

微波等离子推力器真空中工作的 电微波系统及其实验^{*}

杨 涓 毛根旺 何洪庆 唐金兰 宋 军 苏纬仪

(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

(2003 年 12 月 29 日收到, 2004 年 2 月 18 日收到修改稿)

为了解决微波等离子推力器全系统在真空中进行实验的关键问题, 减少实验中不必要的能量损失, 研制出可在大气与真空环境中工作的微波等离子推力器电微波系统. 该系统利用了开关电源、衰减器和检波器一体化设计技术、液体冷却技术, 解决了微波电子器件在真空中的放电问题. 实验表明: 系统输出的微波功率稳定, 能可靠地工作在地面和真空环境中.

关键词: 等离子体源, 等离子体设备及应用, 微波技术

PACC: 5250D, 5275, 5270G

1. 引言

微波等离子推力器(MPT)属等离子推进的一种, 特点为比冲适中($5000\text{—}9000\text{ m/s}$)、推力范围宽($10\text{—}1000\text{ mN}$)、系统效率高(45%)、无电极烧蚀、与飞行器兼容性好, 应用于卫星姿态控制、位置保持和深空探测器的主推进时, 可以增加有效载荷、延长寿命、节约费用. 对这种装置的研究在一些国家受到重视^[1-8].

MPT 由微波源、推力器腔体和工质供应系统组成. 微波源又由微波发生器及其供电电源、微波传输和检测器件组成, 推力器腔体实质上是一个微波谐振腔. 圆柱谐振腔用于 1000 W 以上 MPT, 同轴谐振腔用于 100 W 的 MPT, 微波源和谐振腔构成了 MPT 的电微波系统^[9-10]. 到目前为止, 由于没有解决真空条件下电子器件的气体放电和冷却问题, 国内外对 MPT 开展实验研究时, 都把微波源放置在大气环境中, 而把推力器的腔体放置真空舱中. 这就必须采用额外的电缆和微波接头通过真空舱的法兰把微波源和腔体连接起来. 额外电缆和微波接头的使用将增加 MPT 不必要的能量损失, 损失大小又受测试状态、推力器系统装配和实验状态的影响, 很难得到准确测量, 因而也难以准确给出推力器具有一定性能时需要消耗的功率. 为此, 我们采用非线性开关电源技术、封闭式水冷却技术、衰减器和检波器一体化设

计技术, 研制出可以在大气和真空环境中工作的 200 W 微波源. 这为开展 MPT 电微波系统在真空条件下的实验研究创造了良好条件.

在大气和真空环境中, 对 MPT 的电微波系统成功地进行了实验. 结果表明: 系统输出功率稳定、能够可靠地工作在大气和真空条件下.

2. MPT 电微波系统

图 1 为可在大气与真空环境中工作的 200 W MPT 电微波系统结构示意图, 由微波源和同轴谐振腔组成. 微波源又由模拟电源、开关电源、磁控管、环行器和衰减检波器组成. 电微波系统的工作原理是: 模拟电源首先把 220 V 50 Hz 的交流电转换成 27 V 直流电, 开关电源把 27 V 直流电转换成高压电, 磁控管在高压电的作用下, 产生出连续微波能量并沿环行器输入到同轴谐振腔中. 当同轴谐振腔的谐振状态不佳时, 反射出的能量再沿环行器被传输到衰减检波器中并被转换成低电压直流信号, 该信号可用于指示反射功率的大小. 在微波源工作过程中, 改变输出功率控制信号可以调节磁控管微波输出功率的大小.

2.1. 微波源

MPT 微波源中的微波发生器选用磁控管, 原因是: 该器件的工作电压、体积、质量都低于其他类型

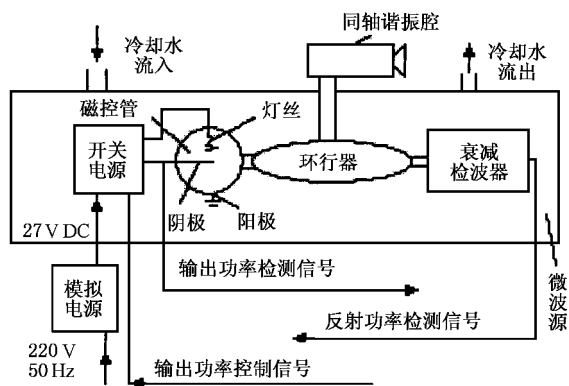


图1 MPT电微波系统结构示意图

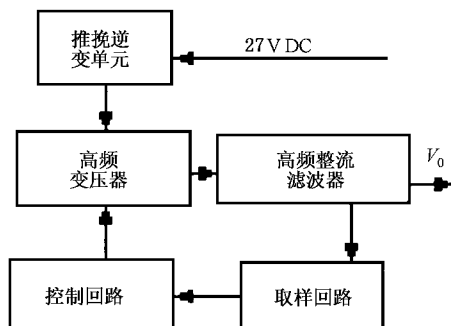


图2 开关电源结构示意图

的电真空管,但效率却高于其他电真空管,而且该器件生产工艺成熟、应用广泛。

200 W MPT微波源的磁控管要求提供 1800 和 1795 V 的阴极和灯丝电压,可选择体积小、重量轻、效率高、输出电压稳定的开关电源为磁控管提供满足要求的工作电压与电流,它含高压和低压电路两部分。高压电路输出 -1800 V 电压,低压电路输出 5 V 电压。高压正极和低压负极相联并接地,就产生了 -1800 和 -1795 V 的两路输出。高压和低压电路的原理、结构基本相同,图 2 给出高压电路的示意图。从图 2 可知,高压电路由推挽逆变单元、高频变压器、高频整流滤波器、取样回路和控制回路构成。27 V 直流电通过推挽逆变单元被转换成高频脉冲信号,该信号再通过高频变压器和高频整流滤波电路输出需要的直流电。取样回路把输出电压的变化量送至控制回路,再改变推挽逆变单元输出的电压脉冲宽度,从而保证输出电压的平稳性并调节输出电流。高频变压器连接在推挽逆变单元和高频整流滤波电路之间,这可以大幅度地降低电源的体积和重量,提高效率。

为了使 MPT 微波源的结构紧凑,设计了体积小、重量轻、以水为冷却媒质的衰减检波器一体化结构。衰减器结构方案为同轴电阻形式,具体结构为在同轴电缆中间沿半径方向放置微波能量吸收片,以吸收 90% 以上的微波能量,其余 10% 以下的微波能量被送入检波器转换为低于 5 V 的电压信号 U , U 和微波功率 P 的关系为 $U = kP^2$ 。因此,根据 U 值的大小可推算出功率。环行器结构为同轴三端口形式,微波通过时,具有顺时针传输特性,即从任一端输入微波能量将按给定顺时针方向依次传输到下一个端口输出。

常规的自然对流风冷却装置不能用在真空环境中,为此,专门设计了水对流散热器以解决真空环境下的散热问题。以开关电源为例,其散热器由底板、若干个螺栓、盖板、两套进水组件构成。底板光滑面的一端为冷却面,另一端面上开有边长为 2.8 mm 的方形槽。当底板上的冷却面和系统中器件的散热面结合在一起时,可以把热量带走,起到散热效果。

当 MPT 微波源中的器件直接工作在真空环境中时,高电位金属和微波器件接头处有空气放电现象,影响系统的正常工作。采用高绝缘性密封胶可以解决金属接头的放电问题,但是由微波功率引起的空气击穿发生在器件内部,不能采用包覆绝缘胶的方法解决。根据气体击穿理论,当提高气体压强时,击穿空气所需的功率和电位都增加。因此采取提高环境压强的方法可以有效地避免放电问题,采用密封充气机箱是该方法的具体实施方案。选用不锈钢材料,采用有限元分析 NASTRAN 计算机程序对机箱进行设计计算,最后确定的机箱尺寸为 400 mm × 180 mm × 255 mm,厚度为 2.2 mm。为了减少真空下机箱的应力和应变,上盖板与下底板的中部加装宽 30 mm、高 2 mm 的加强筋。

2.2. 谐振腔

如图 3 所示,200 W MPT 谐振腔由内、外导体和耦合探针组成。微波能量通过耦合探针被输入到谐振腔内,调节内导体到合适的位置可使微波在腔体内谐振,此时在腔体内喷管附近产生强电场强度区。气体通过进气口进入腔体后,在强电场强度区被击穿形成等离子体,等离子体再通过喷管被加速产生推力。

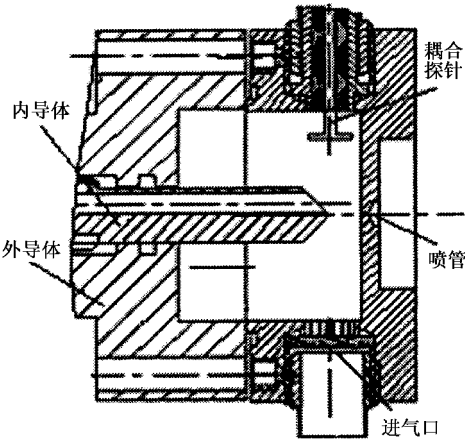


图 3 MPT 谐振腔结构示意图

3. 实 验

在大气和真空条件下分别对 MPT 电微波系统进行实验 ,其中真空实验全系统如图 4 所示.图 4 中的计算机虚拟仪器测控装置可以实现对气体流量、微波输出功率的控制 ,同时测量反射功率和气体压强等 .

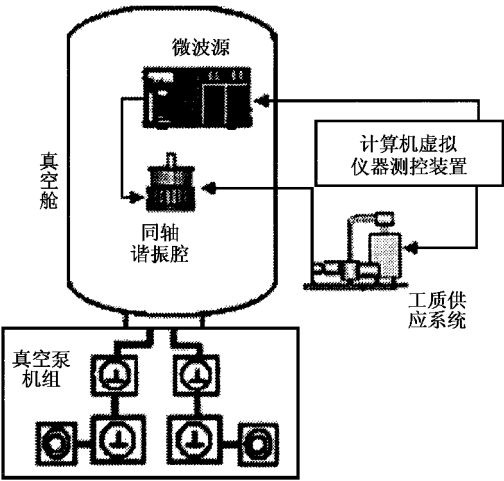


图 4 MPT 真空实验系统示意图

在地面大气条件下 ,当微波输出功率不同时 ,以氩气和氦气为工质 ,测出从推力器腔体反射的微波功率随气体流量的变化如图 5 所示.以氩气为工质 ,当微波输出功率在 54—115 W 范围内时 ,MPT 稳定工作的流量范围为 5—150 mg/s ;以氦气为工质 ,当微波输出功率在 50—100 W 范围内时 ,MPT 稳定工

作的流量范围为 5—20 mg/s .

真空条件下 ,当微波输出功率不同时 ,以氩气为工质 ,测出从推力器腔体反射出的微波功率如图 6 所示.与地面实验相比 ,MPT 稳定工作的最大流量可以达到 290 mg/s .

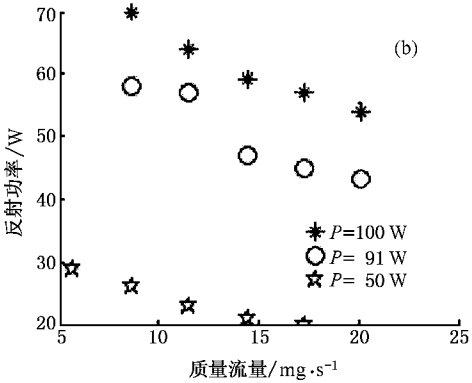
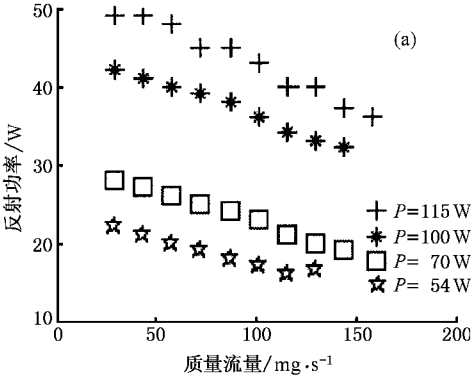


图 5 地面大气条件下 ,微波反射功率测量结果 (a) 氩气 , (b) 氦气

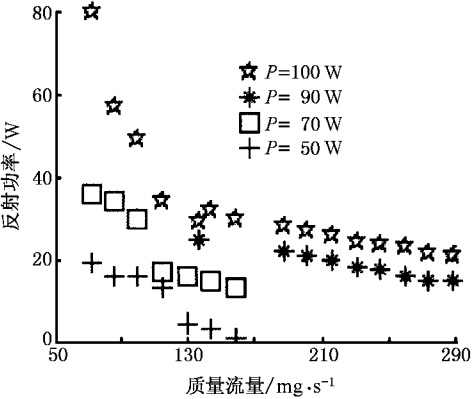


图 6 真空条件下反射功率随氩气流量的变化

由图 5、图 6 可以获得如下结果：

(1) 分别以氩气和氦气为工质 ,当磁控管微波输出功率一定时 ,反射功率随气体流量的增加而减小 .

(2)当磁控管微波输出功率一定时,在 MPT 稳定工作的气体流量范围内,谐振腔反射功率以氩气为工质时最大。

(3)当气体流量一定时,无论工质是氩气还是氢气,也无论是在地面大气条件下还是在真空条件下,微波反射功率随磁控管微波输出功率的增加而增加。

(4)比较图 5(a)和图 6 可以看出,在相同的输出功率和气体流量情况下,MPT 在真空条件下工作时推力器腔体的反射功率比在地面大气条件下工作时要大。

4. 结 论

根据上述的实验情况和所得结果,我们认为:开关电源可以为 MPT 微波源中磁控管提供满足要求

的工作电压和电流,同时能缩小其体积。以水为冷却媒质的散热器有效地解决了真空环境中微波源的散热问题。采用密封充气机箱,并在裸露的金属件上包覆绝缘胶能避免微波和电子器件在真空下的放电问题。

在地面大气和真空环境中,对 MPT 的电微波系统进行的实验说明:该系统结构合理、工作可靠,能够工作在地面大气和真空环境中。

本文介绍的微波源采用密闭充气机箱和包覆耐高压绝缘胶的措施,解决了微波电子器件在真空下的放电问题。这种方式不能适应未来实际应用的工作环境。固态微波源由半导体器件组成,工作电压为 12 或 24 V,可以省去微波发生器的高压供电电源,在真空中工作时不会出现气体放电现象,与磁控管相比体积更小、质量更轻。因此,固态微波源是以后 MPT 微波源的发展趋势。

- [1] Micci M M, Balaam P 1992 *J. Propul. Power* **8** 103
- [2] Power J L 1992 *IEEE Trans. Microw. Theo. Technol.* **40** 1179
- [3] Balaam P, Micci M M 1995 *J. Propul. Power* **11** 1021
- [4] Diamant K D, Brandenburg J E, Cohen R B *et al* 2001 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit (Salt Lake City: AIAA) B900
- [5] Chiravalle V P, Miles R B, Choueiri E Y 2001 39th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit (Reno: AIAA) B62
- [6] Yang J, He H Q, Mao G W *et al* 2004 *J. Space. Roc.* **41** 126

- [7] Mao G W, He H Q, Yang J 1998 *J. Propul. Technol.* **19** 21 (in Chinese) 【毛根旺、何洪庆、杨 涓 1998 推进技术 **19** 21】
- [8] Mao G W, Han X W, Yang J 2000 *J. Propul. Technol.* **21** 1 (in Chinese) 【毛根旺、韩先伟、杨 涓 2000 推进技术 **21** 1】
- [9] Yang J, He H Q, Mao G W 2003 *J. Sol. Roc. Technol.* **26** 75 (in Chinese) 【杨 涓、何洪庆、毛根旺 2003 固体火箭技术 **26** 75】
- [10] Han X W, He H Q, Mao G W 2003 *J. Propul. Technol.* **24** 208 (in Chinese) 【韩先伟、何洪庆、毛根旺 2003 推进技术 **24** 208】

Electro-microwave device of microwave plasma thruster operating under vacuum condition and its experiment

Yang Juan Mao Gen-Wang He Hong-Qing Tang Jin-Lan Song Jun Su Wei-Yi

(*College of Astronautics , Northwestern Polytechnic University , Xi'an 710072 , China*)

(Received 29 December 2003 ; revised manuscript received 18 February 2004)

Abstract

In order to tackle the key problems in the experimental study on the microwave plasma thruster , of which the whole system operates under the vacuum condition , and remove the unnecessary energy loss , an electro-microwave device operating under atmosphere and vacuum condition has been developed by applying the design technology of the nonlinear power supply , the integration of attenuator and detector , liquid cooling , and after resolving the gas breakdown problems of electro and microwave apparatus . The experimental study on the device with argon and helium as propellant has been carried out . The results show that the output power of microwave is stable , the device can operate under vacuum and atmosphere condition reliably .

Keywords : plasma sources , plasma devices and applications , microwave techniques

PACC : 5250D , 5275 , 5270G