



航天科技图书出版基金资助出版

太阳能发电卫星白皮书

—— URSI SPS 国际委员会工作组报告

URSI SPS 国际委员会工作组 著
侯欣宾 王 立 刘长军 黄卡玛 译



NLIC2970876013



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

太阳能发电卫星白皮书

——URSI SPS 国际委员会工作组报告

URSI SPS 国际委员会工作组 著

侯欣宾 王立 刘长军 黄卡玛 译



NLIC2970875013



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

太阳能发电卫星白皮书: URSI SPS 国际委员会工作组报告 / 侯欣宾等译. —北京: 中国宇航出版社, 2013. 3

书名原文: Report of the URSI Inter-Commission Working Group on SPS

ISBN 978 - 7 - 5159 - 0322 - 4

I. ①太… II. ①侯… III. ①太阳能发电—电站—研究报告 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 269219 号

著作权合同登记号: 图字: 01—2013—1386 号

责任编辑 黄 莘 责任校对 王 妍 封面设计 文道思

出版
发行

中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路 8 号 邮 编 100830
(010) 68768548

网 址 www.caphbook.com

经 销 新华书店

发行部 (010) 68371900 (010) 88530478 (传真)
(010) 68768541 (010) 68767294 (传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010) 68371105 (010) 62529336

承 印 北京画中国画印刷有限公司

版 次 2013 年 3 月第 1 版 2013 年 3 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230 开 本 1/32

印 张 9.625 字 数 265 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 0322 - 4

定 价 68.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的,旨在鼓励航天科技人员著书立说,不断积累和传承航天科技知识,为航天事业提供知识储备和技术支持,繁荣航天科技图书出版工作,促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定,由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作,航天工程技术著作,航天科技工具书,航天型号管理经验与管理思想集萃,世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著,向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次,资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站,点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表;也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址: <http://www.caphbook.com>

电话: (010) 68767205, 68768904

前 言

本报告由国际无线电科学联合会（URSI—Union Radio Scientific International）出版，URSI 希望通过这一白皮书，为太阳能发电卫星相关问题的深入讨论提供科学背景。URSI 是一个非盈利、非官方的科学家及工程师国际联合会，致力于无线电科学各个方面的研究。自 1919 年成立以来，URSI 就成为国际科学理事会（ICSU）成员，在无线电科学领域积累了丰富的知识和经验，是解决无线电科学相关问题的专门组织。

近年来，随着全球能源需求的持续增长，化石燃料燃烧所排放的二氧化碳成为全球变暖的主要原因。尽管存在与无线电应用相关的其他问题，目前仍是对长期以来在技术和理论上一直得到提议、研究，并被认为是一种清洁能源的太阳能发电卫星进行总体概述的最佳时机。URSI 是研究解决与太阳能发电卫星（SPS）相关、所有无线电科学疑问和问题的适合的国际组织，这些疑问和问题都在本白皮书中进行解释和讨论，而与无线电科学关系不大的部分，如卫星发射、运输及其他空间技术，仅作简单论述。

需要强调的是，URSI 并不完全提倡发展 SPS，在其内部也存在担心和保留意见。URSI 清楚地认识到，有责任为 SPS 提供必要的科学背景，并为公正、不带任何偏见地讨论 SPS 的利弊提供一个平台。URSI 于 2002 年成立了关于 SPS 的国际委员会工作组，工作组通过 3 年时间进行白皮书的准备工作。从 2005 年开始，报告的总结部分被提取出来称为“白皮书”。经过工作组内部认真的讨论，白皮书得到了科学委员会和国家委员会的认可，并发表在《无线电科学公报》上。其他成果为这份带有附件和补充材料的文件，提供了详

细的科学和技术信息。我们希望白皮书有助于迈出关于 SPS 利弊的技术和科学讨论的第一步。

报告由主报告和附件组成, 包括为白皮书的完整版本提供 CD 格式, 对于不包括附件在内的部分也提供印刷版本。

最后, 编者深深地感谢 N. Shinohara, S. Kawasaki, J. Mankins, N. Suzuki 及 L. Summerer 负责编写报告和附件的许多部分。感谢 Yahya Rahmat-Samii, T. Itoh, M. T. Rietveld, Mike Davis, James Lin, Q. Balzano, Y. Omura 及 Y. Mitani 编写报告的部分小节。感谢 M. Inoue, R. Schillizzi, D. Emerson, M. Ohishi, A. R. Thompson 和 W. van Driel 从射电天文方面提供帮助。同时还要感谢 P. Degauque, F. Lefeure, K. Schlegel, P. Wittke, R. M. Dickinson, T. Takano, M. Taki, D. Preble 和 K. Hughes 提出了很好的建议。附录 D 是日本 JAXA SSPS 委员会主席 H. Matsumoto 完成的日文报告的翻译稿, 一些部分被用于报告正文。感谢 M. Mori, H. Nagayama 和 Y. Saito 的管理工作, K. Toyama, M. Oda, S. Sasaki, M. Utashima, N. Shinohara, K. Hashimoto, T. Yoshida, M. Imaizumi, S. Toyama, H. Kawasaki 的编写和翻译校对工作, 以及 G. Maeda 的英语翻译工作。SPS 国际委员会工作组成员包括 A. C. Marvin, Y. Rahmat-Samii, T. Ohira, T. Itoh, Z. Kawasaki, S. C. Reising, M. T. Rietveld, N. Schinohara, D. T. Emerson, W. van Driel 和 J. Lin。

URSI 前主席

URSI SPS 国际委员会工作组主席

Hiroshi Matsumoto

URSI SPS 国际委员会工作组秘书

Kozo Hashimoto

目 录

第 1 章 太阳能发电卫星研发背景	1
1.1 未来 100 年的人类生活	1
1.2 未来 50 年的能源需求	1
1.2.1 化石燃料的需求和产量预测	1
1.2.2 化石燃料所排放的 CO ₂	5
1.3 京都议定书 (Kyoto Protocol) 与全球变暖	9
1.4 可持续能源	10
1.4.1 地面太阳能	10
1.4.2 水能	11
1.4.3 风能	11
1.4.4 生物质能	12
1.4.5 地热能	12
1.4.6 氢能	12
1.4.7 海洋热能	12
1.4.8 潮汐能	12
1.4.9 波能	13
1.5 作为可持续能源的太阳能发电卫星	13
1.6 核能	13
参考文献	14
第 2 章 太阳能发电卫星发展现状	16
2.1 SPS 的特征	16

2.1.1	基本概念	16
2.1.2	不排放 CO ₂ 的清洁能源	18
2.1.3	与地面光伏电站的比较	19
2.1.4	经济性	21
2.2	SPS 系统	22
2.2.1	空间段	22
2.2.2	地面段	23
2.3	SPS 关键技术	24
2.3.1	发射和运输	24
2.3.2	太阳能发电系统	28
2.3.3	热控技术	32
2.3.4	微波能量传输	35
2.3.5	目标检测和波束控制	43
2.3.6	整流天线和地面网络	46
2.4	SPS 研究: 技术发展现状	50
2.4.1	美国的研究	51
2.4.2	日本的研究	56
2.4.3	欧洲的研究	65
2.4.4	全球的活动	71
	参考文献	72
第 3 章	太阳能发电卫星无线电技术	82
3.1	微波能量传输技术	83
3.1.1	利用电磁波传输能量	83
3.1.2	Friis 传输方程的应用	85
3.1.3	微波能量传输的特征	85
3.2	微波器件	86
3.2.1	微波半导体	87

3.2.2 微波真空管	87
3.2.3 移相器和功率分配器	89
3.2.4 微波器件、电路和系统	89
3.3 波束控制	92
3.3.1 传输效率	92
3.3.2 单元之间的相位同步	92
3.3.3 反向导引	93
3.3.4 软件反向导引系统	94
3.3.5 天线阵列的振幅和相位误差的影响	94
3.3.6 目前的天线技术和未来发展预测	95
3.4 整流天线	95
3.5 测量和校准	96
3.5.1 地面和空间的巨型天线阵列测量	97
3.5.2 整流天线测量	97
3.5.3 天线增益和相位误差的自校准	97
3.5.4 SPS 天线测试项目	97
3.6 衍生技术	101
参考文献	104
第 4 章 太阳能发电卫星的影响和效应	108
4.1 与空间和大气之间的相互作用	108
4.1.1 大气的影响	108
4.1.2 电离层的影响	110
4.1.3 电推进对磁层的影响	112
4.2 与其他无线电业务和应用的兼容性	113
4.2.1 与射电天文等其他业务的兼容性	114
4.2.2 太阳能电池的反射和热发射	116
4.3 MPT 对人类健康和生物的效应	117

4.4	风险预防准则	120
4.5	SPS 的优点和缺点总结	120
4.5.1	SPS 的优势	120
4.5.2	SPS 的缺点	121
4.5.3	SPS 的其他问题	122
4.5.4	SPS 的优缺点问答	123
	参考文献	126
第 5 章	国际无线电科学联合会与太阳能发电卫星	130
5.1	技术	130
5.2	环境	131
第 6 章	深入阅读	133
附录 A	世界微波能量传输活动	136
A.1	早期的历史	136
A.2	美国的活动	140
A.3	加拿大的活动	140
A.4	日本的活动	141
A.5	欧洲的活动	143
	参考文献	144
附录 B	各种太阳能发电卫星模型	147
B.1	Glaser 的 SPS 概念方案	147
B.2	SPS 2000	148
B.3	太阳盘 (Solar Disc)	149
B.4	算盘反射器构型	151
B.5	NEDO 模型	151
B.6	JAXA 模型	152
B.7	发展路线图	153

参考文献	154
附录 C 美国的研究工作	155
前言	155
C.1 概述	156
C.1.1 什么是空间太阳能电站	156
C.1.2 为什么空间太阳能电站是一种重要的解决方式	157
C.1.3 最新 SSP 研究工作的主要结论	158
C.2 美国 SPS 和 SSP 活动简史 (1960~1970 年)	159
C.2.1 20 世纪 70 年代进行的太阳能发电卫星的研究	160
C.2.2 中断期 (20 世纪 80 年代~20 世纪 90 年代初) ...	162
C.3 NASA “Fresh Look” 研究 (1995~1997 年)	162
C.3.1 太阳塔方案	163
C.3.2 太阳盘方案	165
C.3.3 结论	166
C.4 SSP 概念定义研究 (1998 年)	166
C.5 SERT 计划 (1999~2000 年)	167
C.5.1 Abacus 方案	169
C.5.2 ISC 方案	170
C.5.3 SERT 计划的结束	170
C.6 NRC 评审 (2000~2001 年)	171
C.7 NASA—国际科学基金会 (NSF) —电力研究协会 (EPRI) 联合研究 (2001~2003 年)	171
C.8 NASA 近期的 SSP 及相关技术研发 (2004~2005 年)	172
C.9 总结和结论	173
C.9.1 一般性的发现	174
C.9.2 环境问题	177
C.9.3 广泛应用	178

C. 9. 4 未来发展方向	185
参考文献	189
附录 D 日本的研究工作	193
D. 1 JAXA 模型	193
D. 1. 1 2001 模型	193
D. 1. 2 2002 模型	194
D. 1. 3 2003 模型 (编队飞行 SPS)	196
D. 2 发射和运输	197
D. 2. 1 发射	197
D. 2. 2 运输	198
D. 3 太阳能发电	201
D. 3. 1 太阳能聚光器	201
D. 3. 2 发电技术	205
D. 4 热控技术	209
D. 4. 1 微波 SPS 的热控	209
D. 4. 2 热工况	210
D. 4. 3 能量转化模块的温度	213
D. 4. 4 减少太阳能电池上的热负荷	215
D. 5 SPS 的微波能量传输	218
D. 5. 1 与 SPS 相关的主要参数	218
D. 5. 2 微波发生器	220
D. 5. 3 微波天线	224
D. 5. 4 波束控制	225
D. 6 整流天线与地面段	229
D. 6. 1 微波接收器 (整流天线)	229
D. 6. 2 天线组件	230
D. 6. 3 整流电路	232

D. 6. 4	微波接收概述	233
D. 6. 5	整流天线研究的近期发展趋势	235
D. 6. 6	整流天线商业化相关问题	237
D. 6. 7	地面电网	238
D. 7	SPS 的经济性	239
D. 7. 1	SPS 成本模型	239
D. 8	环境与安全问题	245
D. 8. 1	运输过程	247
D. 8. 2	部署和维护过程	247
D. 8. 3	微波辐射传输的影响	247
D. 9	基于激光的 SPS 研究	249
D. 9. 1	激光能量传输	249
D. 9. 2	直接太阳能泵浦激光振荡	250
D. 9. 3	太阳能泵浦激光系统设计	252
D. 9. 4	L-SPS 参考模型	252
	参考文献	254
附录 E	欧洲的研究工作 (ESA 报告)	257
	摘要	257
E. 1	引言	258
E. 2	动机和框架	258
E. 2. 1	全球范围	258
E. 2. 2	欧洲范围	261
E. 3	目标	261
E. 3. 1	边界条件	262
E. 3. 2	综合: 空间系统和地面工厂	263
E. 4	欧洲的方法	263
E. 4. 1	欧洲空间太阳能发电研究网络	263

E. 4. 2	与地面太阳能发电专家的结合	263
E. 4. 3	电力消耗曲线	263
E. 4. 4	供应方案	263
E. 4. 5	发射成本	264
E. 5	参考系统——地面	265
E. 5. 1	光伏发电技术	265
E. 5. 2	太阳能热发电技术	266
E. 5. 3	储能系统	267
E. 5. 4	传输系统	267
E. 6	参考系统——空间	268
E. 7	对比结果	269
E. 7. 1	基础负载电力供给	269
E. 7. 2	非基础负载的能源供给	272
E. 7. 3	能量回收时间——主要的有效性因素	273
E. 8	结论	275
	参考文献	276
附录 F	URSI 十个科学委员会及其关注领域	279
F. 1	委员会 A: 电磁方法、电磁测量与标准	279
F. 2	委员会 B: 场和波, 电磁理论和应用	279
F. 3	委员会 C: 无线电通信系统与信号处理	280
F. 4	委员会 D: 电子学与光子学	280
F. 5	委员会 E: 电磁噪声与干扰	280
F. 6	委员会 F: 波的传输和遥感 (行星大气、表面和浅表层)	281
F. 7	委员会 G: 电离层无线电和传播 (包括电离层通信和电离介质的遥感)	281

F.8 委员会 H: 在等离子体中的波 (包括空间和实验室等 离子体)	282
F.9 委员会 J: 射电天文 (包括天体的遥感)	282
F.10 委员会 K: 生物学和医学中的电磁问题	282
英文缩写词	283

第 1 章 太阳能发电卫星研发背景^{*}

1.1 未来 100 年的人类生活

近期,人类的生活水平和人口数量呈爆炸式增长。事实上,20 世纪全球人口数量增长了 4 倍,而能源消耗却增加了 16 倍^[1],能源、食物和物质资源的消耗在未来 50 年中预计将增加 2.5 倍。人类对于更高质量生活的追求,导致人们在 21 世纪必须面对全球性的严重威胁人类生活、甚至直接影响人类在地球生存安全的问题,诸如全球变暖、环境恶化、二氧化碳(CO₂)含量升高所造成的陆地、海洋养分减少和化石燃料储量的快速减少。由于发展中国家的生活水平和人口数量持续增长,预计到 2050 年,人类对能源的需求将增加到目前的几倍。

1.2 未来 50 年的能源需求

目前人类的主要能源来自于化石燃料,如石油、煤和天然气。然而,化石燃料存在两个严重问题,使其不能长期作为主要能源。一是化石燃料有限的储量问题,如果按照目前或更快的速度消耗,化石燃料不能维持很久。二是化石燃料的燃烧会产生 CO₂,而 CO₂ 是一种温室气体,会导致全球变暖。

1.2.1 化石燃料的需求和产量预测

2004 年 11 月 9 日,一篇福布斯杂志(Forbes)的报告称,俄罗斯的石油出口量可能在未来两年内降低^[3]。一名俄罗斯专家说:“俄罗斯只有在石油价格合理的情况下才会增加出口”。2004 年 11 月 17

^{*} URSI SPS 国际委员会工作组不提供本书内容的翻译校正——译者注。

日, Arabicnews.com 网站报告称, 叙利亚的轻质原油出口预计将大幅减少^[4]。诸如此类的石油减产消息并不意外。M. K. Hubbert 在 1956 年就预测, 除阿拉斯加外, 美国的原油生产在 1969 年就会达到顶峰。图 1-1 表示了近年来全球的石油年产量和预测产量。其中, “米” 字符号代表的较浅曲线是根据 Campbell 和 Laherrere 的分析模型预测的结果, 该模型部分基于 Hubbert 曲线^[2]。美国和加拿大的石油产量在 1972 年达到顶峰, 这与 Hubbert 的预测相吻合。全球石油产量分别在 1973 年和 1979 年下降后恢复上升, 但可以看出全球石油产量在近几年持续下降。苏联的石油产量从 1987 年以来降低了 45%。波斯湾地区以外的石油产量顶峰正在来临。图 1-2 表示了最近的石油产量趋势, 与预测相吻合。开采一桶原油和 1 立方米天然气的成本正在持续地增加, 随之而来的能源支出上升可能会造成严重的、甚至是全球性的通货膨胀。根据 Exxon 石油公司的报告^[6], 到 2015 年, 工业部门每天的石油需求量要增加相当于 1 亿桶石油, 这一数值接近目前产量的 80%, 如图 1-3 所示。

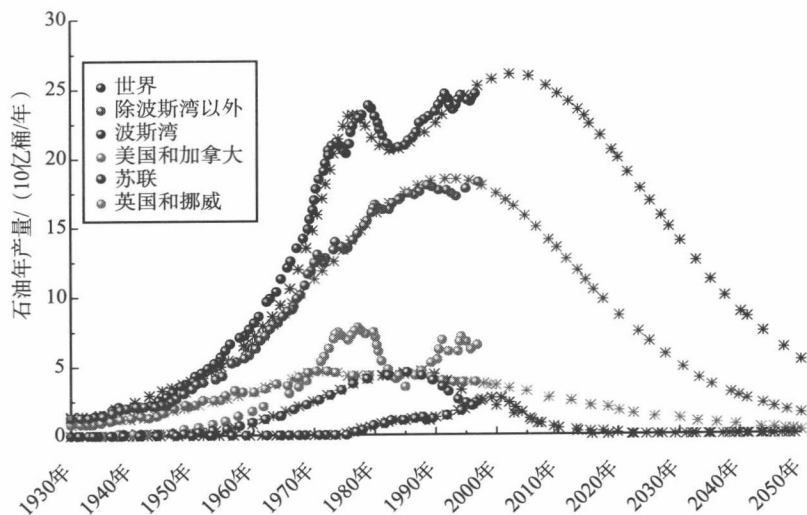


图 1-1 全球石油产量及预测曲线^[2]