

空间科学与技术研究丛书

# 空间电推进 测试与评价技术

Testing and Evaluation Technologies for  
Space Electric Propulsion

李得天 张天平 张伟文 郭宁 杨生胜 编著



中国工信出版集团



北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

★ ★ ★  
“十三五”  
★ ★ ★

国家重点出版物出版规划项目

空间科学与技术研究丛书



# 空间电推进 测试与评价技术

---

Testing and Evaluation Technologies for  
Space Electric Propulsion

李得天 张天平 张伟文 郭宁 杨生胜 编著



 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

电推进是先进的空间推进技术,航天器应用电推进可以大幅节约推进剂使用量,显著提高航天器有效载荷比,是否应用电推进正成为衡量航天器先进性和竞争力的重要标志。对电推进进行系统、准确的测试与评价是应用电推进的前提。根据上述需求,作者在总结国外电推进测试与评价技术的基础上,根据自身实践完成本书撰写,重点介绍了空间电推进测试与评价相关技术。全书分为9章,第1章介绍了空间电推进基础知识;第2~4章介绍了电推力器性能、寿命的试验与评估技术以及力、热特性分析与测试评价技术;第5章介绍了电推力器关键部组件测试与评价技术;第6~7章介绍了电推进羽流特性及其效应测试与评价技术、电推进电磁兼容性试验技术;第8章介绍了推进剂流量控制与校准技术;第9章介绍了电推进试验设备系统。

本书偏重于工程技术内容介绍,实用性强,适合从事与电推进技术工作相关的工程技术人员、科研人员使用,亦可供大专院校相关专业的师生阅读。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

空间电推进测试与评价技术 / 李得天等编著. —北京:北京理工大学出版社, 2018.9

(国家出版基金项目、“十三五”国家重点出版物出版规划项目、国之重器出版工程、空间科学与技术研究丛书)

ISBN 978-7-5682-6283-5

I. ①空… II. ①李… III. ①空间定向—电推进 IV. ①V514

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 204444 号

---

出版社 / 北京理工大学出版社有限责任公司  
地址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号  
邮编 / 100081  
电话 / (010) 68914775 (总编室)  
(010) 82562903 (教材售后服务热线)  
(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经销 / 全国各地新华书店

印刷 / 固安县铭成印刷有限公司

开本 / 710\*1000mm 1/16

印张 / 25.75

彩插 / 6

字数 / 458 千字

版次 / 2018 年 9 月第 1 版 2018 年 9 月第 1 次印刷

定价 / 96.00 元

责任编辑 / 杜春英

文案编辑 / 杜春英

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

---

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换



## 序

随着我国载人航天工程、探月工程的顺利实施，期间取得一系列举世瞩目的科技成就，这些成就标志着我国航天技术已经迈上新的台阶，与此同时，中国航天也将面临一个新的起点。推动我国航天技术发展，建设航天强国成为航天人新的历史责任。空间推进技术是决定航天器技术水平的高新技术，电推进是先进的空间推进技术，发展电推进是航天器技术水平提升的最重要途径之一，也是推动我国从航天大国向航天强国迈进必不可少的基础。

近年来，我国空间电推进技术发展取得了一系列喜人的成绩，特别是 LIPS-200 离子电推进系统完成地面寿命考核，表明该系统具备了确保卫星在轨可靠运行 15 年以上的能力；SJ-13 卫星已经应用 LIPS-200 离子电推进系统执行南北位置保持任务，标志着我国航天器已经进入电推进时代。这些事件都是中国航天发展中具有重要影响的事件。

电推进技术涉及的学科专业、技术领域较为广泛，技术复杂，产品研制难度大。发展电推进需要全国相关的大学、研究所、企业共同合作，相互之间进行广泛的学术技术交流。测试与评价技术是电推进技术研究、产品研制过程中的重要工作内容，只有经过充分的测试与评价，才能保证电推进稳定可靠地应用于航天器。在我国空间电推进已经取得重要成绩，且迫切需要大力发展，更上一层楼的发展关头，总结电推进测试与评价技术的成果并编著专业书籍，毫无疑问对推动电推进领域内专家学者相互交流是大有裨益的，对推动电推进在中国航天器上尽早广泛应用大有好处。

兰州空间技术物理研究所是我国最早从事电推进技术研究的单位，其技术积淀有四十余年的历史，已经圆满完成 LIPS-200 离子电推进系统、LHT-100



霍尔电推进系统空间飞行验证，并在国内率先完成电推进系统地面长寿命考核以及空间工程应用，还完成了多个种类、多个规格的电推进样机研制，是国内电推进技术发展的领军单位。

《空间电推进测试与评价技术》是兰州空间技术物理研究所的专家在总结国外电推进测试与评价技术的基础上，根据自身实践编著而成。该书涵盖电推力器及其关键部组件的性能、寿命测试与评价技术，电推力器力、热特性评价技术，电推进系统兼容性试验技术等方面的内容，不仅反映了作者多年来在电推进领域内的研究成果，同时引入国内外同行在该领域所取得的成就，内容丰富，知识性强。该书将不仅对中国空间电推进技术发展产生重要、积极的影响，也是对中国航天的一份重要贡献。

应作者邀请为《空间电推进测试与评价技术》撰写序言，为之高兴。兰州空间技术物理研究所对空间电推进技术的研究工作，从理论到实践，做得很深入，为国内领先，这部书的出版相信会对促进我国空间事业的发展，建设航天强国，起到积极推动作用。

中国工程院院士：

张应涛

2017年10月



## 前 言

空间电推进是利用电能加热、离解和加速工质形成高速射流而产生推力的技术，相对传统化学推进具有比冲高、显著的特点。空间电推进可以应用于航天器的姿态和轨道控制、轨道转移、深空探测主推进、无拖曳控制等任务。航天器应用电推进，可以大幅减少推进剂携带量。以美国 BSS-702SP 通信卫星平台为例，采用电推进进行轨道转移和位置保持，该平台发射质量约为 2 t，而如果采用化学推进方案，该平台的质量将高达 4 t 以上。另外，针对部分速度增量较大的深空探测任务，如果不采用电推进，则需要携带的推进剂质量远远超过运载的发射能力，任务根本无法实现。由此可见，应用电推进可以产生巨大的技术经济效益。

半个世纪以来，美国、俄罗斯、欧空局和日本都在电推进技术领域持续地大力投入，目前，不同类型和不同特点的电推进在空间航天器上得到了广泛应用。近二十年来，我国空间电推进技术在需求牵引和其他技术发展的支持下，也取得了丰硕的成果。2012 年，我国首次实现了离子、霍尔两个类型的电推进空间飞行验证；2016 年，我国 LIPS-200 离子电推进系统首次完成地面长寿命考核试验，表明该系统具备了确保卫星在轨可靠运行 15 年以上的能力；2017 年，我国首颗高通量通信卫星实践十三号成功发射，LIPS-200 离子电推进系统首次实现空间正式应用。可以预见，在今后的十年内，随着我国通信卫星技术升级换代，深空探测国家重大专项以及其他空间科学探测项目的实施，我国空间电推进技术将迎来前所未有的蓬勃发展机遇期。

实现电推进在轨应用，必须经过充分的地面测试与评价，确认电推进产品的性能、寿命、可靠性以及与航天器的兼容性等特性能满足航天器的应用要求。



为了促进我国空间电推进技术的发展，支持我国航天技术快速发展，支撑国家重大专项顺利实施，笔者和国内同行都热切希望有一本系统介绍空间电推进测试与评价技术的专著。从 2015 年，笔者在许多专家和同事的支持下开始编著本书，经过两年的努力，本书终于同读者见面了，但愿本书能对读者有所帮助，能对我国空间电推进技术的发展略尽绵薄之力。

本书系统介绍了国内外空间电推进测试与评价技术方面的最新进展，内容涵盖电推力器及其关键部组件的性能、寿命测试与评价技术，电推力器力、热特性分析与评价技术，电推进系统与航天器兼容性试验与评价技术，书中还介绍了电推进推进剂流量控制与测量技术、电推进试验设备。在电推力器性能测试与评价中重点介绍了推力、比冲、效率、发散角、推力偏心角等指标的测试与评价方法。在电推力器寿命验证试验与评价技术中，重点介绍了电推力器寿命试验方案与分析评价方法。在电推力器关键部组件测试与评价技术中，重点介绍了空心阴极与栅极的测试与评价技术。在电推力器力、热特性分析与评价技术中，着重介绍了力、热特性建模分析试验验证方法。在电推进系统与航天器兼容性试验与评价技术中，着重介绍了电推进羽流特性诊断及其影响评估方法，以及电推进系统电磁兼容性试验技术。以上内容大多是本书的各位编著者在电推进技术研究、产品开发、飞行产品研制中多次实践应用的技术成果，很多成果已经服务于我国航天器电推进系统研制，多次保证了空间电推进飞行成功。特别是基于特征频率和位移复合特性的微小推力激光测量方法、基于透波副舱的真空环境下电推力器电磁辐射发射测量方法、基于热节流器的微小流量控制方法和定容差压校准方法、基于法拉第平面阵列的推力矢量偏心角和束发散角测量方法、空心球形朗缪尔探针与阻滞势分析仪相互配合的电推进羽流等离子体参数诊断方法，系统解决了电推进测试与评价技术中面临的一系列难题，形成了多项自主知识产权，受到同行的广泛关注与高度评价。

在本书的撰写过程中，兰州空间技术物理研究所真空技术与物理重点实验室的龙建飞、贾艳辉、唐福俊、杨俊泰、陈娟娟、孟伟、孙明明、王蒙、谷增杰、李娟、颜则东、陈益峰、田恺、杨浩、杨福全、成永军、赵澜、徐金灵等同事提供了大量资料并参与了撰稿工作，在此表示衷心的感谢！

由于编著者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

李得天

2017 年 10 月



# 目 录

第 1 章 空间电推进基础知识	001
1.1 电推进简介	002
1.1.1 电推进的基本概念与分类	002
1.1.2 典型电推进简介	004
1.1.3 电推力器主要性能参数	009
1.2 电推进发展概述及典型应用	015
1.2.1 电推进技术发展	015
1.2.2 电推进应用进展	015
1.2.3 深空探测领域典型应用	017
1.2.4 地球轨道卫星领域典型应用	021
1.3 电推进测试技术概要	024
1.3.1 电推进测试工作的必要性	024
1.3.2 电推进测试的内容及范畴	024
1.3.3 电推进测试的作用及意义	025
参考文献	025
第 2 章 电推力器性能测试与评价技术	029
2.1 电推力器性能及束流特性测试概述	030
2.1.1 电推力器主要性能参数测试	030
2.1.2 离子推力器束流特性及测试	031
2.2 电推进微小推力测试	035





2.2.1	推力测量的必要性	035
2.2.2	扭转式推力测量方法	035
2.2.3	摆式推力测量方法	038
2.3	电推进束流分布测试	042
2.3.1	束流分布测试原理	042
2.3.2	束流分布测试装置实例	051
2.3.3	典型实例束流分布测试结果与分析	058
2.4	双荷离子比例测试	062
2.4.1	测试原理	062
2.4.2	测试装置及测试方法	066
2.4.3	测试结果与分析	068
	参考文献	071
<b>第3章</b>	<b>电推力器寿命验证试验与评估技术</b>	<b>075</b>
3.1	概述	076
3.2	寿命试验技术	077
3.2.1	试验方法	077
3.2.2	试验系统组成	079
3.2.3	试验流程	080
3.2.4	性能变化诊断测试项目	084
3.3	寿命试验实例	085
3.3.1	NSTAR 离子推力器分阶段的寿命扩展试验	086
3.3.2	NEXT 离子推力器寿命试验	086
3.3.3	XIPS-13 和 XIPS-25 离子推力器寿命试验	088
3.3.4	ETS-VI 离子推力器寿命试验情况	089
3.3.5	$\mu$ -10 离子推力器寿命试验	092
3.3.6	RITA 推力器寿命试验	092
3.4	寿命评估	094
3.4.1	失效模式及失效判据	094
3.4.2	寿命模型	096
3.4.3	寿命评估方法与流程	106
3.4.4	寿命分析评估实例	110
	参考文献	113



第 4 章 电推力器力、热特性分析与测试评价技术 .....	119
4.1 力学特性分析与测试评价技术 .....	120
4.1.1 电推力器力学特性要求 .....	120
4.1.2 离子推力器力学仿真分析方法 .....	122
4.1.3 离子推力器力学试验方法 .....	129
4.1.4 离子推力器力学试验与仿真结果的对比分析 .....	133
4.1.5 总结 .....	135
4.2 热特性分析与测试评价技术 .....	136
4.2.1 电推力器热特性评价需求 .....	136
4.2.2 30 cm 离子推力器栅极组件热形变位移分析 .....	137
4.2.3 三栅极组件热形变位移对离子引出过程的影响分析 .....	145
4.2.4 离子推力器热真空试验方法 .....	160
参考文献 .....	164
第 5 章 电推力器关键部组件测试与评价技术 .....	169
5.1 空心阴极测试与评价技术 .....	170
5.1.1 空心阴极的结构及工作原理 .....	170
5.1.2 性能测试装置 .....	172
5.1.3 点火启动特性测试与评价技术 .....	176
5.1.4 稳态放电特性测试与评价技术 .....	178
5.1.5 寿命试验与评价技术 .....	185
5.2 栅极组件测试技术 .....	186
5.2.1 栅极组件的结构与工作原理 .....	186
5.2.2 主要几何参数及其测量方法 .....	187
5.2.3 主要性能参数及其测试方法 .....	191
参考文献 .....	197
第 6 章 电推进羽流效应测试与评价技术 .....	207
6.1 羽流等离子体模型与数值计算方法 .....	208
6.1.1 电推进羽流的组成成分 .....	208
6.1.2 电推进羽流的动力学模型 .....	209
6.1.3 粒子运动的相关数值模拟方法 .....	214



6.1.4	粒子碰撞数值模拟方法	216
6.2	羽流等离子体诊断测量技术	219
6.2.1	电推进羽流 LP 探针诊断	220
6.2.2	电推进羽流 Faraday 探针诊断	233
6.2.3	电推进羽流 RPA 探针诊断	236
6.2.4	电推进羽流污染 QCM 诊断	241
6.2.5	电推进羽流发射光谱诊断技术	247
6.3	羽流等离子体效应评价	248
6.3.1	羽流等离子体概述	248
6.3.2	溅射与沉积	249
6.3.3	充放电效应	267
	参考文献	276
第 7 章	电推进电磁兼容性试验技术	281
7.1	电推进电磁兼容性试验的必要性及特殊性	282
7.1.1	电推进电磁兼容性试验的必要性	282
7.1.2	电推进电磁兼容性试验的特殊性	282
7.2	电推进 EMC 试验装置	283
7.2.1	电推进 EMC 试验装置组成	283
7.2.2	透波舱	284
7.2.3	电波暗室	285
7.2.4	仪器仪表	285
7.3	电推进 EMC 试验流程	286
7.3.1	试验布局	286
7.3.2	试验流程	287
7.3.3	试验数据处理与分析	289
7.4	离子电推进电磁兼容性试验	291
7.4.1	美国深空一号 30 cm 离子电推进电磁兼容性试验	291
7.4.2	日本 MUSES-C 的 12 cm 离子电推进电磁兼容性 试验	292
7.4.3	ARTEMIS 卫星离子电推进电磁兼容性试验	295
7.4.4	国内 LIPS-200/300 离子电推进电磁兼容性试验	298
7.5	霍尔电推进电磁兼容性试验	304



7.5.1	美国 SPT-100 电推进电磁兼容性试验	304
7.5.2	美国 SPT-140 霍尔电推进电磁干扰试验	312
7.5.3	国内霍尔电推进电磁兼容性试验	313
	参考文献	315
<b>第 8 章 推进剂流量控制与校准技术</b>		<b>317</b>
8.1	推进剂流量控制技术	318
8.1.1	流量控制方法与原理	319
8.1.2	流量控制装置	322
8.1.3	应用实例	328
8.2	推进剂流量校准技术	333
8.2.1	校准原理	333
8.2.2	推进剂流量校准装置	335
8.2.3	校准结果及分析	337
	参考文献	343
<b>第 9 章 电推进试验设备系统</b>		<b>345</b>
9.1	概述	346
9.1.1	电推进试验项目	346
9.1.2	电推进试验设备组成及功能简介	347
9.2	典型电推进试验设备系统	348
9.2.1	电推进性能试验设备	348
9.2.2	电推进寿命考核及可靠性验证试验设备	350
9.2.3	电推进热真空试验设备	351
9.2.4	电推进地面联试试验设备	351
9.3	电推进试验设备设计	352
9.3.1	布局设计	352
9.3.2	真空舱设计	352
9.3.3	抽气系统设计	356
9.3.4	供气系统设计	358
9.3.5	温控装置设计	359
9.3.6	测量控制系统设计	361
9.3.7	等离子体影响防护设计	364



9.4 电推进试验设备实例 .....	365
9.4.1 美国电推进试验设备 .....	365
9.4.2 我国典型电推进试验设备 .....	368
参考文献 .....	372
索引 .....	373



第 1 章

空间电推进基础知识



## | 1.1 电推进简介 |

### 1.1.1 电推进的基本概念与分类

#### 1. 电推进的基本概念

电推进是利用电能加热、离解和加速推进剂形成高速射流而产生推力的技术。在空间环境下，电能主要来自太阳能或核能，相应的推进系统称为太阳电推进或核电推进。一般来说，带电离子的喷射速度远高于化学推进方式，因此电推进可以实现更高的比冲。图 1-1 所示为化学推进和电推进的工作原理。按照电推进技术的发展现状，电推进比化学推进的排气速度可以高出一

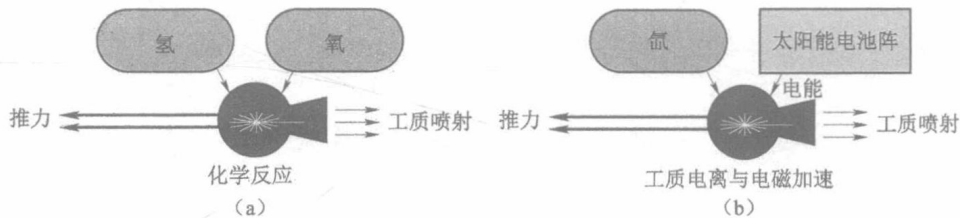


图 1-1 两种推进方式的工作原理

(a) 化学推进；(b) 电推进



个量级或者更高。电推进发动机又称为电推力器，目前实际应用的电推力器产生的推力较小，一般在几十到几百毫牛顿量级。随着高效太阳能技术和空间核电技术的不断发展，以及气体放电及加速理论研究的不断深化，电推进的推力和比冲将不断提高，推力有望达到牛顿量级甚至更高，比冲可以达到上万秒。

## 2. 电推进的分类

按照电推进的工作原理，传统上把电推进分为电热式、静电式和电磁式三大类，每一类又包含数种不同的类别，如图 1-2 所示。其中，电热式推进是利用电热方式提高推进剂能量并通过喷嘴加速产生推力；静电式推进是利用静电场加速推进剂的方式产生推力；电磁式推进是利用电磁场加速推进剂的方式产生推力。



图 1-2 电推进分类示意图

## 3. 电推进的特点

目前，电推进系统几乎可以完成除航天器发射以外的所有空间推进任务。相比传统的空间化学推进，电推进具有诸多显著优势，主要包括：

- ① 比冲高、相同任务消耗推进剂少，可以有效提高航天器载荷比。
- ② 单机提供总冲高、寿命长，可以有效提高航天器在轨工作寿命。
- ③ 可长时间连续工作，提供连续变化推力，控制精度高，完成化学推进无法完成的科学探测任务。
- ④ 体积小，采用多台推力器组合，方便实现推力矢量调节。
- ⑤ 推力精确可控，有利于实现高精度的姿态和轨道控制。





⑥ 推力器启动过程对航天器产生更小的振动,是超静卫星平台的首要选择。

## 1.1.2 典型电推进简介

### 1. 电阻加热推力器

电阻加热推力器的工作原理与实物如图 1-3 所示。推进剂气体流过电阻加热器,温度升高后经喷嘴喷出,产生推力。它具有结构简单、造价低廉、可靠性高的特点,适用于小型、低成本航天器的轨道调整、高度控制和位置保持。只要不与电阻加热器材料发生化学反应,几乎所有气体都可用作推进剂;在空间站也可用各种生物废气、废料作推进剂,实现资源重复利用。

目前,典型的电阻加热推力器推进剂为肼,一般功率为 300~500 W,比冲可达 300 s,推力可达 500 mN。

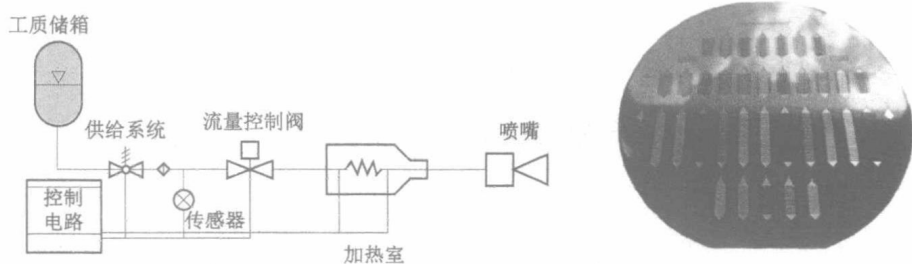


图 1-3 电阻加热推力器的工作原理与实物

### 2. 电弧加热推力器

电弧加热推力器的工作原理与实物如图 1-4 所示。兼作喷嘴的阳极与上游中心的阴极之间加直流电压,在喷嘴喉部附近产生的高温电弧对推进剂进行加热,加热后的高温气体(包含少量的等离子体)从喷嘴喷出,产生推力。电弧

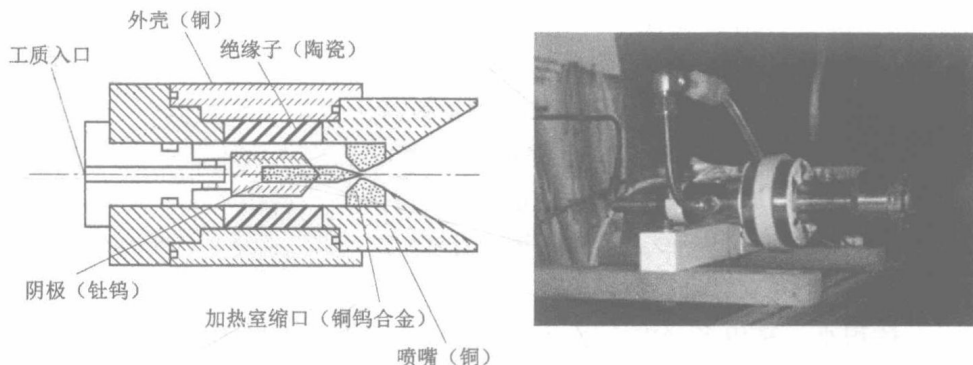


图 1-4 电弧加热推力器的工作原理与实物