

10. 电阻加热式推力器（Resistojet）

- 10.1. 概述 2
- 10.2. 工作原理与分类 4
- 10.3. 系统组成 5
 - 10.3.1.直接电阻加热式推力器 5
 - 10.3.2.间接电阻加热式推力器 7
 - 10.3.3.电热增强肼推力器 8
 - 10.3.4.生物废气电阻加热推力器 10
- 10.4. 主要特点 12
- 10.5. 主要参数与性能 13
 - 10.5.1.直接加热式电阻加热推力器 13
 - 10.5.2.间接电阻加热式推力器 14
 - 10.5.3.电热增强肼推力器 14

10.1. 概述

电阻加热式推力器

- 属于电热式推力器。
- 利用气体 (H_2 、 N_2 、 He 、 N_2O 和 Ar 等) 或者液体 (N_2H_4 、 NH_3 、 C_4H_{10} 和 H_2O 等) 作为推进剂。
- 典型的推力从 1mN-10N, 稳态工作时效率达 80%
- 最简单的电推力器, 其技术来源于常规的热传导、热对流和热辐射
- 推进剂在流过电阻加热的难熔金属表面时被加热, 加热器的结构形式:
 - ◆ 流动方向平行放置的系列加热线圈 (图 1a);
 - ◆ 沿流动方向垂直放置的系列加热线圈 (图 1b);
 - ◆ 球形钨金属床 (图 1c);
 - ◆ 尖劈形加热器 (图 1d);
 - ◆ 壳体壁本身被电阻加热 (图 1e)。
- 加热器工作在直流或交流电源上, 功率范围为 1W~60kW, 能以稳态与脉冲态模式工作。

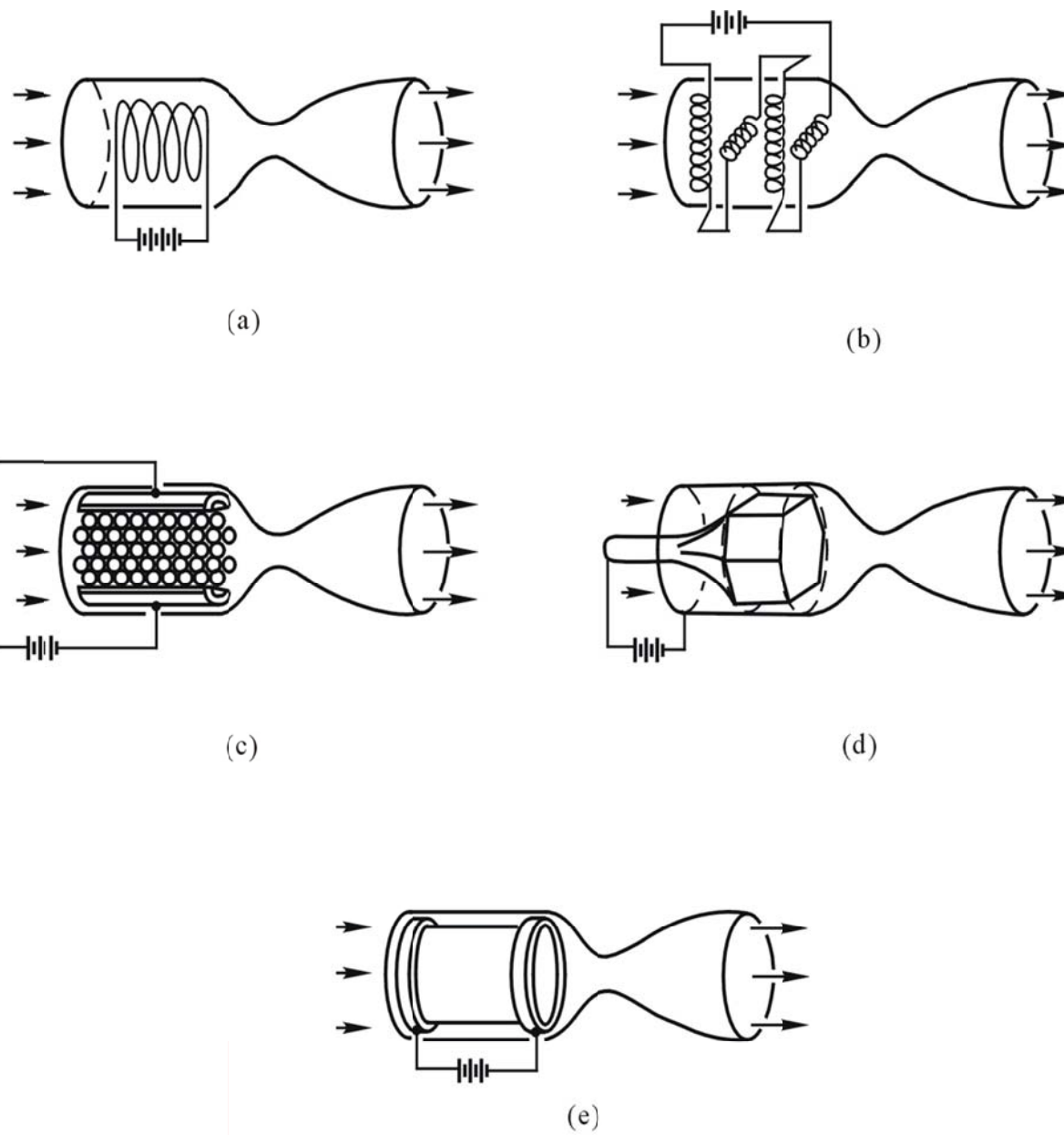


图 1 电阻加热推力器构型

10.2. 工作原理与分类

- 利用电能（电流流过电阻丝产生的焦耳热）把推进剂加热到高温，然后通过缩扩喷管的气动热力加速喷出，从而将电能转化为定向射流的动能产生反作用力。
- 由于材料的限制，工作温度低于 2700K，最大比冲在 300s 左右。
- 氢作推进剂时达到最高比冲（因其分子量最小），但密度低。
- 可用作推进剂气体如： O_2 、 H_2O 、 CO_2 、 NH_3 、 CH_4 和 N_2 。
- 由肼催化分解所产生的 NH_3 、 H_2O 混合气体预热至 700℃ 以上，然后通过电加热至更高的温度，单组元电加热推力器。
- 电阻加热式推力器又可分为：
 - ◆ 直接电阻加热推力器
 - ◆ 间接电阻加热推力器
 - ◆ 电热增强肼推力器
 - ◆ 生物废气电阻加热推力器。

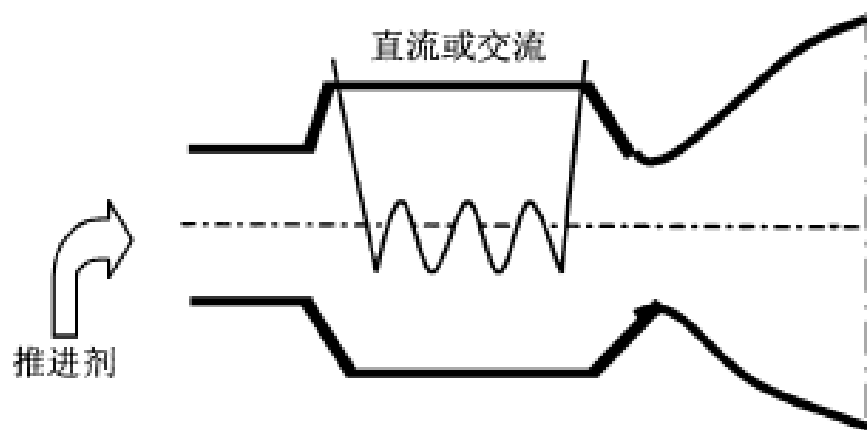


图 2 电阻加热式推力器原理图

10.3. 系统组成

典型的电阻加热推力器由三部分组成：

- 推力器本体
- 推进剂贮存和供应系统
- 电源与信号处理系统。

10.3.1. 直接电阻加热式推力器

ДЭН—15 是俄罗斯卫星上用的电阻加热推力器。

ДЭН—15 推力器还有管路、阀门和真空热屏蔽等部件。

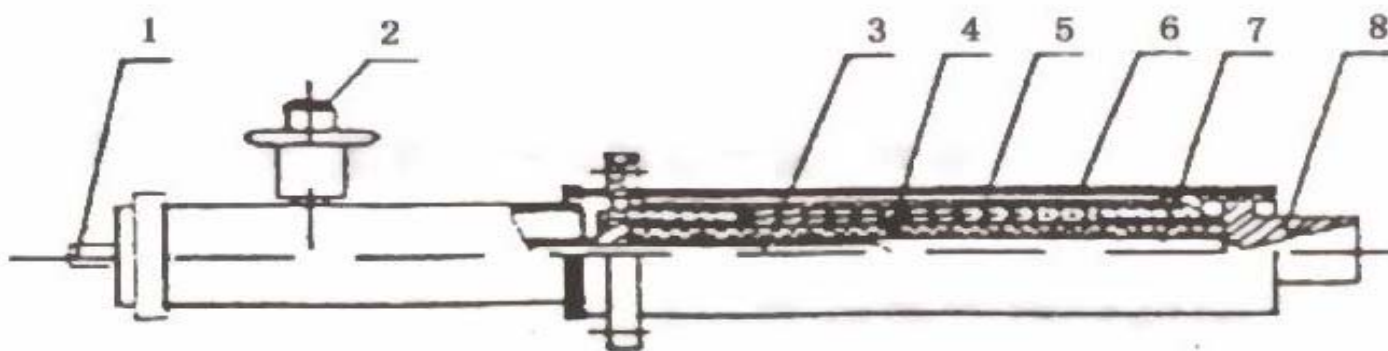


图 3 ДЭН—15 电阻加热式推力器

- 1—电源输入接头
- 2—推进剂节流调节器
- 3—温度敏感元件
- 4—多孔加热器
- 5—粉末绝缘件
- 6—外室；7—内室
- 8—喷嘴

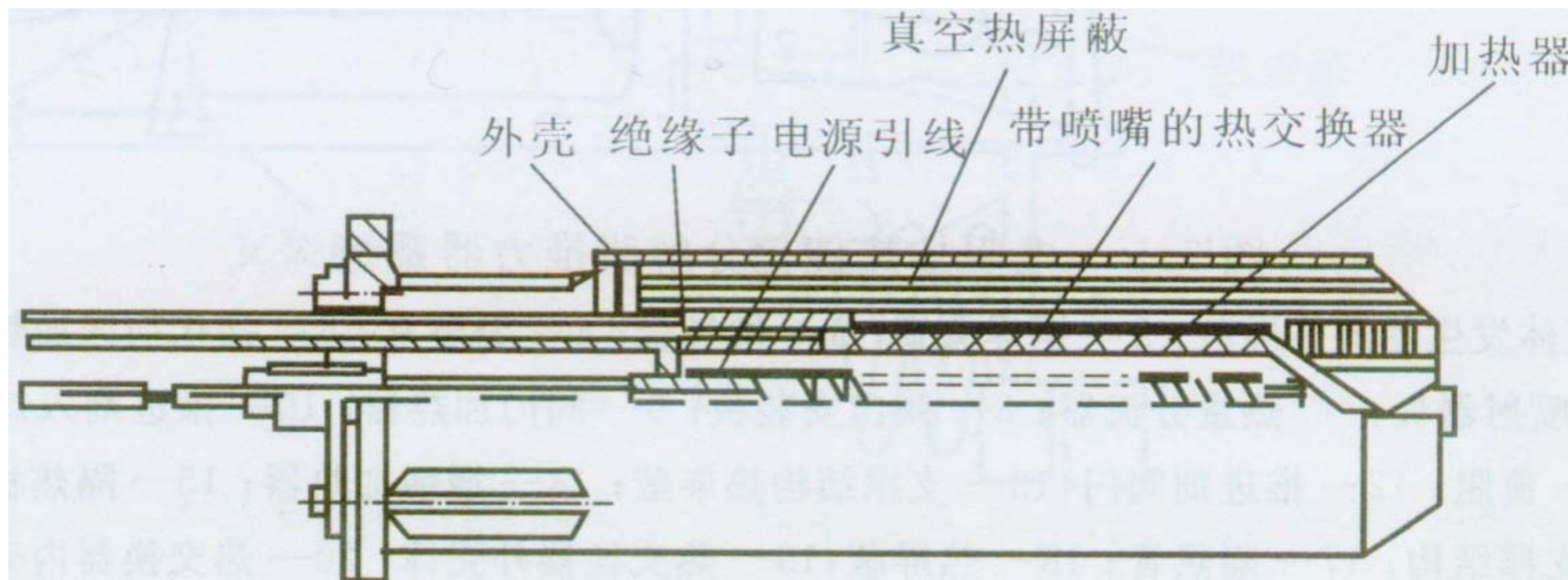
- 推力器的电源通过接头引入
- 推进剂通过侧边的节流调节器和孔达到外室的圆柱形空间
- 当推进剂从外室粉末绝缘件和多孔加热器流进圆柱形室的内部时被加热
- 被加热的推进剂经喷嘴喷出
- 通过测温元件可以把推进剂的温度控制精度达到 $\pm 40\text{K}$ 。

ДЭН—15 的设计特点:

- 采用热交换效率很高的多孔（平均孔径为 $30\mu\text{m}$ ）电加热器和粉末绝缘件组合而成的热交换器；
- 采用简单的继电器电路控制电加热器，保持稳定；
- 采用半导体电加热器，热态电阻比冷态电阻高 $2\sim 3$ 倍，排除了控制开合过程中的电流浪涌；
- 通过专门的制作工艺，改变电阻率，适应不同卫星上的电源要求，无需电压变换器；
- 加热器具有良好的抗氧化性和还原性；
- 采用微型节流装置，可以单独对每个推力器进行推力调节。

10.3.2. 间接电阻加热式推力器

俄罗斯法克尔（Fakel）设计局研制的一种间接加热式推力器。



通过热交换器的通道将辐射热传递给推进剂。推力器的主要部件有：

- 螺旋形加热器：电加热器用在高温下具有良好热稳定性的热解石墨制成。
- 带有螺旋形通道和喷嘴的圆柱形热交换器：热交换器用钼加工而成。
- 真空热屏蔽、电源导线、支撑绝缘子、外部壳体。

10.3.3. 电热增强肼推力器

由推进剂贮箱与供电系统、电源处理系统和推力器本体组成。

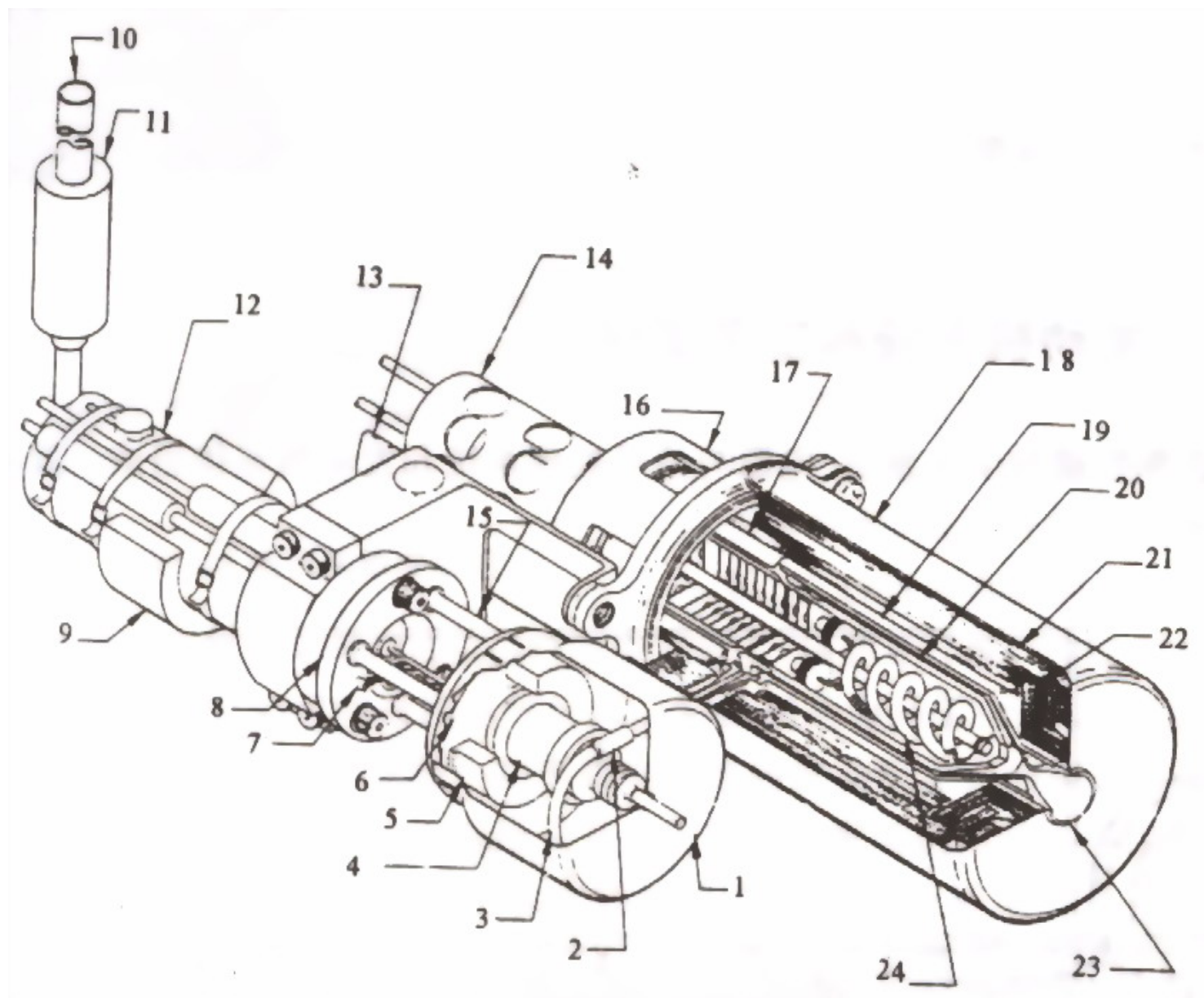
推力器本体包括阀门、肼催化分解室、热交换器和喷咀等主要部分。

热交换器采用外热式结构（即电加热器与气态推进剂不直接接触）。

来自分解室的肼分解气体流经绕圆周分布的排管内的凹槽到混流室，然后经喷咀喷出。

液态肼经阀门和喷注器进入催化剂床并在分解室中分解成氮，氢和氨的气体混合物。

在分解室与喷咀之间加进了一个热交换器，利用电阻加热的方式提供附加的热量，使气体混合物的温度进一步提高，然后经喷咀出，提高了推力器的性能。



1—气体发生器的热屏蔽, 2—铜焊套管, 3—供气管, 4—分解室, 5—催化床加热器, 6—喷射器板, 7—热量分流器, 8—阀门安装板, 9—阀门加热器, 10—推进剂入口, 11—流阻, 12—推进剂阀门, 13—支承结构热屏蔽, 14—增强加热器, 15—隔热板, 16—支承结构, 17—隔热管, 18—热屏蔽, 19—热换热器外壳体, 20—热换热器内壳体, 21—螺旋形卷绕辐射屏蔽, 22—辐射屏蔽圆盘, 23—喷咀, 24—加热丝

图 5 电阻加热催化分解肼推力器系统

10.3.4. 生物废气电阻加热推力器

生物废气作推进剂的推力器，推力范围为 $0.0445\text{N}\sim 4.45\text{N}$ 。

采用同心管式热交换器结构。

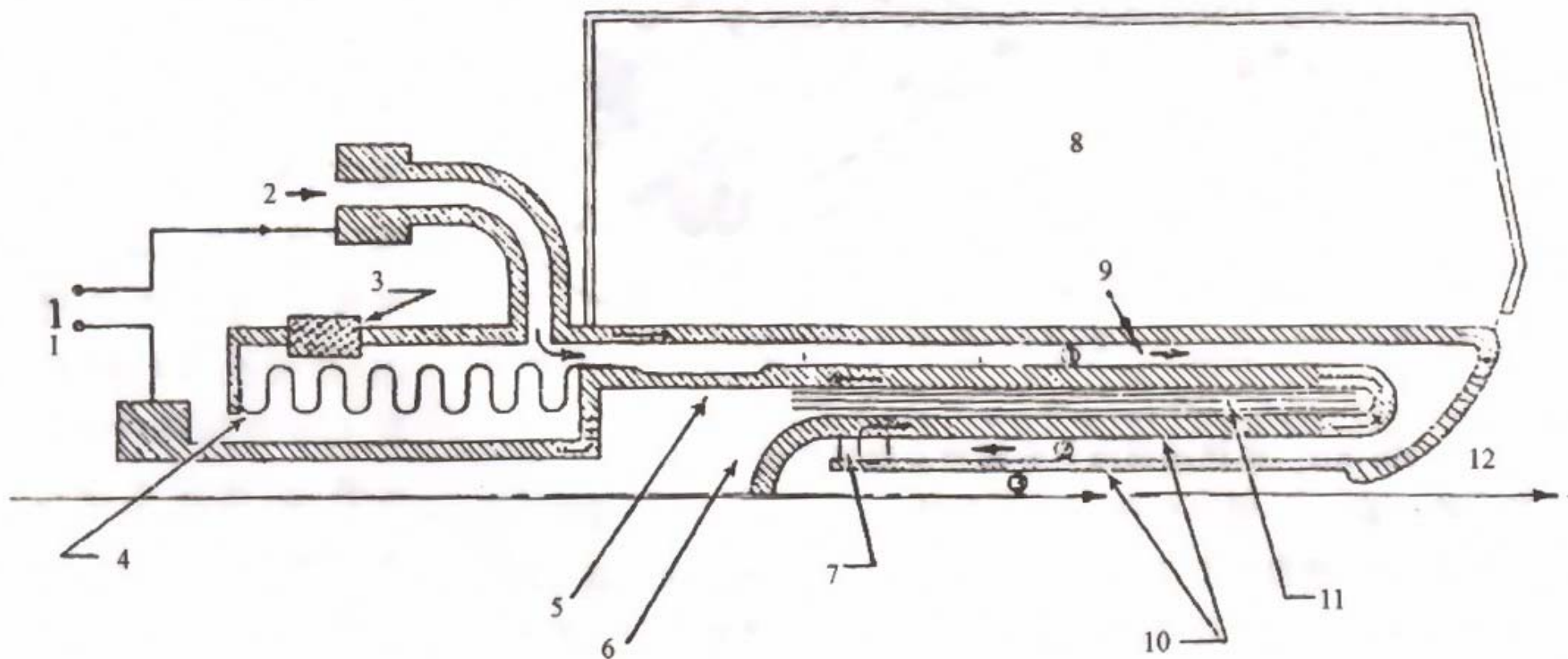
典型的生物废气包括 $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{H}_2, \text{CH}_4$ 及少量的 N_2, O_2 。

具有下述优点：

- 热效率高，耗电少；
- 在高比冲运行时，气体温度可接近壁温；
- 寿命长。

推力器本体包括气体热交换器和喷咀。

- 气体热交换器中，电流从外壳流经壳端，喷咀及支杆，然后到内部加热件部分。内部加热件部分大约提供 75% 的欧姆热。
- 喷咀把加热到高温的气体加速，产生推力。



1—电源接线 2—推进剂入口 3—电绝缘子 4—波纹管 5—热障管 6—真空夹套
7—支撑接头 8—热绝缘 9—通道 10—加热器 11—辐射屏蔽 12—喷咀

图 6 生物废气电阻加热推力器

10.4. 主要特点

- 结构简单、价格便宜、安全可靠、操作和维护方便、污染小
- 适用于小型、低成本卫星的轨道调整、高度控制和位置保持
- 受结构材料的限制，工质加热的温度低
- 与化学火箭一样，比冲正比于温度的平方根，一般比冲为 300s 左右
- 为达到一定的总冲或速度增量，航天器需携带较多的工质
- 以水为工质的电阻式推进器还较适合于长期运行的载人航天器，如空间站
- 空间站在运行期间需要进行机动和变轨，推进剂消耗量很大，可以充分利用生活保障系统产生的大量废水作工质，减少地面向空间站补给推进剂的运输量
- 羽流是非离子化的，没有电磁污染问题

10.5. 主要参数与性能

效率在 65%到 85%之间。

比冲主要取决于：

- 推进剂分子量；
- 推力室和喷管所能承受的最高温度。

10.5.1. 直接加热式电阻加热推力器

表 1 直接加热电阻推力器主要性能与结构参数

质量,kg	0.490	总冲,kN·s	500
ДЭН—15 本体,kg	0.250	推进剂	氨
电磁阀,kg	0.160	比冲,m/s	2900
固定支架 ,kg	0.080	推力,N	0.05~0.3
输入功率,W	100~450		

10.5.2. 间接电阻加热式推力器

表 2 间接电阻加热式推力器的主要性能与结构参数

推力	N	0.02~0.05	推进剂	氨	
比冲	m/s	2500	输入功率	W	80~200

* 注：数据来自俄罗斯法克尔（Fakel）设计局研制推力器。

10.5.3. 电热增强肼推力器

- 比冲和推力随着加热功率的增加而增加
- 流量增加（在固定比功率下）引起实际性能降低
- 最高比功率（功率同质量流量之比）是在相对低流量、低推力和适度增强的加热器下达到的
- 在较高的温度下，气体分子的离解明显降低了热动力膨胀的能量

表 3 典型电热增强推力器的性能

推进剂	液态肼
入口压强/MPa	0.689~2.41
催化剂出口温度/K	1144
加热后出口温度/K	1922
推力/N	0.18~0.33
流量/ (kg/s)	$5.9\times 10^{-5}\sim 1.3\times 10^{-4}$
真空比冲/s	280~304
加热器功率/W	350~510
阀门功率/W	9
推力室质量	0.816
总冲/ (N·s)	311000
脉冲数	500000
最小冲量/ (N·s)	0.002
状态	可实际应用

*注：数据来自 Primex 宇航公司 MR-501。