

## 多国加快推进空间太阳能电站技术研发

# 把太阳能电站“搬上天”

段宝岩

大的“太空帆板”在高速运动中始终瞄准两个不同的目标,挑战很大。无论采用哪种方案,空间太阳能电站作为一个连接“太空—太空”“太空—地面”的超大型能源供给系统,都需要突破多项关键技术。比如,远距离高功率高效率微波无线传能、在轨超大型结构组装、极端环境控制、长期可靠性运行等。这些技术环环相扣,需系统性突破。

### 太空能源研发按下“快进键”

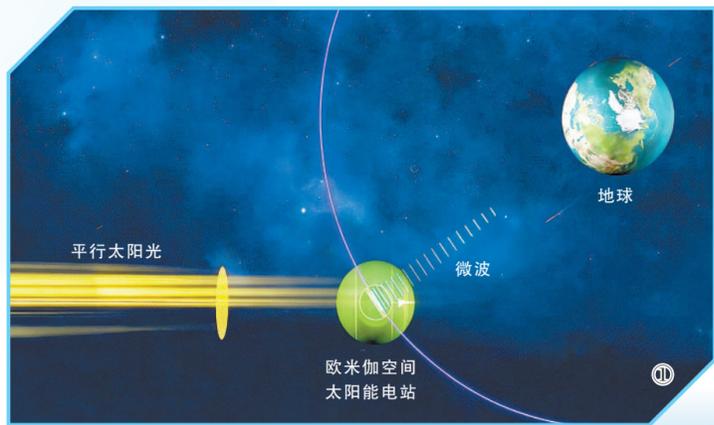
近年来,空间太阳能电站从理论探索迈向工程验证的关键阶段,多国加快推进关键技术攻关与原型试验,一系列突破性进展让这项技术的落地前景越来越清晰。英国将建设空间太阳能电站纳入国家综合能源战略与太空发展战略,给予重点资金和政策支持。欧洲航天局将空间太阳能电站定位为“具备长期可行性的清洁基荷电源选项”,持续投入研发力量,稳步推进相关技术验证。

美国国家航空航天局、国防部等机构不

或地面移动设备同时供电;在高精度指向控制上,进一步提升微波波束的指向精度,减少了能量损耗;在发射与接收天线集成化、小型化与轻量化上取得关键进展,为设备的太空部署奠定了基础。此外,中国航天科技集团五院、重庆大学、四川大学、上海大学、中国科学院电工所、哈尔滨工业大学、上海交通大学等单位也积极参与相关关键技术攻关,形成多学科协同创新格局。

### 未来将有丰富的应用场景

未来,空间太阳能电站一旦建成运行,将深刻重塑人类社会能源格局,应用场景远超想象。在地面供电领域,传统电网受地形地貌和经济成本制约,在偏远山区、沙漠、海洋等地区架设输电线路投资大、难度高。空间太阳能电站立足天基,视域可完整覆盖地球所有区域和地形。通过微波无线能量传输,这些地区可获得持续稳定的电力供应,有助于推动全球能源普惠。在应急救援领域,地震、台风、洪水等



图①:空间太阳能电站在轨运行示意图。

图②:“逐日工程”——欧米伽空间太阳能电站地面验证系统。

图①图②均为西安电子科技大学提供

断推进关键部件与技术的空间验证。2023年,加州理工学院发射了一套在轨小型微波传能收发天线,采用分布式槽型聚光设计,两个天线间距仅一英尺,成功向地面传输了微波束,标志着在小型化传能设备上取得重要突破,为后续大型设备研发积累了经验。

日本在场景试验中做出探索。2024年12月,日本宇宙航空研究开发机构联合产业界,在长野县开展商用飞机向地面微波输电试验。一架飞机在7000米高空以700公里/小时巡航,向地面13个接收点传输270瓦微波功率,验证了高速移动平台对地精准微波功率传输技术方面的可行性。

中国在该领域起步虽晚,但进展迅速。2022年6月,西安电子科技大学牵头建成“逐日工程”——这座75米高的测试塔,是世界首个全链路全系统的空间太阳能电站地面验证系统。近期,“逐日工程”取得一系列新突破:在“一对多”移动目标传能技术上,实现一套发射系统同时为多个移动目标供电,解决了多目标供电的精准控制问题,未来有望为多个太空飞行器



## 科技前沿

“把发电站建在太空,让清洁能源照亮地球!”——这一曾经只出现在科幻作品里的大胆构想,如今正加速走向现实。随着全球能源转型深入推进,航天发射成本持续下降,空间太阳能电站这一“未来能源”构想,已成为世界主要科技强国竞相布局的新高地。中国正稳步推进空间太阳能电站“逐日工程”,计划于2030年前后开展兆瓦级在轨试验。美国企业家埃隆·马斯克近期表示,计划每年向太空部署1亿千瓦太阳能人工智能卫星能源网络。这项技术之所以吸引全球目光,在于它拥有传统能源难以企及的优势,被视为解决人类能源困境的终极方案之一。

### 太空发电的优势与难点

空间太阳能电站的构想,最早由美国科学家彼得·格拉赛于1968年提出。它的工作原理与通信卫星类似:太阳能板在地球轨道上运行,通过自身旋转始终正对太阳,以最佳角度接收阳光;随后,收集到的能量以微波形式传输到地面的接收站,再转换成电能,并接入现有的电网基础设施。与地面太阳能发电相比,太空的发电条件堪称完美:无云层遮挡、无昼夜交替、无大气衰减。在地球静止轨道或地球同步轨道上,单位太阳能电池板可接收的太阳辐射量为地面的8至10倍,且能实现24小时连续发电,具备成为稳定“基荷电源”(连续稳定运行的基础电源)的潜力。同时,空间太阳能电站的扩展能力极强,通过扩大规模能满足全球能源增长需求。如果在地球静止轨道铺设一周二公里宽的太阳能电池带,一年接收的能量相当于地球可开采石油的总量。

空间太阳能电站还能带来多重附加价值:一是给卫星减负,使其摆脱庞大笨重的太阳翼(帆),换上小巧的接收天线,从“太空充电桩”获取电力,显著提升灵活性和续航能力;二是实现能量和信息双传输,让通信、导航卫星的天线同时具备接收电能的功能;三是优化太空信息处理,在太空直接完成数据处理,避免当前“太空压缩、天地传输、地面解压”模式带来的丢包、失真等问题;四是月球基地、火星前哨站等深空探测设施提供远程无线供电。

然而,要在太空建造超级电站,并不是一件容易的事。国际上已提出多种空间太阳能电站设计方案,根据太阳光能收集形式的不同,主要分为聚光型与非聚光型两大类。

聚光型空间太阳能电站的核心思路是通过特殊的聚光系统,一方面将太阳光集中汇聚到太阳能电池表面,提高光电转换效率;另一方面将发射天线发出的微波束精准对准太空飞行器或地面接收站的天线。代表方案包括美国的“阿尔法”、中国的“欧米伽”等,其优势在于结构紧凑、重量较轻,但对热管理与指向精度要求高。

非聚光型空间太阳能电站则直接铺设大面积柔性光伏阵列,配合独立的微波发射天线。比如日本提出的“绳系结构”方案,中国的“多旋臂关节”构型。这类设计更加简洁,但需解决超大柔性结构在轨展开、双轴高精度指向等难题,就像让一块巨

## 科技大观

# 给分子拍部“高清电影”

席正

不久前,英国牛津大学牵头的一个研究团队宣布,他们将常规冷冻电子显微镜(冷冻电镜)的分辨率提高了3倍,成功解析了鸡蛋清中一种名为溶菌酶的小蛋白质的精细结构;中国科学院大学团队也取得一项重大突破,通过利用创新的冷冻电镜技术,破解了神经信息传递中突触囊泡释放与快速回收的生物物理过程,解决了半个世纪以来学界对突触传递机制的争议……近年来,生物学领域许多重要发现的背后都有冷冻电镜的身影。如今,这项技术正从“拍摄静态照片”迈向“拍摄动态电影”,成为科学家观察生命微观活动最有力的工具之一。

细胞的微观世界有着复杂的运行规律。长期以来,人们很难看清其真实面貌。显微镜技术的发展进步,助力微观世界探索不断向纵深处发展。普通光学显微镜受可见光波长限制,分辨率只能达到约0.2微米,远不足以分辨蛋白质等纳米尺度

的分子结构;传统电子显微镜虽然分辨率更高,却需要在真空环境中操作,样本必须脱水、染色并固定,导致生物分子失去天然构象,甚至被电子束灼烧破坏。1974年冷冻电镜技术的问世,带来了一场新的革命。

冷冻电镜技术的思路非常巧妙:将含生物分子的溶液制成薄薄的水膜,在毫秒之内投入零下180摄氏度左右的液态乙烷中,使其瞬间形成“玻璃态冰”——既不膨胀结晶也不蒸发,将分子“冻结”为瞬间姿态。这种“速冻”方式就像按下暂停键,把生命分子的活动定格在某一帧。

接下来是“拍照”,用高能电子束照射样本。由于电子的波长只有可见光的几千分之一,其成像精度可达原子级别。配合高灵敏度的直接电子探测器(类似于数码相机中的图像传感器CCD),可以精准捕捉穿过样本的电子信号,生成大量清晰的二维投影图像。最后一步是“拼图”,即通过计算机将

这些二维图像整合起来,重构出高精度的三维结构模型。这项技术的优势在于“原汁原味”——无需染色或强迫分子结晶,即便是脆弱的大分子也能自然“上镜”,并且可以拍摄到难以定型的柔性分子、细胞内部的精细构造以及病毒入侵等过程。

不过,传统冷冻电镜本质上仍是“静态摄影”,它捕捉的是分子在某一瞬间的构象。要真正理解生命,不仅要知道“它长什么样”,更要明白“它是怎么动的”。近年来,科学家又开发出时间分辨冷冻电镜,在生物反应启动后的特定时间点快速冷冻样本,再通过一系列“时间切片”,复现分子变化的全过程。

此次中国科学技术大学自主研发的毫秒级时间分辨冷冻电镜技术正是基于这一理念,在冷冻同步精度、原位高分辨三维重构等方面实现了提升。团队将光遗传学刺激反应与毫秒级投入冷冻方法相结合,不用将神经突触从细胞中分离,

## 创新汇

在深邃的海底世界,章鱼是当之无愧的“伪装大师”。当它游过珊瑚礁时,皮肤几乎在瞬间就能从米色变得灰褐,质感也从光滑变得粗糙,与周围岩石的纹理和色彩“完美融合”。人工材料能否像章鱼一样,拥有魔术般的“伪装”能力?近日,《自然》杂志发表了美国斯坦福大学研究团队的一项新成果,受章鱼、乌贼等头足类动物启发,团队开发出一种新型聚合物材料,首次实现在单一器件上对表面视觉纹理和结构色彩的独立、动态调控。这项技术有望为动态伪装、自适应显示、智能建筑以及互动艺术等领域,提供全新的解决方案。

“头足类动物能够通过调控皮肤的乳突(皮肤上可伸缩的微小突起)和色素细胞改变自身纹理和颜色,这是它们实现惊人伪装能力的关键。”该论文的共同通讯作者、斯坦福大学博士生西达尔特·多希在接受本报记者采访时表示,研究团队一直希望能在工程材料上复现这一精妙的自然机制。一次偶然的发现让他们找到了突破口。“我们发现,一块曾在扫描电子显微镜下观察过的PEDOT:PSS(一种导电聚合物)样品,其被电子束照射的区域,溶胀行为(指材料接触溶剂时因溶剂分子渗透而发生的膨胀现象)与未照射区域截然不同。受到电子束照射的区域,其结构变得紧致,遇水后的膨胀能力被大大抑制;而未照射的区域则能自由吸水大幅隆起。”多希说。

这一发现激发了研究团队的探索热情。在对材料的物理控制上,他们利用高精度的电子束光刻工具,在聚合物薄膜上“微雕”出各种图案。当薄膜被浸入不同液体中时,会发生可逆的局部膨胀或收缩,从而隐藏或显示预设的纹理图案。在颜色控制上,则采用了一种精巧的光学结构,将薄膜夹在两个极薄的金属层之间,使之构成一个“法布里—珀罗谐振腔”(一种光学谐振装置)。这一结构如同给材料装上了精密的“调音器”,可精确控制薄膜不同区域的溶胀程度,改变器件对特定颜色光的反射率,从而呈现不同的结构色。

更关键的创新在于对纹理与颜色的独立调控。“我们将‘纹理层’和‘色彩层’分别制备在超薄玻璃板的两侧,通过向基板两侧独立导入不同溶剂,便能对纹理和颜色进行实时、独立的调控。”多希介绍,这种设计就像为物体表面装上了两套可以独立开关的系统,一套控制“浮雕”,一套控制“灯光”。

这种仿生材料的适用性究竟如何?实验表明,其响应速度令人惊喜——完整的纹理和颜色切换可在短短20秒内完成,并能承受超过250次循环使用而性能不减。这种适应性和耐久性可以促其运用于多种场景。比如,在动态伪装方面,这种材料不仅能精准匹配背景颜色,还能生动复刻背景的纹理质感,从而达到更深层次的视觉融合。在显示与交互领域,它可用来创造能改变物体表面质感的“实体像素”,或开发新型防伪标签,只需滴加特定液体,标签背后隐藏的信息便会悄然浮现。“我们本质上是在调控光的颜色、反射和散射等基本属性。”多希表示,该技术还可用于控制建筑物表皮对阳光的吸收与反射,实现智能节能,也可创作出能随环境或情绪变化的动态面料或艺术品。

不过,从实验室走向现实,这项技术仍面临不少挑战。目前其驱动方式依赖液体浸泡,在一定程度上限制了便携性与环境适应性。“我们已发现电化学手段也能驱动类似薄膜发生溶胀。”多希表示,“未来若能实现全电子化控制,将极大拓展应用场景。”此外,目前制备工艺所需的电子束光刻技术成本高昂。研究团队正在探索更经济的制备方法,如紫外光刻或大面积热加工技术,以期推动规模化应用。

北京大学工学院教授喻俊志表示,这项技术的核心创新在于:一是通过电子束预先“编程”材料内部的溶胀差异,让图案在溶剂环境变化中可控显示与隐藏;二是采用双层结构设计,实现了“形变”与“变色”的独立调控。喻俊志认为,“这种受头足类动物启发的表面动态调控新方法,不仅为智能材料设计提供了新思路,还为仿生机器人的外观自适应与伪装技术开辟了新途径。”

### 改善空气质量或有助于预防阿尔茨海默病

据新华社北京电(记者李雯)美国《科学公共图书馆·医学》杂志日前刊载的一项研究显示,长期暴露在较严重的空气污染中与阿尔茨海默病风险增加相关,改善空气质量或有助于预防阿尔茨海默病。

美国埃默里大学的研究人员分析了2000年至2018年超过2780万名65岁以上美国患者的数据,包括空气污染暴露情况、是否患有阿尔茨海默病以及其他慢性病等。

结果发现,长期暴露在较严重的空气污染中与阿尔茨海默病风险增加相关,且这种关联在曾患过中风的个体中略强。相比之下,高血压和抑郁症对这种关联的影响较小。

研究人员说,这表明空气污染主要通过直接影响大脑导致阿尔茨海默病,而非通过高血压、中风或抑郁症等常见慢性病来实现,曾患中风的人,其大脑可能更容易受到空气污染的损害。研究还表明,改善空气质量或许可以作为老年人群预防阿尔茨海默病策略的一环。

### 海洋碳研究不足或影响气候政策

据新华社巴黎电(记者罗毓)联合国教科文组织政府间海洋学委员会日前发布报告指出,人们对海洋如何吸收和储存碳的认识存在严重不足,可能导致当前气候预测出现偏差,影响未来几十年制定有效减缓和适应气候变化的策略的能力。

这项题为《海洋碳综合研究》的报告认为,科学模型对海洋吸碳量的估算可能与实际存在差异,全球范围的差异在10%至20%之间,在某些地区差异甚至更大。这些差异源于长期数据有限,以及对关键过程如何响应气候变化的理解存在缺口。

报告说,这表明人们正在不了解海洋未来变化的情况下制定气候政策。如果未来海洋吸碳能力减弱,更多二氧化碳将滞留在大气中,从而加速全球变暖。这将直接影响未来的排放目标和各国气候计划。

本版责编:王慧 黄发红 孔歌  
版式设计:蔡华伟

# 像章鱼一样「伪装」的仿生材料

本报记者 李墨