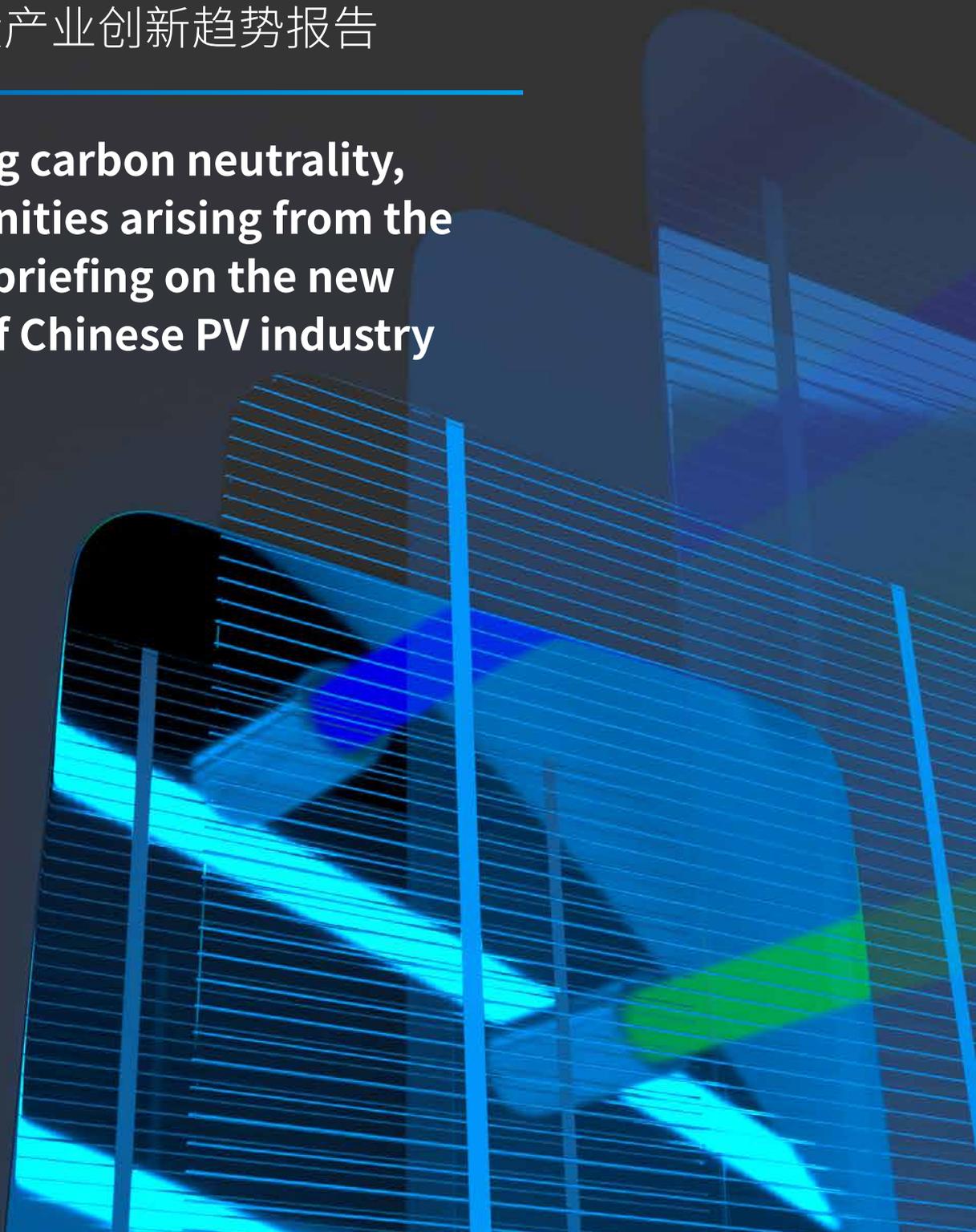
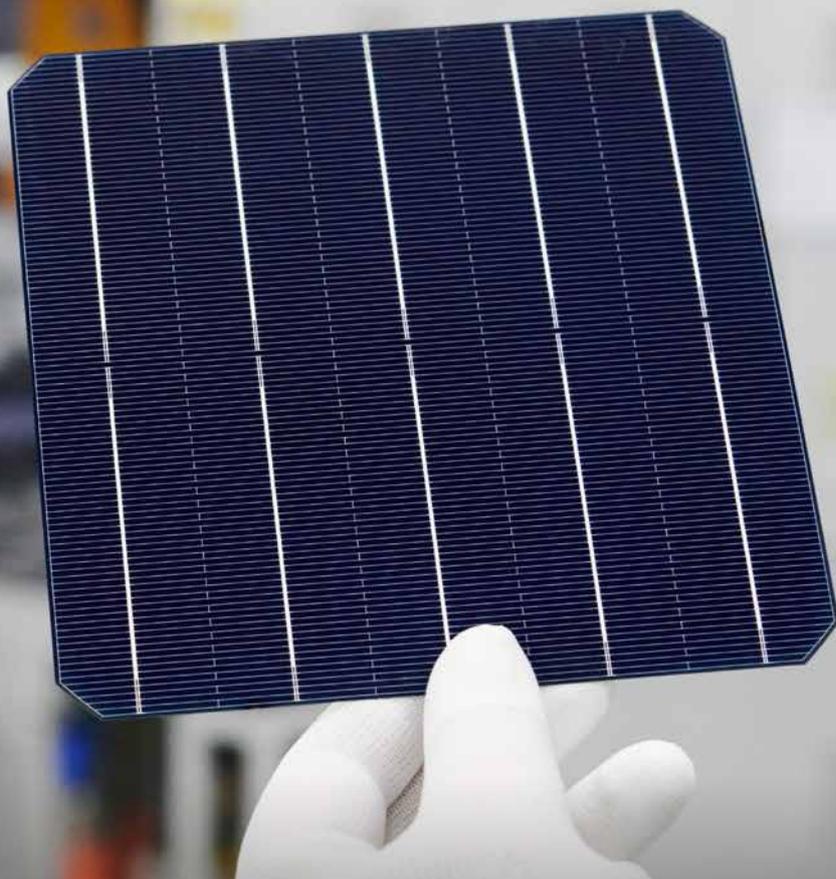


助力碳中和， 阳光下的机遇

—— 光伏产业创新趋势报告

Powering carbon neutrality,
opportunities arising from the
sun — a briefing on the new
trends of Chinese PV industry





版权和免责声明：

本报告由绿色和平和中华环保联合会基于在北京取得的临时活动备案共同发布。

本报告中的引用的信息来源于已公开的资料，绿色和平对这些信息的准确性，及时性和完整性不作任何保证。报告的研究结果是本机构基于时限内所获得的信息进行独立分析所得。

本报告中提及的企业及引用的商标仅作为研究示例，并不代表绿色和平对相关企业进行批评或推荐。

除标明引用的内容以外，本报告内所有内容(包括文字、数据、图表、商标)的著作权及其他知识产权归绿色和平所有。如需引用本报告中的数据及图表,请标明出处。标明由绿色和平拍摄的照片必须取得绿色和平授权后方可使用。

作者： 马文、张文佳、吴雪莹、吕歆

鸣谢以下人员对于此报告的贡献： 周清然、刘苏婉、陈舒蓝、钟煊

此外感谢隆基股份产业研究院专业总监闻震利博士、中国可再生能源学会光伏专委会特约观察员红炜老师、新能源资深分析师华鹏伟老师对本报告提出的宝贵意见和建议。

目录

报告综述	4
1. 行业宏观动态	6
1.1 需求端：中国和欧洲气候目标提前	8
1.2 供给端：度电成本进入平价时代	10
1.3 资产收益回报比较	13
2. 各环节创新机会	17
2.1 硅料环节：提纯工艺	19
2.2 硅片环节：高纯度石英砂	21
2.3 电池环节：钙钛矿电池	23
2.4 组件回收处理	26
2.5 系统环节：追踪支架	29
2.6 应用开发环节：光伏建筑一体化（BIPV）	32
2.7 运维环节：清洗机器人	36
2.8 运维环节：运维无人机	39
2.9 各环节相关公司图谱	43
关于PowerLab能源孵化器	44
参考文献	45

报告综述

经过十年发展,中国毋庸置疑已经成为全球光伏产业龙头,并对全球低碳化转型做出了突出贡献。2020年9月,习近平总书记在联合国大会上做出中国二氧化碳的排放量将在2030年之前达到峰值以及在2060年前实现碳中和的承诺,使得中国的可再生能源行业进入“倍速阶段”。作为可再生能源行业中的主力军,我国的光伏产业将会在加速中国能源转型的道路上发挥更加重要的影响力。

光伏产业链从上游的硅料、硅片环节开始,延伸到下游的电站运维、光伏板回收、相关技术的专业知识涉及物理、化学、材料科学、电子通信、机械制造等多个学科,且跨度较大。涵盖光伏产业多个环节的技术创新趋势报告,一方面有助于专注于某些环节的业内人士了解上下游环节的技术现状,另一方面也期望可以为能源等相关领域的投资人提供一个全产业链的宏观图景。

报告的具体内容涵盖宏观政策、市场趋势,以及具体的技术创新趋势等等:

从宏观政策来看:中国的消纳保障机制以及发达国家提出的碳中和目标为中长期的光伏需求提供了支撑。中国的可再生能源配额消纳保障机制在2020年正式实施以后,将会在能源消费端发挥积极作用,助力上游光伏产业规模的持续扩大。消纳保障机制使得消纳责任归属更明确,激励地方政府大力扶持,促使企业直接增加新能源容量和促使电网企业完善电网规划,加强新能源跨区外送,进而直接达到增加光伏需求的目的;另一方面,随着欧盟提高2030年碳减排目标、日本、韩国相继提出远期碳中和目标,海外光伏市场需求未来也将迎来一波上涨。

从市场趋势来看:在电力消费端,配额制能够与绿证机制、可再生能源市场化交易等政策市场手段相互配合,共同促进光伏的生产与消纳,更好地发挥市场交易与强制约束的作用。而在发电端,2021年中国光伏发电将迎来全面平价上网,光伏技术创新将从全生命周期发电小时数、电站运维成本和系统造价成本三个维度带来的持续的度电成本下降。最后,即使去除国家光伏补贴收益后,光伏电站收益率仍十分可观,具有与固定收益类资产一样良好的稳定性,且兼具浮动收益类资产可能带来的高收益性,项目内部收益率在7%-10%左右。近年来,光伏发电站组件成本和其他建造成本持续下降,光伏电站内部收益率呈上升趋势,具有良好的发展前景和投资价值。

除了从宏观政策以及市场的角度出发全面了解中国光伏产业的机遇之外,光伏产业各个环节之中的创新技术也是光伏行业的从业者以及光伏产业的投资者应该聚焦的话题。本报告借此机遇为行业内外梳理了光伏产业从上游的硅料到下游的电厂智能运维的八大环节的创新机遇,他们分别是:

● 硅料环节:提纯工艺

光伏行业对于硅料的纯度要求达到6N-9N级别。再加上光伏电池向N型电池发展的趋势,这使得行业对于上游的硅料的纯度也有了新的要求。相关的企业加大对于硅烷法等技术的研发以及投入,可以使得上游的硅料提纯工艺在光伏行业发展的潮流下再上新的台阶。

● 硅片环节:高纯度石英砂

石英坩埚是单晶拉棒过程中装放多晶硅原料的一次性石英器件。生产石英坩埚的主要原料是高纯石英砂,而全球目前符合要求的矿源集中在个别地区,上游高端单晶硅片的生产面临“卡脖子”风险。因此国产高纯度人工制造二氧化硅,将在未来高纯度硅片的生产环节中扮演重要角色。

● 电池环节：钙钛矿电池

尽管晶硅电池单瓦成本近年快速下降，但晶硅电池的材料成本下降空间日趋缩小，同时电池效率已经逼近其理论极限。而钙钛矿电池的材料成本低廉，吸光性能突出，单结效率在短短十年间从3.8%提升到25.5%，有望成为下一代的主流电池技术。

● 组件回收处理

未来光伏行业面临的一大潜在难题就是太阳能光伏板的老化回收问题。然而，我国目前并没有出台光伏板回收的政策法规，专注于光伏板回收的企业也是寥寥无几。在其核心技术的研发方面，由于硅料在光伏板中占有比较大的比重，如果能从旧光伏板中提取出纯度较高的硅料再进行运用。这将会创造出较大的市场价值。

● 系统环节：追踪支架

与固定倾斜支架相比，目前单轴跟踪器可使电站的发电量的提升幅度在7%-37%的范围之间，双轴跟踪器最多能提高40%的发电量。追踪支架是一个软硬件结合的技术。在硬件方面，利用先进的材料确保支架的稳定性并且在不断追踪最合适的光照角度下保持支架结构的强度；在软件方面，追踪角度的精准测算。这都是今后在追踪支架环节上要突破的瓶颈问题。

● 应用开发环节：光伏建筑一体化（BIPV）

BIPV可以被视为工商业光伏屋顶项目开发模式的一种升级。最近，光伏行业的繁荣发展驱动了BIPV概念的快速回温。在优质屋顶资源日益紧俏的同时，光伏系统造价成本快速下降，使得BIPV组件开始具有直接替代工厂彩钢瓦屋顶的经济性。

● 运维环节：清洗机器人

对光伏清洗机器人的需求取决于客户对精细化运维的重视程度。传统上电站运维单位可以凭借经验和历史数据，来判断需要清洗的时点。而机器人自动高频率清洗带来的优势，难以在项目投运初期被定量直观地感受到。另外，运维单位自身预算有限，考核压力不大，面对较高的前期投资，就缺少足够的采购动力。这导致目前只有小部分污染特别严重的电站，才会配备清洗机器人，提高清洗频率，或者是用于示范用途。但是经过比较，机器人清洁的成本相比传统的清洁模式的成本仍然占有优势。

● 运维环节：运维无人机

中国无人机巡检市场还处在发展早期阶段，国内许多无人机巡检公司还停留在设备和技术层面，行业领先的国外公司已经将关注点转移到更加专业的软件和分析层面。国外运维精细化程度更高，更注重对故障发生前的筛查，以及积极开拓小型电站的业务。相对而言，目前国内的光伏电站运维受重视程度并不高。但随着光伏平价时代的到来，预计未来光伏运维会有更加精细化的需求，中国无人机光伏巡检的市场也会更加广阔。

本报告的研究方法以桌面文献研究为主，同时通过业内人士分享了解近期的光伏行业动态。光伏技术进步日新月异，由于团队专业知识有限，撰写内容难免有错误与疏漏，仅希望借此报告抛砖引玉，与更多行业同仁共同探讨光伏产业下一个十年的创新升级之路。

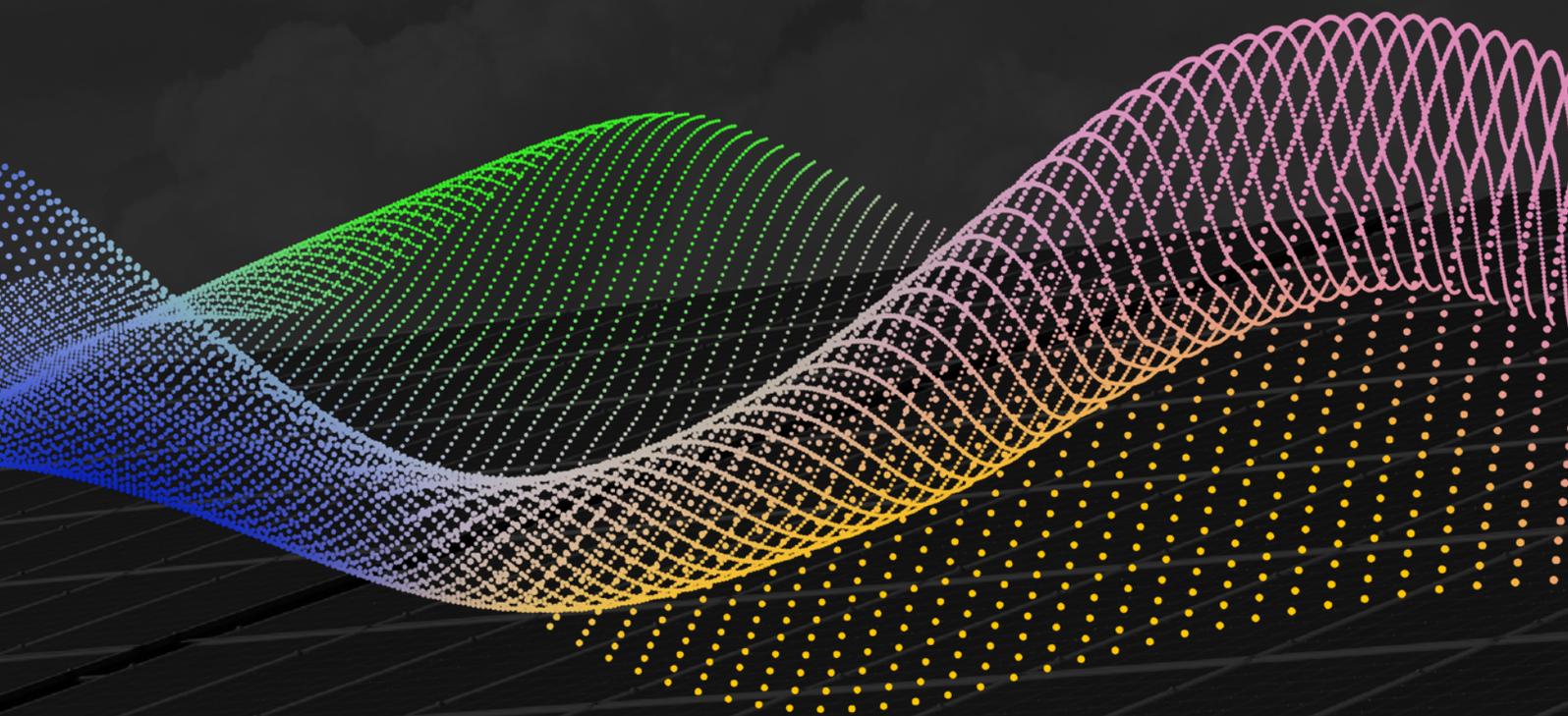
PowerLab由国际环保组织绿色和平联合加州清洁能源基金会创立，是国内第一个专注于可再生能源的非营利孵化器。在致力于孵化与赋能可再生能源创新创业团队和个人的基础上，PowerLab引入“开放式创新”的概念和实践，希望通过可再生能源产业的开放式创新，以场景赋能、协调创新等多种形式助力能源领域初创团队。

第一章



行业宏观动态

Market and industry dynamics





全球能源结构绿色转型的有利契机下，光伏产业需要坚持创新驱动，践行零碳发展理念，让阳光更好地造福人类生活。绿色和平PowerLab发布的《光伏产业创新趋势报告》为业内人士提供了一个了解最新宏观政策市场背景，以及光伏产业链多个环节的技术概况的机会。期待绿色和平PowerLab未来在能源开放创新领域能有更多的产出，助力中国碳中和、碳达峰目标的实现。”

张翼飞

英利集团 保定嘉盛光电科技股份有限公司总经理

1.1 需求端：中国和欧洲气候目标提前

1.1.1 配额制对光伏需求的支撑

国内光伏激励制度，目前正处于以固定电价制度为代表的政府补贴式，向以配额制为代表的市场主导式转型的阶段。可再生能源电力总量消纳责任权重（简称“配额制”），包括“最低消纳责任权重”和“激励性消纳责任权重”。国家发改委、国家能源局共同发布的《关于各省级行政区域2020年可再生能源电力消纳责任权重的通知》¹明确，2020年最低非水可再生能源电力消纳责任权重应不低于2019年实际完成情况。全国有10个省（区、市）的最低可再生能源总量消纳责任权重超过30%，9个省（区、市）最低非水电可再生能源消纳责任权重超过15%。

按上述消纳责任权重测算评估，预计2020年可再生能源电力消费占比将达到总消费的28.2%、而非水电消费占比将达到10.8%，分别比2019年增长0.3%和0.7%²。预计2020年国内非水可再生能源消费量将达到7500亿KWh，非水可再生能源电量消费在2019和2020两年间可累计增长大约1200亿KWh。按照光伏发电利用小时数1300小时测算，若新增可再生能源供应全部为光伏新增装机，2019、2020两年新增光伏并网装机92.3GW³。

而放眼至全球，配额制已经在许多国家和地区发挥了重要作用。目前全球共有包括美国约30个州或地区以及英国等100多个国家或地区实施了配额制。配额制对于光伏市场的积极作用主要表现在两个方面。

第一，消纳保障机制使消纳责任归属更明确，激励地方政府大力扶持，促使企业直接增加新能源容量和促使电网企业完善电网规划，加强新能源跨区外送，进而直接达到增加光伏需求的目的。

第二，配额制能够与绿证机制、平价上网等政策相互配合，共建光伏消纳保障机制，更好地发挥市场交易与强制约束的作用。在强制约束各地最低消纳责任的同时，国家能源管理部门试图引进市场交易的机制，规定各电力交易机构优先完成与可再生能源电力消纳相应的电力交易。在考核主体实际消纳可再生能源电量的同时，可以通过交易超额消纳量和绿证两种方式完成消纳量。

1.1.2 海外光伏市场预判

- **欧洲方面：**欧盟委员会为2030年设定了38-40%的新的具有约束力的可再生能源目标，而欧洲议会2020年10月6日将2030年温室气体排放量(相比1990年)从目前40%的减排目标提高到60%。可再生能源目标也落实到光伏领域，欧洲重要国家（德国、法国、意大利、西班牙、葡萄牙、土耳其、俄罗斯）制定了2030光伏累积装机目标共254.3GW⁴。

欧洲各国光伏累计装机量目标 | 表 1

	2023年	2030年	2050年
德国	\	98GW	\
法国	18-21GW	35.6-44.5GW	\
西班牙	\	37-39.2GW	50-60GW
意大利	\	50GW	\
土耳其	14GW	38GW	\
葡萄牙	\	8.1-9.9GW	\
俄罗斯	1.52GW (2024年)	2.7GW	\

数据来源：中国能源报；能源界^{5,6}

- **美国方面：**美国太阳能协会（SEIA）提出到2030年，太阳能发电占全国发电量20%的目标。为达到此目标，到2030年美国需安装累积500GW的太阳能项目⁷。而美国能源信息署（EIA）则预计到2050年美国光伏总装机量将达到可再生能源中的46%，装机规模达到920GW⁸。另一方面，美国能源部也非常重视光伏行业发展的可持续性，并在2019年提出了Sunshot2030计划，目标进一步大幅削减度电成本：1、住宅光伏0.05美元/度；2、商用光伏0.04美元/度；3、用于公用事业的光伏0.03美元/度。
- **印度方面：**印度能源部（MNRE）曾在2015年提出到2022年印度太阳能装机达到100GW。目标主要内容包括，实现40GW屋顶电站，同时建造60GW地面电站⁹。截止2019年底，印度累计光伏装机42.8GW。
- **东南亚方面：东盟整体：**东盟计划到2025年再生能源需达到占整体能源供应比重的23%。在2025年的能源规划蓝图里光伏最大安装量将达到55GW，依循这样的逻辑进行推算，2018年起每年东盟国家需达到7.26GW的光伏安装量。

东南亚主要国家光伏装机目标 | 表2

	2025年	2030年
泰国	\	6GW
菲律宾	\	1.528GW
越南	4GW	12GW
印尼	908MW	\
新加坡	\	2GW

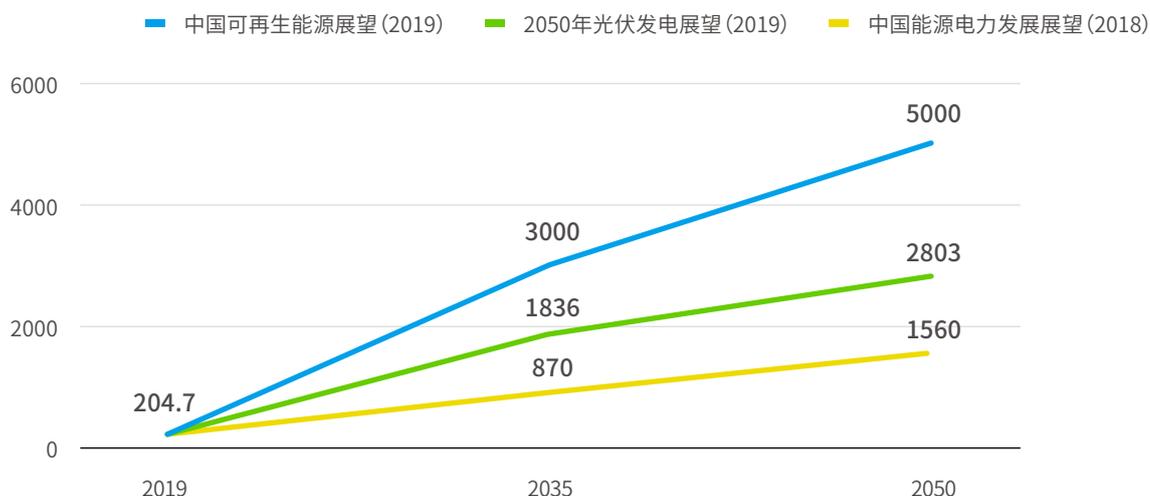
数据来源：印尼能矿部¹⁰；臧超¹¹；阳光中盛¹²

1.1.3 长期光伏需求情景

许多机构都对中国乃至全球光伏长期需求作出了情景预测。不同机构预测的基本推演逻辑大体上一致：首先基于不同政策和偏好假设不同的社会发展情景，分工商业、农业等不同领域推测其生产增长率，继而得出不同情景下的社会用电量远期预测。然后结合对于光伏度电成本下降情况的具体推测，得出光伏发电量占比，最终推出光伏用电长期需求。鉴于2030碳达峰，2060碳中和目标，中国未来光伏装机容量增长将会进一步提速，根据何建坤的预测¹³，2021-2030年间，中国每年新增的风电和光伏发电装机容量将达到10GW左右。

根据国际能源署（IEA）的预测，在2035年全球光伏累积装机量将达到2400GW¹⁴。国际可再生能源署（IRENA）预计，2050年全球光伏累积装机量将达到8519GW¹⁵。中国能源研究所在《2050年光伏发展展望》的报告中提出在同时满足光伏继续规模化、技术创新使得组件成本持续下降、光伏应用场景不断拓展、以及电力系统充分调配和利用资源的前提下，中国光伏累积装机量在2030年及2050年则可分别达到3000GW及5000GW¹⁶。

中国光伏累计装机情景预测 | 图 1



数据来源: 发改委能源研究所, 国网信息研究院^{16, 17, 18}

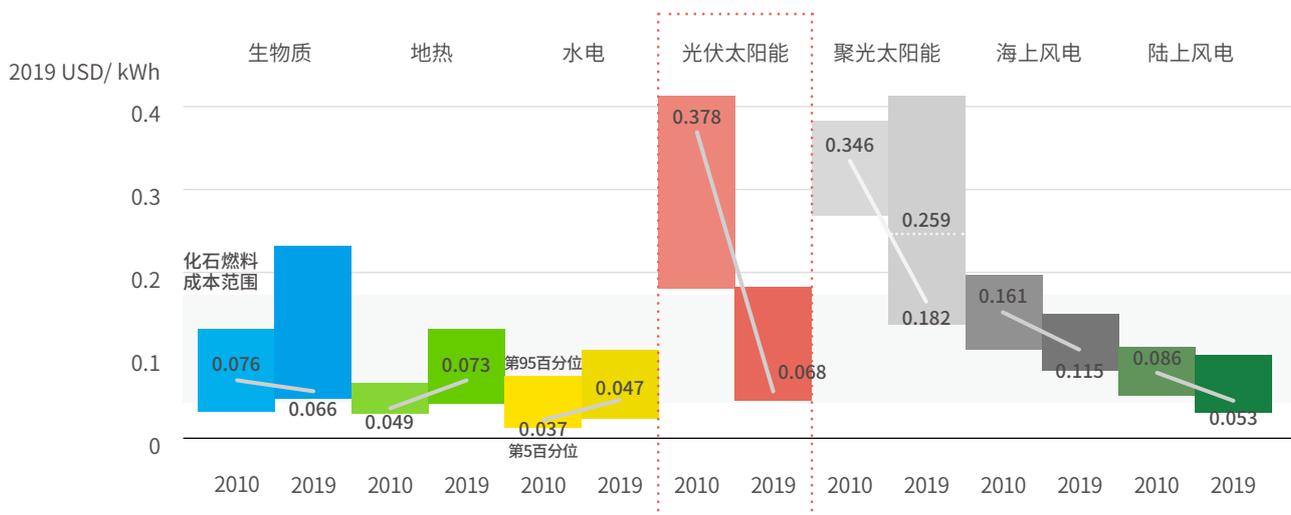
1.2 供给端：度电成本进入平价时代

1.2.1 现状与成本预测

根据国际可再生能源署 (IRENA) 的《2019可再生能源发电成本》报告, 2019年全球光伏度电成本再次创下新低, 大约0.068美元/度¹⁹。2010年到2019年, 全球光伏度电成本下降了80%, 而2019年相比前一年下降13%¹⁰。

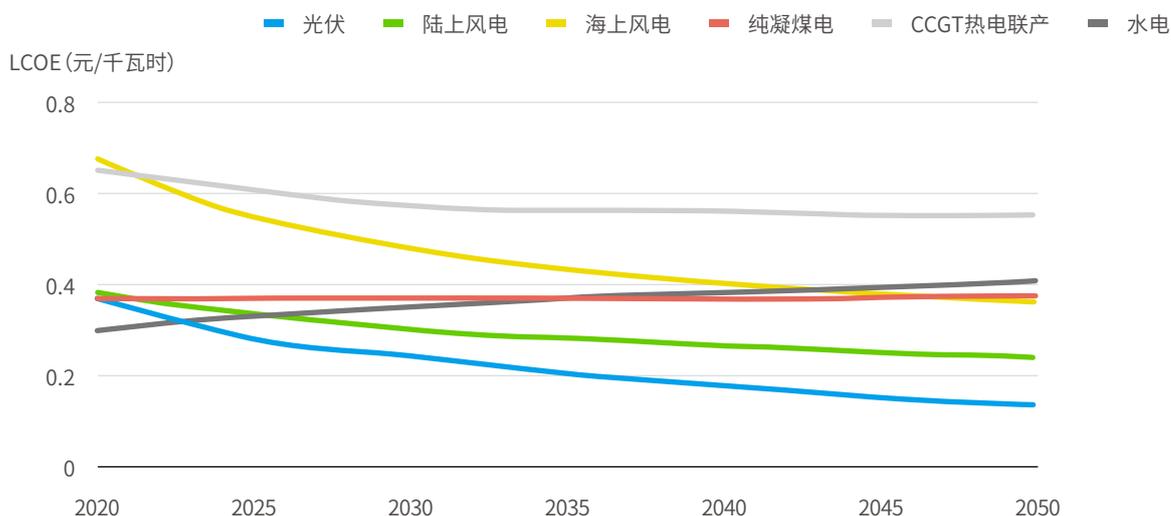
据国际可再生能源署 (IRENA) 预测, 全球公用事业规模的光伏电站的度电成本在2030年将达到0.02到0.08美元/千瓦时。到2050年, 预计成本在0.014-0.05美元/千瓦时之间²⁰。

2010-2019年全球可再生能源度电成本趋势 | 图 2



数据来源: 国际可再生能源署 (IRENA)¹⁴

2020-2050年中国不同发电技术度电成本预测 | 图3



数据来源：中国光伏行业协会（CPIA）²¹

在中国，光伏的市场竞争力同样不断提升。根据中国光伏行业协会（CPIA）预测，到2025年光伏新增装机度电成本预计低于0.3元/千瓦时。水电和其他传统电力将有成本增加的压力，风电的下降幅度比光伏慢，而光伏将成为最有经济竞争力的电源。CPIA认为到2035年，新增光伏度电成本比当前下降约50%，2050年将下降约70%²¹。

1.2.2 光伏降本潜力

平准化度电成本，是对项目生命周期内的成本和发电量先进行平准化，再计算得到的发电成本，即生命周期内的成本现值/生命周期内发电量现值。根据平准化度电成本公式，度电成本可以拆解为三个变量：全生命周期发电小时数、电站运维成本和系统造价成本。

全生命发电小时数

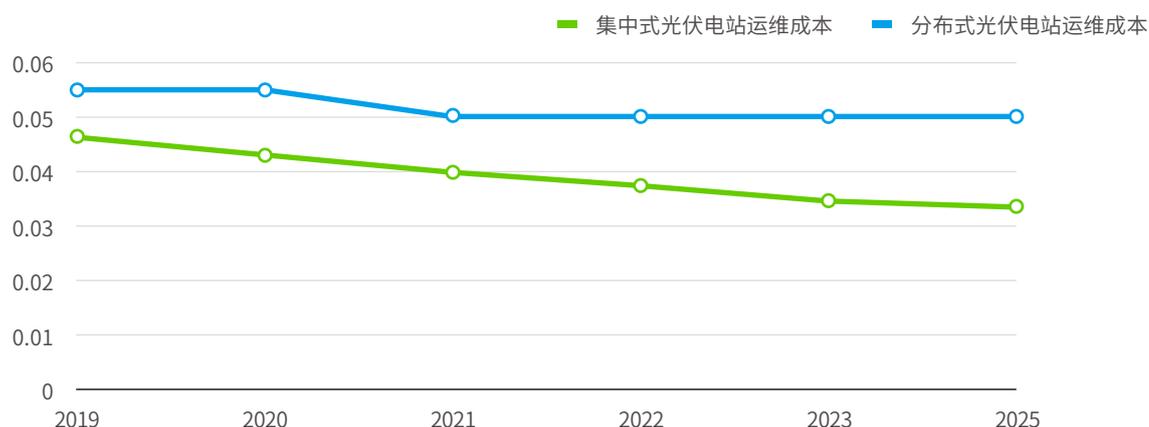
根据国际光伏技术路线图（ITRPV）预测，组件寿命将会延长，组件和系统集成的综合进步可使系统使用寿命延长到30年甚至更长；另一方面，异质结和钙钛矿的弱光响应性，会增加有效小时数量。

运维成本

进入平价时代后，业主将会更加注重电站精细化管理，并运用更多自动化设备和人工智能技术。借助数据采集和分析（气象数据、发电量统计、PR分析、设备运行）、组串故障定位、告警中心、缺陷管理、自动化报表管理等分析工作，光伏电站将实现24小时组件级监测。智能运维，首先有利于保障综合发电量，其次可以降低电站人工成本，从而促进度电成本下降。

新增运维需求将主要通过智能设备实现，而随着管理效率和产品标准化的提升，单瓦运维成本将小幅下降。根据CPIA的数据显示，在2019年，在运维成本方面，国内分布式光伏电站的成本约为0.055元/瓦/年，集中式地面电站约为0.046元/瓦/年¹²。预计到2025年，集中式地面电站的运维成本依然有下降的空间，而分布式光伏的运维成本将稳定在这个水平。

2019-2025年中国光伏电站运维成本趋势(元/瓦/年) | 图4

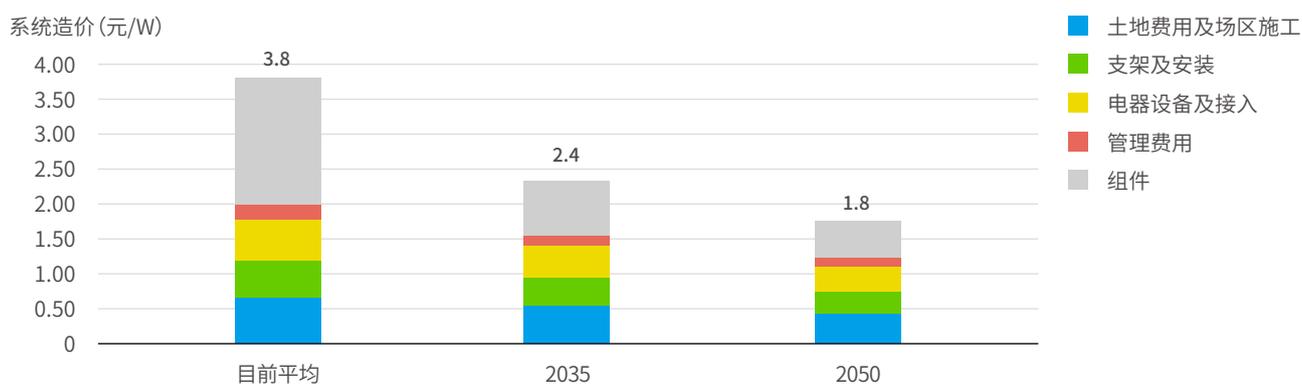


数据来源: 中国光伏行业协会 (CPIA) ²¹

系统造价

在组件成本大幅降低和转换效率持续升高的带动下, 光伏电站系统造价将一直下降。一方面, 金刚线细线化、大尺寸、降低拉棒电耗等措施, 将进一步降低组件的材料和能耗成本。另一方面, 电池效率从20%向30%迈进, 在降低单瓦成本的同时, 摊薄土地费用和厂区施工、支架、电气设备和管理费用等非材料成本。根据CPIA预测, 在2035年, 光伏电站投资成本水平与现在相比将会下降37%, 2050年会下降53%²¹。

中国光伏电站2035年和2050年系统造价预测 | 图5



数据来源: 中国光伏行业协会 (CPIA) ²¹

国际光伏技术路线 (ITRPV) 在技术层面, 讨论了光伏系统造价进一步降低的空间。

高效电池技术方向

- **钝化发射极和背面电池技术电池(PERC):** PERC电池已经成为太阳能电池的“主力军”。182mm等更大尺寸硅片的出现, 有望提高少子寿命(μsec)和薄片电阻率($\Omega \cdot \text{cm}$)的比率。通过移去主栅和减少细栅到 $30\mu\text{m}$, 从而降低金属覆

盖率。通过减少硅溶解到铝层过程中产生的空隙率, 来改善PERC电池的背面接触。开发其他表面钝化层材料 (SiNx 和Al₂O₃除外), 以改善双面性。以及, 通过提高产量和进一步实现自动化, 促使PERC电池成本的降低。

- **异质结电池(HJT):** 通过开发镀铜技术减少银的使用 (或者开发由铜代替银的技术), 以及减少透明导电氧化物(TCO)层中钼的使用²², 克服在沉积非晶硅层之后, 不能使用温度高于200°C的工艺问题。在清洗制绒方面, 用新型臭氧法减少溶剂的消耗量, 提高电池效率; 在TCO薄膜沉积方面, 通过实现银浆、靶材国产化也可降低异质结电池的材料成本; 在丝网印刷方面, 利用多主栅技术减少银浆的消耗, 同时实现银浆国产化, 从而降低异质结电池生产成本。
- **叉指背接触式电池(IBC):** IBC电池是具有高效率潜力的电池, 因为它可以最大利用入射光, 减少光损失。通过应用钝化触点结合异质结钝化触点, IBC电池可以实现高于PERC电池的效率。
- **铜铟镓硒电池(CIGS):** 优化CIGS组件以获得更低的度电成本, 需要平衡制造成本、效率、耐用性和发电量之间的关系。如果使用ZnS、In、S₃、ZnSe、ZnO、SnO₂、ZnIn₂Se取代CdS作为缓冲层, 就能实现制备绿色无镉高效CIGS薄膜太阳能电池, 同时尽可能地减小薄膜的厚度以节约原材料和能源, 从而促进成本降低²²。
- **钙钛矿电池(PSC):** 提高传输材料和背面触点的透明度, 完善无机输送层、阻挡层, 可能有助于同时实现电池效率和稳定性, 减少电池制造过程中的步骤, 实现成本降低。
- **硅基叠层电池:** 顶部钙钛矿电池和底部的硅电池组成了叠层电池, 不同叠层吸收了不同部分的太阳光谱, 可实现更高的电池效率, 进而实现度电成本下降。钝化剂的使用有望提高钙钛矿的性能和稳定性。

高效组件趋势

双面双玻组件或新的封装材料, 可有效提升发电量。国际可再生能源署 (IRENA) 预计, 双面双玻组件技术将在近期迎来性价比拐点, 并迅速提升市场渗透率, 预计最快在2021年达到40%的市场份额²³。另外, “无缝焊接”技术, 能完全消除组件中电池片间距, 从而提升组件效率。

高效逆变器趋势

由碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 等材料制造的高效逆变器, 可以降低无源元件的故障率、减小封装和节省安装成本, 还可减小逆变器散热器尺寸 (因为GaN和SiC有优良的导热系数)。通过结合控制技术、效率和总系统成本会得到优化, 同时效率有望提升到98%以上, 综合促进单位成本下降²⁴。

1.3 资产收益回报比较

近年来, 实体经济下行, 货币政策仍相对宽松, 收益高的优质资产越来越少。面对着资产荒时代的来临, 光伏产业发展仍势头不减。光伏电站寿命大约为20至25年, 收益长期稳定。且近年来光伏组件价格、建造成本等其他投资成本持续走低, 即使去除国家光伏补贴收益, 光伏电站收益率仍十分可观。在资产荒的背景下, 光伏电站和其他资产相比是否具有投资价值? 下文将进行详细分析。

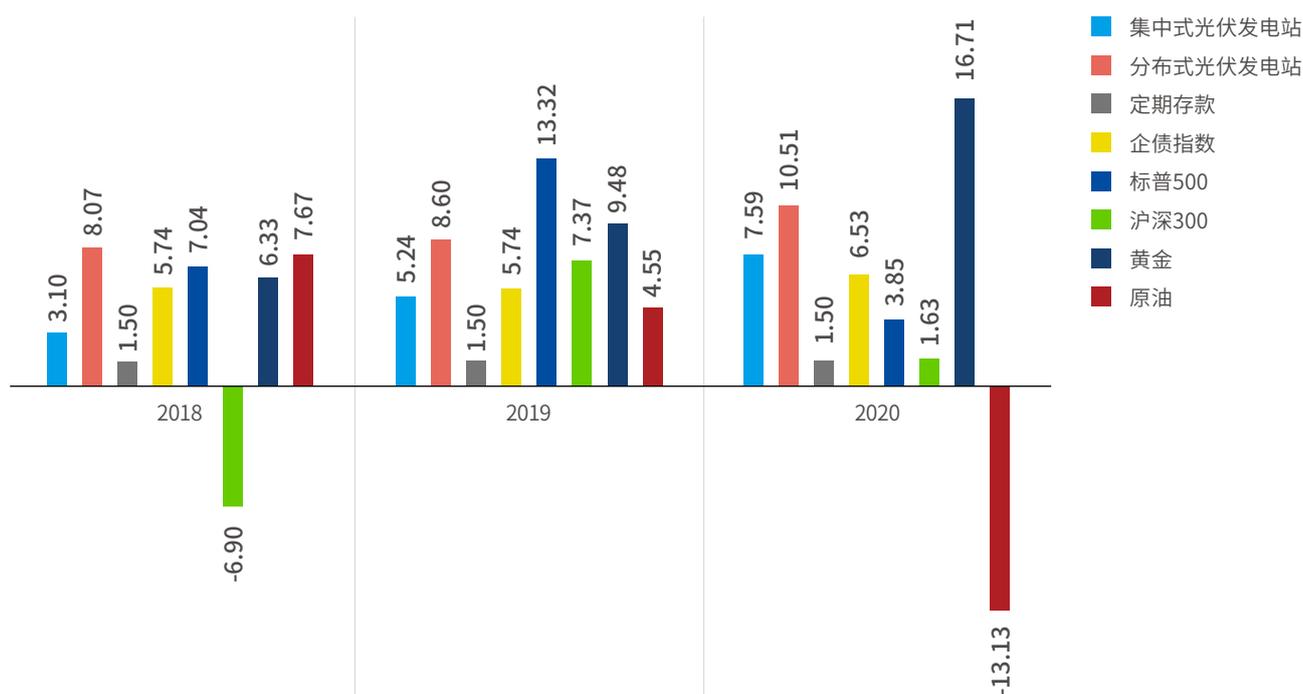
1.3.1 光伏电站与资产大类收益率横向对比

本报告建模测算了去补贴的光伏发电站收益率, 情景假设如下: 集中式光伏电站和分布式光伏电站内部收益率计算均不计入补贴, 电价以全国各省平均上网标杆电价计算, 电站每年运维费用为项目总投资的2%, 每年发电损耗为

0.5%。假定集中式光伏电站2018年、2019年、2020年（截止6月30日）EPC造价分别为5.9元/瓦，4.5元/瓦、3.5元/瓦。由于优质光资源集中式电站项目有限，假定2018年、2019年、2020年（截止6月30日）有效光照时间分别为每年1400、1350、1300小时。假定分布式光伏电站用户80%自发自用，2018年、2019年、2020年（截止6月30日）EPC造价分别为5.5元/瓦，4元/瓦、3.1元/瓦，有效光照时间为每年1250小时。

根据模型测算，集中式光伏电站与分布式光伏电站的收益率三年来持续上升。在不计入补贴的情况下，2020年集中式光伏电站收益率达7.59%，分布式光伏电站收益率达10.51%。

2018年-2020年平价光伏电站与大类资产的收益率情况 | 图6



数据说明：集中式光伏电站和分布式光伏电站内部收益率计算均未计入补贴；分布式光伏电站假设用户80%自发自用；定期存款：一年期定期存款（整存整取）；企债指数：000013.S；原油：CL00Y WTI原油；黄金：GC00Y COMEX黄金；所有数据截止2020年6月30日；标普500、沪深300、黄金和原油以三年滚动收益率计算。

与固定收益类资产——定期存款、企债指数相比，光伏电站收益率不仅稳定，且高于这两种固定收益类资产收益率。对比浮动收益类资产的三年滚动收益率——股票、黄金期货和原油期货：2018年，分布式光伏电站收益率高于标普500指数、沪深300指数、黄金期货和原油期货收益率；2019年分布式光伏电站收益率高于两种浮动收益类资产收益率，且与当年高收益资产——标普500指数的收益率仅相差4.72%。2020年截止6月30日，由于光伏电站EPC成本下降，集中式光伏电站和分布式光伏电站的收益率均上升2%左右，收益率分别为7.59%、10.51%，高于三种浮动收益类资产。

总体而言，光伏电站收益率具有与固定收益类资产一样良好的稳定性，且兼具浮动收益类资产可能带来的高收益性。近年来，光伏电站组件成本和其他建造成本持续下降，光伏电站内部收益率呈上升趋势，具有良好的发展前景和投资价值。

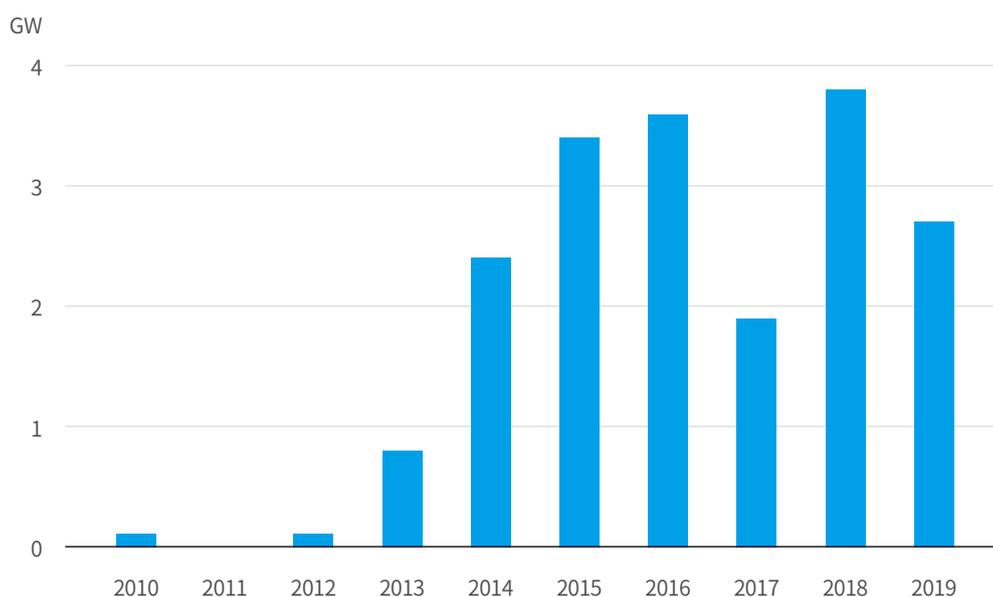
1.3.2 电站交易的规模和主体

根据彭博新能源财经数据,2010至2019年间,国内披露的光伏电站资产交易总数达到520笔,累计涉及项目609个,总规模达18.63GW²⁵。

2010年至2013年,中国光伏电站行业交易较不活跃。2014年,光伏发电厂的交易量大幅增加。2016年,单年交易量达到了360亿瓦²⁷。

交易趋势的变化与国家可再生能源补贴目录紧密相关。补贴下发年份,光伏电站交易规模显著增加。国内光伏电站市场在2018年5月31日光伏新政出台后后迅猛增长,光伏电站资产交易规模创历史新高,达3.8GW²⁶。

2010-2019年光伏电站交易规模 | 图7

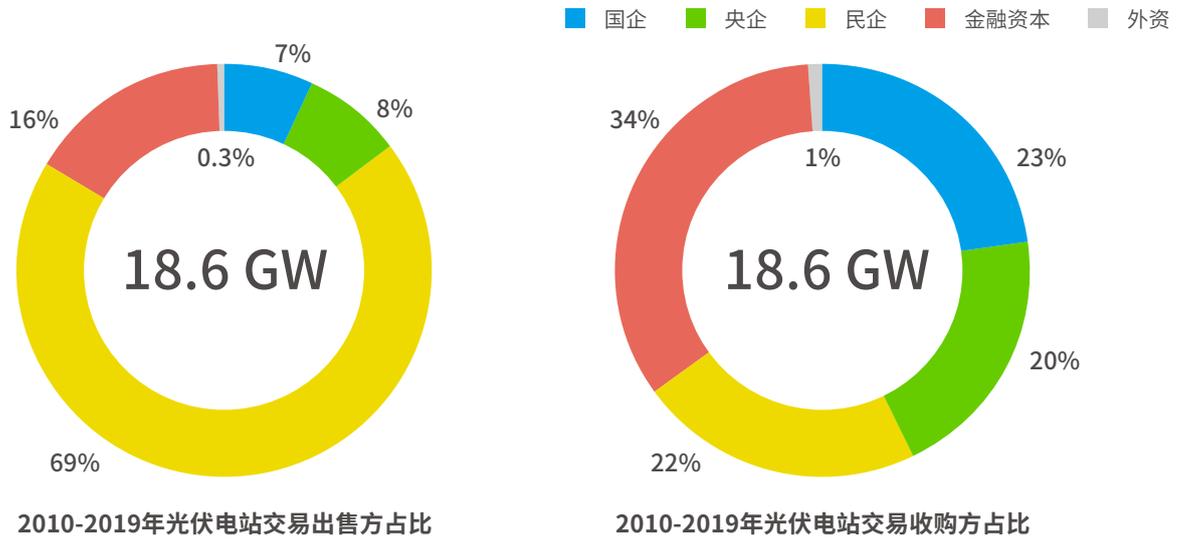


数据来源:彭博新能源财经(BNEF)²⁷

目前我国光伏电站交易市场是买方市场。从交易主体来看,光伏电站资产交易的出售方以民营企业、金融资本为主,收购方较为平均。

- **出售方:**从光伏电站交易出售方来看,民营企业最为活跃,2010年至2019年共出售光伏电站12.8GW,占比约69%。2018年的交易方式主要为同行业并购,其中出售方大多是规模较小的光伏企业。这是由于一些实力较弱的光伏电站运营商想要通过出售光伏电站资产来缓解受光伏新政影响的债务压力²⁷。

2010-2019年光伏电站交易收购方占比及2010-2019年光伏资产收购方市场变化 | 图8



数据来源: 彭博新能源财经(BNEF)²⁷

- **收购方:** 从光伏电站交易收购方来看, 各收购方的活跃度相对比较平均, 主要为金融资本、民营企业、国企和央企。四类企业光伏电站累计收购规模均分别在3GW以上, 占全部收购规模的比例超过90%²⁷。

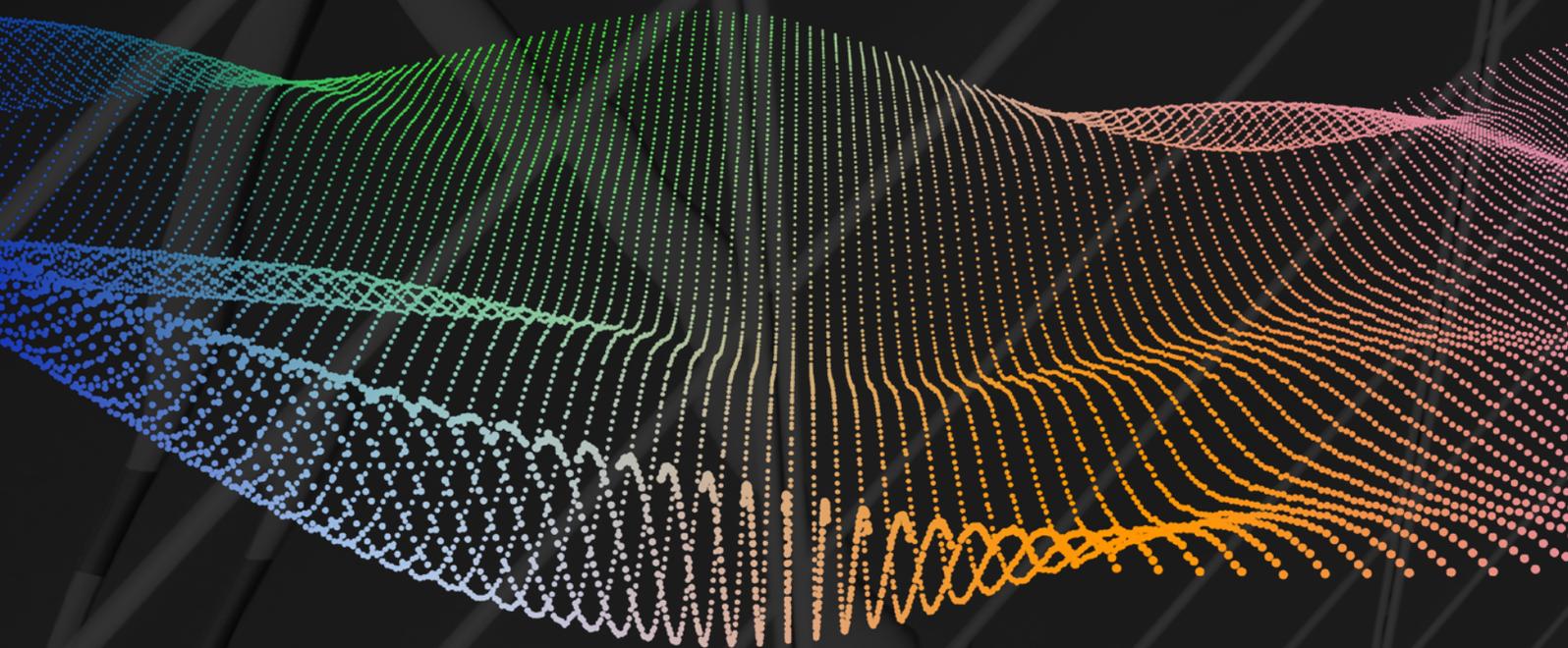
展望平价上网时代, 投资和收购主体形态可能会重新回归市场化主导方向。

第二章



各环节创新机会

Technology trends
across PV industry





2020年是光伏发展一个里程碑的年份, 光伏发电的成本在大部分地区都能与火力发电相近, 部分地区实现了平价上网。尽管出现新冠疫情、贸易战等不利因素, 但光伏行业依然保持了稳定快速增长的态势。另外, 全球主要国家均设立了碳中和目标, 并在这一问题上达成了实质共识。中国政府在联合国大会上提出二氧化碳排放量于2030年达到峰值, 2060年前实现碳中和的目标。

全社会从上到下, 普遍认识到了光伏发电的绿色性, 低成本性, 就连股票市场也产生了一波前所未有的普涨。可以预见, 未来五年全球光伏市场将保持20%以上复合增速。预计2050年, 光伏系统成本将比现在下降约50%, 在中国, 光伏发电量将达到全社会用电量的39%左右, 成为第一大能源。

光伏市场的爆发、社会对光伏发电的认可得益于绿色环保和成本降低。一些非行业内的人士批评说制造光伏产品造成的环境污染大于光伏发电带来的环境收益, 制造光伏所耗的能量大于光伏发电产生的能量。这是对光伏产业的误解, 光伏制造行业是简易的半导体工艺, 同其它行业一样, 只要严格遵守当地的环保政策, 就不会产生环保问题; 光伏发电的平价上网直接证明了光伏发电收益远大于制造光伏所耗能源(因为光伏成本中除了耗能还有材料和人工成本等)。光伏成本降低的原因有两个: 一个是光伏产品的材料成本、人工和能耗成本持续不断的降低, 例如电池片正面银浆用量的单耗每年都有下降10mg左右, 人工成本的降低得益于自动化的大规模采用和设备产能的增加。另外一个更大成本降低的源泉来源于光伏电池的发电效率的提升, 这个是光伏产品区别于其它工业品的地方, 给光伏产品成本降低提供了持续的源泉。按照第一性原理来考虑, 光伏系统材料就是一定量的水泥(桩基)、钢铁(支架)、铝(组件边框)、玻璃、塑料粒子(EVA, POE)、石英石(硅片、逆变器芯片)、铜(电缆、焊带)、少量银等, 光伏系统的材料成本随着技术的进步越来越接近这些大宗材料的成本, 降本空间一定会越来越小, 目前材料资源边际成本降低越来越接近极限。而光伏电池的发电效率目前只有22%左右, 距离多结光伏电池的理论极限效率86.8%还有很大空间, 这正是我们看好光伏发电前景的地方。

无论是材料成本、人工成本的降低, 还是效率的提升, 归根结底都来源于技术的创新, 本报告正是聚焦于“中国光伏产业创新趋势”主题, 通过客观的引用学术文献, 行业报告, 走访实际企业, 梳理、分析了非常有价值的光伏产业链上的主要创新技术。无论是对于我们这些光伏行业内的企业, 还是对于想投资光伏行业的投行, 甚至是负责光伏政策制定的政府单位, 都有参考意义和实用价值。我们也期望行业内外的技术人员、投资者、政府人员都关注这些创新点, 共同努力, 施展才能, 有所作为, 造福社会, 有益人类。

当然, 本报告也难免会对目前行业的一些创新点有所疏漏, 比如大硅片技术、大组件技术, HIT和Topcon技术虽然有所提及但是还是不够详尽。

另外值得一提的是光伏发展的下一波大爆发一定是来源于储能技术的突破造成的储能成本的实质性降低, 在那时, 光伏发电才有可能取代传统能源, 成为社会上最主要的电力来源。”

闻震利 博士

隆基股份产业研究院专业总监

2.1 硅料环节：提纯工艺

单晶硅和多晶硅的原料均来自高纯硅原料，初始原料为石英砂(SiO_2)，石英砂与焦炭在高温电炉里进行炭热还原反应，形成纯度99%左右的金属硅，再经西门子法或硅烷流化床等工艺技术提纯为高纯多晶硅原料。多晶硅经区熔或直拉工艺可生产单晶硅。

多晶硅原料下游主要用于半导体和光伏产业，半导体产业对多晶硅产品质量要求更高，纯度往往要求在99.999999%以上(9N-11N)，**光伏级多晶硅纯度的要求略低于半导体级，但也要达到6N-9N。另一方面，目前下游电池环节正在向N型电池发展，对纯度要求更高。**这刺激了保利协鑫等上游龙头，加大投入攻关硅烷法工艺。随着协鑫中能江苏产线推进，硅烷法可能成为下一个技术升级重点。

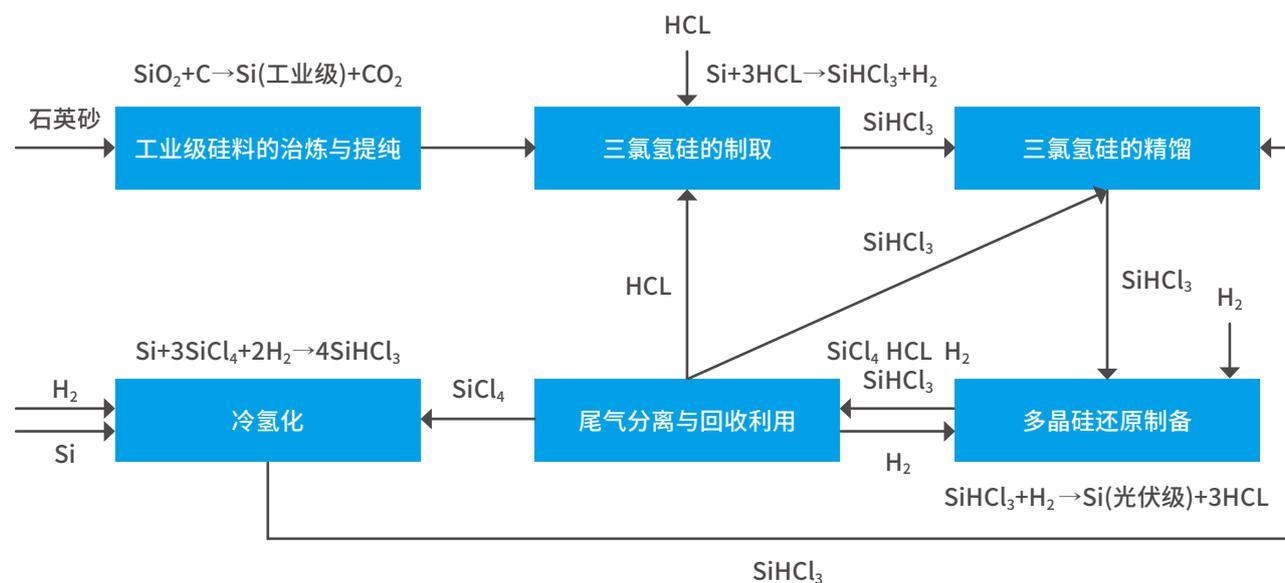
2.1.1 核心技术分析

西门子法

1955年，德国西门子公司成功开发出三氯硅烷在氢气氛围下，在炙热的硅芯/硅棒表面上沉积硅的工艺技术，并于1957年开始工业化生产，即“西门子法”多晶硅生产工艺。

但西门子法多晶硅转化率低，四氯化硅等副产品污染严重。改良西门子法在前者的基础上采用了闭环式生产工艺。该工艺将工业硅粉与氯化氢反应，加工成三氯氢硅，再让三氯氢硅在氢气气氛的还原炉中还原沉积得到多晶硅。还原炉排出的尾气氢气、三氯氢硅、氯化硅、二氯氢硅和氯化氢经过分离后再循环利用。

改良西门子法工艺简图 | 图9



数据来源：中债资信²⁷

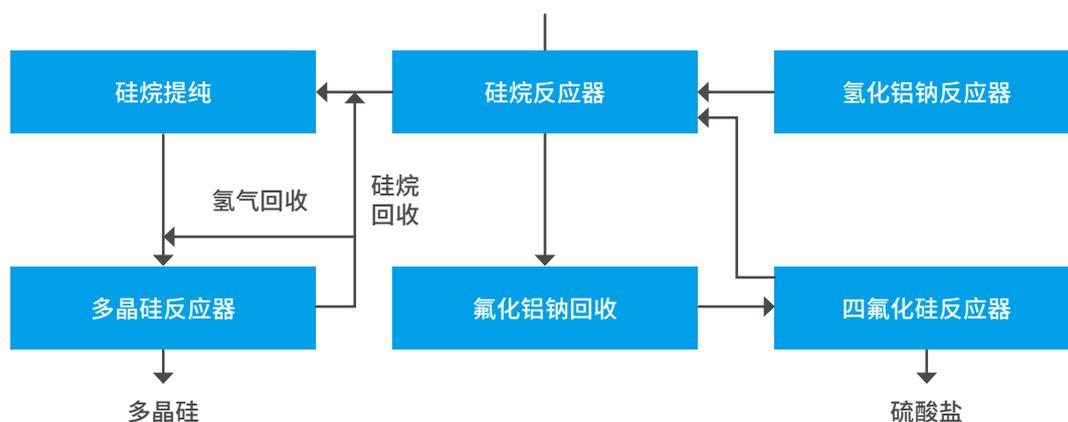
硅烷法

硅烷法，首先是采用现有三氯氢硅法工艺中的冷氢法技术将四氯化硅转化为三氯氢硅，再将三氯氢硅歧化生产硅烷。然后将硅烷通入以多晶硅晶种作为流化颗粒的流化床中，使硅烷裂解并在晶种上沉积。颗粒硅从流化床底部不断排出，而硅籽晶则从流化床顶部加入。

硅烷热分解法与西门子法相比，其优点主要在于：硅烷较易提纯，含硅量较高，分解温度较低，生成的多晶硅的能耗仅为40kWh/kg，且产品纯度高。但是缺点是易燃、易爆、安全性差，国外曾发生过硅烷工厂强烈爆炸的事故。

因此，工业生产中，硅烷热分解法的应用不及西门子法。2019年硅烷法生产的颗粒硅仅占到全国总产量的2.5%。2019年保利协鑫硅烷法颗粒硅产量3200吨（产能5000吨），天宏瑞科颗粒硅产量6016吨（产能1.8万吨）。

硅烷法工艺简图 | 图 10



数据来源：海川化工论坛²⁸

优劣势总结

改良西门子法与硅烷法对比 | 表 3

	改良西门子法	硅烷法
硅含量和尾气	含硅20.7%；尾气需要分离再回收	含硅 87.5%；尾气主要为氢气
电耗量	分解温度在1000度，分解率15%左右；综合电耗70kWh/kg-Si	分解温度在 650-700 度，速度快，分解率高达 99%；综合电耗 40kWh/kg-Si
生产工序	分批次生产；需破碎进一步加工	连续生产；无需破碎直接投料
应用场景	\	有利于连续加料拉晶
问题	技术稳定，国产化成熟	易燃易爆，有安全隐患

为什么之前硅烷法没有推广

- 硅烷分解时容易产生非晶硅粉,限制了硅烷的沉积速率。需要比较强的工艺操作要求。
- 硅烷毒性很大,会强烈刺激人的呼吸道,中毒者可能出现头痛和恶心等症状,吸入量较大时会引起呼吸及淋巴系统产生生理病变。
- 改良西门子法开发时间更早,工艺更成熟,人才梯队完善。流化床工艺开发相对稍晚,技术不成熟,而专利又掌握在几家巨头手上。这使得中国企业选择门槛较低的西门子法,集中攻关降低能耗等成本指标,补足了理论值劣势²⁹。

2.1.2 相关企业介绍

保利协鑫

保利协鑫从2013年开始,在改良西门子法多晶硅技术基础上投入硅烷流化床新工艺,其万吨硅烷和3000吨流化床项目于2015年在江苏徐州投入试生产。

美国REC

REC公司是另一家持续投入开发流化床颗粒硅的企业,在陕西榆林建有1.8万吨颗粒硅产线,2018年投产,2019年产量6016万吨。

亚洲硅业

2018年亚洲硅业经过3年多的研发和试验,攻克了氯硅烷制备颗粒多晶硅的多项技术难题,已经在中试线上实现了用二氯二氢硅生产无硅尘的颗粒硅。既可以用氯硅烷也可以用硅烷气生产颗粒硅,具有更好的灵活性。

2.2 硅片环节：高纯度石英砂

石英坩埚,是单晶拉棒过程中装放多晶硅原料的一次性石英器件。为了减少硅棒杂质,坩埚需要超高的石英纯度以及耐温耐久性。生产石英坩埚的主要原料是高纯石英砂(二氧化硅),而全球目前符合要求的矿源集中在美国北卡罗来纳Spruce Pine地区,因此上游高端单晶硅片的生产面临“卡脖子”风险。而国产高纯度人造二氧化硅将在未来高纯度硅片的生产环节中扮演重要角色。

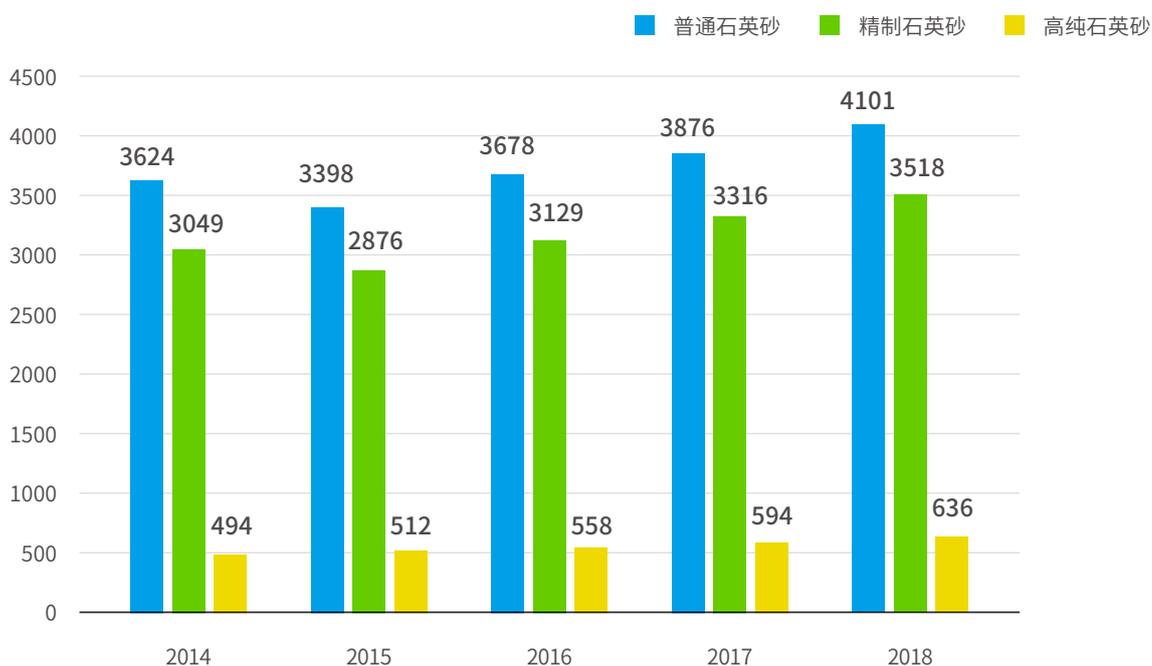
2.2.1 资源格局

美国Spruce Pine是全球高纯度石英砂的主要产区,这个产区在亚洲太平洋地区所持有的市场占有率高达80%。在这个矿区中,只有两家公司可以从这里得到高纯度的石英砂,分别是Quartz Corporation和Sibelco。而在全球的石英矿公司中,只有美国的Sibelco公司,拥有最高纯度的石英矿(99.9992%),并且他们公司的供应链可以长期稳定供货,价格公道。Sibelco旗下公司Unimin(尤尼明)所产的纯度高达99.9995%的石英砂产量达60000吨³⁰。

除了上述提到的美国Spruce Pine地区,挪威西部也有一部分高纯度的石英砂资源,年产量可以达到30000吨左右³¹。

在全球石英砂的供求关系上,美国具有天然的地理优势,石英砂资源优越,再加上其产业链成熟产量大,且有完善的检测系统,使美国的高纯度石英砂资源成为全球的佼佼者。美国是业界最大的出口国;在进口国中,中国和德国的进口量分别达到13000吨和8000吨,其出口单价分别为2608美元/吨和2588美元/吨³²。

2014 - 2018年中国石英砂分品种产量图 | 图 11



数据来源：河北省自然资源厅²³

中国的高纯度石英砂主要分布在江苏连云港地区，江苏太平洋石英也拥有高达99.99%-99.9993%纯度的石英砂，但是高纯度石英砂的产量只有9000吨。

随着我国光伏发电装机量的提高，及光伏市场上游中单晶代替多晶的趋势，我国对于高纯度石英砂的需求也呈现出逐年增长的趋势。预计在2020年和2021年，我国对于高纯度石英砂的需求分别将达到24.6吨和26.2吨。

我国高纯度石英坩埚在发展方面主要面临两个问题。首先，国内的石英砂有先天不纯的劣势。我国的地质结构决定石英原矿的纯度难以比国外原矿的纯度高，国内的石英矿具有流体杂质多、矿体规模小、矿石品质不稳定等缺点。我国的石英矿床包括岩类矿床和砂类矿床，岩类矿床主要有石英岩、石英砂岩、及脉石英矿；砂类矿床主要有石英砂矿。其中石英岩、石英砂岩和天然石英砂合计占我国石英矿资源的99.07%，而高品质的脉石英仅占我国石英矿资源的0.93%³⁴。虽然石英砂可以通过后天加工来提高纯度，但是并不能提高很多。所以在发掘国产高纯度石英矿方面，我国始终都要面临不小的挑战。

其次，国内石英砂高纯度提取技术是在2009年开始发展的，在技术方面相比国外著名的石英砂公司，仍然存在不小的差距。且高纯石英砂的制备是一个系统工程，一方面依赖于制备技术的改进，另一方面对高纯度石英砂产地条件勘探、高纯度石英砂开采流程的优化及完善提出更高的要求。目前我国自主发展高纯度石英砂原料产业还存在很大障碍³⁵。

2.2.2 核心技术分析

由于我国的高纯度石英砂产业面临前文提到的种种问题，从技术上开发可替代高纯度石英砂的人工合成高纯度二氧化硅是一大创新趋势。合成高纯二氧化硅可由硅的卤化物、硅醇或硅酸钠制得，其质量可以满足电子领域的要求³⁶。

- **沉淀法：**目前国内二氧化硅70%的需求量是通过沉淀法制备的。沉淀法的主要原料是水玻璃，即硅酸钠。沉淀法生产二氧化硅的原理是使硅酸钠与空气中的二氧化碳或酸溶液反应生成偏硅酸沉淀，经过滤、洗涤、干燥、煅烧后得到二氧化硅。该生产工艺操作简单，条件易控制，生产成本低，但是产品性能不高，纯度低，容易发生团聚，粒径大。
- **气相法：**该工艺的主要原料包括四氯化硅和甲基三氯硅烷。利用硅烷与氢气氧气混合后，高温条件下发生水解生成无定型的二氧化硅，温度需要达到1200~1600°C，然后通过骤然降温、旋风分离等气固分离得到产品。该生产工艺简单，由于过程中需要高温环境，所以对设备要求高。制备的二氧化硅产品品质好，生产成本较高。
- **溶胶—凝胶法：**原理是利用金属盐的水解，水解过程中会产生凝胶，过滤并对凝胶中的有机溶剂进行洗涤，干燥后得到产品二氧化硅。该生产工艺简单，对设备的要求低，生产过程中除了原料有机溶剂没有添加其他物质，所以制备出的二氧化硅是纯净的，杂质含量较少。但是，因为实验过程中可变因素较多，不能达到准确控制，目前只停留在实验室小试阶段。

2.2.3 相关企业介绍

江苏瀚华硅产业有限公司

公司成立于2004年，拥有自主知识产权的规模化生产体系。超细线：年产1500吨物理法技术工艺生产的高纯超细纳米级石英粉。提纯线：年产3000吨超高纯石英砂，二氧化硅纯度达到99.999%以上³⁷。

2.3 电池环节：钙钛矿电池

尽管晶硅电池单瓦成本近年快速下降，但晶硅电池的材料成本下降空间日趋缩小，同时电池效率最高已经达到26.63%，逼近其理论极限29.3%。而**钙钛矿电池的材料成本低廉，吸光性能突出，并且在短短十年间单结效率从3.8%提升到25.5%，被认为最有希望成为下一代电池材料。**

2.3.1 核心技术分析

技术原理

钙钛矿以俄国科学家Lev Perovski名字命名，具有与钛酸钙（ CaTiO_3 ）相似的立方晶体结构，化学式为 ABX_3 。应用于太阳能电池中的钙钛矿材料，A一般是有机胺离子（如 CH_3NH_3^+ ， $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{NH}_3^+$ ），B一般是二价金属离子（如 Pb^{2+} ， Sn^{2+} 等），X表示卤素离子（ Cl^- ， Br^- ， I^- ）。由于它们的离子半径比较恰当，尺寸较小的有机离子可以调节无机离子间的空隙，使得无机卤化金属可以构成连续的八面体骨架，形成近似于立方体较为规整的晶型。紧密堆叠所得的三维连续结构拥有较窄的带隙和极为理想的能带结构。

优势

- **钙钛矿材料的吸光能力远超晶硅。**1.4eV是为最优半导体带隙。晶体硅的带隙约为1.1eV，理论效率为29.3%，而钙钛矿材料带隙可以非常接近于最优带隙，因此单层钙钛矿电池的理论效率为33%。所以电池中钙钛矿层厚度仅0.3 μm 左右，叠加其他功能层（除玻璃）合计厚度也不超过1 μm 。而晶硅电池里的硅片厚度通常是180微米。
- 耗材用量小，成本低。由于吸光性好，按60片组件计算，原本需要消耗1kg的硅料，现在只需要2g的钙钛矿材料。
- 钙钛矿材料的优化空间更大，可以改进配方的元素及配比。单结电池效率从2009年的3.8%，提升到了目前25.5%，未来空间可期。而晶硅材料只能提纯，材料优化的性价比较低。

- 钙钛矿对纯度不敏感，目前 98%左右的纯度即可满足要求，而晶硅对杂质敏感，需要 99.9999%（6 个 N）以上才能用于电池制造。
- 弱光效果较好，并且光致增益。根据协鑫纳米的单结钙钛矿组件在户外连续工作三个半月的结果显示，组件效率不降反升20%。两者结合，18%的量产效率其实已经相当于21%的晶硅电池效率，而20%的效率则相当于23%的晶硅电池效率³⁸。
- 钙钛矿的工艺简单、能耗低，流程通常在 150°C以下。晶硅电池端的烧结温度在 800-900°C之间，硅片端的铸锭温度更是超过 1500 度。

挑战

钙钛矿材料的稳定性本身具有挑战，接触水和空气会快速分解。常用结构中的 TiO₂ 具有光催化性能，在紫外线照射下也可催化钙钛矿材料发生分解反应。但不稳定性可以通过加工工艺和封装技术提升来克服，并且行业龙头牛津光伏的叠层电池已通过IEC双85测试，国内协鑫光伏也表示其单结产品寿命可长达25年。

叠层钙钛矿电池

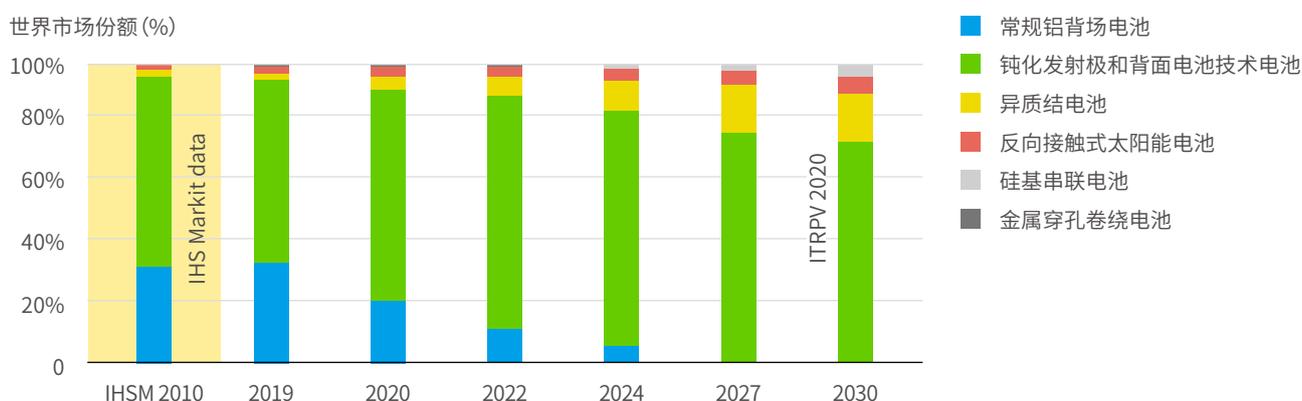
为了超越晶硅的理论效率极限，叠层电池是一种很好的策略。通常叠层器件分为两层，上层为宽带隙的材料，下层是窄带隙的材料。硅电池的带隙是 1.12eV，接近下层电池的最优带隙，因此需要匹配一个上层电池材料，其上层电池材料最优的带隙大约在 1.65-1.7eV 左右。考虑到光学损失及光致次带隙等各种因素，钙钛矿材料是优选的材料。

钙钛矿电池禁带宽度的调整范围为 1.5eV 左右至 1.7eV 以上，当钙钛矿的禁带宽度为 1.55eV 时，它可以吸收波长小于 800nm 的光子，而带隙为 1.12eV 的硅电池可吸收波长小于 1100nm 的光子。将钙钛矿电池与硅电池按能隙从大到小的顺序从外向里叠合起来，让短波长的光被最外侧的宽带隙钙钛矿太阳能电池吸收，波长较长的光能够透射进去让窄带隙的硅太阳能电池吸收，这就有可能最大限度地将光能变成电能，大大地提高了太阳光谱的利用率、电池的性能和稳定性。

理论计算表明，晶硅+钙钛矿叠层电池的理论效率有望达到43%。目前此类叠层钙钛矿电池效率已经达到29.15%（德国亥姆霍兹柏林能源与材料研究中心），业界龙头牛津光伏也在18年底认证达到27.8%，有望能突破30%关口。根据国际光伏技术路线图（11版）预测，2024年叠层电池量产效率将实现27%，2030年达到29%。

2.3.2 太阳能电池产业链的结构预测

太阳能电池产业链结构预测 | 图 13



光伏组件目前在系统成本中占比已经接近40%，成本越低占比越小，驱使产业纷纷追求更高电池效率，以图摊薄系统平衡部件（BOS）非材料成本。从电池效率的角度出发，展望下一个十年，电池环节可能会同时经历三股浪潮。第一波是从p型钝化发射极和背面电池技术电池（PERC）迈向n型-Topcon效率提升2%，到24%左右；第二波是产线换代，做异质结电池，效率提升到24.5%左右；第三波是进一步叠加钙钛矿层，效率进一步提高到27%以上。

电池量产效率路线图 | 表 4

	2020	2024	2030
多晶PERC	20.8%	21.4%	22.0%
p-单晶 PERC	22.8%	23.2%	24.0%
n-单晶 PERT/Topcon	23.1%	24.0%	24.5%
异质结HJT	23.8%	24.5%	25.0%
叠层	-	27.0%	29.0%

数据来源：国际光伏技术线路2020（ITRPV）³⁹

异质结（HIT）工艺主要是四步，包括：清洗制绒→电池正反面沉积本征非晶硅薄膜和掺杂非晶硅薄膜→电池正反面沉积 TCO 薄膜→印刷烘干。HIT 电池产线所需设备包括：制绒清洗设备→PECVD/HWCVD 设备沉积非晶硅薄膜→RPD/CVD 设备沉积 TCO 薄膜→丝网印刷设备→自动分选机。

尽管HIT生产工艺相比P-PERC和TOPCon大幅简化，但目前非晶硅薄膜沉积设备和 TCO 薄膜沉积设备主要依赖进口，占到总投资额70%。目前HIT产线大约6-8亿元/GW，是PERC产线的2倍左右。根据申万宏源测算，随着国产化水平和工艺改进，HIT电池成本（不含税）有望在2025年从目前1.06元/瓦下降至0.57元/瓦。

在HIT国产化快速降本的前提下，结合钙钛矿工艺改进，才能有机会发挥“1+1>2”的协同效果。牛津光伏和梅耶博格的合作，就很好地反映了这种共生的合作关系。梅耶博格投资牛津光伏，反过来牛津光伏向梅耶博格订购异质结产线，并合作研发钙钛矿所需的量产设备。

2.3.3 相关企业介绍

牛津光伏

公司成立于2010年，牛津光伏是钙钛矿-硅串联太阳能电池的制造商，2018年公布了钙钛矿-硅叠层电池28%的转换效率，突破了世界纪录。

纤纳光电

2015年，纤纳光电成立于杭州，专注于玻璃基板的钙钛矿太阳能电池和光伏组件的研发，并使用溶液打印法在光伏组件基底上制备出钙钛矿薄膜。

众能光电

众能光电成立于2015年,是一家从事新型钙钛矿电池和光伏封装材料、光伏器件装备研发和制造的企业,贯彻“器件+装备双轮驱动”的发展战略。

曜能光电

北京曜能科技有限公司成立于2017年,是全球最早进行钙钛矿太阳能电池产业化研发的团队之一,公司成员自2013年起在美国开始进行钙钛矿太阳能电池技术研发。

Saule Tech

2014年,Saule Technologies成立于波兰,该公司使用喷墨打印在塑料等柔性基板上的方法制造钙钛矿太阳能电池。凭借着重量轻和较小面积的组件优势,Saule Technologies开拓室内应用设备市场,钙钛矿将人造光转化为电能,利用物联网,为用于传感和通信的小型设备提供动力。

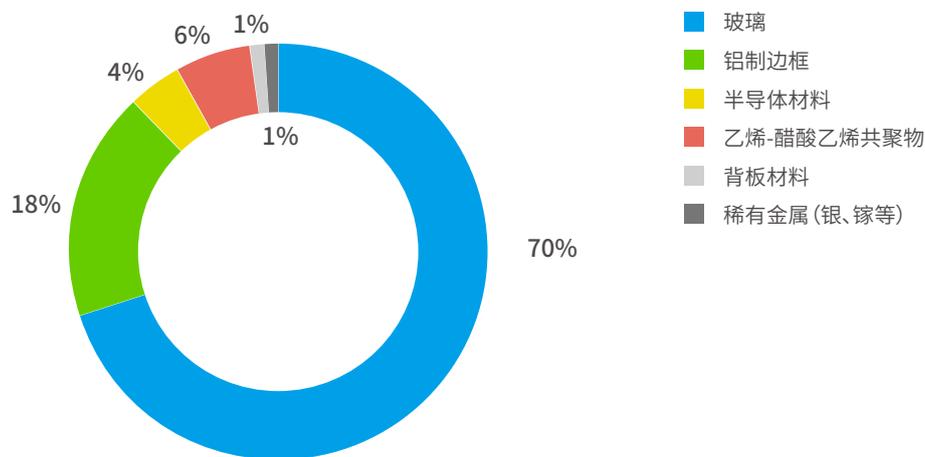
2.4 组件回收处理

光伏行业连年高速发展的背景下,未来光伏行业面临的一大潜在难题就是太阳能光伏板的老化回收问题。按一块250W的光伏组件19千克估算,1GW的报废组件的重量就可以达到7.6万吨。按照我国2019年光伏装机30GW来看,如果这些光伏组件没有妥善处理,会产生228万吨的电子废弃物。然而,我国现在并没有出台有关光伏板回收的政策法规,专注于光伏板回收的企业也是寥寥无几。

2.4.1 市场格局

在对光伏板进行回收的过程中,需要对其组件进行拆分,将铝边框、玻璃和接线盒部分去除,得到硅晶片。以一块250W的光伏组件为例,其中玻璃约占总重的70%左右,铝制边框占到18%,半导体材料占到4%,另外像银、镉、镓等稀有金属占到总重量的1%⁴¹。

光伏组件的结构与重量组成 | 图 14



数据来源:国际光伏技术路线2020(ITRPV)³⁹

2016年国际可再生能源署（IRENA）和国际能源机构的太阳能光伏系统项目（IEA-PVPS）发布了《产品生命终期管理：太阳能光伏板》报告，对于光伏板回收的经济价值做了拆分⁴²。预计在2030年，全球光伏装机量会达到1600GW，在这其中会产生170-180万吨的光伏废品。本报告对其中的主要回收材料按照现在的回收价格进行预算，在这其中所创造出的经济价值，如下表所示：

2030年组件材料回收市场规模 | 表 5

回收材料	累计回收量	单价	创造价值
玻璃	96万吨	30 – 50 USD 每吨	2千8百万 USD
铝框、铜线	7.5万吨和7千吨	1500 USD 每吨、 4600 USD 每吨	1亿4千万 USD
银	90吨	15.74 USD 盎司	5千万 USD
铟、镓等稀有金属	390吨	/	1亿8千万 USD

数据来源：产品生命终期管理：太阳能光伏板（IEA-PVPS）⁴³

2.4.2 政策与核心技术分析

政策现状

中国目前尚未出台专门针对光伏组件回收再利用的强制性政策，专门的光伏组件回收机构也处于空白状态，所以说目前国内的光伏回收产业还有待发展。

发达国家政策

- **日本：**2004年，在日本太阳能发电协会（JPEA）的推进下，日本发行了《关于太阳能电池类物品废弃处理的法律事项》。2015年，日本太阳能发电协会与经济产业省和行业团体合作，制定了光伏发电设备的拆除、搬运及处理方法的相关指导方针。要求企业对用于生产电池的铜与银，通过熔炼的方式取出并回收；对于薄膜太阳能电池常采用的有毒物质铅与硒，鼓励企业在生产时改用其他无毒或少毒的工艺。明确要求企业将使用过及破损的电池板视为工业废弃物，但不强求电池板废弃物的比例（约5%）⁴⁴。
- **欧洲：**2012年以前，一些机构，如PV Cycle已经自主开始回收。随着太阳能技术的推广普及，欧盟于2012年重新修订了《欧洲废弃电子电器产品管理条例》（WEEE 2.0），将太阳能光伏组件纳入管理范围，出台了强制回收光伏组件的相关规定。根据修订条例，2019年以前的电子产品回收率需要达到85%以上，其中材料的再循环率要达到80%以上。2014年初，WEEE修订版在欧盟全面正式生效⁴⁴。

分离和处理技术

美国可再生能源国家实验室（NREL）总结，回收光伏板常见的步骤总结为三步。第一步，通过机器将框架和接线盒拆离。第二步，去除密封剂，运用热力，机械或者化学的过程分离玻璃还有硅片。第三步，通过化学或者电机技术分离还有提取硅片中重要的金属物质，例如，银、铅、铜⁴⁵。

处理技术的核心, 一方面是组件有效分离, 另一方面是含氟背板无害化处理。

组件有效分离的技术路径主要包括⁴⁶:

- **无机酸溶解法:** 用硝酸和过氧化氮混合酸, 在一定的温度条件下, 经过一段时间将乙烯-醋酸乙烯共聚物 (EVA) 溶解掉, 与玻璃分类。此法可保持晶硅片的完整, 但需要进一步对硅晶片进行处理。
- **固定容器热处理法:** 将光伏组件放入焚烧炉中, 设置反应温度600°C进行焚烧。焚烧完成后, 将电池、玻璃和边框等手工分离。回收的各类材料进入相应的回收程序, 塑料类的材料完全焚烧。
- **流化床反应器热处理法:** 使用流化床反应器对废弃光伏组件进行热处理。将细沙放入流化床反应器中, 在一定温度、流速的空气作用下, 细沙处于滚烫流动状态, 具有液体的物理性质。将组件放入流化床中, EVA和背板材料会在反应器中气化, 废气则从反应器中进入二次燃烧室, 作为反应器的热源。对于厚度达到400微米以上的电池片, 可以回收完好的硅片。由于制造技术不断发展, 电池片逐代变薄, 热处理法已无法获得完好的硅片, 因此也只能适用于回收硅料。
- **有机酸溶解法:** 用有机溶剂溶胀EVA, 以达到分离电池片、EVA、玻璃和背板的目的。该法所需时间较长, 大约7天为一次反应周期。另外, EVA膨胀后使电池片破碎且存在有机废液处理问题, 因此该法仍处于实验室研究阶段。
- **物理分离法:** 先将组件铝边框与接线盒拆除, 随后粉碎无框组件, 分离涂锡焊带与玻璃颗粒, 剩下的部分再进行研磨, 用静电分离方法得到金属、硅粉末、背板颗粒和EVA颗粒。该法最终得到是不同材料的混合物, 未能实现单一组分的充分分离, 仍处于实验室研究阶段。

针对含氟背板⁴⁶, 其含有卤族元素, 组件报废若焚烧处理会产生氟化氢等毒性气体。加之碳氟化合物异常牢固的化学结构, 通常的掩埋处理方法在1000年内都无法降解该成分。目前主要的无害化处理方法是, 将背板破碎再通过醇解类试剂进行降解, 得到不溶于醇类溶剂的含氟材料混合物和溶于醇类溶剂的涤纶树脂 (PET) 降解产物, 然后再对醇解产物进行处理。

针对材料提炼回收⁴⁵, 银、铅、铜等物质在光伏组件中的占比在1%左右, 如果单单是发展这种工艺相对的价格比较高。但是硅片是单晶组件中价值含量最高的一个部分, 目前市场上从废旧光伏板中提取的硅料纯度较低, 大部分只属于冶金级硅料, 价格大约在2美元/kg。如果提纯技术得以提升, 纯度较高的回收硅料可以再利用于组件制造, 而光伏组件级别的硅料价格为10美元/kg。因此, 硅提纯技术是一个有价值的开发方向。

2.4.3 相关企业介绍

ROSI Solar⁴⁷

法国初创团队ROSI Solar从生产的过程中入手, 利用其开发的Kerf 切口技术, 分离光伏板生产过程中的细硅颗粒与锯切液, 然后再将分离之后的硅粒再次运用到光伏板的生产上。与此同时, ROSI Solar也开发了可以深度分离报废光伏板中层压的材料, 可以提取纯度非常高的的硅料。ROSI Solar的技术没有使用化学反应, 在一定程度上降低了运营成本。

NPC⁴⁸

日本公司NPC已开发出一种称为热刀法的工艺, 该工艺可在约40秒内将面板的电池与玻璃分离。

Veolia⁴⁹

法国公司威立雅 (Veolia) 为了提高光伏板回收的安全性和效率, 在对于电池板的拆解和分拣工作上采用了自动机器人来完成这项工作。在拆检完成之后, 其中2/3的玻璃会被送往玻璃场; 铝制框架会被送往铝精炼厂; 废塑料在燃烧后

可作为燃料送往水泥厂；回收后的硅可以在贵金属工业被再利用；最后，剩下的缆线和接头会被压碎后以铜珠的形式出售。回收率可达到95%以上。

2.5 系统环节：追踪支架

2.5.1 市场格局

据GTM Research统计，2015年全球地面电站跟踪支架安装量为5.12GW。2017年，全球地面光伏电站跟踪支架安装量增长到11.84GW。目前，美国为全球第一大跟踪支架市场。

随着成本的下降、稳定性的提升以及搭配双面组件的应用，预计2025年光伏跟踪系统市场空间将达到864亿。未来全球光伏新增装机将持续增加，大型地面电站的装机份额虽然下降，但依然超过50%的份额。而跟踪支架由于自身效益方面的优势，渗透率将在2025年达80%。光伏跟踪支架的装机量和市场空间在未来6年的年复合增长率分别达到34%和27%。经测算，2025年跟踪支架装机达173GW，6年复合增长率达34%⁵⁰。

光伏跟踪系统市场空间预测 | 表6

年份	2019A	2020E	2021E	2022E	2023E	2024E	2025E
全球光伏新增装机(GW)	100	115	160	200	250	300	400
YOY	-4%	15%	39.1%	25.0%	25.0%	20.0%	33.3%
大型地面装机(GW)	75	70	93	114	140	165	216
占比	75%	61%	58%	57%	56%	55%	54%
跟踪支架渗透率	40%	42%	45%	52%	60%	70%	80%
跟踪支架装机(GW)	30	29	42	59	84	116	173
YOY	41%	-2%	42%	42%	42%	38%	50%
跟踪支架单价(元/W)	0.68	0.65	0.61	0.58	0.55	0.53	0.50
市场空间(亿元)	204	190	256	346	465	608	864
YOY		-7%	35%	35%	35%	31%	42%

数据来源：GTM Research、IHS、安信证券研究中心⁵²

注：YoY：表示当期数据较去年同期变化多少

根据 GTM Research数据，2017年，全球跟踪支架占地面光伏电站的比例达到16%。预计到2023年，跟踪支架占地面光伏电站的比例将提升至42%⁵¹。目前光伏跟踪支架的主要市场还是美洲地区，跟踪支架需求占全球需求的一半以上⁵¹。近年来在亚洲、澳大利亚及非洲地区，跟踪支架的需求正在快速增长。

在中国，过去几年跟踪支架成本相对较高，并主要应用于领跑基地项目。根据中国光伏行业协会和赛迪智库集成电路研究所的数据，2019年跟踪支架占有率大约是16%（因为2019年领跑基地项目少），预计到2025年，跟踪支架占比将达25%以上²⁰。

2.5.2 追踪支架的价值

平单轴跟踪支架、斜单轴跟踪支架、双轴跟踪支架可以增加电站发电量, 如果与双面组件结合, 还可以出现提升发电量的叠加效应。

采用跟踪支架的光伏系统, 其组件可根据光照情况进行位置调整, 组件与太阳直射光之间的夹角将会减少, 以获取更多的太阳辐照并提高发电效率。据中信博官网披露, 根据现场的实证调查及后期的数据分析, 与固定倾斜支架相比, 目前单轴跟踪器可使电站的发电量的提升幅度在7%-37%的范围之间, 双轴跟踪器最多能提高40%的发电量⁵⁰。若假设组件价格为1.5元, 上网电价为0.35元/度, 有效发电小时数为1300小时, 当跟踪系统发电量增益高于5%时, 跟踪系统即更有经济性。在双面双玻组件快速发展之下, 单轴跟踪系统有望成为最具经济性的支架技术。

跟踪系统发电量增益关于IRR的敏感性分析 | 表7

发电量增益	固定支架	跟踪支架	跟踪支架IRR增益
0%	9.2%	8.0%	-1.19%
5%	9.2%	9.4%	0.28%
10%	9.2%	10.9%	1.78%
15%	9.2%	12.5%	3.31%
20%	9.2%	14.0%	4.89%
25%	9.2%	15.7%	6.50%
30%	9.2%	17.3%	8.15%
35%	9.2%	19.0%	9.83%
40%	9.2%	20.7%	11.56%

数据来源: 中国光伏行业协会、安信证券研究中心⁵⁰ (注: IRR: 内部收益率)

2.5.3 核心技术分析

跟踪支架是硬件和软件结合的产品, 关键技术有机械和电气两个部分。类型有最佳倾角固定式 (以前应用最广泛), 平单轴跟踪式 (目前应用最广泛), 斜单轴跟踪式, 双轴跟踪式和固定可调式 (应用量仅次于固定支架)。

机械部分 (硬件)

- 包括支架结构设计、机械设计、机械加工和镀锌工序。
- 提高稳定性的方法: 用高分子塑料替代钢轴承; 优化组件重量分布设计; 通过风洞测试技术, 以获取跟踪器主轴及各部分扭力变形情况, 确保结构强度和系统稳定性。

电气部分（软硬件结合）

- 包括电控系统设计，驱动系统及配套组装工序。
- 电控设计：包括跟踪控制算法的设计，软件开发，电控箱设计，通讯控制箱设计，云平台系统开发，电控设备组网方案设计等。技术核心在于智能控制算法及配套软件的设计与开发。电控部件直接控制跟踪支架的转动角度，进而影响光伏组件的发电效率。
- 驱动设计：技术核心在于驱动设计开发需根据跟踪支架的技术参数及方案，测算驱动系统的回转保持力矩、驱动力矩、减速比等技术参数，设计回转减速器与直流电机的最佳配比方案，并且进行样品打样及验证定型。
- 人工智能跟踪技术：由于气候和季节因素，不同时间点的反射率不同。AI自主学习可使光伏跟踪系统能找到正反两面相加发电量最大化的有效角度⁵⁰。

2.5.4 相关企业介绍

清源科技（厦门）

清源科技成立于2007年，从事于光伏支架、光伏逆变器、电站开发和清洁能源投资。公司以光伏支架销售作为主营方向，定位中高端客户和市场。清能科技的联动式平单轴跟踪系统采用机械式“力矩打滑器+直线推杆”的跟踪技术，并且采用“天文算法+闭环控制”的方式，实现系统对太阳的自动跟踪。与固定支架相比，清源科技的跟踪支架系统可至少提高20%的发电量⁵²。

深圳市安泰科能源环保有限公司

安泰科成立于2004年，是一家专注于光伏跟踪和固定支架系统的研发，能源项目系统开发和新能源投资的企业。ATEC TRACKER平单轴太阳能跟踪系统能对太阳的方位进行自主跟踪，能够根据太阳各个时间点的方位自主跟踪、尽量多收集太阳能，在恶劣天气下自动开启保护模式，与固定支架相比每年可实现电量增发10%~20%。太阳能跟踪系统坡度容差可达10%，可与组串式逆变器实现通讯、电控一体化。

厦门格瑞士太阳能科技有限公司

公司成立于2011年，在光伏市场，格瑞士结合天文跟踪算法+闭环控制，融合AI人工智能，物联网等新一代信息技术相继推出智能跟踪系统、固定支架、水上支架、BIPV等系统解决方案。格瑞士平单轴跟踪系统采用天文跟踪算法，无阴影跟踪模式，大风保护系统，防雷设计，抗扭稳定系统，无线远程控制等多种功能，在保证安全平衡的前提下能提升太阳能组件转换效率，最高达25%。

杭州华鼎太阳能

2009年，杭州华鼎太阳能成立，公司服务内容包括提供完整的光伏项目整体解决方案和EPC服务，提供太阳能光伏支架系统。华鼎太阳能采用天文算法、主动式跟踪和闭环反馈对跟踪系统控制运行，遭遇恶劣气象天气时，系统能够自动检测并执行相应的规避动作，依靠组串自供电，无需外部交流电源，控制系统与核心传动部件防护等级不低于IP65，满足长期户外环境的应用。

北京中航绿能

中航绿能成立于2017年，公司结合了气相缓蚀技术（VCI）与片锌技术的二维导电特性，研制出防腐涂层材料，替

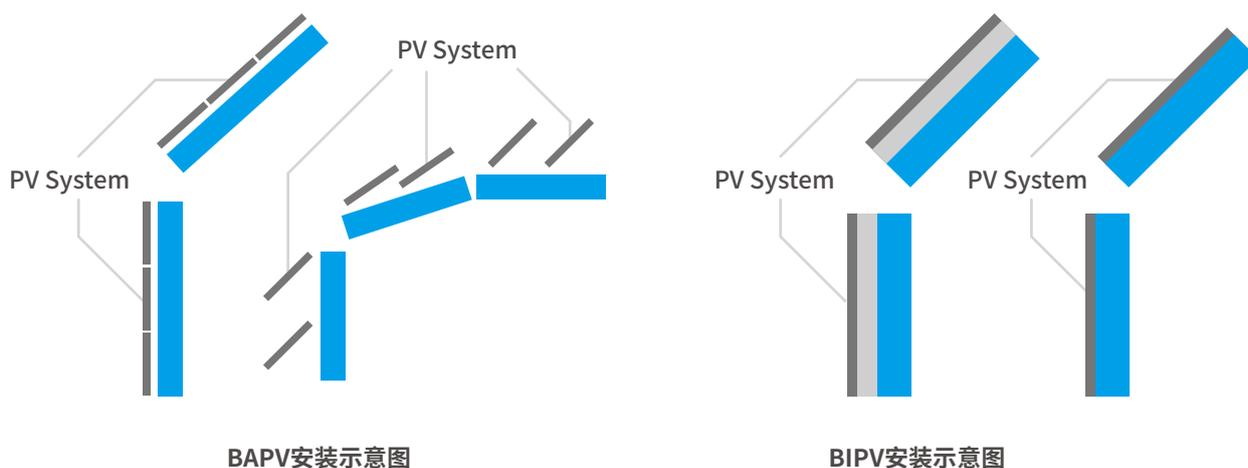
代了有污染的传统镀锌环节（热镀锌的生产过程可能产生有毒废气和废液），攻克了支架供应短缺的困扰。VCI技术耐盐雾寿命达到1000小时以上，是热镀锌的2-3倍，达到防腐和延长寿命的目的。

2.6 应用开发环节：光伏建筑一体化（BIPV）

光伏建筑一体化（BIPV, Building Integrated PV），是将光伏产品集成到建筑自身，成为建筑的组成部分，兼顾美观与功能性，通常以建筑属性为主，发电属性为辅，主要包括屋顶、幕墙、玻璃等形式。需要区别的是，传统屋顶光伏是将光伏安装在建筑屋顶，利用建筑闲置空间进行发电，属于BAPV范畴（Building Attached PV）。

BIPV可以被视为工商业光伏屋顶项目开发模式的一种升级。最近，光伏行业的繁荣发展驱动了BIPV概念的快速回温。在优质屋顶资源日益紧俏的同时，光伏系统造价成本快速下降，使得BIPV组件开始具有直接替代工厂彩钢瓦屋顶的经济性。

BAPV及BIPV安装示意图 | 图 15



数据来源：辉伦太阳能（PhonoSolar）⁵³

（注：PV System：光伏系统）

根据应用场景不同，BIPV大致可以分为屋顶和幕墙两类：

- **光伏屋顶：**将光伏电池与屋顶建材高度集成，安装在建筑物顶部，兼顾发电和承受应力作用。目前应用最广泛的是钢化玻璃夹层结构和中空结构，后者在玻璃之间留有一定间隙，以满足采光设计，并起到隔声和绝热作用。
- **光伏幕墙：**应用在朝向较好、且有大面积幕墙的公寓、办公楼、酒店等建筑上，替代传统玻璃幕墙，可分为半透明幕墙和不透明幕墙。

2.6.1 市场格局

仅考虑工商业, 每年潜在屋顶面积12.3亿平方米, 市场空间1.3万亿。

- **存量屋顶:** 全国总建筑面积为800亿平方米, 其中工商业面积为250亿平方米。假设平均2层楼, 工商业屋顶面积为125亿平方米。假设每年屋顶翻新比例5%, 每年翻新屋顶面积6.3亿平方米。
- **新增屋顶:** 每年建筑业竣工面积为40亿平方米, 假设工商业占比30%, 平均2层楼, 对应每年新增工商业屋顶面积6亿平方米。

BIPV每年潜在屋顶面积: 翻新屋顶+新增屋顶, 约12.3亿平方米。假设光伏板功率为200瓦/平方米, 潜在装机规模为245GW。假设BIPV价格为5.5元/瓦, 对应市场空间1.3万亿。

BIPV 市场空间测算 | 表 8

存量屋顶		
全国总建筑面积	亿平方米	800
其中:工商业面积	亿平方米	250
假设工商业层数	层	2
工商业屋顶面积	亿平方米	125
存量翻新屋顶		
假设每年翻新占比	%	5%
每年翻新屋顶面积	亿平方米	6.3
新增屋顶		
每年建筑业竣工面积	亿平方米	40
假设其中工商业占比	%	30%
工商业屋顶竣工面积	亿平方米	12
假设工商业层数	层	2
工商业屋顶面积	亿平方米	6
潜在屋顶面积		
存量+新增	亿平方米	131
新增+翻新	亿平方米	12.3
BIPV市场空间		
潜在屋顶面积	亿平方米	12.3
光伏板功率	w/平方米	200
BIPV装机	GW	245
BIPV价格	元/w	5.5
市场空间	亿元	13475

图表来源: 天风证券⁵⁴

2.6.2 BIPV的经济价值

BIPV组件将电池组件与屋顶材料结合, 可替代工业厂房彩钢瓦屋顶的组件产品, 节省传统屋顶材料花销。虽然目前BIPV组件较传统光伏组件一般贵0.3-0.5元/W, 但BIPV屋顶装机功率密度更高, 同时25年以上寿命远超彩钢瓦屋顶的10-15年, BIPV屋顶发电收益可在6年内回收投资, 性价比已超过传统的附着在建筑物上的太阳能光伏发电系统 (BAPV) 屋顶模式, 且更美观。若考虑各地相关部门对超低能耗绿色建筑的财政补贴及优惠政策, BIPV屋顶投资回报率或更加可观。

以隆基股份和东方日升的实际项目测算来看, 非自建项目投资回收期约 7.4 年, 在有杠杆的前提下自建项目投资回收期仅约 5.1 年, 对应内部收益率或达 12% 以上, 且业主可通过 BIPV 全生命周期发电收益形成利润收回单层厂房的建筑投资。

彩钢瓦屋顶、传统屋顶光伏、BIPV 屋顶投资收益估算对比⁵⁵ | 表 9

项目	彩钢瓦屋面	传统屋顶光伏	BIPV 屋顶
日间电价 (元/度)	0.72	0.72	0.72
屋顶面积 (m ²)	2000	2000	2000
系统价格 (元/W)	0	4.2	4.6
辅助功率 (kW)	0	250	300
屋顶造价 (万元)	16×2=32 (更换1次彩钢瓦)	16×2+105=137 (更换1次彩钢瓦)	138
屋顶拆除维修 (万元)	2.5 (更换1次彩钢瓦)	5 (更换1次彩钢瓦, 且需拆装光伏构件)	0
25年总投资 (万元)	34.5	142	138
年发电利用小时数 (h)	0	1200 (不考虑翻新屋顶期间损失电量)	1200
25年发电 (万元)	0	540	648
(屋顶) 投资回收期 (年)		6.6	5.3

资料来源: 阳光电源 (于第十五届中国太阳能硅及光伏发电研讨会演讲), 中信证券研究部测算

彩钢瓦屋顶、传统屋顶光伏及BIPV屋顶成本及内部收益率对比 | 表 10

	单位	彩钢瓦	彩钢瓦+BAPV	BIPV
屋顶成本				
屋顶面积	平方米	1000	1000	1000
彩钢瓦单价	元/平方米	100	100	100
彩钢瓦屋顶价格	万元	10	10	10
彩钢瓦使用寿命	年	8-10	8-10	8-10
电站使用寿命	年	25	25	25
彩钢瓦成本	万元	30	30	0
电费				
光伏板功率	w/平方米		200	200
面积利用率	%		85%	100%
电站功率	kw		170	200
年光照小时数	h		1100	1100
年发电量	kwh		187000	220000
假设年用电量	kwh	220000	220000	220000
工商业平均电价	元/kwh	0.6948	0.6948	0.6948
购买电量	kwh	220000	33000	0
年电费	万元	15.3	2.3	0
贴现率	%	5%	5%	5%
25年电费 (考虑贴现)	万元	215.4	32.32	0.00
电站成本				
单价	元/w		4.5	5.5
电站价格	万元		76.5	110
屋顶+电费+电站成本	万元	245	139	110
IRR			14%	13%

图表来源: BIPV, 能否开启光伏新增市场? (天风证券)⁵⁴

国内已有工商业厂房屋顶BIPV项目投资收益测算⁵⁵ | 表 11

项目	隆基股份承建广东某BIPV项目	东方日升自建金坛基地BIPV项目
屋顶面积 (m ²)	10000	10000
安装功率 (kW)	1000	2050
建设投资 (万元)	609	820
年发电量 (万度)	110	225
电价 (元/度)	0.75	0.72
年发电收入 (万元)	82.5	160
静态投资回收期	7.4	5.4

资料来源：隆基股份（于世界未来能源展览会演讲），东方日升，中信证券研究部测算

然而户用BIPV屋顶仍尚未成熟，主要制约因素包括：1) 国内居民大社区聚居的居住方式决定了户用屋顶资源稀缺，2) 户用光伏市场主要集中于农村地区，屋顶空间较小且形貌复杂，不利于BIPV组件因地制宜地匹配，且组件安装时涉及角度方向和易遮挡问题，需在每块组件上配套微型逆变器或功率优化器，单位投资成本过高；3) 国内居民侧电价较低，户用BIPV系统在无补贴情况下投资收益率低；4) 在“隔墙售电”政策尚不清晰、储能配套成本较高的情况下，家庭用户难以对光伏电力有效就地消纳。

另一方面，光伏幕墙经济性还有很大提升空间，目前尚不具备大面积普及的条件。光伏幕墙多用于高端商业楼宇或示范性项目，业主对成本敏感性相对较低，更追求美观，薄膜电池技术凭借彩色透光、可弯折、易定制等优势，与光伏幕墙适配性强。但薄膜光伏幕墙目前成本仍较高，售价通常约1000-2000元/平方米甚至更高，按照发电功率80W/平方米测算，投资回收期一般需15-25年，现阶段仍难具备大规模推广基础。同时，虽然薄膜技术弱光性较好，但光伏幕墙搭建在建筑物外立面，光照倾角条件差，尤其是正午光强最强时照射角度反而越小，因此实际工作中薄膜光伏幕墙发电效果往往大打折扣。

2.6.3 相关企业介绍

上迈新能源

上迈新能源科技有限公司创建于2014年。上迈新能源开发了新型高分子聚合物复合材料，该复合材料应用于高效晶硅太阳能电池的组件封装技术及其产业化生产工艺和装备，成功研制了无玻璃、轻量化、薄片化和柔性化的新型晶硅光伏组件“eArc”。eArc光伏组件的重量可轻至2.8 kg/m²，只有传统光伏组件的30%，厚度可减少到2 mm以下，形状和尺寸可调制，实现定制化设计和生产，便于运输，大幅降低运输成本，并通过了盐雾、氨气和PID测试，实现批量化生产和销售。

赫里欧新能源科技

赫里欧新能源科技有限公司于2017年成立，开发并推出BIPV屋面系统。产品具备高安全性、防火、防水、防潮、耐候、承重特性，可替换彩钢瓦直接作为屋面材料使用，解决目前BAPV技术彩钢寿命短、易生锈、易腐蚀、易漏水的痛点。

杭州桑尼能源科技

杭州桑尼能源科技股份有限公司成立于2001年，桑尼能源研发推出的光伏建筑一体化屋顶发电系统产品，实现了用太

太阳能板建屋顶。太阳能板的安装结构极为稳定、使用寿命长, 整体结构重量轻、用材省, 更易于安装、拆卸、修葺, 可完全替换传统工业厂房屋顶。

2.7 运维环节：清洗机器人

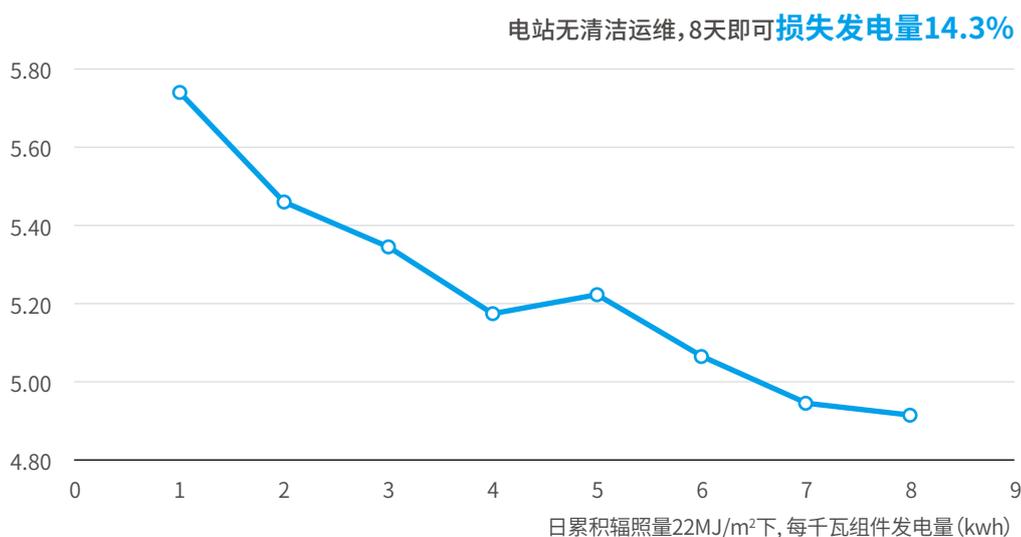
对光伏清洗机器人的需求取决于客户对精细化运维的重视程度。传统上电站运维单位可以凭借经验和历史数据, 来判断需要清洗的时点。而机器人自动高频率清洗带来的优势, 难以在项目投运初期被定量直观地感受到。另外, 运维单位自身预算有限, 考核压力不大, 面对较高的前期投资, 就缺少足够的采购动力。这导致目前只有小部分污染特别严重的电站, 才会配备清洗机器人, 提高清洗频率, 或者是用于示范用途。

2.7.1 清洗机器人的经济价值

首先, 发电量损失是困扰很多电站的主要问题之一。灰尘导致电站发电量每年降低5%以上: 1) 灰尘会遮蔽光伏组件, 降低到达光伏组件的光线; 2) 一些酸碱性较强的灰尘会侵蚀电池板表面, 降低了面板玻璃的透过率; 3) 灰尘的遮盖会降低光伏组件表面的散热性能, 导致光电转换效率降低。

以10MW光伏电站为例, 因为电池板清洗的问题, 电池板实际发电效率只有60-70%左右, 每年损失在100万以上⁵⁶。即使使用人工清洁(一般一个月人工清洁一次), 因为无法做到高频次清洁, 所以发电量损失依然可观。然而光伏清洁机器人已经可以做到全天候自动清洁, 保持光伏组件的清洁, 最小化因灰尘而导致的发电量损失。根据污染程度的不同, 使用光伏清洁机器人可有效提升发电量5%~20%以上⁵⁶。

光伏电站无清洁运维造成的发电量损失 | 图 16



图表来源: 科沃斯; 北极星太阳能光伏网⁵⁷

其次, 目前市场上传统清洁方式的成本大都比较高。以10MW的电站每年清洗费用为例, 假设每月清洗一次, 高压水枪每年的清洗费用在35万左右, 喷淋系统清洗约需要25-30万元, 大型清洁车每年约34万元, 人工清洁约25万。与这些成本较高的清洁方式不同, 机器人每年清洁费用在20万左右。即使与中国成本较低的人工擦洗相比, 清洁机器人也更具经济性⁵⁷。

2.7.2 核心技术与场景分析

场景要求

- **地面电站：**排布集中且规律，有利于清洗机器人成规模覆盖。但地面电站集中在中西部地区，地势情况复杂（特别是山地），要求机器人具有较强场地适应性。另外现场水资源紧张，要求机器人必须免水清洗。
- **分布式电站：**屋顶电站面积比较小，导致单台清洗面积有限，这要求机器人具有更好成本控制。此外，分布式电站存在障碍物多、排布不规则问题，导致一般单排机器人难以作业。其中，工商业屋顶光伏电站受工业粉尘、道路扬尘的严重污染，特别是靠近钢铁厂、锅炉厂、火电厂等的屋顶电站尤其需要强清洁性能的清洁机器人，对清洁频次也有更高要求⁵⁸。
- **渔光互补/农光互补电站：**由于建在水面/农作物之上，运维通道通行性差、灵活性低，所以清洗难度很大，工作耗时多，运维效率低。加之水面上动物排泄物较多/农业耕作会荡起大量灰尘，所以渔光互补/农光互补电站对于清洁力和清洁频次也有一定要求。除此之外，渔光互补电站，对安全性也有很高要求，需要确保设备绝缘性⁵⁸。

技术路线

- **单排机器人：**指清洁机器人只能固定在一排光伏组件上，对该排光伏组件进行清洁，不能越排。机器人横向移动，并用毛刷将积灰从组件表面掸起。其中又分为三种行走模式。
 - **沿边框行走：**机器人的四个行走轮沿组件边框行走，清洗部分的毛刷转向与行走轮的行进方向相反，在毛刷转动过程中先将积灰从组件表面掸起，然后借助毛刷的冲击和旋转气流的共同作用下将灰尘驱赶至组件缝隙处脱落。
 - **沿导轨行走：**需要在横向行走路径上全程铺设导轨，清洁机器人沿着导轨行走。
 - **钢丝绳牵引：**清洗部分固定在钢丝绳上，无需自主转动，依靠钢丝绳的拖动前行。这种方案适用性较大、价格低廉，但钢丝绳容易出现打滑、预紧力丢失等从而造成设备上下行走不协调甚至钢丝绳崩断的问题。
- **跨排机器人：**在单排机器人的基础上，增加跨排摆渡车，将清洗部分在排间转运。但这种方案对轨道载体的平整度要求高，复杂的环境和地形地貌会导致成本陡增，且设备易发生倾覆。
- **便携式机器人：**类似家用扫地机器人，可以在组件表面移动清扫，通过行走轮的转速差实现机器人的转向。但目前为防止清洁机器人从组件上跌落，多以人工现场控制为主，个别厂家正在研发基于视觉跟踪系统的位置判断技术⁵⁹。

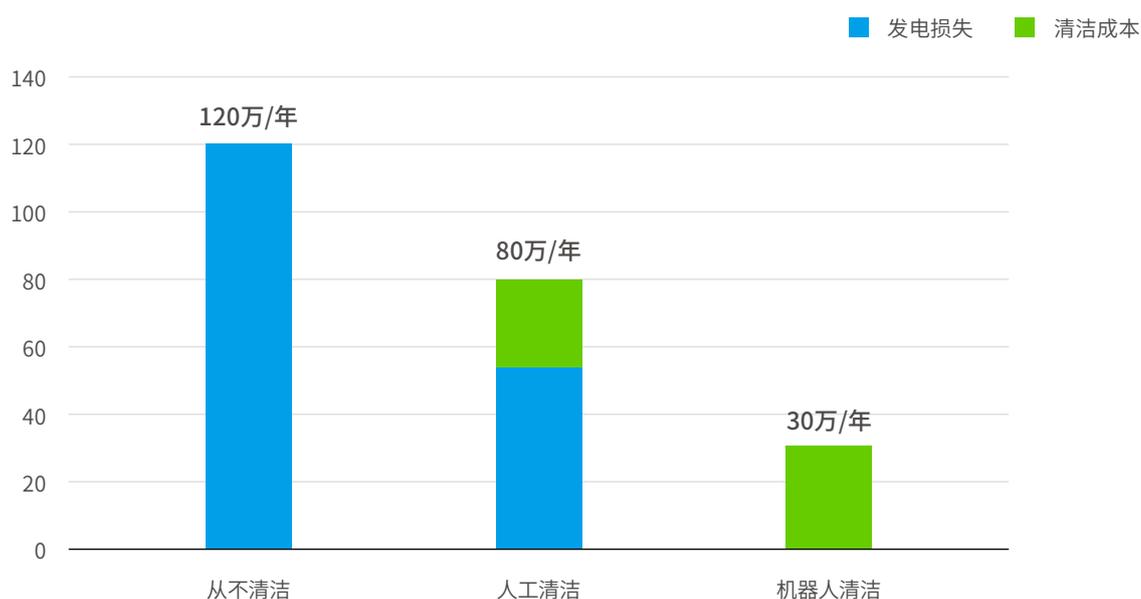
核心指标

- **供电方式：**自带光伏板及蓄电装置，无需外部电源；自带蓄电装置，也适用外部电源供电
- **清洁效率：**每分钟可清洁长度以及可持续工作时长
- **安全性：**是否会压电池板、是否会造成隐裂、是否易“卡死”、是否有自我保护等功能
- **自动化：**全自动化，可按设定方案自动工作；需要操作者遥控作业

- 用水量：无水清洁；需要外接水源
- 单/多行清洁：是否能换行清洁
- 适用性：适用电站类型（分布式/集中式）、适用地形（平原、丘陵、沙漠、湖面）、适用组件类型（组件规格、间隔、错位）、适用环境温度

经济性

各种清洁方式经济性对比(以10MW电站为例) | 图 17



目前清洗机器人主要是直接销售模式。对光伏清洁机器人的年化回报率进行测算，情景假设如下：每台光伏清洁机器人设备价格在1.5~3万元左右，适用寿命预估为5年，平均每台光伏清洁机器人可服务150kW的光伏板，可提升全年光伏发电量10%。在全额上网项目中，每兆瓦投资金额为12~15万元，以10MW项目为例，项目初始投资成本为150万元，经测算，每年由发电量提升带来的收益约为55万元，节省人工清洁成本25万元（2000元/MW/次，1次/月），项目年收益提升80万元。以清洁机器人使用5年为例，设备的一次性投入在第23个月即可收回，剩余37个月是净收益，假设设备故障、检修等占用比例约10%，则5年内的净收益为225万元，年投资回报率约为30%。自发自用余电上网项目中，每兆瓦投资金额为15~18万元，同样以10MW项目为例，项目初始投资成本为180万元，按照0.42元/kWh补贴标准测算，项目总收益提升110万元（发电量提升带来的收益约为85万元，节省人工清洁成本25万元），年化回报率高于35%⁵⁶。

2.7.3 相关企业介绍

上海安轩自动化科技有限公司

上海安轩自动化科技有限公司成立于2013年,是一家基于人工智能、物联网和大数据技术研究的高科技公司。其自主研发的光伏电站智能运维机器人在2015年就获得了全球首张国家光伏质检中心(CPVT)光伏清扫机器人测试认证证书,技术成熟度高、认可度高,有先发优势。iSUN系列光伏智能运维机器人单排清洁机器人,将光伏清洁与故障诊断结合,具有自供电、降水联动清扫、电池管理系统、高通行性、红外故障检测以及自我保护等性能。

山东豪沃电气有限公司

山东豪沃电气有限公司成立于2016年,是一家提供高科技新能源产品设计、研发、生产、供应和运营维护的电气科技企业。其自主研发的HW系列光伏板智能清扫机器人单排清洁机器人,主打无水清扫、无需清洁介质,清扫面积大、清洁效率高达95%,适用场景也十分广泛,包括屋顶、大棚、平原、丘陵、沙漠、湖面等多种区域和地形。

深圳创动科技有限公司

深圳创动科技有限公司成立于2010年,专注于光伏及风电运维无人机、光伏清洁机器人等产品的研发、生产、销售和服务。在光伏清洁机器人领域,创动科技推出了针对分布式光伏电站的D系列便携式清洁机器人和针对集中式光伏电站的C系列跨排清洁式清洁机器人,并都有配套的APP智能控制和云端远程管理、数据分析系统。

郑州德瑞智能科技有限公司

郑州德瑞智能科技有限公司成立于2018年,是专注于新能源运维解决方案的科技创新企业。该公司主要特点为产品选择多样,涵盖单排、跨排、平铺便携式、子母车、三轴柔式光伏清洁机器人产品,适用于集中式、分布式光伏电站,平铺、斜铺等多种场景。德瑞智能的所有光伏清洁产品都应用了柔性轮组设计和拒尘柔性材料刷头,不压电池板,不会造成隐裂,长期使用也不会划伤电池板。同时,还配备了数据采集与监视控制系统(SCADA)光伏清洁机器人监控平台,使光伏清洁机器运维更加智能化、数据化。

2.8 运维环节: 运维无人机

中国无人机巡检技术还在发展初期阶段,国内许多无人机巡检公司还停留在设备和技术层面,然而国外比较领先的公司已经将关注点转移到更加专业的软件和分析层面。**国外无人机巡检企业在商业化方面也更加优秀,针对不同客户群体(电站主、第三方运维企业、投资者等等)定制的专业咨询服务。这就需要国内无人机巡检领域的初创企业不断精进技术、升级产品、提供更加专业化的服务。**

除此之外,由于国外运维精细化程度更高,所以专业化程度也更高,国外公司也更注重对故障发生前的筛查,以及积极开拓小型电站的业务。与之相比,目前国内的光伏电站运维受重视程度并不高。但随着光伏平价时代的到来,预计未来光伏运维会有更加精细化的需求,无人机光伏巡检的市场也会更加广阔。

2.8.1 市场预测

根据彭博新能源财经统计,目前全球范围内共有50GW的光伏项目运用了无人机光伏巡检技术,占全球总装机量的8%。预计未来几年,会有更多光伏项目采用无人机巡检技术,市场增长率可达20%⁶⁰。

中国作为世界上光伏装机量最大的国家, 在无人机光伏巡检方面有很大的市场需求和发展潜力。但短期内, 无人机巡检在中国的市场增长率相较于国际平均水平可能略低, 预计会保持在10%左右⁶⁰。

2.8.2 无人机巡检的价值

太阳能光伏发电系统主要分集中式和分布式, 集中式电站一般占地面积广, 大多建在我国西北部和一些偏远地区, 自然环境较为恶劣; 分布式电站一般建在屋顶、大棚和大面积水域上。然而, 这些光伏电站并网后带来了大量的运营维护压力, 如常规设备检测、光伏板巡检等。

传统运维方式采用的是人工巡检, 效率低, 而且大多依据运维人员经验来判别设备故障, 极易产生偏差。同时, 在偏远地区恶劣的自然环境下, 光伏电站巡检工作是十分困难和危险的。传统的人工巡检已不能满足需求, 无法实现安全高效的光伏巡检目的。

无人机光伏巡检便应运而生。无人机搭载可见光相机、热红外传感器或EL检测设备, 采集光伏组件的可见光、热红外图像或EL数据, 实现无人机智能化巡检。后续利用无人机智能诊断软件对无人机采集的热红外图像和可见光图像进行智能化处理, 实现组件自动化诊断和定位。无人机光伏巡检的优势有:

- **效率高:** 无人机从高空进行巡检, 每次巡检的范围很广; 同时利用红外热成像或EL检测等技术, 可以快速发现问题点。相较于传统的人工巡检, 时间效率能大大提升。两名巡检人员人工巡检每日可巡检1MW (约等于4,000件组件), 而配备光伏巡检无人机的两名工作人员每日可巡检25MW (约等于100,000件组件), 效率提升了20倍以上。
- **精度高:** 人工巡检只能发现有显著发电量损失或者有明显损伤的组件。然而, 利用红外技术或EL检测技术, 清晰度和精度大大提升, 可以发现人工巡检难以分辨的问题, 例如内部隐裂、损坏、焊带故障等问题。
- **安全性高:** 传统的光伏运维手段是运维人员必须高举扫描仪或借助升降车进行太阳能板的运维工作, 有时甚至需要运维人员攀爬屋顶、山地, 或者在水面作业等, 危险系数高, 而光伏无人机检测人员只需要在地面操作, 消除作业环境带来的安全隐患。

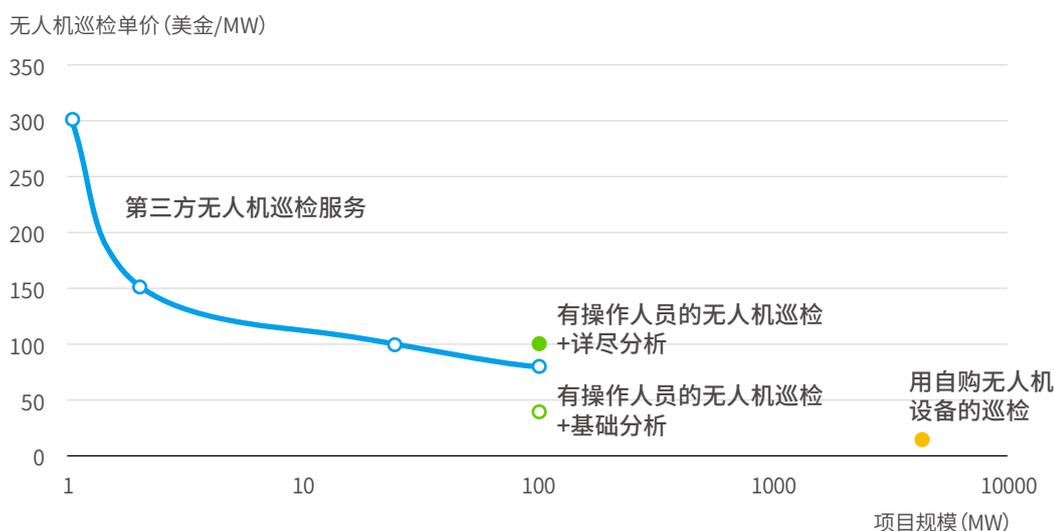
经济性

无人机巡检的收益取决于光伏项目的实际情况, 组件问题越多, 无人机巡检的价值也就越大。目前, 光伏项目的组件故障率约为2-3%, 因此而导致的发电量损失占总发电量的1-2%左右⁶⁰。以10MW的光伏项目为例, 每年因故障导致的发电量损失可达20万度, 约等于10万元的收益损失。

无人机光伏巡检的成本取决于巡检规模、信息精细度, 还有运作方式, 大致成本如下图所示。一般来说, 电站规模越大, 均摊下来的无人机巡检成本就越低。有些第三方巡检公司也会基于分析的细致程度收取不同的费用。对于一些项目规模较大的电站, 相比于购买第三方的服务, 自购无人机巡检设备是经济性最高的。

对比无人机巡检与人工巡检的成本, 人工巡检的成本很大程度上取决于各地的人工成本, 而无人机巡检的主要成本在设备上。目前, 美国光伏人工巡检的单价约为250美金/MW, 远高于无人机巡检的成本⁶¹。我国人工巡检成本略低于美国, 但随着未来人工成本的上升, 无人机巡检的经济性则更加显著。

不同场景下的无人机巡检成本 | 图 18



数据来源: 彭博新能源财经 (BNEF)⁶⁰

2.8.3 核心技术分析

- **无人机+配套系统:** 国内无人机巡检公司主要产品为软件和适配大疆无人机的系统, 但也有部分公司主攻硬件, 自行研发适用于光伏巡检场景的无人机和配套机场。目前, 无人机技术已经比较成熟, 针对光伏巡检这一应用的技术重点应该在续航能力、自动化程度 (自动规划路线、自动巡检、自动换电等) 以及实时传输上。
- **成像技术:** 目前无人机巡检主流使用的是热成像技术, 也有部分公司使用电致发光 (EL) 检测技术。热成像技术主要通过热成像传感器的温差图像判断光伏板是否正常运行 (故障光伏板颜色较暗), 搭配热成像分析软件可有效帮助后期缺陷分析与定位分析。EL技术则进一步提升了清晰度和精度, 可以检测更多故障类型, 例如隐裂、断栅等等。目前EL技术在经济性和技术成熟度上还不如热成像技术, 但随着故障筛查愈发精细化, EL技术的高精度会更加符合未来趋势。
- **智能分析系统:** 光伏巡检的智能分析系统包含的主要技术有图像识别与处理、地理空间技术、AI智能诊断技术等。利用图像处理技术和光伏组件故障检测技术, 可以自动诊断出组件故障以及故障类型判定, 同时结合摄影测量和地理空间技术, 实现组件故障的精准定位。
- **云数据管理:** 巡检的重要价值之一为建立电站的数据库, 更好地管理光伏模块, 这就需要配套的云端平台进行历史数据的记录与存储。同时, 云平台还能帮助客户制作追踪报告及状态预测趋势分析。

2.8.4 相关企业介绍

目前, 无人机光伏巡检行业有许多不同的商业模式和产品, 大致可划分为: 1) 卖硬件设备; 2) 卖可适配第三方无人机的软件系统; 3) 卖软硬件结合的全套解决方案; 4) 卖分析。

金鸿泰 (主要产品软件系统, 尝试将产品拓宽到软硬件结合的全套解决方案)

北京金鸿泰科技有限公司成立于2008年, 于2015年获得了中关村集团战略融资。其自主研发的SolarFly速福来无人机智能巡检诊断系统, 巡检效率高、精度高, 一键式全自动化巡检, 无需人工参与, 设备覆盖广, 并且可对光伏电站进行全面评估和预测。

莱科斯 (主要产品为硬件设备)

苏州莱科斯新能源科技有限公司成立于2015年, 致力于太阳能检测及自动化设备。光伏EL检测设备为该公司的重点产品, 产品规格灵活多变、价格低廉适中、性能稳定可靠。EL技术相较于市面上的红外热成像技术, 在清晰度和精确度上有了进一步的提升, 能识别更多问题, 例如隐裂和断栅。

伯镭科技 (主要产品为软件系统)

伯镭科技Boonray成立于2015年, 是全球泛在机器人技术的引领者, 目前已经在矿山无人化运输、光伏电站智能巡检及园区智能配送等多个场景实现商业落地。产品包括伯镭云无人机多任务云端处理平台和伯镭智飞应用程序, 高度智能化以及用户友好。伯镭科技运用其前期勘探设计系统为天合光能的光伏板屋顶架设提供了全自动、无人化的解决方案, 也利用无人机技术帮助国电投的光伏电站实现“远程集控、无人值守、区域维检”。

创视科技 Advanced Vision Analytics (新加坡) (主要产品为分析和数据分析)

Advanced Vision Analytics (AVA) 是成立于2017年的无人机光伏检测和数据分析公司, 总部位于新加坡, 致力于通过提供可行的解决方案, 帮助金融家、保险公司、开发商、业主、EPC和O & M运营商解决太阳能光伏电站问题。该公司创建了世界上第一个以光伏AI技术为基础的集成分析, 该分析提供了对光伏资产的深度退化分析, 并识别了工厂内部的隐藏缺陷, 以防止发生大量的产量损失。

2.9 各环节相关公司图谱

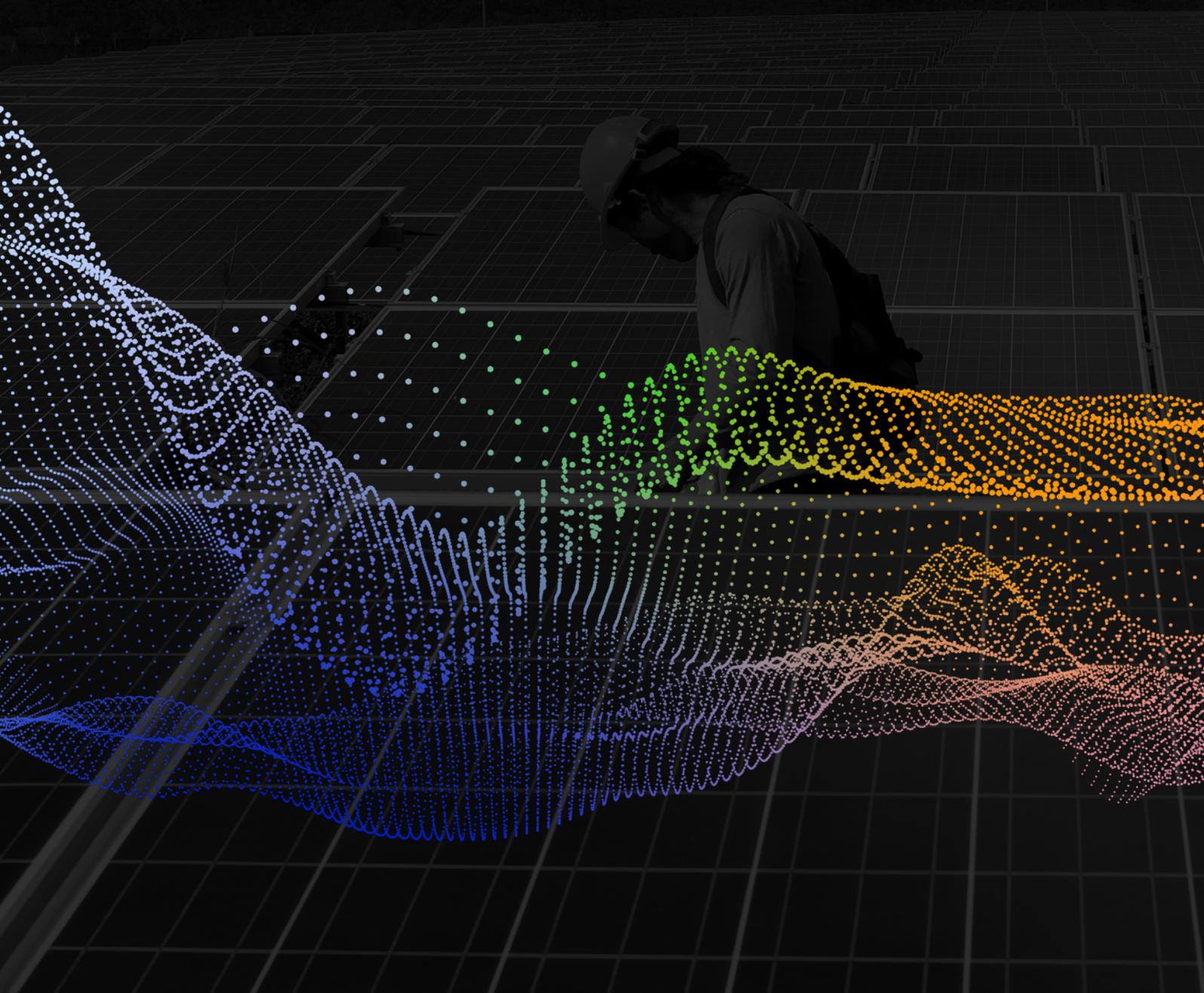
各环节创新公司图谱 | 图19



关于PowerLab能源孵化器

2016年，国际环保组织绿色和平联合加州清洁能源基金会创立了国内第一个专注于可再生能源的非营利孵化器——PowerLab。在致力于孵化与赋能可再生能源创新创业团队和个人的基础上，PowerLab引入“开放式创新”的概念和实践，希望通过可再生能源产业的开放式创新，以场景赋能、协调创新等多种形式助力能源领域初创团队。同时，通过与创新团队的高效合作，引导有实力的能源企业注入多元创新基因、搭建企业创业生态，进而推动中国再生能源多元应用的发展。

2020年，PowerLab继续从可再生能源产业的内部创新出发，基于产业龙头企业的实际业务需求，经过国内/海外项目征集，为企业发现并对接到合适的项目与团队，并予以网络/技术/资金/人才上的深度支持。



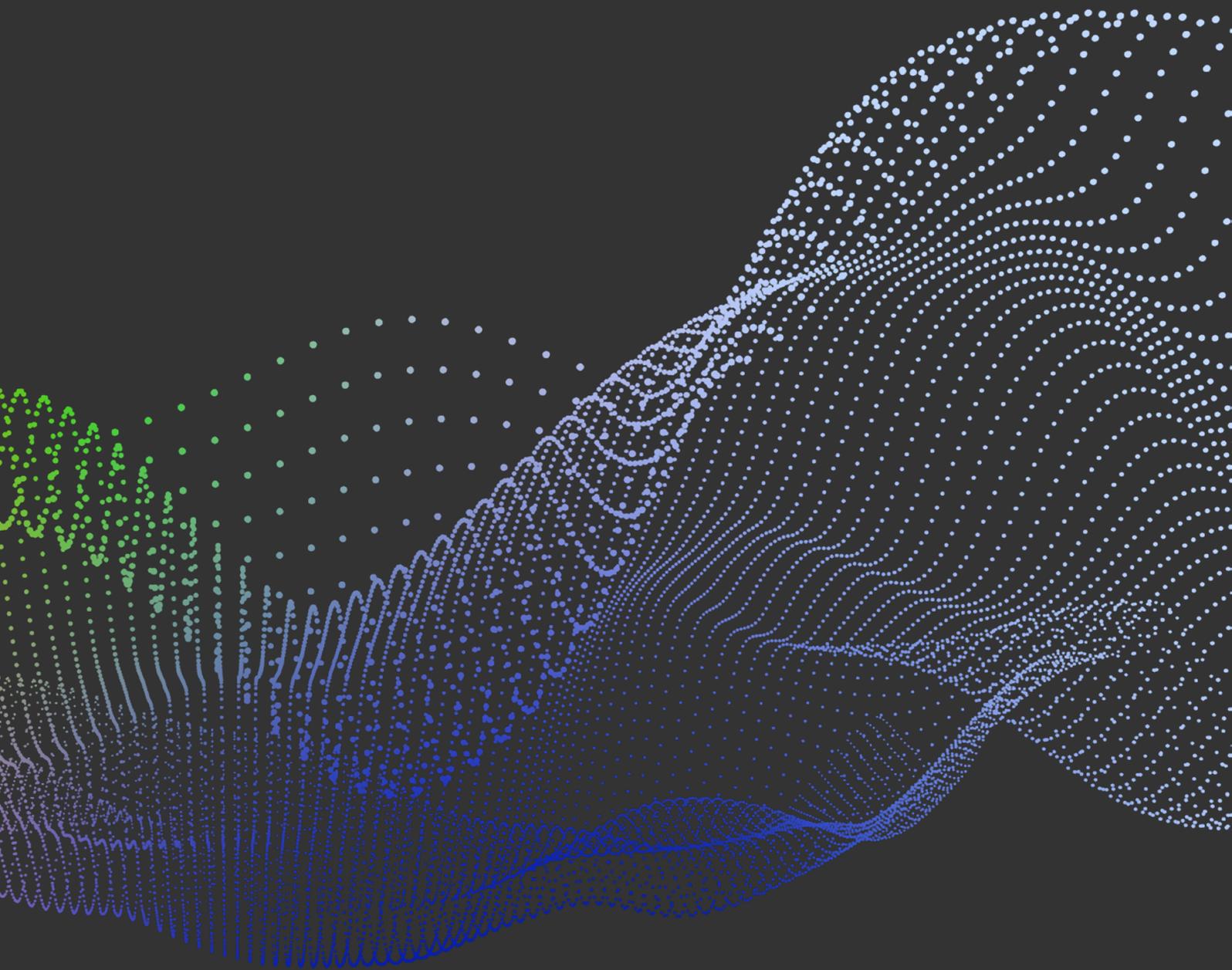
参考文献

1. 国家发展改革委,国家能源局.关于印发各省级行政区域2020年可再生能源电力消纳责任权重的通知[EB/OL],2020-06-01.http://www.nea.gov.cn/2019-05/15/c_138060649.htm
2. 苏南.配额制效果待考:十年博弈终落地 更大考验才刚刚开始[N].中国能源报,2020-06-16.
3. 王秀强.十年磨一剑 “配额制”为可再生能源消纳保驾护航[J].能源,2019
4. José Rojo Martín. 241.6GW! 欧盟重要国家2030年太阳能装机目标统计[OL].PV-Tech,2020-06-23. https://www.sohu.com/a/403795185_465917
5. 董梓童.土耳其启动大规模光伏项目招标总装机量达1吉瓦,涉及74个项目[N].中国能源报,2020-07-13(006)
6. 俄罗斯——光伏市场下一个爆发点?[OL].能源界,2018-12-21.<http://www.nengyuanjie.net/article/21835.html>
7. Solar Energy Industries Association. The Solar+ Decade & American Renewable Energy Manufacturing[R].2020
8. Energy Information Administration. Annual Energy Outlook 2020 with projections to 2050[R].2020:31
9. Ministry of New & Renewable Energy.National Solar Project(2015)[R].2015
10. Ministry of Energy and Mineral Resources.Energy Supply Business Plan2019-2028[R].2019
11. 臧超.最新盘点:东盟十国光伏现状[OL].光伏们,2019-05-29. <https://www.ne21.com/news/show-114254.html>
12. 阳光中盛.东南亚五国光伏需求分析[OL].SOLARZOOM光储亿家,2018-11-30. <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20181130/945441.shtml>
13. 超前布局为二〇三〇年前碳排放达峰创造条件 [N].光明日报,2020
14. Installed power generation capacity by source in the Stated Policies Scenario, 2000-2040[EB/OL].IEA,2020-01-29.<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/installed-power-generation-capacity-by-source-in-the-stated-policies-scenario-2000-2040>
15. GLOBAL ENERGY TRANSFORMATION-A Roadmap to 2050[R].IRENA.2019
16. 王仲颖、李振国等.中国2050年光伏发展展望[R].发改委能源研究所,2019
17. China Renewable Energy Outlook 2019[R].CREO,2019
18. 2018中国能源电力发展展望[R].国网信息研究院,2019

19. Renewable power generation cost in 2019 [OL] . IRENA,2020<https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>
20. 中国光伏行业协会 (CPIA) .中国光伏产业发展线路图(2019年版) [R].2020
21. 中国光伏行业协会 (CPIA) .中国2050年光伏发展展望[R] .2019
22. Gregory M Wilson et al. The 2020 photovoltaic Technologies roadmap[J].Journal of Physics D:Applied Physics,2020,53:49
23. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) Results 2018 [R]. ITRPV,2020
24. 国际新能源网. SiC和GaN技术将成为太阳能逆变器制胜关键[OL].SOLARBE索比光伏网,2020-09-20. <https://news.solarbe.com/201307/01/39215.html>
25. 华能天成.中国新能源电站资产交易白皮书[R].BNEF,2020
26. 德国莱茵TÜV大中华区.2019 中国光伏电站资产交易白皮书[R]. 普华永道,2020
27. 中债资信新能源行业研究团队.多晶硅行业的现状与展望—价格、工艺与成本控制[R].中债资信,2017
28. SSSSS.探讨一下硅烷法生产多晶硅工[OL].海川化工论坛,2009-07-04 <https://bbs.hcbbs.com/thread-502523-1-1.html>
29. Shravan Chunduri, Gøran Bye.Q&A With Silicon Expert Goran Bye About Chances And Challenges Of Fluidized-Bed Reactor Technology[EB/OL].Taiyang News,2017-04-01.<http://taiyangnews.info/technology/the-secret-of-fbr-solar-silicon/>
30. Murray Lines.High purity quartz supply & demand[R].Stratum Resources,2019
31. 国家能源局.2017年光伏电站专项监管报告[R].2018
32. 一文了解全球高纯石英市场概况[OL].中国机械社区,2019-11-13.<https://machine.hc360.com/25/250901.html>
33. 河北省自然资源厅 (海洋局) 科技外事处.高纯石英全球资源现状与我国发展建议[EB/OL],2020-06-10.<http://zrzy.hebei.gov.cn/heb/gk/kjxx/gjll/101590400089009.html>
34. 丁琼.石英股份——信息化加速看上游, 国产石英待腾飞[R].国盛证券.2018
35. 剖析: 国内高纯石英砂产业现状! [OL].粉体技术网,2020-03-31.<http://www.siliconchina.org/2020/0331/25195.html>
36. 墨玉.亟待提高的关键技术——高纯二氧化硅的合成[OL].中国粉体网,2019-10-16.<https://news.cnpowder.com.cn/52528.html>
37. 江苏瀚华硅产业有限公司.企业介绍[OL].中国供应商<https://jshhg1985.cn.china.cn/company-information.html>

38. 2020年光伏市场竞争之三: 钙钛矿[OL].阳光工匠光伏网,2020-01-13.<https://news.solarbe.com/202001/13/319337.html>
39. The International Technology Roadmap for Photovoltaic 2020[R].Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau,2020
40. 太阳能光伏废组件回收处理方法[OL].午日新能源网,2017-05-26.<http://www.nowpv.com/news/166.html>
41. 光伏组件的回收可行性及前景分析[OL].中国有色金属协会硅业分会,2016-06-20.<http://www.siliconchina.org/2016/0620/20383.html>
42. 2050年回收光伏材料将创150亿美元价值[OL].Ofweek太阳能光伏网,2016-06-22.<https://www.china5e.com/news/news-948738-1.html>
43. End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels[R]. IEA-PVPS,2016
44. 第一批光伏组件即将退役 看各国如何进行回收[OL].中国化学信息周刊,2018-09-13.https://www.sohu.com/a/253735254_806277
45. The Afterlife of Solar Panels[R]. BNEF,2020
46. kuogua.光伏组件回收技术成熟吗? [OL].坎德拉学院,2019-12-24.https://mp.weixin.qq.com/s/xQur-GU_H8-LY9-I8H2RIQ
47. ROSI Solar. <https://www.rosi-solar.com/>
48. PV Panel Recycling Service[OL].NPC incorporated,2020-09-30.
<https://www.npcgroup.net/eng/solarpower/reuse-recycle/recycle-service>
49. 揭秘威立雅欧洲首家光伏板回收厂, 利用率达95%[OL].威立雅,2019-03-18.<https://www.nengapp.com/news/detail/2497585>
50. 邓永康, 吴用, 彭广春.一论光伏跟踪系统: 四大核心壁垒, 远非“打铁”那么简单! [R].安信电新,2020
51. 江苏中信博新能源科技股份有限公司.首次公开发行股票并在科创板上市招股说明书(注册稿) [R].2020
52. 追光路上砥砺前行, 清源科技为全球首批特高压光伏项目提供光伏跟踪支架系统[OL].SOLARBE索比光伏网,2020-08-21.https://www.sohu.com/a/414260391_418320
53. Phonosloar.<http://www.phonosolar.com/international/Solutions.html#Residential>
54. 邹润芳.BIPV, 能否开启光伏新增市场? [R].天风证券,2020
55. 弓永锋、林劼.特斯拉眼中的BIPV 真的“香”吗? (附股)[R].中信证券,2020
56. 光伏清扫机器人案例分析[OL].光伏们,2019-11-28.<https://mp.weixin.qq.com/s/iElQOyS586n2tGnc1EFMzw>

57. 清洁机器人进驻太阳能电站挽回小灰尘带来的大损失[OL].北极星太阳能光伏网,2016-11-03.<http://guangfu.bjx.com.cn/news/20161103/785866.shtml>
58. 电站“四”大问题场景运维解决方案看这里! [OL].安轩科技,2020.<http://www.anxtec.com/nd.jsp?id=139>
59. 董伯先, 刘冬.光伏电站清洗, 哪种方式又便宜、又快、又好? [OL].智汇光伏,2019-08-29 <https://mp.weixin.qq.com/s/45emCLYhm4EwjwOYyHyuQ>
60. Thermal Eyes Find Faults in PV Modules[R]. BNEF,2020
61. Drones Cut Cost of Thermographic PV Panel Inspections[OL].UAS Vision,2016-09-15. <https://www.uasvision.com/2016/09/15/drones-cut-cost-of-thermographic-pv-panel-inspections/>



ENERGY • GEEKY • FUN • INNOVATIVE

有趣的 有料的
新能源创新故事

微信号: [powerlab_innovators](https://www.powerlab.com/innovators)





GREENPEACE 绿色和平

绿色和平是一个全球性环保组织，
致力于以实际行动推动积极的改变，
保护地球环境与世界和平。

地址:北京东城区东四十条94号亮点文创园A座201室

邮编:100007

电话:010-65546931

传真:010-64087851

www.greenpeace.org.cn