

**Microwave Power
Transmission Technology**



微波输能技术

杨雪霞 黄文华/著



科学出版社

微波输能技术

杨雪霞 黄文华 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

微波输能技术在国际上兴起于 20 世纪 60 年代,由于高功率微波源、波束控制、平面接收天线和高效整流电路等关键技术的突破,在 21 世纪被广泛关注并期待应用。本书首先介绍了几类无线输能技术工作原理和微波输能技术研究进展;接着分析了微波输能技术的理论基础;重点论述了平面印刷整流电路工作原理及设计方法,以及整流天线与阵列理论和设计;最后分专题介绍了微波输能技术新进展,包括毫米波输能、定向输能、能量收集超表面和能量信息并行传输。本书在整流电路、整流天线和阵列及各项专题方面,提供了大量有代表性的设计实例。

本书可作为电子与科学技术领域高年级本科生和研究生的研究专题教材,也可作为相关领域研究者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

微波输能技术/杨雪霞,黄文华著. —北京:科学出版社,2018.8

ISBN 978-7-03-058099-3

I. ①微… II. ①杨… ②黄… III. ①微波技术-应用-能量传递-研究
IV. ①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 134165 号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:郑金红
责任印制:张 伟/封面设计:无极书装

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>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 8 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 8 月第一次印刷 印张:15 1/4 插页:2

字数:302 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

1888 年,海因里希·鲁道夫·赫兹证明了麦克斯韦所预言的电磁波的存在,1901 年,伽利尔摩·马可尼实现了横跨大西洋的无线电通信,直至目前,无线通信技术日新月异,小至人体内的各种医用无线传感器,大到探测深空的平方千米阵 (Square Kilometer Array, SKA) 射电望远镜,无线通信技术一直改变着人类的生活,不断提高着人类对宇宙的认知。实际上,在电磁波发现后不久的 1899 年,尼古拉·特斯拉就提出了用无线电输送能量的概念,利用电磁波在空气中传输损耗小的优点,将能量进行远距离的无线传输。20 世纪 60 年代,电子管、晶体管及高功率微波管的逐渐成熟,使得无线输电这一设想得到关注。

随着微波技术、半导体器件和微电子技术的飞速发展,微波输能技术已经从最初的太阳能卫星计划、驱动无人机、高空通信永久作业平台、复杂地面环境输电等应用,拓展到可重构卫星之间无线输电、卫星内部电子设备无线供电,以及物联网、移动式电子设备等领域。尽管微波输能技术有如此广泛的应用前景,但是尚未形成在某一领域的成熟应用,有诸多关键技术尚待突破。另外,随着无线通信技术和系统的部署,人类生活环境和地球周围充满了电磁波,如果能够将这些电磁能量回收,就地取“能”,则摆脱了电子设备使用寿命由电池决定的限制。随着相关半导体技术和材料科学的进步,微波输能技术正成为国际上的研究热点。近年来,这一技术得到国家有关部门的重视和支持,一些研究院所和高等学校积极投入无线输能技术研究中来。

由于微波输能技术尚未形成一定规模的具体应用,而且是一项涉及多个领域的技术,目前国际上的相关专著很少,日本京都大学 Noriki Shinohara 教授曾著 *Transferring Power by Radio* 一书。国内有类似的无线输电相关专著,内容都是近距离的电磁感应式。作者自 1999 年开始微波输能技术研究,将多年积累的研究工作进行总结,并结合当前国际上的最新研究进展,汇集成册,希望本书对进行相关研究的科研人员和研究生有所帮助,为推动我国微波输能技术的快速发展尽绵薄之力。

微波无线输能技术包括高功率微波、波束控制、接收天线、高效整流电路及收发系统优化等诸多研究领域。随着各种无线通信、射电天文、卫星导航等技术的发展,微波无线输能技术在高功率微波源和发射天线方面有了丰富的积累,而整流天线是微波输能的专门技术。本书系统而全面地介绍和论述了微波无线输能技术,包括:几类无线输能技术比较、微波输能技术国内外发展现状、微波输能基本理论;

重点内容是基于不同传输线类型的高效整流电路、接收整流天线和阵列理论与设计方法,以及毫米波整流天线、具有定向输能的方向回溯整流天线阵列;还包括能量收集超表面、能量信息并行传输等新课题。每一部分都提供了代表性的设计实例,贴近工程应用。本书有助于科研人员和研究生系统地掌握微波输能相关理论知识和设计方法,也有助于他们了解相关学科的最新前沿动态。本书第 2~4 章是微波输能基本理论,后续 4 章讲述关于多功能微波输能及研究的最新课题,其内容相对独立,具有微波技术基础的科研人员可直接阅读。

本书中的整流电路、整流天线和阵列设计内容由博士研究生谭冠南、薛海皋、卢忠亮,硕士研究生梅欢、李凌峰、高艳艳、陆佳骏、聂美娟、江超、薛玉杰、沈龙、李林、孙晓萌等完成,系统效率分析由博士研究生周华伟和硕士研究生江起完成,电磁能量收集超表面由仲辉腾完成。在本书出版之际,感谢研究生的杰出工作,是年轻学子极富创造性的研究,支持和推动了我们微波输能技术坚持了近二十年的研究。衷心感谢各类的基金支持,其中包括国家自然科学基金“毫米波高转换效率整流天线与阵列的设计理论与实现方法研究”(61271062)、科技部国家高技术研究发展计划(863 计划)项目“公共无线携能通信系统关键技术研发”(2015AA016201)等。

鉴于作者水平有限,加之时间仓促,缺点和不足在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2017 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 能量无线传输技术历史简况	1
1.2 几种无线能量传输方式	3
1.2.1 电磁感应式	3
1.2.2 磁共振式	5
1.2.3 电场耦合方式	6
1.2.4 激光输能	6
1.2.5 微波输能	8
1.3 微波输能技术研究进展	9
1.3.1 微波输能技术起源	9
1.3.2 近代微波输能技术	10
1.3.3 地对空微波输能实验	12
1.3.4 整流天线及阵列研究现状	16
1.3.5 微波功率源	18
1.3.6 发射天线	21
1.3.7 我国情况	22
1.4 微波输能的工作频率	22
1.5 本章小结	23
参考文献	23
第 2 章 微波输能基本理论	26
2.1 理论基础	26
2.1.1 麦克斯韦方程组	26
2.1.2 电磁能量	27
2.1.3 微波输能系统组成及效率	28
2.1.4 远场条件及场区定义	30
2.2 波束捕获效率	32
2.2.1 传输因子 τ	32
2.2.2 波束捕获效率	33

2.2.3	口径电平分布与系统效率	36
2.2.4	口径电平分布波形的优化	38
2.2.5	Fun 5 和高斯波形分布的系统性能比较	40
2.2.6	Fun 4 和 Fun 3 波形分布的系统性能比较	41
2.3	定向微波输能理论	42
2.3.1	相控阵天线微波输能	42
2.3.2	方向回溯微波输能	44
2.4	波束接收	48
2.4.1	腔模理论	49
2.4.2	微带天线圆极化技术	52
2.4.3	双极化微带天线	57
2.5	近场能量耦合效率	64
2.6	本章小结	65
	参考文献	65
第 3 章	微波整流电路	68
3.1	二极管整流原理	68
3.1.1	低频整流原理	68
3.1.2	微波整流机理分析	71
3.1.3	高效微波整流理论	72
3.1.4	二极管微波整流理论分析举例	77
3.1.5	二极管微波整流的时域解释	81
3.2	平面传输线理论	83
3.2.1	微带线	83
3.2.2	共面波导	94
3.2.3	共面带线	96
3.3	微波整流电路设计理论	97
3.3.1	微波整流电路结构和设计	97
3.3.2	整流电路基本拓扑结构	98
3.3.3	多频整流电路拓扑结构	100
3.3.4	宽输入功率整流电路拓扑结构	101
3.4	微波整流电路设计实例	103
3.4.1	微带线型高效整流电路	103
3.4.2	共面波导型整流电路	107

3.4.3	共面带线型整流电路	111
3.4.4	功率自适应整流电路	113
3.4.5	多频整流电路	120
3.5	本章小结	124
	参考文献	125
第 4 章	整流天线与阵列	127
4.1	整流天线理论	127
4.1.1	整流天线拓扑结构	127
4.1.2	多/宽频整流天线拓扑结构	127
4.1.3	整流天线效率	129
4.1.4	整流天线效率测试系统	130
4.2	整流天线阵列理论	131
4.2.1	整流天线组阵形式	131
4.2.2	整流天线阵列等效电路理论	132
4.3	整流天线和阵列设计	135
4.3.1	微带线型整流天线与阵列	135
4.3.2	共面波导型整流天线	141
4.3.3	共面带线型整流天线	145
4.4	本章小结	150
	参考文献	150
第 5 章	毫米波整流天线及阵列	153
5.1	毫米波整流电路	153
5.1.1	二极管输入阻抗的测试	154
5.1.2	整流电路设计	156
5.2	圆极化毫米波整流天线	158
5.2.1	高增益圆极化毫米波天线	158
5.2.2	圆极化毫米波整流天线	160
5.3	二极管串联整流电路	161
5.3.1	串联型整流电路结构	162
5.3.2	串联型整流电路实验	163
5.4	基片集成波导毫米波整流天线和阵列	165
5.4.1	基片集成波导缝隙耦合微带贴片天线及阵列	165
5.4.2	SIW 贴片整流天线及阵列	171

5.5 宽波束 Vivaldi 整流天线及阵列	175
5.5.1 宽带 Vivaldi 天线	175
5.5.2 零介电常数超材料单元设计	177
5.5.3 超材料加载的高增益宽带 Vivaldi 天线	181
5.5.4 Vivaldi 整流天线单元	184
5.5.5 Vivaldi 整流天线阵列	186
5.6 本章小结	187
参考文献	188
第 6 章 方向回溯整流天线技术	190
6.1 Van Atta 天线阵列原理	190
6.2 双极化缝隙耦合微带天线设计	193
6.3 差分整流电路设计	195
6.4 2×2 元方向回溯整流天线阵列设计与实验	200
6.5 本章小结	203
参考文献	203
第 7 章 电磁能量收集超表面	205
7.1 超材料吸波基本概念	205
7.2 三频极化不敏感宽入射角超表面	207
7.2.1 三频超表面单元设计和仿真	207
7.2.2 三频超表面实验	210
7.3 宽带极化不敏感宽入射角超表面	211
7.3.1 宽带超表面单元结构和仿真	211
7.3.2 宽带超表面实验	215
7.4 超宽带极化不敏感宽入射角超表面	216
7.4.1 超宽带超表面单元设计和仿真	216
7.4.2 超表面实验	218
7.5 本章小结	219
参考文献	219
第 8 章 能量信息并行传输	221
8.1 引言	221
8.2 整流电路及调制波整流	221
8.2.1 S 波段整流电路设计	221
8.2.2 连续波与调制波整流实验	223

8.3 高隔离度双极化天线单元	225
8.3.1 接收天线单元设计与仿真	225
8.3.2 接收天线单元实验	227
8.4 双极化接收天线阵列	227
8.5 携能通信实验	230
8.5.1 整流天线阵列对不同波形的转换效率测试	230
8.5.2 能量信息并行传输实验	232
8.6 本章小结	233
参考文献	233

彩图

第1章 绪 论

无线能量传输技术包括电磁感应、电场耦合、电磁共振、微波波束、激光束、声波、振动等。本章简述无线能量传输技术发展史,简要介绍当前已取得较大研究进展并引起科学界和工业界极大兴趣的五种输能方式:电磁感应式、电磁共振式、电场耦合式、微波波束和激光束输能技术。

1.1 能量无线传输技术历史简况

1888年,德国物理学家海因里希·鲁道夫·赫兹(Heinrich Rudolf Hertz, 1857—1894)用金属线圈所做的电火花实验证明了电磁波在空气中的传播。130年后的今天,电磁波在通信和信息领域的应用已经渗透到人类社会生活、工业生产和科学研究的方方面面,如广播、电视、遥感、雷达、射电天文、卫星导航及各种移动通信。实际上,早在1899年,美国科学家尼古拉·特斯拉(Nikola Tesla, 1856—1943)就提出用电磁波传送能量,并做了大量验证工作。据记载,当年特斯拉在美国的科罗拉多斯普林斯(Colorado Springs)进行了无线输能实验,用150kHz的无线电波通过谐振来输能,遗憾的是详细数据没有保留下来。在1933~1934年的芝加哥世界博览会上,威斯汀豪斯实验室的H. V. Noble演示了第二个著名的无线输能实验,几百瓦的能量通过100MHz的电磁波传输了约7.6m,发射和接收均为偶极子天线,且工作于远场区,但是更详细的数据难以考究。

直到20世纪50年代末,由于微波源和晶体管的成熟,微波无线输能技术再次得到关注。当时速调管和磁控管已经可以输出较为稳定的微波,能够有效整流的晶体二极管也已出现^[1]。在第二次世界大战期间,较高射频波段的微波源、雷达系统的相控阵天线和高增益天线发展迅速,电磁波能够以窄波束传播。这为微波无线输能技术的发展奠定了基础。

1959年,美国雷声(Raytheon)公司提出高空微波平台,这是第一个具有实际价值的微波输能技术应用。平台位于约20km的临近空间,为通信中继、环境监测、空间探测和远程遥感提供长航时工作平台。微波平台相当于一颗通信卫星,但是成本和维护费用要低得多。虽然高空微波平台尚未具体实施,但是自此进入了微波输能技术研究阶段。1963年,美国喷气推进实验室(JPL)的W. Brown博士实施了第一个微波输能实验^[2],400W的微波能量在自由空间传播后,在7.4m距

离处被接收和整流,得到 104W 的直流电能。自 20 世纪 80 年代到 21 世纪初,微波平台引起多国兴趣,例如,加拿大的 SHARP(Stationary High Altitude Relay Platform) 计划^[3],日本京都大学领衔的 MINIX(Microwave Ionosphere Nonlinear Interaction eXperiment) 计划、MILAX(Microwave Lifted Airplane eXperiment) 计划和 ETHER(Energy Trans-Mission Toward High Altitude Long Endurance Airship Experiment) 计划^[4,5],韩国电气研究院(Korea Electrotechnology Research Institute, KERI) 也曾在 1999 年实施微波输能实验^[6]。在这些计划实施和验证过程中,为了验证微波输能的关键技术,研究者在地面上进行了若干点到点的“地对地”和“地对空”实验。

1968 年,美国 P.Glaser 博士提出在地球同步轨道上建立空间太阳能卫星(Solar Power Satellite, SPS)的构想,以解决当时的“能源危机”这一社会问题,通过微波波束或者激光束将空间太阳能传送到地面^[7]。太阳能卫星是一个能量转换站,光电板将取之不尽的太阳能收集并转换为电能,微波功率源或激光器将直流电能转换为微波或者激光,由天线定向发射到地球上的能量接收装置——整流天线阵或者光伏电池上,并将能量再次转换成直流电能。20 世纪末,美国在其 SERT(Solar Space Power Exploratory Research and Technology) 计划中对太阳能卫星总体方案和关键技术进行较为深入的论证^[8]。空间太阳能具有能流密度大、持续稳定、不受昼夜气候影响、洁净、无污染等优点。随着人类征服太空能力的加强,以及石油、天然气、煤炭资源的日趋短缺和地球生态环境的恶化,作为一种绿色能源,太阳能卫星在当前和未来仍将引起各界关注。太阳能卫星的提出极大地推动了微波和激光输能技术的研究进展,除了效率问题,学术界对微波和激光对路径上生物体(如飞鸟)、土壤和电离层等的影响也进行了初步研究。

2007 年,美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 提出分布式可重构航天器的概念,这是微波平台和太阳能卫星的结合与发展,更具实际意义。分布式航天器是由能源、通信控制、应用载荷等多个功能模块组成的卫星系统,每个模块分别承担不同功能。其中一个能源模块通过微波或者激光输能从太阳能卫星(或者地面站)获取能量,然后通过微波或激光输能为其他模块提供能量。微波输能技术还可用于沙漠、孤岛、峡谷等复杂环境的无线电能输送。2004 年,有报道称法国利用微波输能技术解决了留尼汪岛上一个偏远小村庄的日常用电问题^[9]。

20 世纪 90 年代以来,随着平面印刷技术的成熟和集成电路技术的发展,接收整流天线可以附着于用电设备的表面;半导体器件的发展使得低功率密度条件下接收整流效率得以提高。由此,微波输能技术在射频识别(RFID)、无线传感器网络(WSN)、可穿戴电子设备等领域的应用得到各界关注,这些设备可广泛应用于医疗监测、城市基础设施以及恶劣环境中的监控等诸多方面。在 RFID 和 WSN 系

统中,无线输能技术能够减少甚至避免电池的使用,不仅延长了电子设备的寿命,而且使电子器件更加小巧、多用。需要注意的是,无线输能的功率密度要满足人类健康安全标准^[10]。

在国内,林为干院士于1994年首次向国人介绍了微波输能技术^[11]。上海大学自1999年开始,对微波输能关键技术做了较为系统和深入的研究^[12-14],主要包括高效整流无线阵列与系统效率优化方面。中国科学院电工研究所、四川大学、东南大学也有研究报道。近年来,不同领域的科学家共同呼吁研究太阳能电站,引起了国内学术界对微波输能技术的关注。

20世纪80年代,基于磁场感应耦合的无线能量传输技术被学者所关注。特别是21世纪以来,随着消费电子产品的迅速发展,提出了对无线充电的需求,如无尾电视、智能家居中厨具的无线供电、手机无线充电等,尽管尚未市场普及,但已引起工业界和商业界的极大兴趣。2008年,无线能量联盟(Wireless Power Consortium, WPC)制定近场磁感应式无线供电接口标准,即Qi标准,此后该标准不断得到更新。这种磁感应式无线充电的距离最远在厘米量级,一般在几毫米范围内。在大功率应用方面,新西兰奥克兰大学Boys教授课题组研制了对国家地热公园载人游览车的无线供电;美国汽车工程协会制定了用非接触感应电能传输技术为电动汽车充电的统一标准——SAEJ.1773。国内重庆大学孙跃教授课题组自2002年开始研究磁场感应耦合无线供电技术^[15],将其用于电动车、家用电器、旋转机构的无线供电,并实现工程化应用。2007年,美国麻省理工学院(MIT)提出强磁场耦合谐振式无线供电,将距离拓展到数米量级,在2m远处点亮功率为60W的灯泡^[16]。

1.2 几种无线能量传输方式

下面简要说明几种无线输能方式的工作原理、特点及其发展现状^[17,18]。

1.2.1 电磁感应式

电磁感应式无线传能类似于赫兹所做的电火花实验。电流流过金属线圈时其周围会产生磁场,如图1.1所示,这个线圈叫作主动线圈。没有通电的另一金属线圈,即副线圈靠近该磁场时,会发现副线圈中产生了电流,这个实验证明了空间存在电磁波,即无线传能现象。主动线圈和被动线圈可以分别看作发射和接收天线,工作于天线的感应场区。电磁感应式无线传能方式的有效工作频段在110~205kHz范围,传送的能量范围低到微瓦量级,高至几十万瓦量级,效率可达80%。由于传输距离在几厘米以内,因此也叫非接触式供能。

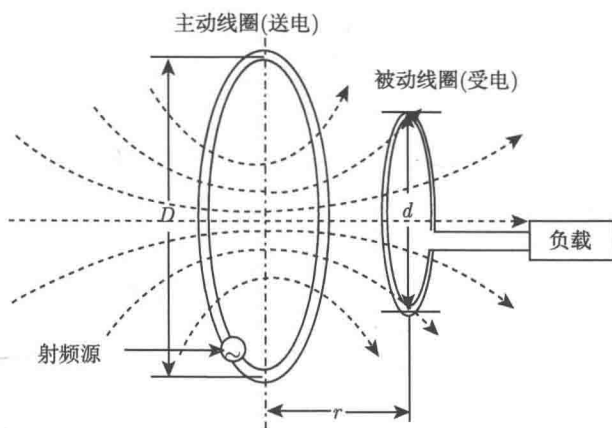


图 1.1 电磁感应式工作原理

图 1.2 是电磁感应式无线供电系统电路组成。在能量输入端，高频信号发生器提供高频交流电，交流电被功率放大器放大后传送到主动线圈。为增大传输距离，变压器可采用松耦合方式。在输出端，高频能量经被动线圈耦合，获得的交流电通过整流滤波电路，转换成直流电。最后根据实际需求，将直流电通过稳压电路转换为直流电压源。

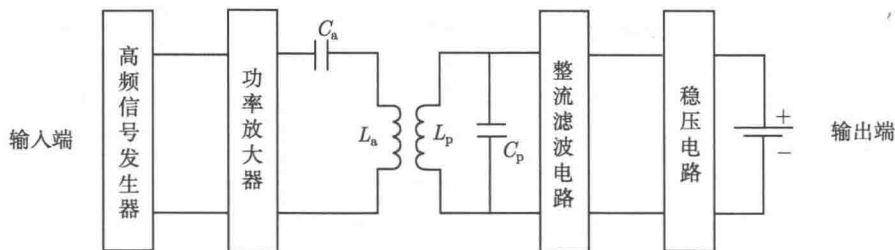


图 1.2 电磁感应式无线供电系统电路组成

电磁感应式是一种最成熟的无线传能方式，虽然没有普及，但是已经在消费电子产品、嵌入式医疗器械和电动汽车充电等领域崭露头角，并出现了若干国际标准。2010 年，全球首个推动无线充电技术的标准化组织 WPC 推出 Qi 标准，其第一个版本为“低功率系统描述”(最大输出功率为 5W)，工作频带为 110~205kHz。该标准覆盖无线充电解决方案的各个环节，为所有电子厂商提供统一的通用标准。通过标准化，只要是带有 Qi 标志的产品，可为任何厂商的任何机型充电。目前，WPC 拥有 100 多个成员。

1.2.2 磁共振式

2007 年, 美国麻省理工学院物理学家马林·索尔贾希克 (Marin Soljacic) 实验验证了磁共振方式无线输能^[16]。其工作原理与音叉的共振原理相同, 将振动频率相同的音叉按规律排列, 如果一个音叉发声, 其他的也会因共振而发声。同样, 排列在磁场中的相同振动频率的线圈, 也可从一个向另一个供电。基于磁共振, 射频电能可以在以同样频率发生共振的线圈之间进行无线传输, 工作原理如图 1.3 所示。工作频率在几十兆赫兹量级, 传输距离 8 倍于线圈半径, 如果线圈够大, 可向数米远以外供电, 而且通过中继可以传得更远。收发线圈可以看作工作于近场区的天线。

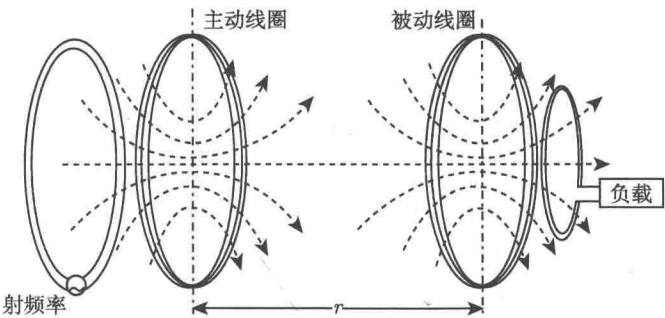


图 1.3 磁共振式无线输能工作原理

图 1.4 是基于磁共振原理的无线供电系统框图, 由高频信号发生器、功率放大电路、发射线圈、两个谐振线圈、接收线圈、整流滤波电路和稳压电路构成。其中谐振线圈并不是必要组成部分, 没有谐振线圈也能正常工作, 加入谐振线圈的目的是增加能量传输距离, 谐振线圈可以加入多个, 本装置加入了两个。发射线圈、谐振线圈、接收线圈三者同轴, 并且具有相同的谐振频率, 三者通过磁场耦合相互作用。发射线圈与接收线圈之间的距离即能量的传输距离。

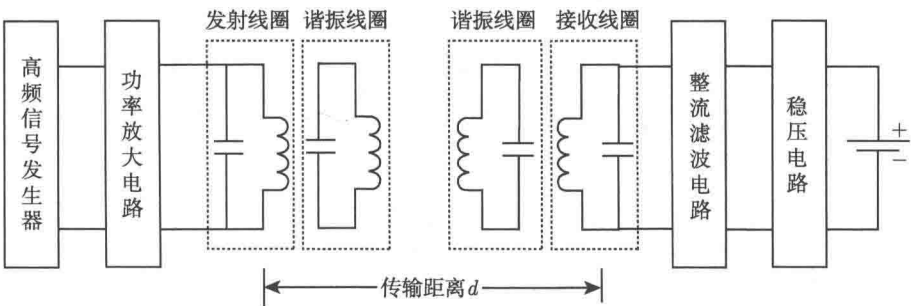


图 1.4 基于磁共振原理的无线供电系统框图

1.2.3 电场耦合方式

电场耦合方式不使用线圈，而是在送电侧和受电侧设置电极，利用二者之间产生的电场无线供电，工作原理如图 1.5 所示。图 1.6 是电场耦合充电系统结构框图，电场耦合方式是以高电压传输电力，先将送电侧的电压升高，然后通过电场耦合在受电侧产生电压，再将受电侧的电压降低、整流，对负载供电。

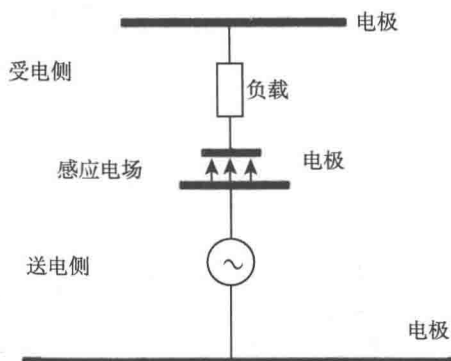


图 1.5 电场耦合工作原理示意图

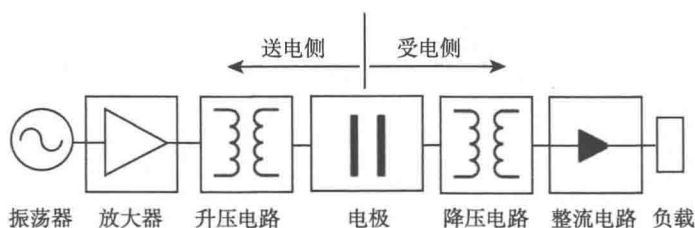


图 1.6 电场耦合充电系统结构框图

电场耦合方式的特点是，输出功率比磁场耦合式的 Q_i 标准要高，即使电极之间的位置稍有偏移也可维持高传输效率。日立麦克赛尔公司在 2011 年 11 月面向 iPad2 上市了无线充电器 AIR VOLTAGE for iPad2，为 iPad2 套上内置有受用电电极的专用外壳来充电，是全球首款采用“电场耦合方式”的产品。

1.2.4 激光输能

激光输能技术也源于太阳能卫星计划，与微波输能相比，激光光束方向性强、能量集中，系统的收发设备口径小、重量轻。太阳能电站的激光输能可选用 800~1400nm 大气透射窗口波段。激光输能的基本原理是光伏发电，由于半导体器件的光电转换效率在不同波长差别很大，大气传输损耗也千差万别，所以采用特定波长

和有限线宽的激光输能。与地球上太阳能电站不同的是，激光输能能够以更高的功率密度和更高的光电转换效率（窄的线宽）定点传输能量。

图 1.7 是激光无线输能系统组成框图。空间太阳能电站上的激光器将收集的太阳能转化为激光，将能量集中传到地面上。激光器是激光发射模块的核心部件，目标是获得高亮度、分布均匀的激光束，实现高效率的电能-激光转换。地面接收系统由能量接收转换阵列和电源管理设备组成，其功能是接收空间太阳能电站发射的激光，并进行必要的功率跟踪，实现激光到电能的转换。光伏器件是激光-电能转换模块的核心部件。目前的光伏电池主要有多晶硅、单晶硅、III-V 族半导体等类型，以镓砷 (GaInAs) 与砷化镓 (GaAs) 为代表的 III-V 族化合物半导体电池，其光电转换效率已经超过 40%，理论光电转换效率高达 70%，若进一步采用微纳加工技术和光子工程技术，转换效率有望提高到 80%。

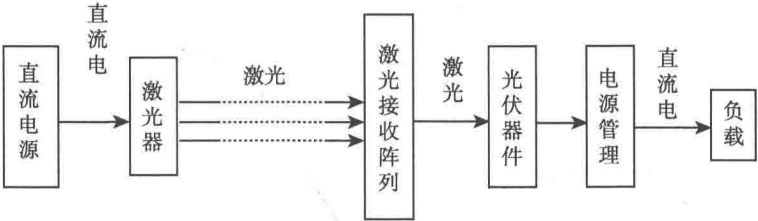


图 1.7 激光无线输能系统组成框图

激光输能关键技术包括激光器、空间聚光阵列、光电转换和高功率激光光束控制技术，激光输能技术的实用化依赖于这些关键技术的突破。激光输能具有极好的能量截获效率，特别适合远距离无线输能。但是也正因为其光束特别集中（窄），从而对波束指向控制要求极高，比较适合移动性低或固定目标的远程无线输能。表 1.1 总结了所报道的激光输能实验。

表 1.1 激光输能实验

年份	机构/研究者	激光器	接收	实验结果
1997	日本 Yugami 等	连续 CO ₂ 激光器	150mm 口径的离轴抛物面镜	传输距离 500m, 发射激光到接收激光的传输效率为 60%~65%
1997	日本 Kawashima 等	60W 光纤输出半导体激光器	直径 70cm 的太阳能电池板	传输距离 1000m, 光电转换效率 20%
2002	德国	Nd:YAG 全固态激光器	装备光伏电池的 小车	光伏电池转换效率 25%
2004	欧洲空间局 (ESA)	IR- 激光器	光伏电池组件接收系统	地球同步卫星轨道至地面, 光电转换效率 14.9%