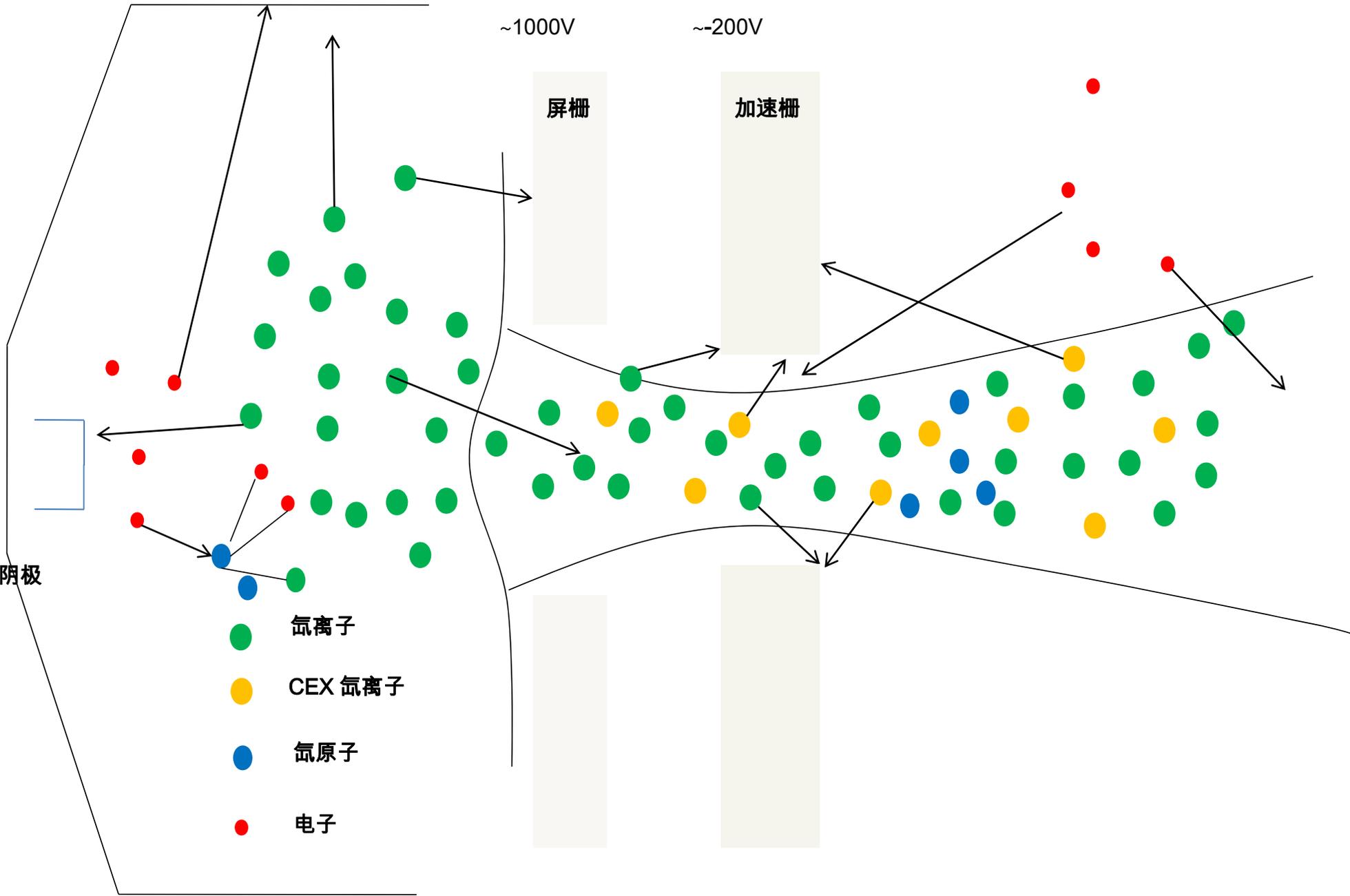
加速栅

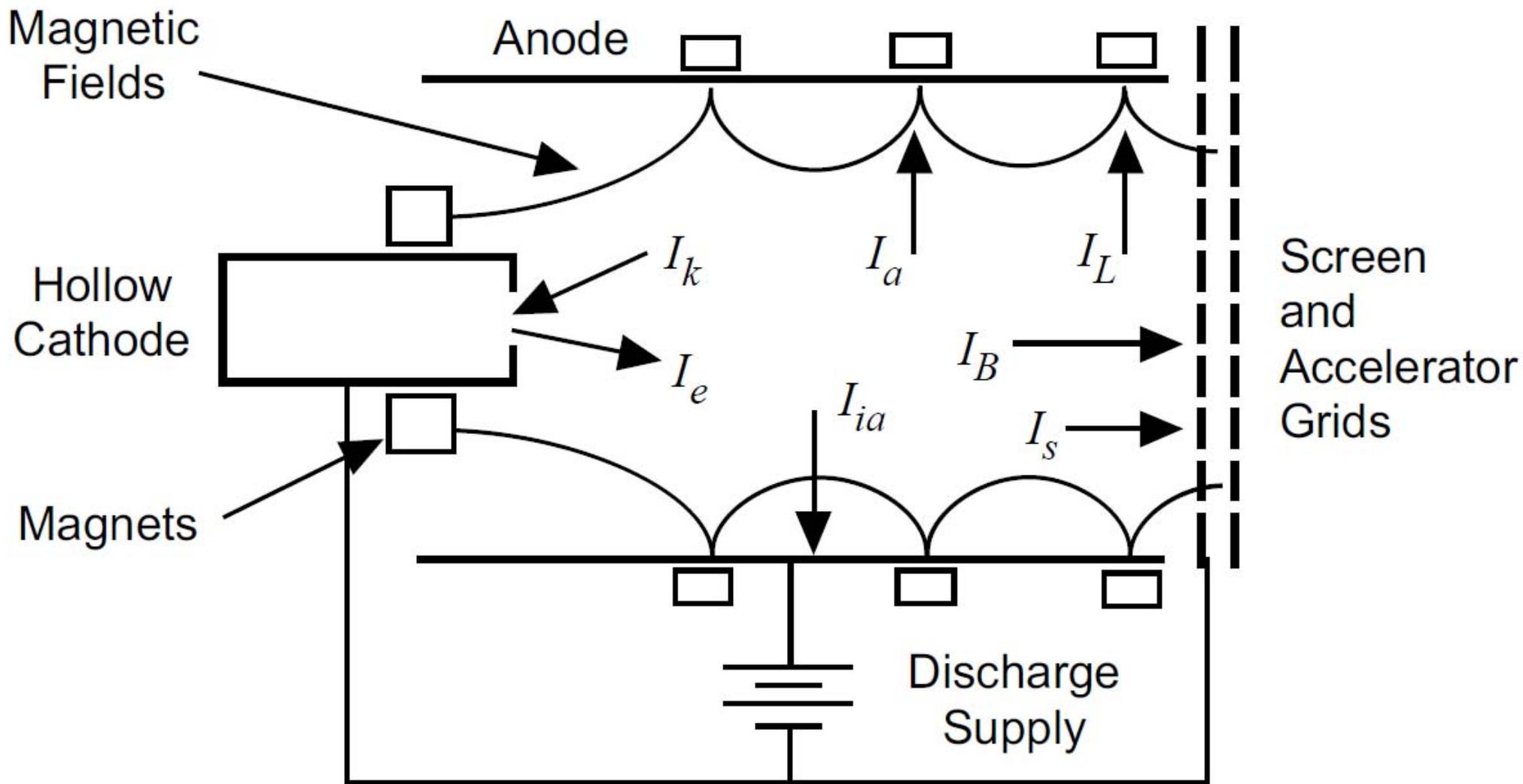
氙离子

CEX 氙离子

氙原子

电子





15.3.1. 中性原子的约束

通过离子光学系统对推进剂工质气体分子的导流系数实现中性原子的约束
要求和特点:

- 降低离子光学系统对推进剂工质气体分子的导流系数，维持放电室中的气体压强，提高推进剂的利用率
- 选择小的加速极透明度
- 增加推力器放电室的长度，增大推进剂工质气体分子在推力器的驻留时间

放电室中的中性原子的驻留时间表示为： $t_{res} = m_i n_n V / \dot{m}_n$

中性原子的质量流率： $\dot{m}_n = m_i n_n c_n A \phi_n / 4$

电离碰撞的平均时间可以表示为： $t_i = 1 / (n_e c_e A_i)$

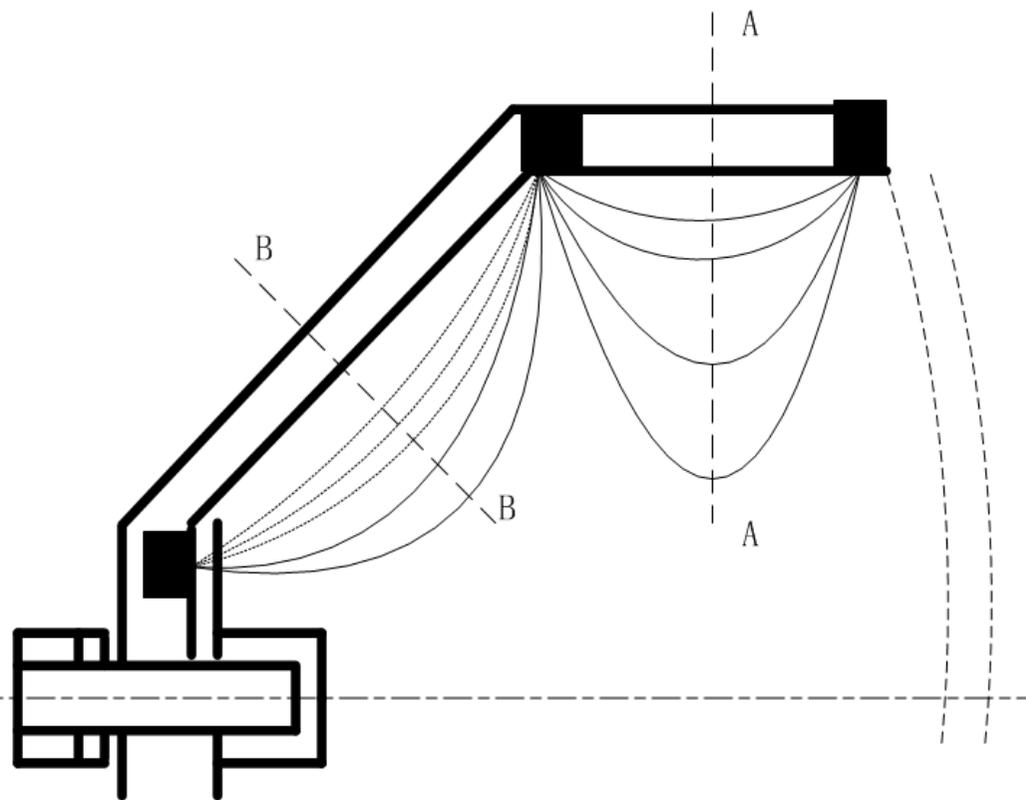
电离条件：驻留时间大于平均电离碰撞时间， $t_{res} > t_i$ ，有：

$$4Ln_e c_e A_i / (c_n \phi_n) > 1$$

式中， n_n ——中性原子的浓度， \dot{m}_n ——中性原子的流率， V ——放电室的体积， $V=AL$ ， A ——放电室的横截面面积， L ——放电室的长度， ne ——放电室的电子浓度， ce ——电子的平均热运动速度， A_i ——电离碰撞截面， ϕ_n ——几何透明度

15.3.2. 电子的约束

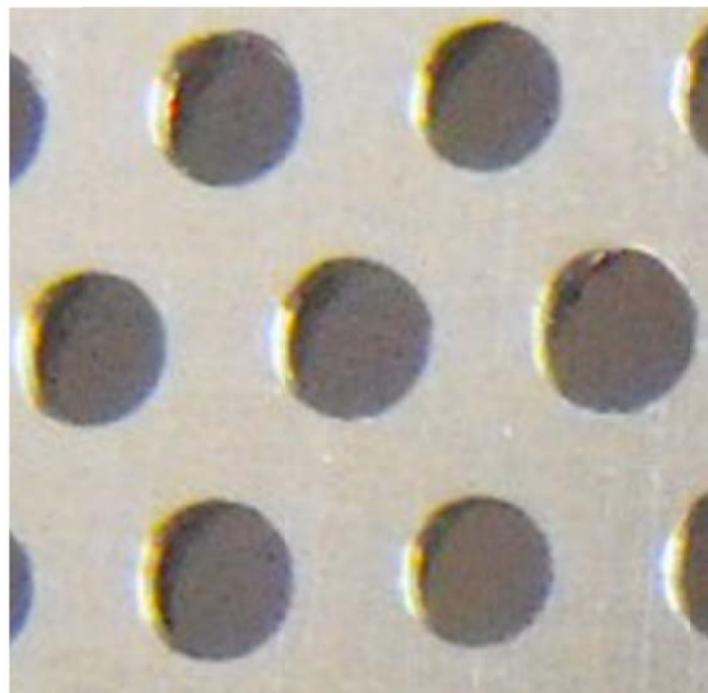
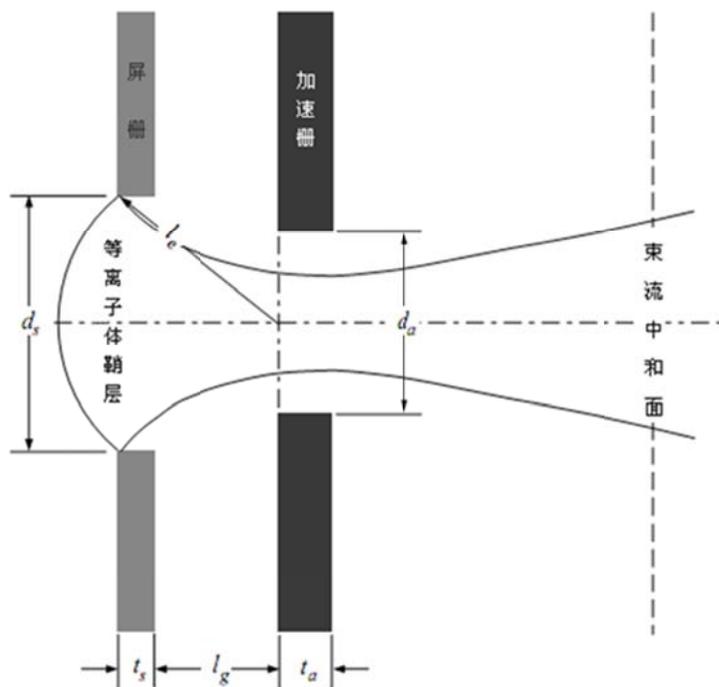
- 电子的约束是通过放电室中的磁场位形实现的
- 延长电子向阳极运动的路径长度，增大电子的存活时间，可以提高推力器的效率
- 放电室和磁场极靴的合理配置
- 使主阴极发射的原初电子区更有效地占据放电室的空间和扩展放电室准无磁场区的空间
- 合理地改变原初电子区的形状
- 改善离子源的束流均匀性、气体的利用率和放电损耗
- 多极的环形会切磁场位形放电室结构方案十分完美



15.3.3. 离子光学系统的原理与要求

对推力器离子引出系统的基本要求是：

- 要能形成聚焦性能良好的离子束，束流发散角较小，而且在推力器参数出现不稳定，诸如等离子体密度有变化、放电室中有异常打火放电时，束流性能的变化要尽量地小。
- 要在指定的引出能量下达到较小的束流发散角，并具有最大的束流。
- 系统在最佳聚焦时要有尽可能大的束流导流系数。
- 离子光学系统对于处于分子流的中性原子具有较低的导流系数，以增大放电室中内外的气体压强，提高气体利用率
- 将电极上截流的离子流减到最小，以提高系统的电效率和延长电极的寿命
- 加速极要维持尽可能低的电压，以减少离子束对加速极的轰击
- 工艺上应保证离子引出系统在工作承接较大的温度变化时，变形量较小，还应有良好的对中精度及耐离子轰击性能，结构要便于加工和安装。



- 空间电荷饱和
- 获得较大的推力—提高束流密度

$$J_h = \frac{\pi \epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2 \cdot e}{m_i}} V_t^{\frac{3}{2}} \left(\frac{d_s}{l_e}\right)^2$$

$$l_e = \sqrt{(l_g + t_s)^2 + \left(\frac{d_s}{2}\right)^2}$$

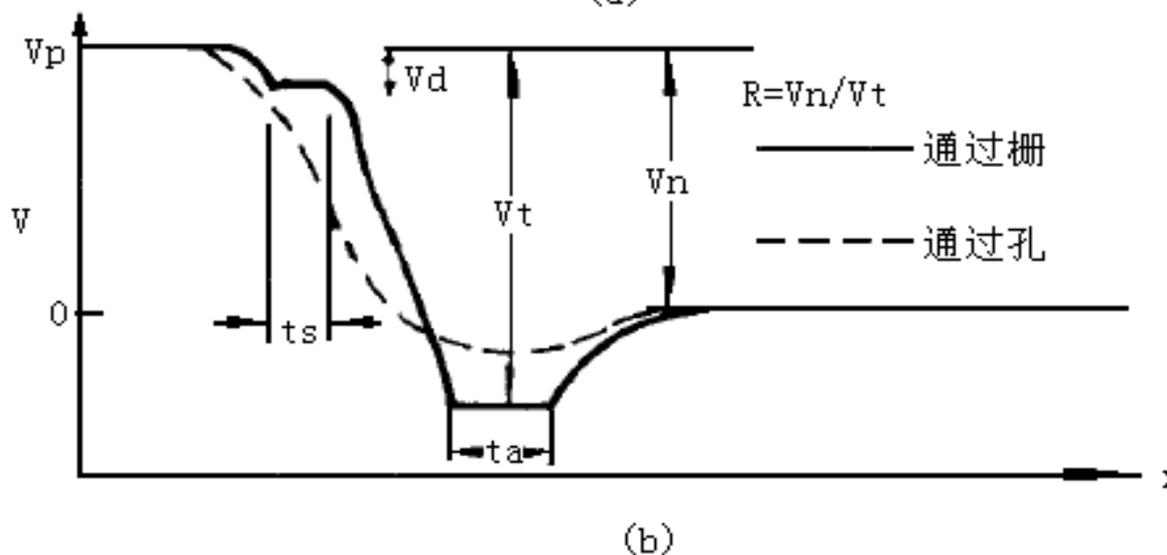
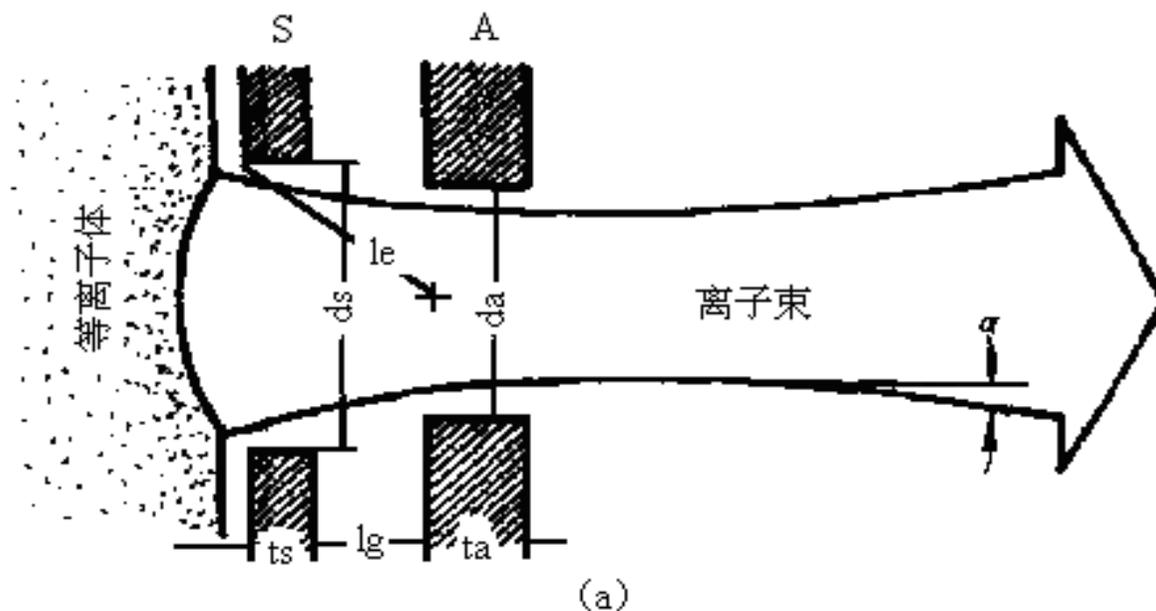


图 5 栅极示意图

束散角（羽流发散：小孔等位面的弯曲、离子之间相互排斥）

$$\alpha = \arctan \frac{R_a - r_a}{L}$$

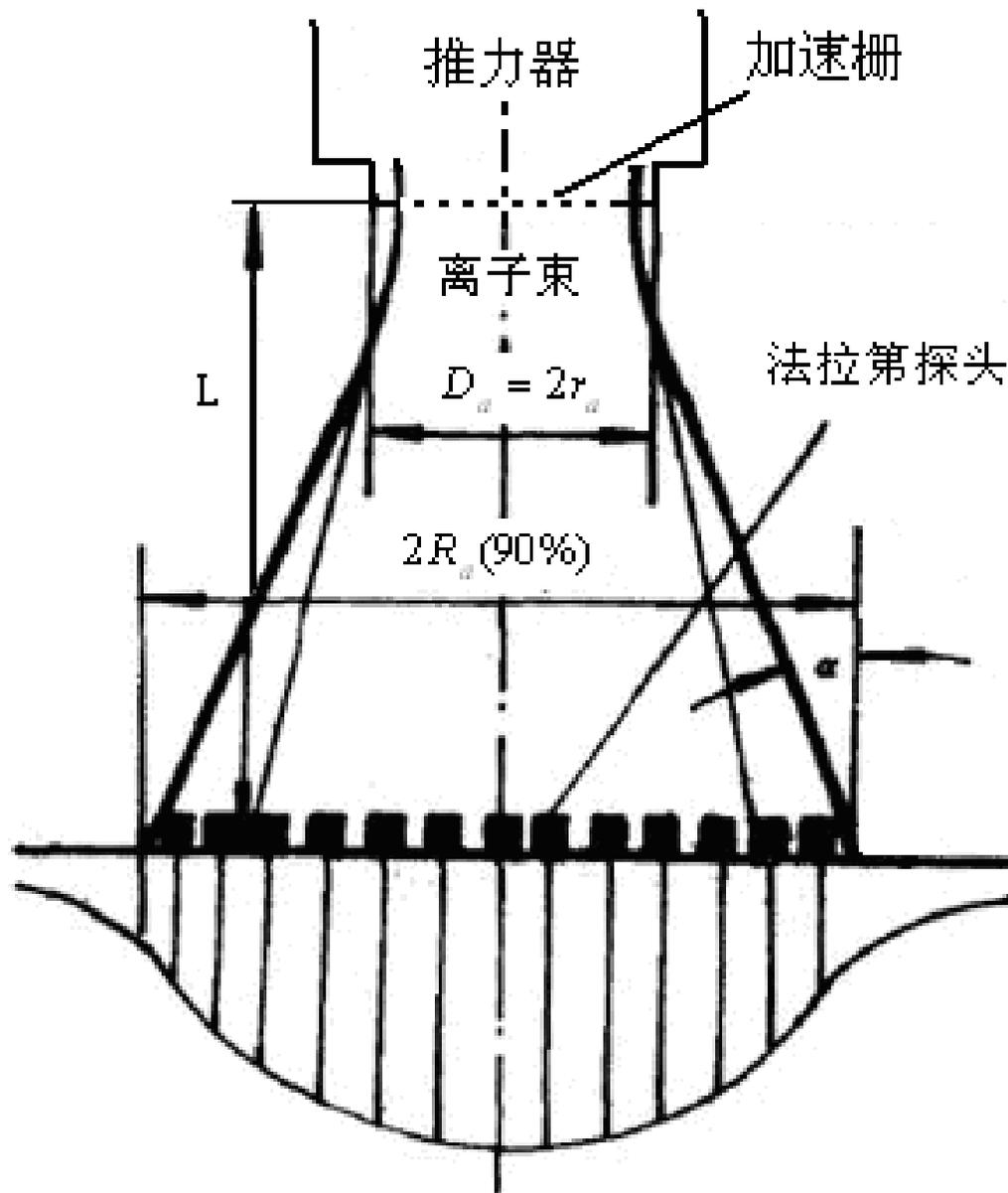
R_a 为接收 90% 积分束流圆面积的半径； r_a 为加速栅极开孔区域半径； L 为加速栅极至束流测试面的距离。

引出束流的均匀性

离子光学系统抽取的总束流与按峰值束流密度抽取的总束流之比，即

$$F = \frac{2\pi \int_0^{r_b} J_b r dr}{J_{b \max} \pi r_a^2}$$

式中 r_b 为引出离子束流的束半径。对于矩形束流密度分布（即均匀分布） $F=1$ ，其他则小于 1。



15.4. 性能参数

主要性能参数包括：推力、比冲、工质利用效率、推力器电效率等
推力 F 的表达式为：

$$F = \dot{m}_{pi} v_{pu} = \eta_v \eta_u \dot{m}_p v_p, \quad v_p = \sqrt{2 e V_B / m_{pi}}$$

消耗工质质量 M_p 为：

$$M_p = M_{pi} + M_{po} + M_{pn}$$

工质利用效率为：

$$\eta_u = \frac{M_{pi}}{M_{pi} + M_{po} + M_{pn}}$$

式中， \dot{m}_{pi} 为工质离子的流率， v_p 为排出速度， v_{pu} 为有效排气速度， V_B 为离子束电位， m_{pi} 为工质单个原子的质量， e 为电子电量， M_{pi} 为电离工质质量， M_{pn} 为中和器工质质量， M_{po} 为逃逸的未电离工质质量。