

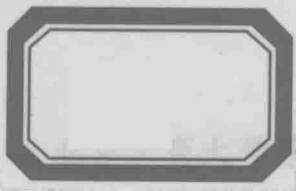
# 无线供电技术

WUXIAN GONGDIAN JISHU

邓亚峰 著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press



技术专著出版资助

# 无线供电技术

邓亚峰 著

北京

冶金工业出版社

2014

## 内 容 提 要

本书首先对无线供电进行概述,并介绍无线供电技术的历史发展、分类以及国内外的研究进展,接着分析无线供电技术的拓扑结构,然后分别介绍电磁感应式和电磁谐振式无线供电,随后专门介绍小型化无线供电技术,还介绍了基于无线供电技术的信号传输,最后对无线供电技术的热点研究方向以及后续工作进行了介绍。

本书可供从事无线电能传输研究的科研人员参考,也可作为机电及相关专业师生的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

无线供电技术/邓亚峰著. —北京:冶金工业出版社,  
2013.3(2014.1重印)

ISBN 978-7-5024-6148-5

I. ①无… II. ①邓… III. ①供电系统 IV. ①TM72

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第019448号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 尚海霞 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6148-5

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京慧美印刷有限公司印刷

2013年3月第1版,2014年1月第2次印刷

169mm×239mm;12印张;231千字;179页

32.00元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

# 前 言

无线供电是借助电磁场或电磁波进行能量传输的一种技术。近年来，许多便携式电器（如笔记本电脑、手机、音乐播放器等移动设备）都需要电池和充电，电源电线频繁地拔插，既不安全也容易磨损；一些充电器、电线、插座标准也不完全统一，这样就造成了原材料的浪费，形成了对环境的污染；在特殊场合下（例如矿井和石油开采中），传统的输电方式在安全上也存在隐患；孤立的岛屿和工作于山头的基站采用架设电线的传统配电方式又存在很多的困难。这些因素都促使对无线供电技术的需求越来越迫切。随着磁集成技术、高频电源技术和电力电子技术等基础理论的发展，无线供电技术在进入21世纪后迅速成为国内外的研究热点和重点。

无线供电技术的研究必将导致大量新的研究领域出现，产生新的经济增长点，使电能的应用更为广阔，必将改善在特殊环境中电工设备供电受客观环境限制的影响，开拓如机械制造、能源交通以及在生物医学、家用电器等多方面的应用，并带动相关技术的发展。因此，该技术的研究不仅有重要的科学意义，而且有明确的实用价值和广阔的应用前景，可能带来显著的经济和社会效益。无线供电技术的安全性、可靠性和灵活性决定了它的巨大应用潜力。

本书的主要内容为：第1章介绍无线供电技术的诞生、历史发展，并介绍无线供电技术的研究意义，对无线供电技术的分类进行详细介绍，对国内外最新的理论研究和应用研究的进展情况进行总结；第2章分析无线供电技术发展依赖的三大技术，即磁耦合技术、高频电源技术及电力电子技术，并从供能环节（初级电路）、传输环节（耦合电

路)、接收环节(次级电路)对无线供电技术的拓扑结构进行分析;第3章先对电磁感应式无线供电的耦合模型和传输性能指标进行分析,通过对初、次级线圈位置改变时对电磁感应式无线供电系统耦合性能的影响进行分析,推导得到气隙、中心偏移量和偏转角改变时互感的理论计算公式,首次引入椭圆积分的级数表达式对互感计算公式进行优化,得到比较准确的互感理论计算公式,同时该公式具有普适性,对互感的计算有重要的参考价值,本章还对初、次级线圈相对位置对耦合性能的影响进行了理论研究,对电磁感应式无线供电系统进行了实验研究;第4章对电磁谐振式无线供电系统的传输性能指标进行分析,并进行电磁谐振式无线供电系统的实验研究和双增强线圈电磁谐振式无线供电系统实验研究,并在双增强线圈电磁谐振式无线供电系统研究中首次提出最大有效传输距离的概念;第5章针对小型化无线供电系统的应用需求以及性能指标进行理论分析,并设计相关实验进行研究;第6章进行基于无线供电技术的独立式信号传输研究和高频注入式信号传输研究;第7章对无线供电技术热点研究方向进行介绍,分别介绍无线供电系统的自适应能量控制、高压输电线无线能量拾取技术研究、植入式医疗装置无线供电技术研究、扭矩传感器无线能量传输技术研究、水下仪器的无线供电技术研究等;第8章对无线供电技术做了总结和展望。

本书的主要内容是在北京科技大学王长松教授的指导下,由作者在攻读博士学位期间所做的科研课题总结而成。感谢课题组成员张绪鹏、孙述、刘澜涛、查成东、张旭君、徐西波等同志所做的大量前期工作和后续补充。张绪鹏博士对感应式无线供电技术做了大量的理论分析工作和实验研究,孙述硕士和刘澜涛硕士在作者攻读博士学位期间,辅助作者做了大量的实验工作和文献检索工作,他们富有成效的工作为作者撰写本书提供了十分有益的帮助。在这里一并向他们致以衷心的感谢。

在本书的撰写过程中，李岳峰、吴志海、王章宇、陆孙事等对本书的书稿进行了认真的整理，并对书中错别字进行了纠正，在此表示感谢！也感谢家人彭玲玲、邓文斌、彭延华在作者撰写本书期间给予的大力支持。

本书的出版得到北京工商大学学术专著出版资助，在此对学校 and 学院各级领导给予的支持和帮助谨致以衷心的感谢。

由于时间仓促，作者学识水平及试验条件有限，书中疏漏之处敬请专家、读者不吝批评指正。

邓亚峰

2012年10月于北京

# 目 录

1 绪论 .....	1
1.1 无线供电概述 .....	1
1.2 无线供电技术历史发展 .....	2
1.3 无线供电技术分类 .....	4
1.3.1 电磁辐射式无线供电 .....	4
1.3.2 电磁谐振式无线供电 .....	7
1.3.3 电磁感应式无线供电 .....	11
1.4 国内外无线供电技术的研究进展 .....	11
1.4.1 无线供电技术的研究趋势 .....	12
1.4.2 国内外无线供电技术理论研究进展 .....	13
1.4.3 国内外无线供电技术应用研究进展 .....	14
1.5 本章小结 .....	31
2 无线供电技术的拓扑结构分析 .....	32
2.1 概述 .....	32
2.1.1 磁耦合技术 .....	32
2.1.2 高频电源技术 .....	33
2.1.3 电力电子技术 .....	34
2.2 无线供电系统结构及工作原理 .....	35
2.2.1 无线供电系统的结构 .....	35
2.2.2 无线供电系统的工作原理 .....	35
2.3 无线供电系统拓扑结构分析 .....	36
2.3.1 供能环节——初级电路 .....	36
2.3.2 传输环节——耦合电路 .....	39
2.3.3 接收环节——次级电路 .....	41
2.4 本章小结 .....	48

3 电磁感应式无线供电	49
3.1 电磁感应式无线供电系统耦合模型	49
3.1.1 电磁感应式无线供电系统耦合模型分析	49
3.1.2 电磁感应式无线供电系统的磁路	51
3.1.3 电磁感应式无线供电系统的补偿	61
3.1.4 电磁感应式无线供电系统的自感和互感参数分析	64
3.1.5 电磁感应式无线供电系统的分布电容控制	68
3.2 电磁感应式无线供电系统传输性能指标	69
3.2.1 电磁感应式无线供电系统的电压增益	69
3.2.2 电磁感应式无线供电系统的初级输入视在功率	71
3.2.3 电磁感应式无线供电系统的输出功率	73
3.2.4 电磁感应式无线供电系统的传输效率	75
3.3 初、次级线圈相对位置对耦合性能的影响	77
3.3.1 理想状态下互感计算	78
3.3.2 中心偏移量 $\Delta$ 对互感的影响	80
3.3.3 偏转角 $\alpha$ 对互感的影响	82
3.3.4 中心偏移量 $\Delta$ 和偏转角 $\alpha$ 同时作用对互感的影响	83
3.4 电磁感应式无线供电系统的实验研究	85
3.4.1 电磁感应式无线供电系统电压源设计	87
3.4.2 电磁感应式无线供电系统初、次级线圈制作	87
3.4.3 气隙、中心偏移量和偏转角对互感的影响研究	88
3.4.4 工作频率和负载对输出功率的影响	91
3.5 本章小结	92
4 电磁谐振式无线供电	93
4.1 电磁谐振式无线供电系统传输性能指标	93
4.1.1 电磁谐振式无线供电系统的谐振频率	94
4.1.2 电磁谐振式无线供电系统的传输效率	101
4.1.3 电磁谐振式无线供电系统的品质因数	106
4.2 电磁谐振式无线供电系统研究	112
4.2.1 实验器件的选择	112
4.2.2 电磁谐振式无线供电系统的实验研究	114
4.3 双增强线圈电磁谐振式无线供电系统研究	119
4.3.1 双增强线圈电磁谐振式无线供电系统的传输效率	120



4.3.2	双增强线圈电磁谐振式无线供电系统的最大有效传输距离	125
4.3.3	双增强线圈电磁谐振式无线供电系统的实验研究	128
4.4	本章小结	131
<b>5</b>	<b>小型化无线供电系统</b>	<b>133</b>
5.1	平面变压器技术和平面磁集成技术	133
5.2	小型化无线供电系统传输性能指标	135
5.2.1	小型化无线供电技术的电感	135
5.2.2	小型化无线供电技术的损耗	136
5.2.3	小型化无线供电技术的漏感	138
5.3	小型化无线供电系统	139
5.3.1	系统结构	139
5.3.2	系统的感应线圈	140
5.4	小型化无线供电技术两项实验	141
5.4.1	低频负载实验	141
5.4.2	高频谐振空载实验和负载实验	143
5.5	本章小结	143
<b>6</b>	<b>基于无线供电技术的信号传输</b>	<b>145</b>
6.1	基于无线供电技术的独立式信号传输	146
6.1.1	基于电磁感应式无线供电技术的独立式信号传输研究	146
6.1.2	基于电磁谐振式无线供电技术的独立式信号传输研究	147
6.2	基于无线供电技术的高频注入式信号传输	149
6.2.1	基于电磁感应式无线供电技术的高频注入式信号传输研究	149
6.2.2	基于电磁谐振式无线供电技术的高频注入式信号传输研究	151
6.3	基于电磁感应式无线供电技术的信道计算	152
6.3.1	能量传输效率分析	152
6.3.2	信号传输效率分析	153
6.4	本章小结	154
<b>7</b>	<b>无线供电技术热点研究方向介绍</b>	<b>155</b>
7.1	无线供电系统的自适应能量控制	155
7.1.1	自适应能量传输系统	155
7.1.2	无线供电系统的变频控制分析	155
7.2	高压输电线无线能量拾取技术研究	157

7.3 植入式医疗装置无线供电技术的研究 .....	158
7.3.1 植入式医疗装置无线供电技术研究的意义 .....	158
7.3.2 国内外研究现状分析及存在问题 .....	159
7.3.3 应用方向和应用前景 .....	161
7.3.4 研究的可行性分析 .....	161
7.4 扭矩传感器无线能量传输技术研究 .....	164
7.5 水下仪器的无线供电技术研究 .....	165
7.6 本章小结 .....	166
8 总结和展望 .....	167
8.1 本书主要结论 .....	167
8.2 本书主要创新点 .....	168
8.3 无线供电技术在应用发展中应注意的问题 .....	169
8.4 后续工作展望 .....	170
8.5 本章小结 .....	170
参考文献 .....	171

# 1 绪 论

## 1.1 无线供电概述

无线供电是借助电磁场或电磁波进行能量传输的一种技术。近年来,许多便携式电器(如笔记本电脑、手机、音乐播放器等移动设备)都需要电池或充电,电源电线频繁地拔插,既不安全也容易磨损;一些充电器、电线、插座标准也不完全统一,这样就造成了原材料的浪费,形成了对环境的污染;在特殊场合下(例如矿井和石油开采中),传统的输电方式在安全上也存在隐患;孤立的岛屿和工作于山头的基站采用架设电线的传统配电方式也存在很多的困难。无线供电技术采用电磁感应耦合的方式进行电能传输,消除了摩擦、触电的危险,提高了系统电能传输的灵活性,显著减小了用电系统的质量和体积。无线供电传输系统多功能性好、可靠性高、柔性好,安全性、可靠性及使用寿命较高,加上无接触、无磨损的特性,能够满足不同条件下电工设备的用电需求,同时兼顾了信息传输功能的需求。该技术特别适用于那些不同部件之间需要相对独立运动的设备,这些设备小到微特电机、精密仪表,大到工厂中的操作臂、机器人,城市交通中的电车、地铁,尤其适用于那些空间受限或需要完全封闭的特殊应用场合。在上述情形下,无线供电技术被美国《技术评论》杂志评选为未来十大科研方向之一,2008年12月15日,在纪念中国科协成立50周年大会上,无线供电技术也被中国科协评选为“10项引领未来的科学技术<sup>①</sup>”之一。

无线供电技术(WPS, wireless power supply)也称为无接触能量传输(NCPS, non-contact power supply)、感应耦合电能传输(ICPT, inductive coupled power transfer)、无接触能量传输(CPT, contactless power transfer)或松耦合电能传输(LCIPT, loosely coupled inductive power transfer)。我国在无线供电方面的研究才刚刚起步,这方面的研究比欧美国家要落后不少。

无线供电系统具有以下优点:

(1) 没有裸露导体存在,能量传输能力不受环境因素的影响,如尘土、污物、水等,因此,这种方式比起通过导线连接来传输能量更为可靠、耐用,因为

<sup>①</sup> 10项引领未来的科学技术——基因修饰技术、未来家庭机器人、新型电池、人工智能技术、超高速交通工具、干细胞技术、光电信息技术、可服用诊疗芯片、感冒疫苗、无线能量传输技术。

它不存在机械磨损和摩擦。

(2) 系统各部分之间相互独立,可以保证电气绝缘,且不产生火花。

(3) 变压器初、次级可以相互分离,次级端可以采用多个绕组同时接收能量,并可同时为多个用电负载提供电能。初、次级端可以处于相对静止或运动状态,其配合比较自由,组织形式灵活多样,适用范围也更广泛。

基于无线供电技术的以上优点,所以其在各个领域的应用都有着传统供电方式无法比拟的优势。很多低功耗的设备将摆脱电缆的束缚,也不再使用电池;采用无线供电技术的很多设备的安全性能、可靠性将有较大的提升;电能可跨越一些特殊的环境,进行远距离传输;无线局域网也能输送电能,处在网络覆盖中的便携设备的电源使用时间将大大延长,甚至可以连续使用。无线供电技术的研究推动了电力电子技术的发展,既具有较好的理论意义,又具有较高的实用价值。

无线供电技术的研究必将导致大量新的研究领域的出现,产生新的经济增长点,使电能的应用更为广阔,必将改善在特殊环境中电工设备馈电受客观环境限制的影响,开拓如机械制造、能源交通以及在生物医学、家用电器等多方面的应用,并带动相关技术的发展。因此,无线供电技术的研究不仅有重要的科学意义,而且有明确的实用价值和广阔的应用前景,可能带来显著的经济和社会效益。无线供电系统的安全性、可靠性和灵活性决定了它的巨大应用潜力。

## 1.2 无线供电技术历史发展

无线输电技术一直是人们关注的课题,早在 1890 年,物理学家兼电气工程师 Nicola Tesla 就做了无线电能传输的实验(见图 1-1),他是最早进行远距离无线输电实验的人,因而有人称之为“无线电能传输之父”。Nicola Tesla 构想的无线电能传输方法是把地球作为内导体,把地球电离层作为外导体,通过放大发射机以径向电磁波振荡模式,在地球与电离层之间建立起大约 8Hz 的低频共振,建立在地面上的特斯拉电塔可以接收和发射能量(见图 1-2),利用环绕地球的表面电磁波来传输能量(见图 1-3)。后人虽然从理论上完全证实了这种方案的可行性,但世界还没有实现大同,想要在世界范围内进行能量传播和免费获取也是不可能的。因此,一个伟大的科学设想就这样胎死腹中。

其后, Goubau、Sohweing 等人从理论上推算了自由空间波束导波可达到近 100% 的传输效率,并随后在反射波束导波系统上得到了验证。20 世纪 20 年代中期,日本的 H. Yagi 和 S. Uda 发明了可用于无线电能传输的定向天线,又称为八木-宇田天线。60 年代初期,雷声公司(Raytheon)的 W. C. Brown 做了大量的无线电能传输研究工作,从而奠定了无线电能传输的实验基础,使这一概念变成了现实。雷声公司在实验中设计了一种效率高、结构简单的半波电偶极子半导

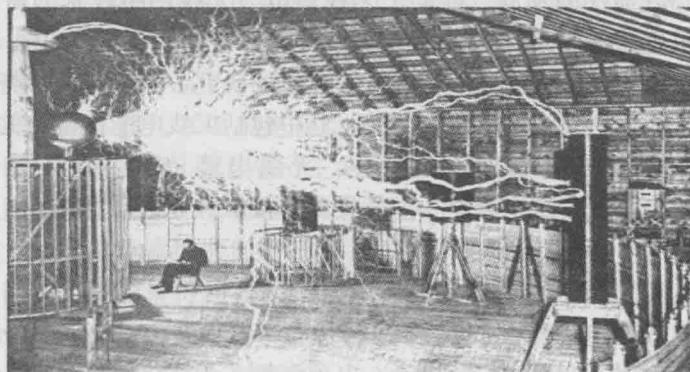


图 1-1 Nicola Tesla 进行无线电力传输实验



图 1-2 特斯拉电塔

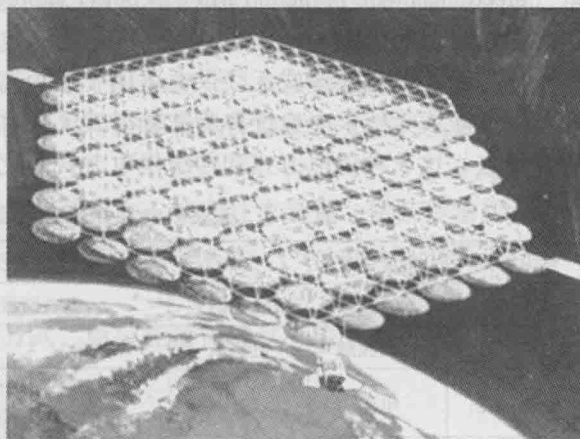


图 1-3 环绕地球的表面电磁波传输能量

体二极管整流天线，将频率 2.45GHz 的微波能量转换为了直流电，1977 年，雷声公司又在实验中使用 GaAs - Pt 肖特基势垒二极管，用铝条构造半波电偶极子和传输线，输入微波的功率为 8W，获得了 90.6% 的微波一直流电整流效率。后来改用印刷薄膜，在频率 2.45GHz 时效率达到了 85%。自从 Brown 实验获得成功以后，人们开始对无线电能传输技术产生了兴趣。1975 年，在美国宇航局的支持下，开始了无线电能传输地面实验的 5A 计划，喷气发动机实验室和 Lewis 科研中心曾将 30kW 的微波无线输送 1.6 km，其微波一直流的转换效率达 83%。1991 年，华盛顿 ARCO 电力技术公司使用频率 35GHz 的毫米波，整流天线的转换效率为 72%，到了 1998 年，5.8GHz 印刷电偶极子整流天线阵转换效率为 82%。

21 世纪初，特别是近年来，便携式电子产品大量涌现，以及传感器无线网

络技术与 MEMS 器件的发展,推动了无线供电与无线网络技术的研发,并在理论研究和实用化技术方面取得了初步的成果。

前苏联在无线电能传输方面也进行了大量的研究。莫斯科大学与微波公司合作,研制出了一系列无线电能传输器件,其中包括无线电能传输的关键器件——快回旋电子束波微波整流器。近几年,无线电能传输发展更是迅速,Wild Charge、Splash Power、东京大学相继开发出非接触式充电器。

### 1.3 无线供电技术分类

无线供电分为电磁辐射式无线供电 (electromagnetic radiation wireless power supply, 本书简称为“辐射式 WPS”)、电磁谐振式无线供电 (electromagnetic resonance wireless power supply, 本书简称为“谐振式 WPS”) 和电磁感应式无线供电 (electromagnetic induction wireless power supply, 本书简称为“感应式 WPS”)。电磁辐射式无线供电可用于远距离电能传输;电磁谐振式无线供电适用于中等距离电能传输;电磁感应式无线供电可用于近距离电能传输。电磁谐振式无线供电和电磁感应式无线供电也统称为非辐射式无线供电,非辐射式无线供电是本书的研究重点。这 3 种供电方式和传统供电方式的比较见表 1-1。

表 1-1 无线供电方式和传统供电方式的比较

供电方式	传统供电	无线供电				
特 点	导线连接	电磁辐射式	电磁谐振式		电磁感应式	
类 型	移动接触	电磁波	紧耦合	松耦合	紧耦合	松耦合
基本理论	电路	波的传导	电场交流电路	分布式的电场电力电子	磁路交流电路	分布式的磁场电力电子
典型技术	导线连接器	天线波的引导装置	电容	容性能量传输	变压器	感性能量传输

#### 1.3.1 电磁辐射式无线供电

对无线供电技术来说,能量传递的效率是最重要的。因此,方向性强、能量集中的激光与具有类似性质的微波束是实验优先选择的途径。但激光光束在空间传输易受到空气和尘埃的散射,非线性效应明显,且输出功率小,因此,微波传输能量成为能量传递的首选方式。

微波是指那些频率在 300 ~ 3000MHz 之间的电磁波,它的波长在 1 ~ 1000mm 之间。电磁波俗称为无线电波,它是人们非常熟悉的一个概念。正是由于发现了它,才奠定了广播、电视和现代通信技术的基础。电磁波不仅能传输信号,它也能传输电能。美国 Power Cast 公司开发了这项技术,可为各种电子产品充电或供电,包括耗电量相对较低的电子产品,如手机、MP3 随身听、温度传感器、助

听器,以及汽车零部件和医疗仪器。整个系统基本上包含了两个部件,称为 Power Caster 的发射器模块和称为 Power Harvester 的接收器模块,前者可插在插座上,后者则嵌在电子产品上。发送器发射安全的低频电磁波,接收器接收发射频率的电磁波,据称约有 70% 的电磁信号能量转换为直流电能。该项技术之所以会得到多家厂商的青睐,原因在于它独特的电磁波接收装置,它的电磁波接收装置能够根据不同的负载、电场强度来做调整,以维持稳定的直流电压。

电磁波无线能量传输技术直接利用了电磁波能量可以通过天线发送和接收的原理,例如微波无线能量传输技术,就是利用微波转换装置把直流电转变为微波,然后由天线发射出去;大功率的电磁射束通过自由空间后被接收天线收集,经过微波整流器后重新转变为直流电。它的实质就是用微波束来代替输电导线,通过自由空间把电能从一处输送到另一处。该技术可以实现极高功率的无线传输,但是在能量传输过程中,发射器必须对准接收器,能量传输受方向限制,并且不能绕过或穿过障碍物,微波在空气中的损耗也大,效率低,对人体和其他生物都有严重伤害,所以该技术一般应用于特殊场合,如低轨道军用卫星、天基定向能武器、微波飞机、卫星太阳能电站等许多新的、意义重大的科技领域,它具有美好的发展前景。

因为电磁波的频率越高,能量就越集中,方向性也越强。微波传输能量就是将微波聚焦后定向发射出去,在接收端通过整流天线(rectenna)把接收到的微波能量转化为直流电能。

作为一种点对点的能量传输方式,微波能量传输具有以下特点:

- (1) 以光速传输能量;
- (2) 能量传输方向可迅速变换;
- (3) 在真空中传递能量无损耗;
- (4) 波长较长时,在大气中能量传递损耗很小;
- (5) 能量传输不受地球引力差的影响;
- (6) 工作在微波波段,换能器可以很轻便。

20 世纪 60 年代,William C 向世人展示了电磁波传输电能示意图,如图 1-4 所示。该电磁波传输系统包括微波源、发射天线、接收天线和整流器等几部分,其中最关键的是把微波或激光束的能量转变为直流电的整流器。微波源是可供无线输电技术选用的电磁波发生器,电磁波源内有磁控管,在 2.45GHz 频段输出 5~200W 的功率,在厘米波段,理想磁控管和放大管的效率分别为 90% 和 80%,而理论上效率最高的磁旋束管放大器可达到 100%,放大系数无限大;在毫米波段,回旋管的实际效率已达到 40%;在光波波段,阳光直射时激光器的效率约 20%。微波源输出的能量通过同轴电缆连接到适配器上,亚铁酸盐的循环器连接在波导管上,使波导管和发射天线相匹配。发射天线包含 8 个部分,

每个部分上都有 8 个缝隙，这 64 个缝隙均匀地向外发射电磁波。这种开孔的波导天线很适合用于无线电能传输，因为它有高达 95% 的孔径效率和很高的能量捕捉能力。硅控整流二极管天线用来收集微波并把它转换成直流电，在展示的电磁波输能系统中，该接收天线拥有 25% 的收集和转换效率，这种天线在 2.45GHz 频段测试时曾经达到甚至超过 90% 的效率。由于传输距离比较远，因此增强天线的方向性和效率会十分困难。

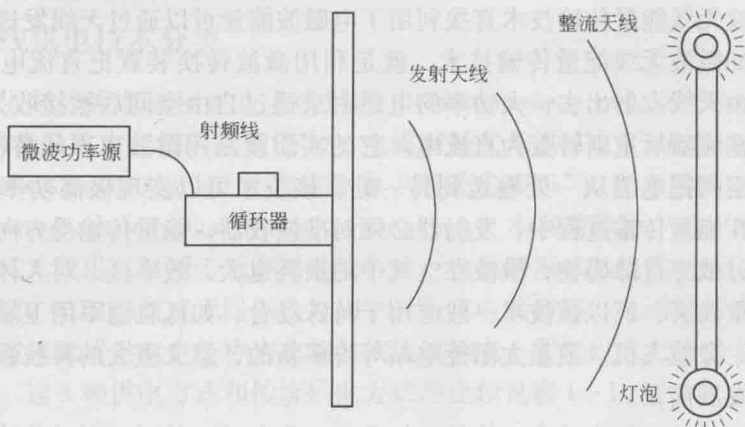


图 1-4 电磁辐射式无线供电模型

用  $D$  代表微波在自由空间传输的距离， $A_t$ 、 $A_r$  分别代表发射天线和接收天线的面积， $\lambda$  表示工作波长，则微波在自由空间的传输效率  $\eta$  是参数  $\tau$  的函数， $\tau$  的函数表达式为： $\tau = \frac{\sqrt{A_t A_r}}{\lambda D}$ 。图 1-5 所示为它们之间的关系图，假设发射天线的口径场分布为高斯型。

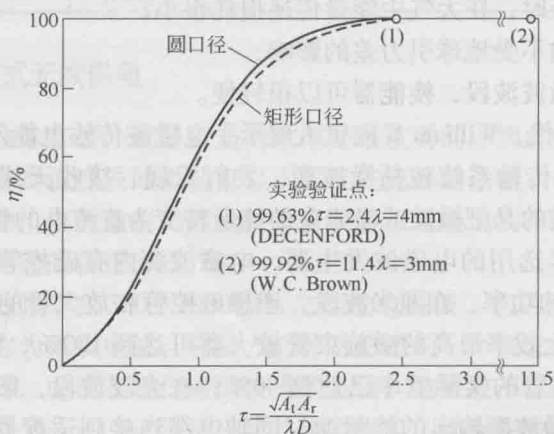


图 1-5 自由空间微波传输效率  $\eta$  和  $\tau$  的关系



从图 1-5 中曲线可以得出这样一个结论, 传输效率  $\eta$  与传输距离  $D$  没有直接的联系, 传输效率  $\eta$  是由  $\frac{\sqrt{A_r A_t}}{\lambda D}$  决定。因此, 距离  $D$  增大的效应可由  $A_t$ 、 $A_r$  的增加或  $\lambda$  的减小来补偿。微波传输能量的总效率等于直流到微波、微波传输和接收整流三部分效率之积。

微波输能总效率和各部分的效率见表 1-2。由表 1-2 可以看出, 目前微波传输能量的效率还不高, 但是还是很有发展潜力的。

表 1-2 微波输能总效率和各部分的效率

项 目	当前值/%	改进值/%	预期值/%
微波发生器的效率	76.7	85	90
发生器至接收天线口径之间的传输效率	94	94	95
接收整流效率	94	75	90
总效率	39	60	77

早在 1968 年, 美国航天工程师 Peter Glaser 就已经更进一步提出了空间太阳能发电 (SSP, space solar power) 的概念。他设想在大气层外通过卫星收集太阳能发电, 然后通过微波将能量无线传输回地面, 并且重新转化成电能供人使用。这一设想不是在仅数十千米的距离上用微波传递能量, 而是要把能量从三万多千米之外的太空精确地射向地面接收站。

加拿大科学家正计划制造一架无人飞机, 飞行高度 33km, 可以在空中连续飞行几个月。这可能是世界上第一架可以真正投入使用的远程无线供电飞机, 本身不携带燃料, 而是从地面的微波站中获取能量。在这架无人机起飞之后, 地面的高功率发射机通过天线将发射机所产生的微波能量汇聚成能量集中的窄波束, 然后将其射向高空飞行的微波飞机。微波飞机通过微波接收天线接收能量, 转换成直流电, 再由直流电动机带动飞机的螺旋桨旋转。因为无需携带燃料和发动机, 这种飞机的有效载荷将会大大提升。

### 1.3.2 电磁谐振式无线供电

谐振是一种非常高效的能量传输方式, 它的基本原理是: 两个振动频率相同的物体之间可以高效地传输能量, 而对不同振动频率的物体几乎没有影响。根据谐振的特性, 能量传输是在一个谐振系统内部进行, 对谐振系统以外的物体没有影响。

图 1-6 所示为电磁谐振式无线供电模型, A 是一个半径为 25cm 的单匝铜环, 它是激励电路的一部分, 输出频率为 9.9MHz 的正弦波; S 和 D 是自谐振线圈; B 是连接到负载 (灯泡) 的单匝导线环; 不同的  $k$  代表箭头表示的对象之间