

# 霍尔推力器电磁辐射测量方案研究

张 敏, 邱 刚, 乔彩霞, 康小录  
(上海空间推进研究所, 上海 201112)

**摘 要:** 电磁辐射特性的检测与评估是电推进系统与航天器系统间电磁兼容性研究的重要组成部分。电推进放电室和电子电路间电压、电流振荡引起强电磁辐射干扰, 可能会对卫星平台及载荷运行产生不良影响, 开展电推进电磁兼容性测试试验十分必要。介绍了霍尔推力器电磁辐射测试系统研制方案, 为优化霍尔电推进系统性能设计提供参考。

**关键词:** 霍尔电推进; 电磁辐射; 电磁兼容性

**中图分类号:** V439-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 02-0108-06

## Detection scheme for electromagnetic radiation of Hall thruster

ZHANG Min, QIU Gang, QIAO Cai-xia, KANG Xiao-lu  
(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

**Abstract:** Detection and evaluation of electromagnetic radiation characteristics are the important parts in the research of electromagnetic compatibility between electric propulsion system and space vehicle system. The strong electromagnetic interference caused by voltage and current oscillation between Electronic propulsion discharge chamber and the electronic circuit can result in a harmful effect on the satellite platform and loading operation, so it is necessary to carry out the test for electromagnetic compatibility of the electric propulsion. The development scheme of the electromagnetic radiation testing system for Hall thruster is introduced in his paper, which can provide a reference for optimization of performance design of Hall electric propulsion system.

**Keywords:** Hall electric propulsion; electromagnetic radiation; EMC

## 0 引言

电磁辐射特性的检测与评估是电推进系统与航天器集成时电磁兼容性 (EMC, Electro Magnetic Compatibility) 研究的重要组成部分。电推进系统

中特别是电推力器工作在高电压、大电流且电流变化率较高的状态中, 其工作放电时产生的电磁干扰是否会对射频敏感设备造成潜在影响, 是否会对卫星平台及载荷运行等产生不良影响及其中影响程度大小需通过试验测试来评估。

收稿日期: 2014-08-19; 修回日期: 2014-09-25

作者简介: 张敏 (1987—), 女, 硕士, 研究领域为空间电推进技术

针对我国航天器应用电推进所面临的典型频段的电磁辐射干扰问题, 通过对电推力器产生的电磁干扰进行机理分析和试验测量的方法, 明晰电推力器电磁辐射特性规律, 并以此为基础设计有效的电推力器电磁辐射测量方案。最终通过试验测试电推力器在典型频段的电磁辐射数据, 为航天器全面应用电推进系统提供电磁兼容评估支撑。

## 1 国外电推力器辐射发射试验方案

电推力器工作在高真空环境中, 这种特殊的工作环境决定了电推力器的电磁辐射测试试验难以在常规 EMC 试验室进行。因此, 需要建立特殊的试验条件。为了满足电推力器工作的特殊环境和电磁兼容测试的要求, 经调研国外测试方案, 发现大致采用三种方法进行电推力器辐射发射测试: 1) 玻璃纤维副舱方案; 2) 真空舱吸波材料方案; 3) 直接真空舱方案。

### 1.1 玻璃纤维副舱方案

美国 Aerospace 公司采用玻璃纤维副舱试验装置如图 1 所示。

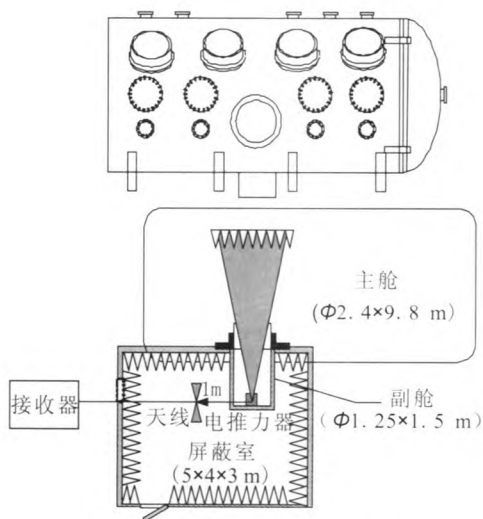


图 1 美国 Aerospace 公司 EMC 测试设备

Fig. 1 EMC testing equipment made by Aerospace Company of U. S.

该装置是在一套直径 2.4 m, 长 9.8 m 的空间环境模拟舱中增加一个直径 1.25 m, 长 1.5 m

玻璃纤维副舱, 该玻璃纤维副舱位于屏蔽测试间, 并在主舱的推力器羽流作用面增加防电磁波反射措施。该测试装置有 3 个组成部分: 1) 用于推力器安装的透波舱, 这个玻璃纤维副舱与不锈钢真空舱相互匹配; 2) 半屏蔽室, 它包围着透波副舱的目的是屏蔽外部背景噪声, 该金属室排列着 0.6 m 高的铝锥, 这些铝锥可以吸收频率在高于 80 MHz 的推力器辐射, 以减轻屏蔽室墙面的反射作用; 3) 记录推力器辐射发射情况的标准吸收器。频率低于 18 GHz 时, 接收器使用已知衰减系数的双节半刚性电缆通过半屏蔽室里的面板顺序连接至一系列天线; 而当频率高于 18 GHz 时, 接收器置于屏蔽室里通过两个短电缆顺序连接至一系列倍频喇叭状天线。

该测试方案既可以保证电推力器工作的真空环境, 同时通过玻璃纤维副舱和屏蔽室的配置, 可以满足电推力器电磁辐射发射特性的测试要求。目前这一方案在国外的电推进系统研究中应用较多: 如欧洲的 SMART-1 和美国空军 TechSat 21 的 BHT-200 电推进系统等等。

### 1.2 真空舱吸波材料方案

真空舱吸波材料方案如图 2 所示。

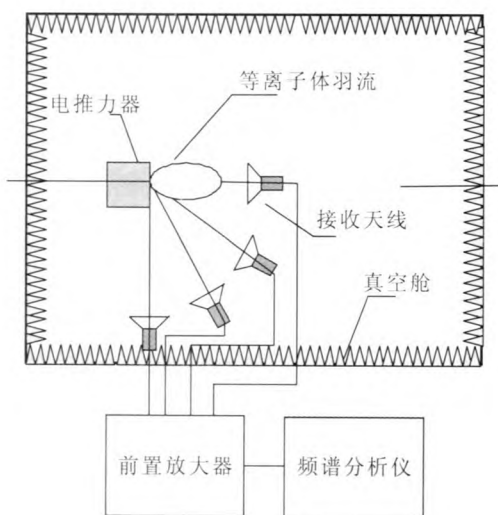


图 2 真空舱吸波材料方案

Fig. 2 Scheme of absorbing materials for vacuum chamber

本方案真空室舱壁覆盖吸波材料 (不影响真空度), 电推力器置于真空舱, 可以保证电推力

器点火工作,这样推力器的辐射发射就可在真空条件下用专用设备进行测量。

本方案既可以满足电推力器工作的真空条件,又实现了在消声屏蔽室内测量电推力器电磁辐射发射的任务需求,但是在技术方面存在两个困难:1)宽频带吸波材料(10 KHz~40 GHz)难以获得;2)吸波材料出气严重,难以达到电推力器工作所需要的真空度。

### 1.3 直接真空舱方案

20世纪90年代美国BMDO(Ballistic Missile Defense Organization)、NASA刘易斯研究中心和JPL通过当时的国际空间技术公司(ISTI)购买了俄罗斯Fakel的SPT-100推力器,NASA刘易斯研究中心对推力器的性能进行了综合评估,其中包括推力测试、振动、磁场耦合特性、推力器羽流与航天器的相互作用、电磁干扰、光学诊断、5 000 h寿命试验和6 000次热循环试验,其中电磁兼容试验在NASA刘易斯研究中心的直径4.6 m、长18.3 m的无吸波层的金属真空舱内直接进行,推力器工作区有效长度8.1 m,如图3所示。

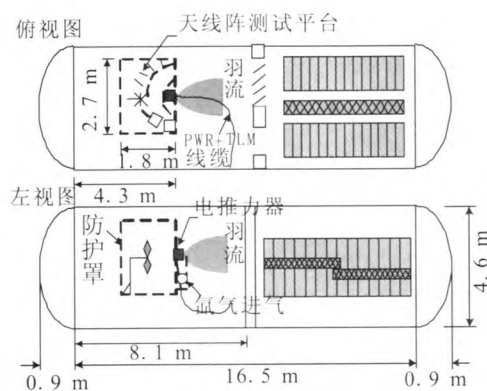


图3 NASA刘易斯研究中心直接真空舱方案

Fig. 3 Directly vacuum chamber scheme made by NASA Lewis Research Center

直接真空舱方案就是将推力器安装在金属真空舱内,按照MIL-STD-461C标准将各种测试天线放置在真空舱内进行测试。EMC试验设备包括一个大型的天线台,推力器的辐射发射在真空条件下用专用设备测量。推力器沿真空舱轴线安

装,波段天线安装在推力器的后半球面,距推力器喷口中心1 m处。为了防止等离子体对天线的污染,需要制作一个大型防护罩包绕在天线周围。这种测试试验方案配置简单,易于实现,是俄罗斯电推进系统研究过程中普遍采用的方案。

## 2 霍尔推力器电磁辐射测量方案设计

鉴于试验条件和工作开展进度,本文只给出电场辐射(RE102)测试方案。霍尔推力器工作功率范围为100~5 000 W;电磁辐射测量范围为10 kHz~18 GHz。电场辐射(RE102)测试步骤:

- 1) RE102测试设备连接调试;
- 2) RE102背景测试;
- 3) 推力器开机工作;
- 4) 推力器稳定工作状态,在测试方案中规定的测量位置处分别对电磁辐射发射(RE102)进行测试,记录测试结果;
- 5) 电推进系统关机。

参照国外电推力器电磁辐射测试方案,电磁辐射测试和接收系统示意图如图4所示。

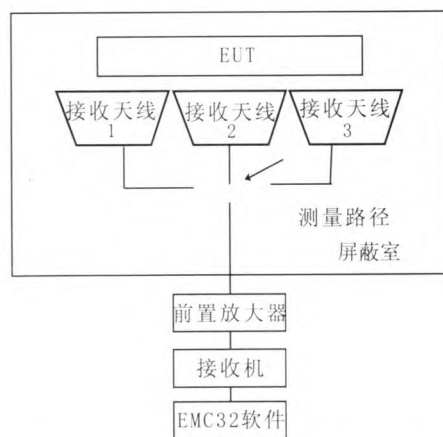


图4 电磁辐射测试和接收系统示意图

Fig. 4 Diagram of testing and receiving system for electromagnetic radiation

### 2.1 推力器和天线的安装

霍尔推力器安装在真空舱的中轴线上,推力器后部靠近一侧舱壁,保证羽流有一定的喷射空间。霍尔推力器辐射试验平台具体搭建方案如图5所示。设计加工专用的转接法兰,用来连接气

路和电路到舱内。推力器的供气通过地面流量控制器进入真空舱内管路。推力器的供电可以用地面电源,也可用功率处理单元直接供电,功率处理单元可以放置在真空舱内与推力器同时进行辐射发射测试。由于霍尔推力器产生的羽流是带电粒子束流,为了防止羽流溅射到主舱舱壁上和防

止测试时信号反射作用,需在主舱中放置一排铝锥。

天线位于在以推力器出口平面中心为圆心、半径为 1 m 与推力器轴线在同一水平面上的  $180^\circ$  圆弧上。具体测量位置分别位于与推力器出口平面夹角为  $0^\circ$  和  $90^\circ$  处。天线布置方式如图 5 所示。

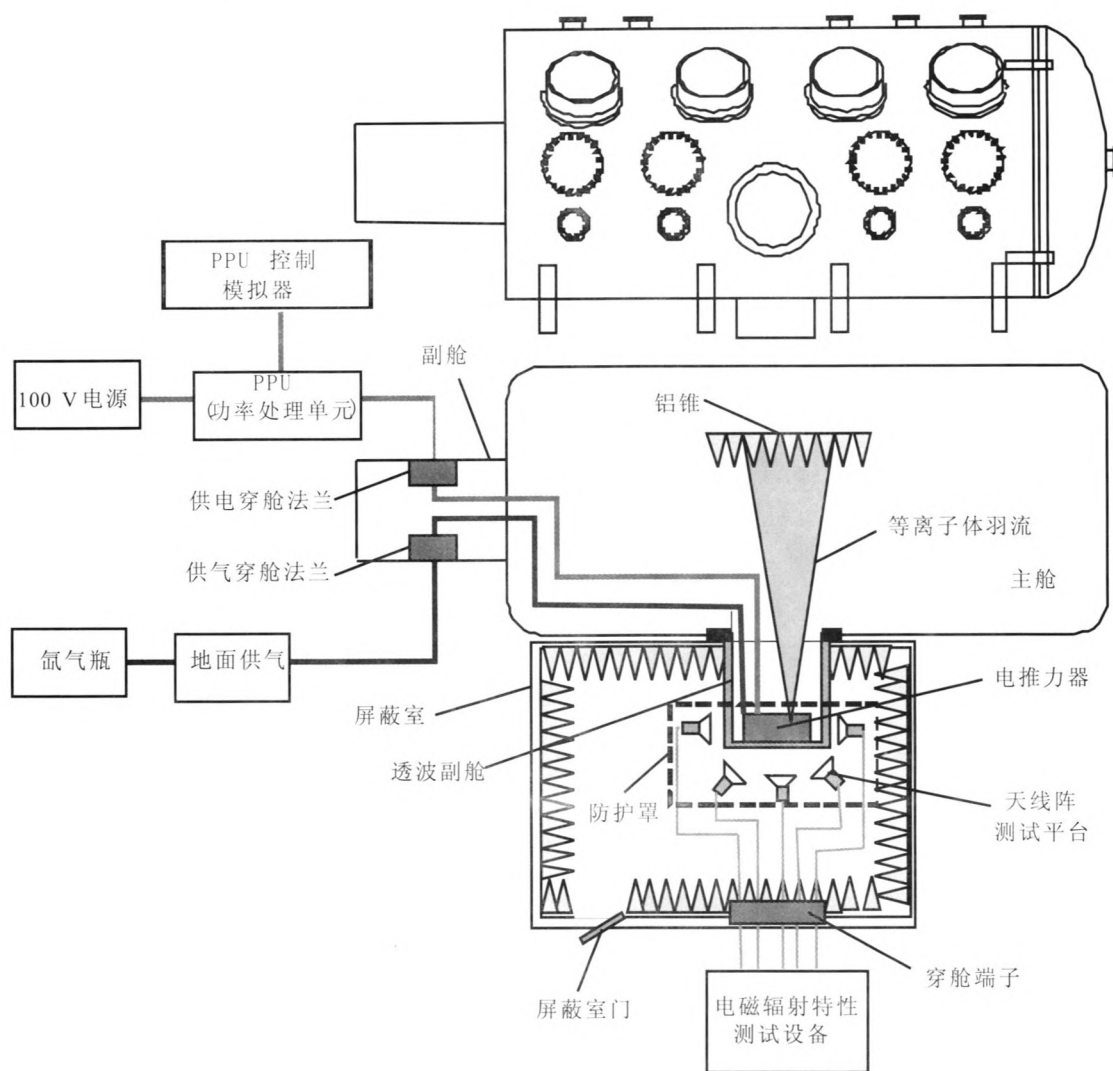


图 5 霍尔推力器电磁辐射特性检测试验台总体布局示意图

Fig. 5 Layout of electromagnetic radiation test-bed for Hall thruster

## 2.2 天线和接收机的配置

所有接收天线、接收机及其他测试仪器基本配置如表 1 所示。

## 3 试验台搭建

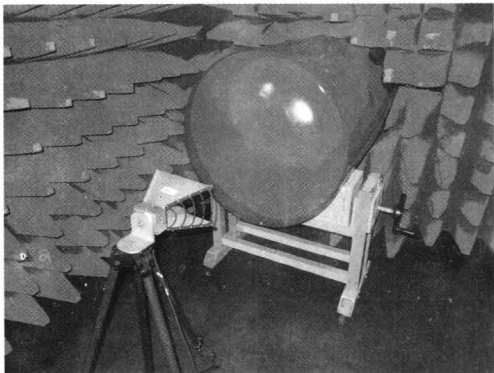
在进行电磁辐射试验时,霍尔推力器装在具有良好透波性能的透波副舱内,配置好仪器设备

后,选择不同频段天线测试了 10 k~18 GHz 霍尔推力器不同工况下点火特性的电磁辐射情况。其中分别在透波副舱正面和侧面放置天线,接收机扫描 10 k~18 GHz 水平极化和垂直极化两个极化方向数据。图 6 给出了 1~18 GHz 的推力器垂直极化电磁辐射示意图,其中图 6(a)为副舱正面测试图,图 6(b)为侧面测试图。

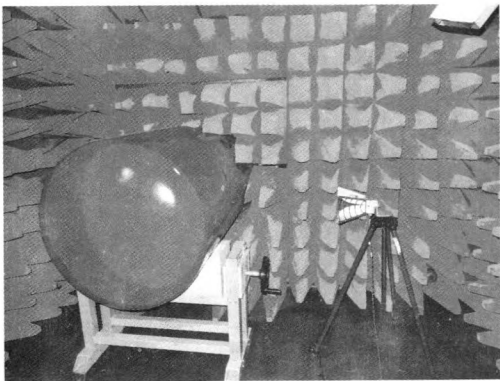
表 1 电推力器辐射发射测试系统基本配置

Tab. 1 Basic configuration of radiation testing system for electric thruster

编号	设备名称	规格描述	数量
1	EMI 接收机	频域测试: 20 Hz~40 GHz	1
2	拉杆式天线	10 k~30 MHz	1
3	双锥喇叭天线	30 M~200 MHz	1
4	双脊喇叭天线	200 M~2 GHz	1
5	双脊喇叭天线	1 G~18 GHz	1
6	喇叭天线	18 G~26.5 GHz	1
7	前置放大器	频率范围: 1~18 GHz, 增益: 38~41 dB, 噪声指数: 2.5 dB	1
8	EMC 32 软件	-	1
9	测试线缆	-	若干



(a) 正面测试



(b) 侧面测试

图 6 1~18 GHz 透波副舱正面和侧面辐射测试  
Fig. 6 Radiation testing at front and side of 1~18 GHz subsidiary chamber

鉴于该试验是霍尔推力器的首次辐射测试试

验, 本文针对仪器设备给出电磁辐射试验测试方案, 将为后续霍尔推力器电磁兼容试验开展提供试验基础。测试仪照片见图 7。

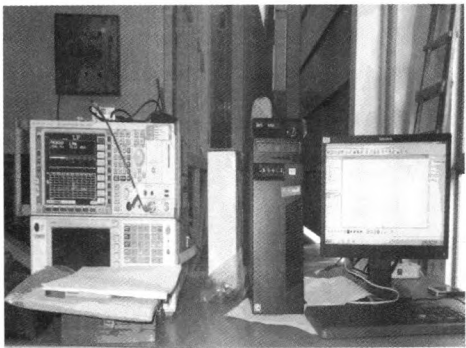


图 7 辐射测试仪器设备

Fig. 7 Testing equipment of electromagnetic radiation

4 结论

介绍了国外进行电推力器电磁辐射实验的成功案例, 借鉴国内外经验和实验室现有设备情况, 给出霍尔电推力器电磁辐射发射测试方案, 可以满足霍尔推力器电磁辐射发射测试要求。该测试平台也为考核电推进系统与整星相关设备是否存在电磁不兼容问题提供相关参考, 在某种程度上可以解决电推进系统研制后期发生电磁不兼容的颠覆性问题。

## 参考文献:

- [1] 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
- [2] HOFER R R, GALLIMORE A D. The role of magnetic field topography in improving the performance of high- voltage hall thrusters, AIAA 2002-4111[R]. USA: AIAA, 2002.
- [3] BEITING E J, POLLARD J E. Electromagnetic emissions to 60 GHZ from a BPT-4000 EDM Hall thruster, IEPC-03-29 [R]. [S.l.]: IEPC, 2003.
- [4] BEITING E J, POLLARD J E, KHAYMS V, et al. Electro-magnetic Emissions to 60 GHZ from a BPT-4000 EDM Hall Thruster, IEPC-03-129[C]// 2003 International Electric Propulsion Conference. Toulouse, France: [s.n.], 2003: 11-18.
- [5] THOMPSON R, GRAY H. The xenon regulator and feed system for electric propulsion systems, IEPC-2005-066 [C] //Proceedings of International Electric Propulsion Conference. Princeton, NJ: [s.n.], 2005: 111-120.
- [6] 赵一男. 霍尔推力器高频电磁辐射的实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [7] 李自然, 周进, 吴建军. 脉冲等离子体推力器电磁辐射干扰诊断[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1244-1248.
- [8] BEITING E J, EAPEN X L, POLLARD J E. Electromagnetic emissions from PPS 1350 Hall thruster, IEPC-03-29 [R]. [S. l.]: IEPC, 2003.
- [9] MANZELLA D, SARMIENTO C, SANKOVIC J, et al. Performance evaluation of the SPT-140, IEPC-97-059 [C]// Proceedings of 25th International Electric Propulsion Conference. Cleveland, Ohio: IEPC, 1997: 359-364.
- [10] BEITING E J, GARRET M L, POLLARD J E. Spectral and temporal characteristics of electromagnetic emissions from the BPT-4000 Hall thruster, AIAA-2006-5154[R]. USA: AIAA, 2006.
- [11] BEITING E J, GARRET M L, POLLARD J E, et al. Temporal characteristics of radiated emission from SPT-100 Hall thrusters in the L- S-, and C-bands, IEPC2005-222 [R]. Princeton, NJ: IEPC, 2005.
- [12] BEITING E J, SPEKTOR R, GARRETT M L. Experimental investigation on the origin of the 1~ 8 GHz radiated emission from Hall thrusters, ISPC-2008-070[R]. Crete, Greece: ISPC, 2008.
- [13] BEITING E J, SPEKTOR R, EAPEN X L. On the origin of the L-, S- and C-bands (1 - 8 GHz) Emission from Hall Thrusters, IEPC-2009-072[R]. Ann Arbor, MI: IEPC, 2009.
- [14] BEITING E J. Design and performance of a facility to measure electromagnetic emissions from electric satellite thrusters, AIAA-2001-3344[R]. Salt Lake City: AIAA, 2001.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 101 页)

2) 设计试验件进行了水压强度试验和密封性试验, 根据试验结果对设计进行了局部修正, 并投入使用。

3) 系统应用情况表明, 黄铜连接件能够满足 21 MPa 高压纯氧环境下黄铜管件及设备连接要求, 使用方便、密封可靠、能够反复拆卸。

4) 解决了黄铜管道与不锈钢管道的对接问题, 可以在其他高压氧气系统中推广使用。

## 参考文献:

- [1] 贾德训. 对氧气管道安全问题的探讨[J]. 钢铁技术, 2002 (3): 45-49.
- [2] 崔海莉. 氧气管道安全运行措施的分析[J]. 管道技术与设备, 2010 (4): 15-17.
- [3] 江坚. 氧气管道设计及安装质量控制[J]. 化工设备与管道, 2007, 44(1): 56-59.
- [4] 第一汽车制造厂设备修造分厂生产组. 机械工程材料手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1970.

(编辑: 王建喜)