

霍尔推力器振荡问题的研究综述

江滨浩, 赵一男, 魏立秋, 王春生, 于达仁

(哈尔滨工业大学 402 信箱, 哈尔滨 150008)

摘 要: 自前苏联 1971 年将霍尔推力器成功地应用以来, 霍尔推力器以其优异的性能, 在卫星轨道保持和变轨运行过程中成为最佳动力装置之一, 由于霍尔推力器自身工作原理所产生的等离子体振荡, 其频率从几十 kHz 到几 GHz, 包含推力器中各种物理现象、与推力器中粒子电离、加速、传导等等离子体微观物理过程息息相关, 一直是该领域的研究热点和焦点问题。系统总结了各国主要研究机构对于霍尔推力器振荡问题的理论和实验研究成果, 结合自身对霍尔推力器等离子体振荡物理过程的认识, 分析了目前尚待解决的振荡问题, 对于进一步深入研究霍尔推力器的等离子体振荡问题具有一定借鉴意义。

关键词: 等离子体振荡; 霍尔推力器

中图分类号: V43

文献标识码: A

文章编号: 1000-1328(2009)06-2062-10

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2009.06.002

0 引言

霍尔推力器是一种具有 $\vec{E} \times \vec{B}$ 场的同轴圆环形直流放电等离子体加速器, 是属于电推进 (Electric Propulsion) 范畴内的一种基本类型。霍尔推力器结构示意图如图 1 所示, 通道内磁场和电场的方向相互正交, 由于磁场对电子的束缚作用, 从阴极释放出的电子被束缚在通道中的某一个区域中, 这些电子同从阳极注入的惰性气体原子 (一般为氙或氩) 发生碰撞并使其电离形成等离子体。由于离子的质量要远远大于电子的质量, 所以通道内的磁场有效束缚电子轴向运动的同时对离子的运动几乎没有影响, 电离产生的离子在通道内电场的作用下加速喷出, 产生推力。其特点是结构简单, 没有易变形、易烧蚀的栅极, 运行电压低, 结构紧凑, 比冲处于目前最佳范围 (1000~2000 s), 效率在 45%~55% 之间, 适合于多种类型航天器^[1], 因此在未来的空间应用方面具有较强的竞争力。

但是霍尔推力器在工作过程中存在着振荡现象, 频率从几 kHz 到几 GHz, 甚至十几 GHz 都能够测量到振荡信号。按照推力器内振荡的频率范围, 可以将推力器内的振荡分为低频 (LF)、高频 (HF) 和超

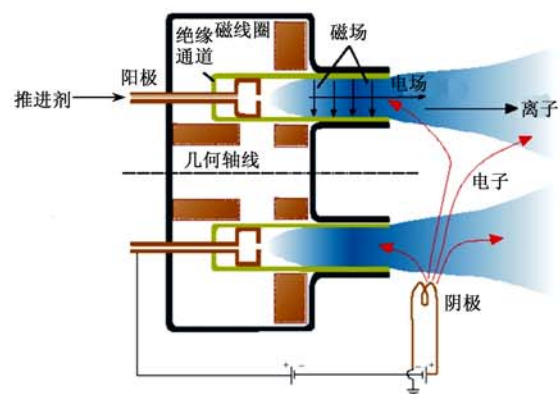


图 1 霍尔推力器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hall thruster

高频 (UHF) 振荡。低频振荡是影响推力器和电源处理单元 (PPU) 设计的重要因素, 高频振荡引起的辐射影响推力器与卫星板载电路的一体化, 制约着霍尔推力器在卫星上的实际应用, 超高频辐射则对霍尔推力器在深空探测中的应用产生影响。世界各国致力于霍尔推力器的研究人员都对霍尔推力器中的振荡现象进行了广泛的研究。本文总结了各国研究人员对于推力器振荡现象的研究成果, 提出了对于霍尔推力器振荡研究尚待解决的问题, 为进一步研究霍尔推力器的振荡现象提供了参考。

收稿日期: 2009-03-03; 修回日期: 2009-05-08

基金项目: 国家自然科学基金—霍尔推力器中一种新的振荡模式励磁/放电耦合振荡研究 (50877018)

1 霍尔推力器低频振荡研究现状

1.1 低频振荡产生机理及建模研究

在霍尔推力器的工作过程中,观察到了大规模的放电电流自发振荡,振荡频率主要存在于10~100 kHz之间,通常所说的霍尔推力器低频振荡,就是指这一振荡,图2为霍尔推力器放电电流低频振荡的典型示波器测量图。低频振荡幅值比较大,对推力器自身运行特性和电源设计有较大的影响,因此各霍尔推力器研究机构和研究人员^[2-3]都投入很大的时间和精力研究低频振荡问题。

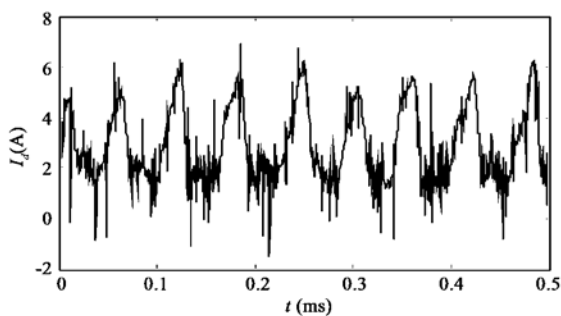


图2 霍尔推力器放电电流低频振荡

Fig. 2 Low frequency discharge current oscillations in Hall thruster

研究人员提出各种模型来描述低频振荡,试图阐述低频振荡产生的机理。在描述低频振荡的众多机制当中,伴随着10 kHz~30 kHz频率范围之内放电电流振荡的呼吸振荡机制无疑最为限制电源的设计。然而直到20世纪70年代中期,这一振荡机制才始见于俄罗斯的文献之中^[4-6]。呼吸振荡是一种在各种型号霍尔推力器运行中都能观察到的低频纵向振荡。最先给出这种振荡解释的是Baranov等人^[7]和Fife^[8]等人,他们在给出物理解释的同时给出了低频振荡最初的数值模型。而术语“呼吸”是由Boeuf和Garrigues提出的,他们在放电过程的数值模拟中观察到了电离前锋面明显的前后运动,他们对低频振荡的一维准中性混合模型进行了详细描述^[9]。

最初的各种理论研究之间缺乏一致性,这使得各研究机构致力于寻求基于带电粒子动力学的更为严密和一般的研究方法。Noguchi等人借助于一维线性扰动模型分析霍尔推力器运行过程中产生的低频振荡^[10]。日本的Yamamoto等人通过实验研究了

直线型和阳极层型霍尔推力器10 kHz~100 kHz的放电振荡特性,并测量了不同工况下振荡特性随磁场强度的变化情况。实验结果表明,在低频振荡中起到重要作用的是动态电子而不是离子,因为在实验中发现低频振荡的频率和幅值随着磁场强度的变化而变化,但是随着电场强度的变化几乎不发生变化。由于在电离区的末端仍存在着一些电场,从而指出了Baranov假设电离区的电场为零的模型和Fife基于离子和中性粒子的动态过程的模型均存在缺陷,并在此基础上提出基于动态电子和中性粒子相互作用的模型^[11-13]。同时对振荡频率和稳定运行范围进行了模拟,模拟的结果与实验结果相吻合,从而证明了该模型有效地描述了霍尔推力器低频振荡的物理过程^[14]。在文献[15]中Banal等人运用线性小扰动模型和非线性模型研究了霍尔推力器的低频振荡。对于线性小扰动模型的制定依赖于Ahedo等人^[16]和Molina等人^[17]的模型,通过线性小扰动模型的分析,得出了低频振荡的一系列影响因素。而非线性模型的分析,则初步得出呼吸机制的一些关键过程,如振荡直接涉及的只有电子和中性粒子,这符合捕食模型对呼吸振荡机制的解释。在此基础上,通过进一步的研究,Barral推导出了低频振荡准静态模型,改进了以前的理论^[18],并对低频振荡产生机理的研究成果进行了总结,最终得出在呼吸振荡机制的两种解释中,用捕食模型来解释呼吸振荡机制更为恰当^[19]。斯坦福大学由M. A. Cappelli领导的团队早期对振荡的实验研究成果较多,其中包括用单探针、发射探针和扫频Langmuir探针对霍尔推力器通道内外的等离子体参数稳态特性和频谱测量,以验证通道内低频振荡、周向漂移波和随机扰动的存在^[20]。

还有一些研究人员运用光学诊断方法研究霍尔推力器内的低频振荡问题^[21]。Meezan利用发射光谱和探针研究低电压下的周向漂移波(5~70 kHz),这种波动在放电电流饱和区被低频振荡所取代,得出了低频振荡是由于电离不稳定造成的和频率与Fife的捕食模型定性吻合的结论^[22];并利用双探针测量通道内振荡的周向和轴向特性,得出探针离子饱和电流均值与探针轴向和周向位置有关、周向振荡反映等离子体密度波动沿周向传播等结论^[23]。同样的,F. Damon也用光学方法和数值模型研究了

霍尔推力器内大振幅的低频振荡的产生机理^[24]。

1.2 低频振荡的特点及影响因素研究

霍尔推力器内产生的振荡现象在推力器的良好运行中发挥着重要作用。但也是这些振荡制约着卫星上推力器的集成和推力器电源处理单元(PPU)的设计。因此对霍尔推力器内的振荡更清楚的认识和更全面的诊断是不断改进霍尔推力器和 PPU 设计中必不可少的重要研究内容。

法国的霍尔推力器研究团队一直致力于霍尔推力器内低频振荡问题的研究。L. Garrigues 和 J. P. Boeuf 以及后来的 G. J. M. Hagelaar 是较早通过模拟开始研究霍尔推力器振荡的研究人员。L. Garrigues 和 J. P. Boeuf 首先通过建立一维准中性混合模型(电子以流体描述、离子以无碰撞的动力学方程描述),详细计算了霍尔推力器中参数的稳态分布情况和等离子体的振荡情况,以及在不同出口区磁场强度、不同磁场分布、不同电压情况下,推力器内的低频振荡幅值与频率的变化情况,并与实验研究的结果进行了比较^[25]。法国也是比较早采用光学设备和快速照相的方法对于推力器通道和羽流的参数进行测量的,其中 Franck Damon 和 Michel Lyszzyk 等人运用光学设备和电学设备研究了 SPT100 内存在的频率低于 1MHz 的低频振荡的光学特性和电学特性^[26]。而 N. Gascon 和 E. Chesta 等人则使用两个 Langmuir 探针初步研究了低频振荡的色散问题,并给出条件采样和小波分析两种数据处理方法的差别^[27]。在此基础上,使用三个朗缪尔探针实验研究了低频振荡沿周向和轴向的色散和传播问题^[28]。沿着这一思路,又在氧化铝和氮化硼两种不同壁面条件下使用探针测量和小波分解的方法研究了低频振荡的色散问题,得出了在两种不同壁面条件下,与等离子体密度和磁场梯度密切相关的低频振荡周向传播性质总体相同,但是在电离区有着显著的不同,这是因为决定着等离子体密度峰值的电离区位置不同。在氧化铝壁面的条件下,电离区非常接近磁场峰值处,而氮化硼壁面条件下,两者要分开 20 - 30 mm^[29]。目前,加拿大的 A. Smolyakov 正在与该团队合作利用一维的 PIC 模型研究鞘层的不稳定性问题^[30-31]。

最近,哈工大等离子体推进技术实验室的研究团队对霍尔推力器羽流区的振荡问题开展了实验研

究。采用在轴向、周向不同位置安装探针,通过探针上接收的饱和离子电流和饱和电子电流来反映羽流区等离子体密度波动。实验结果表明,羽流区等离子体密度振荡的频率与低频振荡频率相同,在低频时间尺度内,等离子体密度波动沿周向是同步的,而沿轴向的相位差反映了等离子体密度波动沿轴向的传播,传播速度与离子飞越时间近似相等。

对于低频振荡影响因素的研究也一直是振荡问题研究的重要内容。S. Barral 在对呼吸振荡数值研究的基础上,从理论上分析了电源对于霍尔推力器内呼吸振荡的影响^[32]。哈工大等离子体推进技术实验室在实验中发现霍尔推力器阳极与气体分配器之间存在着电压,进而通过理论预测和实验研究证实了在霍尔推力器缓冲腔内存在着工质气体的预电离现象。通过改变电场强度和磁场强度可以改变缓冲腔内的电离率。通过数值模拟和理论分析,哈工大等离子体推进技术实验室首次阐述了预电离机制对霍尔推力器低频振荡影响的物理机理。霍尔推力器通道内的电离过程中,正负反馈作用交替占据主导地位,造成电离的不稳定,引起离子密度和中性原子密度大幅度变化,这是引起霍尔推力器低频振荡的主要原因。而通过促进霍尔推力器缓冲腔内的预电离,提高预电离率,也就提高了工质气体进入加速通道时等离子体的密度,相应地也就降低了通道入口处中性原子的密度,显然,这使得通道内原子密度和离子密度的变化范围都减小了,也就削弱了电离过程中的正负反馈作用,从而减小了低频振荡的幅度^[33]。同时该研究团队还研究了霍尔推力器滤波器电感对低频振荡特性的影响。在霍尔推力器实际应用中,通常会采用由电感和电阻并联而成的滤波器来抑制放电低频振荡,在电感和电阻匹配条件下,可以将低频振荡控制在一个可以接受的水平上。实际应用的电感一般由磁环和缠绕在其上的线圈组成的。实验结果表明,对于相同电感值的电感元件由于其实际的频率特性不同,在应用于霍尔推力器滤波器上时,对放电电流低频振荡的影响完全不同,有时差异会相当的大^[34]。

对于阳极层型霍尔推力器,一个重要问题是如何克服放电不稳定。为了稳定放电,设计了空心的阳极,但是空心阳极的作用还没有得到充分的证实,空心阳极的优化工作尚需进行。Shinsuke Yashi 和

Ken Kumakura 等人使用 1kW 级阳极层型霍尔推力器实验研究了各种空心阳极宽度和阳极区轴向位置的放电电流振荡的振幅,确定了稳定放电的等离子体密度阈值,为阳极层型霍尔推力器的稳定运行奠定了基础^[35]。

1.3 低频振荡对霍尔推力器性能的影响及抑制方法研究

东京大学的 Yamamoto 等人通过调节磁场得到不同的低频振荡情况,研究低频振荡和羽流发散角以及推力器寿命的关系,实验给出低频振荡本身对于羽流发散角和推力器寿命的影响很小,而磁场的变化引起的电离区变化是影响推力器羽流发散角和寿命的主要因素^[36]。同时研究了 1kW 阳极层型霍尔推力器内 10 kHz~100 kHz 频率范围内的放电振荡,基于其建立的模型对运行状况不稳定进行了预测。结果表明,减少放电通道的截面,会使稳定运行范围变大,这与实验结果相符合。但是该模型给出的稳定条件表达式并没有经过简化,而是通过一种数值的方法给出了稳定的区域,其判别式中的参数是通过实验测量给出的^[37]。随后经过进一步的研究才简化了稳定条件的表达式^[38]。根据稳定条件,通过改变阳极层型推力器阳极的宽度和阳极区的位置可以改变稳定区域大小,并得到了实验验证。基于该模型,进一步的工作是给出了振荡频率表达式,指出这符合振荡频率随着放电电压的增大而增大的实验结果,因为放电电压的提高使电子的温度增大^[39-40]。在实验方面,采用高速的相机拍摄了阳极层型推力器电离区激发的氙离子密度变化情况,并和低频振荡电流相比较,发现电离区氙离子密度正比于放电电流,得出低频振荡是由于电离不稳定引起的结论^[41]。该研究团队的 Fukushima 和 Yokota 还通过周向工质不均匀供给研究了阳极层型霍尔推力器的低频振荡抑制方法,文章的实验结果表明,在工质不均匀供给条件下低频振荡得到了抑制,但是同时放电电流上升,推力器效率大幅下降^[42]。而 Tamida 和 Nakagawa 等人对霍尔推力器内的低频振荡进行了理论和实验研究。振荡现象依赖于各种外部控制参数,而且,这种依赖性可以通过对外部控制参数的组合给出非常明确的表达形式。使用这种表达形式,人们可以观察到在给定的外部控制参数下的振荡强度和振荡模式。他们认为,通过确定的参

数设置可以抑制低频振荡^[43]。

密西根大学关于霍尔推力器的研究主要集中在推力器性能和寿命、实验测量方法、变工质、羽流区模拟和新型推力器的研制上,关于霍尔推力器的振荡问题研究不多,Alec D. Gallimore 教授领导的等离子体动态与电推进实验室在研究霍尔推力器多组并行运行中,实验研究了利用 DSP 编程控制霍尔推力器低频振荡的方法^[44]。

Lazurenko 研究了 PPS-1350-G 型号推力器在宽参数范围运行时的振荡现象,包括与仿真结果的比较。Snecma Moteurs 公司的 PPS 1350-G 型推力器 2003-2004 年曾用于欧空局地-月任务的推进系统中^[45-46]。Barral 等人指出除了对工作参数作相应调整以外,也可以通过外电路的设计和串联励磁的方法来降低低频振荡。外电路主要是通过 RLC 电路的形式,主要作用元件为电感;串联励磁主要是通过 PID 控制的形式给出电流对磁场大小的影响。模拟结果给出了各个参数变化对低频振荡的影响,表明两种方法对于抑制低频振荡都起到了很好的作用,但是通过两种方法的比较,可以得出,串联励磁对于抑制低频振荡更加有效^[47]。

另外,在霍尔推力器实际应用中,通常会采用由电感和电阻并联而成的滤波器来抑制放电低频振荡,前期研究表明,在霍尔推力器和 PPU 之间选择合适的滤波器可以减小低频振荡的幅值,将低频振荡控制在一个可以接受的水平上。中国的于达仁,魏立秋等人通过实验和数值模拟的方法,从控制理论的角度阐述了滤波器参数与放电电流低频振荡的关系,为滤波器的设计提供了理论支持^[48]。

2 霍尔推力器高频振荡研究现状

2.1 高频振荡特性及建模研究

霍尔推力器内存在频率在几十 kHz 范围的低频振荡,也存在频率在几百 kHz 到几十 MHz 范围的高频振荡。一般情况,推力器内产生的振荡在几十 kHz 到几百 kHz 的频率范围内振荡幅值最大,在接近 1MHz 时振幅降为原来的 10-50 分之一,频率再升高时,则振幅的下降约为原来的 $1/f^2$ 。A. I. Morozov 等人把霍尔推力器中具有较大幅值的等离子体振荡归结为“离子化振荡”和“飞行振荡”两种类型,其中“离子化振荡”是在低放电电压的条件下,即在

放电伏安特性的离子化区域,在霍尔推力器的加速通道内观察到的几十 kHz 非常有规律的振荡,主要存在于加速通道出口到阳极的区域;而在伏安特性的电流饱和区域,振荡的频谱呈现出另外一种形式——它是产生于等离子体内的与离子化过程无关的一种等离子体不稳定性,这种振荡的最大特点是它的频率范围 f_0 与离子飞行穿过加速管的时间倒数有关,因此称之为“飞行振荡”^[49]。

霍尔推力器在运行时会产生高频振荡现象是阻碍霍尔推力器在卫星或宇宙飞船上成功应用的一个重要问题,因为振荡引起的高频辐射可能干扰射频通信或推力器自身的运行。对于高频范围的飞越时间振荡——“飞行振荡”产生机理的解释,虽然 Esipchuck 在他概括 Morozov 的早期振荡研究成果时就已经首先提出^[50],但是,对霍尔推力器几十 MHz 频段的高频振荡物理性质的理论和实验研究都是十分有限的,高频振荡实验数据的缺乏是由检测和诊断这些振荡所遇到的技术难题所造成的。

以前,人们对离子飞行振荡的研究一般都是通过数值仿真进行的^[51-52]。随着诊断理论的不成熟和电子电路的不断发展^[53],人们逐渐解决了高频振荡测量的技术问题。Y. Raitses 和 N. J. Fisch 等人建立了一套包含单探针、带特殊屏蔽罩的连接器、位置调节器、电阻匹配电路的高频测量探针系统^[54]。经校准后初步测量了霍尔推力器的高频等离子体振荡,实验结果显示,在加速区存在几 MHz 的方位角波,观察到波的频率强烈依赖于推力器的配置和运行工况,并且振荡的频率随着放电电压的增加而增加,随着磁场强度的增加而减小。同时,还观察到了的几个主频率的高阶谐波。根据实验结果,从理论上预测这种波动可能为 Rayleigh 不稳定性^[55]。随后,利用这一套探针研究了在一定程度上是由磁场、等离子体密度、电子漂移速度的轴向梯度激发的周向准静电波,从实验上验证了理论预测的 Rayleigh 不稳定性的存在^[56]。Y. Raitses 和 N. J. Fisch 等人还从线性的二维流体模型出发分析了这种由梯度导致的 Rayleigh 不稳定性的不稳定性条件和周向传播的一般准则,并基于霍尔推力器通道内轴向分布参数的简化模型得到了与电子周向漂移谐振的振荡波的增长率^[57]。N. J. Fisch 还利用二维流体模型研究了霍尔推力器加速通道内由于碰撞引起的等离子体

波动问题,阐述了由于在 $\vec{E} \times \vec{B}$ 电磁场下电子的碰撞引起的静电低混杂波和电磁 Alfvén 波的特性,并指出其特征频率与实验观察相吻合^[58]。

A. Lazurenko 等人对高频振荡的研究主要以实验为主,通过实验证明了高频方位角波以接近电子漂移的速度传播,这与 Esipchuck 和 Tulinin 以及 Litvak 等人提出的观点一致。同时他们利用二维全动力学模拟得出通道内存在着很强的电场波动,并且认为这一波动反应了电子沿轴向的反常输运。同时,通过对静电波色散关系的研究得出高频振荡在 1~10 MHz 频段内具有小的增长率^[59]。随后,A. Lazurenko 等人又从使用六个安装在加速通道陶瓷管外部各个轴向和周向位置的天线,对 1-10 MHz 频率范围的高频振荡进行了详细的实验研究,特别是高频振荡与 10 kHz~30 kHz 频率范围内的低频振荡^[60]和放电电流^[61]的关系。得出轴向电场的变化来自于振荡的性质,而振荡的性质表现为推力器运行参数——放电电压和磁场的函数^[62]。并针对高频振荡的色散特性进行了详细的研究,得出高频振荡沿方位角方向的色散关系几乎是线性的,而沿轴向的色散关系则取决于探针所安装的位置。通过色散关系描述了高频振荡的特点^[63]。

波兰大学的 J. Kurzynia 等人运用经验模式分解^[64]、Hilbert-Huang 方法^[65]和 Empirical Mode Decomposition (EMD)^[66]等振荡数据的分析方法研究了霍尔推力器内的高频等离子体振荡。波兰科学院基本技术研究所电推进专业的研究人员对于振荡的建模研究作了很多工作,建立了比较完备的一维流体模型,通过色散关系给出相角传播速度在离子声速级别的高频振荡的分析^[67-68]。

A. I. Morozov 还利用可移动电极在霍尔推力器内进行电势扰动的实验测量,结果表明,在整个加速通道内电势的受迫振荡是相同的,即电势受迫振荡存在于整个推力器加速通道内,但是距离扰动源越远,则受迫振荡的幅值越小,且振荡的幅值沿加速通道内电子的流动方向衰减。在假设等离子体固有频率很大(大于 10MHz)的条件下,在 100kHz-800kHz 的范围连续的变化频率,对振荡的扰动进行观察,最终得出在发生电势受迫振荡时,不存在共振现象^[69]。而 A. I. Bugrova 则证明了在霍尔推力器中存在着“膜片振荡”,指出膜片振荡表征电子温度的振

荡,并与流量的横向密度梯度的存在有关^[70]。而在近期,哈尔滨工业大学的魏立秋等人则在霍尔推力器内发现了一种新的振荡模式—耦合振荡,实验测量得到通过导磁柱绕制线圈的励磁电流并非是稳态直流,而是在几百 kHz 范围内具有宽谱的振荡特性,并在几个固定频率处存在较大幅值。经过对实验结果的分析,得出了励磁电流的振荡是由于推力器放电过程中电磁耦合作用引起的结论^[71]。

2.2 高频振荡对电子传导的影响研究

通常认为在霍尔推力器通道以内电子传导为经典传导和近壁传导相加,在通道外面则是经典传导和 Bohm 传导相加。Hagelaar 等人运用霍尔推力器放电二维混合模型,通过调节近壁传导和 Bohm 传导的系数模拟了不同磁场位型下两种传导和系统参数之间的关系。该模型的特点是难以理解霍尔推力器系统参数对电子反常运输的影响,Hagelaar 等人验证了这些系统参数对仿真结果的影响^[72]。为了了解电子穿越磁场的传导,Lazurenko 等人首先通过电容式天线和等离子体探针研究了不同尺寸和功率的霍尔推力器内 5—10 MHz 频率的高频振荡,证实这一频段的振荡在不同尺寸和功率的推力器内都存在。研究结果显示这些振荡周向不对称并吻合以前提出的振荡是电子密度波动沿周向漂移的观点。由偏置探针得到的信号证实存在中频(MF)电子密度波动,这些中频振荡的性质符合在混合粒子模拟中表现出的离子输运时间振荡^[73]。同时进行了霍尔推力器内 1 kHz 到 30 MHz 之间的磁场振荡的测量,运用安装在加速通道周围的小电感线圈,以旋转电阻丝模拟电子电流,能够高准确率的重现观察到的高频磁场振荡,在此基础上研究磁场振荡对有效电子碰撞频率的影响^[74]。提出了电子穿越磁场的电流高频振荡模型,模型仿真结果与实验观察结果有很好的符合^[75]。

Thomas 和 Cappelli 在理论上推导了小幅值扰动对电子传导的影响规律,预测了扰动增长率与振荡频率和传播角度的关系^[76]。Knoll 则在实验上利用沿周向和轴向距离较近的三个探针研究了通道内等离子体振荡的传播方向和频率,探索等离子体振荡与电子反常运输的关系,实验结果显示在霍尔推力器出口平面 1—10MHz 频段的高频振荡在轴向上占主导地位^[77]。在数值模拟方面完成了霍尔推力器

在轴向—周向坐标平面的二维模型,这个数值模型能够再现霍尔推力器内两个主要高频振荡:一个 74 MHz 的 Kelvin-Helmholtz 型剪切振荡,一个是在实验中观察到的 7MHz 等离子体密度振荡。通过模型预测的轴向电子漂移与实验结果吻合,结果表明,在电子输运过程中等离子体振荡发挥着主导作用,特别是轴向电子速度振荡对电子输运的贡献大于经典碰撞对输运贡献的 300%^[78]。

3 霍尔推力器超高频振荡研究现状

霍尔推力器内部产生的超高频(Ultra High Frequency,简称 UHF)振荡的频率为 GHz 量级。而用于深空探测的飞行器与地面通信所采用的通讯频段在近几十年的发展中逐渐提高,从早期的 S-band(2GHz),X-band(8.4GHz),Ku-band(14GHz)到现在主要使用的 Ka-band(32 GHz)^[79-80],通信频率覆盖了 2 GHz—30 GHz 的范围。由此可见,霍尔推力器的 UHF 振荡频率与通信频段相重合,深空探测飞行器使用霍尔推力器后,霍尔推力器自身发射的 UHF 必然会以电磁波的形式干扰飞行器运行过程中所携带的电子器件与地面的正常通讯。对于近地轨道而言,因为通讯距离较近,信号较强,实践证明 UHF 干扰对卫星通讯几乎没有影响;但对于远距离飞行的深空探测来说,信号衰减较大,UHF 对飞行器通讯的干扰不容忽视,所以必须研究霍尔推力器在超高频振荡的特性,为霍尔推力器在深空探测飞行器上的使用做必要的理论储备。

但是,目前对于霍尔推力器内超高频振荡的研究出版的文献较少,仅在 20 世纪 70—90 年代俄罗斯的研究机构对霍尔推力器内的超高频振荡进行了较为全面的分析测试。1972 年,是在“火炬”实验台上首次开始进行超高频振荡的研究的。文献[81]综述了俄罗斯在超高频振荡问题上的一些主要研究成果。首先,通过实验测量了超高频振荡在推力器内部的分布特点,并对推力器内产生超高频振荡的区域进行了划分:电离区、近壁区、负梯度区和等离子体桥区,如图 3 所示,根据这四个区域刚好是不同速度电子群的产生区域,推测霍尔推力器内的超高频振荡主要是由电子分量引起的。并对各个区域产生的超高频振荡的特性进行比较,得出电离区产生的超高频振荡频率最高(10—13 GHz),近壁区次之(1—5 GHz),负梯度区和等

离子体桥区为最小(0.5–1 GHz)。

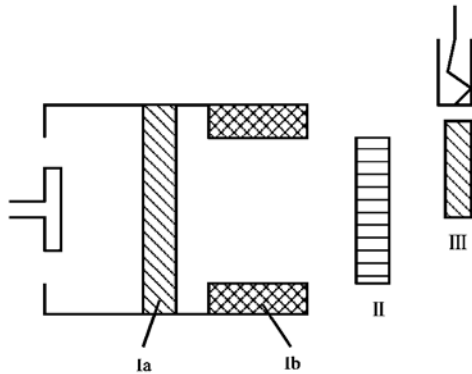


图 3 超高频振荡区域划分示意图

Fig.3 Schematic diagram of ultra high frequency oscillation producing region: Ia - ionization region; Ib - new wall region; II - negative gradient region; III - plasma bridge region

其次,对不同区域超高频幅射随推力器工况的变化情况进行了测量。并在推力器长时间的运行条件下,对超高频幅射随运行时间的变化情况进行了实验观察。除此之外,通过实验给出了超高频振荡引起的电子散射对加速通道内电子反常传导的影响^[82]。

4 结论及展望

由于霍尔推力器是依靠电磁场对等离子体的作用(主要是磁场对电子的束缚和电场对离子的加速)获得推力进行工作的,因此对于霍尔推力器,产生振荡现象是不可避免的。由于低频振荡对霍尔推力器宏观性能以及 PPU 设计的影响较为明显,因此各研究人员开始大都致力于低频振荡的研究工作,从而使得关于低频振荡的研究工作进行得最为全面。随着对低频振荡现象物理机制的认识越来越清楚,国际上一些研究人员开始转向更高频段振荡的研究工作,目前已经取得了一些研究成果。尽管如此,仍存在一些尚需进一步研究的低频振荡问题;首先,外部电路、磁场位形和低频振荡相互影响的问题。通过改变外部电路参数,观察低频振荡变化和外部电路对放电稳定的作用。改变磁场位形的情况下低频振荡如何变化,以及低频振对聚焦磁场位形是否存在破坏作用。其次,振荡模型的建立,考虑到电子温度的影响,完善现有的振荡模型,建立自治的电子温度方程,以及寻找关于振荡频率的解析表达式。第三,关于自励磁稳定性问题,目前已知自励磁模式下可

以抑制低频振荡,但是自励磁模式本身存在着电压振荡,需要研究如何减小电压振荡,抑制稳定点漂移,使得自励磁模式趋于稳定,建立自励磁模型,求得稳态条件。第四,工质对低频振荡是否存在影响,改变工质 Xe-Kr-Ar,观察低频振荡的特性是否存在不同,等等。

由于国内的霍尔推力器研究工作起步较晚,使得国内关于霍尔推力器振荡问题的研究成果明显少于国际上其他研究机构,只是近几年才出现一些比较显著的成果,并在国际及国内相关会议和刊物上发表一些关于振荡问题的文章。因此国内各研究机构应该加大对霍尔推力器研究的力度和深度,在霍尔推力器研究上取得更多的科研成果。

参考文献:

- [1] 毛根旺,韩先伟,杨涓,等.电推进研究的技术状态和发展前景[J].推进技术,2000,21(5). [MAO Gen-wang, HAN Xian-wei, YANG Juan, et al. Research state of electric propulsion and its development prospect[J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(5).]
- [2] <http://www.ippt.gov.pl/inst-a/people.cgi>
- [3] <http://www.aerospace.t.u-tokyo.ac.jp/index-e.html>
- [4] Tilinin G N. High-frequency plasma waves in a Hall Accelerator with an extended acceleration zone. Sov. Phys. Tech. Phys., 22, 1977 - 974.
- [5] Janes G S, Lowder R S. Anomalous electron diffusion and ion acceleration in a low-density plasma. Phys. Fluids, 9, 1966 - 1115.
- [6] Esipchuk Y B, Morozov A I, Tilinin G N, et al. Plasma oscillations in Closed-Drift Accelerators with an extended acceleration zone. Sov. Phys. Tech. Phys., 18, 1974 - 928.
- [7] Baranov V I, Nazarenko Y S, Petrosov V A, et al. Theory of Oscillations and Conductivity for Hall Thrusters. in Proc. 32nd AIAA Joint Propulsion Conference, Washington, D C, Lake Buena Vista, 1996 - 3192.
- [8] Fife J M, Martinez-Sanchez M and Szabo J. A numerical study of low-frequency discharge oscillations in Hall thrusters. in 33th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Seattle, WA, July 6 - 9, AIAA - 1997 - 3052.
- [9] Boeuf J P and Garrigues L. Low frequency oscillations in a stationary plasma thruster. Journal of Applied Physics, 1998, 84(7): 3541 - 3554.
- [10] Noguchi R, Martinez-Sanchez M and Ahedo E. Linear 1 - D analysis of oscillation instabilities in Hall thrusters. in 26th International Electric Propulsion Conference, 1999 - 105.
- [11] Yamamoto N, Kimiya Komurasaki N, et al. Discharge current oscillations in Hall thrusters. International Symposium on Space Technology and Science, Moriok, Japan, 2000, 22:349 - 354.

- [12] Yamamoto N, Nakagawa T, Komurasaki K, et al. Observation of plasma fluctuations in Hall accelerators. *Advances in Applied Plasma Science*, 2001, 3.
- [13] Yamamoto N, Nakagawa T, Komurasaki K, et al. Discharge plasma fluctuations in Hall thrusters. *Vacuum*, 2002, 65(3-4):375-381.
- [14] Yamamoto N, Komurasaki K and Arakawa Y. Discharge current oscillation in Hall thrusters[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2005, 21(5):870-876.
- [15] Barral S, Lapuerta V, Sancho A, et al. Numerical investigation of low-frequency longitudinal oscillations in Hall thrusters. *Proceedings of the 29th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2005-120*.
- [16] Ahedo E, Martinez A, and Martinez-Sanchez M. Steady and linearly-unsteady analysis of a Hall thruster with an internal sonic point. In *Proc. 36th AIAA Joint Propulsion Conference, Huntsville, 2000-3655*.
- [17] Molina A, Lapuerta N, and Ahedo E. Time-dependent model of the Hall thruster discharge. In *Proc. 39th AIAA Joint Propulsion Conference, Huntsville, 2003-4856*.
- [18] Barral S, Ahedo E. Theoretical study of the breathing mode in hall thrusters. *42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Sacramento, California, July 9-12, AIAA-2006-5172*.
- [19] Barral S, Ahedo E. On the origin of low frequency oscillations in Hall thrusters. *AIP Conference Proceedings*, 2008, 993(1):439-442.
- [20] Hargus W A, Meezan N B and Cappelli M A. The transient behavior of a low power laboratory xenon Hall thruster. in *33th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Seattle, WA, July 6-9, 1997*.
- [21] Damon F, Lyszyk M, and Bouchoule A. Optical investigation on plasma oscillations of SPT thrusters, in *Proc. 33rd AIAA Joint Propulsion Conference, Seattle, WA, 1997, paper AIAA-97-3051*.
- [22] Meezan N B, Hargus W A, Jr., et al.. Optical and electrostatic characterization of oscillatory Hall discharge behavior. in *34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Cleveland, OH, July 13-15, 1998*.
- [23] Schmidt D P, Meezan N B and Cappelli M A. Characterization of plasma disturbances in a Hall discharge using a double probe. in *30th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Norfolk, VA, June 28-July 1, AIAA-1999-3437*.
- [24] Damon F, Garrigues L, Boeuf J P, et al. Spontaneous oscillations in a Hall thruster. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1999, 27(1):98-99.
- [25] Garrigues L, Pot C, Gascon N, et al. Characteristics of the SPT100-ML comparisons between experiments and models. in *26th International Electric Propulsion Conference, 1999-102*.
- [26] Damon F, Lyszyk M and Bouchoule A. Optical investigation on plasma oscillations of SPT thrusters. *Proc. 33rd AIAA Joint Propulsion Conference, AIAA-1997-3051*.
- [27] Gascon N, Chesta E, Meezan N B, et al. Dispersion of low frequency waves in a Hall discharge. in *37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Salt Lake City, UT, July 8-11, AIAA-2001-3506*.
- [28] Gascon N, Meezan N B and Cappelli M A. Low frequency plasma wave dispersion and propagation in Hall thrusters. in *27th International Electric Propulsion Conference, 2001-56*.
- [29] Gascon N and Cappelli M A. Plasma instabilities in the ionization regime of a Hall thruster. in *39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Huntsville, Alabama, July 20-23, AIAA-2003-4857*.
- [30] Sydorenko D, Kaganovich I D, Raitsev Y, et al. Effects of sheath instability on properties of a Hall thruster. in *44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Hartford, CT, July 21-23, AIAA-2008-5006*.
- [31] Sydorenko D, Smolyakov A, et al. Plasma-sheath instability in Hall thrusters due to periodic modulation of the energy of secondary electrons in cyclotron motion. *Physics of Plasmas*, 2008, 15(5):053506-7.
- [32] Barral S. Theoretical analysis of the influence of the power supply on breathing oscillations in hall thruster. *Proceedings of the 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, September 17-20, 2007*.
- [33] YU Da-ren, WEI Li-qiu, ZHAO Zuo-yang, et al. Effect of preionization in Aton-type Hall thruster on low frequency oscillation. *Physics of Plasmas*, 2008, 15:043502.
- [34] YU Da-ren, WEI Li-qiu, GAO Chao, et al. On the frequency characteristic of inductor in the filter of Hall thrusters. *Submitted to Plasma Sources Sci, Technol*.
- [35] Yasui S, Kumakura K, Yamamoto N, et al. Function of a hollow anode for an anode layer type Hall Thruster. in *39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Huntsville, Alabama, July 20-23, AIAA-2003-4702*.
- [36] Yamamoto N, Nakagawa T, Komurasaki K, et al. Effect of discharge oscillations on Hall thruster performance. *International Symposium on Space Technology and Science, 2002-b-17*.
- [37] Yamamoto N, Nakagawa T, Komurasaki K, et al. Extending stable operation range in Hall thrusters. in *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit Indianapolis, Indiana, July 7-10, AIAA-2002-3953*.
- [38] Yamamoto N, Komurasaki K, Arakawa Y. Condition of stable operation in a Hall thruster. *IEPC, 2003:03-086*.
- [39] Yamamoto N, Komurasaki K, Arakawa Y. A suppression method of discharge current oscillations in a Hall thruster. in *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, Florida, July 11-14, 2004*.
- [40] Yamamoto N, Komurasaki K and Arakawa Y. Discharge current oscillation in Hall thrusters. *Journal of Propulsion and Power*, 2005, 21(5):870-876.

- [41] Yamamoto N, Yokota S, et al. Suppression of discharge current oscillations in a Hall thruster. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2005, 48(161):169 – 174.
- [42] Fukushima Y, Yokota S, Komurasaki K, et al. Oscillation reduction of an anode-layer-type Hall thruster by azimuthal propellant nonuniformity. in 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Hartford, CT, July 21 – 23, 2008 – 5187.
- [43] Tamida T, Nakagawa T, Suga I, et al. Determining parameter sets for low-frequency-oscillation-free operation of Hall thruster[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102:043304.
- [44] Lobbia R B and Gallimore A D. Evaluation and active control of clustered Hall thruster discharge oscillations. in 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Tucson, Arizona, July 10 – 13, AIAA – 2005 – 3679.
- [45] Albar e L, Bouchoule A, Lazurenko A, et al. Characteristics of PPS – 1350 type thrusters under increased discharge voltages and comparison with hybrid codes simulation results. in 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, October 31 – November 4, 2005 – 136.
- [46] Vial V, Lazurenko A, Bouchoule A, et al. PPS – 1350G in an extended operation domain: comparison between experimental and simulation results. In 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, Florida, July 11 – 14, AIAA – 2004 – 3607.
- [47] Barral S, Miedzik J. A model for the active control of low frequency oscillations in Hall thrusters. in 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Hartford, CT, July 21 – 23, AIAA – 2008 – 4632.
- [48] YU Da-ren, WANG Chun-sheng, WEI Li-qiu, et al. Stabilizing of low frequency oscillation in Hall thruster. *Physics of Plasmas*, 2008, 15:113503.
- [49] Есипчук Ю В, Морозов А И, Тилинин Г Н и т. д. Основные свойства плазменных колебаний в Ускорителе с замкнутым дрейфом и протяженной зоной ускорения (УЗДП). *Журнал Технической Физики*, 1973, 16(7):533 – 951.
- [50] Morozov A I, Esipchuk V, Kapulkin A M. Effect of the Magnetic Field on a closed-electron-drift accelerator. *Sov. Phys. Tech. Phys.* 17, 482 – 1972.
- [51] Garrigues L, Heron A, Adam J C. Hybrid and particle-in-cell models of a stationary plasma thruster. *Plasma Sources Science and Technology*. 2000, 9(2):219 – 226.
- [52] Barral S, Peradzynski Z, Makowski K. An alternative theory of transit-time oscillations in Hall Thrusters. In 28th International Electric Propulsion Conference, 2003:17 – 21.
- [53] Touzeau M, Prioul M, Roche S, et al. Plasma diagnostic systems for Hall-effect plasma thrusters. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2000, 42:323 – 339.
- [54] Litvak A A, Raitses Y and Fisch N J. Experimental studies of high-frequency oscillations in Hall thrusters. in 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Indianapolis, Indiana, July 7 – 10, AIAA – 2002 – 3825.
- [55] Litvak A A, Raitses Y and Fisch N J. High-frequency probing diagnostic for Hall current plasma thrusters. *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73(8): 2882 – 2885.
- [56] Litvak A A, Raitses Y and Fisch N J. Experimental studies of high-frequency azimuthal waves in Hall thrusters. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(4):1701 – 1705.
- [57] Litvak A A and Fisch N J. Rayleigh instability in Hall thrusters. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(4):1379 – 1383.
- [58] Litvak A A and Fisch N J. Resistive instabilities in Hall current plasma discharge. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(2):648 – 651.
- [59] Lazurenko A, Vial V, Bouchoule A, et al. Characterization of Micro-instabilities in Hall Thrusters Plasma: Experimental and Pic Code Simulation Results. *Physical Interpretation and Impact on Transverse Electron Transport*, in 28th International Electric Propulsion Conference, IEPC – 2003 – 0218.
- [60] Lazurenko A, Vial V and Bouchoule A. High-Frequency Instabilities and Low – Frequency Dynamics in Hall Thruster Plasma. in 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Fort Lauderdale, Florida, July 11 – 14, AIAA – 2004 – 3772.
- [61] Lazurenko A, Albarde L, and Bouchoule A. High-frequency Instabilities in Hall-Effect Thrusters: Correlation with the Discharge current and Thruster scale Impact. in 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, October 31 – November 4, 2005 – 142.
- [62] Lazurenko A, Vial V, Prioul V, et al. Experimental investigation of high – frequency drifting perturbations in Hall thrusters. *Physics of Plasmas*, 2005, 12(1):013501.
- [63] Lazurenko A, Coduti G, Mazouffre S, et al. Dispersion relation of high – frequency plasma oscillations in Hall thrusters. *Physics of Plasmas*, 2008, 15(3):034502.
- [64] Kurzyna F, Mazouffre S, Bornomme G, et al. Spectral analysis of Hall-effect thruster plasma oscillations based on the empirical mode decomposition. *Physics of Plasmas*, 2005, 12(12):123506.
- [65] Kurzyna J, Makowski K, Lazurenko A, et al. Search for the frequency content of Hall effect thruster HF electrostatic wave with the Hilbert-Huang method. *AIP Conference Proceedings AIP Conference Proceedings*. 2006(812):411 – 14.
- [66] Kurzyna J, Makowski K, Peradzynski Z, et al. Where is the breathing mode: High voltage Hall effect thruster studies with EMD method. *AIP Conference Proceedings*, 2008, 993:443.
- [67] Barral S, Makowski K, Peradzynski Z, et al. Longitudinal oscillations in Hall Thrusters. in 4th International Spacecraft Propulsion Conference, Cagliari, Sardinia, Italy, June 2 – 4, 2004 – 555E – 12B.
- [68] Barral S, Makowski K, Peradzynski Z, et al. Transit-time instability in Hall thrusters. *Physics of Plasmas*, 2005, 12: 073504.
- [69] Морозов А И, Невровский В А, Смирнов В А. Исследование вынужденных колебаний потенциала плазмы в Ускорителе с

- замкнутым дрейфом электронов (УЗДП). Журнал Технической Физики, 1999, 16(3):533–9–07.
- [70] Bugrova A I, Lipatov A S, Morozov A I, et al. Membrane oscillations in the channel of a steady-state plasma thruster. Technical Physics letters. 1999, 25(6).
- [71] YU Da-ren, WEI Li-qiu, DING Yong-jie, et al. Xperimental study on the physical mechanism of coupling oscillation: a newly discovered oscillation in Hall thrusters. Plasma Sources Sci, 2007; 757–764.
- [72] M. Hagelaar G J, Bareilles J, Garrigues L, et al. Role of anomalous electron transport in a stationary plasma thruster simulation[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(1):67–75.
- [73] Lazurenko A, Albarde A and Bouchoule A. Physical characterization of high-frequency instabilities in hall thrusters. Physics of Plasmas, 2006, 13(8):083503.
- [74] Coduti G, Lazurenko A, Mazouffre S, et al. Investigation of electron transport properties in Hall thrusters through measurements of magnetic field fluctuations. in 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, September 17–20, 2007–143.
- [75] Lazurenko A, Wit T D, Cavoit C, et al. Determination of the electron anomalous mobility through measurements of turbulent magnetic field in Hall thrusters. Physics of Plasmas, 2007, 14(3):033504.
- [76] Thomas C A and Cappelli M A. Fluctuation-induced transport in the Hall plasma accelerator. in 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Sacramento, California, July 9–12, AIAA–2006–5168.
- [77] Knoll A, Thomas C, Gascon N, et al. Experimental investigation of high frequency plasma oscillations within Hall thrusters. in 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Sacramento, California, July 9–12, AIAA–2006–5174.
- [78] Knoll A, Gascon N and Cappelli M. Numerical simulation of high frequency wave coupling within a hall thruster. in 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cincinnati, OH, July 8–11, AIAA–2007–5266.
- [79] Hemmati H, Wilson K, Sue M K, et al. Comparative study of optical and radio–frequency communication systems for a deep–space mission. TDA Progress Report 42–128, February 15, 1997.
- [80] Smith J G. Ka-band (32–GHz) downlink capability for deep space communications. The Telecommunications and Data Acquisition Report, 1987:96–103.
- [81] Кирдяшев К П, Морозов А И. СВЧ–Колебания как индикатор процессов в канале стационарного плазменного двигателя (СПД). Физика Плазма, 1999, 25(4):326–332.
- [82] Kiryashev K P, Bugrova A I, Morozov A I, et al. Microwave oscillations in the acceleration channel of SPK-ATON stationary plasma thruster. Technical Physics Letters. 2005, 31(7):584–587.

作者简介:江滨浩(1959–),男,博士,研究方向为电推进。
通信地址:哈尔滨工业大学 402 信箱(150008)
电话:13644613619
E-mail:jiangbh@hit.edu.cn

Overview of Researches on Oscillations in Hall Thrusters

JIANG Bin-hao, ZHAO Yi-nan, WEI Li-qiu, WANG Chun-sheng, YU Da-ren
(Harbin Institute of Technology, Mail Box 402, Harbin 150008, China)

Abstract: Since Hall thrusters' application in 1971 in the former Soviet Union, Hall thrusters due to their high performance are now considered as one of the preferred candidates for satellite orbit keeping and transferring. The instabilities of discharge plasma ranges from kHz to GHz including many kinds of physical phenomena and playing a major role in the process of ionization, diffusion and acceleration of particles are usually the hotspot issues. The research results about oscillations in Hall thrusters are over-viewed in this paper. Based on our knowledge and investigation, some problems which still need to be resolved have been proposed. All of these are useful for the further research about oscillation in Hall thrusters.

Key words: Plasma oscillation; Hall thrusters