



★ ★ ★ ★ ★
★ “十三五” ★

国家重点出版物出版规划项目



国之重器出版工程

国防现代化建设

空间科学与技术研究丛书

Introduction to
Space Particle Beam Technology

空间粒子束技术 应用概论

方进勇 编著

空间粒子束技术应用概论

Introduction to Space Particle Beam Technology

方进勇 编著

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

内 容 简 介

本书围绕粒子束技术空间应用,分为四个部分进行论述。第一部分由第1、2章组成,主要介绍粒子束技术发展现状及空间应用的局限性,重点介绍了空间电子型粒子束定向能装置的基本概念;第二部分由第3~5章组成,重点介绍了粒子束空间应用机理、空间环境及粒子束空间传输等;第三部分由第6~12章组成,分别介绍了空间电子型粒子束定向能装置系统的组成、加速器技术、微波源技术、捕获跟踪瞄准技术、天基系统散热、粒子束装置空间应用场景及应用模式等内容;第四部分由第13、14章组成,重点对粒子束空间防护问题进行了探讨,同时对粒子束空间拓展应用进行分析,主要包括空间X射线雷达、空间X射线通信、基于空间自由激光的大功率THz源技术等。

本书作者系统总结和归纳了当前粒子束空间应用的主要障碍和技术难点,并在自身理解和认识的基础上提出了粒子束空间应用的新概念和新思路,并进行了系统讨论。本书可作为空间粒子束技术领域,尤其是空间安全相关技术研究人员和工程技术人员的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

空间粒子束技术应用概论 / 方进勇编著. —北京:北京理工大学出版社, 2020.7

(空间科学与技术研究丛书)

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

ISBN 978-7-5682-8809-5

I. ①空… II. ①方… III. ①粒子束 IV. ①TL501

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第137169号

出 版 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 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 / 北京捷迅佳彩印刷有限公司

开 本 / 710毫米×1000毫米 1/16

印 张 / 28.5

字 数 / 495千字

版 次 / 2020年7月第1版 2020年7月第1次印刷

定 价 / 128.00元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

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

《国之重器出版工程》 编辑委员会

编辑委员会主任：苗 圩

编辑委员会副主任：刘利华 辛国斌

编辑委员会委员：

冯长辉	梁志峰	高东升	姜子琨	许科敏
陈 因	郑立新	马向晖	高云虎	金 鑫
李 巍	高延敏	何 琼	刁石京	谢少锋
闻 库	韩 夏	赵志国	谢远生	赵永红
韩占武	刘 多	尹丽波	赵 波	卢 山
徐惠彬	赵长禄	周 玉	姚 郁	张 炜
聂 宏	付梦印	季仲华		



专家委员会委员（按姓氏笔画排列）：

- | | |
|-----|-----------------|
| 于全 | 中国工程院院士 |
| 王越 | 中国科学院院士、中国工程院院士 |
| 王小谟 | 中国工程院院士 |
| 王少萍 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 王建民 | 清华大学软件学院院长 |
| 王哲荣 | 中国工程院院士 |
| 尤肖虎 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 邓玉林 | 国际宇航科学院院士 |
| 邓宗全 | 中国工程院院士 |
| 甘晓华 | 中国工程院院士 |
| 叶培建 | 人民科学家、中国科学院院士 |
| 朱英富 | 中国工程院院士 |
| 朵英贤 | 中国工程院院士 |
| 邬贺铨 | 中国工程院院士 |
| 刘大响 | 中国工程院院士 |
| 刘辛军 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 刘怡昕 | 中国工程院院士 |
| 刘韵洁 | 中国工程院院士 |
| 孙逢春 | 中国工程院院士 |
| 苏东林 | 中国工程院院士 |
| 苏彦庆 | “长江学者奖励计划”特聘教授 |
| 苏哲子 | 中国工程院院士 |
| 李寿平 | 国际宇航科学院院士 |



- 李伯虎** 中国工程院院士
- 李应红** 中国科学院院士
- 李春明** 中国兵器工业集团首席专家
- 李莹辉** 国际宇航科学院院士
- 李得天** 国际宇航科学院院士
- 李新亚** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
中国机械工业联合会副会长
- 杨绍卿** 中国工程院院士
- 杨德森** 中国工程院院士
- 吴伟仁** 中国工程院院士
- 宋爱国** 国家杰出青年科学基金获得者
- 张彦** 电气电子工程师学会会士、英国工程技术
学会会士
- 张宏科** 北京交通大学下一代互联网互联设备国家
工程实验室主任
- 陆军** 中国工程院院士
- 陆建勋** 中国工程院院士
- 陆燕荪** 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、
原机械工业部副部长
- 陈谋** 国家杰出青年科学基金获得者
- 陈一坚** 中国工程院院士
- 陈懋章** 中国工程院院士
- 金东寒** 中国工程院院士
- 周立伟** 中国工程院院士



- 郑纬民 中国工程院院士
郑建华 中国科学院院士
屈贤明 国家制造强国建设战略咨询委员会委员、工业
和信息化部智能制造专家咨询委员会副主任
项昌乐 中国工程院院士
赵沁平 中国工程院院士
郝 跃 中国科学院院士
柳百成 中国工程院院士
段海滨 “长江学者奖励计划”特聘教授
侯增广 国家杰出青年科学基金获得者
闻雪友 中国工程院院士
姜会林 中国工程院院士
徐德民 中国工程院院士
唐长红 中国工程院院士
黄 维 中国科学院院士
黄卫东 “长江学者奖励计划”特聘教授
黄先祥 中国工程院院士
康 锐 “长江学者奖励计划”特聘教授
董景辰 工业和信息化部智能制造专家咨询委员会委员
焦宗夏 “长江学者奖励计划”特聘教授
谭春林 航天系统开发总师



前 言

粒子束技术是人类利用电磁手段对各种粒子进行加速，使粒子携带超高能量，利用超高能量的粒子进行物质结构探索或军事应用的技术总称。粒子进行加速后，可利用粒子与物质相互作用对原子级的物质结构进行探索，或可利用高能粒子产生X射线、激光、高功率微波等进一步扩展其应用领域。

粒子束技术的一个重要应用领域是军事方面，也可称为粒子束定向能系统。无论是地基、空基还是天基，传统粒子束技术的军事应用受到多方面限制。首先，受其损伤效应机理限制。传统粒子束系统主要基于热烧蚀的损伤机理，技战术指标对加速器、搭载平台、能源供给等都提出了灾难性的要求。其次，受到高能、强流粒子束空间传输限制。粒子束能量巨大，在近地空间由于空气的存在，必定会出现传输中严重的空气击穿问题，使波束截止。另外，强流非电中性粒子束在库仑力作用下的远程扩散问题也很难解决。在外层空间，空气击穿的问题可以避免，但同样存在非电中性粒子束在库仑力作用下的远程扩散问题。此外，地球磁场的影响也会给粒子束的远程传输带来极大的不确定性。最后，受到工程能力限制。构成粒子束定向能系统的加速器、粒子源和姿态推进器都需要配套供电电源，对于采用热毁伤机理的粒子束定向能系统，粒子束粒子能量需要达到GeV量级，束流kA量级，在加速器技术没有颠覆性突破的情况下，GeV量级的粒子束定向能系统在可预见的未来很长时期内都很难能够像强激光系统及高功率微波系统一样在地面及空间得以应用。

紧紧围绕粒子束技术未来潜在的空间应用，本书分为四个部分进行详细论述。第一部分包括2章内容，主要介绍粒子束技术发展现状及其军事应用的局



限性，重点介绍了空间电子型粒子束系统的基本概念；第二部分由3章内容组成，重点介绍了自然条件下能量电子与目标的相互作用、空间环境及粒子束空间传输问题等，简要分析了粒子束技术空间应用的潜在方向；第三部分共包括7章内容，分别介绍了空间电子型粒子束系统组成、加速器技术、脉冲功率源技术、天基热控技术及电子束系统空间电子补给技术等，以高能电子束系统应用于空间碎片清除为例进行了详细技术分析，对空间碎片捕获、跟踪、瞄准技术进行了简要介绍，该部分内容着力解决粒子束系统空间应用的工程化问题；第四部分由2章内容组成，重点对粒子束空间防护问题进行了探讨，同时对粒子束空间拓展应用进行了简要分析，包括空间X射线雷达、空间X射线通信、基于空间自由激光（FEL）的大功率太赫兹（THz）源技术等，这些新技术也许在不久的将来会逐渐成为粒子束空间应用新的支撑点，进而开创出粒子束技术空间应用的新领域。

本书由黄文华研究员指导编写了第1章及第8章内容，其余章节由方进勇编写并对全书进行了统稿。在成书的过程中，张颖军参与了第1章、第2章及第14章部分内容的编写，古松参与了第3章及第11章部分内容的编写，彭凯参与了第5章及第7章部分内容的编写，朱鹏参与了第8章、第9章及第12章部分内容的编写，王建军参与了第4章部分内容的编写，黄惠军参与了第6章部分内容的编写，王效顺参与了第10章部分内容的编写，孙静参与了第13章部分内容的编写。特别感谢西安交通大学张冠军教授及中国空间技术研究院崔万照研究员对本书的审阅并提出的宝贵建议。本书的编写还得到了空间微波技术国家重点实验室基金的资助，在此一并表示感谢。

在编写本书的过程中，参考了大量国内外有关著作和论文，并引用了部分图表及论述，在此对相关作者表示衷心的感谢。虽然我们竭尽全力，但囿于理解水平及能力所限，书中难免有不妥之处，敬请读者不吝批评指正。

作者



目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 粒子束技术	002
1.1.1 加速器的基本构成	003
1.1.2 加速器的发展现状	003
1.1.3 加速器的应用	005
1.2 粒子束技术的军事应用	008
1.2.1 粒子束武器发展现状	008
1.2.2 粒子束武器系统组成	011
1.2.3 粒子束武器核心技术	012
1.3 粒子束技术空间应用的局限性	015
1.3.1 毁伤机理	015
1.3.2 粒子束系统	016
1.3.3 传输问题	016
1.4 粒子束技术空间应用可能性分析	018
1.4.1 航天器技术构成发生显著变化	018
1.4.2 重离子型粒子束技术空间应用可行性分析	019
1.4.3 电子型粒子束技术空间应用可行性分析	019
1.5 小结	020
参考文献	021
第 2 章 空间电子型粒子束技术	023
2.1 硬毁伤的概念与内涵	025



2.1.1	硬毁伤所需能量	026
2.1.2	能量的时空分布对阈值的影响	028
2.1.3	“通用”硬毁伤标准	030
2.2	硬毁伤型空间电子束定向能装置参数设置	033
2.3	硬毁伤型空间电子束技术应用局限性	036
2.4	功能损伤的概念与内涵	039
2.5	小结	043
	参考文献	044
第3章	高能电子束与目标的相互作用	046
3.1	电子与材料原子的微观作用	049
3.1.1	电子的电离能损	050
3.1.2	电子的辐射能损	050
3.2	电子束与物质的相互作用	052
3.2.1	入射电子产生的信息	053
3.2.2	电子与固体作用产生的发射电子谱	054
3.2.3	电子吸收和射程	055
3.3	能量电子对介质材料的充放电现象	057
3.3.1	充放电机理	057
3.3.2	充放电建立条件	058
3.3.3	自然空间环境的充放电特点	060
3.3.4	充放电效应对航天器的影响	063
3.4	能量电子对半导体材料和器件的影响	066
3.4.1	电子对半导体材料和器件的作用机理	066
3.4.2	电子对半导体材料的影响实例	067
3.4.3	电子对NPN晶体管的辐照损伤实例	069
3.5	能量电子引起单粒子效应	073
3.6	能量电子对太阳能帆板的影响	077
3.6.1	太阳能电池简介	077
3.6.2	太阳能电池工作的基本原理	078
3.6.3	能量电子作用空间太阳能电池的失效原理	079
3.6.4	高能电子辐照对太阳能电池的影响实例	080
3.7	能量电子对微波部件的影响	088
3.7.1	能量电子对微波器件的影响机制	088



3.7.2	微放电效应建立的条件	089
3.7.3	微放电效应对航天器载荷的影响	091
3.7.4	能量电子引起的增强微放电效应	092
3.8	小结	096
	参考文献	098
第 4 章	空间环境	102
4.1	空间环境基础	103
4.1.1	引力场与微重力	103
4.1.2	真空	104
4.1.3	电离层	104
4.1.4	地球磁场与磁层	106
4.1.5	地球电场	108
4.2	空间辐射环境	109
4.2.1	带电粒子辐射	109
4.2.2	太阳电磁辐射	114
4.2.3	人工辐射	114
4.3	空间等离子体环境	116
4.3.1	等离子体的基本特性	116
4.3.2	等离子体环境	118
4.4	空间环境对航天器的影响	119
4.4.1	高能带电粒子环境的影响	120
4.4.2	空间等离子体环境的影响	122
4.5	空间磁场分类及特点	124
4.6	空间磁场建模	128
4.6.1	地球磁场建模	128
4.6.2	磁层磁场模型	132
4.6.3	磁场建模讨论	134
4.7	小结	136
	参考文献	137
第 5 章	粒子束空间传输	141
5.1	带电粒子束传输物理基础	142
5.1.1	单粒子动力学基础	142



5.1.2	束流特征参数	144
5.1.3	真空束流传输理论	145
5.1.4	虚阴极及限制电流	146
5.2	基于等离子体的空间传输理论	148
5.2.1	空间传输损耗	148
5.2.2	基于等离子体背景的束流扩散	150
5.2.3	电流中和效应	150
5.2.4	空间电荷效应	151
5.2.5	空间传输两大难点	151
5.2.6	空间传输其他重要问题	154
5.3	电子束空间传输解析方法	157
5.3.1	基于电荷中和的束流传输线性束理论	157
5.3.2	单粒子运动方程	157
5.4	PIC模拟方法	159
5.4.1	方法流程与物理基础	160
5.4.2	离散网格与离散时间模型	161
5.4.3	电磁场算法	162
5.4.4	宏粒子模型	163
5.4.5	粒子运动方程	164
5.4.6	粒子与场相互作用算法	165
5.4.7	方法应用讨论	169
5.5	小结	170
	参考文献	171
第6章	空间电子束系统	173
6.1	空间电子束系统组成	174
6.1.1	电子束加速系统	175
6.1.2	空间大功率微波源技术	175
6.1.3	空间碎片目标跟踪、瞄准与束流控制系统	176
6.2	空间电子束系统应用需考虑的其他问题	178
6.2.1	热控系统	178
6.2.2	电子产生与平台维持中性一体化技术	178
6.3	小结	180
	参考文献	181



第 7 章 电子束加速技术	183
7.1 加速器技术概述	184
7.1.1 加速器类型讨论	184
7.1.2 系统方案组成	185
7.2 行波电子直线加速器的基本原理	189
7.2.1 行波电子直线加速器的加速原理	189
7.2.2 行波电子直线加速器的主要参数	190
7.2.3 盘荷波导电磁场理论及计算	194
7.3 行波电子直线加速器物理设计	203
7.3.1 基本参数设计	203
7.3.2 耦合器	206
7.3.3 聚束段与加速腔	213
7.3.4 不同相位电子聚束与加速分析	214
7.3.5 物理参数与几何公差的关系	217
7.4 行波电子直线加速器聚焦系统设计	219
7.4.1 螺线管线圈	219
7.4.2 永磁体	221
7.5 束流集体不稳定性	222
7.6 空间加速器技术探讨	224
7.7 小结	226
参考文献	227
第 8 章 空间大功率微波源技术	229
8.1 大功率微波源在空间电子束系统中的地位与作用	230
8.2 空间大功率微波源的系统组成	232
8.3 初级能源系统	234
8.3.1 电源供给系统	234
8.3.2 储能系统	236
8.3.3 空间大功率微波源系统初级源方案简析	241
8.4 脉冲调制技术	244
8.4.1 脉冲调制器的分类	244
8.4.2 线型脉冲调制器	245
8.4.3 刚管调制器	247



8.4.4	全固态刚管调制器	248
8.4.5	空间大功率微波源系统脉冲调制器方案简析	252
8.5	微波管	253
8.5.1	微波管的类型	253
8.5.2	微波管的发展	256
8.5.3	空间大功率微波源系统微波管应用简析	259
8.6	空间大功率微波源辅助系统	260
8.6.1	控制系统	260
8.6.2	热控系统	261
8.7	空间 Ku 波段 MW 级微波源设计案例	263
8.7.1	参数及工作要求	263
8.7.2	系统设计	263
8.7.3	系统指标	269
8.8	小结	271
	参考文献	272
第 9 章	天基系统的热控技术	274
9.1	航天器空间热环境及热交换	275
9.1.1	航天器空间热环境	276
9.1.2	航天器的热交换	276
9.2	航天器常用热控技术	280
9.2.1	被动热控技术	280
9.2.2	主动热控技术	285
9.3	天基粒子束装置温控系统研究现状	288
9.4	天基电子束系统对热控系统的要求	291
9.5	大功率微波管的热控方法	293
9.6	空间高能电子加速器热控方法	295
9.7	小结	297
	参考文献	298
第 10 章	空间电子束系统电子补给技术	300
10.1	天基电子束系统的中性化概念	301
10.2	天基系统中性化常用方法	302
10.2.1	天基电中性化方法概述	302



10.2.2	等离子体或离子发射基本原理	304
10.2.3	等离子体产生方法	304
10.3	空间电子束系统电子补给需求	307
10.4	不同轨道高度空间电子补给能力	309
10.4.1	空间带电模型	309
10.4.2	空间带电物体中和模型	310
10.5	带电航天器补给电子能力	313
10.5.1	带正电物体中和模型	313
10.5.2	带负电物体中和模型	314
10.5.3	空间电子补给能力讨论	315
10.6	小结	317
	参考文献	318
第 11 章	利用电子束系统进行空间碎片清除	320
11.1	空间碎片概况	321
11.1.1	空间碎片	321
11.1.2	空间碎片危害	324
11.1.3	空间碎片研究范畴及方法	326
11.2	常用空间碎片清除方法	327
11.2.1	增阻离轨清除技术	328
11.2.2	非接触推移离轨清除技术	330
11.2.3	抓捕推移离轨清除技术	333
11.3	利用电子束系统进行碎片驱离原理	337
11.3.1	空间碎片的降轨模式及原理	337
11.3.2	电子束清除轨道碎片的方法	340
11.4	小结	345
	参考文献	346
第 12 章	空间碎片捕获、跟踪、瞄准技术	350
12.1	电子束系统清除空间碎片的工作流程	351
12.2	ATP 系统	353
12.2.1	系统组成及功能	353
12.2.2	ATP 系统模型	356
12.2.3	空间 ATP 系统应用简析	360



12.3	电子束空间波束控制	365
12.3.1	静电偏转控制系统	365
12.3.2	磁偏转控制系统	367
12.4	电子束空间传输对空间碎片瞄准的影响	369
12.5	小结	371
	参考文献	372
第 13 章	粒子束空间防护技术	374
13.1	空间粒子防护的基本手段	376
13.1.1	充放电防护技术	376
13.1.2	电离辐射防护	381
13.2	现有航天器防护存在的问题	386
13.2.1	静电防护存在的问题	387
13.2.2	电离辐射防护存在的问题	387
13.3	防护技术的发展	390
13.3.1	热传递速率的问题	390
13.3.2	屏蔽防护的厚度问题	393
13.3.3	介质电导率的问题	394
13.3.4	电子束诱发的航天器静电放电问题	395
13.4	小结	396
	参考文献	397
第 14 章	高能电子束其他空间应用	399
14.1	空间 X 射线雷达技术	400
14.1.1	基本原理	400
14.1.2	研究现状	401
14.1.3	存在的问题	406
14.1.4	发展趋势	406
14.2	空间 X 射线通信	407
14.2.1	基本原理	407
14.2.2	研究现状	407
14.2.3	存在的问题	411
14.2.4	发展趋势	411
14.3	小型化自由激光太赫兹源	413