

WILEY

ISTE

WIRELESS POWER
TRANSFER VIA RADIOWAVES

无线电力传输

[日] Naoki Shinohara 著
张超 译



新视野
电子电气
科技丛书

清华大学出版社



WILEY

ISTE

WIRELESS POWER
TRANSFER VIA RADIOWAVES

无线电力传输

[日] Naoki Shinohara 著

张超 译



常州大学图书馆
藏书章

新视野

电子电气
科技丛书

清华大学出版社
北京

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2016-9911

Wireless Power Transfer via Radiowaves

Naoki Shinohara

ISBN 978-1-84821-605-1

Copyright © First published 2014 in Great Britain & the United States by ISTE and John Wiley & Sons

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition Published by John Wiley & Sons. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Tsinghua University Press Limited and is not the responsibility of John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书封底贴有 John Wiley & Sons 防伪标签,无标签者不得销售
版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

无线电力传输/(日)筱原直树(Naoki Shinohara)著;张超译.—北京:清华大学出版社,2018
(新视野电子电气科技丛书)

书名原文:Wireless Power Transfer via Radiowaves

ISBN 978-7-302-48696-1

I. ①无… II. ①筱… ②张… III. ①电能—无线传输技术 IV. ①TM910.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 271333 号

责任编辑:梁颖

封面设计:傅瑞学

责任校对:时翠兰

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:190mm×245mm

印 一 张:11.25

字 数:215千字

版 次:2018年5月第1版

印 次:2018年5月第1次印刷

印 数:1~1500

定 价:59.00元

产品编号:069799-01

根据麦克斯韦电磁场理论,变化的电场可以产生变化的磁场,而变化的磁场也可以产生变化的电场,因此会形成电磁波在介质中传播。基于此原理,无线通信技术获得了巨大的成功,如移动电话、广播电视、Wi-Fi网络、卫星通信等技术与我们现在的生活息息相关,极大地提高了人类的生活质量。然而,电磁波不仅可以携带信息,而且具有一定的能量,虽然在电磁场理论建立之初,尼古拉·特斯拉(Nicola Tesla)等科学家就已经开始尝试利用电磁波进行无线电力传输,然而时至今日,无线电力传输技术的成熟度和应用广泛度仍无法与无线通信技术相比。

近来,随着人类社会信息化的不断发展,人们渴望切断电子设备的“最后一根线”——电力线,从而获得最大的使用灵活度,因此无线电力传输技术再次得到人们的重视,进行了大量有益的实验和探索。在该背景下,日本京都大学筱原直树(Naoki Shinohara)教授编著的本书对于无线电力传输技术的推动将产生重要意义。本书首先回顾无线电力传输技术的发展历史,介绍了技术发展路线和现状,并对未来的技术发展进行了预测,使读者可以快速了解无线电力传输技术的发展脉络;然后介绍无线电力传输的基础理论和相关技术原理,让具有一定基础的读者可以全面掌握相关技术和理论;最后对无线电力传输的应用进行详细介绍,激励读者不断探索新的应用场景。

本书叙述语言简洁清晰,理论推导简明扼要,给出的资料和数据翔实充分,尤为难得的是展示了大量实验数据和图片。本书对于无线电力传输技术的初学者来说是一本重要的入门指导书,而对于相关技术的从业者而言是一部具有重要参考价值的技术手册。

全书的翻译由张超完成,其中部分插图数据的核实以及词汇的校对是在研究生脱艳红、刘晓楚和李志强的帮助下完成的,在此表示感谢。本书翻译工作还得到了清华大学出版社梁颖编辑的大力协助,在此表示衷心的感谢。最后,译者对家人在翻译过程中的关心和支持表示深深的感谢。

原书中有少量明显的输入错误和排版疏漏,译者在翻译时直接做了改动。由

于译者的水平有限和不可避免的主观片面性,翻译不当或者表述不清之处在所难免,恳请广大读者及专家批评指正。

张超

2018年1月

于西安交通大学

绪论	1
第 1 章 无线电力传输的历史、现状及未来	5
1.1 19 世纪的理论预测和首次尝试	5
1.2 20 世纪 60 年代微波技术激活无线电力传输	6
1.3 20 世纪电感耦合无线电力传输项目	10
1.4 21 世纪无线电力传输技术将改变世界	12
第 2 章 无线电力传输理论	18
2.1 理论背景	18
2.2 波束效率和耦合效率	19
2.2.1 无线电波的波束效率	19
2.2.2 理论上波束效率的提高	21
2.2.3 近耦合距离处的耦合效率	24
2.3 波束成形	26
2.3.1 相控阵波束成形理论及其误差	26
2.3.2 通过无线电波检测目标	32
2.4 波束接收	35
第 3 章 无线电力传输技术	39
3.1 引言	39
3.2 射频的生成——使用半导体高功率放大器	41
3.3 射频生成——微波管	46
3.3.1 磁控管	46
3.3.2 行波管、行波管放大器	58
3.3.3 速调管	59

3.4	波束成形和相控阵目标检测技术	60
3.4.1	介绍	60
3.4.2	20世纪90年代的相控阵	61
3.4.3	21世纪初的相控阵	64
3.4.4	磁控管相控阵	71
3.4.5	方向回溯系统	76
3.5	射频整流器——整流天线与电子管类型	81
3.5.1	整流天线的一般整流理论	81
3.5.2	整流天线 I——整流回路	86
3.5.3	整流天线 II——更高的频率和双频带	90
3.5.4	整流天线 III——弱电和能量收集	95
3.5.5	整流天线阵列	97
3.5.6	真空管整流器	102
第4章	无线电力传输的应用	105
4.1	引言	105
4.2	能量获取	106
4.3	传感器网络	110
4.4	泛在电源	114
4.5	管道中的微波电力传输	116
4.6	微波在建筑中的应用	119
4.7	二维无线电力传输	121
4.8	电动汽车的无线充电	123
4.9	点对点无线电力传输	127
4.10	运动或飞行目标的无线电力传输	128
4.11	太阳发电卫星	133
4.11.1	基本概念	133
4.11.2	二氧化碳零排放的太阳能发电卫星为人类可持续发展提供清洁能源	134
4.11.3	太阳能发电卫星上的微波电力传输	136
4.11.4	太阳能发电卫星模型	137
	参考文献	149



绪 论

基于电磁学和无线电波理论的无线电力传输(wireless power transfer, WPT)技术具有很好的前景,该技术是电气和无线电科学的综合应用。目前,有许多无线电力传输的技术,如电感耦合无线电力传输(如图 0.1(a)所示)和短距离无线电力传输的谐振耦合无线电力传输(如图 0.1(b)所示)。另外,使用无线电波的无线电力传输已经发展成为长距离无线电力传输的技术方案。这些技术包括聚焦束的微波电力传输(microwave power transfer, MPT)(如图 0.1(c)所示)和从广播的无线电波或者扩散的无线电获取能量的技术(如图 0.1(d)所示)。电感耦合无线电力传输和谐振耦合无线电力传输都是以电磁波理论为基础的。发射机和接收机是电磁耦合的,能量通过电场、磁场或者电磁场被无线传输。不同于短距离范围内的技术,使用无线电的无线电力传输不需要发射机和接收机之间的耦合,但是无线电力传输需要辐射电磁波。使用无线电波的无线电力传输需要更高的频率,如微波,来更有效地聚集无线电能。各种无线电力传输技术的一般特性见表 0.1。电感耦合和谐振耦合主要的区别是电感耦合是非谐振的,而谐振耦合是谐振的。在短距离的情况下,应用线圈的电感耦合和谐振耦合技术是有效的。耦合的距离受限于耦合理论,谐振耦合也不例外。为了增加单位能量下的传输距离,无线电波必须作为能量的载体。对于使用无线电波的无线电力传输来说,天线被用作能量的辐射和接收。天线作为谐振器来高效地辐射无线电波。

所有的无线电力传输技术都基于 Maxwell(麦克斯韦)方程组,而且,在无线电力传输应用方面只有较小的不同。目前,无线电力传输有可能使用较高频率的无线电波,如兆赫兹的微波频段,从而使得无线电力达到足够的水平,或者波束效率可以满足各种应用。图 0.2 为一个无线电力传输系统示意图。变频器可以将电力转换成无线电力,反之亦然。电力和无线电力最主要的区别是频率的问题。像广播和无线通信一样,从多个发射天线到多个接收天线传输无线电力也是可能的,因为天线不是电磁耦合的。非常低功率的无线电力传输系统甚至不需要电池,这个

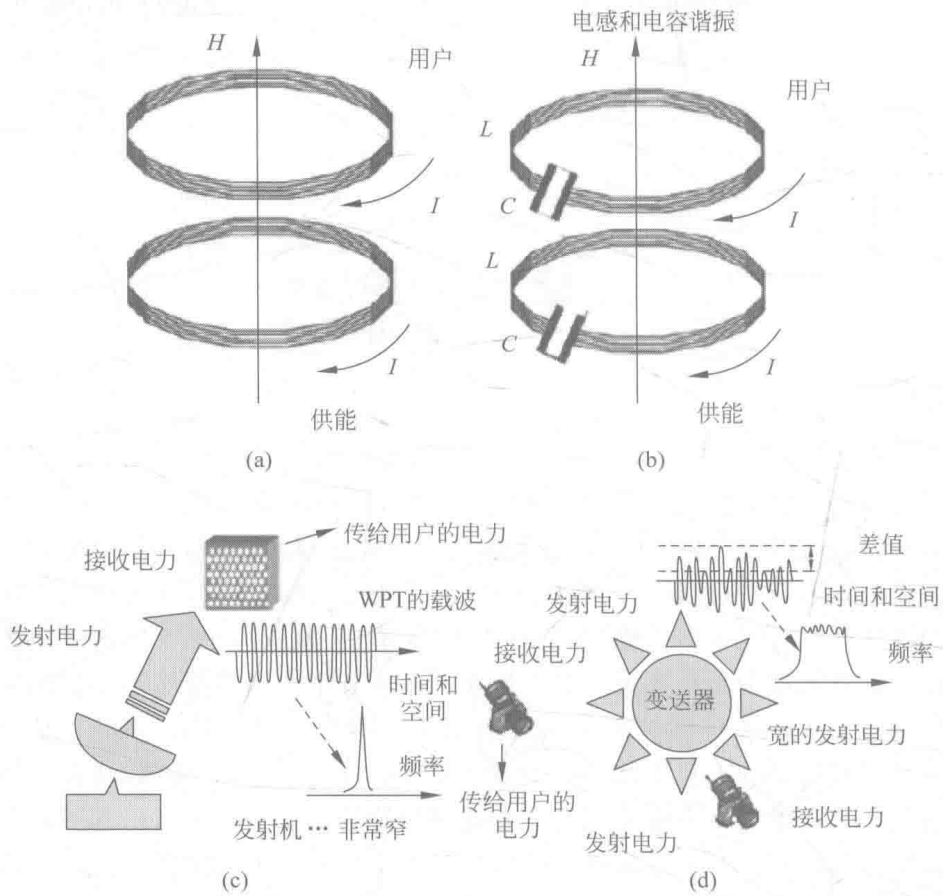


图 0.1 各种无线电力传输技术

(a)电感耦合；(b)谐振耦合；(c)聚焦束使用无线电波的无线电力传输；(d)从扩散的无线电波收集能量

表 0.1 无线电力传输技术的特点

技术	通过电波的 WPT	谐振耦合	电感耦合
场	电磁场	谐振场	磁场
方式	天线	谐振器	线圈
效率	低到高	高	高
距离	短到长	中等	短
功率	低到高	高	高
安全性	电磁安全	正在讨论	磁场安全
规则	无线电波	正在讨论	正在讨论

系统能够从周围环境的无线电频率和微波辐射中获得能量来维持系统的正常运行。此外,当无线电力传输被广泛应用时,电池容量可以降低,这是因为电池可以

被无线充电,因此电池容量的短缺就不再是一个需要费心的问题。

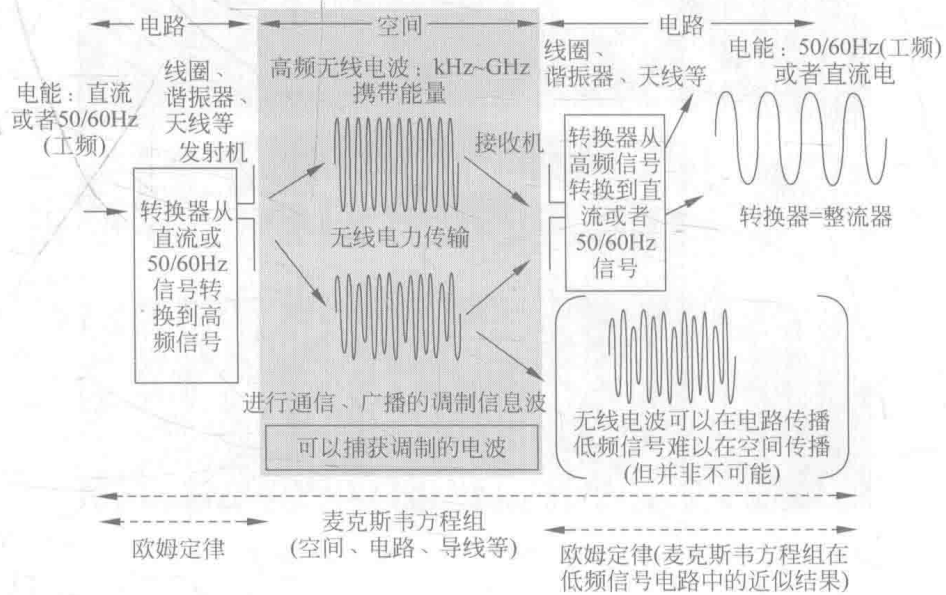


图 0.2 一个无线电力传输系统

这样的场景将很快成为现实。事实上,使用无线电波的无线电力传输是一种很有价值而且很方便的技术,这种技术可以用于移动电话、计算机(personal computer, PC)、电动汽车(electric vehicle, EV),也可用于发光二极管(light emitting diode, LED)、集成电路(integrated circuits, IC)和其他设备的电池充电。在不久的将来,利用无线电力传输技术,可以从太空中获得稳定的二氧化碳零排放的电力。太空太阳能发电卫星(space-based solar power satellite, SPS)的概念是由微波电力传输技术支撑的。太阳能发电卫星是太空中一个巨大的发电站。太阳能发电卫星对于“人类环境”这个概念具有十分重要的意义。人类环境也就是人类活动发生的地方。人类环境科学对人类的环境进行研究,是一门跨学科的科学。这门科学对于人类社会未来的发展具有十分重大的意义。图 0.3 形象地描述了人类环境和人类环境科学。为了维持人类的福利和目前的生活水平,甚至避免世纪灾难,能源、食物和环境的问题应该被重视起来。目前,使用化石燃料产生电力的电力需求和对洁净的环境的需要的冲突正在加剧。迄今为止,有多种方法可以产生电力,如水力发电、火力发电和核电。然而,这些方法引起了全球范围内的环境和污染问题。在这种情况下,在太空中建设发电站来传输电力的可行性研究已经开始进行,这些电力产生于太空中,通过无线电波传向地球。有人认为通过无线电力传输技术来供能的这一构想具有光明的未来。

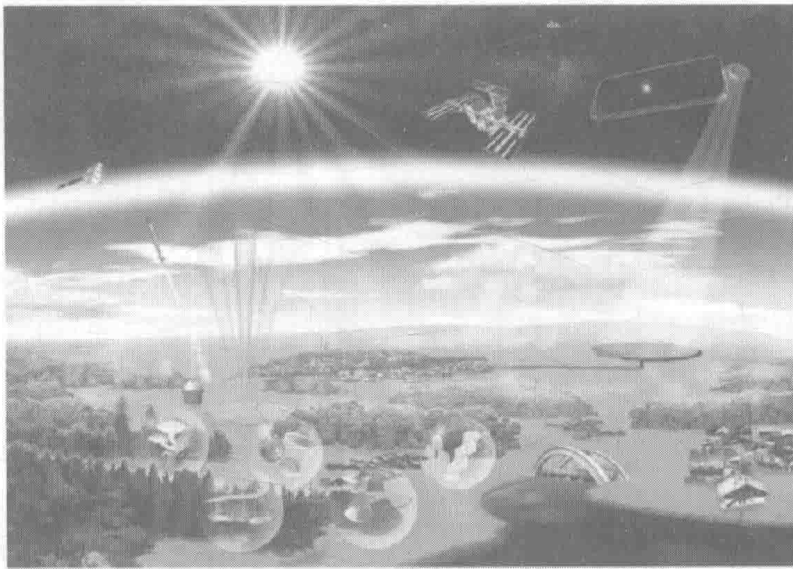


图 0.3 人类环境和人类环境科学示意图

第1章

无线电力传输的历史、现状及未来

1.1 19 世纪的理论预测和首次尝试

1864 年,James C. Maxwell(麦克斯韦)构建了一种数学模型并且通过这种数学模型预测了电磁波的存在。麦克斯韦方程组因此成了众所周知的公式。1884 年,John H. Poynting(坡印亭)意识到坡印亭矢量将在量化电磁能方面扮演重要的角色。1888 年,在麦克斯韦理论的支持下,Heinrich Hertz(赫兹)首先使用他的火花间隙无线电发射机证实了电磁波的存在。19 世纪末,电磁波的预测和证实成为无线电力传输(WPT)的开端。

在同一时期, Marchese G. Marconi(马可尼)和 Reginald Fessenden(费森登)率先提出通过无线电波进行通信, Nicola Tesla(特斯拉)提出了无线电力传输的构想,并在 1899 年进行了无线电力传输(WPT)的实验^[TES 04a, TES 04b]。他说:“这种少量的而又遍及全球的能量可以被收集起来,其功率范围从零点几马力(1 马力=735.5W,译者注,下同)到几马力。无线电力传输的主要应用之一是为孤立的房屋提供照明。”在实验中,特斯拉实际上建立了一个很大的线圈,它连接了 200 英尺(1 英尺=0.3048 米,译者注,下同)高的桅杆,杆顶部有直径为 3 英尺的球。该设备被称为“特斯拉塔”(如图 1.1 所示)。特斯拉给谐振频率为

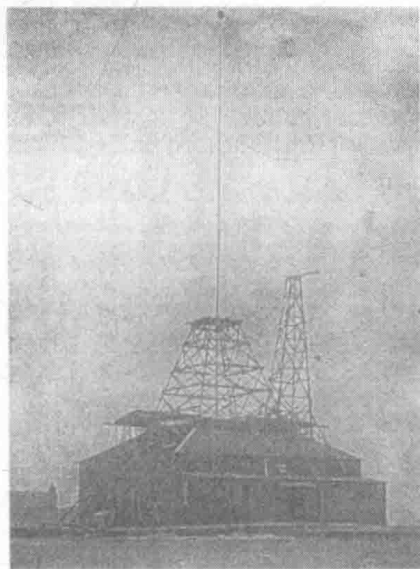


图 1.1 特斯拉塔

150kHz 的线圈提供 300kW 的电能。在顶部的球的射频(radio frequency, RF)电压可能达到 100mV。不幸的是,由于实验中使用 150kHz 的无线电波,其波长为 21km,发射功率在各个方向是发散的,从而导致实验失败。在首次无线电力传输实验尝试后,无线电波一直只应用于无线通信和遥感领域。

1.2 20 世纪 60 年代微波技术激活无线电力传输

为了集中发射电力,提高转换效率,需要使用比特斯拉之前使用的更高的频率。在 20 世纪 30 年代,由于磁控管和速调管的发明,使得在 1~10GHz 产生高功率微波方面取得了很大的进展。在第二次世界大战后,雷达技术的发展推动了高功率、高效率的微波管的发展。接收机接收的能量可以用微波来传递。使用微波的无线电力传输被称为微波电力传输(MPT)。

第二次世界大战期间,在微波管发展的基础上,W. C. Brown(布朗)于 20 世纪 60 年代首先进行了无线电力传输研究。首先,他发明了一个整流天线,这种整流天线用来接收和整流微波。1963 年,第一个整流天线在一种情况下以 50% 的效率输出 4W 的直流电,在另一种情况下以 40% 的效率输出 7W 的直流电^[BRO 84]。利用整流天线,1964 年,Brown 成功地将微波电力传输技术应用于有线直升机;1968 年,Brown 成功地将微波电力传输技术应用于自由飞行的直升机(如图 1.2 所示)。20 世纪 70 年代,Brown 尝试使用 2.45GHz 的微波提升直流-射频-传输-射频-直流的总效率。1970 年,在马歇尔太空飞行中心(Marshall Space Flight Center, MSFC),输出 39W 直流电,直流-直流转换总效率仅为 26.5%^[BRO 73a]。

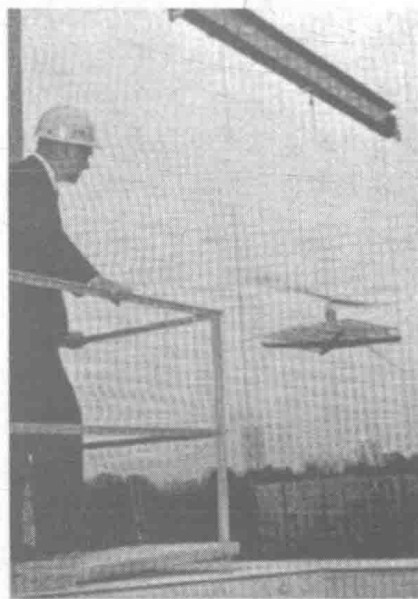


图 1.2 1964 年,W. C. Brown 的微波电力传输直升机示例图^[BRO 84]

1975 年,实验中使用了雷神实验室(Raytheon Laboratory)的磁控管(如图 1.3 所示);输出了 495W 直流电,总的直流-直流转换效率达到了 54%^[BRO 84]。与这个实验同时进行的实验是,Brown、Richard 和他的团队成功地在喷气推进实验室金石系统的维纳斯站(the Venus site of the JPL Goldstone Facility)(如图 1.4 所示)展示了当时最大的微波电力传输技术。直径为 26m 的抛物面形发射天线到整流天

线阵列的距离为1英里(1英里=1.6093km,译者注,下同),整流天线阵列的尺寸是 $3.4\text{m} \times 7.2\text{m}$ 。以 450kW 功率从速调管发射 2.388GHz 微波信号,可以得到 30kW 的整流直流功率,其整流效率为 82.5% 。以Brown的成果为基础,P. E. Glaser于1968年提出了太阳能发电卫星(SPS)系统^[GLA 68]。

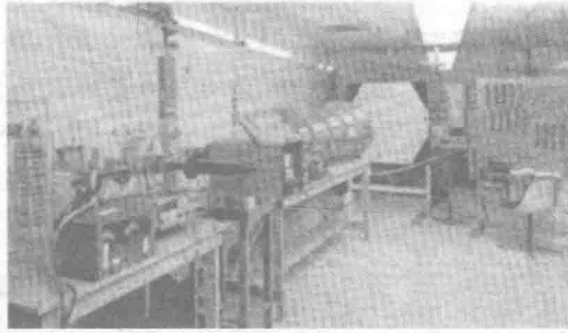


图 1.3 1975年,W. C. Brown在微波功率实验室进行的实验^[BRO 84]

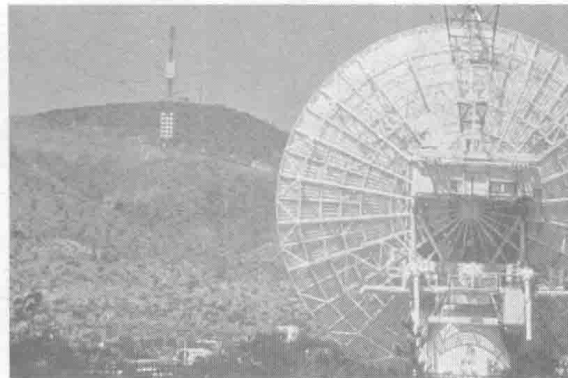


图 1.4 首个地对地微波电力传输实验于1975年在喷气推进实验室金石系统的维纳斯站完成

在20世纪60年代进行的微波电力传输实验之后,太阳能发电卫星的应用使无线电力传输进入了微波电力传输研究阶段^[MCS 02, MAT 02a]。依据理论计算,要实现远距离下的无线电力高效传输,需要很大尺寸的天线,因而太阳能发电卫星的微波电力传输系统可能不适合商业应用。然而,尽管天线的尺寸变得很大,但是太阳能发电卫星还具有其他的优点。SPS被设计为地球同步轨道上的巨大太阳能发电卫星,地球同步轨道距离地球表面 36000km ,地球同步轨道没有云层覆盖,而且全年没有夜晚。微波电力不会被空气、云和雨所吸收,因此,使用微波电力传输技术的太阳能发电卫星在太空中获得的太阳能比从陆地获得的太阳能高10倍。由于预期的高效益,在20世纪后期,微波电力传输的研究主要集中在太阳能发电卫星应用上。

在整个 20 世纪 80 年代,许多日本科学家研究和开发了微波电力传输技术^[MAT 95a, MAT 02a]。在 1983 年和 1993 年, Hiroshi Matsumoto 团队率先在太空中进行了 MPT 实验。1983 年的火箭实验被称为电离层的微波非线性相互作用实验 (microwave ionosphere nonlinear interactive experiment, MINIX) (如图 1.5 所示)。而 1993 年进行了国际空间年-太空微波电力传输 (international space year-microwave energy transmission in space, ISY-METS) 实验。这两个实验主要研究强微波和电离层等离子体之间的非线性相互作用。在 MINIX 中, 研究人员用了一个 800W, 2.45GHz 的电磁炉式 (cooker-type) 磁控管作为微波发射机, 研究过程中发现了新的波-粒子相互作用的现象。等离子理论和计算机实验证明了这个观测现象^[MAT 95b, MAT 95c]。这些火箭实验对太阳能发电卫星应用有指导意义。

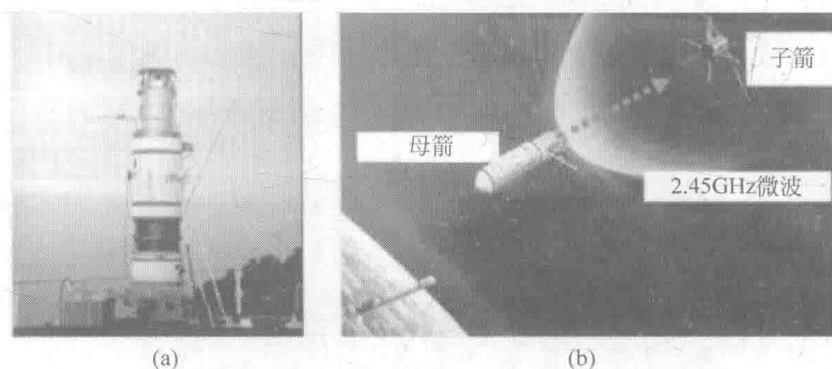


图 1.5 1983 年日本 Matsumoto 进行的电离层的微波非线性相互作用实验的首次火箭实验
(a) 母子火箭图; (b) 实验图

在 20 世纪 90 年代,世界各地已经有了很多微波电力传输实验室和实验场所。这项技术的研究不仅仅用于太阳能发电卫星,也用于其他商业领域。研究人员经常将 2.45GHz 或 5.8GHz 的工业、科学和医疗 (industry, science and medical, ISM) 频段用于微波电力传输系统。加拿大通信研究中心 (Communication Research Centre, CRC) 成功地在 1987 年进行了使用微波电力传输的无燃料飞机飞行实验,这就是所谓的固定高空中继平台 (stationary high-altitude relay platform, SHARP) (如图 1.6 所示)^[SCH 88, SHA 88]。通信研究中心发送 2.45GHz, 10kW 的微波信号到飞机模型,飞机模型总长 2.9m,翼展 4.5m,飞行高度超过 150m。继 Brown 之后,在美国仍有很多关于微波电力传输的研究和开发,例如,对反向微波发射器、整流天线、新设备和微波电路技术的研究^[BRO 88]。在日本,一些领域也进行了微波电力传输实验,例如,在 1992 年的微波供能飞机实验 (microwave lifted airplane experiment, MILAX) 项目中,工作在 2.411GHz 的无燃料飞机飞行实验就采用了微波相控阵传输电力 (如图 1.7 所示)^[MAT 93]; 1994—1995 年,一些

能源公司和大学开展了 2.45GHz 地对地微波电力传输实验(如图 1.8 所示)^[SHI 98a]; 以及 1995 年工作在 2.45 GHz 的微波电力传输的无燃料光源飞艇实验^[KAY 96]。在 MILAX 项目中, 日本 SHARP(夏普公司)负责目标系统技术。1995 年, 神户大学(Kobe University)与通信研究实验室(Communications Research Laboratory, CRL), 现信息和通信技术研究所(National Institute of Information and Communication Technology, NICT))成功地进行了包括飞行飞艇在内的微波电力传输实验, 称为高海拔地区持久能量传输的飞艇实验(energy transmission toward high-altitude long endurance airship experiment, ETHER)项目。研究小组发送 2.45GHz, 10kW 的微波到距地面 35~45m 的飞行飞艇上。这些实验中, 除 MILAX 项目外, 研究人员采用抛物面天线微波电力传输系统, 且该系统使用微波管。而相控阵系统仅在 MILAX 项目中使用, 且 MILAX 项目首先在微波电力传输现场实验中使用相控阵系统。在日本发展微波电力传输技术的同时, 微波发射机的品种、反向微波发射机特别是整流天线也得到了发展。欧洲目前正在开发一些独特的技术, 研究人员计划在留尼旺岛(Reunion Island)进行地对地微波电力传输实验(如图 1.9 所示)^[CEL 97, CEL 04], 但实验项目目前尚未进行。

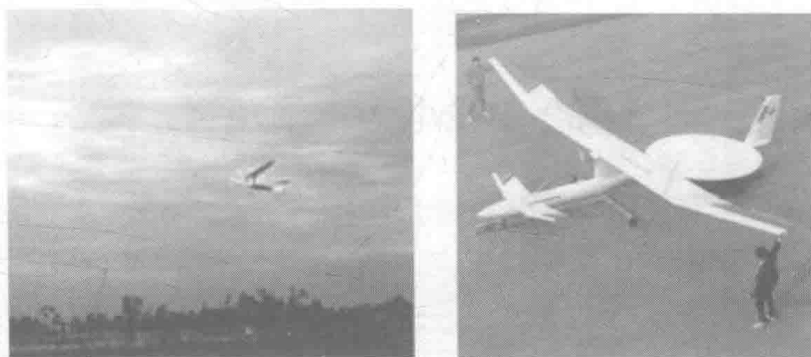


图 1.6 1987 年加拿大的固定高空中继平台飞行实验和 1/8 模型飞机^[SHA 88]



图 1.7 1992 年 MILAX 项目飞机实验展示的飞机模型和日本使用的相控阵

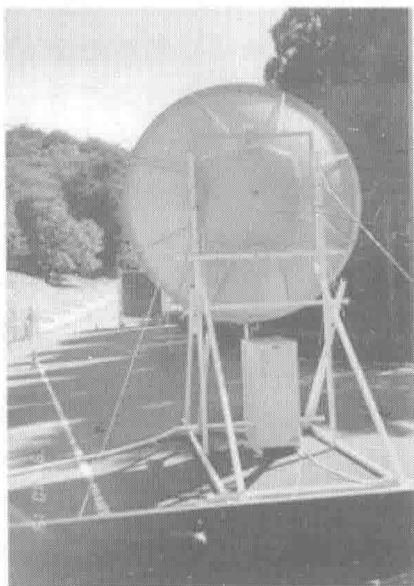


图 1.8 1994 年到 1995 年日本进行的
地对地微波电力传输实验

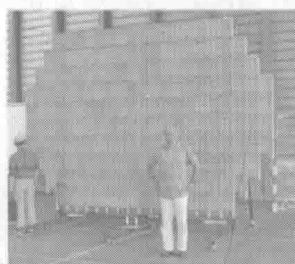


图 1.9 Grand bassin, Réunion 和 France 及
他们的整流天线原型^[CEL 04]

1.3 20 世纪电感耦合无线电力传输项目

麦克斯韦整合了安培定律和法拉第定律到他的方程组中。在麦克斯韦方程组建立之前,从安培定律和法拉第定律中知道变化的电流可以产生磁场,而变化的磁场又产生电流。当一个导体电流变化通过电磁感应引起另一个导体两端产生电压时,这两根导体被称为互感耦合或磁耦合,这种现象被称为电感耦合,适用于电力发电机和变压器。与使用无线电波信号的无线电力传输相反,电感耦合无线电力传输通常使用千赫到兆赫范围内较低的频率。

类似于特斯拉的第一个无线电力传输实验,1894 年, M. Hutin 和 M. Le-Blanc 提出了使用 3kHz 交流发电机^[HUT94]对电动汽车(EV)感应供电的设备和方法。大约 100 年前,在蒸汽机问世后不久,电动汽车就被研制出了。然而在内燃机研制出后,电动汽车变得不太流行了。在 Hutin 和 Le-Blanc 之后,电动汽车的电感耦合无线电力传输充电器像特斯拉的梦想一样最终被人遗忘。

1972 年,新西兰奥克兰大学(University of Auckland)的 Don Otto(奥托)教授提出了一种感应驱动的车辆,使用正弦硅可控整流变换器^[OTT 74]整流的 10kHz 电力驱动车辆。他采用了两个具有圆形横截面的铜导体,其中一个铜导体放置在道路上作为发射器,另一个铜导体被放置在距路面 20cm 以上的电动汽车的车身上。