

上海大学出版社

2005年上海大学博士学位论文 16



中小功率的整流天线 技术研究

- 作者：徐君书
- 专业：电磁场与微波技术
- 导师：徐得名



2005 年上海大学博士学位论文 16

中小功率的整流天线技术研究

作 者：徐君书
专 业：电磁场与微波技术
导 师：徐得名

上海大学出版社

· 上 海 ·

Shanghai University Doctoral
Dissertation (2005)

Investigation on the Technology of Low and Medium Power Rectenna

Candidate: Xu Jun-shu

Major: Electromagnetic Fields and
Microwave Techniques

Supervisor: Prof. Xu De-ming

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查,确认符合上海大学博士学位论文质量要求.

答辩委员会名单:

主任:	安同一	教授,华东师范电子信息工程学院	200062
委员:	朱守正	教授,华东师范电子工程系	200062
	黄伟伦	高工,上海亚美微波仪器厂	200230
	钟顺时	教授,上海大学通信工程系	200072
	王子华	教授,上海大学通信工程系	200072
导师:	徐得名	教授,上海大学	200072

评阅人名单:

杨铃让	教授,东南大学电子工程系	210098
杨鸿生	教授,东南大学毫米波国家重点实验室	210098
毛军发	教授,上海交大电子信息系	200030

评议人名单:

安同一	教授,华东师范大学电子工程系	200062
洪伟	教授,东南大学毫米波国家重点实验室	210098
周世平	教授,上海大学理学院	200030
王子华	教授,上海大学通信工程系	200072
徐长龙	研究员,上海大学通信工程系	200072

答辩委员会对论文的评语

徐君书同学博士论文“中小功率的整流天线技术研究”来源于国家自然科学基金项目.该选题为当今国际微波研究领域前沿,对新型能源开发和利用有重大实用价值.选题具有前瞻性.论文主要成果和创新点如下:

(1)建立了在不锈钢管道内无缆探测微机器人的微波功能系统,包括微波激励装置和整流天线的接收装置.重点解决了 TE_{11} 单模传输和极化失配问题,保证了微机器人驱动电机正常工作.

(2)利用矢量网络分析仪和自行设计的微带TRL校准件(这是一项有相当难度的工作),提出直接测量微波二极管大信号特性的测试系统和二极管大信号S参数和输入阻抗测试方法,保证了微波/直流高转换效率.这项工作已引起国际同行专家重视.

(3)对自由空间整流天线从天线结构、整流电路及其相互间的孔径耦合问题进行了深入研究,获得四单元整流天线阵的高转换效率,达到了国际先进水平.

本论文理论联系实际,作者在数值计算、软件应用、微波测量以及天线设计等方面的知识得到较全面的锻炼与提高,具备了独立从事科研的能力.论文层次分明、文笔流畅,理论与实验结果可信,答辩中回答问题正确,已达到博士论文水平.

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过徐君书同学的博士学位论文答辩,建议授予工学博士学位.

答辩委员会主席: **安周一**

2005年6月19日

摘 要

全球能源危机的提前到来,加快了人类开发利用空间太阳能资源的步伐,而空间太阳能卫星的提出,将会使人类全面开发利用太阳能逐步成为现实.作为太阳能卫星中的关键技术——微波输能技术,伴随着它在其他领域的广泛应用,对它的研究已经越来越有应用潜力和实际意义.

在国家自然科学基金重点项目(69889501)和国家自然科学基金项目(6017107)的资助下,本论文以设计出实际应用的高性能、高整流转换效率为目标,对整流天线技术进行了系统深入的研究.

本文的主要研究工作和创新成果有:

(1) 利用微波输能技术的理论为不锈钢管道无缆探测微机器人建立了一套微波供能系统,它包括不锈钢管道微波激励装置和管道内微波能量接收装置(整流天线).激励装置使微波在管道内实现了以 TE_{11}^0 单模传输,并解决了微波在不锈钢管道传输过程中的极化旋转以及能量传输的稳定性问题.实验测得工业用不锈钢管道的传输损耗为 1.3 dB/m,与计算结果 1.1 dB/m 比较吻合,表明此微波源激励装置可用于向管道内微机器人提供微波能源.在能量接收装置的设计中,针对管道内微波接收装置的特点(一是解决整流电路的尺寸受管道内径的制约,二是解决微机器人旋转作业时造成的微波极化方向失配),我们分别设计了管道内准八木天线和圆极化微带贴片天

线作为接收天线,整流电路采用了倍压电路形式,充分发挥了 HP-HSMS-8202 二极管的结构性能,最终对整个微波供能系统的测试结果表明,此系统提供的直流电源能够保证管道内机器人的驱动电机正常工作。

(2) 利用配有选件 085 的 Agilent 8722ES 矢量网络分析仪和自行设计的微带 TRL 校准件,我们首次给出了一种能够直接测量微波二极管大信号特性的测试系统(在已公开的资料中没有直接测量二极管大信号特性的文章报道)。利用此系统可直接测得二极管大信号 S 参数和输入阻抗,进而可由软件仿真优化出二极管大信号的等效电路模型参数。利用 HP-HSMS8202 二极管在 10 GHz 测量的大信号特性参数,设计了一个相应的匹配整流电路,通过对其微波-直流的整流转换效率的测试,验证了我们所设计的这套测量系统的准确性,此测量方法可广泛适用于一般固态器件大信号的特性测量。

(3) 在二极管大信号特性的测量基础上,对自由空间中整流天线单元和阵列进行了系统的研究,整流天线采用接收天线与整流电路位于两个平面、其间的接地面提供辐射单元和整流电路之间良好屏蔽的孔径耦合圆极化微带天线。建立了一套微波暗室内测量整流天线微波-直流转换效率的测试系统,最终测试的四单元整流天线阵最大转换效率为 74%,达到了当前国外整流天线研究的先进水平。

关键词 无线输能,管道微机器人,整流天线,微带圆极化天线,时域有限差分法

Abstract

With the global energy crisis coming, human being is speeding his pace to develop and utilize the solar power. This will become true when the space solar power satellite (SSPS) was presented. Recent teens years, the microwave power transmission technique as the important role in the SSPS has expanded its applications in other fields, so it is become very significative and tremendous application potentials.

The rectenna technique has been systematically and deeply investigated in both theory and experiment. This work was supported by National Natural Science Foundation of China.

The major contributions of the work presented in this thesis are listed as follows:

(1) The microwave energy supply system for in-pipe inspect micromachine was set up by using microwave transmission theory. This system concludes microwave energy exciting device and the power receiving device (rectenna). The exciting device keeps the microwave transmission with single TE_{11}^o mode, and it solves the problem resulting from polarization rotation and power transmission stability. The measured transmission attenuation of 1.3 dB/m was in good agreement with the calculated results of 1.1 dB/m, so the

exciting device can be used to supply power to in-pipe micromachine. Due to the small size of the pipe and polarization rotation because of the micromachine rotation, we designed two type receiving antennas, one is quasi-Yagi antenna, the other is circularly polarized microstrip antenna. To produce higher output voltages than would be produced by a single diode, A voltage doubler was realized using the two series diodes in the HP - HSMS8202.

The experiment results prove that this energy supply system can keep the motor of micromachine in-pipe work normally.

(2) An Agilent 8722ES Network Analyzer with option 085 was configured to directly measure the diode large signal characteristics. Meanwhile, we also designed a set of accurate TRL calibration kits. Using the measurement system we can directly get the large signal S parameter and the input impedance of the diode, then Ansoft Harmonic software was used to determine the diode equivalent circuit parameters by the optimize command that curve fits the diode circuit model to the measured S parameter data. A corresponding matching circuit was designed by using the diode measured data. The experiment results of the rectifying circuit microwave-DC conversion efficiency proved our measurement system is accurate. This measurement method is quite general and can be used for characterizing surface-mount devices under large signal operation conditions.

Rectenna element and rectenna array in free space were

studied in detail. Aperture-coupled circularly polarized microstrip rectenna was given. For this type rectenna, the receiving antenna and rectifying circuit were placed in two different planes; there is a groundplane between them it serves as a very effective shield between the radiating aperture and the rectifying circuit.

(3) A measurement system in microwave anechoic chamber was established to test microwave-DC conversion efficiency of the rectennas. The final measurement results of the four elements rectenna array were quite good. A maximum conversion efficiency of 74.5% was achieved. This result has reached international advanced level.

Key words wireless power transmission, in-pipe micromachine, rectenna, circularly polarized microstrip antenna, finite-difference time-domain method

目 录

第一章 绪论	1
1.1 课题来源	1
1.2 课题研究的目的和意义	1
1.3 无线输能技术	3
1.4 本论文的研究内容和主要贡献	14
第二章 时域有限差分法分析管道中的微带天线	17
2.1 引言	17
2.2 时域有限差分法及 PML 理想匹配层边界条件	17
2.3 采用 PML 边界条件的 FDTD 分析圆周波导中的微带 天线	25
2.4 小结	32
第三章 整流天线中二极管的大信号特性测试	33
3.1 引言	33
3.2 Agilent 矢量网络分析仪 8722ES 与 Option 085 大功率 测量的设置	41
3.3 TRL 校准技术及 TRL 校准件的设计	46
3.4 大信号二极管 S 参数及输入阻抗的测量	54
3.5 二极管大信号 RF-DC 转换效率的测量	58
3.6 小结	61
第四章 管道探测无缆微机器人微波供能系统的设计	63
4.1 引言	63

4.2	管道探测微机器人微波供能系统原理	64
4.3	管道探测微机器人微波供能系统激励装置的设计	64
4.4	管道探测微机器人微波供能系统能量接收部分设计	69
4.5	小结	85
第五章 自由空间中整流天线单元及阵列的设计		86
5.1	引言	86
5.2	整流天线中口径耦合圆极化微带接收天线的设计	87
5.3	空间中整流天线转换效率的微波暗室测量	102
5.4	小结	113
第六章 结束语		114
附录		116
参考文献		123
致谢		141

第一章 绪 论

1.1 课题来源

● 国家自然科学基金重点项目(69889501)的子项目,起止日期:2000年01月~2003年08月,经费:10万.

● 国家自然科学基金项目“中小功率的整流天线技术研究”(6017107),起止日期:2002年01月~2004年12月,经费:20万.

1.2 课题研究的目的和意义

世界经济的现代化,得益于化石能源,如石油、天然气、煤炭与核裂变能的广泛投入应用,因而它是建立在化石能源基础之上的一种经济.然而,由于这一经济的资源载体将在21世纪上半叶迅速地接近枯竭,据能源专家综合估算,可支配的石油储量大约在2050年左右宣告枯竭,煤、天然气、铀矿等其他化石能源也将在不久的将来被开采利用殆尽.世界能源危机早在1973年就从美国发生,20世纪90年代初期,我国的能源尚可自给自足.而进入21世纪随着我国经济快速发展,我国的能源战略问题已日益突出,自去年起全国电力供求持续偏紧已是一个不争的事实,尤以今年最为严重.截止到目前,全国共有24个省级电网拉闸限电,据专家估计我国直到2006年随着加大对能源的投资,全国缺电的现象才能有望初步缓解.面对能源危机,开源节流已经成为摆在我们面前的严峻考验.中国科学院经过对国内能源储备和应用的调研分析后,在名为《中国未来能源发展战略咨询报告》中建议:目前就全国而言,急需发展低成本、方便的新技术,以适

应不同地区的需要. 太阳能利用最经济实惠, 是中国乃至世界面临能源危机的最佳解决方案. 太阳能同时符合新能源的两个条件: 一是蕴藏丰富、不会枯竭; 二是安全、干净. 科学研究表明, 照射在地球上的太阳能非常巨大, 大约 40 min 照射在地球上的太阳能, 便足以供全球人类一年能量的消耗. 而且太阳能发电绝对干净, 完全符合当前全球能源危机下新能源的选择标准^[1]. 早在 20 世纪 50 年代美国等西方国家就提出了加大利用太阳能力度的太阳能卫星 (SPS-Solar Power Satellite) 方案^[2,3], 它就是将太空中的太阳能先转换成电能再通过微波能的形式将能量传到地面上再转换成电能加以利用. 太阳能卫星中一个关键技术就是无线输能技术 (WPT-Wireless Power Transmission).

近代无线输能技术的系统研究是从 20 世纪 60 年代初开始的, 它除了应用在太阳能卫星之外, 还有其他许多具体的应用领域如直升飞机空中通信接力平台^[4], 此飞机的飞行高度可从 5 千英尺到 10 万英尺, 其功能相当于一颗近地小卫星, 可作为空中通信平台和对地进行勘测, 因其造价、维护费用低 (相对于卫星而言) 以及军事上的潜在应用前景, 因而一直受到西方发达国家的青睐; 还有地面两地间输送电能, 以解决沙漠、孤岛、峡谷等复杂环境中的电能输送问题; 90 年代以来, 微波集成和半导体技术的发展又为无线输能开拓了新的应用领域——微系统领域, 如电子标签和微机械^[5,6]. 微机械因其体积小重量轻, 限制了其在机燃料和电池寿命, 而无线输能系统可弥补此缺陷. 此外, 据报道西方一些国家 (美、俄等) 和日本都在秘密地积极研究未来战场上的微型武器, 如微型侦察机、‘麻雀’卫星、‘苍蝇’飞机、‘蚂蚁’士兵等等, 这些未来战场上的微型武器的能源供给很有可能是无线输能技术的潜在应用领域.

无线输能系统的核心技术是整流天线 Rectenna (Rectifying Antenna), 它是由接收天线、匹配网络、整流二极管、直流负载组成的能高效地将微波转换成直流的装置. 在某些频段整流效率可达 80% 左右, 其工作频率也由早期的 2.45 GHz 发展到 5.8 GHz、10 GHz、

35 GHz. 随着微波输能技术应用领域的扩大(大到太阳能卫星小到微机械), 整流天线技术既向小型化也向阵列化发展. 据报道 1998 年, 日本研制了一个由 256 个子阵组成的 $3.25\text{ m} \times 3.6\text{ m}$ 大型整流天线阵^[7], 也研制了直径小于 10 mm 的用于管道探测无缆机器人系统的微型整流天线. 无线输能是基于电磁场理论、微波技术、微电子等多学科交叉的新研究热点, 它正日益受到世界各国的重视.

经过几十年的发展, 微波技术在我国已具有雄厚的理论和技术基础, 开展无线输能系统研究的技术条件已经成熟. 国内已有这方面的资料和文章发表, 但大多限于综述性报道, 研究工作还没有真正起步. 鉴于无线输能技术的独特优点和广泛应用前景, 尽快开拓这方面的研究对我国经济、政治和军事都有重大的现实意义.

1.3 无线输能技术

1.3.1 微波输能技术基本概念

无线输能技术顾名思义就是利用无线电波来传送能量, 现在它主要有两种形式, 一种是利用激光进行能量传送, 另外一种就是利用微波进行能量传送即微波输能技术. 激光在传输过程是直线传输, 所以其能量密度大, 传输效率高, 不过其激光-直流的转换效率比较低, 近年来人们在固体激光器的研究方面取得了巨大的进展. 未来几年, 激光器的激光-直流的转换效率将可能达到 20%~30%, 激光传输受大气影响比较大, 对传输路径上的生物体损坏比较大, 这是它的缺点; 微波输能由于微波理论研究比较成熟, 其研究团体比较多, 当前其微波-直流的转换效率达到了 85%, 相对于激光器件其制作成本非常低, 所以它成为了目前无线输能研究的主要形式, 但它也有不足的方面, 例如微波传输是以微波束的形式, 所以它需要的能量接收部分面积庞大, 另外它可能对卫星通信和长期暴露在微波束里边的人们的生活产生一定的影响. 下面我们主要对微波输能技术进行讨论. 微