

一种空间太阳能电站无线功率传输初步方案

吴 昕¹ 刘长军¹ 侯欣宾²

(四川大学 电子信息学院, 成都 610064)¹ (中国空间技术研究院, 北京 100094)²
wuxin5342@qq.com cqliu@scu.edu.cn

摘要: 空间太阳能电站是未来一种清洁的可再生能源系统, 受到世界各能源大国的广泛关注。针对中国的基本国情与现有相关技术储备, 本文提出了空间太阳能电站微波无线能量传输系统初步方案构想, 并且对该系统的重要组成部分及关键技术进行了相应的阐述。

关键词: 微波无线能量传输; 大功率微波源; 整流天线

A Preliminary Scheme on Microwave Wireless Power Transmission System of SPS

Wu Xin¹, Liu Changjun¹, Hou Xinbin²

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064)¹
(China Academy of Space Technology Beijing 100094)²

Abstract: As a clean and renewable energy system, the Solar Power Satellite (SPS) has attracted widespread concern of international community. According to China's basic national conditions and the existing related technical reserves, this paper puts forward the conception of the microwave wireless power transmission system and introduces the key technology of this system.

Keywords: Microwave wireless power transmission; High power microwave source; Rectifying antenna

空间太阳能电站 (Solar Power Satellite) 是将宇宙空间中的太阳能转化成电能, 输送到地面电网的能源系统。作为极有前景的一种可再生能源系统, 空间太阳能电站具有能流密度大、持续稳定、不受昼夜气候影响、清洁环保等优势, 符合未来能源利用的发展趋势, 已经引起世界各国的广泛关注^[1,2]。



图 1 空间太阳能电站系统概念图

我国对 SPS 及相关技术的研究工作起步相对较晚, 现有国内的一些研究和实验工作表明我国开展

微波无线输能的研究条件已经日趋成熟, 并且已经在微波源、天线设计和微波整流电路设计方面都取得较大进展。^[3,4]基于中国基本国情与当前微波能量传输技术储备, 我国需要制定可行性高、费用较少而又能够高效发展自主路线。在 SPS 相关技术研究中, 我国可采用多线并行的发展模式, 将各项关键技术开发同步开展。

1 系统构成

微波能量传输系统 (MPT) 是 SPS 系统的一个关键部分, 其性能直接决定了空间太阳能电站技术的可行性。总体而言, 该系统由空间系统和地面系统两大部分组成。

其中空间微波功率发射系统可以分为微波发射天线、波导功分馈电系统、大功率微波源、相位控制五个部分; 地面微波功率接收系统分为整流天线、直流合成及 DC-DC 变换、波束逆向控制三个

*基金项目: 民用航天科研预先研究项目资助。

构成部分。该系统通过太空中的太阳能发电系统利用太阳能生产电力，微波发生系统将电力转换为微波能量，由发射天线阵列传回地面接收点，经过微波接收和整流最终转换成直流电并入电网。

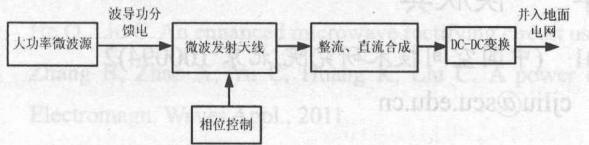


图 2 MPT 系统框图

2 系统效率链分析

空间太阳能电站收集太阳能所产生的电力，需要被转换为微波能量，再通过微波能量传输系统穿越大气层传回地面接收站，然后经过接收整流再次转换为直流电力。能量传送过程中有很多因素会造成能量的衰减，降低系统微波能量传输的效率。

空间太阳能电力进入微波能量传输系统第一步是要通过空间高功率微波源将直流电力转化为微波能量。微波源转化出来的微波能量需要通过空间的微波发射天线发送回地面，天线的口径效率直接影响微波能量的送出效率。当微波能量到达地面，将由地面接收站微波天线进行接收并进行整流，接收端回收天线的口径效率同样会影响微波能量的总体传输效能。微波能量在传输路径上会因为发生折射、发射以及衍射等现象而损耗，同时还受到大气的衰减、水汽吸收以及云雾的阻挡，从而进一步损失一部分能量。

综上所述，在 SPS 系统的微波能量传输中微波源效率、微波发射和接收天线的口径效率、大气衰减、接收整流天线的覆盖效率和整流效率都会不同程度的影响系统的总传输效率。

3 初步设想方案

我国空间太阳能电站微波无线能量传输系统被设想为从约 36000km 的地球静止轨道以 5.8GHz 的频率发射，发射功率为 1GW。地面接收整流天线阵列直径约为 4km，接收天线阵列中心的最高功率密度约为 300W/m^2 (30mW/cm^2)，边缘的功率密度为 10W/m^2 (1mW/cm^2) [5,6]。

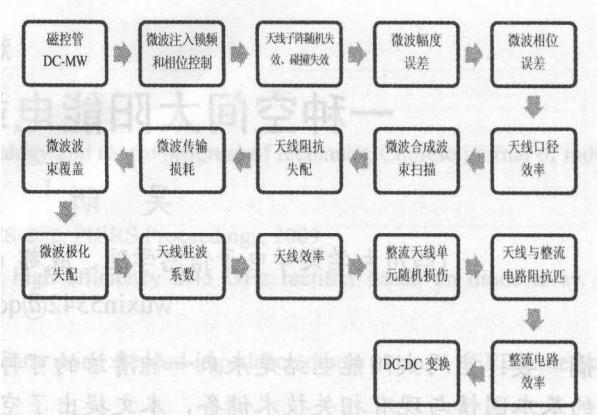


图 3 系统效率链

由太阳能转化成的电力供给微波发射天线系统中的大功率微波源。通过波导微波馈电系统将辐射出来的微波功率分布后馈入到薄膜式天线上。相位控制系统保障天线单元模块之间具有相同的相位，保证发射的微波波束的指向性及精度。微波发射天线系统将微波波束高定向性的传输到地面，整流天线接收微波功率并将其转化为直流电。直流合成模块将对整流天线单元的直流输出进行串联并联，然后通过 DC-DC 变换满足地面电网的需要，实现供电的并网。

3.1 大功率微波源

空间太阳能电站的发电能力为 GW 级，而目前 5.8GHz 连续波磁控管的最大单管功率容量不过数千瓦。因此，一方面需要提高单管的功率容量，一方面基于磁控管的功率合成研究是 SPS 微波源所需要解决的问题，功率要能合成需要微波源相位可控且频率和相位输出高度稳定。兼顾生产成本与其物理机制和工艺结构的限制等因素，采用多磁控管功率合成技术来实现高功率微波源。通过微波功率注入可以实现对磁控管的频率锁定，基于阳极电压或者直流磁场调节形成类锁相环，控制输出相位的稳定。

大功率微波源部分主要由大功率磁控管和注入锁频装置构成。注入锁频装置包括固态放大器、环行器及匹配负载。微波相位的基准信息由无线总线传输，通过放大器处理后，通过磁控管的磁场和高压进行幅度和相位的调节。微波幅度和相位的基准信息由无线总线传输，通过放大器处理后的分别通过磁控管的磁场和高压进行幅度和相位的调节。

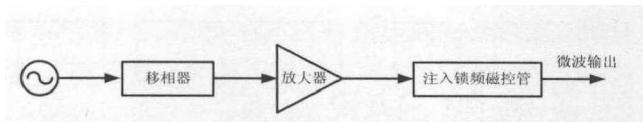


图 4 注入锁频磁控管相位和幅度控制

3.2 发射天线

为了能够对准地面的接收天线，并且控制旁瓣的电平，发射天线需要能够对各个单元进行相位的控制。

微波发射天线为相控阵天线，通过天线单元相控阵实现微波天线波束发射角控制。发射天线阵是一个圆形的、直径约 1000m 的由多个单元天线平铺的平面。每个发射单元是一个边长为 1.27m 的六边形平面，在轨最终组装之前，发射单元将先被集成成为子组件。理论分析表明，在相同条件下，圆形天线具有更低的旁瓣，更适合于 SPS 系统的应用。为了减轻火箭发射的次数，发射天线单元应该具有轻型紧凑的特点，并且可以进行空间展开和组装。

作为空间太阳能电站微波发射天线，其标准天线单元结构上要便于拼装，并且还必须满足空间微波无线能量传输所要求的高增益、大功率容量、足够频带宽度、结构坚固、性能稳定等要求。

这种大天线的设计、加工、拼装和测试都是一种挑战。通过相位控制的方法，可以减少对这种大天线加工精度的要求，保证波束合成的质量。

3.3 接收天线

SPS 系统将要求一个大的接收区域，包括与地面上现有电力网络连接的一个整流天线阵以及电网。整流天线由微波天线和整流电路构成，其中微波天线由偶极子天线、反射平面构成。整流天线由多个单元构成，每个单元均包括接收天线和整流电路，分别用于接收微波功率和将微波转化为直流^[7]。尽管每个整流天线单元只有几瓦，但整个的接收功率大于 GW。需要逐渐地研究整流天线单元、阵列

和网络来实现 SPS 系统。



图 6 地面接收整流天线整体效果图

4 结论

空间太阳能电站需要综合考虑各方面因素和影响，例如：高功率微波与电离层的相互作用，对地面的电磁干扰问题，对生物系统的安全问题等。在这里我们仅仅讨论了空间太阳能电站系统中的微波无线能量传输的微波相关技术。在今后将更加深入和详细地对微波系统进行设计和评估。

由于目前相关技术条件的限制，我们设想的微波输能系统的整体效率还不够理想。未来将对微波输能系统进行深入研究与进一步的优化，比如增加微波整流天线的面积来提高采集效率，提升优化整流天线效率等，有望将系统整体传输效率显著提高。最终实现可用于空间太阳能电站微波能量传输的输能系统。

空间太阳能电站是一项规模庞大的空间与地面工程，涉及到许多重要的技术领域，其研究成果将在国民经济的各个方面发挥重要的作用，能够大力推动我国能源的可持续发展和航天技术领域的可持续发展。通过太阳能电站项目的开展，可以带动相关领域技术的发展。我国是一个发展中国家，制定一条符合基本国情、切合国家利益以及经济能力，具有中国特色的 SPS 发展规划道路具有举足轻重的意义。

参考文献

- [1] 侯欣宾, 王立, 朱耀平, 董娜, 国际空间太阳能电站发展现状, 太阳能学报, 2009 Vol.23, 10 期, pp. 1443-1448
- [2] Report of the URSI Inter-Commission Working Group on SPS, June 2007
- [3] 陈彦龙, 李凯, 刘长军, 一种 915MHz 紧凑型肖特基二极管微波整流电路, 信息与电子工程, 2012 Vol.1, 第一期, pp. 64-67.
- [4] 张彪, 刘长军, 一种高效的 2.45 GHz 二极管阵列微波整流电路, 强激光与粒子束, 2011 Vol.23 (09), pp. 2443-2446.
- [5] Naoki Shinohara, "Development of High Efficient Phased Array for Microwave Power Transmission of Space Solar Power Satellite/Station," Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2010 IEEE , pp1-4
- [6] N. Shinohara, Y. Hisada, M. Mori, and JAXA SSPS WG4 Team, Request and Roadmap for Microwave Power Transmission System of Space Solar Power System (SSPS), Proc. of IAF2005, Japan, 2005
- [7] Yu-Jiun Ren, Kai Chang, "New 5.8-GHz Circularly Polarized Retrodirective Rectenna Arrays for Wireless Power Transmission", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 54, No. 7, July 2006, pp:2970-2976.

作者简介：吴昕；刘长军，男，教授，电磁场与微波技术；侯欣宾，男，研究员，空间技术。