



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

Space Wireless Power Transmission Technique

空间无线能量 传输技术

马海虹 李成国 董亚洲 吴世臣 禹旭敏 周宇昌 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

“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

空间无线能量传输技术

Space Wireless Power Transmission Technique

马海虹 李成国 董亚洲 著
吴世臣 禹旭敏 周宇昌

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

内 容 简 介

空间无线能量传输技术不仅可以推动空间太阳能电站发展,而且可以解决分布式可重构卫星、月球基地等特殊应用供电需求难题。作者基于“863”等多个课题研究成果,总结国内外技术发展及应用的基础上,结合空间无线能量传输工程应用需求,编写此书。第1章介绍了无线能量传输技术分类及特点,分析了国内外无线能量传输技术发展动态及应用前景。第2章研究了天线能量传输理论及设计方法。第3章介绍了大功率发射机的种类、技术方案和典型设计方法。第4章内容包括微波无线能量接收整流技术方案和实现途径。第5章研究了空间无线能量传输系统组成、传输理论和系统链路效率。第6章内容包括激光无线能量传输技术及国内外发展概况。第7章简要介绍了国内外典型的空间无线能量传输试验情况,以及一种高效微波无线能量传输演示验证系统。

本书将空间无线能量传输基础理论和工程应用相结合,实用性强,适合从事空间无线能量传输技术工作的工程技术人员、科研人员使用,亦可供科研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

空间无线能量传输技术/马海虹等著. —北京:北京理工大学出版社, 2019.2

(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 978-7-5682-6698-7

I. ①空… II. ①马… III. ①空间科学-能量传递-研究 IV. ①V419

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第019790号

出版发行/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/北京地大彩印有限公司

开 本/710毫米×1000毫米 1/16

印 张/22.25

字 数/400千字

版 次/2019年2月第1版 2019年2月第1次印刷

定 价/108.00元

责任编辑/刘 派

文案编辑/刘 派

责任校对/周瑞红

责任印制/边心超

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

21 世纪人类面临着非常严峻的能源形势，通过大规模开发利用太阳能将有望解决人类的能源危机。随着空间无线能量传输技术、高效能量转换技术、空间超大型结构天线及在轨服务等关键技术的快速发展，空间太阳能电站作为高效利用太阳能的有效途径，受到了国内外广泛关注。其中，无线能量传输技术是空间太阳能电站建设的核心技术之一，其技术发展必将推动我国空间太阳能电站的快速发展。

近年来，我国科研人员自主创新，系统地开展了空间无线能量传输技术研究，取得了重要研究成果。中国空间技术研究院承担了我国空间无线能量传输的较多科研任务，特别是承担了民口“863”模块航天器间无线能量传输课题，通过对分布式可重构卫星系统模块航天器间无线能量传输技术的研究，为我国后续空间无线能量传输技术的研究提供了较好的理论和工程研制方面的支持。

空间无线能量传输技术涉及高效率能量转化、高性能聚焦天线、高效率整流等关键技术，技术复杂，系统实现难度大，需要研究所和高校等科研机构密切合作，进行广泛深入的学术交流。及时归纳总结空间无线能量传输技术研究成果，编写专业著作，可以为从事空间无线能量传输技术研究的科研人员提供理论和技术支持，推动我国空间无线能量传输技术发展。

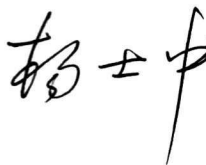
《空间无线能量传输技术》是中国空间技术研究院西安分院相关科研人员在总结分析国家 863 等课题研究成果的基础上，结合工程实践编写完成。此著作分析了空间无线能量传输技术的分类、特点、关键技术等内容，研究了空间



空间无线能量传输技术

无线能量传输系统设计方法，讨论了国内外空间无线能量传输技术发展动态及应用前景，并给出了无线能量传输技术发展建议，对推动我国空间无线能量传输技术发展具有重要意义。

应作者邀请为《空间无线能量传输技术》撰写序，为之高兴。中国空间技术研究院西安分院在空间无线能量传输技术方面走在国内前列，取得了国内领先的研究成果。本著作是一本综合性强、适用性广、时效性高的空间无线能量传输技术专业书籍，内容全面，系统性和可读性强，具有很强的学术和应用价值。这部著作的出版将对促进我国空间无线能量传输技术的发展，建设航天强国，起到积极的推动作用。

中国工程院院士： 

2017 年 10 月



前言

21 世纪人类面临着非常严峻的能源形势，通过大规模开发利用太阳能将有望彻底解决人类的能源危机。空间太阳能电站是高效利用太阳能的有效途径，受到了各发达国家的广泛关注。美国、日本等能源需求大国，特别是日本对基于空间太阳能发电卫星计划的无线能量传输技术进行了深入研究。随着我国分布式飞行器和深空探测技术的不断发展，一方面需要为飞行器提供能量，另一方面需要解决星体表面（如月球）各设备的无线供电技术难题，为此开展了大量无线能量传输技术研究。空间无线能量传输技术将会推动能量传输技术的革命性发展，在深空探测、分布式卫星载荷、空间太阳能电站以及大功率空间武器等领域具有广阔的应用前景。

根据能量载体的不同，空间无线能量传输的方式主要分为微波无线能量传输（Microwave Wireless Power Transmission, MWPT）和激光无线能量传输（Laser Wireless Power Transmission, LWPT）两种。二者相比，主要区别表现在受大气影响情况、链路传输效率、系统规模以及技术成熟度等方面。综合考虑各种影响因素，当传输距离较近、传输能量较小时，利用激光方向性强、能量集中的优点，进行激光无线能量传输，可有效提高传输效率并减小系统的重量和体积。当传输距离较远，且需要传输能量较大时，则选择微波作为载体进行无线能量传输，此时可获得比激光方式更高的传输效率。

目前，国内还没有一本详细且系统介绍空间无线能量传输技术的著作。“十二五”期间，在 863 课题的支持下，国内开展了无线能量传输技术研究，通过对分布式可重构卫星系统中模块航天器间无线能量传输技术的研究，在无线能量传输系统设计技术与无线能量传输技术的传输机理方面取得了较大进



展，同时，突破各相关关键技术，完成地面演示原理样机，并进行了地面验证试验，为分布式可重构卫星系统的研究提供了必要的理论和工程研制方面的支持。基于“十二五”863等课题的研究成果，并充分结合国内外无线能量传输技术最新研究成果，组织了相关专家编著了此书。

本书对空间无线能量传输的系统特点、系统组成、能量传输理论以及技术解决方案进行了系统、全面的论述，并分别介绍了微波无线能量传输系统以及激光无线能量传输系统的设计方法，内容全面，系统性和可读性强，具有很强的实际应用价值。本书既可以作为高等院校和科研院所的研究生教材，也可以为从事空间无线能量传输技术的科研工作者提供有效的理论和技术支持。关于最新的无线能量传输技术发展动态及内容均来源于公开发表的资料。

本书共分7章，第1章介绍了无线能量传输技术分类及特点，提出无线能量传输关键技术，分析了国内外无线能量传输技术发展动态及应用前景；第2章研究了空间无线能量传输理论及设计方法，给出了无线能量传输系统中典型的收/发系统设计；第3章简要介绍了大功率发射机的种类、技术方案和典型设计；第4章详细介绍了微波无线能量接收整流技术方案和实现途径；第5章研究了微波无线能量传输系统组成、能量传输理论和系统链路效率分析；第6章详细介绍了激光无线能量传输技术及国内外发展概况；第7章简要介绍了国内外典型的空间无线能量传输试验情况，详细介绍了某高效微波无线能量传输演示验证系统的设计，分析了我国无线能量传输技术发展前景和需求，并提出了我国无线能量传输技术发展建议。

本书由工作在一线的工程师完成编写任务，他们是马海虹（全书审编及统稿，第1、3、5、7章）、李成国（第2、3、5章）、董亚洲（第4章）、吴世臣（第6章）、周宇昌（第1章）、禹旭敏（第3章）。此外，本书中介绍的微波无线能量传输技术演示验证系统，在研制过程中得到了南京理工大学孙琳琳团队以及西安电子科技大学杨琳、栗曦团队的大力支持，其中高效微波发射机由孙琳琳团队协助研制，收/发天线及整流部分由杨琳、栗曦团队协助研制。

本书编写过程中得到了中国空间技术研究院西安分院各级领导的关心，得到了北京理工大学出版社的帮助。在审定过程中，中国空间技术研究院西安分院崔万照研究员、谭庆贵研究员、禹旭敏研究员等均提出了宝贵意见，在此一并表示感谢。

由于作者学识有限，书中难免存在不足和错误，恳请广大读者批评指正。

作者
2018年11月



目 录

第 1 章 概述	001
1.1 无线能量传输技术	002
1.1.1 无线能量传输技术分类及特点	003
1.1.2 空间无线能量传输技术	005
1.2 美国无线能量传输技术研究概况	006
1.3 日本无线能量传输技术研究概况	011
1.3.1 日本空间无线能量传输技术发展规划	011
1.3.2 日本空间无线能量传输技术研究开发体制	014
1.3.3 日本三菱电机公司的太阳能发电无线输电技术研究	014
1.3.4 日本空间激光无线能量传输技术研究	015
1.4 国际无线电科学联盟	018
1.4.1 空间太阳能发电卫星（SPS）白皮书	018
1.4.2 SPS 关键技术	019
1.5 无线能量传输系统组成及其关键技术	020
1.5.1 电波辐射式无线能量传输	020
1.5.2 无线能量传输系统组成	021
1.5.3 无线能量传输关键技术	023
1.6 无线能量传输技术应用需求	025
1.6.1 人造卫星之间无线能量传输	025



1.6.2	星地之间无线能量传输	026
1.6.3	深空探测无线能量传输	027
第2章	空间天线能量传输理论	029
2.1	天线基本辐射理论	031
2.2	天线辐射场分析	034
2.2.1	感应近场区	038
2.2.2	辐射近场区	039
2.2.3	辐射远场区	043
2.3	能量传输收/发天线系统	046
2.3.1	典型收/发天线系统	047
2.3.2	收/发天线系统能量传输分析	049
2.4	能量传输天线辐射聚焦分析	056
2.4.1	天线聚焦特性分析	060
2.4.2	自适应波束聚焦技术	073
2.5	天线波束控制、跟踪和校准分析	081
2.5.1	波束控制和跟踪	081
2.5.2	天线诊断和校准	094
第3章	微波功率发射技术	105
3.1	微波大功率发射器件	106
3.1.1	磁控管	107
3.1.2	行波管	108
3.1.3	半导体固态器件	109
3.2	F类/逆F类功率放大器工作原理	113
3.2.1	理想F类功率放大器工作原理	113
3.2.2	理想逆F类功率放大器工作原理	118
3.3	F类功率放大器设计分析	119
3.3.1	功率放大器特性分析	120
3.3.2	F类功率放大器设计	126
第4章	微波能量接收整流技术	133
4.1	微波能量接收整流技术进展	135
4.1.1	美国	135



4.1.2	日本	137
4.1.3	欧洲及其他	140
4.2	高效率微波能量整流电路设计技术	142
4.2.1	整流二极管建模与分析	142
4.2.2	整流电路原理与结构	146
4.2.3	5.8 GHz 整流电路仿真与分析	150
4.3	微波能量接收整流技术发展趋势	155
4.3.1	高频段微波能量接收整流技术	155
4.3.2	宽带化微波能量接收整流技术	157
4.3.3	大动态整流电路技术	159
4.3.4	适用于信息与能量协同传输的接收整流技术	161
第5章	微波无线能量传输系统设计技术	165
5.1	微波无线能量传输技术特点	166
5.1.1	微波无线能量传输关键技术	166
5.1.2	国内外主要验证系统指标对比	171
5.1.3	国内外技术水平差距及主要问题	172
5.2	微波无线能量传输系统组成	173
5.3	微波无线能量传输系统效率链路分析	174
5.3.1	微波发射机效率分析	175
5.3.2	微波接收整流电路效率分析	175
5.3.3	收/发天线能量传输效率分析	175
5.4	微波无线能量传输系统收/发天线设计	177
5.4.1	收/发天线功率密度分析	177
5.4.2	收/发天线设计	180
5.5	微波无线能量传输系统发射机设计	206
5.6	微波无线能量传输整流系统设计	210
第6章	激光无线能量传输系统设计技术	213
6.1	国内外研究概况	214
6.1.1	国外发展概况	214
6.1.2	国内发展概况	224
6.2	激光无线能量传输系统	226
6.3	大功率激光器	228



6.4	准直发射与接收	232
6.4.1	光束准直可采用的方法	232
6.4.2	各种方法初步比较	234
6.4.3	多光束协同发射	235
6.5	高效激光接收技术	237
6.5.1	激光电池技术	238
6.5.2	电源管理技术	242
6.5.3	能源转换提取技术	246
6.5.4	激光电池片散热技术	255
6.6	高精度光束控制技术	257
6.6.1	APT 系统功能	257
6.6.2	系统组成	258
6.6.3	APT 执行步骤	262
第7章	国内外空间无线能量传输试验研究简介	263
7.1	日本无线能量传输试验	265
7.1.1	日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 最新试验	266
7.1.2	三菱重工业公司的最新试验	267
7.1.3	USEF 的太阳能发电无线输电技术研究	269
7.2	美国和欧洲无线能量传输试验	271
7.2.1	美国无线能量传输试验	271
7.2.2	欧洲无线能量传输试验	272
7.3	国内空间无线能量传输试验研究	274
7.4	高效微波无线能量传输系统设计实例	278
7.4.1	系统简介及指标要求	278
7.4.2	链路传输效率预算	279
7.4.3	微波发射机设计	279
7.4.4	天线设计	291
7.4.5	整流及直流合成电路设计	297
7.4.6	接收天线阵列与整流电路布局设计	300
7.4.7	试验结果	301
7.5	我国无线能量传输技术发展前景和需求分析	303
7.5.1	国民经济发展对无线能量传输技术的需求	303
7.5.2	科学技术发展对无线能量传输技术的需求	305



- 7.5.3 国防应用对无线能量传输技术的需求 306
- 7.6 启示与展望 307
 - 7.6.1 我国无线能量传输技术发展建议目标 307
 - 7.6.2 我国无线能量传输技术发展建议路线图 308
 - 7.6.3 我国无线能量传输技术研究工作建议 309
- 参考文献 311
- 索引 326





第 1 章

概 述





| 1.1 无线能量传输技术 |

无线能量传输是指能量从源传输到负载的过程摆脱了传统的有线传输方式，通过自由空间实现能量从发射端到接收端的点到点传播。这种能量传输方式打破了传统的利用电缆传播能量的方式，开辟了一种全新的能量传播方法。随着技术水平不断发展，无线能量传输技术可实现地对地、地对空、空对地和空对空等方式的能量传输，在空间太阳能电站、模块航天器、临近空间飞行器、深空探测、机器人供电、微系统供电以及手机充电等领域具有日益广阔的应用前景。

21 世纪人类面临着非常严峻的能源形势。太阳能是持久稳定的清洁能源，太阳能发电时不产生 CO_2 的排放。而且，由于资源制约，对于能源缺乏的国家，为减少石油依存度，可以将其作为石油的替代能源。另外，从应对地球环境问题、确保能源稳定供给的角度出发，谋求更多地引入太阳能发电对人类社会未来发展变得越来越重要。同时，为了实现低碳社会，到 2050 年全世界的温室气体排放要减半，有必要在地面扩大引入可再生的清洁能源。大规模开发利用太阳能将有望彻底解决人类的能源危机。而空间太阳能电站是高效利用太阳能的有效途径，受到了各发达国家的广泛关注，20 世纪 70 年代以来，以美国和日本为主的发达国家开展了广泛的空间太阳能电站技术研究，目前已经提出 20 多种概念设计方案，并且在无线能量传输



等关键技术方面开展了重点研究，同时发展空间太阳能电站还可能会引起新技术产业革命，意义十分重大。

太空太阳能发电计划最早是由美国在 20 世纪 60 年代提出的。1968 年，美国的 Peter Glaser 博士提出了太阳能发电卫星（Solar Power Satellite，SPS）。其基本构想是在地球外层空间建立太阳能发电卫星基地，利用取之不尽的太阳能来发电，然后通过微波将电能送到地面的接收装置，再将所接收的微波能量转变成电能供人类使用。空间太阳能发电系统（Space Solar Power System，SSPS）不同于地面上的太阳能发电，空间太阳能具有不受天气影响、辐射强度高、土地需求较小等优势。它作为将来可实现的新能源系统受到人们的广泛期待。

无线能量传输技术主要是通过电磁感应、电磁共振、微波、激光等方式实现非接触式的电力传输，在军事、通信、工业、医疗、运输、电力、航空航天、节能环保等领域均具有良好的应用前景。

1.1.1 无线能量传输技术分类及特点

无线能量传输技术可以在不采用能源传输线的情况下完成能量的连续传输，可以实现地对地、地对空、空对地、空对空的任意方向上的能量传输。根据实现方式不同，无线能量传输技术大致分为感应耦合、磁场共振、电波辐射三类，其中电波辐射又包含激光和微波两种不同形式，如图 1.1 所示。三种无线能量传输技术分类及特点如表 1.1 所列。

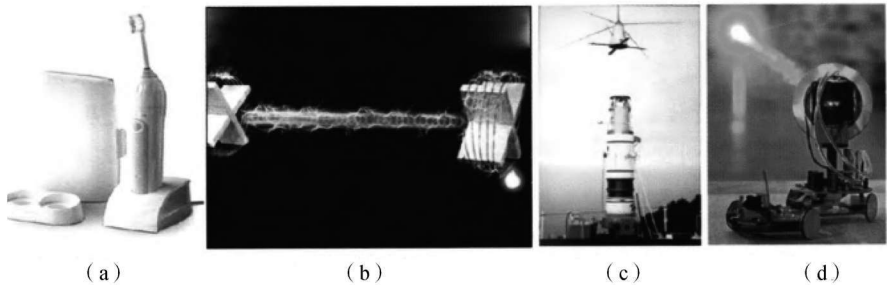


图 1.1 无线能量传输方式示意图

(a) 感应耦合；(b) 磁场共振；(c) 微波；(d) 激光

感应耦合式无线能量传输，是在传统的变压器基础上进行改进，应用电磁感应技术，实现非接触式的电能传输。感应耦合式无线能量传输技术的传输距离较短，发射端与接收端的位置相对固定。



表 1.1 无线能量传输技术分类及特点

分类	原理	特点	应用环境
感应耦合式无线能量传输技术	应用电磁感应技术在传统的变压器基础上进行改进,实现非接触式的电能传输	传输效率高,传输距离较短,发射端与接收端的位置相对固定	短距离能量传输,应用于无线能量传输验证试验
磁场共振式无线能量传输技术	通过非辐射性电场或磁场耦合的电磁谐振原理,实现能量的无线传输	不具有敏感的方向性,传输距离较感应耦合式远,传输效率也稍高	传输距离稍远,应用于手机充电等领域
电波辐射式无线能量传输技术	利用微波源/激光源等装置把直流电转变为微波/激光,再通过天线发送至空间,利用微波束/激光束代替传输电导线实现远程能量传输	传输效率不高,且不能跨越障碍物;其显著优势在于可实现较远距离的无线能量传输	远距离传输,应用于太阳能电站、深空探测等领域

磁场共振式无线能量传输,是通过非辐射性电场或磁场耦合的电磁谐振原理,实现能量的无线传输。发射端与接收端采用具有相同谐振频率的谐振体,两谐振体以电磁场为媒介相互耦合,传递能量。其相比于感应耦合式无线能量传输,不具有敏感的方向性,传输距离较感应耦合式远,传输效率也稍高。

电波辐射式无线能量传输,是利用微波源/激光器等装置把直流电转变为微波/激光,再通过天线发送至空间,大功率的电磁波束/光束通过自由空间后被接收天线收集,经微波/激光整流器后重新转变为直流电,其实质就是利用微波束/激光束代替传输电导线,实现远程能量传输。此种传输方式的传输效率不高,且不能跨越障碍物;其显著优势在于可实现较远距离的无线能量传输,在空间太阳能电站、深空探测等领域均采用此种能量传输方式。

与无线通信系统类似,无线能量传输系统也包括发射机部分、发射天线和地面接收设备部分。但无线能量传输系统又与无线通信系统存在很大差别。对于无线通信而言,无线电波被用于当作信息的载体;而对无线能量传输系统,无线电波是能量的载体。附带能量的电磁波基本上是未经调制的单频波。无线能量传输系统的功率密度比无线通信系统高 3 或 4 个数量级。二者原理和实现方法相似,但前者注重信息传输的效率和准确性,而后者则更倾向于能量传输



的效率，二者的区别如表 1.2 所列。

表 1.2 无线能量传输系统与无线通信系统的主要区别

特点	无线能量传输系统	无线通信系统
传输对象	能量	信息
信号特性	单频电磁波	通常为调制信号
功率密度	较大	较小
度量标准	有效传输功率	误码率、数据率
关注点	能量转换与传输的效率	信息传输的准确性及效率
发射功率	非常大	较小
系统规模	天线口径大	天线口径小
接收难度	较大	较小

1.1.2 空间无线能量传输技术

空间无线能量传输技术是实现空间太阳能电站的核心关键技术，主要有微波无线能量传输技术（MWPT）和激光无线能量传输技术（LWPT）。

微波无线能量传输技术是空间太阳能电站研究较多的传输方式，具有较高的转化和传输效率，在特定频段上的大气、云层穿透性非常好，技术相对成熟，波束功率密度低，且可以通过波束进行高精度指向控制，具有较高的安全性。但由于波束宽，发射和接收天线的规模都非常大，工程实现具有较大的难度，比较适合于超大功率的空间太阳能电站系统。

激光无线能量传输技术的主要特点是传输波束窄、发射和接收装置尺寸小，应用更为灵活。通过合理选择频率，可以减小大气损耗，比较适合于中小功率的空间太阳能电站系统。其难点在于大功率激光器技术成熟性较差，高指向精度实现难度大，存在较大的安全隐患。主要缺点是大气透透性差，传输效率受天气影响大。

随着 20 世纪末能源危机日益显现，美国、日本等能源需求大国，特别是日本开始对基于微波无线能量传输技术的空间太阳能发电卫星计划进行规划、试验和验证，这成为该技术一个最重要的应用领域和发展动力。

