

离子推力器放电室参数在线优化实验研究*

孔令轩, 顾 左, 吴宸宸, 郭 宁, 王 蒙, 郭德洲

(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: 为了改进氙离子推力器传统优化实验方法, 针对环切场放电室设计多维优化调节机构, 通过步进电机配合电磁铁实现放电室设计参数的在线实时调节。实验中在线调节放电室长径比、中间磁极靴位置、阴极顶位置等参数, 得到了放电室性能影响规律, 经迭代实验获取了优化后的放电室构型及磁场参数。优化后的推力器性能曲线“膝点”校正交实验结果更加靠后, 在工质利用率80%~90%区间内, 束离子电离能耗低于正交实验优化结果。在线优化实验方法极大缩短了离子推力器设计周期, 降低研制成本, 并弥补了传统方法需多次破空导致参数一致性差的不足。

关键词: 离子推力器; 放电室; 在线调节; 步进电机; 多维优化

中图分类号: V439*.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2018) 03-0709-06

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2018.03.027

On-Line Adjustments Based Optimization of Discharge Chamber Parameters on Ion Thruster

KONG Ling-xuan, GU Zuo, WU Chen-chen, GUO Ning, WANG Meng, GUO De-zhou

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

Abstract: In order to ameliorate the xenon ion thruster optimization method, multi-parameter optimization setup was designed based on ring-cusp xenon ion thruster and on-line adjustments of design parameters of discharge chamber were realized through stepping motors and electromagnet. Aspect ratio, intermediate magnet pole position, main cathode position, etc were regulated while effects of parameters on discharge performance were concluded. Optimized configuration and magnetic field were obtained after iterative experiments. Comparisons have demonstrated that performance curve knee point of on-line adjustments is rearward than that of orthogonal experiments, and discharge cost is lower as well in propellant utilization efficiency range of 80%~90%. On-line adjustments based optimization method greatly shortens the ion thrusters' design cycles, reduces development costs, and eliminates the defects of poor parameters consistency caused by breaking vacuum in traditional methods.

Key words: Ion thruster; Discharge chamber; On-line adjustments; Stepping motor; Multi-parameter optimization

1 引 言

放电室是Kaufman型离子推力器核心部件, 其为等离子体提供产生区域, 金属壁面在放电中充当阳

极, 放电室磁场分布约束电子的运动直接影响到工质的电离效率和束流均匀性。放电室性能优化是指在保证较高的工质利用率情况下通过调节放电室构型参数、电磁参数及工质流量, 尽量降低束离子产生

* 收稿日期: 2016-09-07; 修订日期: 2016-12-07。

基金项目: 重点实验室基金项目(9140C550206150C55013)。

作者简介: 孔令轩, 男, 博士生, 研究领域为宇航推进技术。E-mail: lxxkong@foxmail.com

通讯作者: 顾 左, 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究领域为空间电推进技术。E-mail: guuzuu@sohu.com

成本。

对放电室多个设计参数采用正交实验进行优化时,将一个参数选定最优值后固定,进一步对其他参数进行调节。该过程实验繁多,在改变参数时,需多次破空,阴极等主要部件暴露,原初电子发射能力降低,导致参数一致性较差,另外该方法忽略了推力器放电室各设计参数之间的耦合关系。兰州空间技术物理研究所在 LIPS-200 型号研制过程中,针对放电室几何构型和磁场位形进行正交优化实验,选用了七种可变因素,其中磁感应强度选用了六个位级,其余选用了三个位级,组成了(6¹×3⁶)正交表实验,工作量大,周期长,成本高。

随着设计经验的积累,设计者根据目标推力器比冲给定放电室构型、磁场,进舱实验对电参数、流量参数进行微调,这种方法虽节省了工作量,但不能保证能够得到放电室的最优化设计。日本 NAL^[1]在对 35cm 离子推力器优化过程中,加工了 LM-1, LM-2 等多套实验样机,最终研制得到性能大幅提高的 BBM-1 推力器,然而在样机改进过程中,改变因素诸多,甚至包括栅极系统的安装方式;NSTAR 推力器研制过程中,Sengupta^[2]曾采用四种磁场位形分布,分别进行三个工况下的实验,研究比较得到了其中较好的磁场,作者指出所做工作并未得到放电室最佳磁场设计。

基于上述原因,论文探索寻找一种针对设计目标,通过对放电室几何参数、电磁参数和工作参数进行连续实时调节,能够覆盖到最优化结果的放电室优化实验方法。20世纪80年代,科罗拉多大学 Isaacson^[3]在 15cm 离子推力器放电室基础上,尝试研究了阳极长度、磁感应强度对放电室性能的影响。Hiatt 等^[4]采用热丝阴极作为原初电子发射源,阳极和阴极使用丝杠驱动实现轴向移动,研究得出放电室长度及阴极直径对工质利用率有一定影响规律,得到了“最佳虚阳极”构型;Vaughn 等^[5]在此基础上使用空心阴极代替热丝,丝杠控制放电室位置研究了磁感应强度和分布对束离子产生成本和束流形状的影响。然而,之前研究在局部范围内得到了一些规律,但并没有实现在线调节多参数从而实现放电室的优化设计。

论文在前人研究基础上,设计使用电机在真空舱内在线调节放电室构型及磁极位置,配合励磁电流调节磁感应强度,从而实现放电室性能优化的目的,该方法能够极大提高离子推力器放电室优化设计效率。

2 优化实验方法

2.1 优化调节参数

对 Kaufman 型离子推力器放电室进行理论分析时,Goebel 等^[6,7]模型在 Brophy 等^[8]基础上引入放电稳定性以及放电过程中时间度量,通过研究等离子体各组分在阳极处形成的电流,再根据放电室的输入输出功率守恒,就可以预测放电损耗随推进剂利用率的变化曲线。该模型中,放电损耗的定义如式(1),其中 V_d 为放电电压, I_d 为放电电流, I_B 为离子束电流。而通过控制平衡关系得到放电损耗的定义式如式(2),其中, T_e 为电子温度, V_c 为空心阴极电势降, V_p 为等离子体电势, U^* 为电离电位, U^* 为激发电位, Φ 为阳极鞘层电势, I_p 为离子生成电流, I 为原子激发当量电流, I_s 为屏栅电流, I_k 为返回到阴极的离子电流, I_{in} 为阳极离子电流, I_L 为阳极原初电子电流。输入推力器外部参数,通过判定式(1)是否等于式(2)迭代计算电子温度等等离子体参数,即可求解放电室性能曲线。

$$\varepsilon_B = \frac{I_d V_d}{I_B} \quad (1)$$

$$\varepsilon_B = \frac{V_d \left(\frac{I_p}{I_B} U^* + \frac{I^*}{I_B} U^* + \frac{(I_s + I_k)}{I_B} (2V_d - V_c + 2V_p + 2\Phi) + \Phi \right)}{V_d - V_c + V_p - 2T_e} + \frac{V_d \left(\frac{I_{in}}{I_B} (V_p + 2T_e + 2\Phi) + \frac{I_L}{I_B} (V_d - V_c + V_p - 2T_e) \right)}{V_d - V_c + V_p - 2T_e} \quad (2)$$

外部输入参数包括离子光学系统透明度,离子引出区域面积,等离子体包络体积,磁环磁尖总长度,推力器各部位电参数等,其中等离子体体积、阳极总面积等参数由放电室构型直接决定,而关于磁场对等离子体的约束作用通过该控制体模型使用约化因子 f_c 来简化表征,显然,该参数由放电室磁极数、各磁极靴位形排布、磁极表面处磁感应强度以及放电室构型共同耦合决定,通过理论计算对放电室各设计参数求取最优解是不可行的。基于文献[9,10]中 NSTAR 推力器构型参数和实验数据进行理论分析,观察输入外部参数改变情况下放电室性能的改变,以图1为例,可以看到放电室长径比及磁场约束因子对放电室性能影响显著:在性能曲线“膝点”处, f_c 减小使得放电损耗急剧下降,放电室对磁场极为敏感,而不同长径比放电室性能曲线存在交点,这也表明在一定工况下,放电室长径比一定存在所期待的最佳位置。

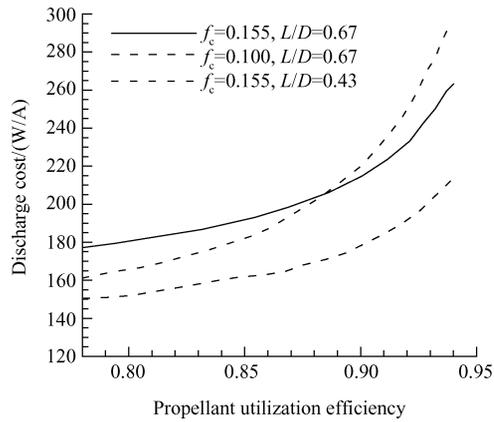


Fig. 1 Analytical results of influence of magnetic field and length on discharge chamber performance

为了对耦合的多参数进行优化设计,将零维模型中输入参数与放电室设计参数建立映射关系,需优化设计参数包括放电室直径 D ,长度 L ,极靴之间距离 L_M ,电磁铁磁感应强度,磁场位形、极靴结构、电磁铁安匝数,另外阴极顶的位置 L_K 对原初电子与中性原子发生一次碰撞所需平均时间影响较大,在充分考虑到对放电室优化参数连续实时调节在结构上的可实现性,直径 D 作为共比参数。因此在固化离子光学引出系统和空心阴极后,放电室多参数优化实验所包含的因素有:

(a)离子推力器特征尺寸,如图2所示。

(b)离子推力器放电室磁场位形,由于磁极靴位置跟随特征尺寸而改变,磁感应强度由特征点处的磁感应强度表征。

(c)流经离子推力器放电室的工质气体流量,包括流经放电室和主阴极的工质气体流量,在优化中尽可能地降低阳极电压 V_d 和加速极电压 V_{ac} 。

2.2 多维优化调节机构

为了实现上述优化参数的在线调节,综合考虑结构工艺及实验条件,设计制备如图3所示的多维优

化机构。该机构由可变尺寸放电室和外部电机驱动装置组成。

放电室采用柱形方案便于长度 L 及极靴之间距离 L_M 的调节;采用三级环形会切磁场方案;阳极筒由固定阳极筒和移动阳极筒配合组成,固定阳极位置相对推力器壳体固定,移动阳极由外部电机驱动相对固定阳极发生位移;放电室磁场由电磁线圈配合电工纯铁材料极靴提供,底部极靴固定于移动阳极背面,中间极靴由电机驱动控制 L_M ,屏栅极靴与栅极系统与壳体固定。

外部电机驱动装置由3台电机组成,在轴线方向上具有3个自由度,分别控制移动阳极,中间极靴及阴极顶位置,整个驱动装置固定于外壳,电机丝杠配合驱动杆及驱动板调节特征尺寸,调节精度为mm,位移调节范围相对基准位置浮动 $\pm 25\%$ 。

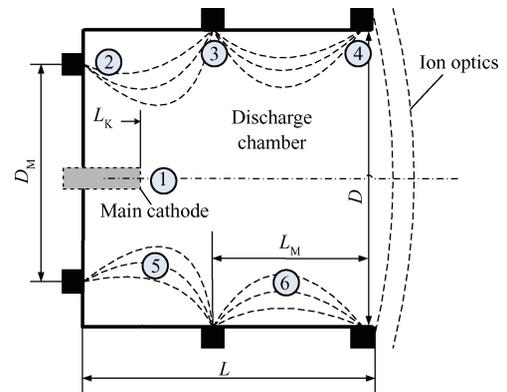


Fig. 2 Design parameters of discharge chamber

2.3 实验设备

实验依托TS-6电推进性能实验设备进行,该设备为 $\Phi 2 \times 5\text{m}$ 的Kaufman离子推力器专用真空系统,系统极限真空度为 $5 \times 10^{-5}\text{Pa}$;采用二台K- $\Phi 800\text{TD}$ 的低返油高真空油扩散泵,该泵工作极限真空度为 $2 \times 10^{-5}\text{Pa}$,对大气的抽速为 $2.5 \times 10^4\text{L/s}$,对氙气的抽速为

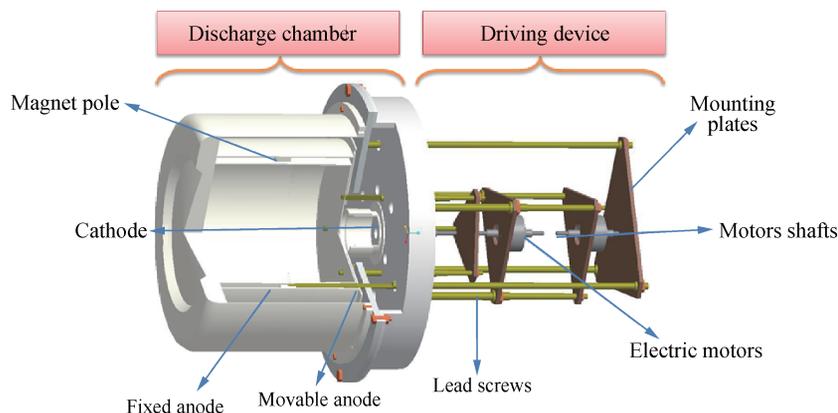


Fig. 3 Schematic of multi-parameter optimization setup

$1.4 \times 10^4 \text{L/s}$; 二台 ZJP-600 罗兹真空泵、四台 2X-70A 机械泵共同组成抽气系统, 工作真空度保持在 $8.5 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 以下^[11,12]。

推进剂供给与调节装置分为三路供气, 分别给离子推力器主阴极、放电室和中和器提供 Xe, 放电室流量调节范围为 $0 \sim 3.0 \text{mg/s}$, 主阴极和中和器阴极的流量调节范围为 $0 \sim 1.0 \text{mg/s}$ 。多路可控制调节电源对推力器部组件及电磁铁、驱动电机供电, 以实现放电室磁场、电场及流量参数的实时调节。

3 放电室优化实验

在进行放电室优化实验时, 安装调试好图 4 中外部电机驱动装置, 保证其能在真空舱内配合图 5 中可变参数放电室稳定工作。

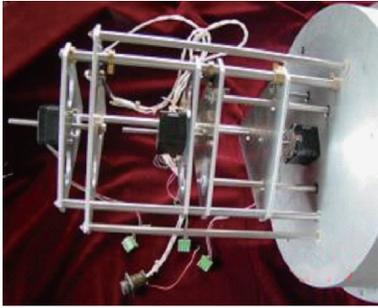


Fig. 4 Driving mechanism of discharge chamber geometry

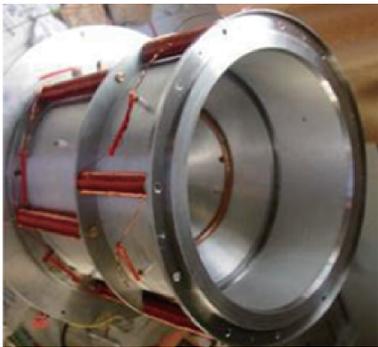


Fig. 5 Variable-parameters discharge chamber

现有推力器设计经验表明, 放电室中应尽可能降低屏栅处的磁感应强度, 提高推力器束流均匀性, 而阴极顶位置磁感应强度对推力器稳定工作至关重要, 该值过高将会引起放电室中放电不稳定, 而过低将会导致放电室性能恶化^[13-15]。由此, 将放电室多维优化调节机构进入真空舱实验之前, 将放电室构型固定于基准位置, 调节上、下游励磁线圈电流, 在放电室轴线上形成如图 6 所示的磁感应强度分布。该指数分布由文献中 30cm 离子推力器磁场分布拟合得到 $B(x) = B_0 e^{(-x/46.9)}$, 而底板磁感应强度值由相似设计准则根据引出束流区域直径之比得到为 0.019T 。

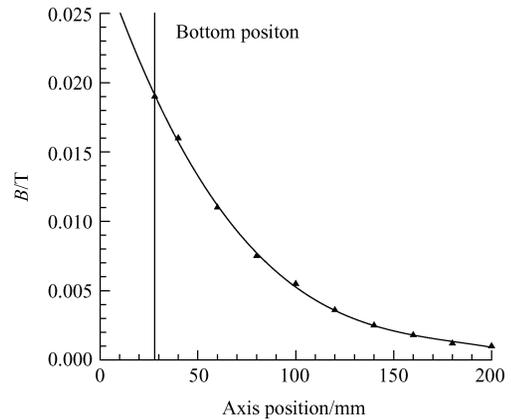


Fig. 6 Initial magnetic intensity distribution at discharge chamber axis

将放电室多维优化机构安装于 TS-6 实验设备, 调节励磁线圈电流至记录值。首先确定束电压、束电流分别为 1000V 和 0.8A , 放电室、主阴极及中和器的总工质流量为 1.37mg/s 。自基准位置开始单因素调节 L/D , L_k , L_m 三个参数, 得到如图 7 所示推力器放电损耗随参数变化曲线。

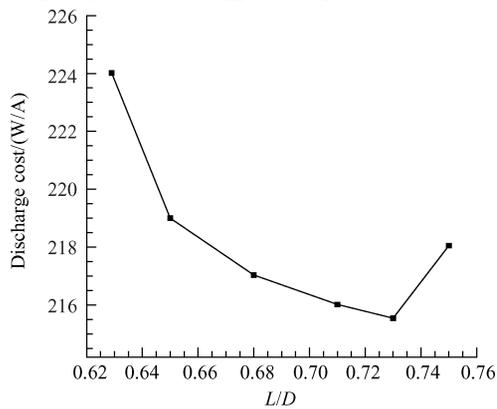
图 7(a) 中明显可以看出, 对于一定口径的放电室在引出一定束流条件下, 存在最佳的放电室长径比, 在该点处, 放电损耗最低, 过低或过高的放电室长度均会导致放电损耗增大。该现象与图 1 中的理论分析是相符合的, 因为放电室长度较小时, 中性原子驻留时间短, 推进剂利用率较低, 维持一定束流需要的阳极功率更高; 放电室长度增加, 增大了中性原子和电子的驻留时间, 提高了电离率, 但同时导致等离子体包络面积加大, 增加了电子与离子的复合率。

阴极顶位置参数 L_k 对放电室工作的影响主要在于原初电子发射位置处磁感应强度, 放电室轴线方向磁感应强度分布如图 6 所示, 随着位置深入, 磁感应强度以指数下降, 故 L_k 过大导致原初电子约束不足, 而 L_k 过小时, 原初电子发射位置离阳极底板过近, 原初电子大量损失于阳极底板导致放电室性能下降。图 7(b) 反映出放电室工作状态对阴极顶位置极为敏感, 阴极伸入放电室 10mm , 放电损耗下降 25W/A , 而随着位置继续伸入, 放电损耗开始上升。

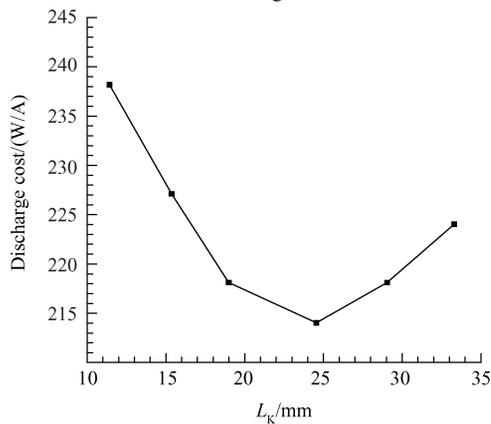
中间极靴的位置直接影响三级场离子推力器放电室内磁感应强度的拓扑结构, 改变中间极靴位置, 导致放电室上下游磁场发生变化。在后续的实验研究中发现, 放电室上游磁场过弱导致原初电子损失电流增大, 放电损耗提高, 下游磁场对放电损耗的影响不如上游磁场显著, 然而下游磁场一旦过强, 会导致放电室振荡无法引出束流。另一方面, 在磁极靴表面

处磁感应强度一定的情况下,极靴之间距离过大导致中间断面处磁感应强度 $B_{y\max}$ 过低无法约束电子,距离过小引起放电室内0.05T磁场等值面包裹体积减小,使得引出区域等离子体密度下降。因此由图7(c)所示,当 L_M 过小时,放电室上游磁感应强度不足导致放电损耗较高,而 L_M 过大导致放电室振荡,性能急剧下降。

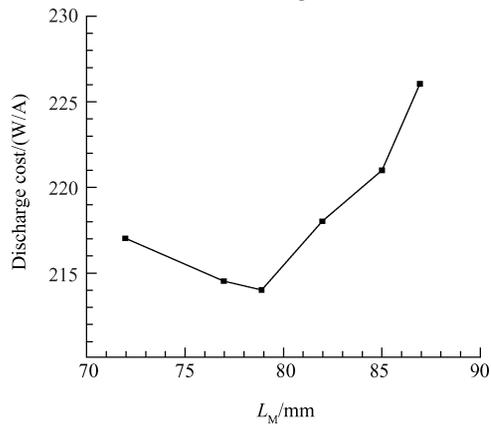
在完成特征尺寸优化调节之后,调节上下游电磁线圈励磁电流,电流值在100mA范围内进行调节,实测的三个磁环的极靴处磁感应强度变化为 $10^{-5}T/mA$,寻找最低离子推力器放电损耗值。以上步骤循环进行,即可得到基准工况点下离子推力器放



(a) Ratio of length and diameter



(b) Cathode position



(c) Intermediate magnet pole position

Fig. 7 Influence of parameters on discharge chamber performance

电室最佳性能所对应的特征尺寸和磁场构型。

在初步选定特征尺寸和励磁电流之后,进行推进剂工质调节实验。实验发现当维持主阴极和中和器流量不变,增加放电室流量时,放电损耗单调下降,这是因为放电室中性原子密度增大,电离概率提高,然而总工质流率提高,导致推力器比冲降低。所以优化实验中决定维持总流量1.37mg/s不变,改变放电室、主阴极流量比例,并保持束电流不变,得到如图8所示实验结果。可以预见,阴极流量过小,原初电子浓度低,放电室电离不充分,而放电室流量不足导致中性原子浓度低,故工质流量在二者之间分配存在一个平衡点。

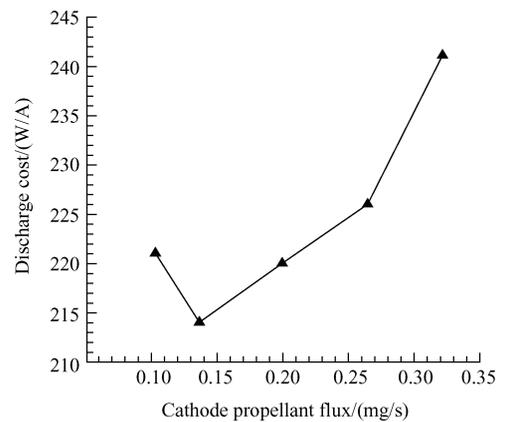


Fig. 8 Influence of cathode propellant flux on discharge chamber performance

4 优化实验结果

优化实验可以在不破空的情况下循环迭代进行,多轮优选之后得到优化结果,表1和表2显示优化后的放电室设计参数,其中表2为优化实验结束后,给定优选励磁电流之后在如图2所示放电室上游磁极靴面、放电室上游阳极中段、放电室主阴极顶、放电室中间磁环极靴面、放电室下游阳极中段、下游磁环极靴面六个特征点处测得磁感应强度值。对几何参数、磁场构型、供气参数优化迭代之后同图7中的初步优化结果存在一定偏差。

按照优化后的参数设计加工放电室,固化特征尺寸,并使用永磁铁实现表2中特征点处磁感应强度。在该组参数下,优化后的离子推力器放电室工作状态如表3所示。在此基础上通过工作参数得到了放电室性能曲线,与正交实验优化所得放电室进行了比较,如图9所示,明显地,通过本文方法优化得到放电室性能曲线“膝点”更加靠后,在工质利用率80%附近,放电损耗172W/A低于正交优化实验结果,在工质利用率80%~90%区间内,二者表现近似,

然而本文优化方法较传统方法更大的优越性体现在极大缩短了设计周期,降低了研制成本。

Table 1 Optimized geometric parameters

L/D	L_k/D	L_m/L
0.65	0.125	0.55

Table 2 Magnetic intensity at feature points

Position	1	2	3	4	5	6
B/T	1.4×10^{-2}	1.5×10^{-2}	9.0×10^{-3}	4.0×10^{-3}	1.4×10^{-2}	6.0×10^{-3}

Table 3 Performance of optimized discharge chamber

Anode voltage/current	30V/4.2A
Cathode keeper voltage/current	18V/0.6A
Beam voltage/current	1000V/0.8A
Accelerator voltage/current	-180V/5.5mA
Discharge cost	172W/A
Equivalent propellant current	980mA
Propellant utilization efficiency	81.4%

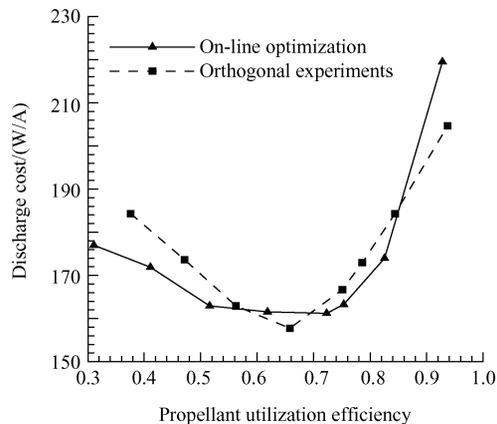


Fig. 9 Comparison of discharge chamber performance between two optimization methods

5 结论

本文通过在线调节放电室几何构型、磁场布局等参数对离子推力器放电室进行了优化设计,得到如下结论:

(1)在一定的推力、比冲目标下,放电室长度、阴极顶位置、中间极靴位置及流率分配均存在最优值。

(2)优化后的推力器性能曲线“膝点”较正交实验结果更加靠后,在工质利用率80%~90%区间内,束离子电离能耗低于正交实验优化结果。

(3)在线优化实验方法极大缩短了离子推力器设计周期,降低了研制成本。

参考文献:

[1] Kitamura S, Miyazaki K, Hayakawa Y, et al. Perfor-

mance Improvement of 150mN Xenon Ion Thrusters[J]. *Acta Astronautica*, 2003, 52(1): 11-20.

[2] Sengupta A. Experimental Investigation of Discharge Plasma Magnetic Confinement in an NSTAR Ion Thruster [R]. *AIAA* 2005-4069.

[3] Isaacson G C. Multipole Gas Thruster Design [R]. *NASA CR-135101*, 1977.

[4] Hiatt J M, Wilbur P J. Ring Cusp Discharge Chamber Performance Optimization[R]. *AIAA* 85-2007.

[5] Vaughn J A, Wilbur P J. Ring Cusp/Hollow Cathode Discharge Chamber Performance Studies [R]. *IEPC* 1988-064.

[6] Goebel D M, Polk J, Sengupta A. Discharge Chamber Performance of the NEXIS Ion Thruster [R]. *AIAA* 2004-3813.

[7] Goebel D M, Wirz R E, Katz I. Analytical Ion Thruster Discharge Performance Model[R]. *AIAA* 2006-4486.

[8] Brophy J R, Wilbur P J. Simple Performance for Ring and Line Cusp Ion Thruster[J]. *AIAA Journal*, 1985, 23(11): 1731-1736.

[9] Sengupta A. Experimental and Analytical Investigation of a Ring Cusp Ion Thruster[D]. *Los Angeles: University of Southern California*, 2005.

[10] Mahalingam S. Particle Based Plasma Simulation for an Ion Engine Discharge Chamber [D]. *Dayton: Wright State University*, 2007.

[11] 郑茂繁,张天平,孟伟,等. 20cm氙离子推力器性能扩展研究[J]. *推进技术*, 2015, 36(7): 1116-1120. (ZHENG Mao-fan, ZHANG Tian-ping, MENG-Wei, et al. Research of Improvement Performance for 20cm Xenon Ion Thruster [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(7): 1116-1120.)

[12] 贾艳辉,张天平,李小平. 离子推力器加速栅寿命概率性分析[J]. *推进技术*, 2011, 32(6): 766-769. (JIA Yan-hui, ZHANG Tian-ping, LI Xiao-ping. Probabilistic Evaluation of Ion Thruster Accelerator Grid Life [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(6): 766-769.)

[13] Williams G J. The Use of Laser-Induced Fluorescence to Characterize Discharge Cathode Erosion in a 30cm Ring-Cusp Ion Thruster[D]. *Michigan: Aerospace Engineering in The University of Michigan*, 2000.

[14] Herman D A, Gallimore A D. Comparison of Discharge Plasma Parameters in a 30cm NSTAR Type Ion Engine with and without Beam Extraction[R]. *AIAA* 2003-5162.

[15] Beattie J R, Matossian J N, Poeschel R L, et, al. Xenon Ion Propulsion Subsystem[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1971, 5(4): 438-444.

(编辑:梅 瑛)