基于空间太阳能电站的深远海无人船无线电能传输方案设计

王　镇[1]，陈　城[2]，肖海松[1]
（1. 中国船舶及海洋工程设计研究院，上海　200011；2. 哈尔滨工程大学 智能科学与工程学院，哈尔滨 150001）

摘　要：[目的]针对深远海无人船（USV）受限于船载储能容量、依赖燃油补给导致续航能力不足的问题，[方法]提出一种基于空间太阳能电站（SSPS）的 USV 微波无线供能方法，通过构建由空间发射端、微波传输链路和 USV 接收端组成的 SSPS-USV 微波能量传输系统架构，提出区域照射式海面供能模式。在此基础上，建立考虑海洋环境、USV 定位误差、波束指向误差及姿态变化等因素的海面功率密度分布模型，对 USV 接收功率进行了统计特性分析，提出使用双极化整流天线及 F 类整流电路，并对微波供能系统与船载直流电力系统之间的功率匹配关系进行研究。[结果]结果表明：在 3～4 级海况下的目标海面区域可获得约 300 W/m^2～400 W/m^2 微波辐射功率密度，20 m^2 接收阵列平均供能功率约 6.5 kW，整流效率约 80%，可实现 USV 关键设备持续供电及储能补能。[结论]SSPS-USV 微波供能体系可为深远海 USV 长期运行提供新的能源保障途径。

关键词：空间太阳能电站（SSPS）；微波无线能量传输；无人船（USV）
中图分类号：U665.12　　**文献标志码：**A　　【DOI】10.13788/j.cnki.cbgc.2026.10.10

Wireless Power Transmission Design for Deep-Sea USV Based on Space Solar Power Station

WANG Zhen[1], CHEN Cheng[2], XIAO Haisong[1]
(1. Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China; 2. College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: [Purpose] To address the limitations of unmanned surface vessel (USV) in deep-sea environments due to onboard energy storage capacity and reliance on fuel refueling, [Method] a microwave wireless power supply method for USVs based on a space-based solar power station (SSPS) is proposed. An SSPS-USV microwave energy transmission system architecture, consisting of a space transmitter, a microwave transmission link, and a USV receiver, is constructed, and a regional illumination-based sea surface power supply mode is proposed. Based on this, a sea surface power density distribution model considering factors such as sea environment, USV positioning error, beam pointing error, and attitude changes is established, and the statistical characteristics of the USV received power are analyzed. The power matching relationship between the microwave power supply system and the onboard DC power system is studied using a dual-polarized rectifier antenna and a Class F rectifier circuit. [Result] The results show that, under typical conditions, a microwave radiation power density of approximately 300 W/m^2～400 W/m^2 can be obtained in the target sea surface area, with an average power supply of approximately 6.5 kW for a 20 m^2 receiver array and a rectification efficiency of approximately 80%, enabling continuous power supply and energy storage replenishment for key USV equipment. [Conclusion]

收稿日期：2026-03-16；**修回日期：**2026-05-12；**录用日期：**2026-06-17
作者简介：王　镇（1999—），男，硕士、助理工程师。研究方向：机电系统集成设计。

The research results show that the SSPS-USV microwave power supply system can provide a new energy security approach for the long-term operation of deep-sea USVs.

Key words: space-based solar power station (SSPS); microwave wireless power transmission; unmanned surface vessel (USV)

0 引言

无人船（Unmanned Surface Vessel, USV）凭借其无人化带来的低成本、低风险、高灵活等优势，已成为海洋资源勘探、海上安全巡检等单一化、长周期任务的首选。目前，USV 动力来源正从单一传统石化能源向“燃油+电池”混动模式过渡，未来将向着全电化的方向发展[1-3]。在混动和全电型轻量 USV 中，船载蓄电池是全船电能的主要来源。当电池能量耗尽时，须对其进行充电。

目前，USV 的主流充电方式分为 2 种：有线充电与无线充电。有线充电依赖传统的电力线缆，在海上通过湿插拔的方式对 USV 进行充电，该方式需事先部署母船或海基平台，违背了 USV 高灵活、高自主的设计初衷。此外，深远海部署 USV 面临距岸数千海里“无依托、无补给”的能源困境，常规手段难以有效覆盖。这一能源瓶颈严重制约了深远海 USV 的任务半径与持续作业能力，亟须探索新型远距离、非接触式的能源保障途径。无线充电（Wireless Power Transmission, WPT）则不依靠有形的电力线缆，而是通过电磁场作为介质进行电能传输，根据传输距离的不同，具体分为近距离无线能量传输与远距离无线能量传输 2 种方式[4-5]。

近距离 WPT 技术主要依靠近场电磁感应实现非接触供能，但其有效传输距离较短，仍和有线充电一样依赖母船、浮标或海基中继站作为能量源，难以满足深远海任务的需求[6]。远距离 WPT 技术主要依靠激光或电磁辐射等方式进行远场能量传输。若通过部署于近地轨道的能源卫星获取空间环境下的高密度太阳能作为能量源，则传输距离最高可达数百千米，且相比近距离 WPT 灵活性更高。根据传输方式和能量载体的不同，远距离 WPT 通常可分为激光 WPT 与微波 WPT（Microwave Power Transmission, MPT），见表 1[7]。

表 1 远距离 WPT 特性对比

Tab. 1 Long-Distance WPT Characteristics Comparison

传输方式	载体形式	优点	缺点
激光传输	定向激光束	高能量密度	低穿透能力
		高指向精度	高控制要求
微波传输	微波波束	强穿透性	波束发散严重
		高覆盖范围	低空间功率密度

激光 WPT 以激光光束作为能量载体，但激光光束在空间至地面的远距离传输过程中极易受大气折射和复杂天气等因素影响而产生较大的衰减，所以鲁棒性差；而 MPT 以微波波束作为能量载体，相比激光光束，微波波束具有更强的环境穿透性，能够大幅降低能量在传输过程中的衰减。MPT 的相关技术已在地面平台与近地无人机等场景中得到初步验证[8-11]。在大功率 MPT 方案中，一部分学者提出了空间太阳能电站（Space Solar Power Station, SSPS）的构想，通过在位于地球同步轨道（Geostationary Orbit, GEO）上的人造卫星部署大面积的光伏电池阵列和微波发射装置，将空间环境下不受天气和昼夜影响、不间断的太阳能转化为微波辐射能，通过微波波束发射至地球表面的接收站，再由接收站转化为电能。

相比无人车、无人机等装备通常具备稳定布设整流天线阵列、接入电网的条件，深远海 USV 部署则存在姿态扰动、平台驻留等问题，其电力负载呈现“低功率持续+高功率脉冲”的强非对称特征。通过微波供能与储能系统的协同优化可持续获取来自高密度空间太阳能的辐射能量，并将其转化为可供平台内机电系统使用的电能，摆脱对传统充电方式的依赖。目前国内外对基于 SSPS 的 MPT 方案多集中在原理验证与发射端工程化设计等方向，尚无研究论证该方案在海上平台实施的可行性。

针对上述问题，本文系统阐述 SSPS-MPT-USV 方案的组成架构与关键技术，结合现有 SSPS 架构与 USV 方案，对海面微波能量密度、整流天线效率、电能转换效率与 USV 续航力等关键参数开展算例分析。论证基于 SSPS 的深远海无人装备无线电能传输方案的工程可行性，并探讨未来关键技术问题与发展空间。

本文创新点如下：

1）系统架构。提出了面向 USV 的区域照射式

微波能量传输模式，该模式将波束控制要求从“精确对准”降为“区域覆盖”，显著降低了 SSPS 端精密控制需求，适应海上移动平台定位精度有限的工程现实。同时，该模式天然具有多节点供能能力，主瓣区域内可同时服务多个 USV，提升 SSPS 的利用效率。

2）环境适应性。针对 USV 在动态海况下的姿态扰动和极化失配问题，提出了双极化整流天线与 F 类整流电路的组合方案，使整流效率在姿态变化条件下保持稳定。同时，针对海洋环境特点，补充分析了海面多径反射、盐雾衰减等因素对微波传输链路的影响。

1　SSPS-USV MPT 系统架构

SSPS-USV MPT 系统主要由 SSPS 发射端、微波传输链路和 USV 接收端 3 部分构成，总体架构见图 1。SSPS 在太空环境下持续获取太阳能并将其转换为微波辐射能，经微波传输链路以微波波束的形式发射至海面特定区域，无人船端通过整流天线接收能量并转化为电能，从而实现对任意区域无人船的远距离、非接触式能量补给。

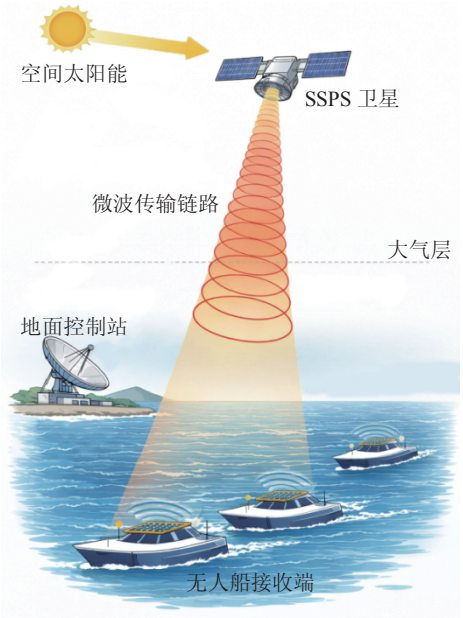


图 1　SSPS-USV MPT 系统架构示意

Fig. 1　Schematic Diagram of SSPS-USV MPT System

1.1　SSPS 发射端

SSPS 这一概念最早由 PETER 于 1968 年提出，其核心思想是在 GEO 部署大规模的光伏阵列，将太阳能转化为微波或激光能量并无线传输至地面接收站，实现近乎连续的清洁能源供给[12]。此后数十年间，SSPS 从理论构想逐步发展为多国重点布局的航天能源系统方向，围绕系统结构形态、能量转换路径和无线传输体制等方面形成了多种技术路线[13-14]。

国际方面，美国较早开展系统级论证与工程验证。美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）于 1979 年提出“SSPS-1979”非聚光型模块化架构[15]，采用大型桁架式结构与微波无线能量传输方案，并在地面开展了近距离 MPT 试验[16]，为大尺度空间结构设计与微波输能工程的实现奠定了技术基础。随后，加州理工学院提出聚光型超大任意相控阵（Arbitrary Large Phased Array, ALPHA）架构，通过轻质薄膜聚光器与相控阵天线的高度集成设计，提升系统功率密度与在轨部署效率。日本宇宙航空研究开发机构（Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA）聚焦系统轻量化与可展开结构，提出分布绳系式（Tethered-Array）构型，通过张拉式结构替代传统刚性支撑框架，在降低发射质量的同时保持大尺度阵列展开能力，形成了具有代表性的非刚性结构技术路线。

国内方面，中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室提出“模块化多旋转关节空间太阳能电站”方案，采用模块化与分布式接收技术，实现非聚光体制下的高效能量收集与系统重构能力[17]。西安电子科技大学则围绕聚光型 SSPS-OMEGA 系统实施“逐日计划”，重点突破高精度聚光跟踪、大口径柔性薄膜反射镜及高效微波整流阵列等关键技术，并完成地面系统验证[11]。

各国 SSPS 研究在结构构型与技术路径上虽各有侧重，但近年来均围绕着高功率密度结构设计、规模化微波能量传输与高精度波束控制等核心问题持续推进。不同系统架构在能量转换链路、空间结构复杂度、波束形成方式及整体效率方面存在显著差异，这些差异将直接影响后续地面接收与能量转换等环节。因此，有必要选取具有代表性的工程化方案作为分析基准。

本文选取中国空间技术研究院提出的 MMR-SPS 方案作为后续系统建模与性能分析的参考对象，其概念图[17]见图 2。MMR-SPS 采用典型的非聚光型架构，设计发电功率约 1 GW，采用 5.8 GHz 频段进行微波能量传输。其主要由太阳能电池阵列、微波发射天线阵列和主结构组成，其中太阳能电池阵列将太阳能转化为直流电能，通过主结构上的高压导体传输至微波发射单元，经功率合成和调制后以微波波束的形式发射至地面。微波发射天线采用平面相控阵结构，整体尺寸（长×宽）约 0.1 km×10.0 km，通过对各阵元相位和幅度的精确控制，发射端可在远场形成定向微波波束，并将能

量集中投射至地表目标区域。

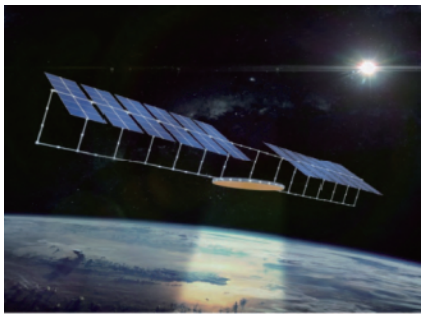


图 2　MMR-SPS 概念图

Fig. 2　Concept Figure of MMR-SPS

1.2　微波传输链路

微波传输链路作为微波波束的传输通道，是系统的关键部分。在远场条件下，微波发射天线所发射的微波波束在海面上会形成一个有限大的投影区域。受限于发射天线的口径，投影区域中的微波功率密度分布通常表现为中心较高、向边缘均匀衰减的非均匀特性，整体可近似为 2 维高斯分布或类 Airy 分布。

在传统远距离 MPT 方案中，发射端与接收端通常采用“一对一，点对点”的定向能量传输方式。此时，发射天线、微波波束与接收天线之间须保持严格的几何匹配关系，系统必须将波束中心精确锁定于接收天线的有效口径范围内。由于接收天线尺寸有限且远距离传播条件下波束扩展受限，通常需要将波束指向误差控制在数米量级以内，才能保证接收天线能够获取到足够多的能量。这种依赖于精准定向的传输模式不仅对波束控制精度和协同控制能力提出了极高的要求，而且一个发射阵列在同一时刻通常只能服务单一接收目标，难以提升 SSPS 的工作效率。

针对上述问题，SSPS-USV MPT 系统引入区域照射式能量传输模式。与点对点模式不同，该模式不再强调波束中心与接收天线之间的严格几何对准关系，而是通过形成面积显著大于单个 USV 尺寸的主瓣覆盖区域，使 USV 只须处于该高功率密度主瓣投影范围内，即可通过接收天线获得稳定的能量输入。由于主瓣区域的空间尺度远大于 USV 本体尺寸，系统对波束指向精度的要求由“精确对准”转变为“区域覆盖”，从而允许更大的波束定位误差，显著降低了对系统精密控制的依赖，提高了对海上机动平台的适应能力。

1.3　USV 接收端

部署于 USV 的微波能量接收端是实现空间微波能量向船载电能转换的核心单元。受 USV 平台尺寸、载荷和结构布局的限制，微波能量接收端需在有限空间内实现微波能量的接收、转换与稳定输出。

微波能量接收端主要由整流天线和能量管理系统组成。整流天线通常由多个天线单元组成平面阵列，部署于 USV 甲板或上层结构，用于接收来自空间发射的微波波束，并通过整流电路将接收到的高频微波信号转换为直流电。整流电路通常由输入匹配网络、高频整流电路及滤波器组成，其能够在保证较高射频-直流转换效率的同时，提高直流电的电能质量与稳定性。能量管理子系统用于监测整流天线工作状态，协调和分配整流天线转换得到的电能，提升微波供能系统与船载电力系统协同运行时的效率。

与地面固定接收站相比，海洋环境对 USV 接收端提出了额外约束：SSPS 与 USV 之间的通信链路延迟约 0.24 s（GEO 双程），基于反馈的波束跟踪控制带宽受限；海面风浪对 USV 航迹保持的扰动导致 USV 在供能区域内产生不可控的横向漂移；海水腐蚀要求甲板整流天线阵列需采用防盐雾涂层和密封封装，增加了系统质量和散热难度。这些约束条件直接影响系统架构的设计选择，除关注电磁和电气性能以外，还须综合考虑结构集成、可靠性及系统稳定性等工程因素，这也是 USV 接收端区别于地面和空中应用的关键因素。

2　SSPS-USV MPT 系统设计

2.1　区域性微波照射环境下功率密度分析

SSPS 的微波发射天线通常为长矩形或圆形。以长矩形相控阵天线为例，主瓣和副瓣照射区域各自的微波功率密度场在理想自由空间中服从非对称二维高斯分布，见图 3。

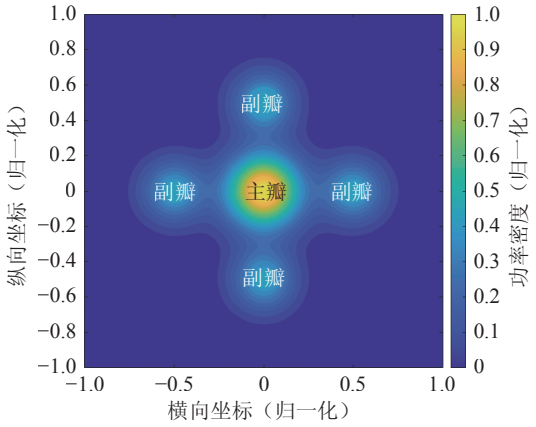


图 3　主瓣与副瓣区域示意

Fig. 3　Schematic Diagram of Main Lobe and Side Lobe Regions

SSPS 在陆地上的应用通常将波束在大气中的传输损耗作为粗略的估计值。但是深远海特殊的电

磁边界环境区别于陆地，高频下行微波链路在穿透高湿度、高盐雾的海洋表面边界层时，会受到水蒸气吸收与悬浮盐粒子的散射损耗；同时，海水作为高导电率介质，其波浪起伏引发的镜面反射波会与太空直射波在船端形成强烈的多径干涉叠加。为尽可能精确地估计接收端能够获取到的实际功率，引入海洋大气综合衰减系数 γ_{sea} 与海面多径增益因子 $F_{\text{multipath}}$，将目标海域的实际瞬时微波功率密度场模型 $S(x, y, t)$ 修正为

$$\begin{cases} S(x,y,t) = A_1 S_0 \exp\left[-\left(\dfrac{x^2}{2\sigma_x^2}+\dfrac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\right] \\ A_1 = 10^{-\frac{\gamma_{\text{sea}} d_{\text{atm}}}{10}} F_{\text{multipath}}(x,y,t) \end{cases} \tag{1}$$

式中：x 和 y 分别为沿波束短轴（横向）和长轴（纵向）方向相对主瓣区域中心点的水平位置偏移；S_0 为自由空间主瓣中心点最大微波功率密度；σ_x 和 σ_y 分别为微波波束在横向和纵向方向上的等效半径；γ_{sea} 为由水蒸气吸收损耗和盐雾损耗叠加而成的海洋大气综合衰减系数；d_{atm} 为穿透海洋稠密大气边界层的有效路径长度；A_1 为计算参数。

海面双路径多径增益因子 $F_{\text{multipath}}$ 表征为

$$F_{\text{multipath}}(x,y,t) = \left|1 + R_v \mathrm{e}^{-j\Delta\phi(t)}\right|^2 \tag{2}$$

式中：R_v 为海面复反射系数；$\Delta\varphi(t)$ 为由于海浪涌动导致船端接收阵列相对海平面瞬时高度动态变化引起的直射与反射路径的相位差。

为了保证 USV 的波束收集效率，微波波束中心应尽量对准整流天线中心。但在空间至海面的长距离传播过程中，波束覆盖区域和中心位置会发生偏移，偏移主要来源于发射端的 SSPS 卫星轨道确定误差、天线阵列姿态控制误差、微波波束指向控制误差，以及接收端的 USV 自身定位及高动态海况飘移误差。发射端方面，现代大型卫星平台的姿态稳定度通常优于 0.1。但由于 GEO 相对海面的距离极大，微小的角度误差也会带来数千米的地面偏移。为此，通常采用基于海面/地面信标引导的相控阵天线闭环控制技术，以及相位共轭、相位补偿类反向波束控制技术[17-23]。现有研究表明，优化后的反向波束控制方法能够实现微弧级的控制精度，带来的波束中心海面位置偏移量 $\sigma_{\text{SSPS}} \leqslant 150$ ms，在发射阵列姿态误差≤0.2 的情况下，不会对传输效率带来明显的负面影响。

在接收端方面，USV 在实际海工况下受强风、海流等非线性动力环境扰动，且受船载导航定位信号漂移的影响，其预期位置和实际位置存在动态偏差。将 USV 海面定位与飘移误差、SSPS 波束指向误差均近似视为在 x 和 y 2 个方向上独立的 2 维高斯分布，二者叠加后的综合指向等效误差仍满足 2 维高斯分布，为

$$f(x_0,y_0) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\text{total},x}\sigma_{\text{total},y}} \exp\left[-\left(\frac{x_0^2}{2\sigma_{\text{total},x}^2}+\frac{y_0^2}{2\sigma_{\text{total},y}^2}\right)\right] \tag{3}$$

$$\sigma_{\text{total},x}^2 = \sigma_{\text{USV},x}^2 + \sigma_{\text{SSPS},x}^2 \tag{4}$$

$$\sigma_{\text{total},y}^2 = \sigma_{\text{USV},y}^2 + \sigma_{\text{SSPS},y}^2 = \sigma_{\text{USV},y}^2 + \left(\sigma_\theta H\right)^2 \tag{5}$$

式（3）～式（5）中：σ_{USV} 为 USV 定位与动态漂移误差标准差；σ_θ 为 SSPS 波束指向角误差标准差；H 为 SSPS 卫星轨道高度。

考虑上述综合指向误差后，并对高频波浪调制的多径瞬时特征进行时域统计平均，则波束投影区域内船端接收功率密度的宏观期望值 $\overline{S}(x,y)$ 可表示为

$$\begin{cases} \overline{S}(x,y) = 10^{-\frac{\gamma_{\text{sea}} d_{\text{atm}}}{10}} S_{\text{mean}} \exp(A_2) \\ A_2 = -\left(\dfrac{x^2}{2\sigma_{\text{total},x}^2+2\sigma_x^2}+\dfrac{y^2}{2\sigma_{\text{total},y}^2+2\sigma_y^2}\right) \end{cases} \tag{6}$$

式中：S_{mean} 为考虑指向误差叠加后的等效海面中心功率密度；A_2 为计算参数。

上述分析表明，对于指定的 SSPS 架构，海面目标区域内的功率密度期望值分布主要由 USV 自身定位漂移和 SSPS 波束指向误差主导。在定量计及海洋盐雾衰减与多径统计特征后，修正后的功率密度场更贴近真实的深远海物理信道。该长距离空间-海洋微波链路预算模型，为深远海 USV 能否获取足够的微波辐射能量，以及后续整流天线的动态鲁棒性设计提供了关键理论支撑。

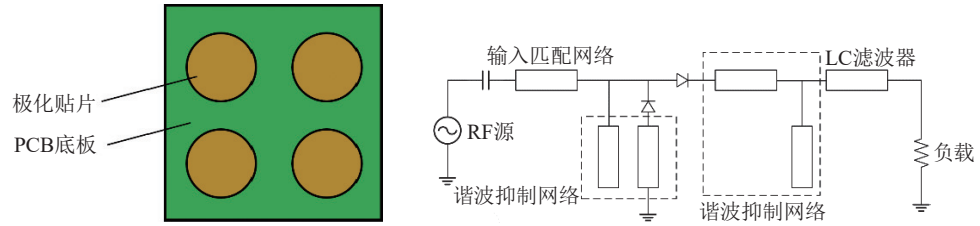
2.2 整流天线特性分析与设计

微波波束携带的辐射能量从 SSPS 传输至海面后，被部署于 USV 上的接收天线接收，通过整流电路转换为可供 USV 使用的直流电能。为了最大化利用辐射能量，避免反射效应，接收天线和整流电路通常被设计为一个整体，称为整流天线。根据极化特性的不同，整流天线可分为单极化整流天线和双极化整流天线。单极化整流天线仅对一种极化方向的微波信号具有高响应，而双极化整流天线则可同时有效接收两种正交极化方向下的微波能量[24]。

SSPS-USV MPT 系统的特点是接收端部署于海上移动平台，天线的姿态和指向角度并非恒定，而是会因为风浪产生不规则的波动，导致微波波束与整流天线之间的相对极化关系呈现显著的不规则性。在采用单极化整流方案的情况下，当微波波束的极化方向与整流天线的极化轴发生偏离时，会产生显著的极化失配损耗，使整流天线的功率随姿态变化产生大幅波动，降低能量的转换效率，并可能对后级直流母线电压的稳定性和负载供能连续性产生不利影响。

为缓解上述极化敏感性问题，可采用双极化整

流天线结构。通过对正交极化分量的同步接收与能量合成，在船体姿态扰动和微波波束极化状态不确定的条件下，将整流效率始终维持在较高的水平。双极化整流天线的最小单元通常由两组在空间上正交布置的辐射单元及其对应的独立射频整流通道构成，分别用于接收微波波束的两个正交极化分量[25]。当整流天线与微波波束之间存在姿态偏转或极化旋转时，各通道所接收的功率分量会随极化状态变化而呈现互补特性，使得直流侧输出的电能相对稳定。由于整流二极管等器件存在非线性特性，整流电路需要引入额外的谐波抑制网络来抑制奇次谐波，进而提高系统输出的电能质量。双极化整流天线关键部分示意见图 4。图 4 中，双极化接收天线最小单元由 4 个圆形贴片和印刷电路板（Printed Circuit Board, PCB）组成，用于接收微波能量；F 类整流电路包含输入匹配网络、2 个谐波抑制网络和输出电感-电容（Inductor-Capacitor, LC）滤波器，负责将微波辐射能转换为电能。



(a) 双极化接收天线最小单元俯视图　　(b) F类整流电路拓扑图

图 4　双极化整流天线关键部分示意

Fig. 4　Schematic Diagram of Key Components of a Dual-Polarized Rectifier Antenna

在 SSPS-USV MPT 系统中，改进接收端的能量转换效率是提高整个系统能量传输效率的关键。其中，从整流天线采集微波辐射能量并将其转换为直流电能是整套能量收集链路的核心技术。整流天线通常由接收天线、输入滤波器、整流二极管、直通滤波器和负载网络等组成，其核心指标为整流效率 $\eta_{\text{RF-DC}}$，即整流天线将接收到的微波辐射能转化为直流电能的效率。在固定的极化方向下，整流效率不仅取决于入射功率密度与工作频率，还与整流天线内部各功能单元的电气参数密切相关。输入匹配网络决定了天线与整流电路之间的阻抗匹配程度，其匹配带宽与匹配精度直接影响射频功率在二极管端口的有效耦合效率；整流二极管的结电容、导通电阻与开启电压，决定了非线性整流过程中的导通损耗与谐波含量；谐波抑制与直通滤波网络则通过控制高次谐波的反射与耗散，塑造二极管两端的电压、电流波形重叠程度，从而影响能量转换效率的上限。整流电路各环节对效率的影响见图 5。

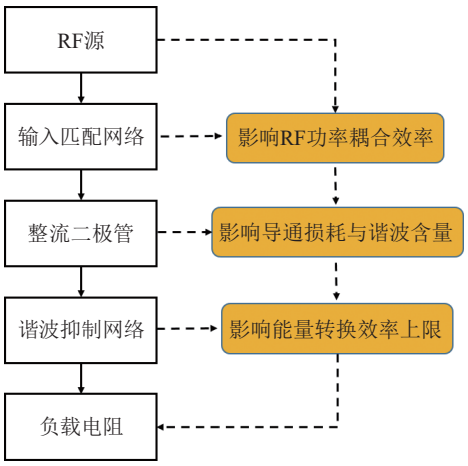


图 5　整流电路各环节对效率的影响

Fig. 5　The Impact of Each Component of the Rectifier Circuit on Efficiency

从外部激励条件来看，整流效率通常随入射功率密度的增加呈现出“先升高后趋于饱和”的非线性特性（见图 6）：在低功率密度区间，二极管尚未充分导通，整流损耗占比高，效率较低；当功率密度提升至二极管最佳工作区间时，阻抗匹配与波形整形效果最优，整流效率达到峰值；继续增大功率密度时，因二极管压降增大、结温升高及负载偏离最佳等效阻抗等因素，整流效率趋于饱和甚至略有下降，同时二极管热效应迅速增大。

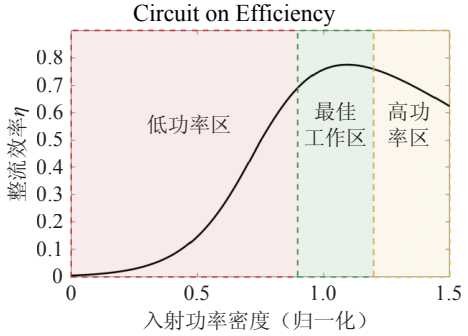


图 6　整流二极管效率-功率密度示意

Fig. 6　Schematic Diagram of Rectifier Diode Efficiency-Power Density

因此，整流天线的最佳效率点本质上由二极管

非线性特性、匹配网络设计与负载阻抗共同决定，其对应的最佳入射功率密度可通过调整匹配网络参数、负载电阻，以及谐波网络的谐振频率与品质因数进行调谐，使系统工作点与目标功率密度区间相匹配。

2.3 船端电力负载特性与微波供能功率匹配分析

受平台尺度、任务需求和系统集成条件的限制，USV 对电力系统的功率密度和系统体积具有较高要求。当前纯电 USV 多采用直流电力系统架构，以磷酸铁锂电池组作为主要能量源，推进系统、导航系统、通信与感知设备等负载可通过多端口电力电子变压器进行统一能量分配与调度。在该体系中，外部能量输入单元并不直接驱动终端负载，而是通过功率变换与储能环节接入直流母线，从而实现能量流与功率流的协同控制。

从负载特性来看，无人船用电呈现明显分层的特征：推进系统功率需求最大，其功率需求随航速和海况剧烈波动，在加速、减速等瞬态工况下对电网的瞬态响应能力和母线电压稳定性要求较高；导航、通信等任务载荷对功率需求水平较低且变化缓慢，但对供电连续性和可靠性要求较高。电池组及其配套的功率变流器在系统中承担能量缓冲与功率调节的功能，通过吸收外部能量用以输入或释放储存的电能，根据响应的充放电策略维持各负载的正常运行。在此架构下，微波供能更适合提供相对平稳、可控的功率输出，其动态调节能力和功率爬升速率通常低于推进负载的功率变化时间尺度。因此，若将微波供能直接用于驱动高动态负载，既无法满足推进负载的功率需求，也容易影响整流天线的正常工作。而导航、通信和控制设备所需的功率通常和微波供能所提供的功率位于同一量级，因此在输入功率水平满足负载所需电能质量的情况下，微波供能所提供的能量可满足这些设备的长期能耗需求。

综上所述，微波供能与船载电力系统的功率匹配可归纳为以下 2 种运行模式：

1）直接供能。该模式下，微波供能提供的电能主要用于覆盖通信、导航、环境感知和任务计算等低功耗设备，船载储能系统承担推进系统的瞬态功率支撑与能量调节。该模式适用于低速巡航、驻留监测等对续航能力和供电连续性要求较高的应用场景。

2）缓冲充电。微波供能持续向船载储能系统充电，当能量管理系统判断储能容量达到阈值后，再由储能系统向推进负载释放功率以支持阶段性高速机动。在该模式下，微波供能可等效为远程充电源，其主要作用在于延长系统的整体续航时间。

3 样船分析

3.1 样船平台架构

USV 主要用于在指定海域进行巡逻、侦察、突袭爆破等任务，现有的 MPT 功率密度一般和排水量为 5 t～10 t 的小型 USV 匹配度较好。样船参数指标见表 2。

表 2 样船参数指标

Tab. 2 Parameters of the Prototype

参数	指标
船体总长/m	9.5
船体型宽/m	2.5
设计排水量/t	3
典型航速/kn	20
最大航速/kn	40
推进器额定功率/kW	150
蓄电池容量/(kW·h)	240
甲板面积/m^2	20

样船船体使用轻量化高强度玻璃纤维增强塑料（Glass Fiber Reinforced Plastic, GFRP）复合材料制造，以纯电模式运行，动力来源为 1 组容量为 240 kW·h 的蓄电池。推进器使用电动舷外机，持续功率 150 kW，峰值功率 225 kW。在 3～4 级海况条件下巡航时，电池预计能耗为 2.5 kW·h/km，可支撑无人船以 20 kn 的航速航行约 100 n mile。USV 的上层甲板表面面积约为 20 m^2，除了部分体积较小的通信和导航设备所占区域外，剩余面积可全部用来铺设整流天线阵列。

3.2 样船供能效率分析

在 SSPS-USV MPT 系统下，微波传输效率[26]是一系列传输环节效率的综合，可表示为

$$\eta_{SG} = \eta_{TA}\eta_{TR}\eta_{RA} \tag{7}$$

式中：η_{TA} 为发射天线效率，即发射天线辐射功率和 SSPS 中太阳能电池阵输出功率之比；η_{TR} 为波束收集效率，即整流天线截获功率和发射天线辐射功率之比；η_{RA} 为整流天线效率，即整流天线接收功率和整流天线截获功率之比。

以 MMR-SPS 为例，计算常见能量传输环节效率，结果见表 3。系统将空间太阳能转换为微波辐射能的效率约为 28.9%。MMR-SPS 的太阳能电池阵设计发电功率为 2.4 GW，可被微波发射天线发射至地面的微波辐射功率为 1.7 GW。考虑电离层散射带来的辐射损失，并按常见海洋气象条件（相对湿度 70%、2～3 分云），最终到达海面的微波波束总辐射功率约为 1.5 GW。地面微波波束功率密度分布见图 7。

微波波束分布于约 1 km×100 km 的海平面上，

其中功率密度＞25 W/m^2 的主瓣区域面积约为 9 km^2，呈条状椭圆形分布，主瓣中心区域的峰值功率密度约为 450 W/m^2。考虑到主瓣区域在纵向方向上的距离分布高达 30 km，远大于 USV 的自身面积和运动尺度，可认为 USV 在纵向上的运动不会影响其所处位置的功率密度，因此本文仅考虑横向方向上的功率密度变化。根据 2.1 节的分析进行推导，可得到在不同大小的 USV 定位误差下，SSPS 波束指向误差对 USV 可用功率密度的影响见图 8。

表 3　系统常见能量传输环节效率

Tab. 3　Efficiency of Common Energy Transfer Links

参数	环节	效率
η_{TA}	电力传输	0.95
	电力-微波转化	0.80
	微波调节与合成	0.95
η_{TR}	微波空地传输	0.85～0.95
η_{RA}	波束收集	0.90
	天线接收	0.90
	功率合成	0.95

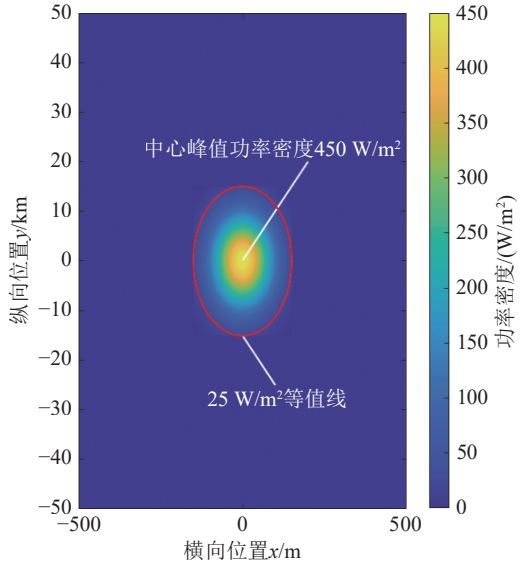


图 7　海面微波功率密度分布

Fig. 7　Microwave Power Density Distribution over Surface

整流天线效率也是微波能量转换效率的重要组成部分。对整流天线而言，需要通过适当的电路参数设计，令其尽可能地在更多时间内于最佳效率点工作。图 9 显示了仿真下经过参数匹配设计的双极化整流天线在不同的极化方向下，其整流效率与入射功率密度之间的关系。在微波频率为 5.8 GHz、入射角为 0°的条件下，通过优化阻抗匹配网络与负载参数，整流天线的最佳效率工作点可调整至与主瓣中心区域峰值功率密度一致的 450 W/m^2 处，此时整流效率约 80%。

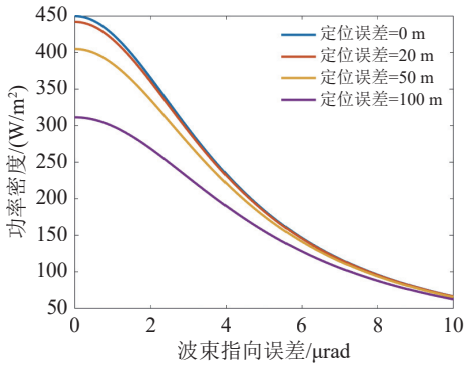


图 8　USV 定位误差和 SSPS 指向误差对功率密度分布的影响

Fig. 8　The Impact of USV Positioning Error and SSPS Pointing Error on Power Density Distribution

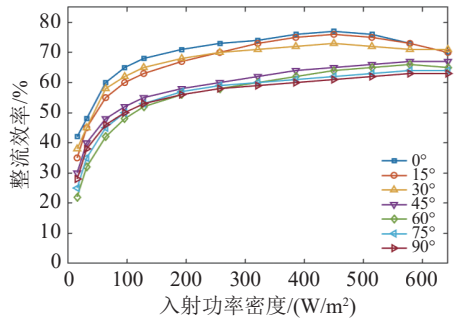


图 9　整流效率-入射功率密度关系

Fig. 9　Microwave Power Density Distribution over Surface

单个接收天线单元所能转换的功率有限。因此在实际布置时，通常将多个整流天线单元以阵列形式进行拼接与集成，通过直流侧的并联或串并混合的方式实现功率汇聚与电压等级匹配，通过直流母线统一连接至蓄电池组（见图 10）。

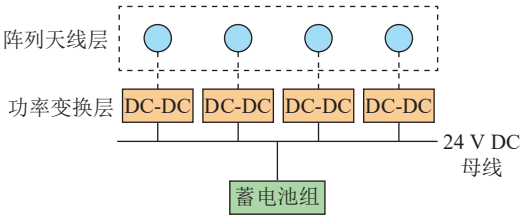


图 10　阵列天线与船载电力系统连接示意

Fig. 10　Schematic Diagram of the Connection Between the Array Antenna and the Ship's Power System

为量化验证所提方案在真实复杂海洋环境下的动态鲁棒性，引入动态海况扰动，对船体姿态高频晃动下的整流效率进行时域跟踪仿真。选取我国深远海典型 3 级海况（显著浪高 1.25 m，特征周期 5.2 s）与 4 级海况（显著浪高 2.50 m，特征周期 6.5 s）作为环境边界条件。根据 USV 在该海况下的耐波性响应特征，其横摇姿态角 $\theta(t)$ 可近似表征

为随海浪周期波动的时域函数。当船体产生姿态晃动时，传统单极化接收天线因极化方向偏转，其瞬时接收功率呈 $\cos^2\theta(t)$ 的平方级大幅跌落；而双极化天线通过正交天线单元对微波电场矢量进行全极化合成，其瞬时接收功率仅受阵面投影面积衰减限制，呈线性缩减。将 2 种天线拓扑在动态姿态下的瞬时接收功率 $P_{\mathrm{rec}}(t)$ 作为激励源，代入前文建立的 F 类非线性整流电路模型中，进行时间跨度为 30 s 的动态时域仿真，得到 3 级和 4 级海况下整流效率的时域波动对比曲线，见图 11 和图 12。

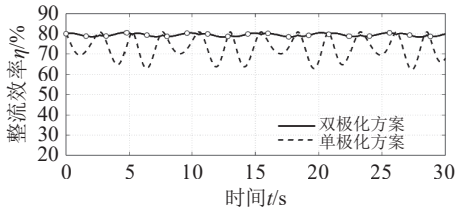


图 11　3 级海况下整流效率仿真结果

Fig. 11　Simulation Results of Rectification Efficiency Under Sea State 3

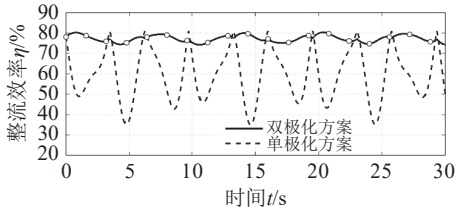


图 12　4 级海况下整流效率仿真结果

Fig. 12　Simulation Results of Rectification Efficiency Under Sea State 4

图 13 通过理论计算给出了在我国典型海洋环境下，无人船在夜间 8 h 内（22 时至次日 6 时）于微波主瓣区域内运行时，海面接收微波功率密度、天线接收功率密度及最终可转化电功率密度的动态变化过程。

由图 13 可知，由于 SSPS 端效率相对稳定，海面微波功率密度整体保持在较高水平。USV 定位和波束指向误差、船体姿态变化和功率合成损失等虽引起电功率密度小幅波动，但能量获取水平维持在 300 W/m^2～400 W/m^2，总体可控。考虑天线面积取 20 m^2，计算可得微波供能功率理论平均值为 6.5 kW，波动小于 5%。对应在夜间 8 h 内可获取的累计电能为 55 kW·h。这相当于船载蓄电池容量的 20%。在低速或停泊工况下，6.5 kW 的功率水平能够完全满足 USV 上通信、导航、环境感知和任务计算等关键设备的功率需求，使得 USV 在到达目标海域后，能够稳定地从外部获得能量补给，不再受电池容量的限制，进而降低对储能系统的依赖程度。在该种任务模式下，只要 MPT 系统能够正常传输能量，USV 理论续航趋近于无穷。当 USV 需要进行机动时，微波供能可作为独立于推进系统的外部补能手段，用于在任务间歇或非机动阶段对平台储能系统进行持续充电，在不依赖返航补给的条件下逐步恢复电池荷电状态，为后续区域转移、航线调整或任务节点切换等行为提供必要的能量储备支持。在 6.5 kW 的微波供能功率下，无人船可在 36 h 时内将蓄电池充满电，维持 USV 在 20 kn 的巡航速度下航行 100 n mile。随着未来 MPT 系统功率密度等级的提升，充电速度还将大幅缩短，实现“边充边走”的无限续航能力。

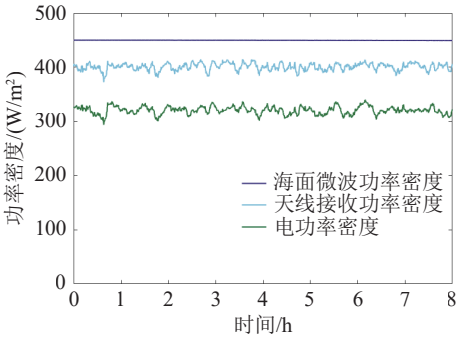


图 13　指定海域夜间 8 h 内的功率密度理论计算结果

Fig. 13　Results of Power Density in a Designated Sea Area During 8 Nighttime Hours

4　亟待解决的核心问题

4.1　SSPS 工程化落地与功率密度提升

SSPS-USV MPT 系统的性能边界在很大程度上由 SSPS 的发射能力所决定。目前 SSPS 尚未形成可规模化部署的工程体系，其系统能力仍主要停留在验证与示范阶段。

从能量传输链路的系统角度分析，发射端是决定链路整体效率与接收端可用功率水平的主导环节。现有方案中，受限于发射阵列的物理口径规模、相位控制精度及空间平台的功率汇聚与热管理能力，微波主瓣中心区域的功率密度相较于地面高功率微波系统仍存在 1～2 个数量级的差距。在远距离传输条件下，这一差异被进一步放大，使得 USV 通常仅能获得数千瓦级的稳定电功率，难以直接支撑高机动性或高负载率连续运行任务。

因此，SSPS 的工程化落地不仅是空间能源技术发展的关键路径，也是 SSPS-USV MPT 系统走向实际应用的基础条件。未来可继续对 SSPS 进行系统性优化设计，通过提升阵列相位一致性与波束能量集中度，有望提高主瓣中心区域的有效功率密度，从而拓展微波能量传输技术在海上无人系统中的应用尺度与任务适应能力。

4.2 整流天线关键器件优化

从接收端角度出发，整流天线的能量转换效率是决定系统整体性能的关键环节。整流电路中的主要损耗来源于整流器件（肖特基二极管）的结电容、结电阻及高频寄生参数所引起的导通损耗与开关损耗，因此，器件电气性能与电路结构设计对系统效率具有直接影响。

近年来，随着氮化镓高电子迁移率晶体管（Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor, GaN HEMT）和磷化铟高电子迁移率晶体管（Indium Phosphide High Electron Mobility Transistor, InP HEMT）等高功率密度射频器件的引入，整流电路在高频与高功率密度条件下的工作能力得到显著提升。已有研究在 GHz 频段实现了 70%～80% 以上的射频-直流（Radio Frequency to Direct Current, RF-DC）转换效率，表明氮化镓（Gallium Nitride, GaN）器件在高功率无线电能传输接收端具有良好的应用潜力。随着高阶谐波控制与高效整流拓扑的发展，整流效率有望进一步接近 90% 的理论极限[27-28]。热效应也是限制整流天线阵列功率承载能力的重要因素。随着接收端入射功率密度的提高，器件结温上升会引起导通损耗增加、寄生参数漂移及非线性效应增强，从而导致整流效率下降，并加剧阵列单元间性能的不一致性。当前研究多集中于匹配网络与电路拓扑层面的优化，对热-电耦合效应的系统建模与工程设计关注相对不足。未来应引入多物理场联合建模，从器件级至舱室级建立热-电耦合模型，系统评估结温分布对整流效率与系统稳定性的影响机制。在工程实现层面，可通过高热导基板材料、先进封装结构及微尺度散热通道设计等手段构建面向高功率密度工况的热管理体系。同时，在电路层面引入多级整流结构、自适应阻抗匹配与宽动态范围工作机制，有助于在入射功率波动和负载变化条件下维持较高的能量转换效率，从而提升系统整体运行的可靠性与工程适应性。

4.3 微波频段提升引发的技术问题

现有 MPT 系统多工作于 2.45 GHz 和 5.8 GHz 等民用频段，受天线口径、电磁安全约束与频谱资源条件的限制，其可实现的空间功率密度水平相对有限。理论上，提高工作频率可在相同天线物理尺寸条件下获得更高的方向性增益和更小的波束扩展角，从而在接收区域内形成更高的空间功率密度，为紧凑型无人平台获取更高功率等级的电能创造条件。

然而，一味提高微波频率也会带来一系列问题：一方面，大气衰减与传播损耗在高频段显著增强，给长距离传输链路的稳定性与效率带来挑战；另一方面，接收端整流器件的寄生参数效应在高频条件下更加突出，对器件结构、匹配网络精度与封装工艺提出更高要求。此外，以 MMR-SPS 为例，海面微波投影区域内的峰值功率密度为 450 W/m^2，远高于国际非电离辐射防护委员会（International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP）对人体安全的标准。在实际应用时，虽然无人船内无碳基生物，但也应考虑事先划定限制区域，远离民用航线和海洋生物聚集区，防止高功率微波造成生物污染。

高频微波在船体和船载设备中的金属结构内可能引发涡流效应，从而对部分电子设备的电磁兼容性与工作稳定性产生影响。实际应用时，应尽量使用复合材料，避免涡流效应；对于不得不使用金属材料的设备，应采用防护措施，防止设备在高频微波下因涡流效应发生损坏。未来研究可在毫米波及更高频段条件下，系统评估波束形成能力、传输损耗与能量转换效率之间的权衡关系，发展适用于高频高功率密度工况的设备结构设计与制造工艺，并在工程应用层面逐步完善相关电磁安全标准与系统设计规范，为微波供能系统在高能量密度与紧凑化平台上的应用提供可靠的理论依据与技术支撑。

5 结论

本文针对依赖传统化石能源的无人船在远海范围内的续航自持力差等问题，提出基于空间太阳能电站-无人船微波能量传输系统的新型能量传输方式。主要技术特点如下：

1）提出由 SSPS 空间发射端、微波传输链路和无人船接收端组成的 SSPS-无人船 MPT 系统架构，创新性提出区别于传统点对点能量传输方式的区域照射式能量传输模式。

2）对区域微波照射下海面微波功率密度开展统计学分析，结果表明微波功率密度分布主要受海洋环境、SSPS 架构、USV 定位误差和 SSPS 波束角指向误差影响，主瓣区域内功率密度最高。

3）分析无人船接收端整流天线的工作原理与参数设计。针对无人船因风浪和工况变化带来的天线姿态变化问题，提出采用双极化天线搭配 F 类整流电路的整流天线方案，降低了入射波束极化方向变化对功率水平带来的影响。仿真结果表明，4 级海况条件下，经过设计后的整流天线在最佳效率工作点的整流效率可达约 80%。

4）基于无人船电力系统的电网架构和负载特性，分析 MPT 系统与船端电力系统的匹配性，提出直接供能和缓冲充电 2 种功率匹配运行模式。通

过无人船平台实例验证两种模式的可行性：直接供能模式可持续满足低功耗通导设备的用电需求，缓冲充电模式能够为高机动任务提供持续性的能源支持。

微波供能体系的工程价值不仅体现在单一平台续航能力的提升，更取决于其与具体任务模式和系统架构之间的协同适配关系。现有研究多聚焦于点对点或单平台供能场景，尚未充分发挥 MPT 系统在区域覆盖与多节点供能方面的潜在系统优势。在新的任务场景下，小型无人船更多发挥“组网”作用，即基于多个无人平台节点，通过多平台协同与分布式部署的工作方式来完成对目标海域的长时间驻守、监视、预警乃至打击任务。在多平台协同与分布式部署任务中，微波供能可与通信链路和任务调度机制进行联合设计，构建“能量覆盖区-任务节点-协同网络”的一体化运行模式，实现多节点“信能一体”。

参考文献：

[1] ZHANG L, DAI L. Forecasting Lithium Demand for Electric Ship Batteries in China's Inland Shipping Under Decarbonization Scenarios[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 13(9): 1676-1688.

[2] 王健, 罗潇, 刘旌扬, 等. 复合动力超长续航无人船系统的设计与实现[J]. 船舶工程, 2017, 39(5): 48-52.
WANG J, LUO X, LIU J Y, et al. Design and Implementation of Composite Power Ultra-Long Endurance Unmanned Boat System[J]. Ship Engineering, 2017, 39(5): 48-52.

[3] 汪晓菲, 刘峰, 王娜娜. 绿色船舶推进技术发展综述[J]. 船舶工程, 2025, 47(增刊 1): 412-417.
WANG X F, LIU F, WANG N N. Review on Development of Green Ship Propulsion Technology[J]. Ship Engineering, 2025, 47(Suppl.1): 412-417.

[4] 刘耀, 肖晋宇, 赵小令, 等. 无线电能传输技术发展与应用综述[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(2): 48-67.
LIU Y, XIAO J Y, ZHAO X L, et al. Development and Application Review on Wireless Power Transmission Technology[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(2): 48-67.

[5] 黄仁豪, 解浩男, 张冬冬, 等. 无线电能传输技术在新型电力系统中的应用研究[J]. 广西电力, 2022, 45(3): 1-7.
HUANG R H, XIE H N, ZHANG D D, et al. Research on the Application of Wireless Power Transmission Technology in the Power Network Based on New Energy[J]. Guangxi Electric Power, 2022, 45(3): 1-7.

[6] 蔡天昊, 吕枫. 水下机器人磁耦合无线电能传输技术研究进展[J]. 中国海洋平台, 2024, 39(4): 39-46.
CAI T H, LYU F. Research Progress of Magnetic-Coupled Wireless Power Transfer Technology for Underwater Robots[J]. China Offshore Platform, 2024, 39(4): 39-46.

[7] 侯欣宾, 王立, 张兴华, 等. 空间高压发电输电及无线能量传输试验验证方案[J]. 空间电子技术, 2018(2): 27-31.
HOU X B, WANG L, ZHANG X H, et al. Space High Voltage Power Transmission and WPT Experiment Scheme[J]. Space Electronic Technology, 2018(2): 27-31.

[8] 侯欣宾, 贾海鹏. 基于微波无线能量传输的临近空间飞行器电力供给[J]. 空间电子技术, 2016(2): 12-16.
HOU X B, JIA H P. Electricity Supply of Near-Space Vehicles Based on Microwave Power Transmission[J]. Space Electronic Technology, 2016(2): 12-16.

[9] LU P, WAGIH M, GOUSSETIS N, et al. A Comprehensive Survey on Transmitting Antenna Systems with Synthesized Beams for Microwave Wireless Power Transmission[J]. IEEE Journal of Microwaves, 2023, 3(4): 1081-1101.

[10] DETKA K, GÓRECKI K. Wireless Power Transfer: a Review[J]. Energies, 2022, 15: 7236-7256.

[11] DUAN B Y, ZHANG Y Q, CHEN G D, et al. On the Innovation, Design, Construction, and Experiments of OMEGA-Based SSPS Prototype: the Sun-Chasing Project[J]. Engineering, 2024, 36(5): 90-101.

[12] GLASER P. Solar Power Satellites: a Space Energy System for Earth[M]. Chichester: Praxis Publishing Ltd., 1998.

[13] 王立, 成正爱, 张兴华, 等. 空间太阳能电站发展展望[J]. 国际太空, 2017, 10: 14-23.
WANG L, CHENG Z A, ZHANG X H, et al. Development of Solar Power Satellite[J]. Space International, 2017, 10: 14-23.

[14] 侯欣宾. 不同空间太阳能电站概念方案的比较研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33: 63-69.
HOU X B. Analysis and Comparison of Various SPS Concepts[J]. ACTA Energiae Solaris Sinica, 2012, 33: 63-69.

[15] NASA. Microwave Power Transmitting Phased Array Antenna Research Project[R]. 1978.

[16] NASA. Design Study for a Ground Microwave Power Transmission System for Use with a High-Altitude Powered Platform[R]. 1983.

[17] 侯欣宾, 张潇, 成正爱, 等. 模块化多旋转关节空间太阳能电站方案设计[J]. 空间电子技术, 2023, 20(3): 1-6.
HOU X B, ZHANG X, CHENG Z A, et al. Concept

Design on Modular Multi-Rotary Joints Solar Power Satellite[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(3): 1-6.

[18] LU W Q, WANG H G, WU G Q. Orbit Determination for All-Electric GEO Satellites Based on Space-Borne GNSS Measurements[J]. Remote Sensing, 2022, 14: 2627-2640.

[19] BALANIS C A. Antenna Theory: Analysis and Design[M]. Hoboken: Wiley, 2016.

[20] SASAKI S, TANAKA K, MAKI K. Microwave Power Transmission Technologies for Solar Power Satellites[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(6): 1438-1447.

[21] 侯欣宾, 王薪, 王立, 等. 空间太阳能电站反向波束控制仿真分析[J]. 宇航学报, 2016, 37(7): 887-894.
HOU X B, WANG X, WANG L, et al. Space Power Satellite Retrodirective Beam Steering Simulation[J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(7): 887-894.

[22] 董士伟, 董亚洲, 王颖, 等. MW 级太空发电站微波能量波束指向控制精度分析[J]. 宇航计测技术, 2018, 38(3): 61-66.
DONG S W, DONG Y Z, WANG Y, et al. Microwave Power Beam Steering Accuracy Analysis of MW-Level SPS[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2018, 38(3): 61-66.

[23] 董士伟, 侯欣宾, 王薪. 空间太阳能电站微波能量反向波束控制技术[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(5): 91-102.
DONG S W, HOU X B, WANG X. Retro-Directive Microwave Power Beam Steering Technology for Space Solar Power Station[J]. Chinese Space Science and Technology, 2022, 42(5): 91-102.

[24] 刘童, 蔺炜, 邓敬亚. 无线能量传输整流天线技术研究进展[J]. 空间电子技术, 2024, 21(3): 18-26.
LIU T, LIN W, DENG J Y. Research Progress on Rectenna Technology of Wireless Power Transfer[J]. Space Electronic Technology, 2024, 21(3): 18-26.

[25] 陈强, 潘嶙, 黄祥. 微波无线传能高性能双极化整流天线设计[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(3): 033003.
CHEN Q, PAN L, HUANG X. Design of High-Performance Dual-Polarized Recrenna for Microwave Wireless Power Transmission[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(3): 033003.

[26] 马海虹, 李成国, 董亚洲, 等. 空间无线能量传输技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018.
MA H H, LI C G, DONG Y Z, et al. Space Wireless Power Transmission Technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018.

[27] ABBASIAN S, JOHNSON T. High Efficiency GaN HEMT Class-F Synchronous Rectifier for Wireless Applications[J]. IEICE Electronics Express, 2015, 12(1): 20140952.

[28] NA J, KIM J, LEE J, et al. 2.4-GHz GaN HEMT Class-F Synchronous Rectifier Using an Independent Second Harmonic Tuning Circuit[C]// IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). 2021.