

4. 冷气推进系统（GPS）

4.1. 概述	2
4.2. 稳压组件	6
4.2.1. 减压器工作原理	7
4.2.2. 减压器特性	9
4.3. 冷气推力器	11

4.1. 概述

冷气推进系统是人类首次使用的空间飞行器推进系统

特点:

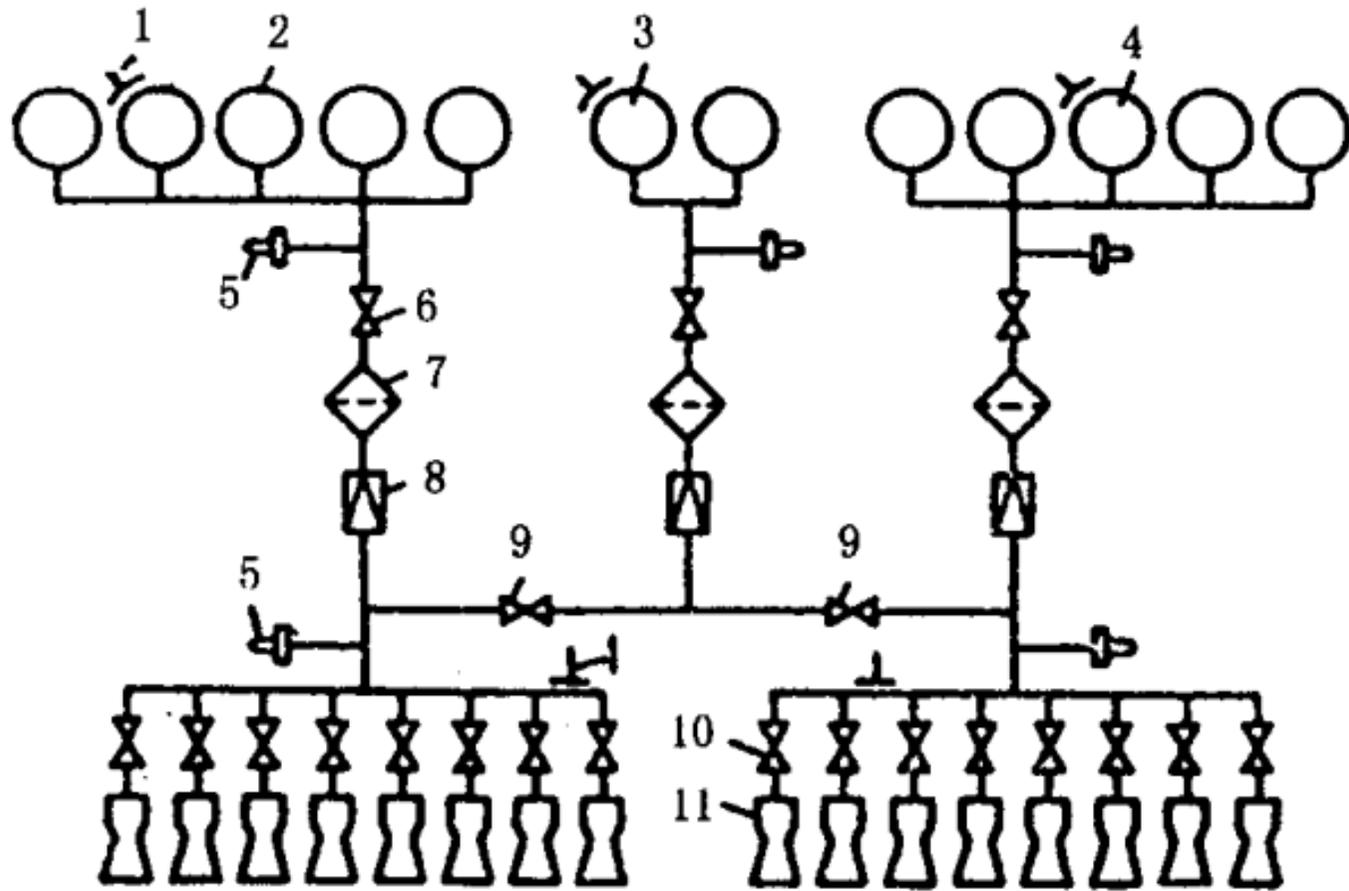
- 结构简单、性能稳定
- 可靠性高
- 无毒、无污染
- 最小脉冲冲量小
- 比冲低
- 成本低

冷气推进系统广泛应用于控制任务:

- 总冲要求低
- 工作时间短
- 安全性要求高

冷气推进系统组成:

- 冷氮气推力器
- 电磁阀
- 温度传感器
- 压力传感器
- 高压气瓶
- 过滤器
- 减压器
- 加注/泄出阀



1, 5 传感器；2, 3, 4 气瓶；6 高压阀；7 过滤器；8 稳压器；
9 输送阀；10 推力控制阀；11 推力器

图 1 冷气推进系统

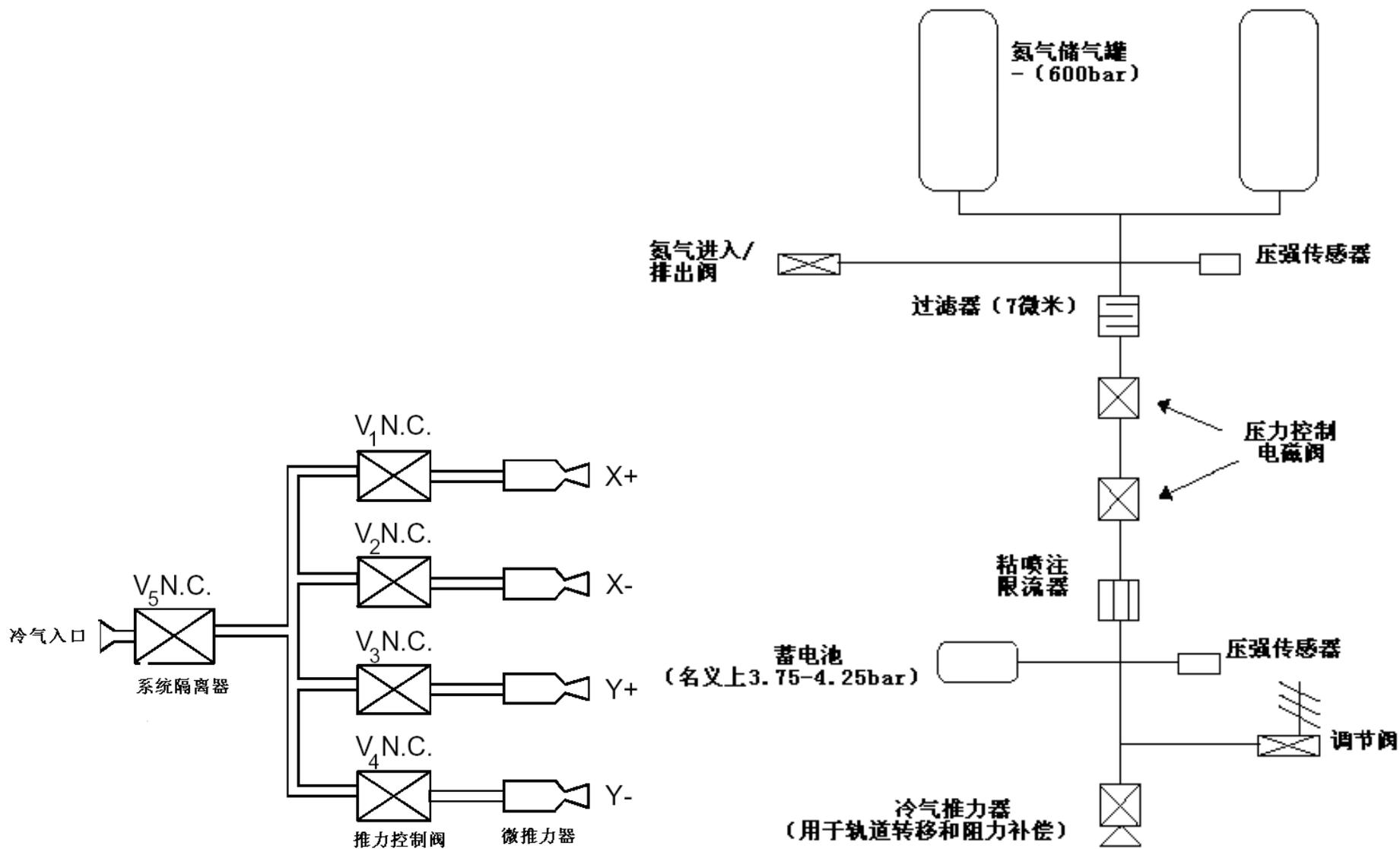


图 2 微型冷气推进系统

4.2. 稳压组件

稳压组件一般由减压器（含过滤器）、一级稳压阀、二级稳压阀组成；

减压器与稳压阀原理相同；

减压器通过启闭件节流，将流体压强降低，使出口压强自动满足要求；

其功能为将高压气瓶压强降至某一规定值，以满足工作要求；

要求出口压强精度高，动态特性好；

在流量变化较大的情况下仍要求出口压强偏差小；

一般的阀门在阀芯上安装阻尼孔以减少高频振荡；

采用薄型高强度聚酯膜片以提高阀门的灵敏度；

减压器的作用一是减压，二是稳压。

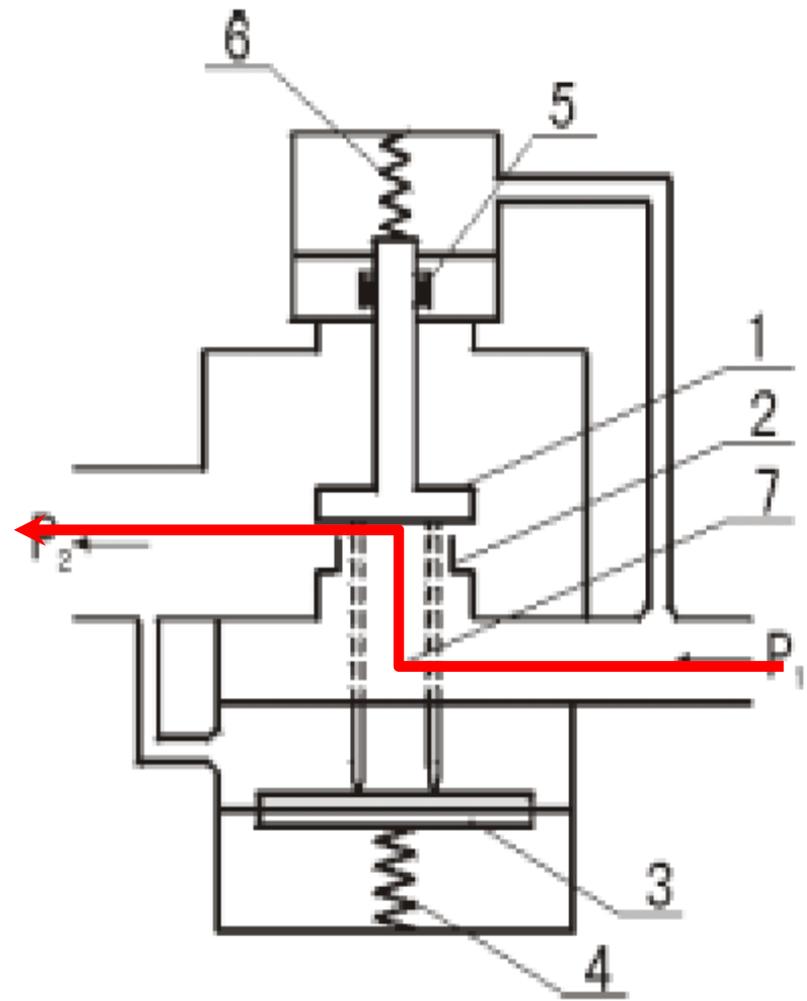
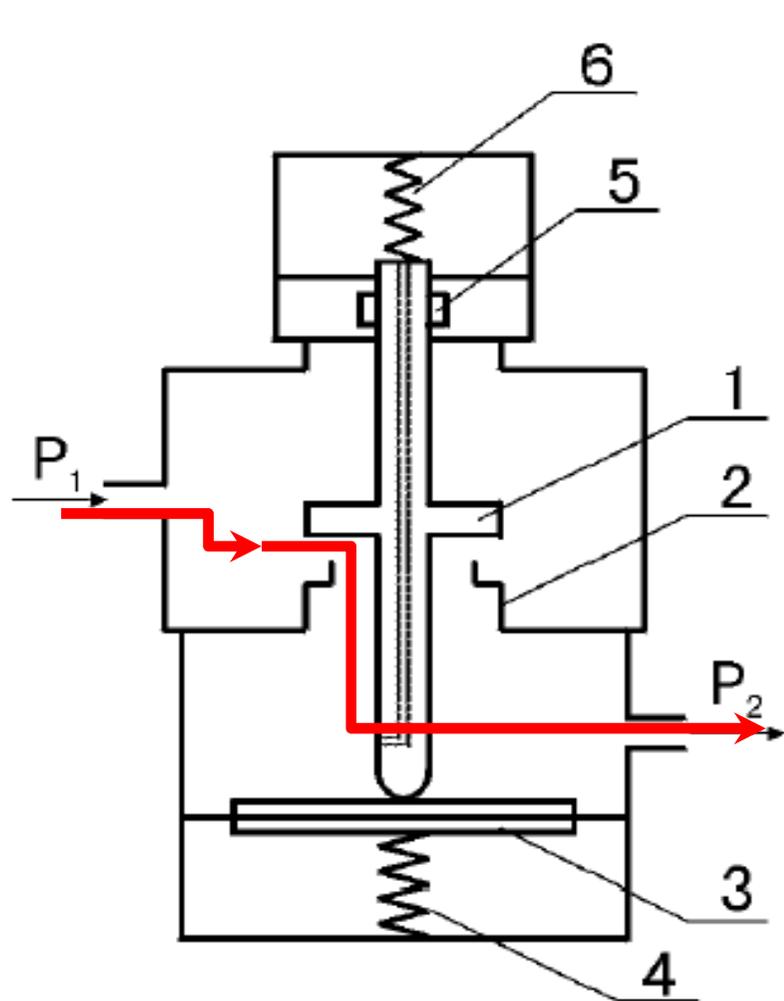
4.2.1. 减压器工作原理

当高压气体流过减压器启闭件（阀芯）与阀座之间形成的狭窄通道时，气体受到节流，在节流过程中气体分子之间以及气体分子与通道壁面之间将发生撞击、摩擦和涡流，气体处于不平衡状态，且是不可逆过程。

节流后压强降低的程度取决于阀芯与阀座之间的开度。

当出口流量一定时，开度越小，压强降低越多。

减压器的稳压原理在于力的平衡作用。



1 阀芯; 2 阀座; 3 敏感元件; 4 主弹簧; 5 卸荷密封; 6 副弹簧

1 阀芯; 2 阀座; 3 敏感元件; 4 主弹簧; 5 卸荷密封; 6 副弹簧; 7 顶杆

$$m\ddot{x} + (k_1 + k_2)x + k_1x_1 + k_2x_2 \pm P_1A_1 + P_2A_2 - P_{XZ} = 0$$

图 3 减压器工作原理图 (左图为逆向卸荷式, 右图为正向卸荷式)

4.2.2. 减压器特性

减压器特性包括静态特性和动态特性，静态特性是指在稳定流动状态下减压器出口压强与入口压强或流量等参数间的函数关系。

当流量不变时，出口压强与入口压强的函数关系成为压强特性；

当入口压强不变时，出口压强与流量的函数关系成为流量特性。

动态特性指在入口压强或流量突然变化或其它扰动因素的作用下，减压器出口压强与时间的函数关系。

影响减压器动态特性的因素很多，其改善措施包括：

(1) 增加入口压强缓冲。在减压器入口增设限流元件（如孔板、缓冲器等），可以减缓入口压强的突然变化，改善启动特性。

(2) 增加弹性元件（如弹簧、膜片等）的总刚度，以提高活动系统的固有频率，提高抗干扰能力。

(3) 增加阻尼。包括增加运动件的摩擦阻尼和设置阻尼腔。

(4) 改变低压腔容积。增大低压腔容积可使气流在低压腔内的缓冲作用加大，增大了抗干扰能力，但低压腔过大也会加大压强振荡和阀芯振荡的相位差，在一定条件下使振幅加大而导致不稳定。

(5) 改变低压腔气流流动方向。使节流后气体不直接作用在敏感元件上，减小对敏感元件的干扰力。

(6) 阀芯开度加大可以改善动态稳定性。因为开度过小时，微小的开度变化会带来流量较大的变化，从而引起压强不稳定。但在保证最大工作开度下应使阀芯的机械行程小，这样可以减小高压气流的冲击，降低启动压强峰，有利于动态稳定，同时节流面处的流量设计应放置涡流，否则易发展为声频振荡。

(7) 减小活动件的质量。活动件的质量越小，运动惯性力也越小，较小的阻尼力可抑制系统的自激振荡。

(8) 改变管路系统。应保证出口管路直径等于甚至大于减压器出口直径。一般而言，加大管路直径和长度可以延长建压时间，避免启动过程中出现自激振荡。

4.3. 冷气推力器

冷气推力器是最早使用的空间飞行器动力装置
推进剂包括：

- 压缩空气、氮气、氦气、氙气和氟气，
 - 液化气体包括氨气、一氧化二氮、丁烷
- 以压缩状态或液化状态贮存在高压容器内。

设计计算

假定：

- 在喷管任一截面上，气流为一维流动，气体参数是均一的
- 气体为理想气体
- 气体流动是定熵的，喷管中的总温 T_c 、总压 P_c 保持不变。
- 气体在冷气推力器绝热，经喷管为完全膨胀

冷气推力器设计计算过程所用的公式如下：

推力器喷管面积比为：

$$\varepsilon(M_a) = \frac{A}{A_t} = \frac{1}{M_a} \left[\frac{2}{k+1} \left(1 + \frac{k-1}{2} M_a^2 \right) \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}}$$

气流温度比为（滞止温度比）：

$$\tau(M_a) = T/T_c = \left(1 + 0.5(k-1)M_a^2 \right)^{-1}$$

膨胀压强比为（滞止压强比）：

$$\pi(M_a) = P/P_c = \left(1 + 0.5(k-1)M_a^2 \right)^{-\frac{k}{k-1}}$$

动压比（ $0.5\rho v^2/P_c$ ）为：

$$\omega(M_a) = 0.5kM_a^2 \left(1 + 0.5(k-1)M_a^2 \right)^{-\frac{k}{k-1}}$$

利用面积比函数可以获得喷管出口马赫数 **Ma**，并依次根据工作室压 **Pc**、推力室喷管入口温度 **Tc**，得到喷管出口截面的温度和压强等参数。

冷气推力器理论特征速度计算公式为： $C_{th}^* = \sqrt{RT_c}/\Gamma$

其中， $\Gamma = \sqrt{k} \left(2/(k+1) \right)^{(k+1)/2(k-1)}$ 。

冷气推力器真空推力系数为： $C_F = \left[2\omega(M_{a_e}) + \pi(M_{a_e}) \right] \varepsilon(M_{a_e})$

推力器喷管喉部截面气流参数 ($Ma=1$)

压强、速度、温度、马赫数计算公式为:

$$T_t = T_c \left(\frac{2}{k+1} \right), \quad p_t = p_c \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$u_t = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_c}, \quad Ma_t = \frac{u_t}{\sqrt{kRT_t}} = 1$$

喷管内任一截面的气体流动参数和该处的压强比 $\pi(M_a) = P/P_c$ 有关
得到任意截面的流动参数:

$$T = T_c \left(P/P_c \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad u = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_c \left[1 - \left(P/P_c \right)^{\frac{k}{k-1}} \right]}$$

冷气推力器的真空比冲为: $I_S = C^* C_F$

表 2 冷气推力器性能

推进剂	分子量 (g/mol)	密度① (kg/m ³)	比冲② (s)	
			理论 (特征)	实际
氢气 Hydrogen	2.0	0.02	296	272
氦气 Helium	4.0	0.04	179	165
氖气 Neon	20.4	0.19	82	75
氮气 Nitrogen	28.0	0.28	80	73
氩气 Argon	39.9	0.44	57	52
氪气 Krypton	93.8	1.08	39	37
氙气 Xenon	131.0	2.74③	31	28
氟利昂 Freon 12	121.0	0.98	46④	37
氟利昂 Freon 14	88.0	0.96	55	45
甲烷 Methane	16.0	0.19	114	105
氨气 Ammonia	17.0	0.60	105	96
丙烷 propane	44.0	1.97	76	68
丁烷 butane	58.0	2.59	69	62
一氧化二氮 Nitrous Oxide	44.0	2.05	67④	61
二氧化碳 Carbon dioxide	44.0	Liquid	67	61

*注：①压强为 24.14MPa，温度为 273K；②温度为 298K，真空条件下 Pa=0Pa；

③最好在低压 13.80MPa 下贮存，以增大推进剂与贮箱的质量比；④温度 311K，面积比为 100。

冷气推力器包括电磁阀和冷气喷嘴

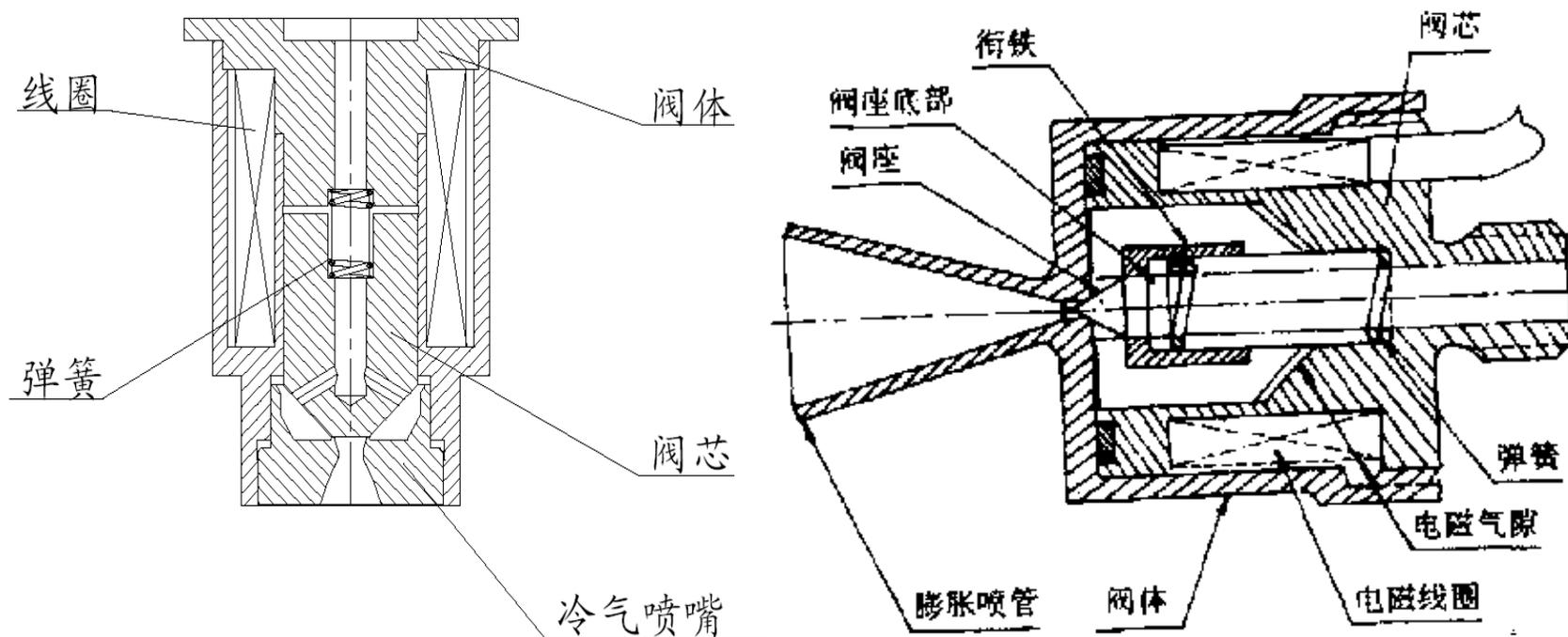


图 5 冷气推力器结构图

当推力器接收到电信号后，对电磁线圈通电，挡铁和衔铁（阀芯）之间产生电磁吸引力，阀芯在电磁力的作用下克服阀芯上的弹簧力、摩擦力和推进剂压强，使阀芯抬起，推力器开始工作；

当断电后，磁场消失，阀芯在弹簧力和推进剂压强力的作用下克服剩磁力与摩擦力，阀芯回到阀座上，切断阀芯与阀座之间的通路，推力器停止工作。

例：冷气系统设计，设计一个冷气系统满足下列要求：

总冲量 5000Ns

最小冲量 0.005Ns

面积比为 100

贮箱压力 30Mpa

推进器的工作温度为 40°C，比热比 $k=1.659$

使用氦为推进剂。

最小响应时间 20 毫秒

计算推力、比冲、燃料质量，体积

可得推力如下：

$$F = 0.005Ns / 0.02s = 0.25N$$

0.25N 的推力大小在冷气推力器的能力之内。

如果航天器为三轴稳定，理论上需要 12 个推进器来提供纯推力。

面积比为 100 时，

$$\varepsilon(M_a) = \frac{A}{A_t} = \frac{1}{M_a} \left[\frac{2}{k+1} \left(1 + \frac{k-1}{2} M_a^2 \right) \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}} = 100, \quad Ma = 10.2823$$

计算得 $Pe/Pc \approx 0.0001222$ ，计算比冲的理论值：

$$\begin{aligned} I = u &= \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_c \left[1 - \left(P / P_c \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \\ &= \sqrt{(2 * 1.659 * 2077 * (40 + 273.15) / 0.659) (1 - 0.000122^{0.659/1.659})} \\ &= 1809 \text{ m / s} \end{aligned}$$

实际的比冲大约为理论值的 **90%**左右，约为 **1629m/s**。

所需氦的总重量可以从总冲中得到：

$$m = 5000 / 1629 = 3.07 \text{ kg}$$

贮箱要求可以存储 **3.07kg** 的氦以及 **0.3kg** 无法使用的氦

体积可以从状态方程中得到：

$$V = \frac{mRT}{P} = \frac{3.37 * 2077 * 313.15}{30,000,000} = 0.073 \text{ m}^3$$