

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

F03H 1/00 (2006.01)

H05H 1/54 (2006.01)



## [12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200480007449.5

[43] 公开日 2006年4月19日

[11] 公开号 CN 1761816A

[22] 申请日 2004.3.17

[21] 申请号 200480007449.5

[30] 优先权

[32] 2003.3.20 [33] EP [31] 03290712.3

[86] 国际申请 PCT/US2004/008054 2004.3.17

[87] 国际公布 WO2005/028310 英 2005.3.31

[85] 进入国家阶段日期 2005.9.19

[71] 申请人 埃尔温有限公司

地址 美国特拉华州

[72] 发明人 G·埃姆瑟勒姆

[74] 专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司

代理人 程伟 王初

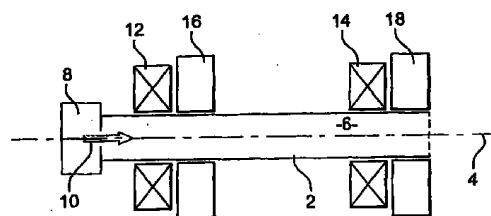
权利要求书4页 说明书21页 附图6页

### [54] 发明名称

航天器的推进器

### [57] 摘要

一种推进器，具有一个限定在一个喷管(2)中的腔体(6)。喷管具有一个纵向轴线，其定义出推进器的轴线(4)；一个位于腔体一端的喷射器(8)在喷管中喷射可电离气体。一个磁场发生器具有两个线圈(12, 14)，产生一个与轴线平行的磁场；磁场沿着轴线(4)具有两个最大点；一个电磁场发生器在两个线圈之间具有一个第一共振腔(16)，在腔体(6)中两个磁场最大点之间产生一个电子回旋共振微波电离场。电磁场发生器具有一个位于第二线圈(14)另一侧的第二共振腔(18)。第二共振腔(18)产生一个有质动力加速场加速电离气体。推进器通过电子回旋共振电离气体，并且随后通过磁化有质动力既加速电子又加速离子。



1. 一种推进器，包括
  - 限定了推进器轴线的腔体；
  - 5 - 用于在腔体中喷射可电离气体的喷射器；
  - 用于产生磁场的磁场发生器，所述磁场沿着轴线至少具有一个最大点；
  - 电磁场发生器，用于产生
    - 腔体中的微波电离场，位于所述最大点的一侧；及
    - 10 - 磁化有质动力加速场，位于所述最大点的另一侧。
2. 如权利要求 1 所述的推进器，其中磁场与轴线的夹角小于  $45^\circ$ ，优选地小于  $20^\circ$ 。
- 15 3. 如权利要求 1 所述的推进器，其中推进器中的离子回旋共振周期至少比离子在推进器中的穿越时间高一个数量级。
4. 如权利要求 1 所述的推进器，其中磁场最大值与最小值的比介于 2 到 20 之间。
- 20 5. 如权利要求 1 所述的推进器，其中电磁场与直辐射方向的夹角小于  $45^\circ$ ，优选地小于  $20^\circ$ 。
6. 如权利要求 1 所述的推进器，其中推进器中电磁场与磁场的局部夹角介于  $60$  到  $90^\circ$  之间。
- 25 7. 如权利要求 1 所述的推进器，其中电磁场频率处于在电磁场产生位置处的电磁回旋共振频率的 10% 范围内。
- 30 8. 如权利要求 1 所述的推进器，其中微波电离场和磁场用于电离至少 50% 喷射入腔体的气体。

9. 如权利要求 1 所述的推进器, 其中磁场发生器包括至少一个线圈, 该线圈位于轴线上大致磁场最大点处。

10. 如权利要求 9 所述的推进器, 其中磁场发生器包括第二线圈, 该第二线圈位于所述至少一个线圈和所述喷射器之间。

11. 如权利要求 1 所述的推进器, 其中磁场发生器用于改变所述最大点的值。

12. 如权利要求 1 所述的推进器, 其中磁场发生器用于至少在所述最大点的所述另一侧改变所述磁场的方向。

13. 如权利要求 1 所述的推进器, 其中电磁场发生器包括至少一个共振腔。

14. 如权利要求 1 所述的推进器, 其中电磁场发生器在所述最大点的所述一侧包括至少一个共振腔。

15. 如权利要求 1 所述的推进器, 其中电磁场发生器在所述最大点的所述另一侧包括至少一个共振腔。

16. 如权利要求 1 所述的推进器, 其中腔体在一个喷管中形成。

17. 如权利要求 16 所述的推进器, 其中喷管在对着喷射器的末端具有一个增大的部分。

18. 如权利要求 16 所述的推进器, 其中喷管具有放射性同位素。

19. 如权利要求 1 所述的推进器, 在喷射器和腔体之间还包括一个稳定腔。

20. 一种推进器, 包括

- 限定了推进器轴线的腔体；  
- 用于在腔体中喷射可电离气体的喷射器；  
- 用于产生磁场的磁场发生器，所述磁场沿着轴线具有至少一个最大点；

- 5       - 电磁场发生器，用于产生
- 腔体中的微波电离场，位于所述最大点的一侧；及
  - 磁化有质动力加速场，位于所述最大点的另一侧，
- 其中推进器中的离子回旋共振周期至少比离子在推进器中的穿越时间高一个数量级。

10

21. 如权利要求 20 所述的推进器，其中电磁场频率处于在电磁场产生位置处的电磁回旋共振频率的 10% 范围内。

22. 一种产生推力的方法，包括：

- 15       - 在腔体中喷射气体；
- 施加第一磁场和第一电磁场，以电离至少部分气体；
  - 然后向气体施加第二磁场和第二电磁场，以通过磁化有质动力加速空间电离气体。

20       23. 如权利要求 22 所述的方法，其中电磁场频率处于在电磁场产生位置处的电磁回旋共振频率的 10% 范围内。

24. 如权利要求 22 所述的方法，其中气体由电子回旋共振电离。

25       25. 如权利要求 22 所述的方法，其中大部分离子不受第一磁场影响。

26. 如权利要求 22 所述的方法，其中第一电磁场与第一磁场之间的局部夹角介于 60 到 90° 之间。

30

27. 如权利要求 22 所述的方法，其中第二电磁场与第二磁场之间的局部夹角介于 60 到 90° 之间。

---

28. 如权利要求 22 所述的方法，其中至少 50% 的气体被电离。

29. 如权利要求 22 所述的方法，还包括改变所述第二磁场方向的  
5 步骤。

## 航天器的推进器

5 本发明涉及推进器。推进器用于推进航天器，其典型的排气速度范围从 2km/s 至超过 50km/s，且推力密度低于或在  $1\text{N/m}^2$  左右。在推进器没有任何物质可以推动或依靠时，推进器依靠喷射航天器的部分质量来推进。喷射速度是衡量推进器效率的关键因素，通常应该使之最大化。

10

已经提出了多种空间推进器的解决方案。US-A-5 241 244 中公开了一种称为离子栅极的推进器。在该装置中，首先电离推进气体，然后用栅极之间产生的稳定电磁场加速所产生的离子。用电子流中和加速离子。为了电离推进气体，该文献建议同时采用磁调节及约束场和频率为磁场 ECR（电磁回旋共振）频率的电磁场。FR-A-2 799 576 中公开了一种类似的推进器，采用电磁感应电离气体。这种推进器的喷射速度大约为 30km/s，2,5kw 电功率下的推力密度小于  $1\text{N/m}^2$ 。

20 这种装置的一个问题是加速栅极之间需要非常高的电压。另一个问题是由于离子撞击造成的栅极腐蚀。最后，中和器和栅极通常都是易损坏的装置。

US-A-5 581 155 公开了一种霍尔效应推进器。这种推进器也采用电磁场加速带正电荷的粒子。这种推进器的喷射速度大约为 15km/s，1,3kw 电功率下的推力密度小于  $5\text{N/m}^2$ 。与离子栅极推进器中一样，腐蚀和中和器的存在使得该推进器易于产生故障。

US-A-6 205 769 或 D.J. Sullivan 等人于 IEPC 1993，第 36 卷，第 337-354 页中发表的《微波空腔共振电热推进器原型开发》（D.J. Sullivan et al., Development of a microwave resonant cavity thruster prototype, IEPC 1993, n° 36, pp. 337-354）中论述了微波电热推进器。30 这些推进器依靠微波场加热推进气体。加热的气体通过一个喷嘴喷射以产生推力。这种推进器的喷射速度大约为 9-12m/s，推力为

200-2000N。

D.A. Kaufman 等人于 IEPC 1993, 第 37 卷, 第 355-360 页中发表的《ECR 等离子体推进器的卷流效应》(D.A. Kaufman et al., Plume characteristic of an ECR plasma thruster, IEPC 1993, n° 37, pp. 355-360) 和 H.Tabara 等人于 IEPC 1997, 第 163 卷, 第 994-1000 页中发表的《使用电磁回旋共振等离子体加速器的空间等离子体模拟器工作特性及其材料和等离子体应用相互作用研究》(H.Tabara et al., Performance characteristic of a space plasma simulator using an electron cyclotron resonance plasma accelerator and its application to material and plasma interaction research, IEPC 1997, n° 163, pp. 994-1000) 中论述了 ECR 等离子体推进器。在这种推进器中, 采用电磁回旋共振在磁喷嘴中产生等离子体。电子在磁偶极矩力的作用下被轴向加速, 产生一个加速离子的电场, 并产生推力。换句话说, 等离子体沿着逐渐减小的磁场的磁力线自由流动。这种推进器的喷射速度可达 35km/s。US-B-6 293 090 中论述了一种 RF 等离子体推进器, 其依据相同原理工作, 主要区别在于使用频率较低的混合波, 代替 ECR 场产生等离子体。

US-B-6 334 302, US-A-4 893 470 或 Dr. Franklin R. Chang-Diaz 于 IEPC 1991, 第 128 卷中发表的《可变 Isp 等离子体火箭设计特性》(Dr. Franklin R. Chang-Diaz, Design characteristic of the variable Isp plasma rocket, IEPC 1991, n° 128) 中公开了可改变具体推力的磁等离子体推进器(缩写为 VaSIMR)。该推进器的工作过程包括三个阶段: 等离子体喷射、加热和在串联式磁镜像结构中受控排气。等离子体源为一个螺旋发生器或磁等离子体动力(MPD)推进器, 而等离子体加热器为一个在离子回旋频率工作的回旋发生器。“混合卷流”, 由冷气体环绕的热等离子体芯组成, 包含在喷嘴中, 该喷嘴由冷气体层与热等离子体隔开。这种喷嘴中的热膨胀将部分内能转化为定向推力。与 ECR 或 RF 等离子体推进器中一样, 电离颗粒不被加速, 而是首先沿着逐渐减小的磁场磁力线流动, 然后沿着压力梯度流动。这种推进器的喷射速度大约为 10-300 km/s, 推力为 50-1000N。

在另一个不同的方面, US-A-4 641 060 和 US-A-5 442 185 中论述了 ECR 等离子体发生器, 其用于抽真空或离子注入。US-A-3 160 566

中给出了另一种类似的等离子体发生器。

US-A-3 571 734 中论述了一种加速微粒的方法和装置。目的是形成一束聚变反应微粒。将气体喷射到一个提供轴向和径向磁场叠加的柱形共振腔中。施加一个 ECR 频率的电磁场用以电离气体。磁场强度沿着腔体轴线减小，从而电离微粒沿着该轴线流动。1963 年 11 月 4 日的 *Compte Rendu de l'Académie des Sciences* 第 257 卷，第 2804-2807 页中也公开了该加速装置。这些装置的目的是形成一束聚变反应微粒：从而，喷射速度大约为 60km/s，但推力密度非常低，通常低于 1,5 N/m<sup>2</sup>。

10 US-A-3 425 902 中公开了一种产生并约束电离气体的装置。电磁场在气体电离腔体的两端最大。

从而，需要一种具有很好的喷射速度、易于制造、坚固耐用的推进器。这限定了一种少电极装置，通过施加定向质量力，将全部微粒加速到高速。

从而，本发明的一个推进器实施方案中，包括：

- 限定了推进器轴线的腔体；
- 用于向腔体中喷射可电离气体的喷射器；
- 20 - 用于产生磁场的磁场发生器，所述磁场沿着轴线至少具有一个最大点；

- 电磁场发生器，用于产生

- ◎腔体（6）中的微波电离场，位于所述最大点的一侧；以及

- ◎磁化有质动力加速场，位于所述最大点的另一侧。

25 该推进器还可能具有一个或多个下列特征：

- 磁场与轴线的夹角小于 45°，优选地小于 20°；
- 电磁场频率处于在电磁场产生位置处的电磁回旋共振频率的 10% 范围内；
- 电磁场最大值与最小值的比处于 1,1-20 之间；
- 30 - 电磁场中的电场部分与直辐射方向的夹角小于 45°，优选地小于 20°；

- 推进器中电磁场中的电场部分与磁场的局部夹角介于 60 到 90° 之间;
- 推进器中的离子回旋共振周期至少比推进器中的本征碰撞时间高两倍;
- 5     - 微波电离场和磁场用于电离至少 50% 喷射入腔体的气体;
- 磁场发生器在沿着轴线大致磁场最大点处包括至少一个线圈;
- 磁场发生器在所述至少一个线圈与所述喷射器之间包括一个第二线圈;
- 磁场发生器用于改变所述最大点的值;
- 10    - 磁场发生器用于至少在所述最大点的所述另一侧改变所述磁场的方向;
- 电磁场发生器包括至少一个共振腔;
- 电磁场发生器在所述最大点的所述一侧包括至少一个共振腔;
- 电磁场发生器在所述最大点的所述另一侧包括至少一个共振
- 15    腔;
- 腔体在一个喷管中形成;
- 喷管在对着喷射器的末端具有一个增大的部分;
- 推进器在喷射器和腔体之间包括一个稳定腔。
  
- 20    本发明还提出一种产生推力的方法，包括：
  - 在腔体中喷射气体;
  - 施加第一磁场和第一电磁场，以电离至少部分气体;
  - 然后向气体施加第二磁场和第二电磁场，通过磁化有质动力来加速空间电离气体。
- 25    该方法还可能具有下列特征之一：
  - 气体由电子回旋共振电离，并由磁化有质动力加速;
  - 大部分离子不受第一磁场影响;
  - 第一电磁场的电场部分与第一磁场之间的局部夹角介于 60 到 90° 之间;
  - 30    - 第二电磁场的电场部分与第二磁场之间的局部夹角介于 60 到 90° 之间;

- 至少 50% 的气体被电离;
- 第二电磁场的方向可变化。

5           下面参考附图，通过非限定性的例子，说明一种体现本发明的推进器，其中：

- 图 1 是一个根据本发明第一实施方案的推进器的剖视示意图;
- 图 2 是沿着图 1 中推进器轴线的磁场和电磁场强度分布图;
- 图 3 是一个根据本发明第二实施方案的推进器的剖视示意图;
- 10   - 图 4 是一个根据本发明第三实施方案的推进器的剖视示意图;
- 图 5 是沿着图 4 中推进器轴线的磁场强度分布图;
- 图 6 是一个根据本发明第四实施方案的推进器的剖视示意图;
- 图 7 是沿着图 6 中推进器轴线的磁场强度分布图;
- 图 8 是一个根据本发明第五实施方案的推进器的剖视示意图;
- 15   - 图 9 是沿着图 8 中推进器轴线的磁场强度分布图;
- 图 10-13 是不同推进器实施方案的示意图，这些推进器的推力方向可以改变;
- 图 14 是一个表示喷管各种可能的变化的剖视示意图;
- 图 15 是一个根据本发明另一个实施方案的推进器的剖视示意图;
- 20   图;
- 图 16 是沿着图 15 中推进器轴线的磁场和电磁场强度分布图;
- 图 17 是另一种推进器的剖视示意图。

25

图 1 是一个根据本发明第一实施方案的推进器的剖视示意图。图 1 中的推进器依靠电子回旋共振产生等离子体，并依靠磁化有质动力来加速这些等离子体，以产生推力。磁化有质动力是由于高频电磁场强度梯度而施加在等离子体上的力。在 H. Motz 和 C. J. H. Watson 30 (1967), 《电子学和电子物理学展望》 (*Advances in electronics and electron physics*) 23, 第 153-302 页中，对这种力作了论述。当没有磁

场时，这种力可以表示为：

$$\text{对于单个微粒 } F = -\frac{q^2}{4m\omega^2} \nabla E^2$$

$$\text{对于等离子体 } F = -\frac{\omega_p^2}{2\omega^2} \nabla \frac{\varepsilon_0 E^2}{2}, \text{ 其中 } \omega_p^2 = \frac{ne^2}{m_e \varepsilon_0}$$

当存在不一致的磁场时，这种力可以表示为：

$$5 \quad F = -\frac{q^2}{4m\omega} \left( \frac{\nabla E^2}{(\omega - \Omega_c)} - \frac{E^2}{(\omega - \Omega_c)^2} \nabla \Omega_c \right) - \mu \nabla B$$

图 1 中的装置包括一个喷管 2。该喷管具有一个纵向轴线 4，该轴线形成推进器的轴线；实际上，推进器产生的推力沿着该轴线——尽管推力可以沿着下面参考图 10-13 中的方向。喷管内部形成一个腔体 6，在其中推进气体被电离并被加速。

10 在图 1 所示的实施方案中，喷管为一个柱形喷管。其由不导电的材料制成，使得可以在腔体中形成磁场和电磁场；可以采用低电容率陶瓷、石英、玻璃或类似的材料。喷管还可以采用二极电子发射率高的材料，如 BN、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、B<sub>4</sub>C。这增大了腔体中电子浓度，促进电离。

15 喷管沿着推进器连续延伸，气体在喷管一端喷入。可以使喷管具有不同的形状。例如，根据推进器出口处所需要的等离子体流，在该实施方案中为圆形的喷管截面也可以具有其它形状。另一种可能的截面形状参考图 14 在下文中给出。同样，喷管不需要在喷射器和推进器出口连续延伸（在这种情况下，喷管可以由金属或合金制成，如钢、W、Mo、Al、Cu、Th-W 或 Cu-W，还可以浸渍或涂覆氧化钡或氧化镁，或者包括放射性同位素，以促进电离）：如下文所述的，等离子体不是用喷管来约束的，而是用施加在推进器中的磁场和电磁场来约束的。从而，喷管可以包括两个单独的部分，而在喷管两部分之间，腔体仍将沿着推进器延伸。

25 喷管的一端具有一个喷射器 8。如图 1 中箭头 10 所示，喷射器向喷管中喷射可电离的气体。该气体可以包括惰性气体 Xe、Ar、Ne、Kr、He，化合物如 H<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>H<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、或 CH<sub>4</sub>，甚至金属如 Cs、Na、K 或 Li（碱金属）或 Hg。最常使用的是 Xe 和 H<sub>2</sub>，这两者需要的电离能量较小。

推进器还包括一个磁场发生器，其在腔体 6 中产生一个磁场。在图 1 所示的实施方案中，磁场发生器包括两个线圈 12 和 14。这些线圈在腔体 6 中产生磁场  $B$ ，磁场  $B$  的纵向部分如图 2 中所示。如图 2 所示，磁场纵向部分有两个最大点，其位置与线圈对应。与第一线圈 12 对应的第一最大点  $B_{\max 1}$  靠近喷射器。其仅用于约束等离子体，而对于推进器操作不是必需的。然而，其具有径向约束等离子体电子的优点，从而由于磁瓶效应电离更加容易；此外，喷管末端和喷射器喷嘴受到保护而可免受腐蚀。第二最大点  $B_{\max 2}$ ，与第二线圈 14 对应，使得能将等离子体约束在腔体中。其还将位于最大点一侧的推进器电离空间与位于最大点另一侧的推进器加速空间分离。该最大点处磁场径向部分的值可以采用下文所述的值。在两个最大点之间，或在第二最大点一侧的气体喷射处，磁场的值较小。在图 1 所示的实例中，磁场大致在腔体中部具有一个最小值  $B_{\min}$ 。

在推进器电离空间——即在图 1 所示的实施方案中，磁场两个最大点之间的部分之中，磁场的径向和直辐射部分——也就是磁场在垂直于推进器纵向轴线的平面中的部分，与推进器操作无关；这部分磁场的强度优选地比磁场纵向部分小。实际上，使腔体中的离子和电子感应出不必要的朝向腔壁的运动，只会降低推进器的效率。

在推进器加速空间中——即在图 1 所示的实施方案中，磁场第二最大点  $B_{\max 2}$  右侧的部分，磁场的方向基本上沿着推进的方向。从而，磁场方向优选地沿着推进器轴线。磁场的径向和直辐射部分优选尽可能地小。

因此，在电离空间和加速空间中，磁场优选地大致平行于推进器轴线。磁场与推进器轴线之间的夹角优选地小于  $45^\circ$ ，更优选地小于  $20^\circ$ 。在图 1 和 2 所示的实施方案中，该角度大致为  $0^\circ$ ，从而图 2 中的表不仅对应磁场沿着推进器轴线分布的强度，而且对应于磁场的轴向部分。

由磁场发生器产生的磁场强度——即值  $B_{\max 1}$ 、 $B_{\max 2}$  和  $B_{\min}$ ，优选地选择如下。最大值选择成使得等离子体的电子被约束在腔体中；磁镜比  $B_{\max}/B_{\min}$  越大，电子约束在腔体中的效果越好。可以根据所期望的（质量流速）推力密度和电磁电离场功率（或者指定流速的功率）

选择该值，使气体通过磁场第二峰值点后，90% 或更多被电离。最小值  $B_{\min}$  取决于线圈位置。除了图 4 和 5 中的实施方案，最小值没有太大的相关性。从磁瓶效应中流失的电子百分比可以表示为：

$$\alpha_{lost} = 1 - \sqrt{1 - \frac{B_{\min}}{B_{\max}}} \quad \text{或} \quad \frac{B_{\min}}{B_{\max}} = \frac{1}{1 - (1 - \alpha_{lost})^2}$$

- 5 对于指定的质量流动，及对于指定的推力，对于相同的流速和电离百分比，较小的  $\alpha_{lost}$  可以降低电离功率。

此外，磁场优选地选择成使得大部分离子不受磁场影响。换句话说，磁场的值小到推进气体离子不因为或基本上不因磁场而偏离。这种情况使得推进气体离子大致直线飞过喷管，从而增大了推力。规定

- 10 离子回旋频率为：

$$f_{ICR} = q \cdot B_{\max} / 2\pi M$$

如果离子回旋频率比离子碰撞频率（或离子霍尔参数，该参数为它们的比，小于 1）低很多，则该离子被定义成未磁化离子

$$f_{ICR} \ll f_{ion-collision}$$

- 15 其中， $q$  为电荷， $M$  为离子质量，而  $B_{\max}$  为磁场最大值。在这种约束条件下， $f_{ICR}$  为离子回旋共振频率，并且是离子围绕磁场磁力线旋转的频率；这种约束条件表示与碰撞时间相比，在腔体中的旋转时间如此长，以至离子运动实施上不因磁场而改变。如我们已知的， $f_{ion-collision}$  定义成：

$$20 \quad f_{ion-collision} = N \cdot \sigma \cdot V_{TH}$$

其中， $N$  为电子强度值， $\sigma$  为电子 — 离子碰撞横截面积，而  $V_{TH}$  为电子热运动速度。热运动速度可以表示为：

$$V_{TH} = \sqrt{\frac{kT}{m_e}}$$

- 25 其中， $k$  为微观玻尔兹曼常量， $T$  为温度，而  $m_e$  为电子质量。 $f_{ion-collision}$  表示一个离子在强度为  $N$ ，温度为  $T$  的电子云中每秒钟的碰撞次数。

优选地，电磁场最大值可以选择成：

$$f_{ICR} < f_{ion-collision} / 2$$

甚至是

$$f_{ICR} < f_{ion-collision} / 10$$

从而，推进器中的离子回旋共振周期至少比腔体或推进器中的离子碰撞周期长两倍。

如下文中给出的一些实施方案所表明，这样仍然有可能将气体充分约束在推进器电离空间内。大部分离子不受磁场影响的事实首先有利于将离子和电子在推进器出口处聚集成束，从而增大了流量。另外，避免了离子离开推进器后仍然依附于磁场磁力线，这确保了产生纯推力。

推进器还包括一个电磁场发生器，其在腔体 6 中产生一个电磁场。在图 1 所示的实施方案中，电磁场发生器包括一个第一共振腔 16 和一个第二共振腔 18，分别位于线圈 12 和 14 附近。第一共振腔 16 用于在腔体中磁场两个最大点之间，或至少在最大点  $B_{\max 2}$  包括喷射器的一侧产生一个振荡电磁场。该振荡场为电离场，频率  $f_{EI}$  处于微波频率范围，即处于 900MHz – 80GHz 之间。电磁场的频率优选地适合局部磁场的频率值，从而电离的重要部分或者说实质部分是由于电子回旋共振所引发。特别地，对于磁场指定的值  $B_{res}$ ，电子回旋共振频率  $f_{ECR}$  由下面的公式决定：

$$f_{ECR} = eB_{res} / 2\pi m$$

其中， $e$  为电荷， $m$  为离子质量。电磁场的该频率值适于使由于电子回旋共振引起的推进气体电离最大化。优选地，电磁场的频率值  $f_{EI}$  与在所施加电磁场的最大处所计算而得的 ECR 频率相等。当然，这只是近似值，因为电磁场沿着轴线的强度会变化，还因为电磁场是局部施加的，而不是施加在一个单一点上。

还可以选择不与优选值精确相等的频率值，优选地处于相对于 ECR 频率  $\pm 10\%$  范围内， $\pm 5\%$  范围内得到的结果更好。而且优选的是，至少使 50% 的推进气体在通过电离空间或腔体时被电离。只能通过使用 ECR 电离才能获得这样的气体电离量；如果电磁场频率变化超过上面给出的  $\pm 10\%$  范围，推进气体的电离程度有可能大大低于优选值 50%。

电离空间中电磁场的电场部分的方向优选地垂直于磁场方向；在任何位置，局部磁场和局部电磁场中振荡电场部分之间的夹角优选地处于 60 到 90° 之间，更优选地处于 75-90° 之间。这样的角度适于使

ECR 电离达到最优。在如图 1 所示的实施方案中，电磁场的电场部分为直辐射的或径向：其包含在一个垂直于纵向轴线的平面内，并且与该平面通过轴线的一条直线成直角；可以简单地通过选择共振腔中的共振模式即可获得这种效果。在如图 1 所示的实施方案中，电磁场以模式  $TE_{111}$  共振。直辐射场还具有改善将等离子体约束在电离空间中及限制与腔体壁接触的优点。电磁场的电场部分的方向可以相对于该优选直辐射方向变化；优选地，电磁场与直辐射方向之间的夹角小于  $45^\circ$ ，更优选地小于  $20^\circ$ 。

在加速空间中，电磁场频率也优选地接近或等于 ECR 频率。这使得磁化有质动力强度在电磁场最大点两侧都被增加，如上文给出的第二个公式所示。此外，电磁力的频率不需要精确地与 ECR 频率相等。频率及磁场和电磁场之间夹角采用与上文所述相同的范围。应该注意到，该阶段用于电离和加速的电磁场频率可以一致：由于可以采用相同的微波发生器驱动两个共振腔，从而可以简化电磁场发生器。

此外，电磁场的电场部分优选地处于纯径向或直辐射方向，从而使磁化有质动力最大。另外，直辐射方向的电磁场的电场部分将使等离子体在推进器出口处聚集成束。电磁场的电场部分与径向或直辐射方向的夹角仍然是优选小于  $45^\circ$ ，更优选小于  $20^\circ$ 。

图 2 是沿着图 1 中推进器轴线的磁场和电磁场强度分布图，磁场和电磁场强度在图中用垂直轴表示，沿着推进器轴线的位置在图中用水平轴表示。如上文所述的，基本上与推进器轴线平行的磁场强度有两个最大点。电磁场电场部分的强度在第一共振腔的中间平面内有一个第一最大值  $E_{\max 1}$ ，在第二共振腔的中间平面内有一个第二最大值  $E_{\max 2}$ 。第一最大值的强度值与电离腔中的质量流动速度一起选择。第二最大值可以与推进器出口处所需的  $I_{sp}$  相适应。在图 2 所示的实施方案中，电磁场的第一和第二最大值的频率是相等的：实际上，共振腔是一样的，并且被同样的微波发生器来驱动。在图 2 所示的实例中，推进器的轴线上的原点位于喷射器 (injector) 的喷嘴处。

下述数值用于例示本发明。气体的流速为  $6 \text{ mg/s}$ ，微波总功率大约为  $1550 \text{ W}$ ，相应地为：在一个大约  $120 \text{ mN}$  的推进器中， $\sim 350 \text{ W}$  用于电离， $\sim 1200 \text{ W}$  用于加速。微波频率为  $3 \text{ GHz}$  左右。从而磁场强度

最大大约为 180mT, 最小为  $\sim 57\text{mT}$ 。图 2 还表示了位于共振腔所在的位置上磁场  $B_{\text{res}}$  的值。如上文所述, 电磁场频率优选地与相应的 ECR 频率  $eB_{\text{res}}/2\pi m$  相等。

下列数值示例性地用于具有大于 20km/s 的喷射速度和高于  
5  $100\text{N/m}^2$  的推力密度的推进器。喷管为 BN 喷管, 内径为 40mm, 外径为 48mm, 长度为 260mm。喷射器喷射 Xe, 进入喷管时的速度为 130m/s, 质量流速为  $\sim 6\text{mg/s}$ 。

磁场的第一个最大点  $B_{\text{max1}}$  位于距喷射器喷嘴  $X_{B1} = 20\text{mm}$  处, 磁场  $B_{\text{max1}}$  的强度为  $\sim 180\text{mT}$ 。电磁场的第一共振腔位于距喷射器喷  
10 嘴  $X_{E1} = 125\text{mm}$  处, 磁场强度  $E_1$  为  $\sim 41000\text{V/m}$ 。磁场的第二个最大点  $B_{\text{max2}}$  位于距喷射器喷嘴  $X_{B2} = 170\text{mm}$  处, 磁场  $B_{\text{max2}}$  的强度为  $\sim 180\text{mT}$ 。电磁场的第二共振腔位于距喷射器喷嘴  $X_{E2} = 205\text{mm}$  处, 磁场强度  $E_2$  为  $\sim 77000\text{V/m}$ 。

. 大约 90% 进入加速空间 ( $X > X_{B2}$ ) 的气体被电离。

15 . 由于  $q = e$  而  $M = 130 \text{ amu}$ ,  $f_{\text{ICR}}$  为 15,9MHz。因此, 离子霍尔参数为 0,2, 从而大部分离子不受磁场影响。

这些值为示例性的, 它们证明根据本发明的推进器能够同时具有大于 15km/s 的喷射速度和高于  $100 \text{ N/m}^2$  的推力密度。图 1 中的推进器操作步骤如下所述。将气体喷射到一个腔体中; 然后使气体通过  
20 一个第一磁场和一个第一电磁场, 以电离至少部分气体; 然后该部分电离气体通过磁场的峰值; 接着使气体通过一个第二磁场和一个第二电磁场, 以磁化有质动力加速气体。电离和加速分开并连续发生, 且可以独立控制。

上面作为例子的推进器明显比现有技术中的装置更加有效。它还  
25 具有下列优点。首先, 其没有电极。从而, 所有由于这些电极而产生的问题 — 腐蚀、高电压及其它问题都可以避免。

其次, 由于磁化有质动力, 电子和离子在相同方向上加速, 从而不需要在推进器出口提供一个中和器。

第三, 用于电离和加速的电磁力频率相同。这使得可以使用相同的  
30 微波发生器来驱动电磁发生器。

第四, 由于电离和加速发生在磁场峰值的相对侧, 因此将它们分

离。这使得如下文中说明的，分别作用于电离和加速，使推进器的性能符合需要。还能提高电离效率并降低电离推进气体所需的能量。

第五，电子在电离空间被激励并被磁化，而离子基本上不受磁场影响。这与现有技术中的 VaSIMR 推进器或等离子体泵相比，提高了推进器效率。此外，电子在 ECR 频率或该频率左右被激励，这提高了电离效率。

图 3 是一个根据本发明第二实施方案的推进器的剖视示意图。图 3 中的实施方案与图 1 中的实施方案不同点在于第一共振腔 16 的位置，其位于产生磁场第二最大点的线圈 14 附近。具体地说，共振腔沿着轴线位于坐标  $X = X_{E3} = 205\text{mm}$  处。如图 2 所示，该位置选择成使得该位置的磁场值与  $X_{E1}$  处的磁场值相同。这使得可以使用相同的共振腔，而不需要改变电磁场频率值。还可以使用两个位于坐标  $X_{E1}$  和  $X_{E2}$  处的共振腔，以在电离空间中产生电磁场。此外，这样可以增大在电离空间中电离的气体比例。使腔体位于右侧可以减小腐蚀。

图 4 是一个根据本发明第三实施方案的推进器的剖视示意图；图 5 是沿着图 4 中推进器轴线的磁场和电磁场强度分布图。图 4 中的推进器与图 1 中的推进器类似。然而，第一共振腔 16 大致位于线圈 12 和 14 中间。图 5 与图 2 类似，但表示图 4 中的实施方案的磁场强度。图中，第一共振腔大致位于坐标  $X_{E4}$  处，其对应磁场最小值  $B_{\min}$ 。电磁场频率选择成  $eB_{\min}/2\pi m$ 。第二共振腔位于磁场具有相同值的位置。同样，这使得可以使用相同的微波发生器驱动两个共振腔。图 4 和 5 中的实施方案的优点在于，整个施加 ECR 场的部分中，磁场的大小大致相同。这在其它条件相同的情况下，增大了气体电离的比例。

图 6 是一个根据本发明第四实施方案的推进器的剖视示意图；图 7 是沿着图 6 中推进器轴线的磁场强度分布图。在该实施方案中，磁场磁镜比的值可以改变，从而能够改变推进器电离空间中的电离程度。更具体地说，由于在电离空间中提高了对电子的约束，从而提高电离程度将产生具有更高电荷的离子。这些粒子将获得更高的速度，从而增大了总推力。

图 6 中的推进器与图 3 中的推进器类似。然而，磁场发生器具

有三个附加线圈 22、24 和 26。第一和第三附加线圈 22 和 26 位于线圈 12 和 14 内，而第二附加线圈 24 大致位于靠近线圈 12 和 14 中间的位置。第一和第三附加线圈产生的磁场用以增强由线圈 12 和 14 形成的磁场。这使得能够增加磁场最大点  $B_{\max 1}$  和  $B_{\max 2}$  的强度。

5 第二附加线圈产生的磁场与由线圈 12 和 14 所提供的磁场相反。这减小磁场  $B_{\min}$  值，从而增大了磁镜比。

图 7 表示向附加线圈施加不同电流值时，磁场强度的分布图。曲线 28 对应附加线圈不产生任何磁场的情况。曲线 30 对应于第一种流经附加线圈的电流，而曲线 32 对应于一个更高的电流。由于第二附加线圈的存在，磁场在共振腔所位于的坐标  $X_{E3}$  和  $X_{E2}$  处大致保持对应。这避免了改变电磁场频率，或腔体的位置，从而保证了获得所需的 ECR 电离，与磁场值无关。换句话说，磁场最大值变化，但共振腔处的磁场大致保持不变。由于这些线圈，磁场值在 100% 范围内变化；这引起电离程度的变化可达 90%，从而引起推力的变化可达 90%。在该实施方案中，可以在推进器出口处使用附加线圈以修正喷射材料的形状和方向。图 8 是一个根据本发明第五实施方案的推进器的剖视示意图；图 9 是沿着图 8 中推进器轴线的磁场强度分布图。在该实施方案中，可以改变加速空间中的磁场梯度，从而改变磁化有质动力的强度。实际上，如上文所述，磁化有质动力的分布与磁场梯度成比例。

图 8 中的推进器与图 4 中的推进器相似；但是，它还包括附加的梯度控制线圈 34, 36, 位于第二共振腔 18 的两侧。第一梯度线圈 34, 位于第二线圈 14 和第二共振腔 18 之间，产生一个与第二线圈所产生磁场平行的磁场。第二梯度线圈 36, 位于第二共振腔 18 与第二线圈 14 相背离的那一侧，产生一个与第二线圈所产生磁场相反的磁场。从而，这些梯度控制线圈可以改变推进器加速空间中的磁场梯度；此外，它们还可以用于增大由第二线圈产生的磁场最大值，同时使共振场的位置靠近腔体中间平面。梯度控制线圈的存在将轻微改变共振腔在推进器加速空间中的位置。

30 图 9 表示图 8 中实施方案的磁场强度分布图。曲线 38 对应于梯度控制线圈未供电的情况。图 40 表示当梯度控制线圈通电时的磁

场值。第二共振腔中的梯度值从 2,3T/m 变化到 4,5T/m, 相对变化达 100%。如图 6 中的实例所示, 共振腔中的磁场值保持不变, 且不需要改变驱动共振腔的电源频率。

图 9 还显示出当梯度控制线圈通电时, 达到磁场最大值  $B_{\max 2}$  的位置略微偏移。图 9 中标出了偏移量  $\delta x$ 。这将改变电离腔的长度, 并且会增大最大值, 将有助于进一步电离推进气体。如参考图 6 和 7 所说明的那样, 这种进一步的电离增大了推力。

图 8 中的那些梯度控制线圈也可以用在图 1 和 4 所示的实施方案中 — 唯一的限制是线圈所占据的空间。图 8 也是一个磁场发生器延伸出喷管末端的很好的例子。这表明喷管不需要从喷射器连续延伸到推进器末端。梯度控制线圈也可以结合到图 7 所示的实施方案中, 也要受到相同的空间约束。

图 10-13 是不同推进器实施方案的示意图, 这些推进器的推力方向可以改变。如上文所述, 有质动力的方向沿着磁场的磁力线。从而, 改变推进器加速空间中的磁场磁力线可以改变推力的方向。图 10 是推进器另一个实施方案的剖视图, 该推进器与图 4 中的推进器类似。然而, 在图 10 所示的实施方案中, 推进器还具有三个位于第二共振腔 18 下游的附加方向控制线圈 42、44 和 46。这些线圈偏离于推进器轴线, 从而改变第二线圈 14 下游的磁场方向。图 11 是一个表示三个线圈和喷管 2 的侧视图; 还表示了通过向这些线圈中的一个或多个通电而产生的不同磁场, 其象征性地由喷管 2 中的箭头表示。优选地, 这些线圈产生一个与线圈 12 和 14 产生的磁场方向相反的磁场; 这进一步增大了磁场梯度, 从而增大了推力。另一方面, 向线圈施加可逆电流使得可以在更宽的范围内改变推力方向, 并使用更少的线圈 (用 2 或 3 代替 4), 但使用一个更复杂的电源来驱动线圈。

图 12 是一个与图 11 相似的侧视图, 但推进器只有两个附加线圈, 与图 11 相比, 还表示了元件 14 和 18 的外径。图 13 是一个与图 11 相似的侧视图, 但推进器只有四个附加线圈。

在图 10-13 中的实施方案中, 方向控制线圈尽可能靠近第二腔体, 从而作用于加速空间中的磁场。有利的是, 方向控制线圈中的磁场方向选择成使磁场在推进器下游仍然连续减小, 这避免了任何可能局部

约束等离子体电子的磁镜效应。还可以使用其轴线倾斜于推进器轴线的线圈。这可以增大推力矢量方向的变化范围。

由方向控制线圈产生的磁场值优选地为主磁场的 20%-80%，从而在任何位置都不会使磁场方向发生逆转。

5 图 14 是一个表示喷管各种可能的变化的剖视示意图。这些变化结合在图 14 所示的实例中，但它们可以单独使用在图 1-13 中所示的任何一个实施方案或图 15 和 17 所示的实施方案中。首先，与上文所述的实施方案相比，图 14 中的腔体 6 具有较小的横截面。这在相同质量流速下，增大了腔体中的气体浓度，从而增大了电离空间的电  
10 离碰撞频率。这改善了电离。

其次，喷管可以具有一个位于腔体 6 上游的稳定腔。该稳定腔具有保护喷射器喷嘴免受高能电子损伤的优点，这些高能电子可以穿  
15 过由磁场第一最大点  $B_{max1}$  形成的屏障。此外，这样的稳定腔将改善腔体中流动的均匀性，并限制腔体中的梯度强度。

20 第三，喷管还具有一个位于加速腔内部的附加气体喷射器 50。其保护喷管壁，避免由推进器加速的高能电子造成的腐蚀。

图 15 是一个根据本发明另一个实施方案的推进器的剖视示意图；在图 15 所示的实施方案中，腔体 52 为环形。此外，图 15 中的推进器采用永磁体代替线圈。图中显示了腔体 52，气体在一端喷射  
25 （箭头 54 和 56）。从而喷管包括布置成围绕相同轴线的内圆筒 58 和外圆筒 59。气体的喷射实际上可以用一个或几个喷射器（图 15 中未显示）来围绕形成在腔体末端的圆环进行。第一和第二共振腔 60 和 62 沿着喷管布置，每个腔体都由位于喷管 58 内部的内部分和位于喷管外部的部分组成。图 15 中的推进器使用永磁体。圆筒 58 内  
30 部具有两个环形磁体 64 和 66；相应地外圆筒 59 外部具有两个环形磁体 68 和 70，对着内环形磁体。一个第三磁体 72 位于腔体 52 左侧。它为圆形，并具有与外部环形磁体外径大致相同的外径。为了引导磁场磁力线，一个用如软铁等材料制成的第一圆管位于外部环形磁铁的外侧，并与圆形磁铁 72 的外圆周相连。一个用相似材料制成的第二圆管 76 位于第一内部环形磁铁 64 的内侧，并连接至圆形磁铁 72 的圆心附近。一个杆 78 将磁场磁力线从第二内部环形磁铁 66 的

内圆周引导至圆形磁铁 78 的圆心。当然，其它引导磁力线的结构也是可以的。

图 16 是沿着图 15 中推进器轴线的磁场和电磁场强度分布图。它基本与图 2 中的图一致，除了图 16 中的磁场大部分为径向。

5 图 17 是一个推进器的剖视示意图，该推进器具有与图 15 中推进器相似的腔体 52。然而，图 17 中的推进器使用线圈产生磁场。结构与图 15 中的推进器相似，但

- 磁体 64、66、68、70 和 72 被具有大致相同形状的磁力线引导装置代替；

- 10 - 一个第一环形线圈 80 位于杆 78 外径上，靠近元件 66；  
- 一个第二环形线圈 82 位于管 76 外径上，靠近元件 64。

此外，磁场和电磁场与图 16 中相似。采用如图 15 和 17 中的环形腔体类似的腔体，磁场和电磁场发生器的位置可以很容易地改变。

15 下面的表给出了一些本发明的实施方案，编号为 1-33。在这些表中：

- Power 表示与表中其它实施方案相比，推进器的相对功率；
- Band 表示微波频段；
- Ptotal 表示推进器的总功率，单位为 W；
- Pthrust 表示推进功率，单位为 W；
- 20 - Pion 表示用于电离的功率，单位为 W；
- Thrust 表示所获得的推力，单位为 mN；
- Mdot 表示质量流率，单位为 mg/s；
- Isp 表示具体冲量，也就是排出速度与海平面上的重力加速度  $g$  之间的比值，单位为 s；
- 25 - Efficiency 表示推进器效率，也就是推进器消耗的功率和机械推进功率之间的比值；
- B 表示回旋磁场，单位为 mT；
- Fce 表示电子回旋频率，单位为 GHz；
- $B_{\max}/B_{\min}$  表示磁场最大值和最小值之间的比值；
- 30 - T/S 表示推力密度，单位为  $N/m^2$ ；
- Routput 表示推进器在出口处的直径，单位为 cm；

- 
- Rin 表示磁场线圈的直径, 单位为 cm;
  - L 表示腔体总长度, 单位为 cm;
  - Dbob 表示磁场线圈之间的距离, 单位为 cm;
  - Ibob 表示磁场线圈的强度, 单位为 A;
- 5      - Nbob 表示磁场线圈匝数。

不同的实例对每个值或示意值给出各种范围。例如,  $B_{\max}/B_{\min}$  的比值处于 1.69 (实施方案 18 和 24) 至 17.61 (实施方案 5) 之间。该值优选地应该处于 1,2 - 20 之间。尽管从表中推导出的不同范围与具体实施方案相关, 但是在表中给出的全部范围内都可以使用本发明。

10    因此, 从表中推导出的不同范围实际上彼此独立。

表 1

实例	Power	Band	Ptotal	Pthrust	Pion	Thrust
1	低	C	199	190	9	8,3
2	低	X	200	139	48	16,4
3	低	K	200	152	48	17,2
4	低	X	200	124	7	5,9
5	低	K	200	151	7	6,6
6	低	C	224	163	61	20,0
7	中等偏低	K	1500	968	382	122,1
8	中等偏低	C	1500	1117	382	131,1
9	中等偏低	X	1500	1117	382	131,1
10	中等偏低	C	1500	993	61	49,3
11	中等偏低	X	1500	1392	61	58,4
12	中等偏低	K	1500	1392	61	58,4
13	中等	K	3500	2591	897	306,2
14	中等	C	3500	2599	897	306,7
15	中等	X	3500	2929	574	260,5
16	中等	K	3500	2947	143	130,2
17	中等	X	3500	3368	143	139,2
18	中等	C	3500	3369	143	139
19	中等偏高	K	8000	7061	913	510,0
20	中等偏高	X	8000	7355	670	445,8
21	中等偏高	X	8000	7604	329	317,4
22	中等偏高	K	8000	7691	329	319,2
23	中等偏高	C	8000	7699	329	319,4
24	中等偏高	C	8027	7708	319	315,1
25	高	C	10000	7417	2573	877,3
26	高	K	10000	9089	839	554,6
27	高	X	10000	9612	410	398,9
28	高	C	10000	9623	410	399,1
29	高	K	10000	9686	339	364,0
30	非常高	C	50000	45952	4204	2791,4
31	非常高	C	50000	48106	2059	1998,9
32	非常高	X	50000	49319	804	1264,9
33	非常高	K	50000	49349	712	1190,8

表 2

实例	Mdot	Isp	Efficiency	B	Fce	Bmin/Bmax	T/S
1	0,18	4638	75,97%	85,41	2,391	2,16	26,6
2	0,97	1729	69,63%	344,97	9,656	2,16	52,3
3	0,97	1806	75,96%	634,46	17,759	9,79	54,6
4	0,14	4244	61,83%	352,09	9,855	2,16	75,6
5	0,14	4684	75,34%	649,72	18,186	17,61	83,5
6	1,22	1666	65,35%	85,41	2,391	2,16	63,6
7	7,70	1617	64,56%	634,46	17,759	9,79	388,6
8	7,70	1737	74,47%	88,55	2,479	2,26	104,3
9	7,70	1737	74,47%	338,73	9,481	3,75	104,3
10	1,22	4108	66,23%	88,55	2,479	2,26	39,2
11	1,22	4864	92,82%	634,46	17,759	9,79	185,8
12	1,22	4864	92,82%	634,46	17,759	9,79	743,1
13	18,09	1725	74,02%	634,46	17,759	9,79	974,6
14	18,09	1728	74,27%	88,55	2,479	2,26	79,7
15	11,58	2293	83,69%	338,73	9,481	3,75	207,3
16	2,87	4616	84,19%	634,46	17,759	9,79	414,3
17	2,87	4935	96,23%	338,73	9,481	3,75	442,9
18	2,87	4935	96,26%	105,78	2,961	1,69	110,8
19	18,42	2823	88,26%	634,46	17,759	9,79	1623,3
20	13,51	3363	91,93%	338,73	9,481	3,75	354,8
21	6,63	4884	95,06%	338,73	9,481	3,75	449,1
22	6,63	4911	96,13%	634,46	17,759	9,79	1016,2
23	6,63	4914	96,23%	88,55	2,479	2,26	162,7
24	6,44	4986	96,34%	90,30	2,528	1,69	111,5
25	51,89	1724	74,17%	88,55	2,479	2,26	137,9
26	16,92	3341	90,89%	634,46	17,759	9,79	1765,4
27	8,28	4913	96,12%	338,73	9,481	3,75	564,3
28	8,28	4915	96,23%	88,55	2,479	2,26	203,3
29	6,84	5425	96,86%	634,46	17,759	9,79	1158,6
30	84,78	3356	91,90%	86,62	2,425	4,45	246,8
31	41,53	4906	96,21%	86,62	2,425	4,45	360,7
32	16,22	7949	98,64%	338,73	9,481	3,75	1006,6
33	14,37	8449	98,70%	634,46	17,759	9,79	3790,4

表 3

实例	Routput	Rin	L	Dbob	Ibob	Nbob
1	1	8	32	20	1	15000
2	1	4	17	10	1,35	20000
3	1	2	16	10	1,4	20000
4	0,5	4	18	10	1,5	20000
5	0,5	1,6	16	10	1,35	20000
6	1	8	32	20	1	15000
7	1	2	16	10	1,4	20000
8	2	7	30	18	1	15000
9	2	3	17	10	1,2	20000
10	2	7	30	18	1	15000
11	1	2	16	10	1,4	20000
12	0,5	2	16	10	1,4	20000
13	1	2	16	10	1,4	20000
14	3,5	7	30	18	1	15000
15	2	3	17	10	1,2	20000
16	1	2	16	10	1,4	20000
17	1	3	17	10	1,2	20000
18	2	7	26	15	1	15000
19	1	2	16	10	1,4	20000
20	2	3	17	10	1,2	20000
21	1,5	3	17	10	1,2	20000
22	1	2	16	10	1,4	20000
23	2,5	7	30	18	1	15000
24	3	7	27	15	1	15000
25	4,5	7	30	18	1	15000
26	1	2	16	10	1,4	20000
27	1,5	3	17	10	1,2	20000
28	2,5	7	30	18	1	15000
29	1	2	16	10	1,4	20000
30	6	5	30	18	1	15000
31	4,2	5	30	18	1	15000
32	2	3	17	10	1,2	20000
33	1	2	16	10	1,4	20000

上述给出的实例可以调整 and 变化。例如，可以使用除线圈以外的装置产生磁场，例如图 15 中所示的永磁体；这也可以用于其它推进器。共振腔或线圈的个数可以根据需要改变。例如，可以使用单个共振腔在磁场最大点两侧产生电磁场，满足空间约束。在图 6 和 7 所示的实施方案中，可以使用三个附加线圈：附加线圈的数目和位置可以不同；例如可以在推进器加速空间增加一个附加线圈。也可以在图 1、3、4、8、10、14、15 或 16 所示的实施方案中使用这样的附加线圈。与之相似，梯度控制线圈的数目和位置可以与图 8 所示的实施方案不同；可以在其它实施方案中使用梯度线圈。可以永久地形成一个较高的磁场梯度 — 如图 9 中的曲线 40。如图 10-13 中的那些方向控制线圈也可以用在图 1-9 或 15-17 所示的实施方案中。在全部实施方案中，电离和加速电磁场可以采用相同的频率；这简化了电磁场的产生；然而，也可以采用不同发生器所产生的不同频率。

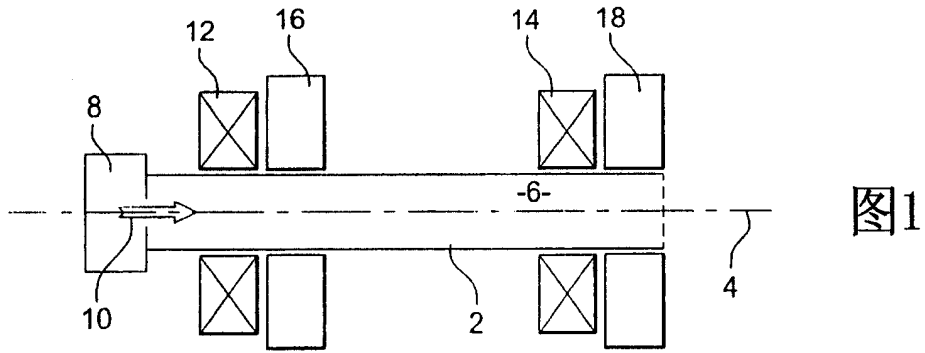


图1

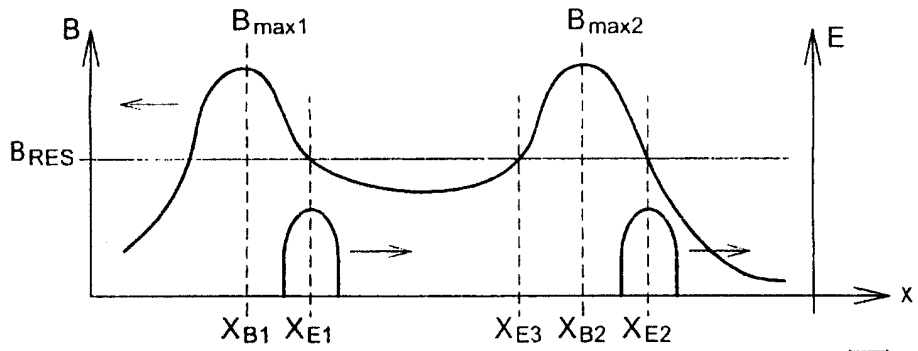


图2

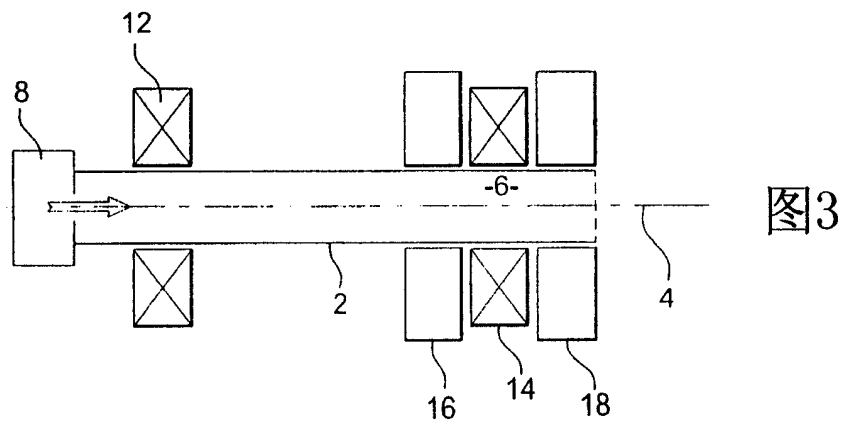


图3

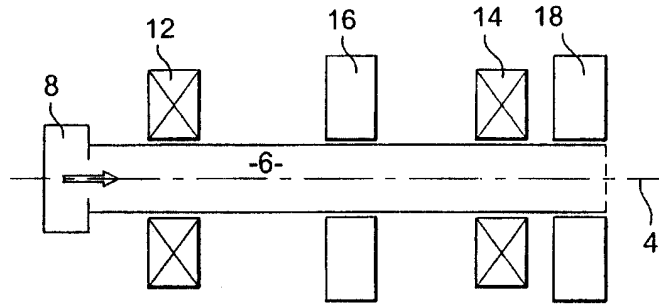


图4

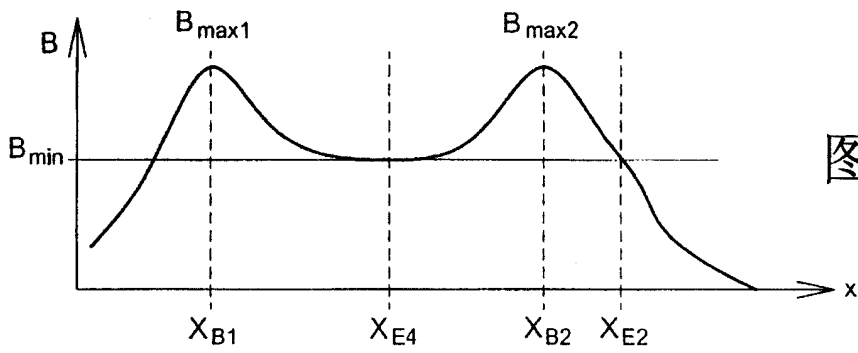


图5

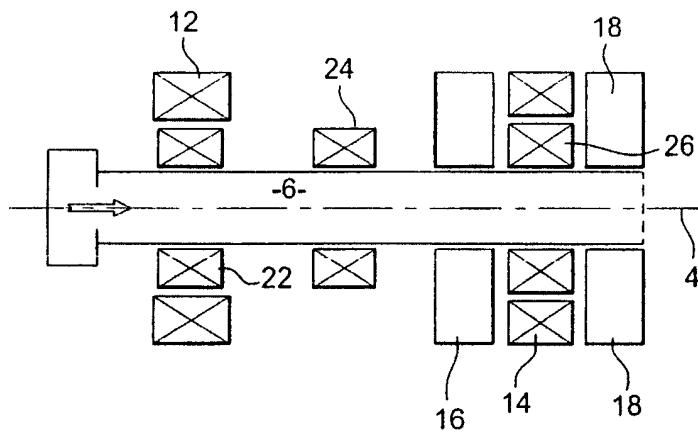


图6

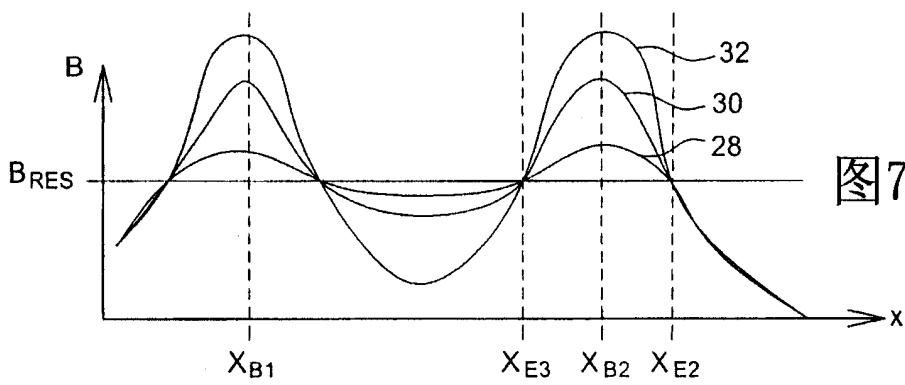


图7

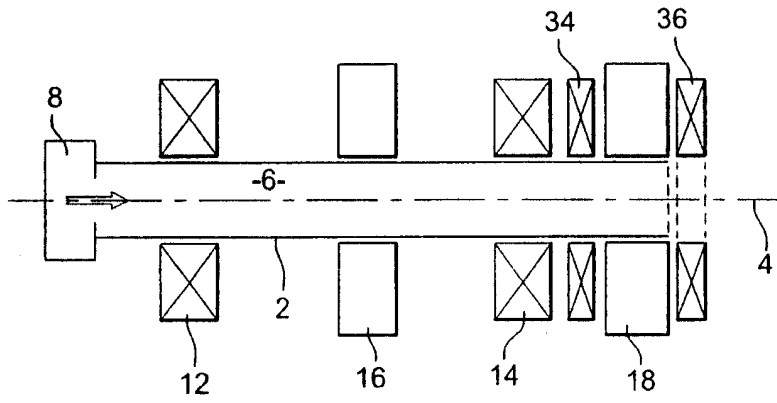


图8

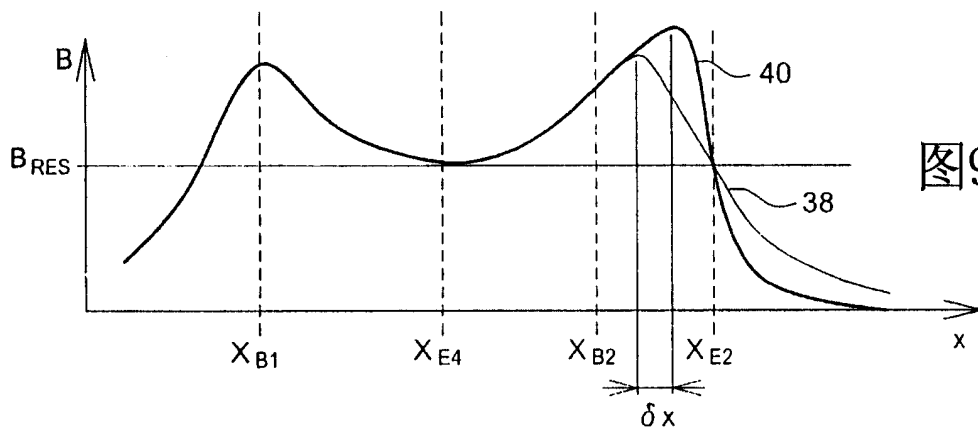


图9

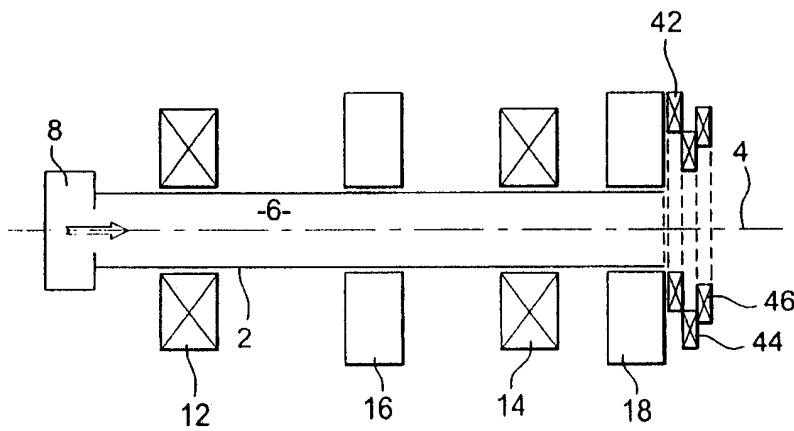


图10

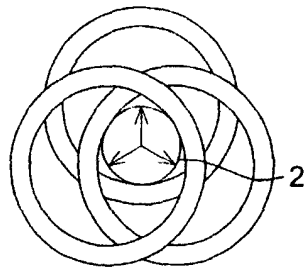


图11

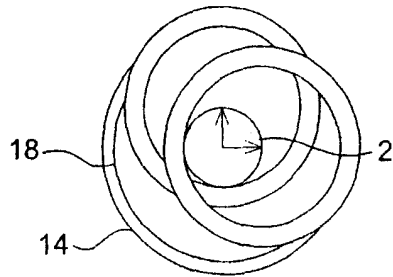


图12

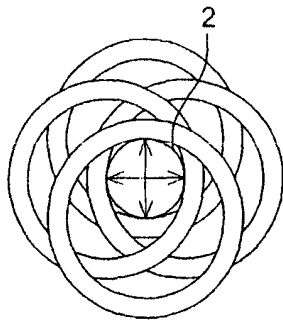


图13

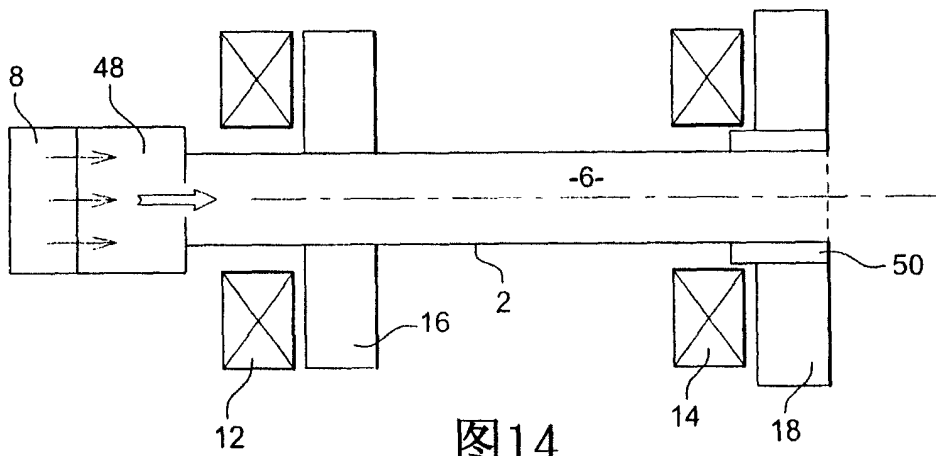


图14

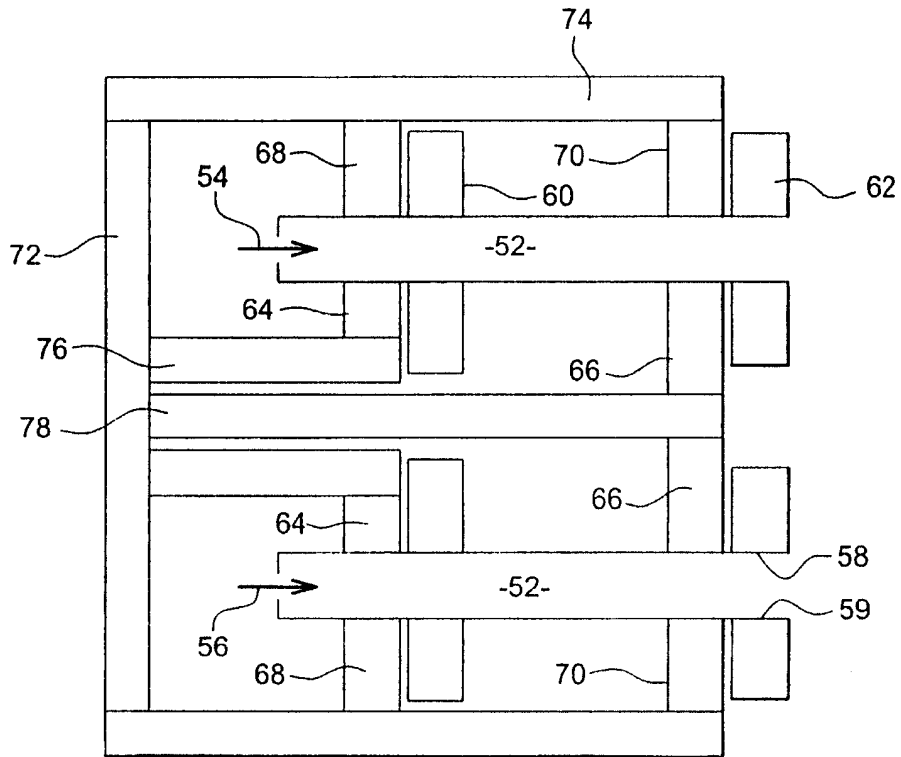


图15

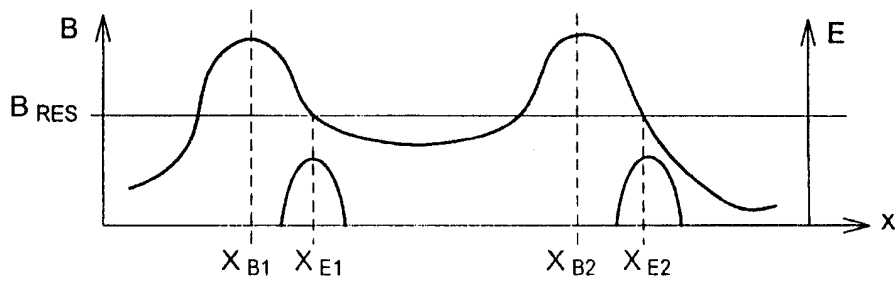


图16

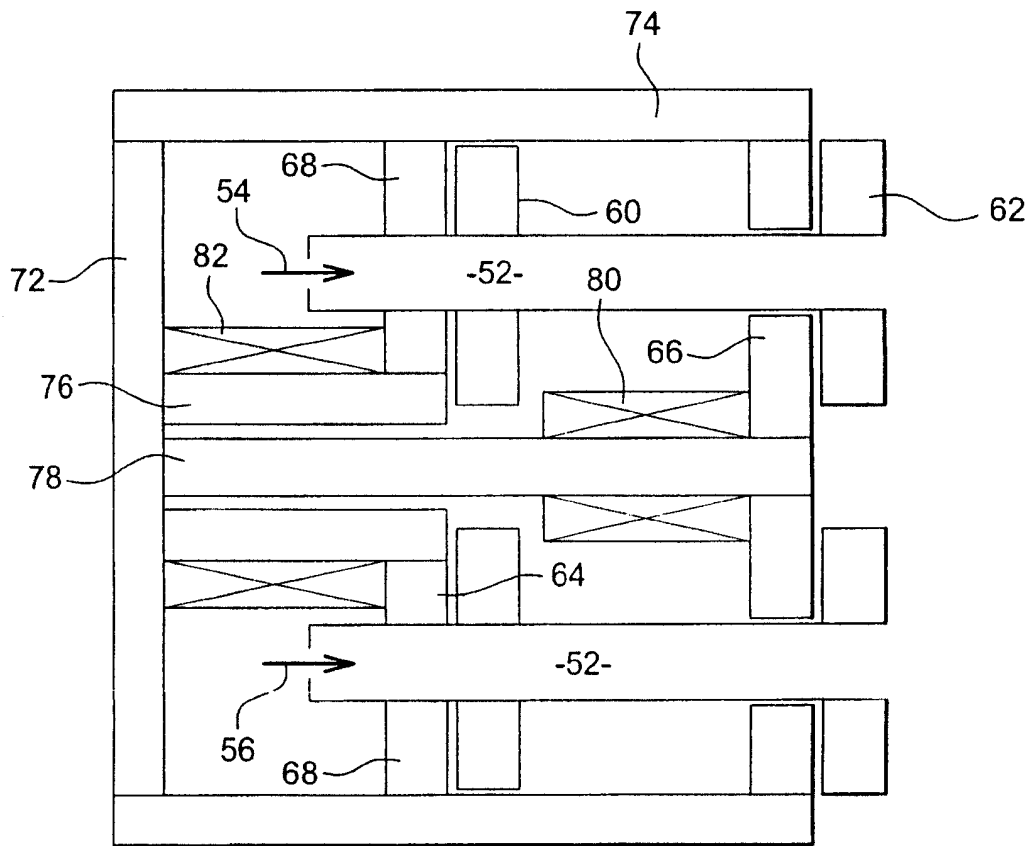


图17