



先进核电技术与核安全系列

“十二五”国家重点图书出版规划项目

核能与核技术出版工程

总主编 杨福家

空间核动力

Space Nuclear Power

苏著亭 杨继材 柯国土 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

先 进 核

安 全 系 列

“十二五”国家重点图书出版规划项目

核能与核技术出版工程

总主编 杨福家

空间核动力

Space Nuclear Power

苏著亭 杨继材 柯国土 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书是“十二五”国家重点图书出版规划项目“核能与核技术出版工程”之一。主要内容包括空间核动力的基本概念、分类、技术特点和实际应用;空间核动力的发展情况及趋势;空间核动力中的热电转换和材料选择;空间核动力的关键部件和重要实验设施;空间核动力的安全和可靠性问题;典型的、最具代表性的空间核动力装置等。

本书可供高校广大师生阅读,也可作为航天和核能工程技术领域专业技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

空间核动力 / 苏著亭, 杨继材, 柯国土编著. —上海: 上海交通大学出版社, 2016
核能与核技术出版工程
ISBN 978-7-313-14120-0

I. ①空… II. ①苏… ②杨… ③柯… III. ①空间科学—应用—核动力—研究 IV. ①TL99

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 278647 号

空间核动力

编 著: 苏著亭 杨继材 柯国土	地 址: 上海市番禺路 951 号
出版发行: 上海交通大学出版社	电 话: 021-64071208
邮政编码: 200030	
出 版 人: 韩建民	
印 制: 山东鸿君杰文化发展有限公司	经 销: 全国新华书店
开 本: 710 mm×1000 mm 1/16	印 张: 28.75
字 数: 480 千字	
版 次: 2016 年 1 月第 1 版	印 次: 2016 年 3 月第 2 次印刷
书 号: ISBN 978-7-313-14120-0/TL	
定 价: 138.00 元	

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0533-8510898

丛书编委会

总主编

杨福家(复旦大学原校长,中国科学院院士)

编委(按姓氏笔画排序)

于俊崇(中国核动力研究设计院,中国工程院院士)

马余刚(中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

马栩泉(清华大学核能技术设计研究院,教授)

王大中(清华大学原校长,中国科学院院士)

韦悦周(上海交通大学核科学与工程学院,教授)

申 森(上海核工程研究设计院,研究员级高工)

朱国英(复旦大学放射医学研究所,研究员)

华跃进(浙江大学农业与生物技术学院,教授)

许道礼(中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

孙 扬(上海交通大学物理与天文系,教授)

苏著亭(中国原子能科学研究院,研究员级高工)

肖国青(中国科学院近代物理研究所所长,研究员)

吴国忠(中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

沈文庆(中国科学院上海分院,中国科学院院士)

陆书玉(上海市环境科学学会副理事长,教授)

周邦新(上海大学材料研究所所长,中国工程院院士)

郑明光(上海核工程研究设计院院长,研究员级高工)

赵振堂(中国科学院上海应用物理研究所所长,研究员)

胡立生(上海交通大学电子信息与电气工程学院,教授)

胡思得(中国工程物理研究院,中国工程院院士)

徐步进(浙江大学农业与生物技术学院,教授)

徐洪杰(中国科学院上海应用物理研究所原所长,研究员)

黄 钢(上海健康医学院院长,教授)

曹学武(上海交通大学机械与动力工程学院,教授)

程 旭(上海交通大学核科学与工程学院,教授)

潘健生(上海交通大学材料科学与工程学院,中国工程院院士)

总 序

1896年法国物理学家贝可勒尔对天然放射性现象的发现,标志着原子核物理学的开始,直接导致了居里夫妇镭的发现,为后来核科学的发展开辟了道路。1942年人类历史上第一个核反应堆在芝加哥的建成被认为是原子核科学技术应用的开端,至今已经历了70多年的发展历程。核技术应用包括军用与民用两个方面,其中民用核技术又分为民用动力核技术(核电)与民用非动力核技术(即核技术在理、工、农、医方面的应用)。在核技术应用发展史上发生的两次核爆炸与三次重大核电站事故,成为人们长期挥之不去的阴影。然而全球能源匮乏以及生态环境恶化问题日益严峻,迫切需要开发新能源,调整能源结构。核能作为清洁、高效、安全的绿色能源,还具有储量最丰富、高能量密集度、低碳无污染等优点,受到了各国政府的极大重视。发展安全核能已成为当前各国解决能源不足和应对气候变化的重要战略。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》明确指出“大力发展核能技术,形成核电系统技术的自主开发能力”,并设立国家科技重大专项“大型先进压水堆及高温气冷堆核电站专项”,把“钍基熔盐堆”核能系统列为国家首项科技先导项目,投资25亿元,已在中国科学院上海应用物理研究所启动,以创建具有自主知识产权的中国核电技术品牌。

从世界来看,核能应用范围正不断扩大。目前核能发电量美国排名第一,中国排名第六;不过核能发电的占比方面,法国占比约74%,排名第一,中国仅约2%,排名几乎最后。但是中国在建、拟建和提议的反应堆数比任何国家都多。相比而言,未来中国核电有很大的发展空间。2015年为中国核电重启的关键年,据中国核能行业协会发布的最新数据显示,截至2015年6月底,中国投入商业运行的核电机组共25台,总装机容量为2334万千瓦。值此核电发展的历史机遇期,中国应大力推广自主开发的第三代以及第四代的“快堆”、

“高温气冷堆”、“钍基熔盐堆”核电技术,努力使中国核电走出去,带动中国由核电大国向核电强国跨越。

随着先进核技术的应用发展,核能将成为逐步代替化石能源的重要能源。受控核聚变技术有望从实验室走向实用,为人类提供取之不尽的干净能源;威力巨大的核爆炸将为工程建设、改造环境和开发资源服务;核动力将在交通运输及星际航行等方面发挥更大的作用。核技术几乎在国民经济的所有领域得到应用。原子核结构的揭示,核能、核技术的开发利用,是21世纪人类征服自然的重大突破,具有划时代的意义。然而,日本大海啸导致的福岛核电站危机,使得发展安全级别更高的核能系统更加急迫,核能技术与核安全成为先进核电技术产业化追求的核心目标,在国家核心利益中的地位愈加显著。

在21世纪的尖端科学中,核科学技术作为战略性高科技学科,已成为标志国家经济发展实力和国防力量的关键学科之一。通过学科间的交叉、融合,核科学技术已形成了多个分支学科并得到了广泛应用,诸如核物理与原子物理、核天体物理、核反应堆工程技术、加速器工程技术、辐射工艺与辐射加工、同步辐射技术、放射化学、放射性同位素及示踪技术、辐射生物等,以及核技术在农学、医学、环境、国防安全等领域的应用。随着核科学技术的稳步发展,我国已经形成了较为完整的核工业体系。核科学技术已走进各行各业,为人类造福。

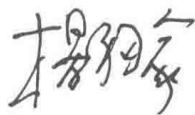
无论是科学研究方面,还是产业化进程方面,我国的核能与核技术研究与应用都积累了丰富的成果和宝贵经验,应该系统总结、整理一下。另外,在大力发展核电的新时期,也急需有一套系统而实用的、汇集前沿成果的技术丛书作指导。在此鼓舞下,上海交通大学出版社联合上海市核学会,召集了国内核领域的权威专家组成高水平编委会,经过多次策划、研讨,召开编委会商讨大纲、遴选书目,最终编写了这套“核能与核技术出版工程”丛书。本丛书的出版旨在:培养核科技人才;推动核科学研究和学科发展;为核技术应用提供决策参考和智力支持;为核科学研究与交流搭建一个学术平台,鼓励创新与科学精神的传承。

这套丛书的编委及作者都是活跃在核科学前沿领域的优秀学者,如核反应堆工程及核安全专家王大中院士、核武器专家胡思得院士、实验核物理专家沈文庆院士、核动力专家于俊崇院士、核材料专家周邦新院士、核电设备专家潘健生院士,还有“国家杰出青年”科学家、“973”项目首席科学家、“国家千人计划”特聘教授等一批有影响的科研工作者。他们都来自各大高校及研究单

位,如清华大学、复旦大学、上海交通大学、浙江大学、上海大学、中国科学院上海应用物理研究所、中国科学院近代物理研究所、中国原子能科学研究院、中国核动力研究设计院、中国工程物理研究院、上海核工程研究设计院、上海市辐射环境监督站等。本丛书是他们最新研究成果的荟萃,其中多项研究成果获国家级或省部级大奖,代表了国内甚至国际先进水平。丛书涵盖军用核技术、民用动力核技术、民用非动力核技术及其在理、工、农、医方面的应用。内容系统而全面且极具实用性与指导性,例如,《应用核物理》就阐述了当今国内外核物理研究与应用的全貌,有助于读者对核物理的应用领域及实验技术有全面的了解,其他书目也都力求做到了这一点,极具可读性。

由于本丛书良好的立意和高品质的学术成果,使得本丛书在策划之初就受到国家的重视,成功入选了“十二五”国家重点图书出版规划项目。另外,本丛书也受到上海新闻出版局的高度肯定,部分书目成功入选了“上海高校服务国家重大战略出版工程”。

在丛书出版的过程中,我们本着追求卓越的精神,力争把丛书从内容到形式上做到最好。希望这套丛书的出版能为我国大力发展核能技术提供上游的思想、理论、方法,能为核科技人才的培养与科创中心建设贡献一份力量,能成为不断汇集核能与核技术科研成果的平台,推动我国核科学事业不断向前发展。



2015 年 11 月

序

核能的发现和利用是 20 世纪最伟大的科技成就之一。在成功用于地面发电、水下潜艇推进等的同时,科学家们就对核能用于航天活动开始探索和研究。美国和苏联两个超级大国早在 20 世纪 60 年代就已将核能成功应用于太空,至今已累计发射 37 个装备空间核反应堆电源的航天器,在不同规模的航天活动中应用了 50 多个放射性同位素电源和数以百计的放射性同位素热源。并且,对核火箭发动机、核能飞机、核电推进等也进行了卓有成效的研究,取得了骄人的成果,开创了空间核动力研发的先河。

空间核动力技术融核能、航天、材料、信息、控制、环境等科学为一体,是一门综合性的前沿科学工程技术,是国家战略核心技术。它的研发和应用将对国防军事、民生经济、科学探索以及拓展人类生存空间、开发宇宙资源、增进人民福祉、推动社会进步产生重大影响。但从总体上看,空间核动力技术难度高、研制周期长、投入经费大,并且要切实保障核与辐射安全。因此,要研发空间核动力技术,就要制订好规划,组织好队伍,筹措好经费,建立起现代化的研究设施和手段,扎扎实实、坚持不懈、持之以恒地搞好基础研究和实验验证。同时,要注重国内协作,举全国之力,发挥国家综合技术实力;也要重视国际合作,掌握先进技术,站在前人的肩头之上。科学是没有国界的,空间核动力终将是全人类的共同事业!

本书的编著者苏著亭、杨继材、柯国土长期致力于核能事业,对先进核能尤其是空间核动力技术情有独钟。他们以独到的眼光,开阔的视野,科学的态度系统全面地介绍了国际上空间核动力的相关知识、发展和应用情况以及安

全和可靠性问题,完成了中国第一部关于空间核动力的著作。本书内容丰富,结构清晰,行文流畅,用词准确,兼具科学性、理论性、实用性和趣味性等突出特点,是一本很好的、值得一读的科技图书。40多年前,我国的核工业人圆了核动力“下五洋捉鳖”的海洋梦,我坚信本书的出版必将为实现空间核动力“上九天揽月”的飞天梦作出应有的贡献。



2015年8月1日

目 录

引言——从“万户飞天”说起	001
第 1 章 空间核动力概述	003
1.1 空间核动力概念	003
1.1.1 地球大气及其附近的空域	004
1.1.2 核能——为“原子能”正名	005
1.1.3 关于同核异能素的研究	007
1.2 空间核动力的分类	011
1.2.1 空间核热源	012
1.2.2 空间核电源	013
1.2.3 核推进	019
1.2.4 双模式(兼具供电和推进功能)空间核动力 系统	022
1.3 空间核动力的特点	025
1.3.1 空间核电源的技术特点	025
1.3.2 核推进的技术特点	039
1.3.3 双模式空间核动力的技术特点	042
1.4 空间核动力的应用	042
1.4.1 空间核热源的应用	043
1.4.2 放射性同位素电源的应用	043
1.4.3 空间核反应堆电源的应用	047
1.4.4 核推进的应用	054

参考文献	058
第2章 空间核动力发展情况及趋势	061
2.1 美国的发展概况	061
2.1.1 放射性同位素电源(RTG)	062
2.1.2 空间核反应堆电源	068
2.1.3 核热推进	081
2.1.4 核电推进	090
2.2 俄罗斯的发展情况	093
2.2.1 放射性同位素电源	093
2.2.2 空间核反应堆电源	094
2.2.3 核热推进	102
2.2.4 核电推进	111
2.3 其他国家的情况	117
2.3.1 法国的 ERATO 空间核反应堆电源	118
2.3.2 联邦德国的 ITR 空间核反应堆电源	119
2.3.3 意大利的 SPOCK 空间核反应堆电源	120
2.3.4 日本的 RAPID 星表核反应堆电源	121
2.3.5 巴西的 TERRA 空间核反应堆电源	121
2.4 美、苏/俄两国发展水平分析	121
2.4.1 美、苏/俄都把空间核动力视为战略核心技术	122
2.4.2 取得的重大成就	123
2.4.3 美俄两国发展水平比较	123
2.5 空间核动力的发展趋势	126
2.5.1 热源模块化、单机功率高、系统一体化的 ²³⁸ Pu 放射性同位素电源	127
2.5.2 大功率、长寿命的空间核反应堆电源	128
2.5.3 适用于月球和火星基地的星表核反应堆电站	128
2.5.4 以空间核反应堆电源为基础的核电推进系统	129
2.5.5 中小型核火箭发动机	129
2.5.6 双模式(电源/推进)空间核动力系统	130
参考文献	130

第 3 章 空间核动力中的热电转换	133
3.1 温差发电技术	133
3.1.1 温差发电器的原理与理论基础	134
3.1.2 温差发电器的性能参数	137
3.1.3 温差发电器电偶材料的特性参数	140
3.1.4 温差发电器设计应注意的几个问题	143
3.1.5 温差发电技术在空间的应用	146
3.2 热离子转换	148
3.2.1 热离子能量转换的原理和理论基础	148
3.2.2 热离子能量转换器的分类和特性	154
3.2.3 钍热离子能量转换器的电特性	162
3.2.4 提高热离子转换性能的途径	167
3.3 碱金属热电转换	172
3.3.1 碱金属热电转换器转换原理与运行参数	173
3.3.2 AMTEC 的工作方式和工质	177
3.3.3 碱金属能量转换在空间的应用	179
3.4 磁流体发电	180
3.4.1 磁流体发电的基本原理和循环系统	181
3.4.2 磁流体发电机的组成与应用	184
3.4.3 空间电源几种静态转换的比较	186
3.5 动态循环	187
3.5.1 朗肯循环	187
3.5.2 布雷顿循环	192
3.5.3 斯特林循环	196
参考文献	199
第 4 章 空间核动力中的材料	203
4.1 空间核动力中的核燃料	203
4.1.1 二氧化铀	204
4.1.2 碳氮化铀	210
4.2 空间核动力中的难熔金属	215
4.2.1 难熔金属单晶	217

4.2.2	难熔金属合金单晶	219
4.2.3	难熔金属的中子辐照	224
4.3	空间核动力中的绝缘材料	229
4.3.1	陶瓷单晶的性能	230
4.3.2	中子辐照性能	234
4.4	空间核动力的慢化剂材料	242
4.4.1	氢化锆	243
4.4.2	氢化钇	248
4.5	屏蔽材料	249
4.5.1	轻屏蔽材料	249
4.5.2	重屏蔽材料	255
4.6	热电直接转换中的功能材料	256
4.6.1	温差电偶材料	257
4.6.2	固体电解质材料	259
	参考文献	261
第5章	空间核动力的关键部件和实验设施	265
5.1	放射性同位素电源的关键部件	265
5.2	空间核反应堆电源的关键部件	267
5.2.1	热离子燃料元件(TFE)	267
5.2.2	铯蒸气供给系统	274
5.2.3	辐射屏蔽	278
5.2.4	转动控制鼓	282
5.2.5	热管(式)辐射冷却器	284
5.2.6	液滴(式)辐射冷却器	287
5.3	核火箭发动机的最核心部件——燃料元件	294
5.3.1	俄罗斯核火箭发动机的燃料元件	294
5.3.2	美国今后着重发展的 CERMET 金属陶瓷燃料 元件	297
5.4	核电推进系统的关键部件	299
5.4.1	电子轰击式离子发动机(900 系列,美国)	300
5.4.2	静态等离子体发动机(SPT-70,苏联)	303

5.5	热离子空间核反应堆电源的主要试验设施	306
5.5.1	“里克(Rig)”台架	306
5.5.2	“第一核电站”的堆内回路考验装置	308
5.5.3	“贝加尔”(Baikal)电加热综合试验台架	312
5.6	俄罗斯专门用于核热推进试验的反应堆	315
5.6.1	IGR 石墨脉冲堆	315
5.6.2	IVG-1 实验堆	317
5.6.3	IRGIT 试验原型堆	320
5.7	用于核火箭发动机及其主要部件实物试验的“贝加尔” 台架	321
5.7.1	“贝加尔”台架综合体的布置	322
5.7.2	“贝加尔”试验台架综合体的主试验楼	323
5.7.3	“贝加尔”试验台架综合体的功能特性	325
	参考文献	326
第6章	空间核动力的安全与可靠性	327
6.1	空间核动力的安全	327
6.1.1	空间核动力安全概念	327
6.1.2	历史上空间核动力的主要事故	328
6.1.3	国际上关于和平利用空间核动力的一些法规/ 规范/建议	331
6.1.4	空间核动力安全的特殊性	334
6.1.5	空间核动力安全的有关考虑	337
6.1.6	美国的空间核动力安全管理程序	347
6.2	空间核动力的可靠性	349
6.2.1	空间核动力可靠性概念	349
6.2.2	可靠性设计	350
6.2.3	可靠性评价	355
6.2.4	使用可靠性评价与改进	357
6.2.5	结论	368
	参考文献	370

第7章 空间核动力装置举要	371
7.1 最具代表性的空间核反应堆电源	371
7.1.1 ROMASHKA 空间核反应堆电源	371
7.1.2 BUK 空间核反应堆电源	373
7.1.3 TOPAZ 空间核反应堆电源	375
7.1.4 ENISEY(TOPAZ-2)空间核电源系统	378
7.1.5 SNAP-10A 空间核反应堆电源	383
7.1.6 SP-100 空间核反应堆电源	389
7.1.7 SPACE-R 热离子空间核反应堆电源	399
7.1.8 热管式火星/月球表面核反应堆电站 (HOMER)	408
7.2 最具代表性的核火箭发动机	412
7.2.1 俄罗斯的 RD-0410 核火箭发动机实验样机	412
7.2.2 小型核反应堆发动机(MITEE-Minature Reactor Engine)	416
7.3 最具代表性的双模式空间核动力系统	419
7.3.1 美国的 NEBA-3 双模式核火箭发动机	419
7.3.2 俄罗斯的兆瓦级空间核动力飞船	423
参考文献	431
结束语——人间正道是沧桑	433
索引	435
致谢	442

引言 ——从“万户飞天”说起

1945年,美国火箭专家赫伯特·S.基姆出版了《火箭与喷气发动机》一书。书中提到“大约在14世纪末,中国明朝有一个叫万户的人,在一把椅子上装了47支火箭,自己坐上去后用绳子绑紧,两手还各举一只大风筝。然后,让人把火箭点燃……”这位火箭专家认为万户是“试图利用火箭作为运载工具的第一人”。这件事情在当时的世界科技界引起了不小的轰动。清华大学的刘仙洲教授将其译为“万户飞天”。此后,英国、德国和苏联的一些火箭专家在他们的著作中也多次提到和引用了这个故事。



万户飞天

万户借助火箭推力升空的创想和实践,使他成为被世界公认的“真正的航天始祖”。20世纪70年代,为了纪念乘中国古代火箭飞天的万户,国际天文联合会将月球背面的一座环形山命名为“万户山”。应该说,“万户飞天”是极具创造性和富于想象的,他既考虑到火箭的推进力,也想到借用风筝的上升力。

他把当时世界上最先进的中国火箭技术和中国传统的风筝艺术戏剧性地结合在了一起。美国华盛顿国家航空航天博物馆正厅,陈列着中国古代的风筝与火箭模型。旁边的标牌中有这样一句话:“人类最早的飞行器是中国的风筝和火箭。”

现在,人类已经成功实现了载人航天,所用的能源动力除了化学能和太阳能外,还拓展使用了核能。在这里,我们把在航天活动中使用的“空间核能”统称为“空间核动力”。本书从7个方面比较详细地介绍了空间核动力科技领域的相关知识与大家分享,不妥之处望不吝指正。