

中国光伏和光伏生产设备制造行业分析

——以拉普拉斯新能源科技股份有限公司为标的*

黄靖翔 21300680007

黄山 21300680008[†]

2024 年 5 月 22 日

*本文是 2024 年春产业经济学的期中作业。笔者特别感谢 Berkeley Energy Camp 对本文模型部分的帮助。本文中的数据都已注明出处，未注明的均来自拉普拉斯新能源科技股份有限公司《招股说明书（申报稿）》。复现本文图片需要的代码和数据上传到了笔者的Github 仓库，相应的数据来源也已经标识在了绘图的源文件中，需要的读者可以查阅。

[†]黄靖翔负责光伏设备制造行业、企业以及模型部分；黄山同学负责光伏行业部分和结论。图表、引入等内容均是二人的共同工作。

目录

1 引言	4
2 光伏行业概况	5
2.1 光伏行业供需格局	5
2.1.1 各国政策文件规划主导光伏行业需求	5
2.1.2 光伏度电成本的经济性也从市场机制的角度促进了光伏发电的需求	5
2.1.3 即便需求持续高增，光伏仍面临严重的产能过剩	6
2.2 光伏产业链与一体化率测算	9
2.2.1 光伏产业链上下游	9
2.2.1.1 硅料	9
2.2.1.2 硅片	9
2.2.1.3 电池片	9
2.2.1.4 组件	9
2.2.1.5 光伏电站	10
2.2.2 一体化成本优势测算	10
2.2.2.1 硅片单 W 成本	10
2.2.2.2 电池片单 W 成本	10
2.2.2.3 组件单 W 成本	10
2.2.2.4 定量计算	11
2.3 光伏电池片技术迭代与溢价测算	11
2.3.1 光伏电池片主流技术与发电效率比较	12
2.3.1.1 Perc 技术	12
2.3.1.2 TOPCon 技术	12
2.3.1.3 HJT 技术	12
2.3.2 TOPCon 技术溢价测算	13
2.4 光伏设备制造	16

3	企业	16
3.1	基本信息和成长阶段	16
3.1.1	2016-2019 年：研发和探索阶段。	17
3.1.2	2020-2021 年：客户对接导入阶段。	17
3.1.3	2022 年至今：快速发展阶段。	18
3.2	业务和财务分析	18
3.3	行业互动	21
3.3.1	行业上下游	21
3.3.1.1	上游供应商情况	21
3.3.1.2	下游客户销售情况	21
3.3.2	主要竞争对手	21
3.3.3	企业应对	22
4	模型	24
4.1	电力提供商	25
4.2	组件生产者	27
4.3	产业均衡	31
4.4	对模型的评论	32
5	总结	33

1 引言

在 21 世纪的能源变革中，可再生能源的发展不仅是技术进步的象征，也成为了全球能源市场和新能源政策中的核心议题。作为清洁能源的重要组成部分，光伏行业的迅猛发展与普及正在重塑全球能源结构，同时也推动了相关制造业的技术与市场进化。国内层面，根据国家能源局公布的 2023 年数据，全国累计发电装机容量约 29.2 亿千瓦，其中，太阳能发电装机容量约 610GW，占比达 20.89%，正式超越水电约 420GW 的装机规模，成为全国装机量第二大电源形式，也是装机容量最大的新能源形式。全球层面，中国光伏相关产品的出口成就引人瞩目，2016 年时，中国已经生产了全球 52% 的多晶硅、81% 的硅片，并拥有全球 70% 的晶体模块产能 (Ball et al. (2017))，在近年来宏观经济不景气的背景下，光伏电池片已经成为了中国出口“新三大件”之一。因此，深入考察光伏行业产业链具有极强的现实意义。本文将拉普拉斯新能源科技股份有限公司为案例，探讨其在光伏电池片生产设备制造业中的地位，分析其产业链的发展现状及未来趋势，以及这一行业如何在全球能源转型的大潮中找到持续发展的机遇。

在探讨光伏电池片生产设备行业的现状及其未来前景之前，有必要首先阐述光伏行业的发展背景及其对上游设备制造业的深远影响。

长期以来有观点认为，中国光伏行业的蓬勃发展主要受益于政府的产业政策。不论这一观点的争议，我国政府对光伏行业的大量密集的补贴不可否认地帮助大量企业渡过了成立之初最困难的阶段，近年来已经有大量企业实现了利润由负转正。林毅夫 (2017) 指出政府在新能源领域的补贴帮助企业具备了自生能力，从而在长期发展和国际竞争中居于有利位置。因此，讨论整个光伏行业就不能离开政府的产业政策，我们非常关心这样的产业政策对行业发展的促进作用究竟有多大，也同样关心产业政策对行业的结构性影响。

聚焦于行业内部，光伏行业的扩张速度与其技术革新的步伐紧密相连，而这一切的核心动力来自于对生产设备的不断需求与更新。当前，光伏市场的供需关系呈现出一定的失衡状态，产能的过剩以及价格的竞争逼近了头部厂商的成本线，这一现象不仅直接影响到电池片生产厂商的盈利模式，更深层次地影响到了生产设备的市场需求。在光伏组件严重过剩，以至于组件价格逼近头部厂商成本线的当下，作为组件生产直接上游的电池片生产设备行业的前景何在？通过对光伏行业的深度分析与定量测算，我们认为前景来源于两个

方面。

首先，头部光伏生产厂商通过自行购入电池片生产设备并切入电池片制造环节，实施垂直一体化战略。这一策略不仅优化了供应链管理，还显著降低了生产成本，增强了市场竞争力。因此，组件厂垂直一体化的需求成为了推动设备更新的关键因素。

此外，电池片技术的迭代常伴随着对原有生产线的升级或完全替换，设备制造商因此在技术溢价的合理范围内找到了增长点。这种由下游市场需求驱动的上游设备更新需求，表明尽管面临诸多挑战，光伏电池片生产设备行业仍具有一定的市场生命力。

本文余下部分将按照下面的方式安排：第2部分介绍光伏行业和相应的光伏生产社别制造行业的概况，第3部分具体介绍拉普拉斯新能源科技股份有限公司，第4部分提供了一个可操作的模型。

2 光伏行业概况

2.1 光伏行业供需格局

2.1.1 各国政策文件规划主导光伏行业需求

光伏组件具有可再生能源的特性，在环境保护方面具有正外部性，其需求主要依赖于各国能源转型和碳中和计划的政策文件指导，如我国的“十三五”规划和“十四五”规划，以及欧洲的 RED 和美国的可再生能源法案。2023 年，全球光伏装机量同比增长 77.83%，其中中国的光伏装机量增长了 147.48%。中国、欧洲和美洲是新增装机量最多的三个地区，其中中国约占全球装机量的 35%。如图1所示，预计全球光伏装机增量将在 2024 年和 2025 年分别达到 451.3GW 和 498.1GW，CAGR 约为 10.34%。

我们非常关心相应的产业政策对光伏产业的影响，并希望构建反事实，来回答产业政策对中国光伏政策究竟有多大的福祉作用这一问题。我们会在文章的第4部分详细展开。

2.1.2 光伏度电成本的经济性也从市场机制的角度促进了光伏发电的需求

LCOE（平准化度电成本）是一种重要的量化指标，最初被用于评估火电、水电、气电等传统能源项目的发电成本，并逐渐扩展到新能源领域。此指标将能源项目在其整个生命

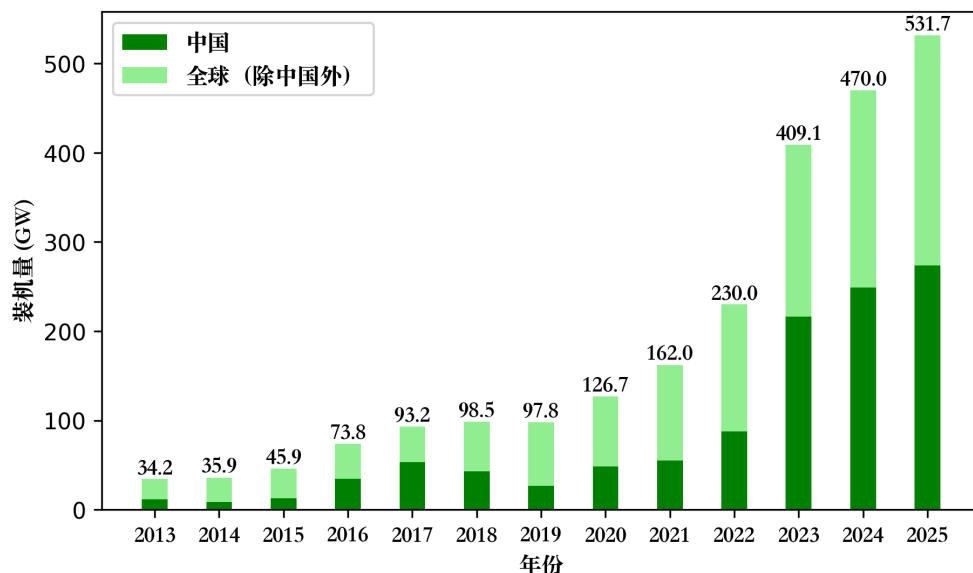


图 1: 全球光伏新增装机量（含预测）（单位：GW）

周期内产生的总成本和总发电量，按照预设的折现率进行现值计算，从而得出单位电能的平均成本，这使得该指标成为比较不同能源项目发电效率的有力工具。

如图2所示，我们发现光伏电站与岸上风电这两种新能源发电方式的 LCOE 远低于传统不可再生能源如煤炭和天然气的 LCOE。这标志着多年的政策补贴取得了成效，也是近年来我国得以落实光伏全面“平价上网”的重要技术前提。

2.1.3 即便需求持续高增，光伏仍面临严重的产能过剩

中国是世界光伏生产的中心。2022 年，中国光伏企业组件的全球市场份额超过了 90%。表1展示了国内一二线厂商和国外主要厂商的现有产能数据和未来三年内的计划投产情况，并发现在不考虑旧产线淘汰的前提下，2022 至 2025 年的全球名义产能分别为 475.5GW、894.6GW、1253.3GW、1560.45GW。而进一步考虑组件的技术构成，传统的 Perc 技术占我国组件名义产能的比例逐年为 25.9%、40.5%、42.13%、43.64%，而 TOPCon 技术的占比为 63.83%、46.3%、46.13%、43.42%。我们可以明显看到由传统的 Perc 技术向 TOPCon 技术转型的趋势。

然而以 2025 年为例，我们前面测算得到光伏行业组件的需求为 498.1GW，维持约 10% 的 CAGR；组件供给为 1560.45GW，是需求的 3.13 倍。结合图??中展示的光伏组件价格

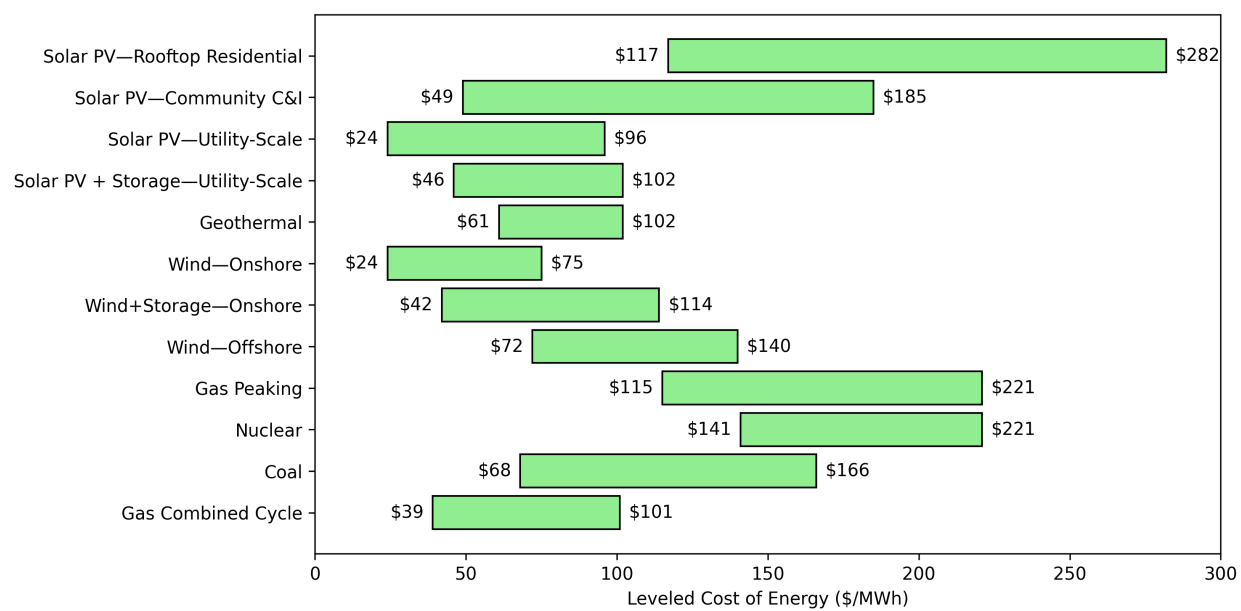


图 2: 不同新能源发电方式 LCOE

8

企业	2022				2023E				2024E				2025E			
	总和	TOPCon	HJT	PERC	总和	TOPCon	HJT	PERC	总和	TOPCon	HJT	PERC	总和	TOPCon	HJT	PERC
晶科能源	70	24	0	46	110	51	0	59	138	87	0	51	166	115	0	51
隆基绿能	85	0	10	75	130	20	34	76	190	30	0	160	230	50	0	180
晶澳科技	50	7.2	0	42.7	95	36	0	59	130	70	0	60	160	80	0	80
天合光能	65	8	0	57	95	40	0	55	130	50	0	80	160	65	0	95
通威股份	14	9	1	4	80	25	1	54	100	41	1	58	130	55	1	74
正泰新能	20	4	0	16	49	34	0	15	60	34	0	26	70	40	0	30
爱旭股份	0	0	0	0	20	10	0	10	35	25	0	10	45	35	0	10
一道新能	20	20	0	0	30	30	0	0	40	40	0	0	50	50	0	0
阿特斯	32	10	0.25	21.75	50	30	0.25	19.75	80	34	0.25	45.75	100	45	0.25	54.75
华晟新能源	2.7	0	2.7	0	10	0	10	0	20	0	20	0	30	0	30	0
TCL 中环	10	0.5	5	4.5	36	6.5	15	14.5	42	11.5	30	0.5	48	16.5	30	1.5
东方日升	25	7.6	0	17.4	45	19.6	0	25.4	65	19.6	0	45.4	75	25	0	50
亿晶光电	10	10	0	0	15	15	0	0	20	20	0	0	25	25	0	0
协鑫集成	15	15	0	0	30	30	0	0	35	35	0	0	40	40	0	0
润马光能	0	0	0	0	2	2	0	0	18	18	0	0	23	23	0	0
其他	26.8	N/A	N/A	N/A	40.2	N/A	N/A	N/A	60.3	N/A	N/A	N/A	90.45	N/A	N/A	N/A
中国	445.5	115.4	18.95	284.35	837.2	339.1	60.25	387.65	1163.3	490.1	51.25	536.65	1442.45	629.5	61.25	626.25
印度	18	N/A	N/A	N/A	38	N/A	N/A	N/A	60	N/A	N/A	N/A	80	N/A	N/A	N/A
美国	4	N/A	N/A	N/A	10	N/A	N/A	N/A	18	N/A	N/A	N/A	23	N/A	N/A	N/A
欧洲	8	N/A	N/A	N/A	9.4	N/A	N/A	N/A	12	N/A	N/A	N/A	15	N/A	N/A	N/A
总计	475.5	115.4	18.95	284.35	894.6	339.1	60.25	387.65	1253.3	490.1	51.25	536.65	1560.45	629.5	61.25	626.25
技术占总产能比例	N/A	25.90%	4.25%	63.83%	N/A	40.50%	7.20%	46.3%	N/A	42.13%	4.41%	46.13%	N/A	43.64%	4.25%	43.42%

* 爱旭股份选择了 ABC 技术，而非 TOPCon 或 HJT 技术，采用 ABC 技术的产量列在了该行 TOPCon 列中。

表 1: 行业主要企业的组件产能以及中国市场销售占比（含预测值）（单位：GW）

近年的走势，或许不难理解为何组件价格会逐年下跌至头部厂商成本线。

2.2 光伏产业链与一体化率测算

2.2.1 光伏产业链上下游

光伏产业链从上游到下游主要分为五个环节：硅料、硅片、电池片、组件和电站运营。

2.2.1.1 硅料

硅料是光伏产业链的起点，主要指用于制造太阳能电池的多晶硅和单晶硅。这一阶段的生产涉及将原材料石英砂通过炉炼转化为高纯度的多晶硅。多晶硅的生产是一个高能耗且技术密集的过程，生产过程需在高温条件下进行，以确保获得高纯度的硅材。生产出的高纯度硅块将被送往下游制造硅片。

2.2.1.2 硅片

硅片是由硅料切割而成的薄片，是制造太阳能电池的直接材料。制造硅片主要通过线切割技术，这种技术可以将硅块精确切割成厚度仅有几百微米的硅片。硅片的质量直接影响到太阳能电池的效率和寿命。

2.2.1.3 电池片

电池片是通过在硅片表面施加多层导电材料制成的，其主要功能是将太阳光转换为电能。这一过程包括表面处理、掺杂、涂覆抗反射层和制备电极等步骤。表面处理主要是为了增加光捕获，而掺杂则是引入特定元素以形成 P-N 结。P-N 结具有的光电效应性质是太阳能电池产生电流的基本原理。电池片的效率不仅取决于硅片的质量，还取决于掺杂和电极制作过程的精度。目前主流的电池片技术为 Perc、TOPCon 和 HJT。

2.2.1.4 组件

组件是由多个电池片组合封装而成的，通常被称为太阳能板。组件的制作过程包括串联连接电池片、增加背板和边框以及涂覆透明的 EVA 薄膜以提供保护。组件的设计与制造旨在最大化捕获光能并转换为电能，同时保证在各种环境条件下的稳定性和耐用性。组件的效率和可靠性是决定光伏电站整体发电效率的关键因素。

2.2.1.5 光伏电站

光伏电站是光伏产业链的末端，涉及到光伏组件的实际应用。它包括光伏组件的安装、电力输送设备的配置以及电站的日常运维。电站的设计需要考虑地理位置、气候条件和地面条件等因素，其发电效率还取决于电站管理和维护的有效性。此外，建设光伏电站通常需要较高的初始投资，包括购入大量的组件设备和 BOS 安装成本。因此，项目开发者和投资者往往依赖于高杠杆借贷来筹集必要的资金。

2.2.2 一体化成本优势测算

本节详细介绍光伏产业中硅片、电池片和组件的单 W 成本的构成和计算逻辑，同时定量计算一体化生产如何通过成本控制来巩固组件厂商的成本优势。

2.2.2.1 硅片单 W 成本

硅片成本包括硅成本和非硅成本，是计算下游材料成本的基础。

$$\text{硅片单 W 成本} = \text{硅成本}_{\text{硅片}} + \text{非硅成本}_{\text{硅片}} \quad (1)$$

2.2.2.2 电池片单 W 成本

电池片成本依赖于硅片的成本，这里区分硅片是自产还是外采。

$$\text{电池片单 W 成本} = \begin{cases} \text{硅片单 W 成本} + \text{非硅成本}_{\text{电池片}}, & \text{如果自产硅片} \\ \text{外采硅片成本} + \text{非硅成本}_{\text{电池片}}, & \text{如果外采硅片} \end{cases} \quad (2)$$

2.2.2.3 组件单 W 成本

组件成本的计算不仅取决于电池片的成本，还需考虑电池片是自产还是外采，这反映了一体化生产的深度。

$$\text{组件单 W 成本} = \begin{cases} \text{电池片单 W 成本} + \text{非硅成本}_{\text{组件}}, & \text{如果自产电池片} \\ \text{外采电池片成本} + \text{非硅成本}_{\text{组件}}, & \text{如果外采电池片} \end{cases} \quad (3)$$

这种详细的成本核算方法让我们深刻了解了产业链上下游环环相扣的特征。

2.2.2.4 定量计算

为了定量计算一体化带来的成本优势，我们搜集了产业链中，硅片、电池片和组件各个工艺环节的具体成本，如硅片生产中的每千克方棒长度、槽距、金刚线直径等数据，电池片生产中的银浆用量、靶材价格、辅材价格等数据，组件生产中的玻璃成本、EVA 胶膜用量、EVA 胶膜价格等数据。通过将数据代入上述式子中，我们得到了表2中一体化率水平对毛利率的影响，其中展示了不同一体化水平下的单 W 成本、单 W 报价、单 W 毛利以及相应的毛利率。从表中可以看出，随着一体化生产水平的提升，即从仅自产组件到全产业链一体化（即自产硅料、硅片、电池片和组件），单 W 成本逐渐下降，毛利率显著提高。例如，仅自产组件的毛利率为 7.02%，而全产业链一体化（即自产硅料、硅片、电池片和组件）的毛利率达到 18.49%，这说明更高级别的一体化能够有效降低生产成本，并增强价格竞争力。

水平	单 W 成本	单 W 报价	单 W 毛利	毛利率 (%)
组件	1.057	1.13	0.079	7.02%
组件 + 电池片	1.034	1.13	0.096	8.51%
组件 + 电池片 + 硅片	0.929	1.13	0.201	17.74%
全产业链一体化	0.921	1.13	0.209	18.49%

表 2: 一体化水平对毛利率的影响 (元/W)

这些结果明确表明，通过整合生产链的不同环节，光伏制造商能够减少对外部供应链的依赖，优化生产效率，从而实现成本控制并提升经济效益。一体化不仅为企业带来了成本上的直接优势，还通过简化供应链和提高生产的可控性，为企业在竞争激烈的市场中构建了强大的成本护城河。这表明了组件产能严重过剩的当下，电池片设备制造商的机遇之一便是头部厂商一体化的需求。

2.3 光伏电池片技术迭代与溢价测算

2023《财经》碳中和高峰论坛上提出了“光伏先进产能永不过剩”的口号，用于在产能严重过剩的背景下为光伏行业的垄断竞争者进一步以先进技术扩大产能提供依据，但我

们认为该口号一方面违背了企业投资决策所遵循成本与收益的决策框架，另一方面也忽视了产业经济学中替代品关系蕴含的经济学性质。只有当新技术产线的定价匹配其带来的收益提升，企业才愿意以新技术投产。

因此，了解目前主流的电池片技术并测算其合理的溢价范围就至关重要。

2.3.1 光伏电池片主流技术与发电效率比较

在光伏电池片中，不同的掺杂剂决定了电池不同的导电特性和效率。P 型硅片使用硼作为掺杂剂，而 N 型硅片使用磷作为掺杂剂。不同技术的电池片在发电效率上差异显著。

2.3.1.1 Perc 技术

Perc 技术主要应用于 P 型硅片。这项技术通过在硅片的背面添加钝化层和反射层来提高电池的光电转换效率，主要通过减少电子的重组来实现。Perc 技术的优点是能显著提升电池的效率，并且与传统的太阳能电池制造工艺兼容，因此被广泛采用。

2.3.1.2 TOPCon 技术

TOPCon 技术通常应用于 N 型硅片，这种技术在硅片的两面使用钝化接触技术来减少载流子的重组损失。TOPCon 技术在电池的表面形成一个薄的氧化层，然后通过使用高效的导电材料来形成电极，从而增强电流的收集。这项技术可以进一步提升 N 型电池的性能，特别是在光照条件较差的环境中。

2.3.1.3 HJT 技术

HJT 技术是一种主要应用于 N 型硅片的先进电池技术，它通过在 N 型硅片两侧使用非晶硅层来形成异质结，有效减少表面重组并增强电池的整体效率。HJT 技术的一个关键特点是它能够在较低的温度下制造，从而减少热应力对硅片的影响，进而提高电池的可靠性和寿命。

目前，电池片主流技术在实际投产的效率上有一定的差异，Perc、HJT 和 TOPCon 的光电转化率分别为 24.5%、27.5% 和 28.7%。可以看出短期内 TOPCon 技术有望成为技术

主流¹，有很强的代表性。

2.3.2 TOPCon 技术溢价测算

鉴于 TOPCon 技术目前的领先地位，我们选取 TOPCon 技术与传统的 Perc 技术作为溢价测算的对象。在这里，我们借用公司金融的资本金内部收益率（IRR）工具，站在产业链终端的光伏电站运营者的角度计算投资回报率。当控制 IRR 不变时，我们便能够得到技术溢价的具体值。这一数值可以作为电池片设备制造行业厂商对以不同技术进行生产的设备进行定价的依据。

光伏电站项目的经济效益和进行内部收益率的计算中，初始投资和现金流是两个核心的财务指标，而光伏电站的现金流与发电量密切相关。以下我们将具体展开如何计算初始投资、发电量、现金流和资本金 IRR。

初始投资：初始投资包括所有必需的前期资本支出，为项目的启动和运行奠定了基础。在本研究中，初始投资计算如下：

$$\text{Initial Investment} = (\text{Module Cost} + \text{BOS Cost}) \times \text{Total Power Capacity} + \text{Land Rent} \quad (4)$$

式 (4) 考虑了模块成本和系统外围成本（BOS），这些都直接关联到光伏组件的购置和安装。土地租赁费用也被包括在内，因为它是项目实施所必须的固定成本。这一全面的初始投资计算确保了项目所有潜在的前期费用都被考虑在内，从而提供了一个真实的项目开展成本视角。

年发电量的计算：项目的年发电量是现金流计算中的关键变量，它直接影响了电站的收益能力。年发电量的计算方法考虑了设备的初始效率和随时间退化的影响：

$$\text{Yearly Generating kWh per kW}_i = \text{First year generating hours} \times \left(\text{System efficiency} - \sum_{j=1}^i \text{Degradation rate}_j \right) \quad (5)$$

¹这一点产业上尚未有定论。仍有大量新进入光伏赛道的公司采取在 HJT 技术赛道厚积薄发的策略。

式 (5) 显示了发电量如何随着时间以及设备效率的下降而减少。通过考虑每年的效率降低, 我们能够更准确地预测项目的长期发电表现和经济回报。

现金流的计算: 现金流是评估项目财务性能的直接指标, 它反映了电站运营的真实经济效益。现金流的计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{Cashflow}_i = & (\text{Electricity price} \times \text{Yearly Generating kWh per kW}_i \times \text{Total Power Capacity}) \\ & - (\text{Maintenance cost per W} \times \text{Total Power Capacity}) \end{aligned} \quad (6)$$

内部报酬率和资本金内部报酬率的计算: 在本研究中, 我们采用了一种创新的方法来评估和比较利用 TOPCon 技术与传统 Perc 技术的溢价。特别地, 我们计算和分析资本金内部收益率 (IRR_0), 即在考虑资本成本后的项目回报率。结合先前对于初始投资、发电量和现金流的公式构建, 我们构建了以下的资本金 IRR 计算模型:

$$IRR_0 = \frac{IRR_1 - R \times LTV \times \frac{t}{T} \times [1 - (1 - LTV) \times \theta]}{(1 - LTV) \times \frac{t}{T} + \frac{T-t}{T}} \quad (7)$$

其中, IRR_1 代表项目的原始内部收益率, R 是项目的贴现率, LTV (Loan-to-Value Ratio) 表示贷款对价值比, t 为项目融资期限, T 为项目总运营期限, 而 θ 代表税收折扣率。通过此模型, 我们可以考虑贷款对项目整体经济效益的影响, 从而得出在考虑资本成本后的调整 IRR。

此公式不仅考虑了从电力销售中获得的收入, 还包括了必要的维护费用, 这些费用对于维持电站长期运营和性能至关重要。通过详细计算每年的现金流, 我们能够深入理解投资项目在整个运营周期内的财务表现。

应用此模型于一个位于中国东部地区的 30MW 光伏电站项目, 我们细致分析了使用 TOPCon 技术与使用 Perc 技术的经济效益。项目的具体经济参数和电力参数, 如组件成本、系统外围成本 (BOS)、投资总额、贷款金额和贷款期限等, 见表3。

在计算资本金 IRR 时, 考虑税收优惠政策是至关重要的, 这反映在资本金 IRR 公式的 θ 中。本项目周期为 25 年, 适用的税收优惠政策为“三免三减半”, 即项目前三年所得税完全免除, 第四至第六年所得税按 50% 征收, 第七年至第二十五年则恢复正常所得税率。

Module Type	PERC	TOPCON
Power per module (182mm)	555	580
Module number	54054.05	51724.14
Area (m ²)	139621.62	133603.45
Rent (yuan/m ²)	0.75	0.75
Rent (thousand yuan)	104.7	100.2
Double-sided rate	0.75	0.8
Degradation-first year (%)	0.50	0.01
Linear degradation (%)	0.45	0.40
First year generating hours	1280	1280
System efficiency	0.80	0.81
Electricity price (yuan/kwh)	0.415	0.415
VAT	0.13	0.13
BOS (yuan/W)	1.765	1.735
Module (yuan/W)	1	1.11
Investment (thousand)	83250	85350
Capital (25%, thousand)	16650	17070
Loan (thousand)	66600	68280
Interest rate %	5.5	5.5
Loan period (year)	15	15
Repayment per year (thousand)	6728.20	6897.92
Maintenance (yuan/W)	0.04	0.04
Capital IRR	4.8%	4.8%

表 3: 30MW Power Project

$$\theta = \frac{0 \times 3 + 0.5 \times 3 + 1 \times 19}{25} \quad (8)$$

因而得到 θ 等于 0.82, θ 考虑了整个项目周期内各个阶段的税收优惠影响, 从而为我们提供了一个调整资本金 IRR 所需的准确税收折扣率。通过应用这一税收折扣率, 可以更精确地评估项目在考虑税收影响后的财务回报。

通过将表3的参数代入到以上的各个公式中计算，我们发现在保持 IRR 一致的情况下，TOPCon 技术相较于 Perc 技术，每瓦的技术溢价为 0.1 元人民币。目前，Perc 的价格为 1 元/W，这意味着 TOPCon 技术的合理溢价应该定为 Perc 技术组件价格的 10%。

2.4 光伏设备制造

光伏电池片的生产设备是实现电池片技术革新的关键。在上文，我们已经指出了 TOPCon 技术的优势，就一般电池片制备工艺而言，热制程设备包括硼扩散设备、磷扩散设备、氧化、退火设备，镀膜设备主要包括 LPCVD 设备、PECVD 设备及 ALD 设备，而 LPCVD 和硼扩散设备是制备 N 型新型高效光伏电池片 TOPCon 及 XBC 的核心工艺设备。且从公开信息披露的生产线设备价值量分布来看，热制程和镀膜设备也是价值的核心组成部分。

TOPCon 电池片由 PERC 电池片的基础架构升级而来，主要差别在于硼扩散与隧穿氧化及掺杂多晶硅层的制备，按其制备方式划分，主要分为三种技术路线，分别为 LPCVD、PECVD 及 PVD，其中 LPCVD 相较于 PECVD、PVD 在技术成熟度、成膜质量（均匀性好、致密度高）方面具有优势，随着石英管寿命的提升以及双插工艺（双插，即一个舟齿放置两块硅片，相较于单插，硅片放置量提升一倍）的不断成熟，LPCVD 已成为下游客户的主流选择。除上述外，TOPCon 生产过程涉及的其他设备则与 PERC 大体相同，主要环节包括清洗制绒、刻蚀、正面氧化铝（ Al_2O_3 ）沉积、双面氮化硅（ SiN_x ）沉积、丝网印刷等。

在以上各种技术方案中，LPCVD 凭借技术成熟、成膜质量高、产能大等优点成为下游客户最主流的解决方案；PECVD 方案则在成膜效率方面具有一定优势，部分厂商也进行了采纳；少部分厂商基于 PVD 低绕镀等优势则选择了 PVD 方案。

3 企业

3.1 基本信息和成长阶段

拉普拉斯新能源科技股份有限公司（以下称拉普拉斯）在深圳成立于 2016 年 5 月 9 日，注册资本 3.65 亿元。拉普拉斯是一家光伏电池片核心工艺设备及解决方案提供商，目

前的主营业务主要包括光伏电池片制造所需高性能热制程、镀膜及配套自动化设备的研发、生产与销售，近年来逐渐进入半导体分立器件领域，生产氧化、退火、镀膜和钎焊炉等设备。拉普拉斯在在高效光伏电池片核心工艺设备方面已建立起核心竞争优势，产品受到了下游行业领先企业的广泛认可，并实现了大规模量产和出货。在行业面临向 TOPCon 技术转型的阶段，拉普拉斯准确把握了行业趋势方向，加强了在此方面的投入，特别地企业在创新低压水平硼扩散技术、光伏级大产能 LPCVD 技术等领域拥有业界领先的技术，构建了一定的技术壁垒。拉普拉斯的良好发展在相当程度上得益于对于行业方向的准确把握，以及在 TOPCon 技术方面深厚的积累。截止 2022 年，公司有员工 1840 人，净利润达到 1.19 亿元。公司大部分经营活动都发生在国内，近年来只有 2022 年的主营业务收入中有境外收入金额分别，1.59 亿元，系与隆基绿能马来西亚子公司交易产生。

企业成立以来的业务、产品和经营的演变可以分为以下三个阶段：

3.1.1 2016-2019 年：研发和探索阶段。

在此阶段行业处于 TOPCon、HJT 等新型高效光伏电池片技术的研发和探索阶段，产业化应用尚未形成规模，公司抓住机会深入研究热制程和镀膜相关设备的相关技术，结合新型高效光伏电池的工艺需求，完成了两代 LPCVD 设备、硼扩散设备等产品的设计、开发和迭代，并完成向下游主流厂商如隆基绿能、晶科能源的测试导入，进行了相关中试线的验证工作。值得一提的是，2019 年晶科能源采购了拉普拉斯的核心工业设备，创造了 N 行 TOPCon 电池转换效率的世界纪录，体现了公司在该阶段的技术积累实力。在此阶段，公司尚未形成规模化出货。

3.1.2 2020-2021 年：客户对接导入阶段。

2020 年开始，随着 PERC 电池基本完成了对 BSF 电池的替代，行业内主流厂商开始对新型高效光伏电池片技术进行规模化商业应用进行准备，并逐步加大产能建设力度，新型高效光伏电池片技术的产业化进程显著加速。公司凭借其技术积累，结合前期客户验证成果，完成了产品的进一步迭代。在该阶段，公司核心工艺设备协助晶科能源等下游企业先后 8 次创造 N 型 TOPCon 电池转换效率世界纪录，并在该阶段形成了批量交付能力，

产品开始规模化出货至隆基绿能、晶科能源、爱旭股份、中来股份等行业主流客户，其中 2021 年度完成订单签署 10.69 亿元，完成产品交付 4.32 亿元。

3.1.3 2022 年至今：快速发展阶段。

2022 年，以 TOPCon 为代表的新型高效光伏电池片开始规模化量产，新技术正式进入规模化商业落地阶段。此阶段公司以 LPCVD 设备、硼扩散设备为代表的核心工艺设备已成为下游厂商的主流选择，公司产品导入至钧达股份、正泰新能、通威股份等更多的行业主流客户，其中 2022 年实现订单签署 42.65 亿元，完成产品交付 34.83 亿元。2022 年至今，公司持续对产品进行迭代、创新，核心工艺设备再次协助晶科能源等下游厂商先后 4 次创造 N 型 TOPCon 电池转换效率世界纪录。此外，公司基于在热制程和镀膜设备领域丰富的技术积累以及对客户需求的挖掘，2021 年开始陆续落地氧化、退火、镀膜以及钎焊炉等半导体分立器件设备订单，完成了对比亚迪、基本半导体等知名客户的导入，实现了业务领域的战略延展。

3.2 业务和财务分析

表5总结了 2020-2022 年度公司主营业务收入的构成和变化，单位以万元计。表中显示 2020-2022 年度，光伏电池片生产设备始终是企业的主要收入来源，且在 2022 年经历了强劲的增长，而自动化及其他设备的收入在 2020 年度以来稳步下降，从接近 4 成下降到不足 1 成，已经逐渐脱离了企业的核心主营业务。而在 2022 年度，热制程设备和镀膜设备都占据超过 40% 的收入份额，构成了企业的主要产品。2022 年度企业开始进军半导体领域，不过依靠的仍然是光伏领域成熟的技术和设备，目前只占到主营业务收入很小一部分。考虑到目前半导体行业的良好前景，这部分在未来可能获得良好的发展。不过本文仍然主要关注于企业在光伏领域的发展和现状。

我们进一步考察公司 2020-2022 年的利润，表4展示了 2020-2022 年度的利润构成，其中单位以万元计。企业在 2022 年度首次实现正利润，达到 1.19 亿元，且营业总收入是 2021 年度的超过 10 倍。企业 2020-2022 年度的净利润率分别是-112.95%、-55.14% 和 9.40%，企业的增长非常迅速。作为一家以技术见长的企业，我们特别关注研发费用的占营业总成本

产品大类	产品	2022 年度		2021 年度		2020 年度	
		金额	占主营业务收入比	金额	占主营业务收入比	金额	占主营业务收入比
光伏设备	热制程设备	57,910.95	45.88%	2,913.72	28.46%	2,183.22	54.48%
	镀膜设备	51,361.23	40.69%	3,398.08	33.19%	-	-
	自动化及其他设备	12,427.14	9.85%	2,783.63	27.19%	1,500.88	37.45%
	光伏电池片设备小计	121,699.32	96.42%	9,095.43	88.83%	3,684.11	91.94%
	其他光伏设备	2,804.78	2.22%	794.25	7.76%	309.73	7.73%
	光伏设备小计	124,504.10	98.65%	9,889.67	96.58%	3,993.84	99.67%
半导体设备	镀膜设备	385.84	0.31%	-	-	-	-
	热制程设备	178.76	0.14%	-	-	-	-
	半导体设备小计	564.40	0.45%	-	-	-	-
配套产品服务	-	1,142.70	0.91%	349.84	3.42%	13.41	0.33%
合计		126,211.40	100.00%	10,239.51	100.00%	4,007.25	100.00%

表 5: 公司主营业务收入构成

的比例，在 2020 年度为 26.84%、2021 年度为 21.88%、2022 年度为 9.96%，可见企业的前期研发投入非常大。事实上 2022 年度的研发费用接近 2021 年度的 3 倍，只是因为 2022 年度营业成本是 2021 年度的接近 10 倍，因此研发投入比重下降，这反映了企业在 2022 年度进行了大规模的扩产。这一点在表5中也得到了印证。

项目	2022 年度	2021 年度	2020 年度
一、营业总收入	126,585.03	10,358.14	4,072.33
其中：营业收入	126,585.03	10,358.14	4,072.33
二、营业总成本	110,560.53	17,859.60	10,179.52
其中：营业成本	84,885.97	8,662.14	4,261.48
税金及附加	1,102.96	111.16	22.57
销售费用	4,301.79	1,504.49	456.17
管理费用	8,448.25	3,147.19	2,254.49
研发费用	11,014.34	3,906.86	2,731.78
财务费用	807.22	527.75	453.02
其中：利息费用	455.76	473.03	400.33
利息收入	510.17	27.53	1.95
加：其他收益	941.14	645.92	1,361.43
投资收益（损失以“-”填列）	636.32	123.96	1.72
公允价值变动收益（损失以“-”填列）	-347.01	179.99	0.01
信用减值损失（损失以“-”填列）	-2,033.58	-159.39	-118.88
资产减值损失（损失以“-”填列）	-3,333.13	-895.93	-757.07
三、营业利润（亏损以“-”填列）	11,888.24	-7,606.91	-5,619.99
加：营业外收入	4.17	11.73	0.58
减：营业外支出	123.23	0.21	5.23
四、利润总额（亏损总额以“-”填列）	11,769.18	-7,595.39	-5,624.63
减：所得税费用	-128.55	-1,884.13	-1,025.00
五、净利润（净亏损以“-”填列）	11,897.72	-5,711.25	-4,599.63

表 4: 合并利润表

3.3 行业互动

3.3.1 行业上下游

3.3.1.1 上游供应商情况

企业采购的原材料主要分为真空类标准件、高温器件及材料、机械一体类、电气元件类、机械标准件，总体大多是行业标准件。2020-2022 年度企业不存在向单个供应商采购比例超过 50% 的情形，上游标准件的供应商加价能力不强，并不具有过多的垄断势力，因此本文略去了具体的供应商采购信息和比例。

3.3.1.2 下游客户销售情况

公司面向下游的销售情况总结在了表6中。2020 年度-2022 年度，光伏领域的各个设备出货量均有提升，特别是 2022 年度的出货量提升非常大，其中热制程设备和镀膜设备的销售均价逐年走高，而自动化设备的销售均价却逐年下降，这是因为前两者的技术提升相对较快。企业在半导体领域则相对稚嫩，还处在非常初步的阶段。

公司主要客户的销售情况总结在了表7中。2020 年度-2022 年度，企业和各个下游采购商的销售收入往来都稳步扩大。由于下游生产商呈现出高度的垄断特征，拉普拉斯的买方多样化程度并不高，特别是 2020 和 2021 年度中，晶科能源和隆基绿能两家企业就占据了超过 95% 的销售收入，这一点在 2022 年度获得了一定程度的改善。不过鉴于下游企业仍然呈现高度集中的态势，2022 年中国前五大电池片厂商的产量占总产量的 56.30%²，且头部企业都呈现出巨无霸的发展模式，拉普拉斯的客户销售情况在短期内可能仍然呈现出多样化程度不足的情况。

3.3.2 主要竞争对手

竞争对手的主要情况在表中已经列出，该行业呈现出寡头垄断的特征。捷佳伟创是居于领导地位的大企业，而拉普拉斯、红太阳光电和微导纳米是具有一定垄断势力的行业参与者。不过在 LPCVD 设备领域，拉普拉斯是行业中最重要设备提供商。在技术升级换

²数据来源：中国光伏行业协会《中国光伏产业发展路线图（2022-2023 年）》。

产品类别	项目	年度数据		
		2022 年度	2021 年度	2020 年度
光伏领域设备				
热制程设备	销售量（台）	169	13	13
	销售均价（万元/台）	342.67	224.13	167.94
镀膜设备	销售量（台）	117	9	-
	销售均价（万元/台）	438.98	377.56	-
自动化及其他设备	销售量（台）	120	18	9
	销售均价（万元/台）	103.56	154.65	166.76
其他光伏设备	销售量（台）	21	18	3
	销售均价（万元/台）	133.56	44.12	103.24
半导体领域设备				
镀膜设备	销售量（台）	1	-	-
	销售均价（万元/台）	385.84	-	-
热制程设备	销售量（台）	2	-	-
	销售均价（万元/台）	89.38	-	-

表 6: 面向下游的销售情况

代的大背景下，我们同样可以认为拉普拉斯在行业中居于相当的垄断地位，且在未来几年，拉普拉斯在行业中的地位将进一步提升。

3.3.3 企业应对

在前文，我们简要介绍了电池片生产设备行业的竞争情况，电池片生产设备行业的主要痛点在于：LPCVD 原成熟应用于半导体领域，但光伏相对于半导体的成本控制要求更高，隧穿氧化及掺杂多晶硅层对光伏电池片转换效率提升带来的收益与相应增加的工序成本相比较必须具有经济性，此外还有大产能的需求，对于结构构造、工艺设计提出了特殊的要求；石英管损耗较高，增加了生产成本；镀膜均匀度较差。

拉普拉斯凭借自身的技术积累，深入研究 LPCVD 的基本原理，以及光伏电池隧穿氧化及掺杂多晶硅层的工艺要求，结合上述痛点创造性地进行了气流控制设计、载片设计、非对称热场设计、硅片载具的创新设计、自适应串级温控设计、优化设备结构延长石英管

序号	客户名称	销售收入 (万元)	占主营业务收入比例
2022 年度			
1	晶科能源	61,277.81	48.55%
2	钧达股份	29,776.08	23.59%
3	隆基绿能	18,445.50	14.61%
4	中来股份	12,743.92	10.10%
5	林洋能源	2,284.62	1.81%
	合计	124,527.92	98.67%
2021 年度			
1	晶科能源	5,551.12	54.21%
2	隆基绿能	4,663.15	45.54%
3	比亚迪	9.96	0.10%
4	通威股份	7.98	0.08%
5	中来股份	6.26	0.06%
	合计	10,238.45	99.99%
2020 年度			
1	隆基绿能	3,112.42	77.67%
2	晶科能源	726.68	18.13%
3	连城数控	88.50	2.21%
4	3M 中国有限公司	79.65	1.99%
	合计	4,007.25	100.00%

表 7: 下游重要客户销售情况

寿命和提升产能，并自研新型石英管涂层技术进一步延长石英寿命，完成了光伏级大产能 LPCVD 的量产落地。

结合我们之前介绍的光伏行业大背景，尽管下游电池片生产行业参与者较少，但竞争程度极高，几乎就在边际成本上方的位置定价，这使得任何一点可能的成本下降机会都是下游企业将要追求的目标。下游企业向 TOPCon 技术的转型为拉普拉斯提供了进入行业的机会，也因为其高度竞争性，才使得拉普拉斯的新技术对于下游行业来说颇具吸引力，为其提供了良好的发展机遇。从另一角度讲，拉普拉斯利用了下游高度竞争的市场结构，进行恰当的 RD 投入，为下游企业提供了更好的技术、更低的边际成本，从而使其具备了行业的领导地位。

在同行业内部，拉普拉斯及竞争对手采取的技术不尽相同，由于下游行业处在向 TOP-

序号	公司名称	热制程和镀膜设备收入	市场地位
1	捷佳伟创	2022 年光伏电池片设备收入为 60.05 亿元，未披露具体构成，根据公开信息可推算主要为 PECVD、扩散设备及清洗设备	国内主要的光伏电池片设备企业之一，主要产品包括 PECVD 及扩散炉等
2	微导纳米	2022 年销售额为 6.85 亿元，主要为光伏设备相关收入	国内从事光伏 ALD 设备的主要企业之一
3	红太阳光电	2021 年销售额为 9 亿元，产品主要为 PECVD、PVD 等，未披露细分设备具体规模	国内从事光伏 PECVD 设备的主要企业之一
4	理想晶延	2021 年销售额为 1.72 亿元，产品包括 ALD、PECVD 等，未披露细分设备具体规模	国内主要从事光伏 ALD 设备的主要企业之一
5	拉普拉斯	2022 年光伏电池片设备销售额为 12.17 亿元，其中 LPCVD 和硅扩散设备销售额分别为 4.38 亿元及 5.03 亿元	国内领先的高效光伏电池片设备提供商，为客户提供 LPCVD 和硅扩散设备等核心工艺设备

表 8: 主要竞争对手

Con 技术转型的初期，因此各个技术带来的成本差别尚不明显，下游企业只能依据其自身对技术的理解和预期来选择相应的技术。而在 TOPCon 技术完全成熟之后，下游的高度竞争性就将传导至上游，使得生产设备制造企业的加价程度显著降低。从这一角度讲，拉普拉斯选择在技术的转型期进入是非常合适的，既能利用自己的技术优势占据一定的市场地位，又不会因竞争程度过高而几乎丧失利润，需要极长的时间才能收回固定成本。

综上，除了在相关领域的技术深耕，对行业格局的准确把握同样是拉普拉斯能够取得行业领导地位的关键因素。

4 模型

正如我们在前文反复指出的，产业政策对于这一行业有举足轻重的影响。光伏行业整体的发展是循序渐进，而非跨越式的，尽管时有全国层面的法规、鼓励政策出台，但各地地方政府仍有或强或弱的动机提供不同的补贴政策鼓励辖区内的光伏行业发展。基于此我们希望提供一个空间模型来讨论这一问题，允许各地有不同的产业政策参数，为可能的实

证提供便利。³我们用 d 表示区域，每个区域都生产或消费电力，如果一个区域生产电厂的有关组件，则再记为 o 。每个区域 d 都有代表性消费者，他们对电力服务的需求是 e^d ，由电力提供商建造并运营光伏 s 和非光伏 s' 种类的电厂。各个电力提供方从各地的上游生产者 o 购买不同的电厂组件。为了模型设定的简化起见，我们假设不同的区域之间只有组件的贸易而没有电力的贸易（输电）。⁴我们关心的核心即电厂组件的生产者有异质性的生产率，并按照一般的产业组织模型进入、退出市场，并进行生产和国际贸易。他们同样有机会进行 R&D 投入，即以一个固定成本的代价提升自己的生产率。

为了使得模型具有良好的性质，我们仅仅关注于电力提供这一个侧面，即假设：电力服务仅作为最终消费品，而非中间投入品；模型不关注除了电力服务之外的任何生产；模型认为各个城市的电力需求外生给定（这相当于假定经济主体不会对各地的电价差作出反应）、工资外生给定（电力生产部门相对于总生产而言非常小）；电厂并不是耐用品。我们希望通过尽可能简单的假设，将关注问题的核心置于光伏电池片的生产部门。因此我们的模型不能看作是纳入了电力生产的一般均衡，而是一个仅仅关注于电力提供的产业内模型。

4.1 电力提供商

在每个区域 d 内，代表性消费者通过获取电力服务得到效用

$$U_d = u(e_d) \quad (9)$$

这个代表性消费者通过 L_d 单位的有效劳动来提供电力服务，我们假设其是外生给定的。

对于一个地区的总电力服务，我们将其分为光伏部分 s 和非光伏部门 s' ，电力服务的

³考虑到篇幅和报告主题的限制，本文略去了此部分的文献综述，本文提供的模型基于Bustos (2011) 和Shapiro and Walker (2018) 以及笔者在参加 Berkeley Energy Camp 时 Ignacio Banares-Sanchez 报告的文章中的模型，同样参考了De Ridder (2024) 中的很多设置。本文的贡献在于，纳入了创新补贴，从而能够更完善地考察供给侧的产业政策，高创新的企业倾向于得到更多补贴，这在现实中的例子包括：政府评选“专精特新”小巨人企业，并相应给予税收、政策优惠等。

⁴这样假设有些武断，一方面是为了使得模型易于处理，另一方面，如果不考虑电力贸易的情况下，政府补贴的作用都是显著的，那么在允许贸易之后，获得生产补贴的厂商将拥有更大的市场，政府的补贴作用只会更强。后续的工作可能包括运用更多的数据，以冰山贸易成本的方式确定更多的基础变量取值。

总产出是二者按照 CES 的形式加总⁵

$$e_d = (\kappa_{d,s'} e_{d,s'}^\rho + \kappa_{d,s} e_{d,s}^\rho)^{1/\rho}$$

其中二者的替代弹性是 $\sigma = 1/(1 - \rho)$ 。具体到光伏部分的电力提供， $e_{d,s}$ 是一系列中间品按照 CES 加总的形式得到的，即

$$e_{d,s} = \left(\sum_o \int_{\omega \in \Omega_{o,s}} q_{od,s}(\omega)^{\frac{\sigma_s-1}{\sigma_s}} d\omega \right)^{\frac{\sigma_s}{\sigma_s-1}}$$

其中 $q_{od,s}(\omega)$ 表示区域 d 使用的区域 o 生产的多样性为 ω 的光伏中间品的数量⁶， σ_s 表示光伏部门不同中间品的替代弹性，即厂商可以从全国任意购买中间品。

在给出了这些设定之后，我们就可以刻画电力提供商的最优化问题，他们将在给定的电价和中间品价格下，选择提供的总电力服务、光伏在其中的占比以及各个中间品的投入。在中国目前的背景下，认为最终电价给定是非常合理的假设。事实上，由于效用函数只与电力服务的消费量有关，我们可以直接考虑给定约束条件下的最大化电力消费即可。我们先求解选择中间品的最优化问题

$$\min_{q_{o,d}(\omega)} \left(\sum_o \int_{\omega \in \Omega_{o,s}} q_{od,s}(\omega) p_{od,s}(\omega) d\omega \right) \quad (10)$$

$$\text{s.t.} \quad \left(\sum_o \int_{\omega \in \Omega_{od,s}} q_{od,s}(\omega)^{\frac{\sigma_s-1}{\sigma_s}} d\omega \right)^{\frac{\sigma_s}{\sigma_s-1}} = e_{d,s} \quad (11)$$

这就可以得到光伏部门和非光伏部门的中间品投入，带入就能得到该部门的电力服务价格。

⁵可能的质疑在于，为什么电力服务的总提供量不是二者的简单相加？事实上简单相加的处理方式并不符合今天中国电力提供行业的实际情况，为了克服光伏和风电等能源对天气的强烈依赖，政府要求大量的火电企业随时保持发电状态，但不并网运行，因此光伏部门与非光伏部门不能视作简单的完全替代品。

⁶这里遵循了产业经济学、宏观经济学的一般处理方式，每个区域的每个企业生产一种特定的多样性 ω 。

我们进一步求解最终的最大化问题

$$\max_{e_{d,s}, e_{d,s'}} (\kappa_{d,s'} e_{d,s'}^\rho + \kappa_{d,s} e_{d,s}^\rho)^{1/\rho} \quad (12)$$

$$\text{s.t. } P_{d,s} e_{d,s} + P_{d,s'} e_{d,s'} = I_d \quad (13)$$

就能将中间品的需求表达出来。我们可以设定 Lagrangian 并经过简单的代数运算，就可以指出

命题 4.1 光伏部门中间品的需求可以表示为

$$q_{od,s}(\omega) = \left(\frac{p_{od,s}(\omega)}{P_{d,s}} \right)^{-\sigma_s} \left(\frac{\kappa_{d,s}}{P_{d,s}} \right)^\sigma \frac{I_d}{\kappa_{d,s'}^\sigma P_{d,s'}^{1-\sigma} + \kappa_{d,s}^\sigma P_{d,s}^{1-\sigma}}$$

如果我们考虑一个需求侧的补贴（直接针对于最终价格 $P_{d,s}$ 的补贴，例如直接针对电厂运营者的减税就可以归类为此类补贴），那么中间品的需求就可以被改写为

$$q_{od,s}(\omega) = \left(\frac{p_{od,s}(\omega)}{P_{d,s}} \right)^{-\sigma_s} \left(\frac{\kappa_{d,s}}{\chi_{d,s} P_{d,s}} \right)^\sigma \frac{I_d}{\kappa_{d,s'}^\sigma P_{d,s'}^{1-\sigma} + \kappa_{d,s}^\sigma (\chi_{d,s} P_{d,s})^{1-\sigma}}$$

其中 $\chi_{d,s} < 1$ 是一个表示补贴大小的参数。这将使得 d 区域的电力提供商更倾向于使用光伏，又考虑到价格是外生给定的并忽略一般均衡效应，那么 d 区域所有的中间品需求将增加相同的幅度，从而导致全国范围内的影响。

4.2 组件生产者

光伏部门和非光伏部门的中间投入品由不同地区的企业生产。每个区域 o 的各部门中都有一个潜在制造企业 i 的连续统，我们假设这些企业处于垄断竞争的状态下，这样我们仍然可以运用 Dixit-Stiglitz 模型的设定。

部门 s 中制造组件中间品（例如太阳能电力部门的太阳能板）的企业 i 使用有效劳动单位 $L_{o,s,i}$ ，单位成本为 $w_{o,s}$ 。为简化起见，我们此后忽略企业下标 i 。企业运营前必须支付沉没成本 $w_o f_{o,s}^e$ ，其用有效劳动单位来表达。企业支付进入费用后，从帕累托分布中抽

取得到一个初始生产力水平 φ 。帕累托分布的累积分布函数（CDF）是

$$G(\phi; b_{o,s}) = 1 - \left(\frac{\varphi}{b_{o,s}} \right)^{-\theta_s}$$

每个运营中的企业生产一个给定部门中间商品的一个特定多样性。相应地，我们可以通过其生产力 φ 或它生产的多样性 ω 来标识企业。要生产 $q_{o,s}(\varphi)$ 单位的多样性，企业需要有效劳动是

$$l_{o,s} = f_{o,s} + \frac{q_{o,s}}{\varphi}$$

其中 $f_{o,s}$ 是用有效劳动单位表示的生产的固定成本， $\frac{1}{\varphi}$ 是生产的边际成本。

企业在观察到其初始生产力 φ 之后，企业可以选择进行创新升级技术，这一方面增加生产的固定成本 $f_{o,s}^i$ ，另一方面降低其边际成本为 $\frac{1}{\xi_{o,s}\varphi}$ ，其中 $\xi_{o,s} > 1$ 。

企业的决策除了创新之外，还可以选择是否向外国地区 \tilde{d} 销售。我们假设国内贸易没有固定成本，且由于采用了 CES 加总形式，企业将向每一个国内地区销售。而如果企业想向外国市场销售，必须支付国际出口固定成本 $f_{o,\tilde{d},s}^x$ 。因此，企业面临一个是否出口或仅服务于国内市场的离散选择。

国内和国际贸易的成本都采取冰山形式，即为了将 $q_{o,d,s}(\varphi)$ 单位送达目的地 d ， o 地的企业需要生产 $\tau_{od,s}q_{o,d,s}(\varphi)$ 单位，其中 $\tau_{od,s} \geq 1$ 。我们将贸易成本正规化，使得当 $d = o$ 时为 1。

企业直接或间接地受到不同类型的补贴的影响，地方政府设定生产、创新和需求补贴三种补贴。我们之前已经介绍了需求侧的补贴，对于生产补贴，我们将针对部门 s 的生产补贴假设为投入成本的减少，允许企业的边际成本将变为 $\frac{a_{o,s}}{\xi_{o,s}\varphi}$ ，其中 $a_{o,s} < 1$ 。对于创新补贴，我们假设为技术升级中固定成本的减少，补贴后企业创新的固定成本为： $\phi_{o,s}f_{i,o,s}$ ，其中 $\phi_{o,s} < 1$ 。

至此，我们已经能得到企业在支付入场费并抽取生产率后的利润，其取决于企业的出口和创新决策，即是三种选择中的最大值——既不创新也不出口、出口但不创新、同时出口和创新。我们忽略了企业创新但不出口的情况，这一方面保证了模型的良好性质，同时

也因为在实际的行业中，我们几乎观察不到企业采取这种行为。

$$\pi_{o,s}(\varphi) = \max \left\{ \begin{array}{l} \sum_{d \neq \tilde{d}} \left\{ p_{od,s}(\varphi) q_{od,s}(\varphi) - w_o \frac{\tau_{od,s} a_{o,s} q_{od,s}(\varphi)}{\varphi} \right\} - w_o f_{o,s}, \\ \sum_d \left\{ p_{od,s}(\varphi) q_{od,s}(\varphi) - w_o \frac{\tau_{od,s} a_{o,s} q_{od,s}(\varphi)}{\varphi} - w_o f_{o,\tilde{d},s}^x \right\} - w_o f_{o,s}, \\ \sum_d \left\{ p_{od,s}(\varphi) q_{od,s}(\varphi) - w_o \frac{\tau_{od,s} a_{o,s} q_{od,s}(\varphi)}{\xi_{o,s} \varphi} - w_o f_{o,\tilde{d},s}^x \right\} - w_o f_{o,s} - w_o \phi_{o,s} f_{o,s}^i \end{array} \right\}$$

在每种情况下，利润都是收入减去生产成本组成，这包括边际成本、出口的固定成本和生产的固定成本。边际成本依赖于生产力、生产补贴、贸易成本、生产力和创新决策。生产的固定成本依赖于创新补贴和创新决策。

企业通过最大化利润来决定价格、出口哪些地区、是否创新、是否退出市场以及是否首次进入市场的决策。直观上对利润表达式的最优化非常困难，因此我们寻求分多阶段解决这一问题。

首先，给定企业对创新和出口的选择，我们可以对企业利润求 $p_{od,s}(\varphi)$ 的一阶导数，代入得到最优的 $q_{od,s}(\omega)$ 。直觉上，CES 加总的自然性质就是价格是边际成本的固定加成。例如，如果企业同时出口创新，价格将是

$$p_{od,s}(\varphi) = \frac{\sigma_s}{\sigma_s - 1} \frac{w_o \tau_{od,s} a_{o,s}}{\xi_{o,s} \varphi} \quad (14)$$

我们遵循 D-S 模型的一般构造，写出支出于光伏部门的总额（其中略去了地区下标 d ）

$$E_s = (p_{o,s}(\omega_2))^{\sigma_s} q_{o,s}(\omega_2) \sum_o \int_{\omega_1} (p_{o,s}(\omega_1))^{1-\sigma_s} d\omega_1$$

以及价格指数

$$q_{o,s}(\omega) = \frac{(p_{o,s}(\omega))^{-\sigma_s}}{(P_s)^{1-\sigma_s}} E_s$$

我们将最优的定价代入企业利润表达式中，就可以得到技术和出口选择的价值函数。我们

指出最优利润可以写成

$$\begin{aligned}\Pi_{o,s}(\varphi) = \max & \left\{ \sum_{d \neq \tilde{d}} \left\{ \frac{(\sigma_s - 1)^{\sigma_s - 1}}{\sigma_s^{\sigma_s}} \frac{E_{d,s}}{(P_{d,s})^{1-\sigma_s}} \left(\frac{w_o \tau_{od,s} a_{o,s}}{\varphi} \right)^{1-\sigma_s} \right\} - w_o f_{o,s}, \right. \\ & \sum_d \left\{ \frac{(\sigma_s - 1)^{\sigma_s - 1}}{\sigma_s^{\sigma_s}} \frac{E_{d,s}}{(P_{d,s})^{1-\sigma_s}} \left(\frac{w_o \tau_{od,s} a_{o,s}}{\varphi} \right)^{1-\sigma_s} \right\} - w_o f_{o,\tilde{d},s}^x - w_o f_{o,s}, \\ & \left. \sum_d \left\{ \frac{(\sigma_s - 1)^{\sigma_s - 1}}{\sigma_s^{\sigma_s}} \frac{E_{d,s}}{(P_{d,s})^{1-\sigma_s}} \left(\frac{w_o \tau_{od,s} a_{o,s}}{\xi_{o,s} \varphi} \right)^{1-\sigma_s} \right\} - w_o f_{o,\tilde{d},s}^x - w_o f_{o,s} - w_o \phi_{o,s} f_{o,s}^i \right\} \quad (15)\end{aligned}$$

这个表达式中需求补贴通过 $E_{d,s}$ 体现。企业之前遵循最优定价，在这个最大化这个表达式的过程中作出出口和创新的离散决策。我们这样设置模型的一个良好性质在于会产生一系列生产力的断点⁷，其决定企业是否 i) 在抽取生产力后留在市场，ii) 出口到国际市场 d ，iii) 创新。

命题 4.2 我们定义 $\varphi_{oo,s}^*$ 是退出国内市场的生产力门槛，它满足国内市场的零利润条件。

$$\varphi_{oo,s}^* = \left(\sum_{d \neq \tilde{d}} \left\{ \frac{(\sigma_s - 1)^{\sigma_s - 1}}{\sigma_s^{\sigma_s}} \frac{E_{d,s}}{w_o f_{o,s}} \left(\frac{w_o \tau_{od,s} a_{o,s}}{\chi_{d,s} P_{d,s}} \right)^{1-\sigma_s} \right\} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_s}} \quad (16)$$

命题 4.3 我们定义 $\varphi_{od,\tilde{s}}^*$ 是出口到 \tilde{d} 的零利润生产力门槛，我们这里需要进一步假设边际上出口的企业不进行创新。

$$\varphi_{od,\tilde{s}}^* = \frac{\tau_{od,\tilde{s}} a_{o,s}}{P_{\tilde{d},s}} \left(\frac{E_{\tilde{d},s}}{f_{o,\tilde{d},s}^x} \frac{(\sigma_s - 1)^{\sigma_s - 1}}{w_o^{\sigma_s} \sigma_s^{\sigma_s}} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_s}} \quad (17)$$

命题 4.4 我们定义 $\varphi_{od,s}^*$ 是进行创新的生产力门槛。

$$\varphi_{oo,s}^i = \left(\sum_d \frac{1 - \xi_{o,s}^{1-\sigma_s}}{\xi_{o,s}^{1-\sigma_s}} \frac{(\sigma_s - 1)^{\sigma_s - 1}}{\sigma_s^{\sigma_s}} \frac{E_{d,s}}{w_o \phi_{o,s} f_{o,s}^i} \left(\frac{w_o \tau_{od,s} a_{o,s}}{\chi_{d,s} P_{d,s}} \right)^{1-\sigma_s} \right)^{\frac{1}{1-\sigma_s}} \quad (18)$$

⁷命题 (4.2) 与命题 (4.3) 的证明十分自然，只需设定零利润条件经过简单的代数改写就能得到。而命题 (4.4) 的证明相对复杂。感兴趣的读者可以向笔者索要。

4.3 产业均衡

至此，我们已经能够定义模型的均衡。我们遵循一般惯例用随机序列定义均衡，并略去均衡存在性的证明。事实上，这个模型并不是一般均衡，因此在参数满足一定条件下均衡的存在性是可以想见的。

定义 4.1 我们定义均衡是一系列内生变量 $\{P, \Omega_{od,s}, \Omega_{od,\tilde{s}}, \Omega_{od,s,i}, q, \pi, \}_0^\infty$ 的随机序列，其满足：家庭按照 (9) 式最大化效用；电力服务提供商按照 (10) 式和 (12) 式最小化成本；组件企业按照 (14) 式定价，寻求最大化利润 (15) 式，并分别按照 (16) 式、(17) 式和 (18) 式作出是否进入、出口和创新的决策，且只有当期望收益高于进入成本时才会选择进入行业；行业满足自由进入条件，即零期望利润，也即进入成本等于期望收益；

$$w_o f_{o,s}^e = (1 - G[\varphi_{oo,s}^*]) \mathbb{E}[\pi \mid \varphi > \varphi_{oo,s}^*] \quad (19)$$

电力服务市场和中间品市场分别出清。

在这样的均衡定义一下，我们指出价格指出满足如下的系统：

$$\sum_{d \neq \tilde{d}} \left\{ \frac{(\sigma_s - 1)^{\sigma_s - 1}}{w_o f_{o,s} \sigma_s^{\sigma_s}} \frac{\kappa_{d,s}^\sigma I_d}{\kappa_{d,s'}^\sigma P_{d,s'}^{1-\sigma} + \kappa_{d,s}^\sigma P_{d,s}^{1-\sigma}} (w_o \tau_{od,s})^{1-\sigma_s} \right\} = \left(\frac{f_{o,s}}{f_{o,s}^e} \theta_{o,s}^{\theta_s} \frac{\sigma_s - 1}{\sigma_s - \theta_s - 1} \left\{ \left(\frac{\sigma_s - \theta_s - 1}{\sigma_s - 1} - 1 \right) \left(\frac{1 - \xi_{o,s}^{1-\sigma_s}}{\xi_{o,s}^{1-\sigma_s}} \right)^{\frac{\theta_s}{\sigma_s - 1}} \Phi^{-\theta_s} - \left(\frac{f_{od,\tilde{s}}^*}{f_{o,s}} \right)^{\frac{1 - \sigma_s + \theta_s}{1 - \sigma_s}} \Theta^{-\theta_s} - 1 \right\} \right)^{\frac{1 - \sigma_s}{\theta_s}} \quad (20)$$

其中

$$\Phi = \left\{ \frac{\sum_d E_d \left(\frac{\tau_{od}}{P_d} \right)^{1-\sigma}}{\sum_{d \neq \tilde{d}} E_d \left(\frac{\tau_{od}}{P_d} \right)^{1-\sigma}} \right\}^{\frac{1}{1-\sigma}} = \left\{ \frac{\sum_d \frac{\kappa_{d,s}^\sigma \tau_{od,s}^{1-\sigma_s} I_d}{\kappa_{d,s'}^\sigma P_{d,s'}^{1-\sigma} + \kappa_{d,s}^\sigma P_{d,s}^{1-\sigma}}}{\sum_{d \neq \tilde{d}} \frac{\kappa_{d,s}^\sigma \tau_{od,s}^{1-\sigma_s} I_d}{\kappa_{d,s'}^\sigma P_{d,s'}^{1-\sigma} + \kappa_{d,s}^\sigma P_{d,s}^{1-\sigma}}} \right\}^{\frac{1}{1-\sigma}}$$

$$\Theta = (\Phi^{1-\sigma} - 1)^{\frac{1}{1-\sigma}}.$$

在这一系统中，价格指数只和基础变量 (fundamentals)、工资、收入有关。我们回顾模型的设定过程中，我们将工资视为外生给定，即不受任何补贴政策的影响。因此这一模型在给定参数之后，可以运用数值模型的方式刻画光伏行业的动态路径、也可以运用贝叶斯估计的方法得到感兴趣的参数或变量。

4.4 对模型的评论

作为对模型的评论，我们需要回答的重要问题在于：光伏行业和其他有一定垄断程度的行业的区别是什么？首先，最直观的区别在于最终产品的价格被相当有力地外生给定，这使得企业之间的激烈竞争不会外溢，不会对电力服务的使用者产生显著的影响。这将显著影响行业的竞争格局，垄断者不再能从消费者的需求曲线上任意取一点，而只能被动接受政府划定的价格，因此所有的竞争被保留在了成本竞争的环节，这意味着行业的竞争激烈程度超过了一般的垄断竞争行业，谁能为电厂提供哪怕更低一点点的边际成本，谁就能占领更大的中间品市场。第二，各地异质性的产业政策以及溢出效应。已经有文献指出，新形势下的官员竞争锦标赛要求各地打造不同的政绩亮点，作为地方政府也不可能扶持所有的新兴行业。相比于消费电子产品、新能源汽车等，光伏行业在全国范围内的补贴异质性明显更大，而电厂由于自然资源的限制，选址相对固定，光伏组件则相对更便于运输，因此组件的贸易就成了行业中经济变量扩散的主要渠道。这两点都已经被我们的模型捕捉。

利用这一模型进行实证检验并不困难，遵循一般惯例，我们可以运用数值模拟仿真 (numerical simulation) 的方式得到内生变量的比较静态结果，受限于数据可及性、时间和篇幅的限制，本文并没有提供相关的实证结果，这留待以后的研究完成和深化。⁸模型设置方面，下一步的研究方向主要包括：纳入企业的动态资本决策以及允许电力服务作为中间产品进入总生产的环节。我们希望纳入电力服务作为中间品的想法是非常直观的，而改进前者的必要性来自于资本投资事实上是新能源行业初期的企业面临的重要决策，正如我们之前指出的，在技术快速迭代的背景下，企业的投资决策与技术有着复杂的互动关系，一方面技术迭代非常迅速，企业不希望频繁更新设备；而另一方面，由于该行业高度的竞争性，任何一点边际成本的下降都将是企业追求的目标，这也是今天光伏行业的显著特征之一。同样受限于时间、篇幅，以及笔者的水平，这些问题留待以后的研究进一步探索。值得指出的是，Kleinman, Liu, and Redding (2023) 使得纳入资本前瞻决策的空间一般均衡成为可能，相信很快一个可操作的空间一般均衡模型就可以被运用来考察产业政策对光伏的影响。

⁸本例中数值模拟的最大可能困难在于参数的取值，由于这一领域的微观相对较少，因此参数独立校准的难度较大，可能需要在保证均衡存在的基础上进行合理的猜想和试验。

5 总结

本文以拉普拉斯新能源科技股份有限公司为标的，通过应用经济学模型对光伏产业从微观和宏观的角度进行了系统的分析。我们重点探讨了技术创新、市场需求、成本控制及一体化战略等关键因素，并结合搜集的实际数据，分析这些因素对企业竞争力和行业发展的影响。

首先，通过市场需求分析，我们发现全球光伏市场的快速增长主要得益于政策支持、技术进步和环境保护意识的增强。尤其是在中国、欧洲和北美等主要市场，政府补贴、税收优惠和融资便利等政策措施为光伏产业的发展提供了强有力的支持。此外，技术进步带来的成本下降和效率提升也大大推动了市场需求的增加。然而，市场需求的波动性对生产设备制造企业提出了更高的灵活性和快速响应能力的要求。

其次，我们利用经济学微观模型对光伏电池片生产设备制造业的成本结构进行了详细分析。研究显示，生产成本的主要组成部分包括原材料成本、设备折旧和人力成本。通过优化生产流程、采用先进技术和进行有效的成本控制，企业可以显著降低生产成本，提升利润率。光伏产业链中的下游组件厂商通过提高一体化水平，实现垂直整合，以期降低生产成本，增强市场竞争力。这种一体化需求直接利好像拉普拉斯新能源科技股份有限公司这样的电池片生产设备制造企业，因为下游厂商的产能扩张和技术升级需要大量的生产设备。

具体而言，在光伏产业链中，一体化战略的实施对企业的成本控制和竞争力提升具有重要意义。本文通过详细的成本核算方法和实证分析，发现高度一体化的企业能够通过整合生产链的不同环节，减少对外部供应链的依赖，优化生产效率，从而实现成本控制并提升经济效益。这一发现尤其在光伏组件严重过剩的背景下显得尤为重要，企业需要通过提高一体化水平来应对市场价格的持续下跌。

同时通过计算 TOPCon 技术相对于 Perc 技术的溢价，我们也发现下游电站运营方在购买不同型号的光伏组件时要面对收益和成本的考量，先进技术的溢价应当保持在合理范围内。拉普拉斯新能源科技股份有限公司在这方面的实践表明，通过提供领先的技术和高效的生产设备，可以提供有竞争性的市场价格，满足下游厂商的需求，从而在激烈的市场竞争中保持优势地位。

在本文研究的最后，我们还构建了一个空间经济学模型，从而考虑各地政策的异质性及其对光伏产业的影响。通过构建一个允许各地有不同产业政策参数的模型，我们能够更准确地评估政策对行业发展的影响。模型中考虑了生产企业的进入和退出决策、创新投入及出口选择，这些决策受制于各地的政策环境和市场条件。研究表明，地方政府的产业政策对企业的创新活动和市场行为有显著影响，从而影响整个产业链的效率和竞争力。

综上所述，光伏电池片生产设备制造业的未来发展将依赖于技术创新、成本控制和市场需求的综合平衡。拉普拉斯新能源科技股份有限公司作为行业中的领先企业，通过优化生产流程、技术创新和有效的成本控制，已经在市场竞争中占据了有利位置。随着全球对可再生能源需求的持续增长，该公司有望在未来继续保持其竞争优势，并为全球光伏产业的发展做出更大贡献。

本文的研究不仅为光伏产业链的企业提供了决策参考，也为政策制定者和投资者理解光伏行业的动态和趋势提供了重要的洞见。在未来的研究中，可以进一步探入企业的动态资本决策以及允许电力服务作为中间产品对社会总生产的影响，以期行业的发展提供更全面的指导和建议。通过持续的研究和分析，我们希望能够为光伏产业的健康可持续发展贡献智慧和力量。

References

- Ball, Jeffrey et al. (Mar. 2017). “The New Solar System: China’ s Evolving Solar Industry and Its Implications for Competitive Solar Power in the United States and the World”. In: *the United States and the World*.
- Bustos, Paula (Feb. 2011). “Trade Liberalization, Exports, and Technology Upgrading: Evidence on the Impact of MERCOSUR on Argentinian Firms”. In: *American Economic Review* 101.1, pp. 304–40.
- De Ridder, Maarten (Jan. 2024). “Market Power and Innovation in the Intangible Economy”. In: *American Economic Review* 114.1, pp. 199–251.

- Kleinman, Benny, Ernest Liu, and Stephen J. Redding (2023). “Dynamic Spatial General Equilibrium”. In: *Econometrica* 91.2, pp. 385–424.
- Shapiro, Joseph S. and Reed Walker (Dec. 2018). “Why Is Pollution from US Manufacturing Declining? The Roles of Environmental Regulation, Productivity, and Trade”. In: *American Economic Review* 108.12, pp. 3814–54.
- 林毅夫 (June 2017). “新结构经济学、自生能力与新的理论见解”. In: 武汉大学学报 (哲学社会科学版).