

# 柔性叠层光伏：空天光伏技术的重要方向

□ 张晓宏

当前，空天领域已成为大国博弈的核心赛场。空天能源作为支撑商业航天、太空算力、深空探测等领域的“心脏”，直接决定着各国空天事业的发展水平与竞争实力。从低轨卫星星座的批量部署，到空间太阳能电站的在轨建设，再到载人航天工程的持续突破，都对高效、可靠、轻量化的能源供给提出迫切需求。传统的空间光伏技术难以满足新时代空天任务发展需求，柔性钙钛矿/晶硅叠层光伏凭借高效率、低成本、高功率重量比等优势，成为破解空天能源瓶颈、引领新一代空天光伏发展的重要方向，将为我国抢占空天科技制高点、保障航天安全提供关键支撑。

## 空天光伏迭代亟须开辟全新技术路径

面向空天事业，为什么要寻找新的光伏材料？晶硅太阳能电池是目前地面光伏电站的主流技术，技术成熟、产业链完整，但其光电转换效率约为25%，实验室最高效率已逼近29.4%的理论极限，进一步提升的潜力有限。航天领域主流使用的砷化镓多结电池光电转换效率超30%、抗辐射性能优异，但成本高昂，每瓦数百元，是地面晶硅电池的数百倍，这严重限制了商业航天规模化应用。

钙钛矿/晶硅叠层光伏技术则提供了新的可能性，既可以实现光谱的高效利用，又能够大幅节约制备成本。该技术由两种材料上下叠加。其中，钙钛矿吸收太阳能中高能量的短波光（如蓝光、紫外光），晶硅吸收太阳能中低能量的长波光（如红光、红外光），由此实现光谱的高效利用，据测算理论光电转换效率超43%。同时，对这一叠层材料进行柔性化处理，更是一次重大的技术突破。基于超薄硅片的柔性叠层电池厚度仅约60微米，为传统硅片的1/3—1/2，具备轻量化、可弯曲特点，功率重量比达1.77瓦/克，十分契合航天器减重

降本需求，可显著节约发射成本。

柔性叠层光伏理论优势显著，但在低轨太空环境中需经受零下150℃至零上180℃的极端温差考验，不同材料层之间因热胀冷缩和弯折产生严重的机械应力集中，进而引发界面分层、效率衰减乃至器件失效，稳定性与耐用性问题长期制约着产业化进程。

针对这一难题，有关科研团队联合攻关，创新提出两项关键界面调控技术方案。一是构建“一松一紧”双层氧化锡缓冲结构：疏松多孔层如减震弹簧，高效吸收、分散弯曲和形变产生的破坏性应力；致密层如高速通道，保障电荷快速提取、稳定传输。这一“刚柔并济”的结构设计，在纳米尺度平衡了应力缓冲与电荷传输需求，为电池披上了“耐用铠甲”。二是开发反应等离子体沉积氧化铟锡薄膜。该薄膜牢固黏合各功能层，既能精准调控界面能级、降低能量损耗，又能提升导电性、透光性和机械性能，并抑制卤素离子迁移，显著提高器件效率、稳定性和柔韧性。依托以上两项创新研制的柔性钙钛矿/晶硅叠层太阳能电池光电转换效率再创世界纪录：小面积器件效率达33.6%，全尺寸硅片器件效率达29.8%。器件经43000次弯折后仍保留97%的初始效率，展现出优异的机械耐久性与空间环境适应性。

## 柔性叠层光伏的应用方向和战略价值

随着全球商业航天竞赛持续升温，空天能源需求迎来多维爆发。低轨卫星互联网加速部署，我国已进入星座组网关键阶段，国家战略级项目规划部署海量卫星；在轨AI算力快速升级，卫星向太空算力方向发展，单星能源需求将提升10倍以上；空间太阳能电站稳步推进，我国计划2030年前完成百万瓦级实验验证，2050年前后实现商用。在以上应用方向驱动下，空天能源已成为先导性技术，预计2030年我国

低轨卫星光伏市场规模将超过30亿美元，在轨AI算力与空间太阳能电站的远期需求将催生千亿级市场。这对高效、轻量化、长寿命的光伏技术提出更高要求。

在此背景下，柔性钙钛矿/晶硅叠层光伏的优势尤为突出。一是轻量化带来的发射成本变革，其功率重量比达1.77瓦/克，在同等发电功率下可大幅减轻器件重量，从而有效降低单星发射成本。二是高效率带来的发电能力跃升，极地轨道太空光伏全年不间断发电、不受昼夜和天气影响，年发电量可达到地面的8倍。柔性钙钛矿/晶硅叠层电池实验室光电转换效率已达33.6%，显著优于传统晶硅电池。发电时长与发电效率的双重提升形成叠加效应，进一步强化了整体发电性能。三是低成本带来的商业航天可行性，未来成本有望降至10元/瓦以下，远低于现行航天器使用的砷化镓多结电池，具备可观的商业化应用潜力。

柔性钙钛矿/晶硅叠层光伏技术的价值和战略意义主要体现在三个维度。

一是抢占未来能源技术国际制高点。光伏作为我国“新三样”核心产业，已具备全球领先优势，向太空光伏延伸是必然趋势。当前，美国、日本均已布局空间太阳能发展计划。率先突破低成本、高可靠太空光伏技术，将直接决定我国在商业航天与空间能源竞争中的主动权。

二是助力“双碳”目标与新型能源体系建设。空间太阳能电站被视作破解全球能源问题、保障国家能源安全的重要战略路径。要实现2030年前完成百万瓦级空间太阳能发电实验验证、2050年实现商业化运行的目标，柔性钙钛矿/晶硅叠层光伏是不可或缺的关键核心技术支撑，也是抢占空间能源科技制高点的重要突破口。

三是推动新能源技术从高端应用走向普惠民用。该技术不仅可用于航天领域，还能向无人机、新能

源汽车、可穿戴设备、车载光伏、光伏建筑一体化等场景拓展，实现尖端科技向大众市场的价值溢出，展现出强大产业生命力。

## 柔性叠层光伏的发展瓶颈与未来展望

尽管柔性钙钛矿/晶硅叠层光伏运用前景广阔，但全球太空光伏技术整体仍处于探索验证初期，远未到确立主流技术路线的阶段。从技术维度看，柔性钙钛矿/晶硅叠层光伏仍需在极端环境耐受性、长期应用稳定性、大面积制备与效率成本平衡四个方向上实现突破。从产业维度看，太空光伏的商业化路径、成本结构、在轨运维体系等均存在不确定性，在太空真实环境中的长期可靠性仍需在轨验证。从政策与协同维度看，航天光伏技术研发涉及材料、器件、封装、空间环境适应性等多个交叉领域，需企业与航天科研机构加强合作，扎实推进技术研发与产业链搭建，避免“资本过热、技术滞后”的失衡局面。

面向未来，从支撑商业航天与太空算力，到助力空间太阳能电站建设，再到反哺地面新能源应用，柔性钙钛矿/晶硅叠层光伏承载着“从效率领跑迈向场景领跑”的宏大愿景。这一进程需历经从实验室研发到在轨验证、从单星示范到大规模部署阶段，每一步推进都能为太空能源体系积累核心技术数据和产业化经验。可以预见，随着更多在轨验证任务落地和产业链持续成熟，柔性钙钛矿/晶硅叠层光伏将逐步从“技术可能性”转化为“工程现实性”，为我国抢占空天科技制高点筑牢坚实可靠的能源底座。

（作者系苏州大学党委书记）



当前，新一代数智技术加速迭代，推动人类社会迈入数字时代。我国数字化发展成效显著，数字政府、数字经济、技术创新能力持续增强，为数字社会高质量建设奠定了坚实基础。习近平总书记强调，我们要乘势而上，加快数字经济、数字社会、数字政府建设，推动各领域数字化优化升级。数字社会是以大数据、人工智能等新一代数智技术为驱动，物理世界与数字虚拟世界高度融合的新型社会形态。面向未来，推进数字社会高质量建设，是落实国家战略、顺应时代趋势、增进人民福祉的重要举措。

## 数字社会高质量建设具有重要意义

数字社会高质量建设事关国家战略落地、生产力升级与民生改善，具有很强的现实性和时代性。

有助于推动数字中国战略加快落地。数字社会是数字中国的重要组成部分，与数字经济、数字政府共同构成数字中国战略的宏伟图景。数字政府推动数智技术与政府治理深度融合，构建适配数字化发展的制度体系，提升治理现代化水平，为数字经济与数字社会发展提供制度保障与治理环境。数字经济构建数智化新业态、新产业，运用数智技术升级传统产业，提高经济资源配置效率，为数字政府和数字社会发展提供技术和产业支撑。数字社会运用数智技术变革社会组织形态、再造社会治理和服务流程，为人创造更加便利、舒适的数智化生活环境。三者既有区别，又紧密融合，在发展中相互协同、互为支撑。

有助于推动新质生产力发展。数智技术是当前科技创新、产业转型升级的主阵地。数字社会高质量建设对数智技术创新提出迫切需求、提供海量场景、供给关键要素。在需求牵引方面，数智技术的广泛渗透催生大量新型消费和服务需求，从需求侧牵引新质生产力发展。线上线下一体化、个性化定制、体验式消费、首发经济等新型消费，为新技术、新产品提供广阔市场空间。在场景创造方面，智慧城市、智慧民生、数字生活、数字公共服务等蓬勃发展，形成海量数智技术创新应用的具体场景，为新技术、新产品提供最广阔落地空间和最宏大的价值转化空间。在要素供给方面，数字社会深入发展，社会生产生活的各个领域全面数字化转型，产生巨量数据资源，成为大数据、人工智能等新技术发展的坚实基础。

有助于促进数字红利全民共享。习近平总书记强调，网信事业要发展，必须贯彻以人民为中心的发展思想。“十四五”规划纲要提出，充分发挥数智技术和数据要素对丰富人民生活、改善民生福祉的作用，拓展教育、医疗、养老、文旅、就业、消费等领域融合应用。数字社会建设的根本目的就是将数字红利转化为民生福祉，通过运用数智技术提高资源分配的公平性、民生服务的便捷性，让数字化发展成果更加公平地惠及全体人民。例如，智慧医疗、智慧教育、智慧交通、智慧应急等应用，让群众在共享数字发展成果中拥有更多获得感、幸福感、安全感。

## 数字社会高质量建设的两个重要支点

数字社会的高质量建设，既离不开底层技术的硬核支撑，也离不开价值理念的重要引领，二者共同为数字化转型注入持久动力。

数智技术的革命性突破是社会数字化转型的源动力。纵观人类社会历次革命性转型，技术集群的突破都发挥了源动力的作用。新技术应用于社会运转的各个环节，渐进式地改变人们的生产生活方式，随着新技术渗透越来越广泛，将引发社会组织结构的系统性重构，推动形成新的社会范式。蒸汽机、发电机、工业机械、汽车、火车的发明和广泛应用，推动人类从农业社会进入工业社会。当下，互联网、大数据、人工智能等数智技术的广泛渗透，加速推动人类迈向数字社会。数智技术不仅改变了信息传递和资源配置方式，更催生了平台化、协同化、智能化的社会运行新形态，推动了家庭、企业、社区、城乡以及更大范围的社会组织结构重塑。

数字文化是社会数字化转型的加速器。文化是社会变革的催化剂，对产业升级和社会变革具有深层次引领作用。新的生产生活方式催生新的社会文化，新的社会文化让人们从思想上接受、认同新的社会运转方式和社会组织结构。广义的思想认同，转化为推动社会变革的深层动能。工业革命时期，工业文化的兴起让工匠精神、工业发明创造受到广泛尊重，加快了工业社会的构建。在数字时代，数字文化的广泛传播，培育

# 推进数字社会高质量建设

□ 王天广

了共享、协同、开放、创新的价值共识，促进全民数字素养的提升，成为驱动数字社会高质量发展的澎湃内生动力。

## 数字社会高质量建设的主要路径

数字社会高质量建设并非单一领域的局部升级，而是覆盖技术、文化、治理、服务、生态的系统性变革工程，需要以系统思维科学布局、精准发力。

充分发挥技术、文化对数字社会高质量建设的驱动作用。一是强化数智技术对数字社会建设的驱动作用。加快布局高质量数据资源、人工智能应用、数字基础设施、安全可信防护等数字社会建设的关键支撑体系，推动以人工智能为代表的新一代数智技术深度融入社会治理、民生服务与产业协同各环节，强化数字社会发展的可持续动能。二是强化数字文化对数字社会建设的加速器作用。加强数字文化资源供给，扩大数字文化传播推广，加快数字文化业态培育，着力构建覆盖全民、普惠共享的数字文化服务体系，推动中华优秀传统文化与数智技术深度融合，激发数字社会发展的新活力。

科学布局社会数字化转型演进路径。社会形态革命性转型，核心是社会运转流程再造和社会组织结构重构，数智技术应用先改变原有流程，进而催化结构变革。一是以场景为牵引推进数字社会运转方式革新。要加大数智技术在社会治理、公共服务和居民生活场景中的应用，重塑社会服务和治理流程，打造智慧便捷的数字生活新体验。二是突出以数智孪生为特征的新的数字社会结构形态。从个人到家庭、社区、城乡等不同维度推动物理空间与数字空间深度耦合，打造融贯虚实个人数字账户、智慧家庭、数智孪生社区和数字城乡，实现社会组织结构的数智化变革。

营造数字社会高质量建设良好环境。着力构建数字社会协同管理新规则、壮大数智技术应用服务新业态和打造素质过硬的数字人才队伍。通过健全网络空间、人工智能等领域的治理规则，完善多方协同的治理机制，为数字社会发展提供制度保障。通过鼓励、培育数智技术应用服务业态，为数字社会建设注入市场化、专业化动能。通过分层分类开展数字人才的培、引、用、留，为数字社会高质量建设提供人才保障。

推进数字社会高质量建设，是数字中国战略落地的重要实践，是发展新质生产力、增进民生福祉的重要举措。坚持以人民为中心，强化技术创新与文化引领，完善制度保障与人才支撑，必将推动数字社会持续健康发展，让数字红利更好惠及全体人民。



（上接1版）各级领导干部要树牢“当兵打仗、带兵打仗、练兵打仗”思想，紧盯科技之变、战争之变、对手之变，大兴研究军事、研究战争、研究打仗之风，把现代战争制胜机理搞清楚、把强敌对手情况搞透彻、把训法战法打法搞熟练，在艰苦严格的训练中、在近似实战的环境中摔打磨砺部队，把每名官兵都锻造成为能打胜仗的“刀尖子”。对那些“仗打不起来、轮不上我”的和平积弊，要从思想深处挖根起底；对那些看似热闹、实则对战斗力贡献不大的花架子、假把式，必须见就批、露头就打，彻底挤干战斗力建设中的水分，确保训练练真功、打仗打胜仗。

强军事业越是阔步向前，部队建设越要扎实过硬，为强军兴军提供坚强支撑。在其位谋其政，任其职尽其责。各级领导干部要把责任扛稳、把部队建好，关键是要树立和践行正确政绩观。部队建设是打基础、管长远的系统工程，不是一蹴而就的闪电战，而是久久为功的持久战。领导干部要处理好显绩与潜绩、当前与长远的辩证关系，把显绩做实，经得起检验，把潜绩做深，坐得了“冷板凳”。既要有“一年抓几件事”的决心拼劲，也要有“几年抓一件事”的定力韧劲，以“功成不必在我、功成必定有我”的胸怀境界，一张蓝图绘到底，一茬接着一茬干，卡住打赢标尺把部队建得全面过硬，创造出经得起实践检验、官兵检验、战争检验的实绩。

站在“十五五”开局起步、攻坚建军百年冲刺加力的关键当口，要奋力抓好“十五五”规划纲要的贯彻落实，全力以赴打好

这场事关全局、不容有失的攻坚战，确保如期实现建军一百年奋斗目标。将成功之时，其困难最甚。强军兴军的事业不会一帆风顺，像长征路上“娄山关”“腊子口”那样的深层次矛盾问题绕不开、躲不掉。领导干部要带头坚决反对“等靠要”思想，反对“躺平”心态，反对遇到困难绕道走、碰到矛盾交上去的消极行为。大战大考炼真金，越是艰险越向前。各级领导干部要以率上率下，强化担当之志、提升担当之能、尽好担当之责，到最困难的地方去，到矛盾最集中的地方去，到任务最艰巨的地方去，拿出“逢山开路、遇水架桥”的闯劲，敢于啃硬骨头，敢于涉险滩，敢于直面困难挑战，带头作表率、打头阵，叫响“看我的、跟我来”，以滚石上山、爬坡过坎、逆水行舟的恒心定力和决心意志，全力以赴、务期必成，向党和人民交出一份满意答卷。

## 在整训锻造中立起纪律严、作风正的好样子

纪律严明、作风优良是我军军的鲜明特色和独特优势。一路走来，党领导人民军队用鲜血和生命铸就了一整套光荣传统和优良作风，成为我军代代相传的宝贵精神财富和重要制胜法宝。要大力传承和弘扬我军优良传统，永葆人民军队的性质、宗旨、本色，不断巩固纯洁光荣的本色作风，始终保持威武之师、文明之师的良好形象。持续深化政治整训，必须弘扬优良传统，

永葆本色作风，发扬彻底的自我革命精神，纵深推进正风反腐，整治“两面人”、小圈子，整治钻营谋利、特权思想，清漳祛疾、正心明道，立起纪律严、作风正的好样子，让作风建设不断向好、新风正气不断昂扬，为如期实现建军一百年奋斗目标提供坚强作风保证。

光荣传统不能丢，丢了就丢了魂；红色基因不能变，变了就变了质。回望来路，无论是烽火岁月还是和平年代，我党我军的优良传统始终都是激励广大官兵披荆斩棘、勇往直前的精神富矿。当前，世情、国情、党情、军情都在发生复杂深刻变化，多元思想文化冲击加剧，历史虚无主义沉渣泛起，意识形态领域的硝烟从未消散，斗争更加尖锐复杂，固根与拔根的较量、铸魂与蛀魂的拉锯、扛旗与改旗的掰腕，一刻也没有停歇。根子上的东西要坚决守住，传统上的优势更不能丢。中医常讲“正气存内，邪不可干”，我党我军的优良传统就是破除一切歪风邪气的浩然正气。要把传承弘扬优良传统作为深化政治整训的重要内容，学好党史军史，讲好战史战例战将，用正史正理管住野史歪理，运用官兵喜闻乐见的形式载体深度诠释传统，在继承中发展，在守正中创新，让优良传统融入血脉、注入灵魂，确保红色基因代代相传、红色江山永不变色。

我军历来高度重视纪律建设，始终把严明纪律作为建军之基、治军之本。井冈山时期，毛泽东就颁布了“三大纪律六项注意”，在后来的土地革命实践中逐步演变为“三大纪律八项注意”。纪律严明是我军所向披靡、人民

信赖、不断从胜利走向胜利的铁的保证。军队越是现代化，越是信息化，越要法治化。要深入推进依法治国、从严治军，厉行法治、严肃军纪，把从严要求不折不扣落实到军队建设各方面全过程。深刻领悟“一切谋私贪腐的思想和行为都同党的性质宗旨格格不入”这一重要论断，持之以恒正风肃纪反腐，保持零容忍的高压态势，一体推进不敢腐、不能腐、不想腐，坚决铲除腐败滋生的土壤和条件。各级领导干部“要懂法纪、明规矩、知敬畏，做到法规制度面前人人平等，遵守法规制度没有特殊，执行法规制度没有例外”，让铁规生威、铁纪发力，以严明的法治和纪律凝聚铁的意志、锤炼铁的作风、锻造铁的隊伍。

人民性是马克思主义的本质属性和最鲜明品格。我军自诞生以来，就始终把人民放在心中最高位置。时代在变、环境在变，全心全意为人民服务的宗旨永远不会变。要牢记为人民扛枪、为人民打仗的神圣职责，不断巩固军政军民团结，永远做人民心中最可爱、最可靠的钢铁长城。密切联系群众，对于军队领导干部来说，还应坚持基层至上、士兵第一。军队的基础在基层，力量的源泉在官兵。领导干部要始终同官兵坐在一条板凳上想问题，拉近距离走近官兵、满腔热情服务官兵、积极主动问计官兵，充分尊重官兵主体地位和首创精神，真正赢得官兵的信任拥护，凝聚起上下同欲、攻坚克难的强大合力。

（作者系空军石家庄飞行学院少将政治委员）