

空间电推进科学与技术丛书

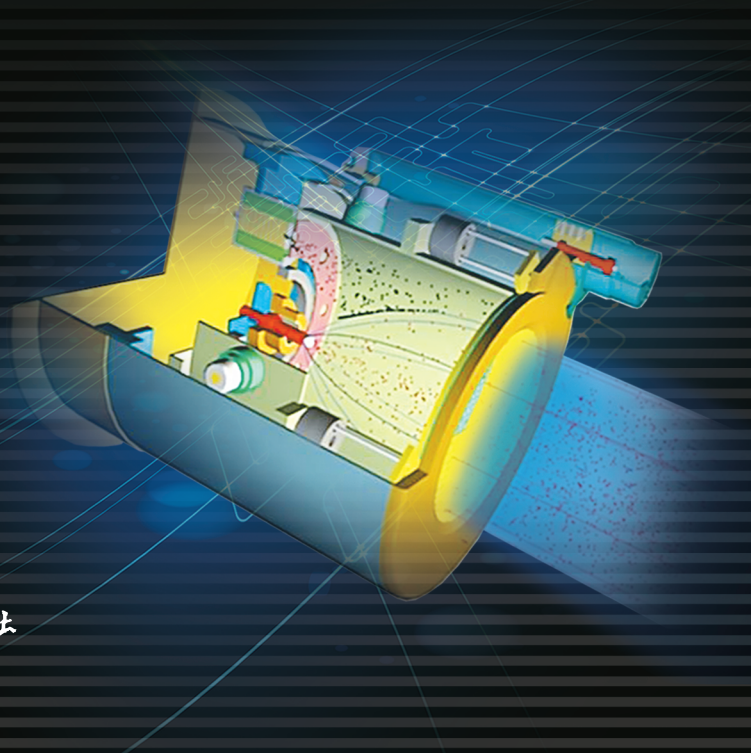
离子电推进物理

PHYSICS OF ION ELECTRIC PROPULSION

张天平 贾艳辉 郭宁 顾左等 编著



科学出版社



空间电推进科学与技术丛书

离子电推进物理

Physics of Ion Electric Propulsion

张天平 贾艳辉 郭宁 顾左 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要涉及离子电推进的基本概念、物理原理、物理过程、技术基础及方法等方面。全书共9章:第1章离子电推进概念,第2章气体放电与气体击穿,第3章等离子体产生原理及方法,第4章基础低温等离子体物理,第5章电磁场中的等离子体运动学,第6章离子光学物理,第7章空心阴极物理,第8章材料物理及其表面过程,第9章数值计算基本方法。

本书适合离子电推进技术的研究人员和工程师、高校相关专业的教师和学生、航天技术爱好者等阅读,可作为研究生教材或教学参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

离子电推进物理 / 张天平编著. —北京: 科学出版社, 2019. 12

(空间电推进科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-063231-9

I. ①离… II. ①张… III. ①离子电流—电推进
IV. ①V514

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 250645 号

责任编辑: 徐杨峰 / 责任校对: 谭宏宇

责任印制: 黄晓鸣 / 封面设计: 殷 靓

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

苏州市越洋印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 12 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2019 年 12 月第一次印刷 印张: 19

字数: 370 000

定价: 150.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

空间电推进科学技术丛书

编写委员会

顾 问

戚发轫 周志成

主 编

于达仁

副主编

蔡国飙 魏延明

编 委

(以姓名笔画为序)

丁永杰 王 敏 宁中喜 成渭民 刘 辉 汤海滨
李 永 张久兴 张天平 武志文 洪延姬 曹 勇
康小明 康小录

丛书序



喷气推进通过将工质流高速向后喷出,利用动量守恒原理产生向前的反作用力使航天器运动变化,在此过程中消耗质量和能量。根据能量供应的形式,可以分为基于燃料化学能的化学推进和基于外部电能源的电推进。电推进的设想由俄国物理学家齐奥尔科夫斯基和美国物理学家罗伯特·戈达德分别在 1902 年和 1906 年提出,与传统化学火箭提出时间基本一致。但是由于其技术复杂性和空间电功率等限制,早期电推进的发展明显滞后于化学推进。20 世纪 50 年代,美国和苏联科学家对电推力器进行了理论研究,论证了空间电推进的可行性,并开始了电推进技术的工程研究。1960~1980 年是电推进技术成熟发展并开始应用的主要发展阶段,几位电推进的先驱者留下了探索的足迹。

空间飞行器对燃料消耗量非常敏感,推进器的比冲成为最重要的性能指标。化学推进受到推进剂焓能限制和耐高温材料的制约,比冲达到 340 s 水平后几乎再难以大幅度提升;电推进可以借助于外部电能,突破传统化学推进比冲的极限,目前已经很普遍地达到 1 000~3 000 s 的高比冲,并且远未达到其上限。

电推进由于其高比冲、微推力等主要特征,在长寿命卫星、深空探测、无拖曳控制等航天工程中正日益发挥极其突出的作用,成为航天推进技术的前沿,受到世界各国的重视;智慧 1 号探月卫星、隼鸟号、深空 1 号、全电推进卫星等的成功应用,标志着电推进技术逐渐走向成熟,在未来航天领域的重要性日益凸显;中国的电推进经过了漫长的发展储备期,在离子推进、霍尔推进、电弧推进、脉冲等离子体推进等方面取得了坚实的进展,2012 年实践 9 号卫星迈出了第一个空间验证的步伐,此后实践 13、实践 17 等卫星进入了同步轨道应用验证和工程实施阶段。

我国电推进的学术交流蓬勃发展,其深度、广度和影响力持续提高,电推进学会发展走入正轨,对促进电推进技术的知识共享、扩大影响、壮大队伍、加快技术进步发挥了巨大的作用。

在此背景下,我国电推进行业的发展和人才培养急需一套电推进技术领域的专业书籍,科学出版社和中国宇航学会电推进技术专业委员会合作推出了这套丛书,希望这套丛书的出版,对我国航天推进领域科学技术的发展起到推动作用。

丛书在编辑过程中得到北京控制工程研究所、上海空间推进研究所、兰州空间技术物理研究所、北京理工大学、北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、空间技术研究院通信卫星事业部、航天工程大学、西安微电子技术研究所、合肥工业大学、上海交通大学等单位的大力支持,对此表示感谢。

由于电推进技术处于快速发展中,丛书所包括的内容来不及涵盖最新的进展,书中的不足之处在所难免,敬请广大读者和同行批评指正。

丛书编委会

2019 年 7 月

前 言

离子电推进是最重要的电推进类型之一,作为航天器应用的先进推进技术,它具有高的比冲和效率、精确便利的性能调控性、很好的技术成熟度和宽广的航天工程适用范围。在国际电推进技术 110 多年的历史中,离子电推进的发展始终最具代表性和领先性:从 1906 年提出电推进原始概念到 1959 年首先研制出考夫曼型离子电推进样机,从 1964 年率先开展空间轨道长期飞行验证到 1997 年开始实现航天器型号的正式应用,当前国际离子电推进的应用范围几乎涉及航天任务的各个领域。

中国离子电推进技术研究始于 1974 年。在过去 45 年的发展历程中,兰州空间技术物理研究所以不忘初心、锲而不舍的精神,在持续开展离子电推进基础研究和攻关的基础上,先后开发研制出多款离子电推进的原理样机、工程样机、飞行产品。自 2012 年以来,兰州空间技术物理研究所研制的离子电推进产品成功实现空间飞行验证和通信卫星型号正式应用,为中国航天步入电推进时代做出了重要贡献。

建设航天强国的冲锋号已经吹响。我国航天工程发展对离子电推进的需求更加迫切,离子电推进产品在我国航天器型号中的应用更为宽广,离子电推进技术在我国未来的发展应持续深化,创新离子电推进技术支撑未来航天工程发展的新时代已经来临。为此,兰州空间技术物理研究所组织专家学者和工程技术人员,编写《离子电推进物理》、《离子电推进技术》和《离子电推进工程》,以期能够有助于进一步推动我国离子电推进的持续蓬勃发展,支持和鼓励更多青年人投身于我国离子电推进的技术创新中。

本书以离子电推进所涉及的物理原理、物理过程、技术基础及方法等为主要内容。在本书编写过程中,张天平、贾艳辉、郭宁、顾左负责全书的策划、统筹和审定,贾艳辉和吴辰宸负责编写第 1 章,刘莉娟负责编写第 2 章,刘莉娟和杨三祥负责编写第 3 章,罗兵负责编写第 4 章,吴先明和温晓东负责编写第 5 章,贾连军负责编写第 6 章,贾艳辉和谷增杰负责编写第 7 章,孙新锋和刘超负责编写第 8 章,杨乐和陈娟娟负责编写第 9 章,罗兵参与编写第 3 章部分内容,杨三祥和刘超负责完成

符号表和校对。

本书的出版,离不开众多人员的辛劳和贡献,在此一并表示诚挚感谢。特别感谢“空间电推进科学与技术丛书”编委会专家对本书内容和编写质量的审查把关,以及兰州空间技术物理研究所耿海、田立成、杨福全、李娟、江豪成、王小永等的修改建议。

限于编者自身的知识水平和写作能力,本书难免会有疏漏和不足之处,恳请关心和关注我国离子电推进发展的各界专家、学者、工程技术人员和读者不吝批评指正。

张天平

2019年9月11日

目 录

丛书序

前言

第 1 章 离子电推进概念

1.1 空间电推进及特点	001
1.1.1 火箭推进原理与火箭方程	001
1.1.2 比冲的定义及其意义	002
1.1.3 空间电推进的概念	004
1.2 离子电推进工作原理	007
1.2.1 离子电推进的工作原理及分类	007
1.2.2 离子电推进工作过程的物理解析	008
1.2.3 离子电推进的技术特点	010
1.3 离子电推进物理概要	013
参考文献	014

第 2 章 气体放电与气体击穿

2.1 气体放电	015
2.1.1 气体放电定义及分类	015
2.1.2 气体放电伏-安特性	016
2.1.3 气体放电相似性原理	017
2.1.4 混合气体电离	022
2.2 气体击穿	023

2.2.1	气压和间距对气体击穿的影响	024
2.2.2	杂质气体对击穿电压的影响	025
2.2.3	影响击穿的其他因素	028
2.3	气体放电中的带电粒子	029
2.3.1	带电粒子的产生	029
2.3.2	带电粒子的消失	033
2.4	气体放电粒子间相互作用	037
2.4.1	弹性碰撞	037
2.4.2	非弹性碰撞	041
2.5	带电粒子在气体中的运动	044
2.5.1	热运动	044
2.5.2	扩散运动	046
2.5.3	漂移运动	048
2.5.4	双极性扩散运动	053
	参考文献	055

第3章 等离子体产生原理及方法

3.1	气体放电概述	057
3.1.1	气体放电中的碰撞过程	057
3.1.2	磁场对碰撞的影响	059
3.1.3	低温离子源	059
3.2	直流放电	060
3.2.1	电晕放电	061
3.2.2	辉光放电	062
3.2.3	弧光放电	063
3.3	射频放电	065
3.3.1	射频等离子体基本定义和分类	065
3.3.2	射频等离子体源的功率馈入	066
3.3.3	射频等离子体源的电磁模型	067
3.3.4	射频等离子体源变压器模型	070
3.4	微波放电	072

3.4.1	微波等离子体基本定义和击穿条件	072
3.4.2	微波放电等离子体的特点	074
3.4.3	微波等离子体发生器的工作原理	075
3.5	螺旋波放电	076
3.5.1	天线耦合	077
3.5.2	螺旋波模式存在的条件	078
3.5.3	波功率的吸收: 加热	079
3.5.4	E-H-W 模式转换	082
3.6	等离子体中电磁波的传输特性	083
3.6.1	电磁波在非磁化等离子体中的传播	083
3.6.2	电磁波在磁化等离子体中的传播	086
	参考文献	089

第 4 章 基础低温等离子体物理

4.1	低温等离子体的基本概念	091
4.1.1	等离子体的定义及其分类	091
4.1.2	低温等离子体的应用	092
4.2	低温等离子体常用特征参量	093
4.2.1	等离子体基本参量	093
4.2.2	等离子体的几个特征参量	095
4.2.3	等离子体的准中性	096
4.3	低温等离子体运动学	100
4.3.1	等离子体运动方程	100
4.3.2	等离子体的热运动	102
4.3.3	等离子体的扩散——粒子输运	104
4.3.4	等离子体热传导和黏滞过程——能量和动量输运	106
4.4	等离子体约束边界物理	107
4.4.1	玻姆鞘	108
4.4.2	预鞘	109
4.4.3	C-L 鞘	110
4.4.4	双鞘	111

4.4.5 半开放边界	113
4.5 离子束流物理	115
4.5.1 正离子束流的中和	116
4.5.2 射流等离子体的传输	118
参考文献	120

第5章 电磁场中的等离子体运动学

5.1 带电粒子在均匀静态电磁场中的运动	122
5.1.1 带电粒子在均匀静电场中的运动	122
5.1.2 带电粒子在均匀静磁场中的运动	123
5.1.3 带电粒子在均匀静态电磁场中的运动	125
5.2 带电粒子在非均匀静态电磁场中的运动	128
5.2.1 带电粒子在非均匀静电场中的运动	128
5.2.2 带电粒子在非均匀静磁场中的运动	128
5.2.3 带电粒子在非均匀静态电磁场中的运动	130
5.3 带电粒子在时变电磁场中的运动	132
5.3.1 带电粒子在缓慢变化电场中的运动	132
5.3.2 带电粒子在随时间任意变化电场中的运动	133
5.3.3 带电粒子在时间变化磁场和空间变化电场中的运动	139
5.4 电磁场中的等离子体输运理论	141
5.4.1 等离子体输运的一般理论	141
5.4.2 无磁场时等离子体的输运特性	143
5.4.3 均匀稳恒磁场中等离子体的输运系数	148
参考文献	152

第6章 离子光学物理

6.1 带电粒子光学基础	153
6.1.1 静电透镜	153
6.1.2 双栅离子光学原理	155

6.1.3	空间电荷效应	156
6.2	单级离子光学系统聚焦物理	161
6.2.1	离子束聚焦原理	161
6.2.2	过聚焦与欠聚焦	164
6.2.3	曲面离子光学边缘聚焦补偿	165
6.3	单级离子光学系统的加速物理	169
6.3.1	单荷离子加速	169
6.3.2	多荷离子和电荷交换离子影响	170
6.3.3	电子反流	173
6.4	多级离子光学系统物理	176
6.4.1	多级离子光学系统	176
6.4.2	双级加速离子光学系统的离子聚焦和离子加速	179
	参考文献	180

第7章 空心阴极物理

7.1	空心阴极基本概念	181
7.1.1	阴极及分类	181
7.1.2	空心阴极工作原理	182
7.2	空心阴极热电子发射物理	183
7.2.1	热电子发射	183
7.2.2	钨基体氧化钡的电子发射	184
7.2.3	LaB_6 材料电子发射	186
7.3	空心阴极工作过程物理	187
7.3.1	击穿放电点火过程	187
7.3.2	等离子体物理过程	189
7.3.3	热过程物理	195
7.3.4	半经验分析模型	202
7.4	空心阴极损耗与退化	208
7.4.1	发射体损耗过程	208
7.4.2	触持极损耗过程	211
7.4.3	空心阴极中毒	213

参考文献	215
------------	-----

第8章 材料物理及其表面过程

8.1 离子推力器材料及界面的基本问题	217
8.1.1 离子推力器基本结构及工作原理	217
8.1.2 离子推力器的特殊材料	218
8.1.3 离子推力器材料与等离子体的界面效应	221
8.2 离子电推进关键组件材料物理	223
8.2.1 永磁材料	223
8.2.2 栅极材料	228
8.2.3 空心阴极材料	232
8.3 载能离子与材料的相互作用	239
8.3.1 载能离子溅射	239
8.3.2 高能粒子轰击引发的二次电子发射	243
8.3.3 材料表面能量沉积	247
8.4 材料表面场击穿物理过程	250
8.4.1 真空环境下的电极表面场击穿物理	250
8.4.2 气体环境对表面击穿的影响	253
8.4.3 等离子体环境对表面击穿的影响	255
参考文献	258

第9章 数值计算基本方法

9.1 基本数值计算问题与数理方程	260
9.1.1 数值模拟必要性	260
9.1.2 数值模拟基本问题	260
9.1.3 数理方程和边界条件	261
9.1.4 数值模拟方法	263
9.2 有限差分计算方法	264
9.2.1 有限差分计算方法简介	264
9.2.2 离子推力器放电室磁场的有限差分计算模型	265

9.3 有限元计算方法	267
9.3.1 有限元计算方法简介	267
9.3.2 双栅极离子引出的有限元计算模型	268
9.4 随机抽样计算方法	270
9.4.1 随机抽样计算方法简介	270
9.4.2 随机抽样计算模型	271
9.5 PIC 方法	272
9.5.1 PIC 方法简介	272
9.5.2 四栅极离子引出的 PIC 计算模型	273
9.6 流体计算方法	276
9.6.1 流体计算方法简介	276
9.6.2 原子传输的流体计算模型	278
9.7 混合模拟方法	279
9.7.1 混合模拟方法简介	279
9.7.2 栅极溅射刻蚀混合计算模型	280
参考文献	284
 附录 氙原子的激发和电离反应方程式	 285
 符号表	 288

第 1 章

离子电推进概念

1.1 空间电推进及特点

1.1.1 火箭推进原理与火箭方程

火箭是一种依靠火箭发动机产生的反作用力推进的飞行器,其中,用于运载航天器的火箭称为运载火箭,用于运载军用炸弹的火箭称为火箭武器(无控制)或导弹(有控制)。在一般用语中,火箭也用作火箭发动机的简称。通常意义上的火箭发动机除上述应用外,还包括航天器发动机。火箭发动机可分为冷气、固体、液体、电推进、核能和激光推进等类型。在运载火箭、武器或航天器设计中,设计人员根据任务特点或需求,在不同的火箭发动机类型中进行择优选择。

火箭推进遵循作用力与反作用力原理。图 1-1 为火箭发动机的工作原理示意图,在火箭工作时,推进剂被高速喷出,进而产生与推进剂喷出方向相反的作用力,称为火箭的推力。



图 1-1 火箭发动机的工作原理示意图

在不考虑大气阻尼的理想条件下,火箭工作过程中系统与外界不存在动量交换,因此火箭遵循动量守恒定律,即单位时间内喷射出的推进剂产生的动量变化量与系统剩余部分动量变化量大小相等,方向相反(彭成荣,2011)。其可以表达为

$$dm_p v_{ex} = -M dv \quad (1-1)$$

根据牛顿第二定律,喷射出去的推进剂作用在火箭上的推力为

$$T = Ma = M \frac{dv}{dt} \quad (1-2)$$

根据式(1-1),推力 T 与消耗推进剂的关系式可以表示为

$$T = -v_{ex} \frac{dm_p}{dt} \quad (1-3)$$

假设火箭质量变化只与推进剂的消耗有关,则推进剂的质量消耗率与火箭的质量变化量相等。

$$\frac{dM}{dt} = \frac{dm_p}{dt} \quad (1-4)$$

将式(1-4)代入式(1-3)得

$$T = -v_{ex} \frac{dM}{dt} \quad (1-5)$$

联立式(1-5)和式(1-2)可得

$$M \frac{dv}{dt} = -v_{ex} \frac{dM}{dt} \quad (1-6)$$

式(1-6)还可以表示为

$$dv = -v_{ex} \frac{dM}{M} \quad (1-7)$$

因此,变质量火箭的速度变化率被表示为式(1-7)的数学表达。

假设火箭为直线运动, v_0 和 v_t 分别为火箭初/末速度, M_0 为火箭初始质量,对式(1-7)进行积分可以得到火箭速度增量与推进剂消耗量的关系,为

$$\int_{v_0}^{v_t} dv = -v_{ex} \int_{M_0}^{M_0-m_p} \frac{dM}{M} \quad (1-8)$$

式(1-8)的解为

$$v_t - v_0 = \Delta v = v_{ex} \ln \left(\frac{M_0 - m_p}{M_0} \right) \quad (1-9)$$

式(1-9)是火箭推进原理最基本的数学表达,称为火箭方程,该式于1903年由俄国科学家康斯坦丁·爱德华道维奇·齐奥尔科夫斯基(Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky)推导得出,因此该式又称为齐奥尔科夫斯基公式。

1.1.2 比冲的定义及其意义

由式(1-9)可知,火箭喷射速度 v_{ex} 越大,产生相同的速度增量 Δv 所消耗的推进剂质量越小,这也可表述为,在保证工作 t 时系统剩余质量相同时,所产生的 Δv 越大。因此,可以简单理解为推进剂喷射速度越大,火箭的推进效率越高。

在工程中,比冲是与推进剂喷射速度有最直接关系的火箭性能指标,是推进剂喷射速度 v_{ex} 的另一种表征,通俗的表达式为