

# 空心阴极放电振荡的频谱分析试验

冯 杰, 赵 勇, 王尚民, 刘 超, 岳士超, 贾艳辉

(兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 目前针对空心阴极的大批次组件级性能测试多采用金属阳极结构, 与空心阴极实际工作时采用正离子束流作为阳极的情况存在差异。为验证分别以金属电极和正离子束流作为阳极时空心阴极放电特性的差别, 设计对比试验, 分别对两种情况下的空心阴极的放电特性、振荡特性以及频率特性进行了分析。试验结果及 FFT 分析表明采用正离子束作为阳极时, 阴极在 2 ~ 12 MHz 之间将会出现多个相关的频率分量; 采用金属阳极时, 空心阴极放电稳定性与供气流量密切相关; 当供气流量大于羽状模式转换阈值时, FFT 分析未发现相关频谱分量, 当供气流量小于转换阈值时, 放电电压将在 17 MHz 处出现振荡分量, 增大供气流量可有效的消除该分量。研究结果为空心阴极的筛选试验改进提供了理论依据。

**关键词:** 空心阴极; 放电振荡; 频谱分析; FFT

**中图分类号:** TG146.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-9374(2021)03-0083-07

## Experimental study of spectrum analysis on discharge oscillation for hollow cathode

FENG Jie, ZHAO Yong, WANG Shangmin, LIU Chao, YUE Shichao, JIA Yanhui

(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory,  
Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** At present, the large-batch module-level performance test for hollow cathodes mostly adopts metal anode structure, which is different from the situation that the hollow cathode uses positive ion beam as the anode in actual work. In order to verify the difference in the discharge characteristics of the hollow cathode when the metal electrode and the positive ion beam are used as the anode, a comparative experiment was designed, and the discharge characteristics, oscillation characteristics and frequency characteristics of the hollow cathode were analyzed in two cases. The test results and FFT analysis show that when the positive ion beam was used as the anode, the cathode will have multiple relevant frequency components between 2 MHz and 12 MHz; when the metal anode was used, the discharge stability of the hollow cathode is closely related to the gas flow. When the air flow is greater than the plume mode switching threshold, FFT analysis does not find the relevant spectral components. When the air supply flow is less than the switching threshold, the discharge voltage will have an oscillating component at 17 MHz. In-

收稿日期: 2020-09-06; 修回日期: 2020-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(12005087); 国家自然科学基金青年科学基金(11702123)

作者简介: 冯杰(1988—), 男, 硕士, 研究领域为空间电推进。

ing the air supply flow can effectively eliminate this component. The research results provide a theoretical basis for the improvement of the hollow cathode screening test.

**Keywords:** hollow cathode; discharge oscillation; spectrum analysis; FFT

## 0 引言

空心阴极是一种高效的电子源,由于克服了金属丝状阴极存在的寿命短的缺点,且其具有可以在较低的电压下发射较大的电流的优点,因此被广泛应用于离子推力器、霍尔推力器等多种静电型推力器中<sup>[1-4]</sup>。但被用作不同用途时,空心阴极所处的环境也不相同。如空心阴极作离子推力器主阴极时,放电室内的锥形或圆筒形金属电极充当了阳极,此时背景气氛中同时外加了环尖或会切磁场。空心阴极做离子推力器中和器时,空心阴极发射电子电流,用以中和呈正电性的离子束流,此时由离子束流充当阳极。再如当空心阴极充当霍尔推力器的放电阴极时,它同时起到了放电主阴极和中和器的角色,推力器尚未引出束流时,阴极发射的电子进入放电通道作为原初电子诱发放电,此时的阳极为霍尔推力器底部金属电极。一旦当放电腔内成功建立了放电过程并引出束流后,就由霍尔推力器的束流充当阳极,此时由束流引出空心阴极内部的电子电流,并起到束流中正离子的效果。因此,以阳极状态来区分,空心阴极有两种典型工作状态,一是由金属电极作为阳极的情况,该情况多见于主阴极模式。第二种是由推力器喷出的离子束流作阳极,该情况多见于中和器模式<sup>[5]</sup>。

通常,在对阴极进行大批次的组件级筛选试验时,出于试验成本及方便性考虑,基本都采用金属阳极结构,如美国于1990年基于SERT II型推力器结构加工了钨材质阳极,以此作为工装对放电阴极开展了5 000 h的长寿命考核<sup>[6]</sup>。美国2009年针对XIPS-25放电阴极进行的寿命考核虽然采用了结构复杂的放电室模拟器方案,加入了磁场环境,但依然采用金属阳极。金属阳极结构的优点在于可以准确、便捷的获得阴极关键放电参数。但这种考核方式忽略了等离子体环境可能带来的振荡作用。

根据国内外研究结果,推力器本身存在多种类型的振荡,如从试验上观测的霍尔推力器的电离振荡(10~100 kHz)、轴向等离子体输运振荡(100~

1 000 kHz)、电子回旋振荡(10 MHz附近)、Langmuire振荡(1 000 MHz)等多种振荡。一些仿真工作也证实了振荡的存在,如NASA开发的1D仿真代码成功预测了称为“呼吸模式”或“狩猎-捕捉模式”的频率为16 kHz左右的振荡<sup>[7-10]</sup>。仿真与实验值的数值出入来自于工质供气流量、放电电流的不同。

空心阴极自身同样也存在不同类型的振荡<sup>[11-15]</sup>。典型的有:

1) 50~1 000 kHz之间的等离子体放电振荡。

2) 放电回路调制振荡。这种情况常见于当空心阴极从点模式进入到羽流模式时,对应电压振荡也会从点模式下的几伏特升高至羽流模式下的十几伏特,此时如果电压振荡足够大,则会引起电源的调制困难,最终导致回路中出现分布在100~1 000 Hz之间的放电振荡。

3) “predator-prey(捕食者-猎物模式)”的分布在50~250 kHz之间的放电振荡。当放电电流增大时,空心阴极羽流区中的电离比率将对应增大,并导致电离不稳定性,该情况下等离子体放电会消耗掉大部分中性气体并引起相应的振荡,大部分时候这种振荡的频率范围都在50~250 kHz之间。具体数值则与放电空间的几何尺寸及具体元器件尺寸相关。这种电离不稳定性在试验中最易观测到,如一些研究中利用探针观测离子饱和电流时就监测到了这种振荡<sup>[16]</sup>,一般来说,这种振荡可以通过合适的选择供气流量或在阴极羽流区中施加合适方向的磁场来避免。

以上提及的不同类型振荡,如空心阴极在羽流模式下的电路调制振荡或推力器的放电振荡,在实际工作中会通过“离子束流-阴极羽流”间的相互作用发生耦合,并对推力器或阴极的关键部位组件或放电陶瓷腔起到加速腐蚀的负面效果<sup>[17-18]</sup>,极大的降低推力器、阴极的工作寿命。而当采用前述的金属阳极结构进行性能考核时,这种由于气体放电带来的振荡作用就被忽略了。

目前国内外大部分关于空心阴极的研究均集

中在其电流-电压特性研究或是长寿命性能的考核,较少有针对不同类型阳极对阴极放电特性的影响。因此,有必要深入分析阳极板结构和与离子束流作为阳极时的异同,并确认其引起振荡的主要频率分量,以在设计放电回路时避开这些可能导致电源发生谐振的频率分量。

## 1 试验装置及产品

试验装置及产品包括推力器、真空舱、PPU 及供气管路。真空舱体积  $1.5 \text{ m}^3$ , 设备由两台分子泵维持真空, 工作真空度在  $10^{-3} \text{ Pa}$  量级。PPU (电源处理单元) 为自研产品, 放电电压、电压振荡、电流、电流振荡则使用 ROHDE&SCHWARZ RTE 1034 型示波器进行监控。由于 PPU 遥测值、示波器电信号波形图均为由多种放电效应叠加后得到的时域信号, 无法从中分析得知导致放电回路不稳定性存在的原因, 因此使用示波器的数学运算功能, 将试验过程中获取的时域图实时转为 FFT 变换后的频谱图, 从而方便对结果进行准确分析。试验系统装置如图 1 所示。

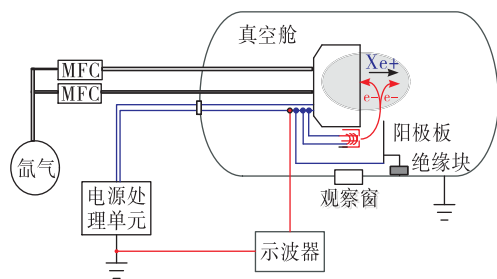


图 1 真空试验系统装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the hollow cathode test facility

试验分 2 种情况进行:

1) 使用直径为 10 cm 的钼制圆形金属板作为阳极, 阴极前端面与阳极间距离 5 cm。

2) 使用推力器离子束流作为虚拟阳极, 推力器的口径为 10 cm, 阴极前端面距离推力器中轴线位置 5 cm。试验中采用同一支阴极, 采用推力器喷出离子束作为虚拟阳极时, 阴极前方不悬挂阳极板。

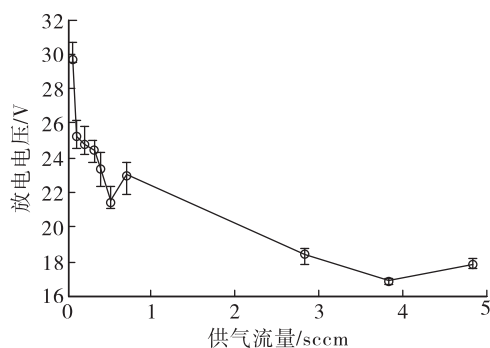
在 2 种情况下进行试验时采用的整体流程相似, 首先将阳极电流设为 0.8 A 固定点, 其次由小至大 (0 ~ 5 sccm) 变化供气流量并监测其放电电压和放电峰峰值, 特别注意阴极达到羽状工作模式时的

流率阈值。同时, 采用示波器实时对不同工作点下的放电波形时域图进行频谱变化获得对应的 FFT 分析结果。试验当中对每个工况点进行 3 次测量, 取其平均值进行折线图的绘制。

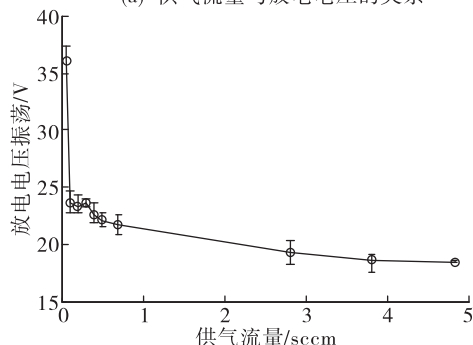
## 2 试验及结果分析

### 2.1 金属阳极试验结果

首先采用阳极板结构进行试验, 在将阳极电流设为 0.8 A 固定点后, 由小至大变化供气流量并监测其放电电压和放电峰峰值, 具体结果如图 2 所示。



(a) 供气流量与放电电压的关系



(b) 供气流量与放电电压峰峰值的关系

图 2 放电参数与供气流量之间的关系 (金属阳极)

Fig. 2 Relationship between discharge parameters and gas flow (metal anode)

从图 2 中容易看出, 空心阴极放电电压、放电电压峰峰值与供气流量之间均呈现明显的负相关关系, 即供气流量越大, 放电电压越低。同时, 当空心阴极供气流量小至某阈值以下时, 空心阴极的放电振荡会突然加剧, 引起电源调制困难, 本试验中该阈值为 0.1 sccm。这是由于供气流量较大时, 阴极工作在较稳定的点模式下, 当供气流量增大时, 阴极则会对进入工作不稳定的羽状模式。羽状模式下放电电压的明显升高是由于供气流量过小, 气

体工质无法提供充足的离子轰击发射体表面以维持阴极本身自持放电,这时 PPU 为继续保证额定量的电子电流发射,就会提升输出电压,电压值由提升至 30 V 以上,电源输出功率提升、空心阴极电子发射效率下降。

为进一步分析造成振荡发生的原因,分别对 4、2、0.1 sccm 3 种不同的供气流量下的放电电压信号进行 FFT 变化,得出对应频域结果,具体如图 3 所示。

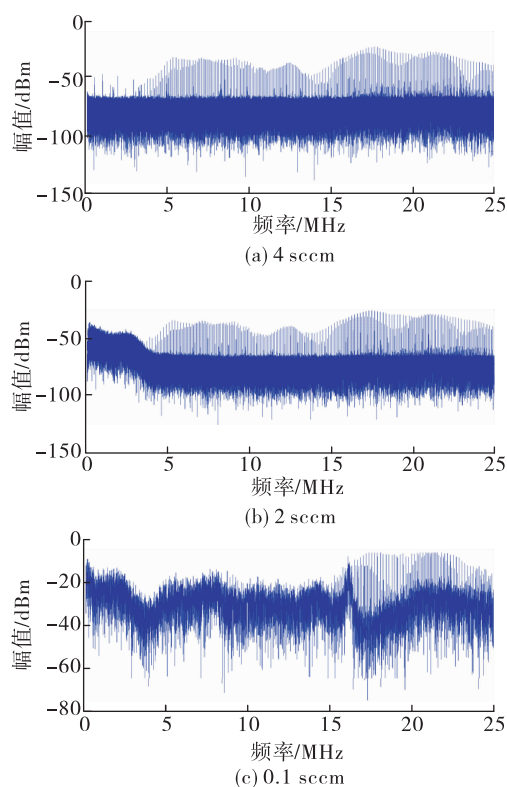


图 3 不同供气流量下放电电压的 FFT 分析结果(金属阳极)

Fig. 3 FFT analysis results of discharge voltage under different gas supply flow (metal anode)

图 3 供气流量依次减小,可以看出,当供气流量分别为 4 sccm 和 2 sccm 时,放电电压信号的 FFT 分析结果无任何分量,阴极工作相对稳定,两者的背景噪声可被认为是白噪声,这与图 2 中的结果相符合。这是因为当供气流量为 4 sccm 和 2 sccm 时,空心阴极工作在点状模式下,放电回路工作稳定,电路中无明显振荡。

其次,将空心阴极的供气流量降至 0.1 sccm 时,空心阴极进入羽状工作模式,此时从 FFT 分析

结果可看出,放电电压工作频域图上出现了 8 MHz、16 MHz 两个峰值。这是因为此时阴极已经进入了羽状模式,此时阴极实际上是在较小的供气流量下提供较大的放电电流,同时空心阴极羽流区中的电离比率将对应增大,并导致电离不稳定。这种阴极自身的振荡被耦合至放电回路中,最终出现了 8 MHz、16 MHz 对应的振荡分量。

因此,采用金属阳极结构时,仅当空心阴极工作在不稳定的羽状模式下时,电路中才会出现较为明显的振荡分量。

## 2.2 虚拟阳极试验结果

为了与金属阳极的情况进行对比,按照同样的方式由小至大调整空心阴极供气流量,同样将离子束流大小设为固定点 0.8 A。试验结果如图 4 所示。

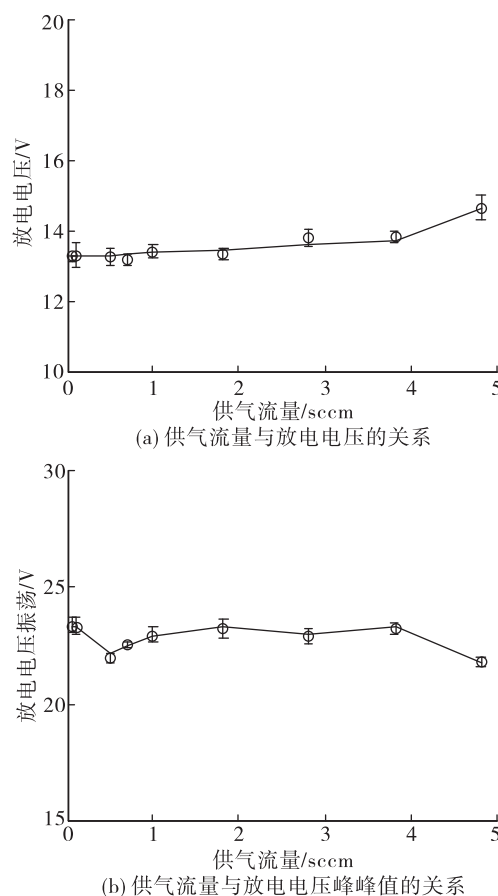


图 4 放电参数与供气流量之间的关系(虚拟阳极)

Fig. 4 Relationship between discharge parameters and gas flow (virtual anode)

从图 4 中可以看出,以离子束流作为阳极时,阴极放电电压、放电电压振荡与供气流量之间的关系与采用金属阳极时并不相同。

采用金属阳极时,阴极的放电电压、放电电压振荡与供气流量之间均呈现为负相关关系,即随着供气流量的增大,放电电压明显下降。但使用离子束流作阳极时,随着供气流量的增大,阴极放电电压出现了轻微的上升,两者间呈正相关关系。与此同时,对应的放电电压振荡值几乎没有变化。

这是因为使用金属板作阳极时,放电区域中的工质气体都来自于空心阴极内部,阴极的放电电压,也就是阴极接地端和阳极板之间的电位差由空心阴极内部发射体至触持极的压降以及触持极至阳极板之间的压降两部分加和而成。其中,前一部分占据了压降的主要部分,此时当供气流量增大时,阴极内部气压升高,由于阴极内部温度恒定,因此阴极内部可用于参与气体放电的工质气体原子数明显上升。这样,就无需外部电场提供额外的功率以维持额定点工作电流的输出。

但是采用推力器束流作为阳极时,一旦阴极发射出的电子电流发生变化,从束流中就会出现对应数量的离子予以补充,对于阴极而言,发射电子电流和收集离子电流在仪器上的读数实际上无法区分。阴极放电电压随着供气流量的轻微上升使本来稳定的离子束流空间电位在更多气体注入后发生了轻微的上升,这样就会从阴极内部引出额外的电子电流,为保证空心阴极的自持稳定性,阴极的放电电压就会轻微上升,以提供额外的放电功率。

类似于阳极板的情况,采用推力器束流作为阳极时,同样变化了 3 种不同的供气流量,4.0、2.0 和 0.1 sccm,并对比不同流量下放电电压信号的 FFT 分析结果,具体如图 5 所示。

从图 5 可以看出不同供气流量下空心阴极的放电频域基本上没有明显变化。采用供气流量为 4.0、2.0 sccm 时,空心阴极处于点状工作模式,工作相对稳定,但不同于采用金属阳极时的情况,频域信号已在 2.8 MHz 处和 15 MHz 处出现了较为明显的尖峰,这两处尖峰是离子声速振荡和离子在磁场

约束下的运动引起。在图 5(c)中,将供气流量降为 0.1 sccm 时,FFT 峰值出现在 11.2 MHz 处。频率分量不同于采用金属阳极结构时,这是因为两者的工作模式不同,采用金属阳极时,电路中收集的电流全部来自于阴极发射的电子电流,因此回路中对应的振荡分量也是来源于由电子电流构成的阴极羽流区的放电不稳定性。而采用离子束流作为阳极时,空心阴极不但对外发射电子电流,同时会收集来自于离子推力器束流中的呈正电性的离子,因此两种情况下,两者的实际工作背景气氛不同,这就导致了采用虚阳极时,放电回路的振荡分量包含了来自于离子振荡的分量。

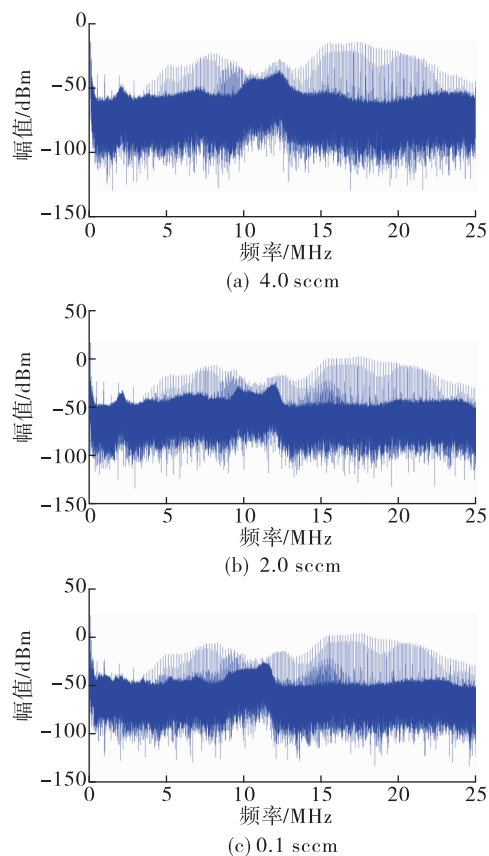


图 5 不同供气流量下放电电压的 FFT 结果(虚拟阳极)

Fig. 5 FFT analysis results of discharge voltage under different gas supply flow( virtual anode)

### 2.3 金属阳极、虚拟阳极振荡分量结果对比

为进一步分析采用金属阳极以及虚拟阳极的区别,取空心阴极放电电流为 0.8 A 时的情况进行



对比,并绘制对应直方图,结果如图 6 所示。

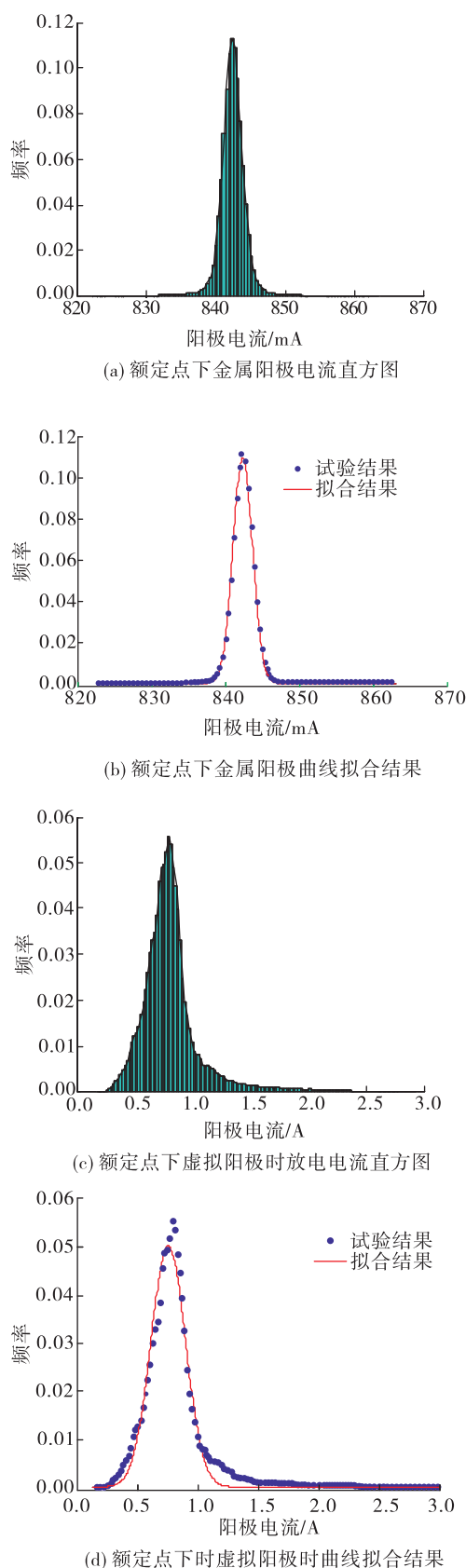


图 6 额定点下金属、虚拟阳极放电电流特性对比

Fig. 6 Comparison of metal anode and virtual anode

对比图 6(a) 和图 6(c) 发现,使用金属阳极时,电流分布在 820 ~ 860 mA 的范围内,放电振荡为 0.04 A。在同一额定点下使用虚拟负载时,电流分布则扩展到 0.2 ~ 3.0 A 范围内,放电振荡为 2.8 A。也即对同一台 PPU(电源处理单元)使用稳压模式工作在同一额定点下输出同等大小电流时,使用虚拟阳极将带来比金属阳极剧烈得多的电流振荡。

同时,分别针对图 6(a) 和图 6(c) 所示的直方图利用高斯函数进行拟合得图 6(b) 和图 6(d)。两者拟合的模型均为  $f(x) = a_1 e^{\frac{-(x-b_1)^2}{c_1}}$ 。容易

看出,采用金属阳极时得到的拟合曲线,也就是图中红色实线部分与散点符合的很好,可以认为采用金属阳极时得到的背景噪声信号为高斯白噪声信号,也就是采用金属阳极时放电回路中不会产生除正常背景噪声之外的其他类型干扰信号。而图 6(d) 中针对虚拟阳极在同一工作点下拟合的曲线,却在当电流过大或过小时偏离标准曲线较多,这说明实际的虚拟阳极的感性和容性部分为对电流的影响较大,其背景噪声信号明显不能等效于高斯白噪声。在筛选试验中也无法采用金属阳极完全等效实际的虚拟阳极情况。

### 3 结论

1) 空心阴极在采用两种不同类型阳极工作时,基本放电特性存在不同,采用阳极板时为负阻、采用虚拟阳极时为正阻性。

2) 采用虚拟阳极工作时,即使将空心阴极供气流量调整为 0,空心阴极也不会进入到羽流模式。采用金属阳极工作时则不同,空心阴极存在一明确的转变阈值点。

3) 空心阴极采用两种不同类型的阳极进行工作时,在空心阴极不供气时的特性完全不同:采用阳极板时无电流输出,无任何其它振荡分量;采用以离子束流的虚拟阳极时依然有电流输出,且存在明显更大的振荡分量。

#### 参考文献:

[1] MIKELLIDES I G, KATZ I, GOEBEL D. Partially-ionized

- gas and associated wear in electron sources for ion propulsion, II: discharge hollow Cathode [C]// 43rd Joint Propulsion Conference. Cincinnati, Ohio; AIAA, 2007.
- [2] KATZ I, MIKELLIDES I, GOEBEL D, et al. Production of high energy ions near an ion thruster discharge hollow cathode [C]// 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Sacramento, California. Reston, Virginia; AIAA, 2006.
- [3] GOEBEL D M, JAMESON K, KATZ I. Plasma potential behavior and plume mode transitions in hollow cathode discharge [C]// 30<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference. Florence, Italy; IEPC, 2007.
- [4] MIKELLIDES I G, KATZ I, GOEBEL D M. Numerical simulation of the hollow cathode discharge plasma dynamics [C]// 29th International Electric Propulsion Conference. Princeton University. Princeton, New Jersey; IEPC, 2005.
- [5] GOEBEL D M, JAMESON K, KATZ I. Energetic ion production and keeper erosion in hollow cathode discharges [C]// 29th International Electric Propulsion Conference. Princeton University. Princeton, New Jersey; IEPC, 2005.
- [6] KERSLAKE W. SERT II-Durability of the hollow cathode and future applications of hollow cathodes [C]// 7th Electric Propulsion Conference. Williamsburg, VA, USA. Reston, Virginia; AIAA, 1969.
- [7] KATZ I, MIKELLIDES I G, GOEBEL D M. Model of the plasma potential distribution in the plume of a hollow cathode [C]// 40th Joint Propulsion Conference. Ft Lauderdale, Florida; AIAA, 2004.
- [8] MIKELLIDES I G, KATZ I, GOEBEL D M. Towards the identification of the keeper erosion mechanisms; 2-D theoretical model of the hollow cathode [C]// 42nd Joint Propulsion Conference. Sacramento, California; AIAA, 2006.
- [9] BOYD I D, CROFTON M W. Modeling the plasma plume of a hollow cathode [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95 (7): 3285-3296.
- [10] MIKELLIDES I G, KATZ I, GOEBEL D M. Numerical simulation of the hollow cathode discharge plasma dynamics [C]// Proceedings of the International Electric Propulsion Conference. [S. l.]; IEPC, 2005.
- [11] 谢侃, 张天平, 武志文, 等. 离子发动机放电阴极的溅射腐蚀机理研究综述 [J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34 (5): 461-468.
- [12] 胡俊锋, 刘辉, 李建置, 等. 会切磁场推力器低频振荡特性 [J]. 中国空间科学技术, 2016, 36 (1): 26-34.
- [13] 江滨浩, 赵一男, 魏立秋, 等. 霍尔推力器振荡问题的研究综述 [J]. 宇航学报, 2009, 30 (6): 2062-2071.
- [14] 杨晶晶. 磁场对霍尔推力器低频振荡的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [15] GOEBEL D M, JAMESON K K, KATZ I, et al. Potential fluctuations and energetic ion production in hollow cathode discharges [J]. Physics of Plasmas, 2007, 14 (10): 103508.
- [16] 贾艳辉, 张天平. 空间用六硼化钨空心阴极最新研究进展及发展趋势 [J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36 (6): 690-698.
- [17] 张天平. 兰州空间技术物理研究所电推进新进展 [J]. 火箭推进, 2015, 41 (2): 7-12.  
ZHANG T P. New progress of electric propulsion technology in LIP [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41 (2): 7-12.
- [18] 郭宁, 顾佐, 邱家稳. 空心阴极在空间技术中的应用 [J]. 真空, 2005, 42 (5): 32-35.