

科技评论

无“线”可能:激光能量传输如何重塑能源未来

刘劼玮¹, 薛傅龙^{2,3*}, 王志峰⁴

摘要 分析了激光无线能量传输(laser wireless power transmission, LWPT)技术的基本原理、发展背景及未来应用。该技术基于受激辐射原理,将电能转化为激光能量,经过大气或真空介质传输后,最终由激光电池将光能高效转换为电能,具备高方向性、高能量密度、远距离传输等优势。在低空产业领域,LWPT 可为无人机、飞行汽车等提供持续能源补给,显著提升续航能力与作业效率;在商业航天领域,其可为卫星、空间站及深空探测器构建灵活的能量传输网络,支撑长期太空任务。展望未来,LWPT 技术与激光通信、卫星遥感定位等技术结合,可实现能源与信息的协同传输,构建交通-信息-能源三网融合的智能蓝图,推动交通系统向高效化、自动化迈进。这一目标的实现,需依托多行业深度合作与持续技术创新,并同步推进跨领域协同研发及标准规范制定。通过推动该技术的发展,有望催生能源传输领域的革命性变革,为现代社会的发展提供坚实的支撑。

关键词 激光无线能量传输(LWPT);能源传输技术;能源革命;新质生产力

在科技与新质生产力快速发展的浪潮中,以低空产业和商业航天为代表的新兴产业不断涌现,并持续重塑着我们的生活和未来。然而,这些新兴领域的发展对能源传输提出了前所未有的挑战。传统的能源供给方式,如地面充电站和电池更换,已无法满足无人机、

飞行汽车等低空交通工具对持续、高效、灵活能源的需求。同样,航天领域的卫星充电、太空站能源补给和深空探测器供电,也亟须突破传统能源传输方式的局限。对此,无线能量传输技术应运而生。其中,激光无线能量传输(LWPT)技术,以其高方向性、高能量密度和远距离传输能力,展现出巨大的发展潜力和广阔的应用前景。

自 20 世纪初,美国科学家尼古拉特斯拉提出无线电力传输的设想并开展研究以来,经过百年的技术积累和需求的不断增长,这一曾被视为科幻场景的技术如今正逐渐成为现实。LWPT 技术利用

电磁波束将能量从发射端传递到接收端,提供了一种无需物理连接的全新能源补给方案。不同于在日常生活中已普遍应用的近场无线能量传输技术,基于电磁波束的 LWPT 技术可以进行点对点的长距离能量传输,在传输距离和灵活性方面具有显著优势。这一技术不仅可以为无人机、飞行汽车等低空飞行器提供持续的能源支持,还在卫星、太空站及深空探测器等航天应用中具有极大的应用前景。

随着技术能力的持续进步,LWPT 技术将超越单纯的能源传输功能,成为推动交通-信息-能源三网融合的核心驱动力。这一融

1. 中国科学院大连化学物理研究所, 大连 116023
2. 清华大学车辆与运载学院, 北京 100084
3. 嘉兴南湖路空协同立体交通产业研究院, 嘉兴 314007
4. 北京九天行歌航天科技有限公司, 北京 100102

收稿日期: 2024-09-09; 修回日期: 2024-10-09

作者简介: 刘劼玮, 副研究员, 研究方向为光电能源转化利用, 电子信箱: jwliu@dicp.ac.cn; 薛傅龙(通信作者), 高级工程师, 研究方向为飞行汽车与低空交通, 电子信箱: xuefulong@buaa.edu.cn

引用格式: 刘劼玮, 薛傅龙, 王志峰. 无“线”可能: 激光能量传输如何重塑能源未来[J]. 科技导报, 2025, 43(9): 15-23; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.09.01276

合将催生全新的交通系统形态,推动交通系统向智能化、自动化和高效化方向迈进。通过高效能源传输和信息传递,交通系统将大幅提升运行效率,减少能源消耗,并提高信息传递的有效性和准确性。未来的交通系统将是与信息、能源网络紧密相连的、高度有序的有机整体,从而实现交通、信息和能源的协同发展。

为实现这一构想,需要在政策、技术、管理等方面进行创新,从而取得能源传输形态的重大突破。LWPT 技术作为无线能量传输的代表,将在其中扮演至关重要的角色。这些创新和变革将为未来人类社会形态的重塑提供无限可能,开启智能交通系统的新时代(图 1)。



图 1 LWPT 能源互联概念图

1 激光无线能量传输的原理与技术特点

基于电磁波束的长距离无线

能量传输技术主要有微波和激光(LWPT)2种路线。其中,激光传输则具有约束性好、传输能量集中、无射频干扰的优势,其传输和接收设备的体积仅为微波传输设备的 1/10。随着激光器和激光电池性能的提升与成本降低,LWPT 技术在众多领域展现出广阔前景。

LWPT 技术的基础是将电能转化为激光能量进行远距离传输,主要包括激光发射、传输、接收和能量转换 4 个主要步骤。如图 2 所示,首先,激光器基于受激辐射原理,将输入的电能转化为激光能量。随后,激光束通过光学系统进行准直和整形,以提高光束的方向性和光束质量。在传输过程中,激光束在大气或真空介质中传播。最后,接收端的光电转换装置(激光电池)利用半导体光伏发电原理,将接收到的激光能量高效转化为电能,为各种负载提供能量供应。

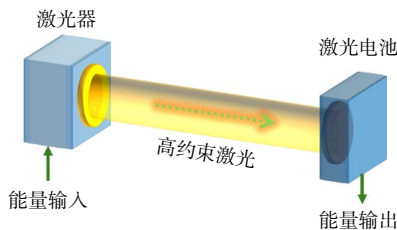


图 2 激光无线能量传输系统示意

LWPT 技术具有以下技术特点。(1) 高方向性:激光束的方向性好,可以聚焦成非常细的光斑,精确地将能量传输到目标,降低能量在传输过程中散失;(2) 高能量密度:激光束可以集中能量,从而能够以高能量密度传输能量,提升远距离内传输能量效率;(3) 安全性:激光传输过程中,能量主要集中在传输路径上,对周围环境的影响较小;(4) 远距离传输能力:激

光可以在远距离内传输能量,在特定条件下激光传输能量的损耗较小;(5) 可选频率范围广:激光可选频率范围广,可以根据不同的应用场景选择合适的频率。例如,在大气环境应用中,通常选择波长在 780~1100 nm 的激光以减小光在大气中的衰减^[1-2]。

虽然在特定条件下,LWPT 技术的传输效率可媲美传统电缆的传输效率。然而,由于大气损耗、激光器和激光电池的热损失等问题,现有技术下 LWPT 的系统整体效率在 10%~25%^[2]。其中,激光器是 LWPT 系统的核心部件,其性能直接影响着整个系统的效率和应用范围。目前,LWPT 技术可使用的激光器主要有半导体激光器(图 3(a))^[3-4]、全固态激光器^[5-7]、光纤激光器^[8]等类型。每种类型的激光器都有其优缺点和适用场景,需根据应用需求、成本、可靠性等因素进行综合考虑。此外,激光电池的性能也是决定 LWPT 系统整体效率的关键要素。目前主要有 3 种类型的激光电池:Ⅲ-V 族化合物半导体激光电池、硅激光电池、基于钙钛矿或有机材料的激光电池。其中,Ⅲ-V 族化合物半导体激光电池(图 3(b))具有带隙与第一大气窗口匹配、效率高、抗辐射能力强等优势,缺点是成本较高。在 808 nm 激光照射下,GaAs 激光电池的转化效率可高达 74.7%^[9]。

硅激光电池是一种成本较低、制造工艺成熟的传统光伏材料,但其用于激光能量转换时的光电转换效率相对较低。钙钛矿和有机太阳能电池,由于具有可调的带隙和较高的吸收系数,可以用于

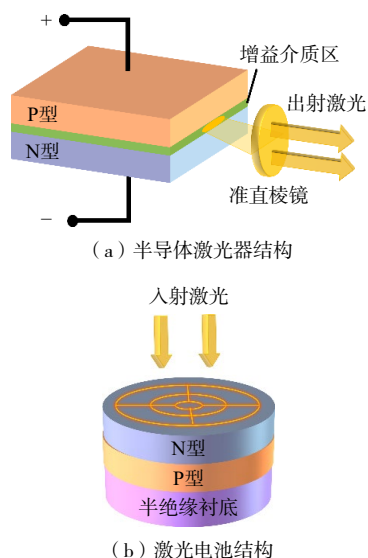


图3 LWPT技术可使用激光器

匹配不同波长的激光,并实现较高的效率。钙钛矿材料,如甲脒铅溴(FAPbBr_3),在水下应用中表现出良好的性能,532 nm的激光照射下其效率可达43.02%^[10],而甲脒铅碘(FAPbI_3)钙钛矿材料在785 nm激光照射下可实现60.2%的转化效率^[11]。有机材料,如可用于制造可穿戴设备的PBDB-TF:BTP-eC₉,在660 nm的激光照射下可实现36.2%的转化效率^[12]。随着技术的不断进步,可以期待激光电池的效率、稳定性和成本将会得到进一步优化,从而提高无线能量传输技术在各领域的应用前景。

此外,LWPT系统在传输过程中的大气衰减和光学系统损耗,以及能量传输过程中系统对准精度的问题,也制约着LWPT系统的性能。例如,大气窗口波段的激光在大气中传输距离为1 km时,能量损耗小于5%^[2,13-15]。光学系统使用透镜的透过率通常为99.9%,而考虑到透镜本身吸收和多透镜效应等因素,系统整体可实现大于98%的透过率^[16]。此外,无人机在

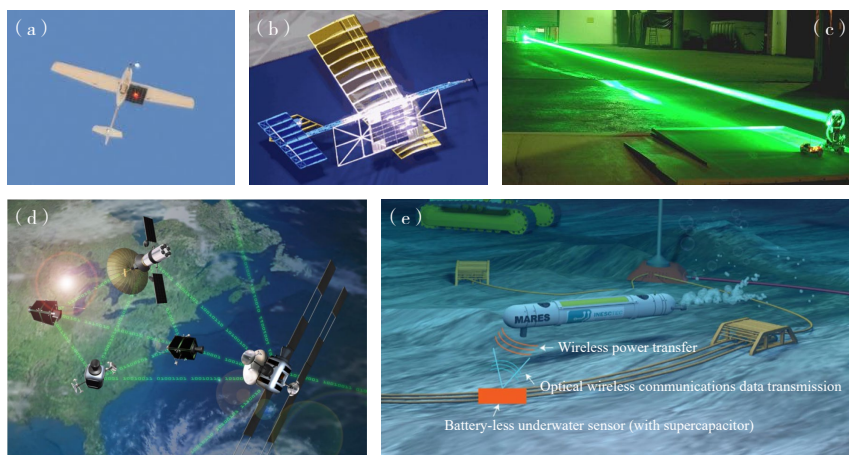
飞行过程中会不断改变姿态和位置,而大气中的散射、吸收和湍流等因素会影响激光束的传播路径和光斑形状^[14]。这些因素都增加了系统对准的难度,并可能导致能量传输效率下降。对此,研究人员使用卡尔曼滤波算法预测目标位置,可以提前给出控制量,避免跟踪延迟,提高跟踪精度^[16]。另外,利用自适应光学技术实时校正激光束形状,可以改善光斑形状,提高能量利用率^[17]。

2 激光无线能量传输系统研究与应用

LWPT技术的潜在应用场景非常广泛,涵盖了从陆地到海洋,从地球到太空,从民用到军事等多个领域。国内外多个研究机构已对LWPT系统开展过相关的验证实验,取得了一定的进展。1997年,日本的Yugami等^[18]进行了地面传输的LWPT实验。当 CO_2 激光器发射的激光经过500 m传输后,到达接收端的能量占初始光能量的60%~65%。2014年,北京工业大学团队开发了一种功率为24 W的LWPT系统。该实验在100 m的距离上进行,整体电-电效率为11.6%^[19]。2016年,日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)在200 m距离上进行了高精度LWPT实验,实现了74.7 W的最大输出电功率^[20]。2017年,中国电子科技集团公司研究团队开发了一种输出功率为100 W的LWPT系统,在50 m的传输距离上激光-电能转换效率超过了

28%。2019年,美国海军实验室在马里兰州的海军实验基地进行了“激光传输电力”项目(PTROL)的第2阶段实验。该实验在325 m的距离上传输了2 kW的激光功率^[21]。2021年,瑞典电信公司Ericsson和美国PowerLig Aerospace公司成功演示了第一个完全由激光无线供电的5G基站^[22]。

在地面应用中,LWPT技术可以用于无人机、电动汽车等移动设备的无线充电。无人机方面,2005年美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的德莱顿飞行研究中心(Dryden Flight Research Center, DFRC)和马歇尔太空飞行中心(Marshall Space Flight Center, MSFC)开展了小型飞行器激光供能实验,实现了室外条件下激光对15 m外的小型飞行器的供能,实现其长时间续航,展示了LWPT技术在提高无人机续航能力和作战效率方面的巨大潜力^[23]。2006年,近畿大学利用LWPT技术对小型直升机和风筝进行激光能量供给实验。该系统直接连接到风筝发动机,实现了42 W的最大功率输出,使风筝飞行时间超过1 h^[24]。2009年,美国LaserMotive公司使用激光为四旋翼直升机无线供电,使其在空中停留12.5 h。2010年,该公司使用激光无线充电系统为1 km外的鹈鹕无人机(UAV)供电(图4(a)和4(b)),将无人机的续航时间从无激光充电的5 min增加到12 h^[2]。2012年美国PowerLight公司(前LaserMotive)的激光无线充电系统,已成功将无人机续航时间从



(a)和(b) 无人机激光传能(LaserMotive); (c) 激光无线供能移动小车; (d) 分布式可重构卫星平台系统(DARPA); (e) 水下能源信息无线传输系统

图4 LWPT系统的相关研究与应用案例

2 h 延长到 48 h 以上,并实现了对多个无人机的同时充电^[25]。电动汽车方面,2003 年,Steinsiek 等^[26]进行了利用激光为地面移动小车无线供能的实验(图 4(c))。2017 年,日本提出了一种通过在车辆顶部安装光伏电池,并在道路两侧利用太阳光抽运激光器接收太阳光并将其转化为激光,再将激光照射到车顶光伏电池上为车辆供能的设想^[27],展示了 LWPT 技术在为电动汽车提供无线充电方面的潜力。

在太空应用中,LWPT 技术可用于卫星充电、太空站能量补给、深空探测器供电等,为人类探索宇宙提供可靠的能源保障(图 4(d))。例如,对于月球或火星探测车等小型航天器,传统的能源补给方式存在能量密度低、续航能力有限等问题。LWPT 技术可以利用空间太阳能电站(space solar power station, SSPS)系统,通过激光将电能传输到探测车上,为其提供持续的能源补给。此外,可以利用 LWPT 技术在 SSPS 系统或其他空间站之间进行能量传输,为空间站提供

稳定的能源补给。2009 年,NASA 进行了激光驱动太空电梯实验,实现了质量为 50 kg 的太空电梯以 2 m/s 的速度正常运行,并展示了 LWPT 技术在为太空电梯提供能量方面的可行性^[28]。2023 年,美国海军研究实验室(United States Naval Research Laboratory, NRL)的“太空无线能量链”(Space-based Wireless Energy Laser Link, SWELL)在轨道上成功运行了 100 多天,是太空激光能量发射的一个成功案例^[29]。

军事方面,美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)开展了 LWPT 技术在军事领域的应用研究,包括用于远程武器系统、无人机等设备的无线供电,提高作战效率和安全性。2016 年,DARPA 与无声猎鹰无人机技术公司(Silent Falcon UAS Technologies)合作,继续开发激光基充电方法,使用其固定翼遥控无人机系统^[30]。该计划旨在为无人机提供无线充电,从而延长其续航时间并

提高作战效率。2022 年,DARPA 发布了一份信息请求,旨在修改加油机以使用激光为无人机充电。该项目的目标是开发一种名为“空中能量井”的吊舱,该吊舱可以安装在美空军现役加油机的机翼下,使用激光为无人机无线充电。DARPA 认为“空中能量井”可以成为能源网络的一部分,该网络将使国防部能够动态分配能源资源,以提供更大的军事行动灵活性^[31]。

此外,LWPT 技术还可以应用于水下设备能量传输。传统的海底供电方式主要依赖电缆,但在深海环境中,电缆的铺设和维护成本高昂,且容易受到腐蚀和损坏。而无线传输技术则能够有效解决这些问题,为水下设备提供更加安全、可靠的能源供应。2018 年,浙江大学首次提出了基于太阳能板的水下无线光学传输(underwater wireless optical communication, UWOC)系统,能够实现光通信和能量传输的双重功能(图 4(e))^[32-33]。2020 年,Filho 等^[34]提出了一种时间分割的光波信息和能量传输系统,使用 430 nm 蓝色激光和光伏电池为电池充电,充电功率为 840 mW,充电时间为 124 min。这些研究为水下探索和海洋资源的开发提供了技术支持。

总的来说,LWPT 技术在太空、地面、军事、水下等多个领域都具有广泛的应用前景。随着该技术的不断进步和应用的不断拓展,LWPT 技术将为人类社会带来更多的便利和福祉,并为新兴产业的颠覆性创新和人类可持续发展做出重要贡献。

3 激光无线能量传输的技术挑战

LWPT 技术因其在诸多领域的潜在应用前景,受到了广泛关注。这项技术代表着未来能源传输领域的重要发展方向,拥有巨大的发展潜力。然而,要进一步实现技术的实用化并推广其应用,仍需克服许多挑战。

首先,激光发射器是 LWPT 系统的核心。近年来,高功率半导体激光器的电光转换效率已显著提高,达到 50% 以上。而进一步通过光纤耦合技术和光束合并技

术,可以将多个低功率激光器的光束合并,实现千瓦级甚至兆瓦级的激光输出。目前,PowerLight 公司已经成功传输了 400 W 的激光功率,并计划在未来实现 1 kW 的传输^[35]。然而,高功率激光器产生的热量也带来了散热难题。为解决这一问题,需要采用高效率的热沉设计,利用特殊的散热材料和结构,将热量快速散发出去;同时,采用低应力、高热导率的封装工艺,确保激光器在工作过程中温度能控制在合理范围,维持稳定运行。

其次,激光电池(laser power converter, LPC)负责接收激光能

量并将其转换为电能,是 LWPT 系统的关键组成部分。目前,基于 GaAs 的 LPC 的光电转换效率已达到 74.7%^[9],而 InGaAs LPC 在 1064 nm 激光照射下,光电转换效率达到 50.8%^[36](图 5^[37])。此外,研究人员也在探索包括钙钛矿材料或有机光伏材料在内的其他新型光电转化材料^[10-12]。然而,高功率激光能量传输会导致 LPC 温度升高,其效率降低甚至损坏。因此,开发高效的散热结构至关重要,例如采用新型散热材料和散热鳍片设计,加强电池的散热能力,以保证激光电池的长期稳定性。

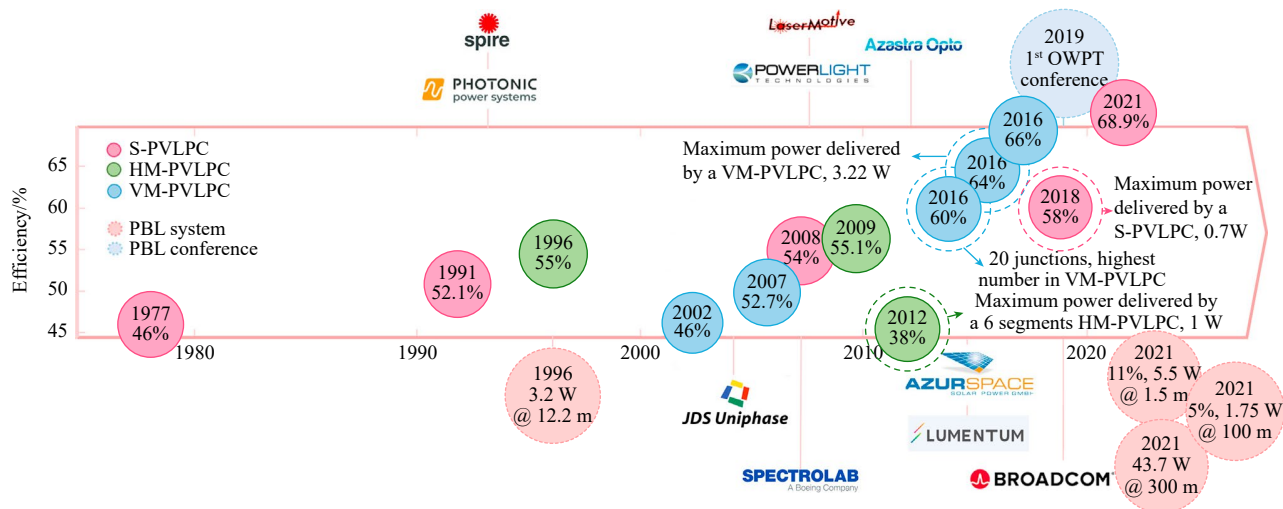


图5 LWPT 研究中的激光电池最高效率统计与相关公司

此外,传输过程损耗也是影响 LWPT 系统效率的重要因素。激光在传播过程中会受到大气的影响,例如大气吸收、散射、湍流等,从而导致能量损失。为了降低大气损耗,需要选择合适的激光波长和传输路径,并采用自适应光学系统来校正波前畸变。同时,激光发射器和接收器之间的对准误差也会导致能量损失。因此,需要开发高精度的激光跟踪控制系统来保证激光束的准确照射。

系统设计方面,为了提高能量转换效率,需要保证激光发射器和接收器的能带匹配。目前, GaAs 和 InGaAs 是 2 种主要的 LPC 材料,分别适用于地面或空间 LWPT 系统和深海 LWPT 系统^[2]。GaAs LPC 主要适用于地面或空间 LWPT 系统,对应的激光波长在 808 nm 附近;而深海 LWPT 系统则需要使用波长在 450~560 nm 的激光^[38]并据此选择相应的接收材料。研究人员也在探索包括钙钛矿材料

或有机光伏材料在内的新型材料在 LWPT 系统中的应用,以期进一步提高能带匹配的效率。同时,将 LWPT 系统设计成模块化结构,可以方便进行系统升级和维护,提高系统的灵活性和可扩展性,便于在不同应用场景中部署和使用。

目前,在多数实际应用中,仍需要进一步优化 LWPT 系统设计以达到更高的效率以满足使用需求。此外,LWPT 系统的整体成本

仍然偏高,这主要来自大功率激光器和高效率 LPC 的制造成本。对此,可以通过采用激光二极管阵列和光束合并技术,实现高效率、低成本的激光输出,从而降低 LWPT 系统的整体成本。随着我国半导体产业的持续发展,可以预期相关配件的生产成本在未来将会进一步降低。

4 发展建议

LWPT 技术作为一种新型的无线能量传输技术,虽然在航空航天、移动设备充电、交通运输等领域展现出巨大的应用潜力,但仍面临着一些技术挑战。为了推动 LWPT 技术的健康发展,本文提出以下发展建议(图 6)。

一是加强基础研究是推动 LWPT 技术发展的关键。基础研究是技术进步的基石,只有深入了

解 LWPT 技术的原理和技术特点,才能攻克关键技术难题。基础研究应涵盖激光发射、传输、接收和能量转换等环节,以及光束瞄准与跟踪、大气影响、能量转换效率等关键技术难题。

二是开展应用示范是验证 LWPT 技术可行性和经济性的重要途径。通过在实际应用场景中进行示范,可以验证 LWPT 技术的性能和稳定性,为技术的推广和应用提供有力支持。在低空产业领域,建立基于 LWPT 技术的无人机无线充电示范基地,展示其在物流配送、巡检等实际任务中的应用效果,包括无人机续航能力提升、充电效率、操作便捷性等方面;在电动汽车领域,选择特定区域开展 LWPT 无线充电试点项目,收集实际使用数据,评估其对电动汽车性能的影响;在太空应用方面,开展 LWPT 技术为太空站

补给能源的示范项目,验证其在太空环境下的长期稳定供电能力,以及与太空站现有能源系统的兼容性。通过这些不同领域的应用示范,全面展示 LWPT 技术的应用潜力。

三是降低成本是提高 LWPT 技术市场竞争力的重要措施。一方面,通过技术创新,研发新型的激光器和光电转换器件制造工艺,提高生产效率,降低制造成本;另一方面,实现规模化生产,优化供应链管理,利用规模效应降低单位产品成本。此外,简化系统结构、提高设备可靠性等方法也可有效降低系统整体成本。

四是制定标准规范是保证 LWPT 技术健康发展的重要保障。标准规范可以统一技术参数、规范设备性能,为技术推广和应用提供依据。同时,标准规范还可以促进技术交流和合作,推动 LWPT 技术在全球范围内的应用。

五是加强国际合作与交流是推动 LWPT 技术发展的重要手段。LWPT 技术具有全球性的应用前景,通过国际合作与交流,可以共享技术成果,加快技术发展进程。国际合作应涵盖技术研发、设备制造、市场推广等环节,共同推动 LWPT 技术在全球范围内的应用。

最后,伴随低空产业和商业航天等新兴产业的蓬勃发展,LWPT 技术可以与激光通信、卫星遥感定位等技术深度结合,实现全时空领域的能源与信息全面互联,打造出全新的人类社会形态。在低空领域,通过能量网、交通网和信息网的三网融合,可实现动力交通一

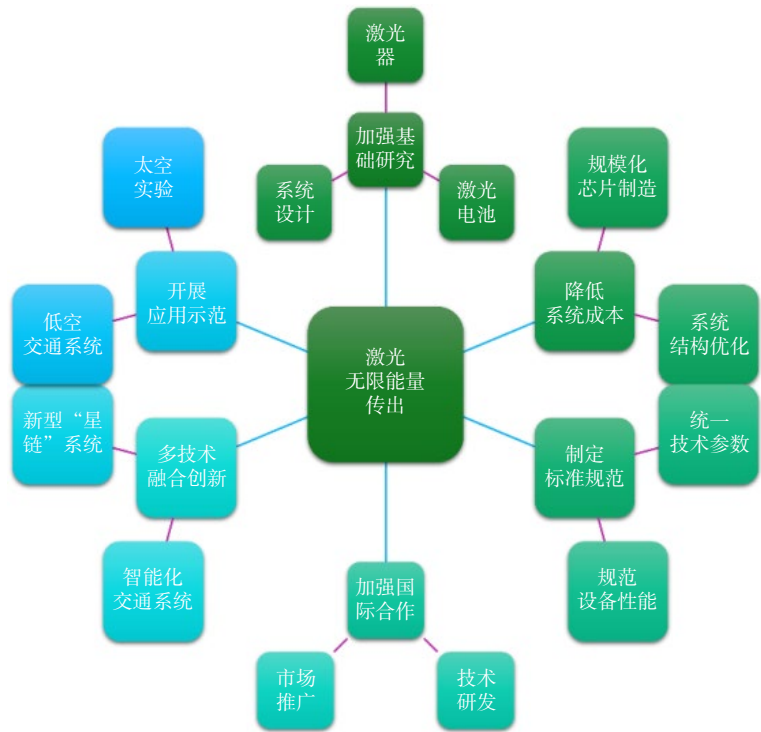


图 6 LWPT 发展建议

体化的智能化交通系统。在航天领域,激光通信和卫星遥感定位技术将协力构建智能化、自动化的“星链”系统。这些愿景的实现,需要不同行业研究人员和政策制定者的紧密合作,打破技术和想象力的壁垒,共同推动人类科技和生活形态的跨越式发展。

5 结论

综上所述,无线能量传输技术,特别是 LWPT 技术,展现出为低空产业和航空航天等领域带来革命性进步的巨大潜力。在无人机、飞行汽车、太空发电和空间传能等新兴产业相关领域,人们对高效、灵活的能源传输技术需求愈发迫切。LWPT 技术凭借其高方向性、高能量密度和远距离传输能力,有望突破传统能源传输方式的局限,为新兴产业的发展注入强大动力。

尽管在发展过程中,LWPT 技术面临诸如光束瞄准与跟踪、能量转换效率和成本等挑战,但通过持续的技术创新和产业发展,这些问题将会逐步得到解决。随着技术的成熟和推广,LWPT 技术不仅有望在智慧城市建设和太空探索中发挥重要作用,还将推动能源结构的转型,为现代社会带来更多便利和高效。

在未来,无人机或许可以做到在城市上空自由飞行,持续进行物流配送;卫星在太空中也许会依靠能源的无缝互联,为全球通信和数据传输提供稳定保障。这一切都将因 LWPT 技术的成熟而成为可能。应抓住这一历史机遇,加快技

术研发和应用推广,推动交通、信息和能源的深度融合,构建智能化、自动化和高效化的交通系统,为国家的科技进步和经济发展贡献力量。

参考文献(References)

- [1] Chen Y, Mai R K, Zhang Y Y, et al. Improving misalignment tolerance for IPT system using a third-coil[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 3009–3013.
- [2] Zheng Y F, Zhang G D, Huan Z H, et al. Wireless laser power transmission: Recent progress and future challenges[J]. Space Solar Power and Wireless Transmission, 2024, 1(1): 17–26.
- [3] Hand C F. Novel 300-watt single-emitter laser diodes for laser initiation applications[C]//Proceedings of Optical Technologies for Arming, Safing, Fuzing, and Firing VI. SPIE, 2010, 7795: 779507.
- [4] Li H X, Reinhardt F, Chyr I, et al. High-efficiency, high-power diode laser chips, bars, and stacks[C]//Proceedings of High-Power Diode Laser Technology and Applications VI. SPIE, 2008, 6876: 68760G.
- [5] Bruesselbach H, Sumida D S. A 2.65-kW Yb: YAG single-rod laser[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 600–603.
- [6] Bo Y, Geng A C, Bi Y, et al. 1.15kW continuous-wave generation by diode-side-pumped two-rod Nd: YAG laser[J]. Chinese Physics, 2005, 14(4): 771–773.
- [7] McNaught S J, Asman C P, Injeyan H, et al. 100-kW coherently combined Nd:YAG MOPA laser array[C]//Proceedings of Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV/Fall 2009 OSA Optics & Photonics Technical Digest. Washington, D C: OSA, 2009.
- [8] Jeong Y, Sahu J, Payne D, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power[J]. Optics Express, 2004, 12(25): 6088–6092.
- [9] Fafard S, Masson D P. 74.7% efficient GaAs-based laser power converters at 808 nm at 150 K[J]. Photonics, 2022, 9(8): 579.
- [10] Guo X, Chen X M, Li Q Y, et al. High-efficiency wide-bandgap perovskite solar cells for laser energy transfer underwater[J]. Energy Technology, 2023, 11(7): 2300083.
- [11] Shen C X, Ling X F, Li Y S, et al. Practical efficiency limit of laser power converters based on lead halide perovskite[J]. Applied Physics Letters, 2023, 123(15): 153301.
- [12] Wang Y F, Zheng Z, Wang J Q, et al. Organic laser power converter for efficient wireless micro power transfer[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 5511.
- [13] Duncan K J. Laser based power transmission: Component selection and laser hazard analysis[C]//Proceedings of IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW). Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 100–103.
- [14] Mohsan S A H, Othman N Q H, Khan M A, et al. A comprehensive review of micro UAV charging techniques[J]. Micromachines, 2022, 13(6): 977.
- [15] Mohsan S A H, Qian H Z, Amjad H. A comprehensive review of optical wireless power transfer technology [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2023, 24(6): 767–800.
- [16] 时振磊, 孟文文, 申景诗, 等. 无人机激光无线能量传输 APT 系统跟踪设计[J]. 激光技术, 2019, 43(6):

- 809–814.
- [17] Kudryashov A, Samarkin V, Alexandrov A, et al. Adaptive optics for high-power laser beam control[M]// Springer Proceedings in Physics. Berlin: Springer, 2005: 237–248.
- [18] Yugami H, Kanamori Y, Arashi H, et al. Field experiment of laser energy transmission and laser to electric conversion[C]//Proceedings of IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 1997.
- [19] He T, Yang S H, Zhang H Y, et al. High-power high-efficiency laser power transmission at 100 m using optimized multi-cell GaAs converter[J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(10): 104203.
- [20] Jomen R, Tanaka F, Akiba T, et al. Conversion efficiencies of single-junction III–V solar cells based on InGaP, GaAs, InGaAsP, and InGaAs for laser wireless power transmission[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(8S3): 08RD12.
- [21] Researchers transmit energy with laser in historic power beaming demonstration[EB/OL]. [2024-07-22]. <https://www.nrl.navy.mil/Media/News/Article/2504007/researchers-transmit-energy-with-laser-in-historic-power-beaming-demonstration/>.
- [22] Ericsson and PowerLight demonstrate world's first wireless powered 5G base station[EB/OL]. [2024-07-22]. <https://www.ericsson.com/en/news/2021/10/ericsson-and-power-light-achieve-base-station-wireless-charging-breakthrough>.
- [23] Blackwell T. Recent demonstrations of laser power beaming at DFRC and MSFC[C]//Proceedings of AIP Conference Proceedings. AIP, 2005: 73–85.
- [24] Kawashima N, Takeda K, Yabe K. Application of the laser energy transmission technology to drive a small airplane[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(101): 109–110.
- [25] Lockheed martin performs first ever outdoor flight test of laser powered UAS[EB/OL]. [2024-07-22]. <https://news.lockheedmartin.com/2012-08-07-Lockheed-Martin-Performs-First-Ever-Outdoor-Flight-Test-Of-Laser-Powered-UAS>.
- [26] Steinsiek F. Wireless power transmission experiment as an early contribution to planetary exploration missions[C]//Proceedings of 54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law. Reston, Virginia: AIAA, 2003: AIAAiac-03-r. 3.06.
- [27] Motohiro T, Takeda Y, Ito H, et al. Concept of the solar-pumped laser-photovoltaics combined system and its application to laser beam power feeding to electric vehicles[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2017, 56(8S2): 08MA07.
- [28] Becker D E, Chiang R, Keys C C, et al. Photovoltaic-concentrator based power beaming for space elevator application[C]//Proceedings of AIP Conference Proceedings. AIP, 2010.
- [29] First in-space laser power beaming experiment[EB/OL]. [2024-07-22]. <https://www.navy.mil/Press-Office/News-Stories/Article/3457305/first-in-space-laser-power-beaming-experiment-surpasses-100-days-of-successful/>.
- [30] Silent falcon selected by DARPA for laser-powered UAS project[EB/OL]. [2024-07-22]. <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2018/08/silent-falcon-selected-by-darpa-for-laser-powered-uas-project/>.
- [31] Darpa airborne energy well seeks laser propulsion on aircrafts to power rechargeable unmanned aerial systems[EB/OL]. [2024-07-22]. <https://idstch.com/military/air/darpa-airborne-energy-well-seeks-laser-propulsion-on-aircrafts-to-power-rechargeable-unmanned-aerial-systems/>.
- [32] Kong M W, Sun B, Sarwar R, et al. Underwater wireless optical communication using a lens-free solar panel receiver[J]. Optics Communications, 2018, 426: 94–98.
- [33] Chen X, Lyu W C, Yu C Y, et al. Diversity-reception UWOC system using solar panel array and maximum ratio combining[J]. Optics Express, 2019, 27(23): 34284–34297.
- [34] de Oliveira Filho J I, Trichili A, Ooi B S, et al. Toward self-powered Internet of underwater things devices[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(1): 68–73.
- [35] MIT Technology Review. Power beaming comes of age[EB/OL]. [2024-07-22]. <https://www.technologyreview.com/2022/10/06/1060650/power-beaming-comes-of-age/>.
- [36] Kalyuzhnyy N A, Emelyanov V M, Evstropov V V, et al. Optimization of photoelectric parameters of InGaAs metamorphic laser ($\lambda=1064$ nm) power converters with over 50% efficiency[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 217: 110710.
- [37] Algora C, García I, Delgado M, et al. Beaming power: Photovoltaic laser power converters for power-by-light[J]. Joule, 2022, 6(2): 340–368.
- [38] Smith R C, Baker K S. Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm)[J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 177–184.

Wireless wonders: How laser power transmission could reshape the future of energy

LIU Jiewei¹, XUE Fulong^{2,3*}, WANG Zhifeng⁴

1. Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China

2. School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084, China

3. Jiaxing Nanhu District Road–Air Cooperative Three–dimensional Transportation Industry Research Institute, Jiaxing 314007, China

4. Beijing Jiu Tian Xing Ge Aerospace Technology Co., Ltd., Beijing 100102, China

Abstract This paper analyzes in detail the basic principles, development background and future applications of Laser Wireless Power Transmission (LWPT) technology, which overcomes the limitations of traditional power transmission methods by virtue of its high directionality, high energy density, and long–distance transmission capability, providing a revolutionary solution for emerging fields such as unmanned aerial vehicles, flying cars, and space power generation. Despite the current technical challenges of beam targeting, energy conversion efficiency, and atmospheric effects, continuous research and innovation are gradually breaking through these bottlenecks. This paper highlights the important application prospects of LWPT technology in low–altitude economy and commercial spaceflight, looks into the future possibilities of combining LWPT technology with laser communication, satellite remote sensing and positioning, and emphasizes the importance of multi–industry cooperation and technological innovation. By promoting the development of this technology, we are expected to usher in a revolution in the field of energy transmission and provide a solid guarantee for the development of modern society in multiple fields.

Keywords laser wireless power transmission (LWPT); energy transfer technology; energy revolution; new quality productivity ●



(责任编辑 赵庆圆)