

北京大学能源研究院

从供给焦虑到需求韧性

——大变局下的中国能源安全与战略重构





北京大学能源研究院
INSTITUTE OF ENERGY

北京大学能源研究院是北京大学下属独立科研实体机构。研究院以国家能源发展战略需求为导向，立足能源领域全局及国际前沿，利用北京大学学科门类齐全的优势，聚焦制约我国能源行业发展的重大战略和科技问题，按照“需求导向、学科引领、软硬结合、交叉创新、突出重点、形成特色”的宗旨，推动能源科技进展，促进能源清洁转型，开展专业及公众教育，致力于打造国际水平的能源智库和能源科技研发推广平台。

从供给焦虑到需求韧性

— 大变局下的中国能源安全与战略重构 —

北京大学能源研究院

2026年4月

致谢

报告撰写过程中，我们有幸得到业界众多专家的无私指导和协助。我们特别感谢周孝信院士（中国电力科学院名誉院长）、吴吟先生（国家能源局原副局长）、夏清教授（清华大学）对本报告所给予的全局性指导意见和所指出的缺漏之处。

我们同时要感谢来自不同领域的专家对报告初稿中涉及典型用能场景的分析内容所提的专业意见，尤其感谢王敏（石油和化学工业规划院）、李顶杰（中国石油和化学工业联合会）、张照生（北京理工大学电动车辆国家工程研究中心）和金雷鸣（滴滴能源）。我们还特别感谢杜祥琬院士、李俊峰研究员、王鹏教授等行业专家提前对报告的审阅。

本报告的研究内容绝大多数是基于我们过去数年来的跟踪研究，我们感谢在这些研究中给予我们协助的伙伴单位和专家。这些专家的宝贵意见对本报告的完善发挥着巨大作用，但最终报告的内容并不一定代表他们的观点。

报告执笔作者为郑平，王炜玮、王倩钰、韩沁珂、郭灵燕、张兰英等参与了报告部分内容的前期工作和编写，黄艺坤、郑明泽、余思远等参与了资料整理和数据处理工作，杨雷是报告的规划和组织者。报告中所述观点为作者团队的见解，不代表北京大学的立场。报告中可能的错误或不足之处均由作者团队负责。

目录

十字路口的全球能源转型与中国样本	1
执行摘要	3
第1章 主要经济体能源战略的分野与趋同	6
1.1 维度一：资源禀赋与地缘影响	7
1.2 维度二：供应链体系与制造业红利	13
1.3 维度三：系统转型敏捷度与转型中的困局	19
1.4 维度四：基础设施的承载力与系统脆弱性测试	23
第2章 中国面临的挑战	26
第3章 构建以“需求侧韧性”为核心的分布式能源体系	28
3.1 概念重塑	29
3.2 灵活性资源挖潜	30
3.3 去中心化	32
3.4 优势与阻碍	33
第4章 典型场景	35
4.1 场景一：AI算力与数据中心	36
4.2 场景二：传统重工业（以钢铁为例）	41
4.3 场景三：化工行业	45
4.4 场景四：新能源汽车与车网互动	49
4.5 场景五：工业园区	54
第5章 机制与政策	58
5.1 完善价格与市场机制——从“信号断层”走向“价值回归”	58
5.2 重新定位调度系统与电网角色——从“集中统揽”走向“分布式优先”与“责任共担”	60
5.3 重构数据体系——筑牢“分布式协同”的数字底座与公信力	61
5.4 优化转型金融机制——拓展“韧性建设”所需的财税和投资激励体系	63

十字路口的全球能源转型与中国样本

当美以伊冲突与俄乌冲突叠加的时候，全世界对于能源安全的脆弱性有了切肤之痛。当前的战事并未真正结束，世界各国在应对油气供给这个燃眉之急的同时，不得不再次反思各自的能源战略。

一个经济体究竟侧重于哪种能源战略，其背后的宏大叙事往往游走于两极：有时是以“国家安全”为绝对出发点，有时则是以“气候变化与可持续发展”为道德制高点。人们必须承认，这两种叙事角度在战略层面并无绝对的道德高下之分，它们都拥有无可辩驳的本国正当性。就在一年多以前，无论各经济体的真实战略动因是什么，从气候和减碳的角度去讨论能源问题，始终是无可指摘的“政治正确”；清洁能源是话题焦点，化石能源则是气候议程中需要“解决”的问题。然而，随着美国立场的变化，过去 20 年间全球艰难建立起来的气候共识，开始经历剧烈震荡和破碎，取而代之的是发展思路的深刻分野，以及对能源安全和供应链竞争的艰难再评估。

今天，随着中东局势陷入动荡，世界对于油气的焦虑再次达到一个高峰。此刻，无论是反思过去还是规划未来，人们对于可再生能源和核能等非化石能源的关注也以另外一种角度回归。只不过，这一次人们投向非化石能源的眼光里，看到的更多是其在能源安全方面的优势。清洁能源的安全属性和气候属性正展现出前所未有的协同潜力。

尽管此次中东战事引起的能源供给短缺，给主要经济体均带来了不同程度的冲击，但有观察家认为，作为一个极具观察价值的能源转型战略样本，中国此次似乎显得相对更加笃定从容。他们把其原因部分归功于中国持续推动交通电气化以减少油气消费，坚定发展可再生能源以建立有利于能源安全和低碳发展的能源结构。

事实上，当 2025 年美国新一届政府将其能源发展重心强势回归到化石能源的时候，大洋彼岸的中国却确立了未来十年宏伟的风电光伏装机目标，并在其 2026 年初发布的“五年发展规划”战略文件中明确要实施非化石能源十年倍增行动。

当前，能源发展道路的选择或许可以简化为以中国和美国所代表的两种不同的战略侧重：力争通过大规模发展非化石能源来换取更大的“能源独立”；或是回归以油气、煤炭为主的传统化石能源阵地，以捍卫自身既有的全球能源主导权与成本优势。

而世界上更多的经济体，似乎在这两者之间陷入了犹豫和观望。

客观而言，此刻断言中国已经坚定不移且不可逆转地选择了清洁能源替代化石能源的“能源转型路线”尚为时过早。毕竟，中国庞大的经济体依然高度依赖以煤炭为主（占比超过一半）的能源结构。风光发电量占比才刚刚超过两成，巨大的挑战就已然显现：

迅速提高的系统成本和弃风弃光比例、建立市场优化资源配置的体制机制障碍、新能源企业内外交困的局面……这些都意味着中国必须做出更加深刻的系统性改变，才能真正适应更高比例的新能源，建立新型能源体系，并迈向能源强国。这样的改变并不容易，正如中央文件所言“改革正在进入深水区”。

世界留给中国验证其绿色转型能带来真实经济红利和环境效益，并促使外部观望者做决定的时间窗口正在急剧收窄。在过去1年里，美国当前政府不仅以前所未有的速度逆转了自身的能源战略方向，更在利用其低成本的油气资源（天然气价格不到中国的三分之一）和强大的地缘政治影响力，试图把世界重新拉回符合美国本届政府利益的传统化石能源轨道。正如美国新任能源部长所言，油气已经成为美国能源强国的基础，那么新能源会成为中国建设能源强国的基石吗？或者说，还需要多久才行？

本报告试图提供一些分析，帮助人们从更多维度理解中国的能源发展境况。

报告把中国作为全球能源转型与清洁能源发展的样本，剖析其当前所处的现实环境，面临的结构性挑战及潜在的历史机遇，并尝试为其突破发展瓶颈提供可能的方案与思路建议。同时，我们也希望对中国样本的分析，可以为其他经济体的探索提供一些启发和借鉴。在曾经的20世纪，能源安全的前提是拥有和控制油、气、煤等资源，那么在新的时代，能源安全的定义可能正在变为“拥有一个无论外部如何风雨飘摇，内部依然运行高效、具有自我调节能力的能源生态系统”。

当然，今天我们讨论宏观能源议题时，无法仅从能源安全或碳减排这两个角度中择一分析，或者刻意回避国家之间的竞争及供应链脱钩等现实，那样未免显得像个脱离实际的“老学究”。因此，本报告愿意更加坦诚地着重于从安全和风险的角度来分析能源转型，报告的第一部分尤其体现了这一点。尽管如此，我们依然坚信，在我们正在经历中东局势动荡带来切肤之痛的当下，再次讨论能源转型尤其是清洁能源发展时，能源安全和碳减排这两个分析角度的诉求点已经很大程度上在趋同。我们同样也认为，在各经济体的能源战略推演中，国家安全与气候治理理应是两个需要被赋予同等权重的核心考量。

执行摘要

通过聚焦中国的能源消费、生产和制造业，本报告指出：中国过去 10 年来的大规模风电光伏装机，已使其在供给侧取得了举世瞩目的成就；但在未来 10 年，如果无法唤醒和重塑“分布式的需求侧韧性”，海量的清洁能源不仅难以转化为“能源转型”的红利，反而可能会因为系统消纳极限和电网统筹成本的急剧攀升，成为进退维谷的沉重包袱。

传统的“韧性”主要用来形容电网在遭受自然灾害或设备故障时能够迅速恢复供电的能力；而针对需求侧，过去的政策工具往往侧重于“节约用电”和“能效提升”或是带有浓厚行政强制色彩的“有序用电”。这些举措在应对当下高比例波动性新能源接入和复杂安全挑战时，已显得捉襟见肘。本报告提出的“需求侧韧性”，不是强调用户如何“少用电”，而是强调终端用能单元（如工业园区、耗能企业、数据中心、汽车、商业楼宇、社区等）如何具备高度的动态用能适应性和极端的自我生存能力。

中国能源转型的破局，必须从清晰认知自身的优劣势出发，完成从“供给侧突围”向“需求侧重塑”的底层逻辑转换。打造基于分布式逻辑的需求侧韧性，不仅是应对外部能源地缘格局震荡的必由之路，更是中国经济迈向高质量发展的底层支撑。

地缘震荡中的中国能源转型——优势、挑战与新能源消纳困局

在全球地缘政治冲突频发、逆全球化浪潮汹涌的今天，中国的能源转型处于比较鲜明的“两重天”境地，而新能源消纳已成为其中的关键。

1. 中国的战略劣势：化石能源的深度依赖与地缘脆弱性

中国的能源软肋在于传统的化石能源体系。高达 70% 以上的原油和 40% 以上的天然气依赖进口，进口来源日益受到地域格局变化的深度影响，且运输命脉高度集中于马六甲海峡、霍尔木兹海峡等远洋咽喉。在极端情景下，这种“供给焦虑”会构成中国能源安全的关键卡点。

2. 中国的战略优势与契机：新能源的崛起与绿色贸易护城河

与之相对，中国能源转型的底气，在于以风电、光伏、电池为代表的新能源全产业链的绝对优势。大力发展新能源，不仅是中国摆脱海外油气依赖、实现“能源独立”的关键契机，也是中国制造业在面对欧盟碳边境调节机制（CBAM）等新型绿色贸易规则时有力的应对手段。通过大规模应用极低成本的绿电，中国工业有望构筑起“低成本 + 零碳排”的双重护城河。

3. 当前的核心挑战：装机猛进与消纳滞后的错位

依托自身的产业优势，中国在过去数年经历了全球瞩目的新能源装机增长。然而，中国同时也正面临一场极其严峻的新考验：巨大的新能源装机量与严重滞后的系统消纳能力之间，产生了剧烈冲突。面对风光发电“靠天吃饭”的秒级随机波动，现有电力系统的处理能力越来越有限。弃风弃光率抬头、负电价频发、系统运行成本攀升，正在反噬新能源的发展红利。

4. 破局之道：从聚焦供给侧，转向唤醒“需求侧韧性”

面对消纳难题，传统的解决思路习惯于向“供给侧”要答案——例如扩建特高压输电线路和主干网，投资上马抽水蓄能和电化学储能，短期内新增大量低利用率的煤电作为调峰备用。然而，这些供给侧的重资产投资正面临巨大的边际收益递减压力，且其高昂的成本最终必将转嫁给终端制造业，削弱国家整体竞争力。

因此，本报告提出核心论断：**解决新能源消纳危机并真正实现能源转型，决不能再单腿走路，当前更主要且更经济性的战略发力点，是全面加强“需求侧韧性”**。必须将庞大的终端用能负荷，从被动的“消费者”改造为主动的“调节器”，用分布式的微观灵活性和韧性，去承载宏观的新能源消纳压力。

打破物理限制——调动需求侧韧性的典型场景

中国拥有全球最庞大、门类最齐全的工业与交通基本盘，其中蕴含着惊人的需求侧灵活性潜力。报告深度剖析并规划了构筑需求侧韧性的五大典型场景。初步估计，仅此五大场景就具备至少数亿千瓦低成本的灵活性调节能力，大致规模相当于目前所有抽水蓄能、新型储能和调节性气电的装机总和。

- ◎ **场景一：AI 算力与电力系统的跨时空协同。**数据中心是未来的耗电大户。通过与“东数西算”战略结合，引导非实时性的大模型训练等算力任务，跟随西部风光出力的波动变化，在东西部数据中心之间进行毫秒级的空间转移。将算力网络化化作消纳绿电的最强柔性引擎之一。
- ◎ **场景二：重工业的“电热切换”改造。**钢铁、有色等重工业不应仅仅被视为减碳包袱。高热负荷的重工业可以通过配置大温差熔盐储热、高温工业热泵等技术，在绿电过剩时海量吸纳极低成本电力转化为较低成本的热能储存。这不仅大幅降低企业的综合用能成本，更让传统高炉变成支撑电网平衡的巨型物理调节器。
- ◎ **场景三：化工行业的“分子互换”与柔性制氢。**打破化工生产高度依赖油气与煤炭的刚性路径。利用柔性电解槽，在风光大发时大规模制取绿氢，实现从“电子”到“分子”的跨介质储能，这为化工行业提供了摆脱化石能源价格波动的第二增长曲线；同时，这种跨介质互换同样也在增强电力系统的柔性。
- ◎ **场景四：构建亿千瓦级的车网互动网络。**电动汽车不仅是交通工具，更是分布在千家万户的移动储能单元。通过强制普及智能充电与 V2G 双向充放电技术，将未来上亿辆新能源汽车聚合，相当于为国家凭空打造了一个容量远超所有建成抽

水蓄能总和的“超级移动储能电站”。

- ◎ **场景五：零碳微电网与产业园区的高度平衡自治。**鼓励工业园区建设源网荷储一体化的微网。通过内部多能互补实现高度自给自足。在面临极端灾害或大电网断电时，这些园区能够自我生存，成为维系国家工业基本盘的坚强底座。

强化制度保障——支撑分布式需求侧韧性的体制机制

物理场景的潜力巨大，但在当前体制下，这些需求侧资源仍处于“休眠”状态。要将潜在韧性转化为现实力量，中国需要在关键的顶层设计上推动变革：

1. 价格信号与灵活性资源的“同权变现”

现行电价机制难以反映新能源真实的供需信号。在已经启动的电力现货市场建设的基础上，需要加速推动现货市场价格直达海量工商业用户。同时建立“需求侧容量补偿市场”，让企业的“不耗电能力（调节能力）”正式成为与发电厂具有同等地位、可交易变现的金融资产，用市场机制终结拉闸限电现象。

2. 电网体制改革与安全责任的分布式共担

面对海量碎片化的需求侧节点，传统电网“大包大揽”的集中调度模式已力不从心。急需重新讨论电力主干网与配电网的角色定位和管理模式，启动并深化相关体制改革：大干线电网“向上归位”，专职跨区域宏观互济；将配网及微网的运行权向下开放，赋予配网、微网和零碳园区独立的物理调度权和“隔墙售电”合法性。厘清安全责任边界，按照“谁受益谁承担”原则合理分担成本和责任。

3. 确立“数据平权”的国家能碳数字孪生底座

分布式的协同离不开底层数据的互通。目前电表与通信数据高度垄断，阻碍了第三方的聚合调控。主管部门应将基于物联网的能碳数字基建提至战略高度，确立“谁产生数据，谁拥有数据”的平权原则。打造中立透明的数据交互平台，既为微网调度提供秒级神经中枢，也为中国制造出海提供符合国际互认标准的动态碳足迹测算的数据支撑。

4. 完善转型金融与财税激励机制

重工业与园区的柔性技改面临一定的初期沉没成本，单靠赚取峰谷电价差难以及时回本。主管部门应出台专属的转型金融政策，研究将需求侧响应能力作为底层资产进行证券化融资，实现收益前置。同时，针对柔性改造装备实施专项投资税收抵免与“加速折旧”，用切实的财税红利，支持全社会的韧性改造。

从“供给焦虑”向“需求侧韧性”的战略转移，是一场涉及物理重构与体制破冰的系统性变革。在未来十年（2026-2035）的关键期，依托海量的新能源装机优势，激活需求侧的亿万个分布式韧性细胞，中国不仅能化解迫在眉睫的新能源消纳危机，逐步缓解油气资源进口受制于人的局面，更将锻造出一张具有高度韧性的绿色能源网络，为实体经济的低碳发展提供坚强保障。

第一章 主要经济体能源战略的分野与趋同

能源问题历来与国家发展深度绑定，在 20 世纪，能源主要被视为生产与生活的成本要素和后勤保障；但现如今，在传统能源贸易的基础上，清洁能源相关产业也已跃升为经济增长最核心的“引擎”之一。从 2013 年到 2022 年，全球太阳能设备贸易增长了 56%，风能设备相关贸易增长了 39%，远高于整体工业产品的 23% 增速¹。2023 年，清洁能源产业给全球经济新增了约 3200 亿美元，相当于全球 GDP 增长的 10%²。

更深层次的变革源于技术与政治的共振。首先，人工智能（AI）革命已进入算力爆发期，能源供应的稳定性和成本已成为决定一个国家 AI 产业上限的关键变量。其次，随着全球化共识的逐渐瓦解，美国推行“本国优先”政策，欧洲似乎也可能被动或主动地推行“欧洲优先”政策，在此背景下，能源体系的发展不再仅仅体现为资源开发与供给能力，还与产业链韧性及对冲地缘政治风险的能力紧密相关。

本章从资源禀赋、供应链体系、转型实效和基础设施四个维度，对中国、美国、欧盟及其他主要经济体的能源发展近况进行更新分析。我们认为，一年前尚占主流的“全球能源转型共识”已被打破，取而代之的是以安全和韧性为核心的不同发展战略。

如果分别以中国和美国为样本，其能源发展战略似乎代表着两种不同的侧重，即力争发展以风电、光伏为主的清洁能源³以争取更大能源独立和可持续发展，还是回归以油气、煤炭为主的传统化石能源以捍卫自身的能源竞争力。自 2025 年美国新一届政府执政以来，美国正力图利用其强大的地缘政治影响力和本土资源禀赋，把自身乃至世界拉回其最熟悉，也拥有绝对主导权的传统化石能源轨道。

中国则一直在尝试另辟蹊径，将战略重注押在清洁能源领域。过去十年，中国已经大规模提高了清洁能源装机量，并在清洁能源技术装备和关键矿产加工上取得显著优势，后者也在很大程度上促进了其经济增长。不过，中国根本的利益诉求并非只是出口创汇，而是希望借此实现对本国能源命脉的掌控，逐步减少对高比例能源进口的依赖。

1 UNCTAD. Trade in renewable energy powers ahead, but barriers slow transition. 2025.11. <https://unctad.org/news/trade-renewable-energy-powers-ahead-barriers-slow-transition>, 报告显示了绿色能源装备制造业及其相关活动对全球 GDP 增长的显著贡献。

2 IEA(国际能源署). Clean energy is boosting economic growth.2024.04. <https://www.iea.org/commentaries/clean-energy-is-boosting-economic-growth>该研究分析了三类清洁能源相关经济活动，包括清洁能源技术制造、部署清洁电力装机和清洁设备(如电动车和热泵)销售。分析显示，美国 GDP 在 2023 年增长了 2.5%，其中清洁能源增长的贡献占到 6%，这与热门的人工智能相关产业的贡献相当。同期，中国 GDP 增长了 5.2%，而清洁能源的贡献更是占到 20%。另有分析认为，2025 年，清洁能源技术产业贡献了中国 GDP 增长的近三成。Carbon Brief. Analysis: Clean energy drove more than a third of China's GDP growth in 2025. 2026.02. <https://www.carbonbrief.org/analysis-clean-energy-drove-more-than-a-third-of-chinas-gdp-growth-in-2025/>

3 在中国政策语境中，风电、光伏和生物质通常被统称为新能源，尤指前两者。为避免重复，在本报告中，除特别说明外，“清洁能源”与“新能源”在风电、光伏和生物质的范围内作同义使用。

然而，决定中国能否实现其战略诉求的关键，并非能制造和出口多少块光伏板或风机，也并非能在本土安装多少块光伏板或风机，而是能否在其庞大的能源体系中，真正实现清洁能源的大规模、高稳定性利用——即中国能源语境中所说的“高比例消纳”。这是跨越能源独立门槛的最关键，也最具挑战的一跃。如果成功，其不仅在未来处理能源地缘冲突中拥有更大的灵活性，也能在全球供应链低碳化进程中起到引领作用；同时，这也将为众多其他经济体实现能源转型提供可复制的案例。

(一) 维度一：资源禀赋与地缘影响

当前，“资源”的定义已从单一的地下能源扩展为化石能源、可再生能源开发潜力与关键矿产（锂、钴、镍、稀土等）供应链的综合叠加。在这个多维度的资源版图上，中美欧展现出了不同的禀赋特征与战略图谋。

美国：重塑化石能源强权与地缘杠杆

自 2025 年特朗普政府重新入主白宫以来，美国的能源战略经历了剧烈的“路径回归”。特朗普政府宣布进入“国家能源紧急状态”，发布行政命令《释放美国能源》（Unleashing American Energy），强调扩大石油、天然气和煤炭开发，加快能源基础设施建设，以充分发挥美国在化石能源资源方面的禀赋优势⁴。2025 年，美国原油产量达到创纪录的 1360 万桶/日⁵，稳固了其全球最大油气生产国和主要出口国的地位⁶。

4 The White House. Executive Order 14154 — Unleashing American Energy. 2025.01. <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/01/unleashing-american-energy/>. 白宫向各联邦机构下达指令，暂停、修订或废除被认为不必要甚至阻碍能源开发的规制，特别是在石油、天然气、煤炭、水电等领域。

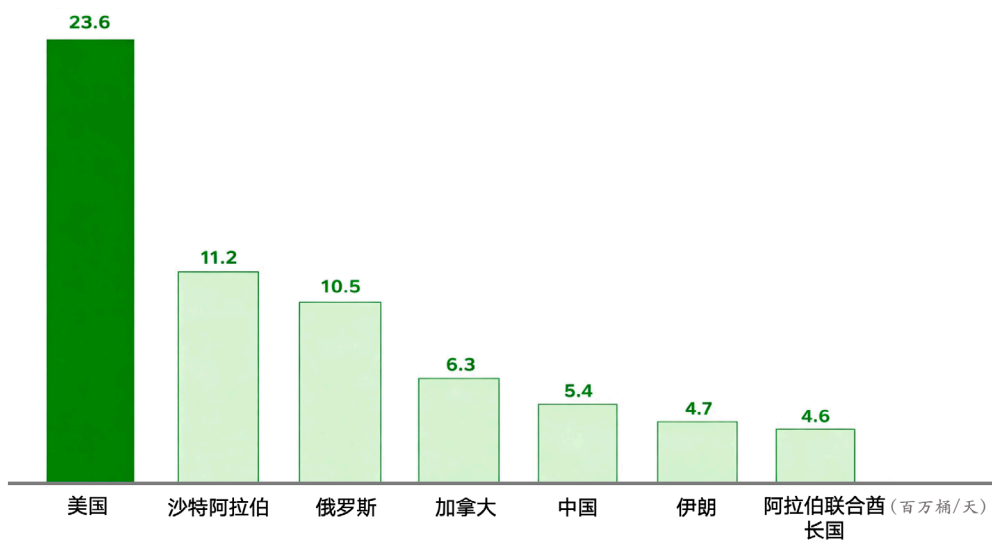
5 EIA(The U.S. Energy Information Administration, 美国能源信息署). EIA forecasts near-term U.S. crude oil production will remain near 2025 record, <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=67045>.

6 根据 EIA 的数据，2025 年美国原油产量以日均 1360 万桶的创纪录水平继续位居全球第一；天然气产量达到约 47.7 万亿立方英尺（1.35 万亿立方米），同样位居第一；原油出口量约 14.55 亿桶/年（近 400 万桶/日），是全球前三大原油出口国之一；天然气出口量达 0.254 万亿立方米，继续保持全球最大天然气出口国地位。 https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_crd_crpdn_adc_mbbldpd_a.htm

根据美国能源部和 EIA 的信息，自特朗普 2025 年上台以来，美国油气生产和出口都创下新记录，其石油和液体燃料的生产量超过了位居第二位和第三位的沙特和俄罗斯的总和，天然气的生产量超过了位于第二、三、四位的俄罗斯、伊朗和中国的总和。 <https://www.energy.gov/state-american-energy-promises-made-promises-kept>; <https://www.energy.gov/articles/fact-sheet-delivering-us-oil-and-natural-gas-production>; <https://www.eia.gov/international/data/world/petroleum-and-other-liquids/annual-petroleum-and-other-liquids-production>; <https://www.eia.gov/international/data/world/natural-gas/dry-natural-gas-production>?

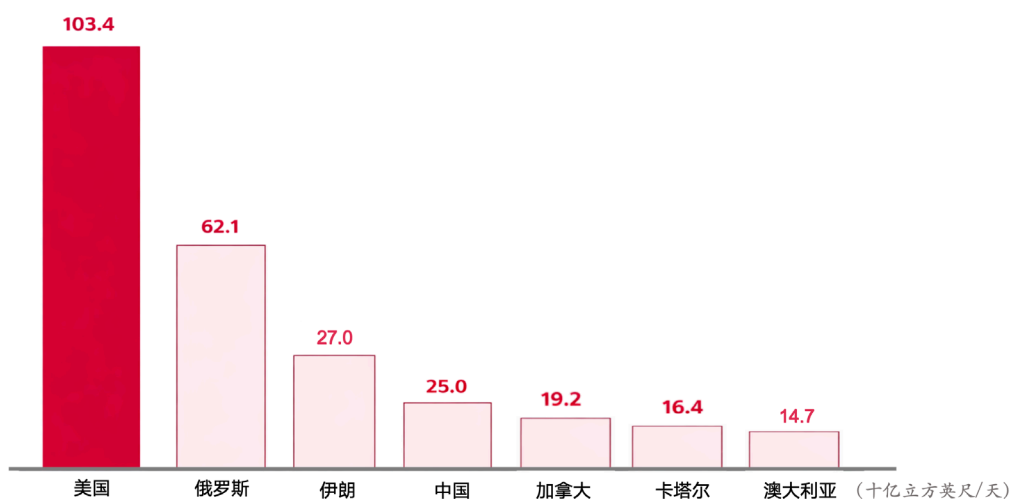
需要说明的是，虽然特朗普政府的能源政策向化石能源倾斜，但并不表明其本土的清洁能源发展会迅速降温。实际上，由于来自数据中心等的终端电力需求快速增长，而清洁能源具有建设周期短、成本低等优势，在 2026 年仍然占据了美国新增电力装机的主体地位。根据 EIA 的统计，2026 年美国已规划的公用事业级新增电力装机将达到创纪录的 86GW，其中太阳能光伏、储能电池和风电分别占到 51%、28% 和 14%，天然气发电仅占 7%。 EIA. New U.S. electric generating capacity expected to reach a record high in 2026. 2026.02. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=67205>

图 1-1: 美国及部分国家石油和液体燃料产量 (2025 年)



信息来源: EIA (美国能源信息署)

图 1-2: 美国及部分国家天然气产量 (2025 年)



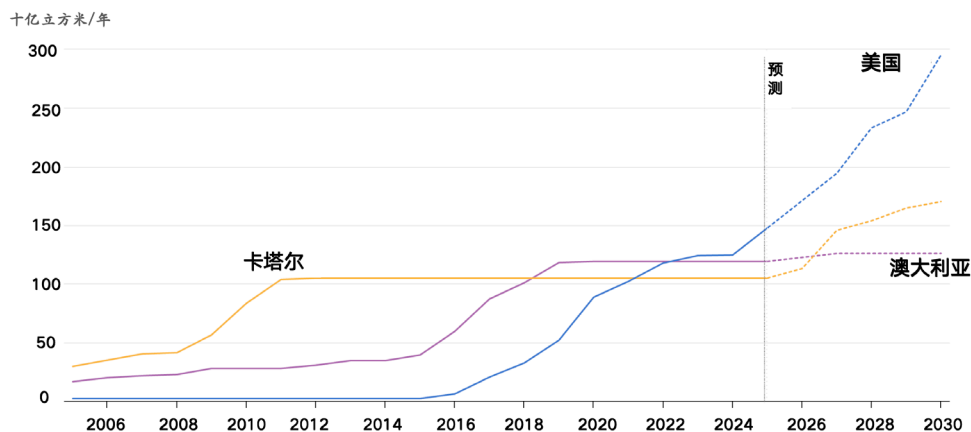
信息来源: EIA (美国能源信息署)

美国的主导权已不再局限于其自身作为主要能源输出国的角色; 通过对中东传统产油国的外交施压与安全合作布局, 以及对俄罗斯、委内瑞拉、伊朗等国实施定向封锁或控制⁷, 美国的能源影响力进一步得到巩固。在全球市场, 美国持续发挥着作为化石能源

7 在本文行将完稿的2026年初的这几个月内, 美国已经在1月上旬实质掌控了委内瑞拉的能源调配; 在2月底, 美国、以色列

流向与价格形成机制中主导者的角色⁸。美国的战略意图十分明确：只要全球经济的大动脉依然流淌着石油和天然气，美国就能通过控制这条大动脉，对其其他经济体形成有效制约。

图 1-3: 美国及部分国家 LNG 出口能力 (2005-2030 年)



信息来源：IEA（国际能源署）

此外，在关键矿产领域，尽管美国本土开采能力有限，但其正通过构建“矿产安全伙伴关系”（MSP）等排他性联盟，利用“友岸外包”战略⁹，试图搭建独立于中国之外的供应链体系¹⁰。2026年2月，美国主导召开“关键矿产部长级会议”，包括欧盟、日本、印度和澳大利亚在内的与会方围绕供应链韧性与战略安全展开讨论¹¹。会议释放出一种信号：美国正通过多边合作机制，在关键矿产开采、加工与投资领域推进供应链重构。其核心目标之一是减少对中国在关键矿产领域主导地位的依赖，从而构建相对独立的供应体系。

和伊朗之间的冲突爆发。

8 IEA. World Energy Outlook 2025. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025/executive-summary>; <https://iea.blob.core.windows.net/assets/81980a53-9716-47f1-904e-b92a2c4d2ea4/WorldEnergyOutlook2025.pdf>.

9 简单来说，“友岸外包”（Friend-shoring）是指将供应链和生产活动转移至地缘政治友好、价值观相似国家的一种战略，以减少在供应链领域对竞争对手的依赖。

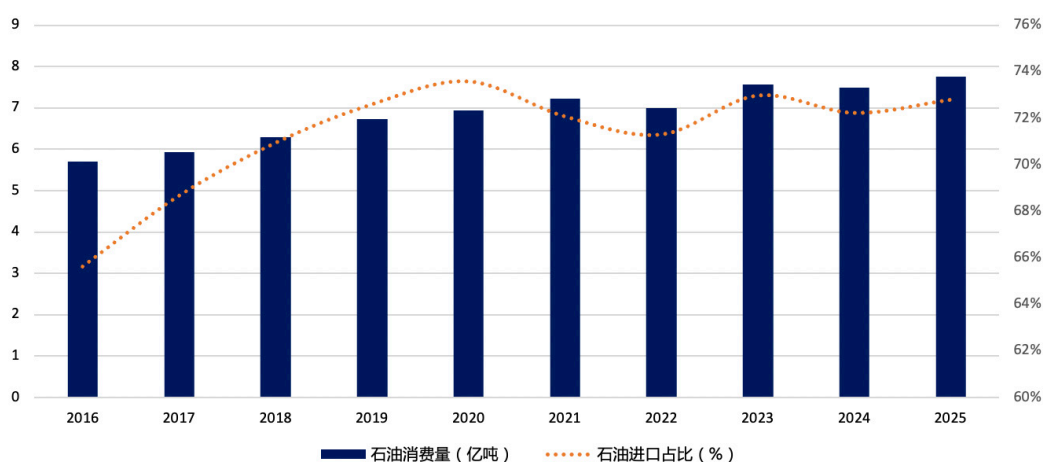
10 U.S. Department of State, House of Representatives. Minerals Security Partnership Authorization Act. 2025.07. <https://www.congress.gov/bill/119th-congress/house-bill/4391/text/ih>. 该文件明确指出美国需要减少或消除对中国等战略竞争对手控制的关键矿产供应链的依赖。

11 美国驻华大使馆. 2026年关键矿产部长级会议. 2026.02. <https://china.usembassy-china.org.cn/zh/2026-critical-minerals-ministerial/>

中国：油气软肋、煤炭压舱石与清洁能源的结构性突围

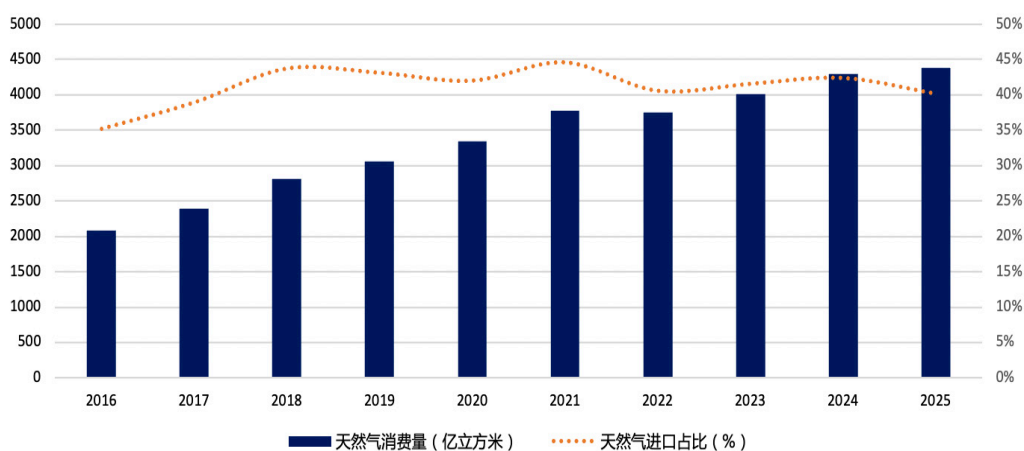
中国的能源资源禀赋呈现出略带分化的“结构性矛盾”。一方面，中国是全球最大的能源进口国，原油和天然气的对外依存度分别超过 70% 和 40%¹²。马六甲海峡、霍尔木兹海峡等关键咽喉通道的安全风险以及极端地缘冲突情况下能源进口受限，始终是悬在中国头顶的“达摩克利斯之剑”。

图 I-4：中国石油消费量及进口占比（2016-2025 年）



信息来源：国家统计局、国家能源局、海关总署

图 I-5：中国天然气消费量及进口占比（2016-2025 年）



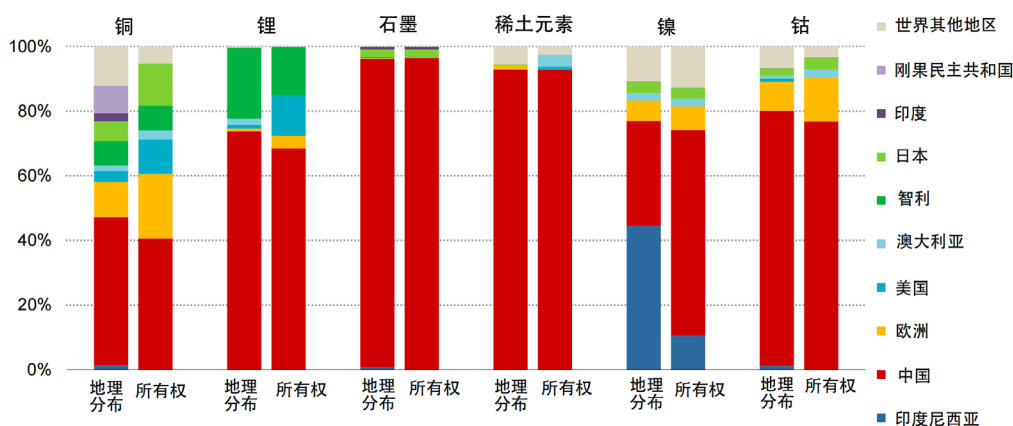
信息来源：国家统计局、国家能源局、海关总署

12 国家统计局. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2025/indexch.htm>

为了应对这一系统性脆弱，中国采取了“两条腿走路”的战略。首先，在不利的地缘环境下，中国始终保持着对煤炭这一本土最丰富能源的战略依赖。2025 年中国煤炭产量创下历史新高，作为“应急压舱石”的作用空前体现¹³。在极端不利的地缘政治冲突或供应链断裂情景下，中国庞大的本土煤炭产能将是维持国家运转的重要防线¹⁴。其次，中国正以惊人的速度推进可再生能源的开发，力图通过将可再生能源转化为“本土内生资源”来逐步置换进口油气和高碳排放的煤炭。然而，这种转型正处于从“量变”到“质变”的临界点，如何将这些庞大的天然资源转化为可用的电能以及其他形式的能源，是中国目前最大的资源挑战。

在关键能源矿产方面，中国拥有全球 10% 的锂、28% 的石墨、49% 的稀土元素（REEs）和 20% 的铀储量；同时，中国在全球关键矿产的开采（包括通过海外股权控制）与冶炼加工环节占据着主导地位——例如开采出全球 22% 的锂、61% 的稀土元素和 87% 的天然石墨，控制着全球 44% 的铜精炼、70-75% 的锂和钴加工，以及超过 90% 的稀土元素和电池级石墨精炼¹⁵。但这同样是一把双刃剑：由于大量未加工的原矿仍需从非洲、拉美等地区进口，中国在关键矿产领域的控制力实际上建立在非常脆弱的跨国供应链之上，极易受到地缘政治的影响。

图 I-6: 关键矿产精炼能力区域分布 (2024 年)



信息来源：基于 IEA（国际能源署）对标普全球（S&P Global）和伍德麦肯兹（Wood Mackenzie）数据的分析。注：所有权依据公司总部所在地确定。对于由多家公司共同运营的项目，其产量归属于持股比例最大的公司。铜的数据基于 2024 年前 20 大矿业公司，覆盖全球 56% 的产量。锂的数据覆盖 2024 年全球 100% 的产量。稀土数据覆盖 94% 的产量，镍覆盖 91%，钴覆盖 94%。稀土指全部稀土元素总量。

13 国家统计局. 2025 年 12 月份能源生产情况. 2026.01.19. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202601/t20260119_1962322.html 数据显示中国 2025 年规模以上工业原煤产量 48.3 亿吨，创历史新高，比上年增长 1.2%。

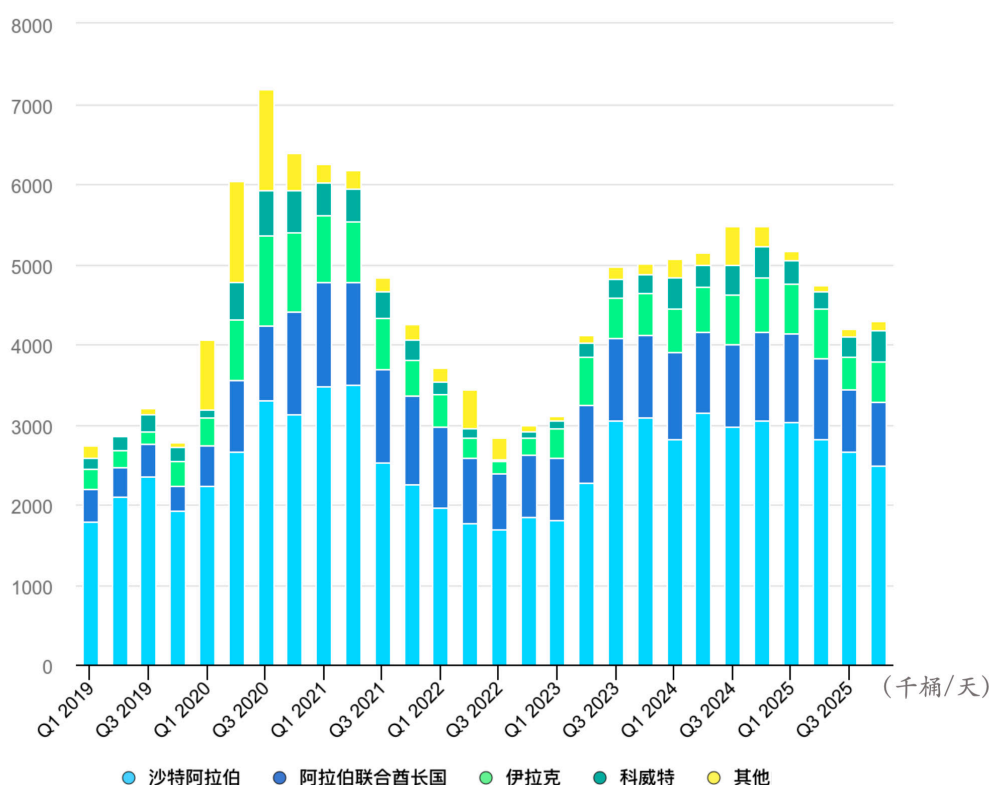
14 国家发展和改革委员会. 关于建立煤炭产能储备制度的实施意见（发改能源规〔2024〕413 号）. 2024.04. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202404/content_6944907.htm. 意见特别指出煤炭在能源供应中的兜底保障作用。

15 IEA. Global Critical Minerals Outlook 2025. 2025.06. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ef5e9b70-3374-4caa-ba9d-19c72253bfc4/GlobalCriticalMineralsOutlook2025.pdf>. 报告指出中国在全球诸多关键矿产的储量、开采和加工中均占有重要份额。

欧佩克与俄罗斯：旧秩序的守卫者与战略支点

在当今多极化能源格局中，以沙特为首的欧佩克成员国以及俄罗斯依然是不可忽视的资源杠杆。沙特凭借较大的闲置产能以及在全球新增产能中的核心角色，对全球供给弹性与市场平衡具有显著影响力¹⁶。俄罗斯自俄乌冲突后在持续地被制裁和被封锁中，通过其“影子船队”和向东方市场深度渗透，仍然是全球资源供给中一个极具影响力的变量。

图 I-7: 欧佩克有效闲置石油产能分布 (2019-2025 年)



信息来源：IEA（国际能源署）。注：“其他”包括欧佩克内的其他经济体（伊朗和委内瑞拉的受制裁产能除外）

欧盟：资源匮乏者的治理突围

相比于中美，欧盟（以及部分欧洲代表性国家）在物理资源禀赋上处于较大劣势。2022 年俄乌冲突后，欧洲付出了高昂的经济代价才勉强切断了对俄罗斯廉价管道天然气

16 IEA. Oil 2025. <https://www.iea.org/reports/oil-2025>. 报告预测沙特阿拉伯将在 2030 年前引领 OPEC+ 整体产能增长。

IEA. Strait of Hormuz Factsheet.2026.02. <https://www.iea.org/about/oil-security-and-emergency-response/strait-of-hormuz>

的依赖，这深刻暴露了其化石能源匮乏的关键不足¹⁷。

然而，正是这种资源的匮乏，倒逼欧洲在能源效率管理、需求侧响应和治理规则创新上走在了全球最前沿。欧盟不仅在加速挖掘本土及北海地区的海上风电潜力，更通过实施碳边境调节机制（CBAM）等措施，试图将自身在“绿色规则”上的领先优势转化为一种新的“资源”——即通过设定碳排放门槛，削弱化石能源禀赋丰富国家的成本优势，从而在缺乏地下资源的情况下，确立其在全球低碳经济秩序中的话语权¹⁸。

(二) 维度二：供应链体系与制造业红利

如果说资源的分布是自然天成，那么制造业的版图则是大国依靠产业政策和资本意志的主动作为。过去十年，清洁能源技术（光伏、风电、储能电池、热泵、电网设备等）已经从边缘的环保产业，演变为全球经济增长的一大主力。全球能源转型投资在 2025 年突破了 2.3 万亿美元，相关制造业增加值已经成为全球主要工业国 GDP 增长的核心驱动力¹⁹。

在这个维度上：中国拥有大部分物理产能和制造业红利，而美国和欧洲为了自身“供应链安全”，力图在本土和特定伙伴国内复制一套不完全依赖中国的平行供应链，但也在付出一定的“安全溢价”。

中国：绝对优势地位与“内部市场过度竞争”的代价

中国在力图改善能源安全环境而大力发展清洁能源的过程中，催生了一个可能连中国自身也没有预料到的“副产品”——清洁能源技术优势。在清洁能源装备制造环节，中国目前具有优势地位。这种优势不是停留在最终产品的组装上，而是贯穿于从基础材料提纯到核心零部件制造的“垂直一体化”全链条。

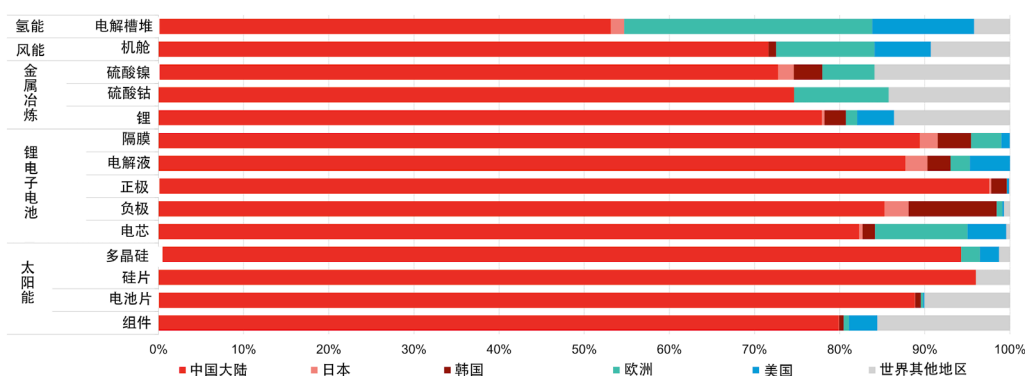
17 European Commission. EU action to address the energy crisis. https://commission.europa.eu/topics/energy/eu-action-address-energy-crisis_en. 文章指出俄乌冲突引发了欧盟前所未有的能源危机，同时总结了欧洲应对危机的举措。

18 European Union. Carbon Border Adjustment Mechanism. 2026. https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en. 欧盟内部通过 EU ETS 碳市场给生产设定碳成本，通过 CBAM 对进口商品补征碳成本差额，使高排放国家出口欧盟成本上升，从而一定程度上维护欧盟产业竞争力。

19 BloombergNEF (BNEF, 彭博新能源财经). <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/bloombergnef-finds-global-energy-transition-investment-reached-record-2-3-trillion-in-2025-up-8-from-2024/> 2026.01. 报告指出 2025 年全球能源转型投资达到 2.3 万亿美元，其中 1270 亿美元流向清洁能源供应链制造环节；电气化交通、可再生能源和电网投资是最大的投资驱动因素，表明能源转型正成为驱动全球工业投资与产业结构升级的重要力量。

制造业红利的兑现：截至 2025 年，中国在全球光伏制造各环节已形成高度集中优势：多晶硅产能约占全球 96.0%，硅片产能占比高达 96.2%，电池产能占 91.3%，组件产能约占 80.1%²⁰；在动力及储能电池领域，中国在电池供应链中也占据主导地位，拥有全球近 85% 的电池电芯产能²¹。这种规模效应带来了巨大的制造业红利。在过去两年中国国内房地产和传统基建投资放缓的背景下，以“新三样”（电动载人汽车、锂电池、太阳能电池）为代表的清洁能源产业链，成为支撑中国宏观经济增长、吸纳高质量就业的“经济引擎”之一。

图 I-8：清洁能源产品制造产能地区分布（2024 年）



信息来源：BloombergNEF（彭博新能源财经）。注：本图展示各市场在相关产业中的产能占比。统计口径基于生产设施所在地，而非企业母公司的注册或归属地。太阳能、氢能及电池组件的产能分别以兆瓦（MW）、兆瓦时（MWh）、平方米或公吨为计量单位。

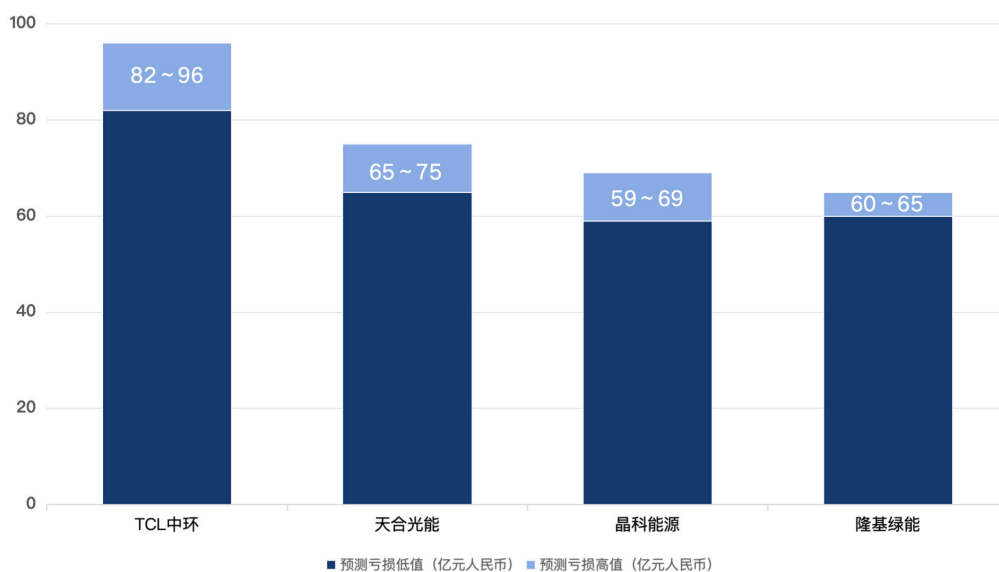
“国内市场过度竞争”的悖论与战略性亏损：然而，中国在取得这种优势地位的同时，其国内产业生态正经历着残酷的“内卷”（内部市场过度竞争）。由于前几年的盲目扩张，中国光伏和电池行业产能高速增长，大量产能闲置。以 2025 年的光伏行业为例，光伏行业中国 A 股上市公司 2025 年业绩预告显示，行业整体仍处亏损区间，多数企业延续亏损态势。例如，中国 A 股上市光伏企业 TCL 中环预计亏损 82 亿至 96 亿元，其他行业龙头企业如天合光能、隆基绿能、晶科能源的预计亏损区间也在 60 亿至 75 亿元之间²²。

20 北京日报. 中国光伏产业链稳居全球主导地位,“反内卷”仍是重中之重. 2026.02. <https://xinwen.bjd.com.cn/content/s69853eb9e4b0687a2890d6b7.html>. 在中国光伏行业协会举办的 2025 年发展回顾与 2026 年形势展望研讨会上,中国光伏行业协会顾问王勃华公布相关统计,显示中国光伏产业链在全球仍然占据主导地位。

21 IEA. Status of battery demand and supply. 2025. <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions/status-of-battery-demand-and-supply>.
BloombergNEF. Clean Energy Trade and Emerging Markets. 2025.10. <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/clean-energy-trade-and-emerging-markets-the-impact-of-tariffs-on-the-energy-transition/>
关于光伏、风机和锂电池等产品的产能,由于统计口径和方法不同,各机构的统计数据有所不同,例如中国光伏行业协会、IEA 和 BloombergNEF 的具体数据均略有出入。

22 人民日报. 2025 年光伏上市公司业绩持续承压. 2026.01. https://paper.people.com.cn/zgnyb/pad/content/202601/26/content_30136309.html;
巨潮资讯. 2025 年度各企业业绩预告报告. <http://www.cninfo.com.cn/new/fulltextSearch?>

图 I-9: 中国光伏企业亏损状况 (2025 年)



信息来源: 巨潮资讯

这导致了一个听起来难以理解的图景: 中国许多处于全球绝对领先地位的龙头企业, 在快速拓展国际市场的同时, 自身却陷入了巨额亏损的泥潭。从纯商业角度看, 这是一种“惨胜”; 但从国家层面看, 这种“通过过度竞争将价格打到全球最低”的现象, 客观上构筑了一道比较难以突破的成本护城河。这也使得其他经济体在试图重建本土清洁能源制造体系时, 不得不面对中国企业的这道成本护城河。当然, 如何以一种更加理性和可持续的模式发展, 则是中国和其他经济体必须共同面对的问题。

美国: 制造业回流的不确定性与“核能超车”的尝试

面对中国的制造业霸主地位, 美国在过去五年里一直力图加速制造业回流, 既希望美国企业把供应链和主要的制造环节从其他经济体转移回本土, 也希望吸引更多其他经济体的企业在美国进行制造业投资。尤其是在 2022 年通过具有历史意义的《通胀削减法案》(Inflation Reduction Act, IRA), 试图用数千亿美元的财政补贴强行扭转供应链走向。然而, 美国在供应链回流方面虽然取得了一定效果, 但还面临一些现实挑战。

产业回流的进展与不确定性: IRA 实施后, 受财税政策激励 (如 Section 45X Advanced Manufacturing Production Tax Credit), 制造业确实成为美国清洁能源技术投资中增长最快的领域, 例如电池、光伏组件和电动车等; 投资额从 IRA 最初实施的 2022 年第三季度的 25 亿美元增长到 2025 年第一季度的 140 亿美元, 近乎翻三番; 同期, 各类企业对外宣布了共 380 个制造项目, 近一半已经在 2025 年初投入运营, 本

土制造和本地供应的能力也相应提高²³。在清洁电力制造行业，每年给全美国 GDP 贡献了 180 亿美元，提供超过 12 万个制造岗位²⁴。不过，与此同时，特朗普政府缩减了联邦政府对清洁能源项目的支持而转向化石能源，加之受对外税战以及需求市场不确定性上升等影响，部分项目被宣布取消或延期。

SMR 微型核反应堆 - 美国的战略对冲：在风光储供应链上短时间内难以取得优势地位的现实，以及现行能源供给系统未来难以可持续发展的窘境，迫使美国开始寻找“技术换道超车”的可能。当 AI 算力狂飙突进、数据中心用能告急的关头，美国政府和科技巨头（如谷歌、亚马逊、微软）将战略重心转向了微型模块化核反应堆（SMRs）和下一代先进核能技术²⁵。美国不仅在 SMR 的设计研发上处于全球领先梯队，也将其视为建立未来能源竞争力的一条关键技术路线。美国正试图通过确立在微型核反应堆领域的全球技术与制造标准，打造另一条属于“美国优先”时代的能源供应链，以此在未来的算力能源竞赛中掌握主动权。

欧盟：防御性产业政策与“去风险”的阵痛

如果说美国还有底气通过重回自身熟悉的赛道或者开辟新赛道来取得自身的相对优势，那么欧盟在重塑其供应链的过程中则显得尤为痛苦和挣扎。

本土制造业难以重现辉煌：欧盟在 2024 年推出《净零工业法案》（Net-Zero Industry Act），雄心勃勃地设定了到 2030 年本土净零技术制造能力应能够满足其年度部署需求的 40% 的目标²⁶。然而，在中国低成本光伏组件的激烈竞争以及美国 IRA 产业补贴的虹吸效应下，欧洲本土的清洁能源制造业仍面临较大压力。例如，欧洲老牌光伏企业 Meyer Burger 已关闭其在德国的组件工厂，并一度计划将生产重心转向美国市场，但公司随后仍陷入财务困境并进入重组程序²⁷。在风电整机制造领域，欧洲曾经的代表企业（如西门子歌美飒）也深陷质量危机和巨额亏损，而中国风机制造商的快速崛起

23 Clean Investment Monitor. The State of US Clean Energy Supply Chains in 2025. 2025.04. 根据该报告的跟踪统计，美国电池和光伏组件的本土制造能力已能满足本地需求，电动车和电网规模的储能有望在 2035 年前都可以满足市场需求。 <https://www.cleaninvestmentmonitor.org/reports/us-clean-energy-supply-chains-2025>

24 American Clean Power Association (ACP). The State of Clean Energy Manufacturing in America. 2025.05. <https://cleanpower.org/resources/america-builds-power/>

25 CNBC. Google signs deal with nuclear company as data center power demand surges. 2024.10 <https://www.cnbc.com/2024/10/14/google-signs-deal-with-nuclear-company-as-data-center-power-demand-surges.html> 谷歌与 SMRs 小型反应堆公司 Kairos Power 签署协议，从其购买电力。
越来越多的科技公司开始把核能纳入其战略能源计划，以满足他们数据中心的巨量用能。
<https://www.constellationenergy.com/news/2025/constellation-meta-sign-20-year-deal-for-clean-reliable-nuclear-energy-in-illinois.html>.
<https://ir.talenenergy.com/news-releases/news-release-details/talen-energy-expands-nuclear-energy-relationship-amazon>.
<https://www.constellationenergy.com/news/2024/Constellation-to-Launch-Crane-Clean-Energy-Center-Restoring-Jobs-and-Carbon-Free-Power-to-The-Grid.html>

26 European Commission. Net-Zero Industry Act Fact Sheet (2024). 2024.06. <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/eu-net-zero-industry-act.html>.

27 Reuters. Swiss solar panel maker Meyer Burger files for US Chapter 11 bankruptcy relief. 2025.06. <https://www.reuters.com/legal/litigation/swiss-solar-panel-maker-meyer-burger-files-us-chapter-11-bankruptcy-relief-2025-06-25/>. 瑞士光伏企业 Meyer Burger 难以应对来自亚洲同行的竞争，被迫于 2025 年 5 月关闭了其位于美国亚利桑那州的光伏组件工厂，随后其德国子公司也启动了破产程序。Meyer Burger. 2023. https://gb.meyerburger.com/en/gb2023/letter-to-shareholders.html?utm_source. 2024 年该公司决定关闭德国弗赖贝格(Freiberg)的组件工厂，并将战略重心转向美国生产。

也在加剧全球市场竞争²⁸。2026年3月，欧盟委员会又正式接受一项新的立法提案——《工业加速器法案》（Industrial Accelerator Act, IAA），同样旨在促进“欧盟制造”，并设立目标：把制造业在欧盟GDP中的占比从2024年的14.3%提高到2035年的20%。但欧盟这次能否实现其目标，还需要靠时间来验证²⁹。

“防御性”关税与转型悖论：面对其他经济体（尤其中国）在供应链制造领域的优势地位，欧盟在2023年出台了《外国补贴条例》（Foreign Subsidies Regulation, FSR）等防御性工具³⁰，甚至对中国风电企业在欧盟从事风力涡轮机生产和销售等活动展开了深入的外国补贴调查³¹。但这就陷入了一个死循环：欧盟在气候目标上非常激进，极度需要廉价的绿色能源设备来实现减碳；而为了保护其本土制造业，又不得不建立极高的贸易壁垒，促使本土消费者需要购买昂贵的欧洲设备。这种“既要便宜能源，又要本土制造”的内生矛盾，会导致欧洲的能源转型成本攀升，间接削弱欧洲整体工业（如化工、汽车）在全球的竞争力。

印度与其他经济体：平行供应链的次级受益者

在评估全球能源供应链时，我们不能忽视正在迅速崛起的“第三方力量”，这包括印度、墨西哥、东盟等经济体。

印度——野心勃勃的中国替代者：印度正试图借鉴中国在过去二十年的产业崛起路径。通过实施生产挂钩激励计划（Production Linked Incentive, PLI）并竖起关税高墙（如对进口太阳能组件征收40%的关税）以促进本土制造业发展，并在一定程度上吸引跨国资本³²。2025年印度在Approved List of Models and Manufacturers (ALMM) List-I³³框架下新增约81GW的太阳能组件制造产能，较2024年的新增规模几乎翻倍；截至2025年11月，印度累计太阳能光伏装机容量已经达到132.85GW³⁴。

28 BloombergNEF (BNEF). Chinese Manufacturers Lead Global Wind Turbine Installations. 2025.03. <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/chinese-manufacturers-lead-global-wind-turbine-installations-bloombergnef-report-shows/> 彭博新能源财经的2024年全球风机出货量统计显示，中国企业占据市场前四位，这是自2013年以来首次出现这种格局；在全部前10名中，中国企业就占据6席，欧洲和美资制造商仅占少数席位。

29 European Commission. Commission proposes Industrial Accelerator Act to strengthen industry and create jobs in Europe. 2026.03. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_26_515. https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/industrial-accelerator-act_en.《工业加速器法案》将制造业在欧盟GDP中的占比从2024年的14.3%提升至2035年的20%，并设计了四个主要的实施路径，包括支持本土制造、为特定领域（主要包括电池、电动车、光伏和关键原材料等）的大规模外国投资(FDI)增设限制条件、简化审批流程、促进可持续制造等。

30 European Commission. Foreign Subsidies Regulation. https://competition-policy.ec.europa.eu/foreign-subsidies-regulation_en 2023.07.

31 European Interest. Commission opens in-depth foreign subsidies investigation into Chinese Goldwind's wind sector activities in Europe. 2026.02. <https://www.europeaninterest.eu/commission-opens-in-depth-foreign-subsidies-investigation-into-chinese-goldwinds-wind-sector-activities-in-europe/>. 欧盟委员会根据《外国补贴条例》对中国风机制造商金风科技进行深入调查，怀疑其可能因国家补贴而在欧盟市场获得竞争优势。调查最初是在2024年启动，并于2026年升级为“深入调查”。

32 PLI Scheme: Powering India's Industrial Renaissance. <https://www.pib.gov.in/PressNoteDetails.aspx?ModuleId=3&NotelId=155082®=3&lang=2>, 2025.08

33 Approved List of Models and Manufacturers (ALMM) List-I for Solar PV Modules. <https://mnre.gov.in/en/notice/approved-list-of-models-and-manufacturers-alm-list-i-for-solar-pv-modules-extension-in-validity/>

34 Solar Now. India Adds 81 GW Solar Module Manufacturing Capacity In 2025. 2026.01. <https://now.solar/2026/01/07/india-adds-81-gw-solar-module-manufacturing-capacity-in-2025-taiyangnews/>. 印度正通过“关税保护 + PLI 补贴 + ALMM 本土化制度”构建以内需为支撑的制造体系，加速从光伏消费大国向制造能力提升型国家转型，但其产业升级仍主要集中在组件与电池环节，尚未触及上游核心供应链控制力。

对于渴望“去风险”的美国市场而言，印度是一个比较好的替代者。然而，印度的供应链依然是比较脆弱的。其目前的产能大部分集中在技术门槛最低的末端组装环节，而上游的硅片、电池片乃至制造设备，仍然严重依赖从中国进口。实际上，它目前扮演的似乎是一个将中国上游中间品转化为“符合美国政治正确要求”的成品的角色；不过，印度已经在努力向供应链的高端升级。

东盟与墨西哥——“绕道”策略的枢纽：类似于印度的角色也由越南、泰国、马来西亚等东盟国家以及墨西哥扮演。这些国家通过承接中国的中间产品，完成最终组装后出口至美国和欧洲³⁵。某种角度上说，这些经济体实际上正从中美紧张的贸易关系中受益。至于特朗普政府是否会采取强硬措施限制这些“中间国”的经贸行为，还存在不确定性。这种现象似乎从一个侧面证明了一个事实：政治上的“去风险”有时可能只是物理上的“重定向”。美国和欧洲虽然希望供应链尽可能多元化，但也需要在风险和成本之间取得平衡，直接或间接地继续购买关联中国技术和资本的能源装备也许是符合其利益最大化的权衡结果。

综上所述，在“供应链体系与制造业红利”这一维度上，中国凭借规模优势、全产业链闭环以及残酷内部竞争中淬炼出的成本控制力，确立了在清洁能源制造领域的领先地位。然而，这种主导力正在引发美国、欧盟等经济体的担忧和防御性政策。美国回归化石能源系统正在规避中国在清洁能源制造领域的优势，欧洲在自身制造业优势减弱的情况下，正试图以“合情合理”的方式削弱中国制造业对欧洲的冲击，而印度等国则在夹缝中争取产业链转移的红利。

对于中国而言，在取得装备制造优势的基础上，海量的高性价比的清洁能源设备首先被应用于中国本土的可再生能源开发，带来了令全球都惊讶的可再生能源发展速度。但在高速发展的同时，“发得出、用不上”的转型困局，正成为中国能源系统最现实的挑战。

35 HKUST Li & Fung Supply Chain Institute. Global Supply Chain Report. https://ustfsci.hkust.edu.hk/sites/default/files/2025-12/Global_Supply_Chain_Report_DEC2025_Solar.pdf 报告指出制造企业正在通过全球生产布局以应对贸易壁垒与市场风险，如部分中国企业将生产线迁往东南亚(越南、泰国、马来西亚、柬埔寨等)以应对关税。
EBRD. Connector Economies in a Fragmenting World.2025.02. <https://www.ebrd.com/home/news-and-events/publications/economics/working-papers/connector-economies-fragmenting-world.html>.

(三) 维度三：系统转型敏捷度与转型中的困局

评估一国在能源转型方面的进展时，容易陷入的陷阱是将清洁能源“装机量”等同于“转型成果”。然而，在如今高度波动的能源市场与地缘环境下，真正的转型效果不再仅仅体现为能够制造或安装多少风机和光伏板，而是体现为“系统转型敏捷度”³⁶。

在这里，“系统转型敏捷度”指的是：一个国家或地区的能源网络，在面对高比例的间歇性可再生能源接入时，能够通过物理灵活性、市场机制和需求侧响应，低成本、高效率地实现供需实时平衡，并实质性地完成对化石能源“真实替代”的能力。

在这个维度上，全球三大经济体展现出了不同的演化路径：欧洲在资源匮乏的倒逼下成为敏捷度的标杆；美国的能源战略已经回撤至化石能源，对能源转型的关注度已显著降低；而中国，尽管拥有全球最庞大的清洁能源资产，却深陷“大而不敏”的系统性困局，这已成为制约其能源战略主动权的最大挑战。

欧盟（以德国为代表）：市场驱动下的“弹性标杆”

尽管缺乏本土化石能源的退路（维度一的劣势）以及本土制造业供应链的衰退（维度二的劣势），但欧盟，特别是德国，却在“系统敏捷度”上开展了颇有成效的探索。

市场价格信号引导：德国的系统敏捷度并非主要来源于庞大的物理储能电站或者化石能源调峰，而是来源于不断完善的电力现货市场（如欧洲电力交易所 EPEX SPOT）。在德国，当风光发电激增导致供大于求时，电价会迅速进入“负电价”区间。2025年上半年，德国电力市场出现了近400小时的负电价时段³⁷。这种极端的市场信号，就像是一根指挥棒，自动唤醒需求侧的灵活性——工业用户会在此时启动高耗能设备，储能设施开始充电，甚至跨国互联电网也会自动将多余电力输送至邻国。

分布式的“虚拟电厂”与底层耦合：德国成功打破了“大电网集中调度”的单一模式，通过“单元平衡机制”等手段广泛部署虚拟电厂并鼓励聚合商发展。通过高度数字化的底层耦合，数以百万计的家庭热泵、屋顶光伏、电动汽车充电桩被聚合成了可以在

36 Oxford Institute for Energy Studies. Flexibility Case Studies for the Clean Energy Transition: Suggestions for China from European Experience. 2025.11. <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2025/11/CE18-Flexibility-Case-Studies-for-the-Clean-Energy-Transition.pdf> 报告指出可再生能源的快速增长带来了系统运行挑战，需要比过去更高的系统灵活性。欧盟委员会的测算表明，灵活性需求占总电力需求的比例将从2021年的11%上升至2030年的24%，并在2050年达到30%。这意味着电力系统的核心约束需要从“容量建设”转向“运行调节能力”。European Commission. 2023.03. https://energy.ec.europa.eu/topics/research-and-technology/energy-storage/key-facts-energy-storage_en

37 PV Magazine. Germany's day-ahead market posts 389 hours of negative prices in H1. 2025.06. <https://www.pv-magazine.com/2025/06/30/germanys-day-ahead-market-posts-389-hours-of-negative-prices-in-h1/> 2025年仅上半年德国负电价时段已达389小时，接近2023年全年水平，显示出价格信号在应对光伏发电高峰时的剧烈调节作用。这种频发的负电价机制正通过经济杠杆倒逼市场提升灵活性，成为德国在不依赖额外煤电备用情况下管理高比例可再生能源的核心市场驱动力之一。

秒级响应电网指令的“弹性海绵”。欧洲能源转型在继续推动“装机扩张”的基础上，逐步转向“系统运行优化”。随着传统可调电源退役、可再生能源占比提升和电气化加速，电力系统在日内、周内及季节尺度上的灵活性需求显著增加，灵活性正日益成为电力系统安全与稳定运行的重要条件³⁸。

美国：主动回撤下的关注点转移

如果从传统的绿色转型角度来看，美国整体的转型进展较缓慢，且目前的电网系统也显老旧，其系统转型敏捷度表现欠佳。不过，在 2025 年以来特朗普政府的能源战略下，美国实际上已经主动改变了游戏规则。

具有天然气这一“灵活性护城河”：天然气发电具有很好的爬坡和启停能力，是比较传统，也比较敏捷的应对风光出力波动或负荷波动的物理手段。2025 年，天然气发电占美国全社会总发电量的 40%³⁹。这意味着，当风光波动、极端天气来临或负荷激增时，美国电力系统可以依靠燃烧本土充足且廉价的天然气（不到中国价格的三分之一）来快速平抑波动。当然，随着特朗普政府重新强调化石能源发展⁴⁰，美国能源政策的重点一定程度上从高比例可再生能源消纳转向电力系统供应能力的快速扩张，以满足数据中心和本地制造业增长带来的电力需求。退一步来说，即使美国能源结构中具有高比例的可再生能源，其本也可以凭借廉价的页岩气资源和煤炭资源，构建一条“化石能源护城河”。

当然，对当前的美国而言，较缓慢的绿色转型和欠佳的电网敏捷度，并非某种战略漏洞，而是一种基于资源禀赋的“主动选择”。美国并不急于解决风光消纳的难题，其战略重心在于利用能源成本优势（廉价天然气和煤炭）吸引全球制造业以及算力中心回流，从而支撑经济基本面。

38 Oxford Institute for Energy Studies. Flexibility Case Studies for the Clean Energy Transition: Suggestions for China from European Experience. 2025.11. <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2025/11/CE18-Flexibility-Case-Studies-for-the-Clean-Energy-Transition.pdf>. 报告指出可再生能源的快速增长带来了系统运行挑战，需要比过去更高的系统灵活性。

European Commission. 2023.03. https://energy.ec.europa.eu/topics/research-and-technology/energy-storage/key-facts-energy-storage_en. 欧盟委员会的测算表明，灵活性需求占总电力需求的比例将从 2021 年的 11% 上升至 2030 年的 24%，并在 2050 年达到 30%。这意味着电力系统的核心约束需要从“容量建设”转向“运行调节能力”。

European Parliament. Increasing Flexibility in the EU Energy System. 2025.03. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2025/769347/ECT1_STU\(2025\)769347_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2025/769347/ECT1_STU(2025)769347_EN.pdf). 该报告从制度与市场设计角度分析了高比例可再生能源条件下灵活性需求的上升，同时系统评估了储能、需求响应和电网互联等解决方案。

Cédric PHILIBERT. The Strategic Dimension of Power System Flexibility: Opportunities in Europe. Studies, Ifri. 2025.05. <https://www.ifri.org/en/studies/strategic-dimension-power-system-flexibility-opportunities-europe>. IFRI 报告则指出，在传统可调电源退役和电气化推进的背景下，灵活性在周际与季节尺度上的重要性增强，缺乏调节能力将加剧价格波动与系统风险。

39 EIA. Short-Term Energy Outlook: Natural Gas as the Unyielding Backbone of US Generation. 2026.02. <https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/natgas.php>

40 The White House. Reinvigorating America's Beautiful Clean Coal Industry and Amending Executive Order 14241. 2025.04. <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/04/reinvigorating-americas-beautiful-clean-coal-industry-and-amending-executive-order-14241/>. 特朗普政府发布行政令，力图重振美国煤炭工业。

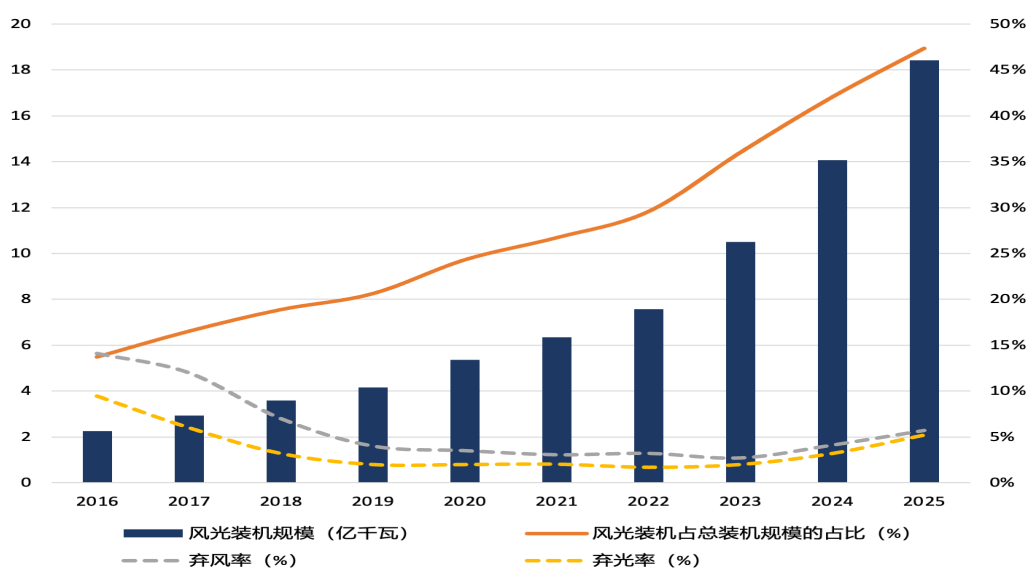
U.S. Department of Energy (DOE). Funding Notice: Restoring Reliability: Coal Recommissioning and Modernization. 2025.09. <https://www.energy.gov/hgeo/funding-notice-restoring-reliability-coal-recommissioning-and-modernization> 美国能源部在 2025 年 9 月宣布，将投资 5.25 亿美元支持煤炭行业的改扩建。

中国：装机巨人面临的“系统性挑战”

与美国的主动回撤不同，中国对可再生能源的诉求是具有极高战略紧迫性的。中国希望通过加速清洁能源的替代，来扭转油气进口受制于人的不利局面并壮大自身的清洁能源装备制造业，拉动经济增长。然而，正是这种极高的战略期望与国内僵化的能源系统架构之间产生了摩擦，暴露出中国在“维度三”上的软肋。

“增量难替代”的转型悖论：中国的风电和光伏总装机容量，远超过其他经济体。但关于实际利用率的数据却隐藏在装机量背后：截至 2025 年，中国风光累计装机量突破 18.4 亿千瓦，在总装机量中的占比已高达 47%，历史性超过火电，而风光发电量却仅占总发电量的 22%⁴¹。与之相应的，则是巨大的弃风弃光隐患。近年来，风电和光伏利用率持续下降；根据国家能源局数据，2023-2025 年，中国风光弃用率分别约为 2.0-2.7%，3.2-4.1% 和 5-6%⁴²。以 2025 年为例，全国风电平均利用率为 94%，光伏发电利用率为 95%；在部分省份，正式统计的数据显示弃风弃光率已开始逼近 10%⁴³，而在一年中的某些不同时段，弃风弃光的实际比例会更高。

图 I-10：中国风电光伏装机规模及弃风弃光率（2016-2025 年）



信息来源：国家能源局、全国新能源消纳监测预警中心

41 国家能源局. 我国风电光伏累计装机首超 18 亿千瓦. <https://www.nea.gov.cn/20260130/503483f133e44016a66dd6fad8ab695/c.html>; 2025 年可再生能源并网运行情况. <https://www.nea.gov.cn/20260212/742b8c6a078347b0b39de676c05c5d58/c.html>

42 国家能源局. 可再生能源并网运行情况; 全国可再生能源电力发展监测评价结果. 2023-2025 年. https://zfxxgk.nea.gov.cn/2024-10/10/c_1310787115.htm; <https://www.nea.gov.cn/20250221/e10f363cabe3458aaf78ba4558970054/c.html>; <https://www.nea.gov.cn/20260212/742b8c6a078347b0b39de676c05c5d58/c.html>

43 电力行业规划研究与监测预警中心. 2025 年全国新能源并网消纳情况. 2026.02 <https://mp.weixin.qq.com/s/OLJUhiavT3CHAKBDYLviWg>

这背后的系统问题值得重视。由于风光能源的间歇性，为了保障日益增长的电力需求以及电网的安全，中国在大量上马新能源的同时，不得不继续批准建设大量煤电机组用来调峰。据有关统计，2025 年中国新增近 80GW 煤电装机，截至 2025 年底仍有近 290GW 已规划煤电装机处于在建状态（相当于在运营煤电装机容量的近 1/5）⁴⁴。这种一定程度上“为了消纳绿电而不得不建煤电”的窘境也许要一直持续到 2035 年，这就导致中国的能源系统陷入一种“新能源增量巨大，但短期内无法形成对化石能源存量的替代”的困局⁴⁵。旧的化石能源包袱不仅没有减轻，反而在系统维持稳定性的刚性需求下会在一定时期内被进一步固化。

大电网与“源随荷动”的刚性体制：导致上述悖论的一个重要原因在于中国长期以来一直引以为傲的“坚强大电网”架构以及传统的体制机制。

长期以来，中国的电力系统奉行“源随荷动”的原则，即发电端必须无条件满足用电端的需求，而需求侧（工业、商业、居民）则长期不认为是能源系统的组成部分。源与荷之间的调配及平衡，由高度集中化的电网企业来负责。这种高度集中，既体现在电网的物理架构上，也体现在电力的调度体系上。在传统的源与荷都相对比较稳定的电力系统中，集中化的电力调度体系可以有效运行并发挥规模效益的优势，但在面对高比例的新能源时就显得力不从心了，而这种系统越庞大，反而会显得越笨重。

1. 物理上和体制上的不敏捷：以特高压线路为例，一旦中国西部天气骤变导致送电功率急跌，东部受端电网的稳定性将面临巨大风险，这就需要东部紧急启动天然气、煤电或储能进行快速调节。除了特高压线路，中国也在全国范围内进行了大量投资用于各地电网建设，这些现代化的电网系统本来对于新能源消纳来说是一个优势，但随着中国中东部地区自身越来越多的集中式和分布式新能源开始大规模建设和出力，这些电源绝大多数都由电网企业这唯一的集中管道（调度体系）来调配，导致后者经常力不从心，其结果就是很多省份陆续出现所谓的“红区”（即禁止新能源并网的区域）。
2. 市场机制的缺失：与欧洲不同，中国大部分地区的用户侧尚未建立起真正反映电力实时供需稀缺性的现货价格机制。虽然，2025 年以来，中国的现货市场建设速度加快，但长期以来僵化的用户侧分时电价、目录电价一直掩盖了绿电波动带来的真实系统成本。当系统最缺乏灵活性的时刻，用户端缺少感知，自然也没有动力去削减或转移负荷。

缺乏有效的电网调度系统，又缺乏需求侧响应机制和灵活的市场定价，最终的代价只能在供给侧消化。其结果呈现出来的正是前述的逐年攀升的弃风弃光率，而当未来十年面临年均增长 2 亿千瓦甚至更高的新增风光装机规模时，在现有模式下，弃风弃光量势必越来越大。这不仅是巨大的资源浪费，也严重削弱了清洁能源项目的投资回报率，构成能源转型进程中严重的系统性风险。

44 Centre for Research on Energy and Clean Air & Global Energy Monitor. Built to peak: Coal power expansion runs out of room in China. <https://energyandcleanair.org/publication/built-to-peak-coal-power-expansion-runs-out-of-room-in-china/>

45 尽管新增煤电并不全是为新能源调峰，有一部分是为了满足正常的新增电力需求，但这实际上也说明，尽管新能源装机规模快速增长，仍然没有实现对化石能源的替代。

(四) 维度四：基础设施的承载力与系统脆弱性测试

能源基础设施（物理管网与输配电网络⁴⁶）是一个能源体系的基本支撑。在极端气候频发和地缘冲突不断的背景下，评估一国在基础设施方面的表现，不再是单纯比拼线路的里程或电压的等级，可能还需要进行一场残酷的“终极测试”：在面对极端的外部冲击（极端气候、网络攻击）或者内部结构性突变（AI算力猛增、高比例新能源接入）时，这套物理系统是能够高效运行，还是会发生灾难性的崩溃？

整体而言，美国在油气端拥有完善的基础设施，但在电网端相对滞后；欧洲则通过高度互联的系统维持着较强的韧性。

而中国，试图打造一副无坚不摧的“电力钢铁骨架”，但这种过度集中化的基础设施体系，存在着非常大的系统性隐患。在和平时期，它可以是经济的加速器；但在极端自然灾害或地缘政治极端事件面前，它的脆弱性可能就会随时暴露出来。真正的能源安全，不应建立在侥幸心理之上，认为可以凭借及时响应或者依靠庞大的备用系统来保证整个主干网和配电网的安全。只有通过重构系统架构，打破对单一庞大电网的绝对依赖，中国才有可能搭建起支撑其能源转型雄心的能源基础设施体系。

美国：“两极分化”基建下的算力电网危机

美国的基础设施呈现出一种巨大反差：拥有完善的化石能源输送网络，但同时却拖着一张老化滞后的公共电网。

油气管网的地缘支撑力：美国的油气基础设施是其能源实力的坚实底座。从其内陆页岩气产区延伸至墨西哥湾沿岸的密集管道网络，以及分布在沿海的大型液化天然气（LNG）出口终端，使美国具备了强大的能源调配与出口能力⁴⁷。这套高度市场化、又具备一定冗余的物理网络，经受住了多次飓风等自然灾害的考验，是美国本土能源体系的基石，也是其向贸易伙伴输送能源商品的核心通道。随着特朗普政府重新回归化石能源体系，这套系统也进一步增强了其底气。

老化电网与 AI 算力的正面相撞：然而，在电力基础设施方面，美国却面临严峻的承载力危机。多项美国能源部及电网研究显示，美国电网基础设施普遍老化，全美超过70%的输电线路和变压器已运行超过25年⁴⁸。而与此同时，人工智能大模型带来的算力

46 本文对能源基础设施的分析，聚焦于单个经济体“内部”的主要设施系统，不包括其海外设施，也较少涉及氢能或核能相关系统。

47 U.S. Energy Information Administration (EIA). Natural gas explained: Natural gas pipelines. 2024.03. <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/natural-gas-pipelines.php>. 美国天然气管网体系覆盖美国本土各州，主干网总长度约300万英里。

48 American Society of Civil Engineers. Infrastructure Report Card. 2025. <https://infrastructurereportcard.org/cat-item/energy-infrastructure/>. 报告指出，消费者和企业对数据存储设施、人工智能的依赖日益加深，给本已脆弱老化的电网带来了巨大压力。

需求正迅速推高电力需求，随着多个 GW 级数据中心园区在北美规划或建设，美国电网扩容速度正面临越来越大的压力。虽然特朗普政府已经试图加强其电网系统建设⁴⁹，但这需要时间。另外，如果这些科技公司的数据中心完全依赖现有公共电网满足其用电需求的话，有可能会推高普通家庭和中小企业的整体用电成本以及全社会的通胀；为此，在特朗普政府的压力下，一些主要的大型科技公司都签署了承诺书，承诺自行承担为其数据中心供电的新建或扩容的发电厂和电力输送系统的成本⁵⁰。不过，即使这些公司都自建电厂，在并网方面仍然存在挑战。例如，在 PJM 等大型互联电网中，新项目的并网排队时间甚至被拉长到超过 4 年⁵¹。

与美国的老化和中国的集中型相比，欧洲在电力基础设施上走出了一条以“拓扑韧性”为核心的道路。

欧洲没有单一的“超级国家电网”，但通过欧洲输电系统运营商联盟（ENTSO-E⁵²），30 多个国家的电网被编织成了一张紧密的跨国网状拓扑结构。这种网络最大的优势在于拥有较高的冗余度与互济能力。当某个国家（例如法国的核电因故停机，或德国遭遇无风无光的时期）出现巨大的能源缺口时，周边的跨国互联通道可以进行电力支援。

值得重视的是，在乌克兰危机爆发后，欧洲能源体系在安全性与韧性方面的短板被显著放大，特别是大型集中式能源设施在极端冲突情境下易成为关键攻击目标。在此背景下，欧盟在既有能源转型路径基础上，进一步强化了对分布式能源与配电网体系的重视；其约 70% 的未来能源资产预计将接入配电层级，投资重点逐步向分布式网络与数字化管理能力倾斜⁵³。

中国：集中式大电网的坚强与隐忧

中国拥有一套基于煤炭、煤电体系的完善高效的电力基础设施，油气基础设施也可圈可点，但对中国未来能源系统影响更大的是其电力系统。如前所述，中国致力于发展清洁能源电力以摆脱对化石能源尤其是油气的依赖，而在这场转型中，以电网为骨架的

49 The White House. Executive Order 14262 - Strengthening the reliability and security of the United States electric grid. 2025.04. <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/04/strengthening-the-reliability-and-security-of-the-united-states-electric-grid/>

50 The Guardian. US tech firms pledge at White House to bear costs of energy for datacenters. 2026.03.04 <https://www.theguardian.com/us-news/2026/mar/04/us-tech-companies-energy-cost-pledge-white-house>. 诸如 Google, Microsoft, Meta, Amazon 等公司于 2026 年 3 月初在白宫签署了此承诺书。另据美国能源信息署 EIA 的统计，由于天然气价格上涨的原因，美国 2025 年整体电价比 2024 年有所上涨。 <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=67106>

51 Berkeley Lab. Queued Up: Characteristics of Power Plants Seeking Transmission Interconnection. 2025. <https://emp.lbl.gov/queues>. 在 2000-2007 年，发电厂从申请并入电网到运营的中位时间不到 2 年；而在 2018-2024 年，这个过程已经拉长到超过 4 年。

52 ENTSO-E Strategic Roadmap 2024.2. https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/Publications/ENTSO-E%20general%20publications/entso-e_strategic_roadmap_WEB_240215.pdf 报告指出以 ENTSO-E 为代表的互联网络连接了 36 个国家的 40 个传输运营商，通过跨境通道实现了“动态平衡”。通过区域协调中心(RCCs)的统一调度，这种拓扑结构能够有效应对单一国家因极端气候(如核电冷却受阻或无风无光的停滞期)造成的电力缺口，利用周边国家的冗余容量进行跨国互济，较大程度上确保了系统的整体抗风险能力与供应安全。

53 European Commission. Study on network development planning, tariff structures and connection requests for electricity distribution grids. 2025. https://energy.ec.europa.eu/topics/infrastructure/european-grids_en. 报告指出，未来约 70% 的能源资产预计接入配电层级，反映出电力系统由集中式向分布式结构转型的趋势。

电力传输和调度系统是其中至关重要的基础设施。

长期以来，中国致力于建设世界上规模最大、电压等级最高、最“坚强”的电网。从表面数据来看，确实取得了较大成就：全球最大规模的纵横交错的特高压直流 / 交流输电线路把西部的能源基地与东部的经济中心紧密相连；在核心城市，供电可靠性甚至达到了惊人的 99.999%。然而，这种追求极致集中和物理庞大的基础设施体系，同时也带来了系统性风险。

未经极限检验的“坚强”：中国电网目前所展现出的可靠性，是一种在相对和平年代、在不受重大外部冲击下的“相对稳定”。我们必须认识到，在过去 75 年里，中国的核心能源基础设施极少经历过系统性的高烈度破坏⁵⁴。这种电力系统的稳定性和韧性，尚有待检验。

极端自然灾害和现代战争（如俄乌冲突中的能源基础设施破坏）的现实案例似乎提供了一个证明：电网系统建得越庞大、越集中、越依赖长距离输送，其潜在的系统性崩溃风险就越高。在极端的自然灾害或人为破坏情景下，只要几个特高压枢纽换流站瘫痪，或是几个大型变电中枢受到破坏，就足以引发大面积、波及大量生产和生活的停电灾难⁵⁵。

电力体制与清洁能源消纳的错位：除了外部安全隐患，集中式大电网在应对内部能源转型时，也暴露出不同程度的体制与物理不适。中国主要有国家电网和南方电网两个超大型电网，其中，国家电网的经营区几乎覆盖了全国 88% 的疆域和超过 11 亿人口⁵⁶。这种运营体制，其底层管理逻辑是“自上而下的控制”；而风电、光伏等清洁能源的物理属性却是“碎片化、波动性、自下而上”的。

这种基础设施架构及管理模式与新能源特性的错位，导致了消纳管理的困难。大电网擅长于调度大型和巨型火电厂，但面对数以百万计的屋顶光伏和分散风机却显得非常笨重。为了维持这张巨型网络的频率和电压稳定，电网管理者往往倾向于采取最保守的策略——牺牲风光等清洁能源（常被称为“垃圾电”）的并网率，或者要求系统继续捆绑高碳的煤电机组或者成本高昂的储能系统（见本章“维度三”的分析）。也许，正是这张试图包揽一切的集中式大电网，在某种程度上反而约束了中国清洁能源系统灵活性的高效提升。

54 1976 年的唐山大地震和 2008 年的汶川大地震，这两场局部自然灾害曾对社会基础设施造成了极大破坏，包括能源系统。

55 Congressional Research Service (CRS). Attacks on Ukraine's Electric Grid: Insights for U.S. Infrastructure Security and Resilience. 2024. <https://www.congress.gov/crs-product/R48067>. 文章分析了乌克兰电网在俄乌冲突中受攻击的情况，以及对美国的启示。高压变电站和大型电力变压器属于电力系统中的关键节点资产，一旦发生失效，可能引发区域性甚至跨区域的连锁故障，对供电可靠性造成显著冲击。

56 国家电网有限公司. http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc_main/gb/gywm/gsjz/index.shtml

第二章 中国面临的挑战

在第一章的多维评估中，我们粗略分析了中美欧在能源战略上的异同，以及各自的发展特点（见表 2-1）。

表 2-1: 中美欧能源发展特点与表现 (2026)

评估维度	中国	美国	欧盟
维度一： 资源禀赋与地缘	中/弱。油气高度依赖进口；面临潜在的进口受阻风险；以煤炭为底线支撑。	极强。全球最大油气生产国；利用同盟重塑油气流通与定价。	弱。本土化石能源极度匮乏；依赖规则制定弥补劣势。
维度二： 供应链与制造业	极强。在光伏、风机、电池、电动车等装备制造领域具备显著优势，占据全球大部分市场份额。	中/弱。补贴回流受阻于高成本；试图利用 SMR 核能技术超车。	弱。本土制造业溃退；处于防守性保护和“去风险”阵痛期。
维度三： 系统转型敏捷度	中。装机规模大但体制导致消纳困难；缺乏灵活响应。	中。转型非战略重点；依赖天然气发电作为天然缓冲池。	强（标杆）。现货市场发达；虚拟电厂和分布式微网成熟。
维度四： 基础设施承载力	中（集中隐患）。大电网缺乏抗打击冗余度。	中。油气管网强；但公共电网老化，制约 AI 算力扩张。	较强（拓扑韧性）。跨国互联互通能力强，向去中心化演进。

在经历了过去十年的狂飙突进后，中国在清洁能源的制造端和供给端（装机量）已经取得了毋庸置疑的成绩。然而，这种目前仅建立在规模上的产能优势，还面临着无法有效转化为能源转型效益的严峻系统性瓶颈。

消纳危机：旧模式难以驾驭新能源

目前中国内部最显著的挑战，集中体现在维度三（敏捷度）和维度四（基础设施）。大量的清洁能源电力被生产出来，却无法被有效消纳，很多沦为电网中难以驾驭的“垃圾电”或者直接被现行的电网系统排除在外。如果不能以最快速度解决这个“消纳与系统承载力”问题，中国会很快丧失在清洁能源领域的先发优势，其雄心勃勃的试图以清洁能源逐步替代化石能源的战略宏图也将难以实现。同时，这也可能因为庞大资金的低效沉淀而拖累宏观经济。

当前的症结在于，中国正在试图用 20 世纪的“旧电网管理范式”来驾驭 21 世纪的“新结构能源”。长期以来，中国的能源战略高度聚焦于供给侧的扩张与输电网络的集中化建设。其中一个基本逻辑是：在西部建设庞大的风光基地，通过跨越数千公里的特高压骨干电网输送至东部，同时在中东部也建设大量集中式和分布式的风光发电系统，并通过电网企业进行统一调度；而终端用户（需求侧）则如同过去使用煤电一样，继续扮演着被动、刚性且盲目的“纯消费者”角色。

然而，事实与数据正在发出严厉的警告：这种“重供给、重集中输送、轻需求侧互动”的单向线性模式，已经触碰到了物理与经济的极限。中国多个省份的清洁能源利用率跌破 90%，弃风弃光现象普遍；同时，为了支撑庞大电网在迎峰度夏或极端天气下的稳定性，大量本应被淘汰的落后煤电机组被重新唤醒并转为备用电源，大量新的煤电项目也以“保障供应”和“调峰”的名义在过去五年落地，同样规模的项目也规划在未来几年内建成（详见第一章“维度三”的分析）。

战略突变与时间窗口的极度压缩

如果国际局势按部就班地演进，中国或许有足够的时间通过渐进式的电网改造来消化这些庞大的绿电。然而，最大的挑战在于外部环境的剧烈突变压缩了中国的时间窗口。

自 2025 年美国新一届政府上台以来，其能源政策重点出现明显调整，重新强调油气等化石能源开发⁵⁷。同时，其地缘政治战略与能源战略相互呼应、彼此支撑，如：强化与中东盟友的关系，控制并影响委内瑞拉的能源开发与贸易，维持对俄罗斯和伊朗的制裁及限制其油气出口⁵⁸。如此一来，在短短一年内，美国已逐步巩固并扩大在传统能源领域的主导权，并试图将全球能源秩序重新拉回其拥有绝对控制权的传统轨道。

在这种“快进”的节奏中，中国本可以保持自身能源战略稳定的定力。但如果外部世界演变成全面退回到化石能源轨道，那么中国要持续推进其能源转型，将具有非常大难度；全球的能源转型和气候议程也将充满巨大变数。因此，中国更现实的战略出路是“向内发展”——尽快解决清洁能源高比例消纳问题，加速替代化石能源，进而增强自身能源系统的韧性。这是中国当前面临的现实挑战，也是其拥有的最大潜在机遇。

从国内瓶颈到全球合作契机

值得注意的是，清洁能源消纳这一挑战并非中国独有。随着清洁能源渗透率的提高，欧洲、拉美以及美国区域电网都面临着电网拥堵和灵活性缺失的阵痛。如果中国能够率先在国内破解“超大规模新能源消纳”这一世界级难题，打造出高度柔性、抗冲击的新型能源系统，这不仅可实现其自身的能源战略，也将成为中国向全球分享“能源治理方案”的新抓手，进而拓展与更广泛国家在能源转型领域合作的空间。

57 The White House. Unleashing American Energy. 2025. <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/01/unleashing-american-energy/>.

58 2026 年 3 月中下旬，为应对霍尔木兹海峡航运受阻给能源市场带来的冲击，美国财政部外国资产控制办公室宣布暂时放松对俄罗斯石油的制裁和出口限制。U.S. Department of the Treasury, Office of Foreign Assets Control. <https://ofac.treasury.gov/recent-actions>. 无论是延续制裁或是临时取消制裁，都显示了美国对俄油气贸易的直接影响。

第三章 构建以“需求侧韧性”为核心的分布式能源体系

既然明确了最大的挑战和风险在于“系统灵活性缺失”与“集中式基建的风险”，接下来的核心问题是：中国应当如何破局？

面对高比例新能源带来的消纳难题和安全隐患，传统的能源管理思路通常会本能地依赖以下三种“供给侧与电网侧”的常规手段：

- 1. 继续扩大供给侧装机：**这是过去几年中国最熟悉的路径。即使大量新能源装机产能已经无法得到释放，但为了达到减碳目标，只能核准建设更多的风光基地。但事实证明，在消纳通道堵塞的情况下，盲目增加供给只会导致更严重的内卷和更低迷的投资回报率。供给侧的建设仍需延续以保持产业惯性，但它已不再是解决当期矛盾的“主攻方向”。
- 2. 扩建集中式输电网：**遇到并网困难，电网企业的第一反应是在部分限制新能源并网的同时，申请数千亿资金修建更多的特高压和输电线路，用数万亿资金建设更大更广的电网⁵⁹。然而，正如第一章维度四所论述的，这种做法正面临急剧递减的边际效益。更致命的是，它在无形中可能会把国家的能源系统维系在一个更加庞大、更易受外部攻击的集中式物理标靶上。
- 3. 推广集中式物理储能：**过去几年曾有政策强制要求新能源场站实现10%-20%的配储比例，很多分布式新能源项目也被直接或间接要求配储。但由于缺乏现货市场价格信号，这些昂贵的储能设施普遍利用率不高，造成极大资产浪费；以2025年为例，新能源配储的整体运行情况虽然好于2024年，但平均利用率指数仍然只有40%⁶⁰。2025年以来，中国加快了市场化改革，也取消了“强制配储”政策⁶¹，这有望释放一部分储能项目的活力，但大部分该类投资的经济性仍然面临巨大不确定性。

59 国家电网有限公司. 国家电网“十五五”计划投资4万亿元建设新型电力系统. <http://wap.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c35325777/content.html>

60 中国电力企业联合会. 2025年度电化学储能电站行业统计数据. 2026.03.25. <https://mp.weixin.qq.com/s/CGL-PxNGbTcnMC7Fwxq1rQ>. 数据显示，2025年新能源配储平均利用率指数40%，比2024年提高8个百分点；电网侧独立储能平均利用率指数60%，工商业配储平均利用率指数63%。

61 国家发展改革委，国家能源局. 关于深化新能源上网电价市场化改革促进新能源高质量发展的通知（发改价格〔2025〕136号）。政策文件中提及不得将配置储能作为新建新能源项目核准、并网、上网等的前置条件. https://www.ndrc.gov.cn/xgk/zcfb/tz/202502/t20250209_1396066.html

逻辑的转换：向“需求侧韧性”的战略转移

当供给侧的产能相对目前的调度能力和消纳能力来说已经相对“过剩”，当电网侧的集中扩建面临安全与成本的双重天花板，当单纯的硬件储能陷入经济性困境时，破解中国能源安全与竞争力困局的更现实也更具创新的出路，需要转向那片长期被忽视、却占据全社会能源流动终点的广阔领域——需求侧。

我们必须打破传统“供给端生产 - 电网端输送 - 需求端被动消费”的单向线性模式。要真正实现中国的能源战略目标，当前的工作重心必须进行一次战略性转移：

从单纯追求供给侧和电网的规模扩张，全面转向深耕需求侧的系统重构。将海量的终端用能主体（工业、商业、建筑、交通）从“被动的负担”改造为“主动的系统调节器”；重构分布式的能源微循环网络，让沉睡的需求侧成为化解供给侧波动的有力工具。当需求侧的潜能被充分调动起来，供给侧迅速增长的风光装机规模才会转变为保障能源供给的中坚力量，而不是成为让现有系统“头疼”的挑战。

在这个战略转移中，“需求侧韧性”是关键所在。构建以“需求侧韧性”为核心的分布式能源体系⁶²，不仅是化解当前消纳危机的技术解法，更是重塑国家能源安全底座的核心策略。

（一）概念重塑

在传统的能源语境中，“韧性”一词通常只赋予给电网或发电厂，意味着电网在遭受自然灾害或设备故障时能够迅速恢复供电的能力。而针对需求侧，过去的政策工具箱里往往只有“节约用电”和“能效提升”或是带有浓厚行政强制色彩的“有序用电”。这些措施在应对当下高比例波动性新能源接入和复杂安全挑战时，已显得捉襟见肘。

本报告所提出的“需求侧韧性”，是一个新的概念重塑。它不是强调用户如何“少用电”，而是强调终端用能单元（如工业园区、耗能企业、数据中心、汽车、商业楼宇、社区等）如何具备高度的动态用能适应性与极端的自我生存能力。具体而言，它包含两个核心内容：

第一，从“源随荷动”到“源荷互动”的灵活响应力。在以化石能源为主的能源系统中，电力系统奉行“源随荷动”，即发电厂燃烧煤炭或天然气追着用户的需求跑。但在风光成为主力的系统中，阳光和风力的不确定性使得“源”侧无法被人为控制。需求侧韧性的首要特征，就是要求占全社会用电主导地位的工业、商业、算力乃至电动车等终端负荷具备弹性变形的能力。当电网中绿电过剩时，它们能够迅速扩大负荷“吸纳”

⁶² 构建以“需求侧韧性”为核心的分布式体系，实际上包含两个层面的涵义：需求侧韧性和分布式体系。我们认为，需求侧韧性是“核”，而分布式是“核”所需要的外部环境，即所呈现出来的“表”。

能量；当绿电骤减或电网面临冲击时，它们能够主动、瞬间地压降非核心能耗⁶³。这种将原本刚性的需求转化为系统调节器的能力，是打破新能源消纳瓶颈的有效途径。

第二，从“被动依附”到“主动微循环”的底线生存力。

在面临极端地缘政治事件、网络攻击或特大自然灾害导致主干电网瘫痪的极端情景下，缺乏韧性的需求侧通常会瞬间陷入社会停摆。需求侧韧性的另一个重要特征，是每一个关键用能节点（如高端制造工厂、核心通信枢纽）都能够通过自身配备的或周边互济的分布式电源（如屋顶光伏、周边的风光装机、小型燃机等）和储能设施，主动响应，或者迅速与主干网物理脱离，进入“孤岛运行”模式，维持核心生命体征的最低运转。

从“纯消费者”向具备生产、调节与自保能力的“产消灵活性实体”转变，这是需求侧韧性的本质要义。

（二）灵活性资源挖潜

打造需求侧韧性的过程中，很容易陷入的另一个技术误区，是将提高韧性简单等同于大规模建设电化学储能或抽水蓄能，以及改造或新建煤电。

不可否认，上述方式是平抑新能源波动的有效手段。但在中国当前的市场环境下，在新能源电站侧、电网侧或用户侧配置高比例此类储能，会大幅度推高实体经济的用能成本。从投资成本角度来说，这些当前常用的灵活性资源的单位投资成本普通高企，是需求侧灵活性资源的数倍，边际成本更是后者的数十到数百倍⁶⁴。并且，如前所述，由于缺乏合理的价格机制调用，前期中国大量建成的集中式新能源配储长期处于低效状态，资产价值未能有效发挥。另外，诸如电化学储能的大规模发展还会加剧锂、钴等关键矿产供应链所面临的地缘政治风险（正如第一章所论述的，这种供应链随时面临竞争者的围堵）。

因此，本报告提出：**在挖掘需求侧韧性的过程中，激活需求侧的天然“灵活性资源”，是比堆砌昂贵硬件储能更具经济性，也更具战略纵深的核心资产。**

需求侧实际上拥有海量的、几乎零边际成本的灵活性资源。以虚拟电厂等为主要抓手，我们可以把物理上分散的灵活性资源聚合成庞大的调节能力：

63 IEA. The Value of Demand Flexibility. 2025.12. <https://www.iea.org/reports/the-value-of-demand-flexibility>. IEA的研究具体分析了“荷随源动”的价值；康奈尔大学的一项研究也对“荷随源动”的应用场景进行了仿真分析。
https://arxiv.org/abs/2208.12966?utm_source.

64 裴善鹏. 国家电投经研院. 电力系统各类灵活性来源单位千瓦成本分析. 2025.10. 根据该研究，新型储能的初期投资成本平均为2600元/千瓦，煤电灵活性改造为2340元/千瓦，新建煤电为4000元/千瓦，抽水蓄能为6000元/千瓦，而负荷侧调节仅200元/千瓦，车网互动为900元/千瓦。就边际成本来说，4h独立储能为86元/千瓦/年，煤电灵活性改造为0，新建煤电为368元/千瓦/年，4h抽水蓄能为279或186元/千瓦/年，负荷侧调节为3.6元/千瓦/年，车网互动为8.3元/千瓦/年。
<https://mp.weixin.qq.com/s/XWN88MwAAjkPARXQRLHJbg>

- 1. 工业及数据中心负荷的柔性重塑：**许多高耗能行业（如钢铁、电解铝、水泥、化工）的生产运行具备天然的灵活性与调节弹性。通过升级工业控制系统，这些工厂可以在保持总体产量不变的前提下，根据电力供需动态与新能源出力情况，实现精细化的能耗调整，以此提升可再生能源消纳能力，助力电力系统运行稳定性提升⁶⁵；在电力需求增长迅速的数据中心领域，同样具备丰富的灵活性资源⁶⁶。
- 2. 电动汽车（新能源汽车⁶⁷）的移动双向网络：**新能源汽车不仅是交通工具，更可作为游走在城市各个角落的超大容量“分布式电池”。中国新能源汽车保有量已近4400万辆，车载动力电池总容量已达数十亿千瓦时。通过有序充电和V2G（Vehicle-to-Grid）技术，新能源汽车可以在用电低谷时助力消纳冗余绿电，在主网面临冲击或高峰时反向向社区微网供电。
- 3. 建筑与暖通空调的热惯性：**商业建筑和大型场馆的空调系统具备显著的热惯性，这一特性成为建筑侧需求侧响应的主要灵活性资源。依托精细化控制模型，把动态电价信号纳入优化目标，通过微调空调设定温度、按需调控制冷压缩机运行状态等方式（人们在体感上几乎无法察觉），实现建筑空调负荷的灵活调节。若对城市级商业建筑群进行规模化调控，则能释放出可观的灵活性调节资源，同时还能为建筑运营带来显著的用电成本节约，实现电网调峰与经济收益的双重价值⁶⁸。

激活这些灵活性资源的关键，不在于技术本身的突破，而在于市场机制的重构。灵活性是一种极具价值的服务，无法通过行政命令来无偿征用。正如国际能源署（IEA）在其报告中指出的那样：“动态价格信号是需求侧响应的基础。”⁶⁹

中国必须尽快打破计划色彩浓厚的目录电价和分时电价体系，让实时的现货市场价格（甚至是负电价和极高尖峰电价）直接传导至终端用户侧⁷⁰。只有让“在需要时削减负荷”或“在过剩时吸收绿电”能够带来真金白银的巨额收益，资本和企业才会拥有源源不断的内生动力，去开发算法、改造设备、构建微网。

65 赵旭东等. 面向差异化工业高耗能负荷灵活性挖掘的市场机制与调度模型研究综述. 电工技术学报. 2025.04. <https://dgjxb.ces-transaction.com/EN/abstract/abstract10134.shtml#>. 该研究量化验证了高耗能行业在不影响总产量的前提下具备分钟级能耗调节的天然弹性。

66 美国加州大学河滨分校(University of California, Riverside)的团队在评估数据中心的灵活性调节能力和减碳效果时提出一套EcoCenter框架，通过协调数据处理任务分配、GPU功率限制及多GPU负载调度，在不影响核心服务质量的前提下，可具备显著的调频能力和碳减排效果，帮助电网接纳更多可再生能源。Ali Jahanshahi, Sara Rashidi Golrouye等. Coordinating Power Grid Frequency Regulation Service with Data Center Load Flexibility. 2026.01. <https://arxiv.org/abs/2601.22487>

67 实际使用中，电动汽车和新能源汽车这两个概念往往混合使用。2025年，中国纯电动汽车保有量约占新能源汽车保有量的69%，居主体地位。本文并不严格区分这两个概念，而是聚集于其电力属性以及与电力系统的互动。

68 Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). Commercial building HVAC demand flexibility with model predictive control: Field demonstration and literature insights. 2025. <https://eta.lbl.gov/publications/commercial-building-hvac-demand>. 研究发现，通过模型预测控制在建筑暖通空调系统中的应用，可降低40%至65%的用能需求，并节省高达61%的年度用能成本。

69 IEA. The Value of Demand Flexibility. 2025. <https://www.iea.org/reports/the-value-of-demand-flexibility>. 报告强调灵敏的价格信号是将需求侧潜力转化为电网韧性的先决条件。

70 虽然2025年以来，中国现货市场建设步伐加快，但很显然，相较于现实需求来说，步伐还不够快。

(三) 去中心化

要承载并激发强大的“需求侧韧性”，就必须打破对集中式庞大物理架构的路径依赖，大力推进能源系统的“去中心化”。

中国的特高压和跨省区大电网在过去几十年中为经济腾飞做出了不可磨灭的贡献，其工程成就在全球范围内也广受瞩目。但是，正如自然界中越庞大的单一生物体对环境突变的适应力往往越差一样，随着清洁能源渗透率逐年攀升，集中式电网的边际管理成本和安全维护成本正在快速上升。

构建分布式能源系统，并非完全抛弃主干大电网，而是要通过“蜂窝状的微循环系统”来对其进行解构与补充。这是一种从“金字塔形的集中管理”向“分散式的节点互联”的架构演进。

重塑工业与城市基座：在新的体系下，未来的每一座大型工业园区、每一个 AI 智算中心，在规划之初就不应仅仅申请主网的“容量接入”，而必须要求同步规划自身内部的微电网。通过在园区内部最大化部署分布式光伏、分散式风电，并结合源网荷储一体化技术，实现能源在“墙内”的就近生产和就地消纳⁷¹。如果像中国这样体量的大型工业国将一部分制造业负荷转移至具备自平衡能力的微电网体系中，那么其主干电网的备用容量投资需求有望锐减，且整体系统的抗打击容错率也将大幅提升。

化解输送风险与重塑安全观：分布式系统的主流化，将从根本上改变国家的能源安全逻辑。面对一个高度集中的大电网，只要几个关键的特高压换流站或大型枢纽变电站失去功能，就可能引发大面积的跨省停电事故。但面对由千千万万个分布式微循环构成的“能源堡垒群”，任何局部的物理失灵都只会导致个别细胞的停运，而无法摧毁整个国家的能源生命线。这种“化整为零”的物理架构，是在未来一段时间内地缘冲突可能常态化的背景下，国家关键基础设施防御的更高智慧。这种分布式系统在面临极端天气、局部自然灾害或者其他突发事件时，系统能采取有效自我应变措施。

71 工业和信息化部. 工业绿色微电网建设与应用指南(2026—2030年). 2026. https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/gzdt/art/2026/art_7895da36bdd943aebdf8a2c0fe9cb7e9.html. 指南要求：工业园区新建太阳能、风能等可再生能源发电每年就近就地自消纳比例原则上不低于60%。

(四) 优势与阻碍

在向“需求侧韧性”转移的战略征途中，中国在物理层面具备打造坚强而灵活的“需求侧韧性”的底子，却也面临着深层次的体制羁绊。要真正激活这种韧性，在最有限的时间内实现新能源对化石能源（尤其是油气）的替代，取得真正的能源独立，就需要有足够的决心，破除传统的电力价格体制、路径依赖和垄断的网架格局。

显著的天然优势：

- 1. 庞大的工业基座作为调节池：**中国是全球最主要的全产业链工业国之一，工业用电量占全社会用电量超 60%⁷²。这意味着，相较于以居民和商业用电为主的欧美国家，中国拥有全球最大、最深厚的负荷调节资源。只要政策得当，稍加引导即可释放惊人的灵活性。
- 2. 车网互动的绝对先发优势：**凭借全球最庞大的新能源汽车保有量和充电桩基础设施体系，中国完全具备将数千万辆电动汽车转化为全球最大的“分布式移动储能网络”的硬件基础。
- 3. 强大的基础设施执行力：**一旦需求侧微电网与虚拟电厂上升为国家级战略工程，中国体制集中力量办大事的优势能够迅速在全国范围内推动底层通信网络（5G/物联网）和智能电表的升级换代。

顽固的机制阻碍：

- 1. 价格机制的传导阻滞：**这仍然是我国电力现货市场建设的核心短板。目前中国大部分省份的电力现货市场仍处于初始启动状态，极端的现货价格（反映能源稀缺度的尖峰电价或反映过剩的负电价）被卡在发电侧，很难穿透至终端用户。没有真金白银的利益激励，企业缺乏主动投资改造设备以提供“需求侧响应”的动力⁷³。
- 2. 大电网垄断下的电力体制阻碍：**这往往是实施层面最现实的，也最顽固的障碍。发展分布式微电网（或者源网荷储）、绿电直连和虚拟电厂，虽然本质上是促进全社会的新能源消纳，符合国家利益最大化，但在落实层面，往往需要“切分”传统电网企业的售电蛋糕和调度权力。长期以来，地方电网公司以“安全考核”

72 根据国家能源局数据，2025年中国第二产业用电量66366亿千瓦时，占全社会用电量比重约64%。<https://www.nea.gov.cn/10443/20260121/715f79826488476a9162da7c8bd77c80/c.html>

73 中国电力企业管理·胡朝阳. 对电力现货市场推进中关键问题的分析与思考. 2025. <http://www.ceppc.org.cn:42808/zx/hyfx/20250805/282331.html>. 文章对目前存在的一些问题做了分析，例如，省级电力现货市场主要还是发电侧单边市场，电价信号未有效传导至用户，这是省级电力现货市场建设中最大的痛点和堵点。

为由，对园区或企业自建微网或其他新业态设置繁琐的并网壁垒，甚至连各级地方政府均难以协调，这构成了去中心化转型的最大隐性阻力。

- 3. “保供”思维的路径依赖：**地方政府长期习惯于“出事就找电网、缺电就开煤机”的刚性保供思维，对于依靠市场化手段和需求侧弹性来化解危机缺乏信任与治理经验。

在快速演进的全球能源竞争中，中国能源系统下半场战役的主战场已不在大西北的风沙与烈日中，而隐藏在千千万万的工厂车间、数据中心、电动汽车和智能楼宇里。从“供给侧扩张”向“需求侧韧性”的战略重心转移，不仅是把数十亿千瓦的绿电产能转化为真实经济红利的必由之路，也是构建一个具有高度韧性的新型能源体系的基石。中国具备一定基础，但要实现这一转变，机制改革势在必行。

第四章 典型场景

接下来，我们将深入分析几个典型行业的应用场景，探究这种“需求侧韧性”如何真正落地。我们主要参考以下几个考量来选取典型场景：

- 1. 负荷体量与系统影响力（规模性）：**当前或未来的负荷规模巨大，其需求侧的微小改变能对国家级能源网络产生实质性的“托底”或“削峰”作用。
- 2. 物理与工艺的弹性（可塑性）：**该行业的生产过程不是绝对刚性的。它具备某种物理上的“惯性”（如热惯性）或业务流上的“可转移性”（如非实时的数据处理），能够在不遭受灾难性经济损失的前提下，响应价格信号进行负荷的压降、中断或时间/空间上的平移。
- 3. 多能互补与介质切换的宽容度（多源性）：**具备同时消费电力、热力、氢能、氨、醇等多种能源介质的开放能力。在极端情况下，能够灵活地在“电子（电网输送）”与“分子（管道/储罐输送）”之间切换能源获取方式，实现系统级韧性。国家管网提出的“质能网”概念也是这一理念的生动体现。
- 4. 油气替代价值（替代性）：**该行业的转型能够直接、显著地降低中国对进口石油和天然气的依赖。

基于这四方面考量，我们选取了五个较有代表性的行业/场景作为重点分析对象（见表 4-1），系统分析其需求侧韧性的工作机理，评估其蕴含的机遇以及目前存在的机制挑战。

表 4-1: 需求侧韧性典型场景的选取

场景	主要应用方式	规模性	可塑性	多源性	替代性
场景一： AI 算力与 数据中心	算力是科技博弈的前沿。其韧性体现在“非实时计算任务”在时间上的平移（追随现货电价低谷）和在空间上的转移（东数西算，数据追着绿电跑）。	✓	✓		
场景二： 传统重工业 （以钢铁行业为例）	传统的耗能大户。其韧性体现在利用“工序调度弹性”与“能源介质弹性”等手段实现对风光剧烈波动的缓冲。	✓	✓	✓	

场景	主要应用方式	规模性	可塑性	多源性	替代性
场景三： 化工行业	化工行业不仅是耗能大户，更是耗油大户（石油作为化工原料）。其韧性不仅体现在生产负荷的调节，更体现在“多能源介质的切换”。	✓		✓	✓
场景四： 新能源汽车与车网互动	中国拥有全球最庞大的电动车车队。每辆车都是一个移动的储能节点。在平时作为海绵吸纳过剩绿电；在大系统瘫痪时，这几千万辆车就是保卫城市末梢能源安全的微型移动电站。		✓		✓
场景五： 工业园区	涵盖广泛的制造业和城市神经末梢。平时通过虚拟电厂等开展需求侧响应；在主网瘫痪的极端情景下，依靠微电网技术，物理断开主网，进入“孤岛生存模式”，保障核心社会功能不停滞。	✓		✓	

（一）场景一：AI 算力与数据中心

1. 现状与挑战

人工智能（AI）大模型与海量数据处理已成为国家未来核心竞争力的基础设施之一。然而，“算力的尽头是电力”，这虽有夸张，但现实也正展现这样的紧迫性。

国际能源署的研究指出，2024 年全球数据中心电力消耗量达 415 TWh（太瓦时），占全球总用电量的 1.5%，与英国全年用电量相当。其中，美国、中国和欧洲的数据中心耗电量分别占 415TWh 的 45%、25% 和 15%。报告预计，随着 AI 训练和推理任务激增，到 2030 年数据中心耗电量将翻倍，达到 945 TWh，约占 2030 年全球电力总消耗量的 3%⁷⁴。在中国，随着“东数西算”工程的全面铺开以及百亿/千亿参数级本土大模型的竞相涌现，数据中心正成为中国电网中增长最显著的负荷板块。预计在“十五五”末，算力相关能耗将占据全社会总用电量的 5% 以上⁷⁵。

高能耗也衍生出碳排放等一系列问题。IEA 预计，到 2035 年，全球数据中心碳排

74 IEA. Energy and AI. 2025.04. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>

75 中国通信院. 算力电力协同发展研究报告. 2025. <https://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202505/P020250509511369626787.pdf>. 报告预测在人工智能爆发增长的高情景下，2030 年中国算力中心用电或超过 7000 亿千瓦时，占全社会用电量 5.3%。

放量将从 2024 年的 1.8 亿吨攀升至 3 亿吨，虽然目前其排放总量仅占能源行业总排放量的 1.5%，但数据中心已成为增速最快的排放源之一⁷⁶。

在传统的能源与 IT 管理模式下，数据中心被视为典型的“刚性负荷”。为了保证服务器的绝对稳定运行和数据不中断，传统数据中心要求电网提供 24 小时不间断、电压频率绝对平稳的电力供应。这种特征给当前的能源系统带来了巨大挑战：

- 1. 加剧新能源消纳负担：**如果大量新建的数据中心依然按照传统的“全天候满负荷”模式运行，它们根本无法吸收电网在特定时段（如中午）涌入的过剩绿电。相反，为了给这些数据中心“保驾护航”，电网不得不保留大量的高碳煤电机组作为基荷电源，这直接拖累了国家能源转型的步伐。
- 2. 算力争夺及对大电网的压力：**很多数据中心为了靠近用户端或人才高地，仍大量聚集在电力资源本就紧张的东部沿海及核心城市（如长三角、京津冀）。在极端高温天气导致用电负荷攀升时，这些高耗能的算力中心将可能直接与民生用电、高端制造业争夺宝贵的电力配额，对局部电网构成压力。

2. 韧性机理

要解决上述挑战，需要对算力负荷进行“需求侧韧性重构”。其底层逻辑在于挖掘其天然具备的“时空弹性”。通俗说，输送和存储数据远比输送和存储能源要方便。

数据中心的计算任务并非全部是需要毫秒级响应的“实时任务”（如金融交易、自动驾驶导航）。事实上，当前导致算力能耗飙升的主力——AI 大模型训练、海量数据历史分析、冷数据备份、影视后期云渲染等，都属于“非实时（延时容忍）的批处理任务”。这些任务对“在哪一秒钟计算”甚至“在哪个地理位置计算”并不敏感，这就为韧性重构提供了两大物理抓手：

- 1. 时间维度的平移：**数据中心可以根据电网现货市场的价格信号或绿电出力预测，动态调整 AI 训练的强度。在中午光伏大发、电价暴跌时，全功率开启数万张 GPU 进行大模型训练；在傍晚电网负荷高峰、绿电锐减时，暂停非紧急训练任务，让服务器进入低功耗待机状态⁷⁷。
- 2. 空间维度的转移：**算力是目前唯一能够以光速在全国甚至全球范围内传输的“能源等效物”。通过光纤网络，我们可以将计算任务瞬间从处于无风无光、电力紧张的东部节点，转移到此时正烈日当空、风力强劲的西北节点。这本质上是用“数据流”的调度替代了“特高压电网”的物理调度。

76 IEA. Energy and AI. 2025.04. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>

77 来自美国加州大学河滨分校(University of California, Riverside)的团队在评估数据中心的灵活性调节能力和减碳效果时提出一套 EcoCenter 框架，通过协调数据处理任务分配、GPU 功率限制及多 GPU 负载调度，在不影响核心服务质量的前提下，可具备显著的调频能力和碳减排效果，帮助电网接纳更多可再生能源。Ali Jahanshahi, Sara Rashidi Golrouye 等. Coordinating Power Grid Frequency Regulation Service with Data Center Load Flexibility. <https://arxiv.org/abs/2601.22487>

案例：

- ◎ **谷歌的碳智能计算平台 (Carbon-Intelligent Computing Platform) :** 谷歌通过追踪各大电网的实时碳排放强度和绿电产量，开发了“跨空间计算负载调度”系统。当其某个数据中心所在地的绿电供应不足时，谷歌系统会自动将旗下的视频网站 YouTube 的视频处理任务、内部的庞大计算任务平移到地球上另一个正处于绿电充裕时段的数据中心⁷⁸。
- ◎ **美国得克萨斯州 (ERCOT 电网) 的柔性数据中心:** 美国数据中心开发商 Lancium 在德州风电场附近建立了专门针对高耗能计算的“柔性数据中心”。这些中心与德州电网系统深度绑定，当电网因极端天气 (如德州寒潮) 面临崩溃风险，或风光发电量骤降导致电价飙升时，Lancium 的数据中心能够在几秒钟内主动削减数兆瓦的用电负荷，以此换取电网的经济补偿。它们从“电网的负担”变成了电网的“超级稳定器”⁷⁹。

3. 机遇与潜力

当数据中心行业全面具备了这种时空弹性后，它将对中国的能源竞争力与安全防线产生非常深远的规模化贡献。

1. 成为清洁能源消纳的“超级海绵”

AI 算力可能是极少数能够与中国西部广袤的风光基地在体量上相匹配的用电主体。通过建立“源网荷储算一体化”的新型算力中心，中国可以将因特高压外送通道受限而被迫“弃风弃光”的“垃圾电”，就地转化为高附加值的 AI 算力 (即“电力算力化”)⁸⁰。这不仅能将中国西北部省份的新能源综合利用率重新拉回到 95% 以上的水平，更能极大改善光伏风电投资企业的财务报表，盘活数万亿沉淀资产⁸¹。

2. 国家级能源安全防御体系

在一些极端情景下，比如长江流域再次遭遇类似 2022 年的极端干旱与高温，水电出力暴跌，华东电网可能就会面临全面拉闸限电的窘境。如果具备了需求侧韧性，国家调度中心无需强制切断制造业工厂的电源。通过一道行政指令和市场价格机制，长三角地区的大型数据中心可以瞬间“休眠”其 50% 以上的非实时 AI 训练负载，将这些任务

78 Google Cloud. Our methodology for carbon-intelligent computing, Google Sustainability. 2025. <https://cloud.google.com/blog/products/infrastructure/using-demand-response-to-reduce-data-center-power-consumption>. 谷歌详细公开了其如何通过碳智能计算平台，根据全球不同电网的实时碳强度和绿电可用性，在不同数据中心之间跨时间和空间转移 YouTube 视频处理等非延迟敏感型计算负载。

79 Lancium. Broad Reach Power and Lancium Partner to Support Grid Stability Through Flexible Data Centers. Texas. 2022-2024. <https://lancium.com/2022/07/07/broad-reach-power-and-lancium-partner-to-support-grid-stability-through-flexible-data-centers/>. Lancium 在美国多地建立的清洁计算枢纽 (Clean Campus)，专门设计为能够根据现货电价和电网频率秒级调整功耗，曾在德州极端天气期间成功为电网提供关键的需求侧响应。

80 实际上，由于中国西部可以提供大量具有价格竞争力的绿电，全球一些科技公司正在把其 AI 模型的算力迁移到中国。南方能源观察：为什么 Token 出海也是我国新能源消纳的良机。2026.03. <https://mp.weixin.qq.com/s/x4deeuOlhsYoDHjieBTgg?scene=1>

81 在“东数西算”枢纽节点，新建数据中心已被要求绿电占比超过 80%。

通过高速算力网络转移至甘肃、宁夏的算力枢纽。仅此一举，即可在几秒钟内为华东电网瞬间释放出数个吉瓦（GW）的救命负荷。算力负荷的瞬时空间转移能力，可能成为电网在面对极端气候或网络攻击时，具有战略深度的安全缓冲垫。

4. 落地障碍与应对措施

然而，在当前的中国体制与行业规则下，这种理论上完美的“算电协同”依然面临着诸多障碍。为了打通这最后一公里，中国需要在未来 5 年内采取非常有针对性的应对措施。

✘ 障碍一：不合理的“PUE 考核”指标导致的“逆淘汰”。

目前中国各级政府考核数据中心是否“绿色”的主要标准是 PUE（电能利用效率，即数据中心总能耗与 IT 设备能耗之比，其值越接近 1 表明能效越高）。这导致了一个非常不合理的局面：如果一个数据中心为了响应电网号召，投资建设了储能电池，或者在电网缺电时主动关停了部分服务器，其总能耗分母变大或 IT 能耗分子变小，PUE 值反而会变差，从而面临被政府勒令整改甚至吊销指标的风险。这种只看物理能效、不看对电网友好度的僵化指标，一定程度上锁死了数据中心的韧性。

✓ 应对措施一：废除单一 PUE 考核，引入“CUE（碳利用效率）”与“网源友好型能效指标”。

在未来 1-2 年内，发展和改革委员会和工信部可联合发布新规，对能够积极参与电网需求侧响应、消纳受阻绿电的柔性数据中心，在能耗双控考核中给予“PUE 豁免”或专项绿电抵扣。将考核重点从“用了多少电”转移到“用了什么时候、什么来源的电”。

✘ 障碍二：云服务商业模式对“中断”的零容忍。

目前一些大型云厂商向客户承诺的 SLA（服务等级协议）通常是 99.99% 以上的可用性。客户习惯了随时随地全功率调用算力，云厂商为了避免巨额违约金，根本不敢轻易调节服务器功率，缺乏推出“柔性算力”的商业动力。

✓ 应对措施二：创建并推广“可中断算力”交易专区与标准。

参考亚马逊 AWS 的“Spot Instances（竞价实例）”商业模式⁸²，国家层面应鼓励并联合主要云服务商，推出与绿电波动直接挂钩的“低碳 / 可中断云服务套餐”。明确告知 AI 开发企业：如果其训练任务允许在电网缺电时被随时暂停，并在绿电丰沛时恢复，其将享受较大折扣的算力价格。通过此类商业折扣，将电网的灵活性需求传导给终端的 AI 算法公司。

82 Amazon Web Services (AWS), Amazon EC2 Spot Instances. <https://aws.amazon.com/cn/ec2/spot>. 这是云计算领域比较成熟的一种“可中断算力”商业模式，允许客户以极低的折扣使用空闲算力，而当有用户全价购买这个时段的算力时，系统会收回服务器、中断低价服务，为用户提供更灵活的服务。

✘ **障碍三：跨部门协同的“算电孤岛”。**

目前，管电网的部门（发展和改革委员会、能源局）和管算力网络的部门（工信、网信）是两套平行运作的体系。电网不知道数据中心的任务属性，算力调度平台也看不懂电网的潮流与现货价格。

✓ **应对措施三：强制推行“算电协同 API 接口标准”。**

在新建的国家级“东数西算”枢纽节点中，强制要求电力调度中心与算力调度平台打通数据黑盒。在未来 3 年内，建立统一的“算电协同联合调度通信协议”，让底层电网的频率波动、现货电价数据能够以机读方式直达数据中心的 AI 调度器，实现真正意义上的机器对机器（M2M）秒级自动化响应。

5. 规模化应用

AI 算力场景展现出的韧性底层逻辑，可以概括为：用比特（信息流）的无痕移动，替代瓦特（能量流）的高成本输送，以及利用非实时任务的时间延展性，对冲风电和光伏的时间随机性。

一旦这套“算电协同”的韧性机制在超大型数据中心跑通，它的底层逻辑可以同样横向外溢至整个国家的数字基础设施：

- 1. 5G/6G 通信基站网络：**中国拥有庞大、超过数百万个的 5G 通信基站。这些基站同样是耗电大户。借用相同的逻辑，基站的用能可以与电网形成互动，减少对电网的压力并降低碳排放⁸³。
- 2. 生物制药与科研计算集群：**例如蛋白质折叠测算、深空探测的数据渲染等科研场景，均属于典型的“非实时批处理任务”，完全可以无缝接入这种“弹性算力池”。

规模化效益：当原本需要消耗全社会越来越大比例电力的数字与信息通信技术基础设施，整体从大电网的耗电大户和被保护对象，转化为具有弹性的巨型可调资源时，能源系统将获得一种潜力巨大的“软性缓冲力”，其仅靠算法与数字调度就能创造出数十 GW 级调节资源。根据北京理工大学研究团队的分析，到 2030 年中国数据中心算力的电力负荷约为 1.05 亿千瓦，而其中 20-40% 可转变为灵活性调节资源，规模约在 23-40GW 之间⁸⁴。

83 《自然》旗下期刊的一篇文章提出利用人工智能技术促进低碳能源系统与信息网络系统的协同优化。文中提到，通过人工智能技术驱动的动态基站休眠与负载迁移策略，仅靠算法优化，不需要新建储能，即可帮助 5G 网络实现其净零目标的 50% 以上，且不会降低用户体验。Junliang Ye, Yuxi Zhao, Yue Yu 等. Artificial intelligence for low-carbon energy and information networks. 2026.03. Nature Reviews Electrical Engineering. <https://www.nature.com/articles/s44287-026-00271-0>

84 王永真、唐豪、魏一鸣等. 中国数据中心综合能耗及其灵活性预测. 北京理工大学学报. 2025.03. <https://journal.bit.edu.cn/sk/cn/article/pdf/preview/10.15918/j.jbitss1009-3370.2025.7124.pdf>

(二) 场景二：传统重工业(以钢铁为例)

1. 现状与挑战

钢铁行业是国家工业化与基础设施建设的重要支柱行业，同时也是能耗大户。中国目前粗钢产量维持在 10 亿吨左右，占据全球半壁江山。钢铁行业的能源消费结构庞大且复杂，其能源消费以煤炭为主。根据国家统计局统计年鉴数据，2023 年中国黑色金属冶炼和压延加工业（主要为钢铁）能源消费总量为 6.8 亿吨标准煤，约占全国能源消费总量的 12%；电力消耗 7073 亿千瓦时，占比全国总电耗的 7.5%⁸⁵。近年来，中国加速推动“废钢回收”和“短流程炼钢”，而短流程以电力消耗为主⁸⁶，因此，未来钢铁行业的电力负荷预计将不断提升。钢铁行业同时也是重要的碳排放源，是仅次于电力行业的碳排放大户⁸⁷。

在传统的管理思维下，钢铁生产被视为一条“牵一发而动全身”的刚性流水线，其刚性生产带来的系统负担在于：

- 1. 耗能大户未能加速能源转型：**传统钢厂通常追求 24 小时满负荷连续运转以摊薄折旧成本，其一般也是所在区域的重点能源用户。长流程目前占中国钢铁行业的主体，为了保障其连续生产和稳定性，钢厂的能源结构中，煤炭占主导，对于不稳定的风光能源消纳有限。这就形成一个局面：尽管中国有大量新能源装机，但包括钢铁和水泥等行业在内的能够左右中国能源消费和碳排放趋势的高耗能、高排放行业，却没能最大比例地消纳新能源从而加速对现有化石能源的替代。
- 2. 面临贸易的“绿色壁垒”：**随着欧盟碳边境调节机制（CBAM）等规则开始正式实施，缺乏灵活性、高度依赖化石能源的高碳钢材，可能面临被征收高额关税的风险。中国出口钢铁产品中，虽然欧盟市场占比较小，但钢铁下游的汽车、机械制造等相关行业，同样可能面临此类贸易壁垒⁸⁸。

85 国家统计局. 中国统计年鉴. 2025. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2025/indexch.htm>

86 钢铁行业的生产工艺目前主要分为长流程和短流程两大类。简单来说，“长流程”一般以铁矿石、焦炭等为原料，生产流程主要包括烧结(球团)、焦化、炼铁、炼钢、轧钢等工序；“短流程”则主要以废钢为原料，采用电炉等设备，通过炼钢、轧钢等工序即可完成生产。“短流程”通常指电弧炉炼钢。

87 汪旭颖, 李冰, 吕晨等. 中国钢铁行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022. <https://www.hjkxyj.org.cn/article/doi/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.11?viewType=HTML>

88 European Commission. Commission strengthens the Carbon Border Adjustment Mechanism. 2025. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_25_3088. 欧盟计划自 2028 年起将碳边境调节机制(CBAM)扩展至 180 种包括钢铁和铝密集型产品，并配套引入反规避措施。

2. 韧性机理

要让钢铁这种“重、硬、刚”的传统行业具备“需求侧韧性”，需要从“工序调度弹性”与“能源介质弹性”两个维度同时深挖潜力，将其改造为大电网的“韧性压舱石”。

- 1. 短流程：工序调度弹性 - 基于物理惯性的“错峰与中断”。** 钢铁生产并非所有环节都要求绝对连续运行，特别是短流程中的电弧炉炼钢和后端的轧钢工序，具有较强的短时负荷调节能力。当电网出现负荷压力时，钢厂可以降低电弧炉功率或延迟下一炉冶炼；而在电网的电力供应充足（尤其是风光出力高峰期）、电价较低时恢复高负荷运行，从而实现用电成本优化并为电网提供灵活性。对于这种“错峰生产”，实质上是将钢厂变成了一个巨大的“虚拟抽水蓄能电站”。
- 2. 长流程：能源介质弹性 - “电热切换”与“绿氢替代”。** 对于需要连续中高温的高炉和加热炉，其韧性可以通过跨介质转换来实现。例如，利用大型电锅炉，在绿电过剩、电价处于低谷时将电能转化为 500° C 以上的热能加以使用，同时利用熔盐、绝缘耐火砖等介质，将热能进行储存；在电价处于高峰时，断开电源，释放热能维持生产，或者切换到天然气锅炉或热电联产机组。另外，多数长流程钢厂拥有自备电厂，一般利用副产煤气发电，并配备相应的煤气储存设施，其可以通过煤气存储或释放的动态调整，与发电机组有机结合，利用煤气的控制来响应电力的峰谷变化⁸⁹。除了“电 - 热”之间的切换外，钢铁行业利用绿电电解水制备“绿氢”，可部分替代焦炭作为还原剂（氢冶金），进一步降低对煤炭的刚性依赖⁹⁰。

案例：

- ◎ **中国的“分时电价”与企业实践：**早在 2021 年，国家发展和改革委员会就出台政策拉大峰谷电价差⁹¹。如今，国内众多短流程（电弧炉）钢企已经常态化实施“错峰就谷”生产——即“白天检修、深夜熔炼”，为局部电网削减了尖峰负荷⁹²。
- ◎ **熔盐储能与工业热电池方案：**山西省的钢铁企业山西建龙实业有限公司利用熔盐储热耦合煤气与新能源发电调峰技术，增强自身能源系统的灵活性。其将高炉煤气余能和富余的绿电转化为可储存、可调节的热能，以熔盐热能的形式存储，再通过蒸汽系统与煤气发电机组耦合，从而把原本刚性的煤气发电系统改

89 赵磊. 中国钢铁行业绿电应用策略分析. 中国钢铁业. 2025 (01).

90 IEA. IEA Hydrogen TCP Task 52 - Hydrogen for Iron and Steelmaking. 2025. <https://www.ieahydrogen.org/task/task-52-hydrogen-for-iron-and-steelmaking/>. IEA 的相关项目对与氢基炼铁相关的技术成熟度、供应链可行性和全球转型路径展开分析，并指出，氢气作为还原剂在直接还原铁(DRI)工艺中提供了可行的替代传统化石还原剂的技术路径。

91 国家发展和改革委员会. 关于进一步完善分时电价机制的通知(发改价格[2021]1093号). 2021.07. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202107/t20210729_1292067.html. 该政策是近年来中国推动需求侧响应的一份基础文件，通过拉大峰谷价差，实质性地推动了高耗能企业的错峰生产。

92 钢铁研究总院. 自然资源保护协会(NRDC). 推动废钢 - 电炉短流程的发展: 以四川省为例. 2025. <https://www.nrdc.cn/Public/uploads/2025-11-17/691a9672e1f55.pdf>. 报告指出，四川省众多短流程钢企利用谷电降低用电成本成为常态化的生产模式。

造为具备灵活调峰能力的多能协同系统⁹³。美国 Rondo Energy 公司利用成本较低的耐火砖储热，将间歇性的风光绿电转化为稳定的工业级连续蒸汽和热风，已在欧美多家传统工厂商业化运行⁹⁴。

3. 机遇与潜力

完成“需求侧韧性”改造的重工业，将对国家能源系统产生重大贡献：

1. 释放 GW 级低成本的虚拟储能潜力

钢铁、水泥等重工业的用电基数庞大。如果中国十分之一的钢铁产能接入电网的需求响应系统，将在极短时间内释放出数 GW 的灵活性资源，不需要为此额外采购昂贵的锂电池或者新投资电线和变压器，即可很大程度化解大规模新能源并网的消纳危机。

2. 极端冲击下的有序用能

在一些极端情景下，比如遭遇罕见寒潮，特高压输电线路严重覆冰，这可能导致跨省送电中断。如果具备了需求侧韧性，调度中心可以不再盲目拉闸。通过最高级别的紧急需求响应指令，全省数十家钢厂瞬间切断所有电弧炉和大型轧制设备的电源，仅保留核心高炉的保温和安保用电，或者紧急释放储备煤气用于发电。这种在几秒钟内释放出的巨大电力空间，足以保住全省三甲医院、通信枢纽和居民供暖的生命线。

4. 落地障碍与应对措施

目前，制约传统工业释放这种庞大韧性潜力的，不再是技术瓶颈，而是僵化的市场机制和利益分配格局。

✘ 障碍一：“大工业用电”的现货市场穿透率低。

中国的现货市场建设近两年来取得了较大进展，甚至超出了人们之前的保守预期，但离普及到广大用电主体尚有较大距离。如果现货市场每隔 15 分钟变动一次的“真实电价”无法直接触达钢厂或水泥厂，企业就缺乏投资自动化控制系统以实现“秒级负荷响应”的经济动力。

✓ 应对措施一：强制高耗能企业全面入市，推行“自动化需求响应”补贴。

未来 1-2 年内，各省电力交易中心应强制要求用电量达到一定规模的高耗能企业 100% 参与电力现货市场结算。同时，对于愿意投资改造分布式控制系统、使自身负荷能够根据电网调度信号自动、瞬间增减功率的企业，给予专项技改资金支持。

93 熔盐储热耦合煤气与新能源发电调峰技术. https://www.csm.org.cn/col/col6317/art/2026/art_b911ea68808f4a3ba724e0ed7bac7545.html; http://www.csteelnews.com/qypd/qydt/202405/t20240514_87939.html

94 Rondo Energy.2025.10. <https://www.rondo.com/news-press/rondo-powers-up-worlds-largest-industrial-heat-battery>. 在美国加利福尼亚州阿拉米达，100兆瓦时的热电池已投入使用。

✘ **障碍二：跨介质改造（电代煤、电代气、氢代煤等）的经济性不具吸引力。**

以目前经济性较差的氢冶炼为例，氢气的经济稳定供给存在挑战，氢基竖炉的生产成本相比高炉 - 转炉长流程要显著提高，难以长期稳定运行。

✓ **应对措施二：将灵活性改造与转型金融深度绑定。**

中国人民银行可出台专项政策，将重工业的电热解耦改造、绿氢应用、柔性排产改造等明确纳入转型金融支持目录。提供低于 LPR（贷款市场报价利率）的长期专项贷款。此类措施不仅看重企业的“减碳量”，也对企业为电力系统提供的调峰容量进行金融变现。

5. 规模化应用

此类场景展现出的韧性底层逻辑是：利用生产流程的物理可中断性（时间平移），以及利用热能转换的宽容度，解除对单一化石燃料的刚性绑定。这种“流程错峰 + 热能转换”的韧性模式，可以横向复制至几乎大多数基础重工业：

- 1. 水泥与建材行业：**水泥生料的粉磨工序是典型的“可中断负荷”，完全可以避开电网高峰；而其高温煅烧环节则可引入“电 - 热”切换模式以绿电替代煤炭。
- 2. 有色金属与玻璃行业：**同样具备调整生产节奏以响应电网波动的能力。
- 3. 造纸与纺织印染：**对中低压蒸汽需求大，适合部署廉价绿电储热系统。

规模化效益：从基于典型工业企业的分析看，钢铁行业综合调控负荷约可占到总生产负荷的 20%，水泥行业约 24%，玻璃行业约 25%，纺织可达 35%⁹⁵。中国拥有几乎全球最庞大、门类最齐全的制造业；在有利的政策条件下，高耗能工业的可调灵活性潜力可达 1 亿千瓦⁹⁶，超过所有在运营的抽水蓄能电站。这种依托于本国庞大实体工业体系建立起来的能源系统韧性，是那些基本已经“去工业化”的西方国家无法企及的能源战略屏障。

95 程元、饶尧、丁胜. 国网电力科学研究院. 工业领域电力需求侧可调节负荷潜力分析. 能源工程. 2023.01. <https://nygc.cbpt.cnki.net/portal/journal/portal/client/paper/41f9a3d0e71a48661c31c7f58c75b2dc>.

刘子屹, 谢俊, 刘雨菁, 宫飞翔等. 电力需求侧灵活性系列: 工业灵活性潜力及发展现状, 落基山研究所(RMI), 2023. <https://rmi.org.cn/insights/industrial-dsf/>.

96 宫飞翔, 孙文强, 李德智等. 综合用能视角的钢铁行业低碳绿色发展技术展望[J]. 可持续发展经济导刊, 2023(08). 文章提到, 按照当前高耗能工业负荷规模估算, 其蕴藏的可调潜力可达 1.08 亿千瓦。

(三) 场景三：化工行业

1. 现状与挑战

化工行业是中国国民经济的支柱产业之一。全球最大规模的石油化工炼化一体化产能和现代煤化工（煤制烯烃、煤制油、煤制天然气等）产能均位于中国。同时，化工行业也是目前中国能耗和碳排放增长最显著的工业领域⁹⁷，尤其是油气消费的重要部门。根据国家统计局统计年鉴数据，2023年中国化学原料和化学制品制造业（不含炼油、焦化及部分煤化工）能源消费总量为7.38亿吨标准煤，不仅位列制造业第一位，同时也是其他所有细分行业（统计年鉴下的分类）的首位；电力消耗为6748亿千瓦时，紧随有色金属冶炼和压延加工业（如电解铝）及黑色金属冶炼和压延加工业（如钢铁）之后，位列制造业第三位⁹⁸。从全球范围看，根据IEA的数据，化工行业是目前最大的工业能源消费部门；化工行业的特殊性在于：化石能源（石油、煤炭、天然气）在这里不仅被作为“燃料”燃烧以提供高温和蒸汽，更被作为“原料”参与化学反应，转化为塑料、化肥和合成纤维等⁹⁹。

- 1. 原料高度依赖进口的“卡脖子”风险：**作为化工行业的主要原料，中国原油的对外依存度多年维持在70%以上。化工产业链是本文第一章中指出的“维度一（地缘脆弱性）”最集中的爆发点。一旦进口来源受地缘冲突影响或海上油气通道被切断，国民经济日常运行所需要的各种塑料橡胶纤维原料、部分化工原料等都将面临供应严重不足的风险，极大影响国民经济稳定运行。
- 2. 刚性连续生产对电力系统的要求：**化工生产一般都非常强调“安稳长满优”，生产装置一旦开车通常连续运行数月至一年。这使得化工厂成为电力用户中非常庞大但又几乎没有弹性的需求方。它们不仅无法在局部高比例消纳风光绿电，还需要配套大功率稳定电源以确保生产运行安全稳定。

2. 韧性机理

与其他高耗能行业主要依靠“错峰用电”不同，化工行业拥有得天独厚的“多能源介质切换”潜能，其“需求侧韧性”呈现出更加多样化的灵活性。如果处理分子级别的复杂化学反应和物质重构本就是化工行业的优势，那么对于处理复杂程度可能远不及分子级别的调峰和介质切换来说，也许其难度并不如人们想象得那么大。其韧性机理主要包含两条路径。

97 CarbonBrief. Analysis: China's CO₂ emissions have now been 'flat or falling' for 21 months. 2026. <https://www.carbonbrief.org/analysis-chinas-co2-emissions-have-now-been-flat-or-falling-for-21-months/>. 该分析认为，中国化工行业煤炭使用量增加了15%，石油消耗量增加了10%，导致化工行业整体碳排放总量上升了12%；在交通、电力、水泥等主要行业排放普遍下降的背景下，化工行业成为当年排放增长的唯一显著来源，对全国排放变化产生了关键影响。

98 国家统计局. 中国统计年鉴. 2025. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2025/indexch.htm>

99 IEA. Chemicals-Energy System Overview. 2023. <https://www.iea.org/energy-system/industry/chemicals>. 报告指出化工部门是全球最大工业能源消费行业，其独特属性在于化石燃料中超过一半被用作化学合成的原料，而非单纯用于燃烧。

- 1. 近期高经济性路径：“以电代汽、以电代气”储热调节（电 - 热介质切换）。**化工生产需要大量不同压力的工业蒸汽，这些蒸汽一般用于热力（如精馏、干燥、聚合）或者动力（如送入汽轮机进而驱动各种机泵）。传统的做法是燃烧煤炭或天然气产汽。但是，在风光资源富集区，化工厂可通过部署高压电极锅炉满足热力需求；当绿电过剩、电价低廉时，系统自动切换为用电锅炉来“绿电产汽”，多余的蒸汽被存入成本较低的蒸汽蓄热器或高温熔盐储热罐中。当绿电不足时，电锅炉开始停机，工厂依靠储热罐释放的“绿汽”或备用燃煤锅炉维持生产。这种双源热网赋予了化工厂很大的低成本削峰填谷能力¹⁰⁰。与此同时，在风光出力充足的时段，化工厂可采用电驱替代汽驱满足动力需求，以及通过电裂解工艺用电替代燃料气¹⁰¹，而这些通常也是大型化工装置的一些重要耗能单元；当绿电不足时，工厂再利用自备电厂或储备的燃料气，切换到传统的供能模式。通过上述电 - 热介质的相互切换，可充分发挥化工行业自身的能源需求韧性，极大促进绿电消纳，减少煤炭和天然气消费。
- 2. 中长期战略性路径：绿氢 / 氨 / 醇的耦合替代（电 - 分子介质切换）。**这是化工行业比较独特的一个优势。利用绿电电解水制取绿氢（亦可进而合成绿氨、绿醇）。随着技术的不断迭代，质子交换膜电解槽（PEM）和碱性电解槽（ALK）已经具备较强的秒级 / 分钟级负荷跟随能力，能够较好地贴合风光发电的剧烈波动。制出的绿氢用于下游的合成氨或炼化装置，这就相当于把电网中无法消纳的“垃圾电”，通过电解槽，变成了可以长期储存、运输的化学品。

案例：

- ◎ **“以电代汽、以电代气” / 储热案例：**中煤榆林煤炭深加工基地二期项目使用电驱空分，其 3 × 85000 标准立方米 / 小时（氧气）空分装置是目前中国较大的电驱空分装置集群。德国化工企业巴斯夫（BASF）在其路德维希港基地和广东湛江一体化基地，正大力推进蒸汽裂解装置的电气化改造，通过电加热炉替代天然气，参与电网的灵活互动；2025 年底，中石油独山子石化投运电裂解炉试验装置，完成乙丙烷、液化气、石脑油裂解验证；中石化镇海炼化等也在推进工业化试验。
- ◎ **绿氢耦合案例：**中国石化在新疆库车建成了全球最大的光伏绿氢示范项目（2 万吨 / 年）。该项目利用光伏发电生产绿氢，直接通过管道输送至塔河炼化，替代了原有的天然气制氢¹⁰²。

100 IRENA & 国家电网. Electrification with Renewables: Driving the transformation of energy services. 2019. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jan/IRENA_RE-Electrification_SGCC_2019.ashx; https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Feb/IRENA_Smart-Electrification_Renewables_2022.pdf 报告指出，通过部署可快速切换电 / 气（或煤）的“混合动力锅炉”，工厂能利用波动电价，在绿电过剩及低价时段切换为电加热并结合储热系统，从而将工业负荷转化为柔性资源，实现低成本削峰填谷。

101 化工生产有时还需要使用燃料气把物料加热至较高温度，如生产乙烯的裂解炉反应温度一般达到 800℃，需要大量燃料气（包括天然气）提供热量，而通过电加热新工艺可以替代燃料气。

102 中国石化洛阳工程有限公司. 新疆库车绿氢示范项目全面建成投产. 2023.09. http://lpec.sinopec.com/lpec/news/com_news/20230904/news_20230904_550906974984.shtml. 该项目利用新疆丰富的太阳能资源，初步验证了绿氢炼化在工业规模上的可行性。

3. 机遇与潜力

具备了多能互换韧性的化工基地，可对国家的能源网络和地缘安全产生潜力巨大的压舱石效应：

1. 成为西北绿电消纳用户

中国最大的风光大基地和最大的现代煤化工基地在地理上高度重合（如内蒙古、新疆、宁夏、陕北）。如果通过“以电代汽+部分绿氢耦合”，将庞大的化工园区改造为“随源而动”的柔性负荷，仅内蒙古一地的化工园区就能为当地电网提供百万到千万千瓦级的灵活性容量。这将显著解决西北特高压外送通道受限导致的消纳危机，实现“绿电就地转化为高附加值化学品”的内循环。

2. 抵御地缘断供的防线

在极端情景下，如果类似当前的中东冲突导致中国海运油气进口急剧萎缩，那么传统炼厂极可能面临大面积停工，引发全国性化工原料短缺恐慌。但具备韧性的现代化工基地，能够很快拔高绿电制氢、绿电制甲醇的负荷，并将其与煤化工深度耦合（利用绿氢补充煤化工缺氢的短板，并将二氧化碳全部转化为化工产品）。这种基于本国风光资源与煤炭底线的“电子-分子转化网”，能在极端情形下外部油气进口被切断时，优先保障国家基本燃料（甲醇可替代汽油、柴油）和材料（军工/民用基础材料，如合成树脂、橡胶、纤维）的自给自足，一定程度上化解能源被人卡脖子的风险。

4. 落地障碍与应对措施

随着绿电成本降低，化工行业对使用绿电积极性很高，一些企业已经通过购买绿证实现存量用电100%使用绿电。但是必须客观承认，目前深化绿电消纳、利用绿电直接制备氢/氨/醇的经济性依然较差（绿氢成本往往是煤制氢的2-3倍），导致其难以完全依靠市场力量自发铺开。要让这套体系落地，需要采取“长短结合、机制护航”的措施。

✘ 障碍一：绿氢的经济性劣势与电解槽的“容量电价”压力。

为了消纳便宜的过剩绿电，电解槽和电锅炉往往只能“间歇性”运行（例如每天只运行8-10小时）。但在现行电价机制下，企业接入大功率设备必须缴纳高昂的“基本容量电费”。设备运行时间越短，分摊到每度电的容量成本就越高，直接扼杀了企业利用低谷电进行“介质切换”的经济性。

✓ 应对措施一：免除P2X（电转X）柔性设备的容量电费，实行“纯量计价”。

在未来1-2年内，发展和改革委可出台专项特许政策：对于承诺为电网提供100%可中断响应能力的电解水制氢装置和电热锅炉，完全免除其“基本容量电费”或“最大需量电费”，允许其在现货市场低谷期无负担地大量消纳过剩绿电。

✘ **障碍二：缺乏为“绿价溢价”买单的终端市场。**

化工企业投入巨资用绿电替代油气和煤炭生产出的“绿色化学品”，由于成本会因此大幅增加，且国内绿色低碳价值在终端产品上未能充分体现，企业转型积极性不高。

✓ **应对措施二：打通“绿电 - 绿氢 - 碳资产”认证，定向挂钩出口与航运市场。**

依托国家碳市场，在 1-3 年内迅速建立国际互认的绿色甲醇 / 绿色合成氨产品碳足迹核算标准。将这些高成本但零碳的“绿色分子”，定向供应给对碳税相对更敏感的行业（如国际航空业和远洋海运业），以及需要应对欧盟 CBAM 的出口加工企业。“绿色分子”通过碳市场机制获得的收益，反向补贴化工基地的柔性改造。

✘ **障碍三：煤化工行业缺乏使用绿电和绿氢的意愿。**

对煤化工企业而言，现有的煤制氢工艺技术成熟、成本低廉，在没有碳约束的情况下，让企业主动放弃廉价的“灰氢”改用高成本的绿氢，等同于主动推高生产成本。另外，煤化工装置的连续化生产特性，与风光制氢的间歇性天然错配，即便企业有心掺烧或替代，也面临供氢稳定性难题。

✓ **应对措施三：分阶段强制要求现代煤化工行业使用高比例绿电与绿氢。**

分阶段强制要求新建及在役煤化工项目必须配置不低于 20%-30% 的柔性用能容量，并逐步提升绿氢在合成气中的配比。对于达到“绿氢耦合”标准的项目，在碳双控考核中给予相应奖励；而对于转型滞后的企业，则严格限制其产能指标。

5. 规模化应用

化工场景展现出的韧性底层逻辑，可以概括为：跨越能源介质壁垒，利用物理缓冲罐（储氢罐、蓄热罐）作为能源系统中另一形式的“电池”，以及通过源头的非化石原料替代，将资源依附型产业重塑为技术制造型产业。

这种“多能源介质切换”的机制，不仅局限于传统的石油化工和煤化工行业，它正快速外溢到中国未来其他几个具有潜力的万亿级新赛道：

- 1. 绿色交通与可持续航空燃料（SAF）：**对于航空业和远洋航运业等长距离交通业态，目前大规模电气化还存在障碍，相关交通工具无法挂着沉重的电池飞行或航行。利用具有柔性消纳能力的化工体系生产的绿醇、绿氨和 SAF，是长距离交通脱碳的可行方案。例如，航空业中长期最主要的脱碳路径就是使用 SAF。
- 2. 合成生物制造：**未来，利用绿电制取的绿氢与捕集的二氧化碳，通过生物酶催化直接合成蛋白质、淀粉或高分子材料。这可能会直接成为对传统石化农业和化工业的低碳替代。

规模化效益：当原本是比较苛刻的能源消费者的化工基地，通过电解槽和电极锅炉等措施，演变成一张兼具“电子消纳”与“绿色分子输出”的耦合网络时，中国能源化

工系统的电力网络便不再是一张机械的单向电网，也逐渐不再需要巨量油气资源作为其原料或燃料。同样的系统可以复制到交通和钢铁等行业，这既有效增强现行能源和电力系统的韧性，也极大降低自身碳排放，支撑中国工业在全球供应链减碳的趋势中取得有利地位。

(四) 场景四：新能源汽车与电网互动

1. 现状与挑战

接下来，我们把分析重点从庞大集中的重工业转向非常分散但数量惊人的终端负荷——新能源汽车。

中国拥有全球最庞大、市场渗透率最高的新能源汽车（NEV）车队。截至2025年底，全国新能源汽车保有量达4397万辆，占汽车总量的12.01%；其中纯电动汽车保有量3022万辆，占新能源汽车保有量的68.74%。2025年新注册登记新能源汽车1293万辆，占新注册登记汽车数量的49.38%，与2024年相比增加168万辆，增长14.93%¹⁰³。其搭载的动力电池总容量超过数十亿千瓦时（TWh级别）。2025年，新能源车年充电量约占全社会用电量的1%，到2030年，预计可达2-4%。

这些车辆不仅是交通部门脱碳和摆脱石油进口依赖的主力，也逐渐会成为耗电大户，更在理论上构成了一个比全国所有抽水蓄能电站总和还要大得多的巨型“移动电池库”。然而，统计显示，私家车在90%以上的时间里都是停靠闲置的，并没有发挥其可以作为能源系统中的储能的角色¹⁰⁴。相反，在缺乏机制引导的“无序充放电”模式下，这些海量的电动车不仅未能成为电力系统的帮手，反而成了潜在的负担。

- 1. “晚高峰”的叠加碰撞：**大量车主习惯在傍晚下班回家后插上充电枪（18:00-20:00），这恰好与居民生活用电的晚高峰以及太阳能光伏出力的急剧下降时段重合，加剧了净负荷在短时间内攀升，增大了电网的调峰压力。
- 2. 末梢配电网的局部过载：**随着快充桩的普及，老旧小区和商场的变压器无法承受数十辆车同时大功率充电的负荷冲击，可能导致局部跳闸现象，迫使电网进行昂贵且低效的被动扩容。

103 公安部. 全国机动车保有量达4.69亿辆 驾驶人达5.59亿名. 2026. 01. <https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c10383533/content.html>.

104 汽车之家研究院、新能源汽车国家大数据联盟. 纯电新能源汽车市场发展与用车年度报告. 2024. <https://www.autohome.com.cn/news/202404/1295064.html> 研究显示，家用车辆日均行驶时长为2.2小时，60%车辆行驶时长为1-4小时，大部分时间处于闲置状态。

2. 韧性机理

要把这股“破坏力”转化为维持电力系统平衡的韧性，可以通过“车网互动（Vehicle-to-Grid Integration）”机制。其韧性机理分为两个层级：有序充电与双向充放电（V2G）。

- 1. 有序充电的“负荷平移”。**车辆仅单向从电网取电，但通过智能充电桩接收后台信号，动态调节充电功率或改变充电时间。例如，将傍晚的充电需求自动推迟到深夜（风电大发且处于负荷低谷时）；或者在白天办公楼停车场，当屋顶光伏过剩时，集中以最大功率“吸纳”阳光。这是成本低、见效快的“消纳海绵”。
- 2. V2G 双向互动的“海量微型电站”。**车辆不仅能充电，还能通过双向逆变器（OBC 或直流 V2G 桩）向电网反向送电。当电网面临突发缺电或极寒天气导致主力电源宕机时，无数停靠的电动车可在短时间内转化为“分布式虚拟电厂”，将电池内的电卖给电网或其他用电终端，实现跨越空间的紧急功率支撑。

案例：

- ◎ **深圳的虚拟电厂与 V2G 实践：**深圳虚拟电厂管理中心已接入部分具备 V2G 功能的充电站。在多次需求响应测试中，车主通过向电网反向放电，不仅帮助电网平抑峰值，还获得了可观的度电收益补贴¹⁰⁵。
- ◎ **大众汽车充电墙盒在德国的应用：**该墙盒是大众汽车集团旗下推出的一款家用智能电动车充电设备，主要面向普通家庭使用，在硬件中内置控制芯片和算法模块，可以实时读取电力市场的现货电价信息，并根据价格走势做出智能判断。在电价低的时候自动启动车辆充电，同时优先利用屋顶光伏发的电，只有在光伏电力不够时才从电网拉电来充车。其模式相当于让充电设备直接响应现货市场价格信号，通过自动选择低价时段和高自发电比例来降低充电成本¹⁰⁶。

3. 机遇与潜力

1. 日常消纳：低成本的风光“蓄水池”

相较于巨资建设的百兆瓦级的集中式电化学储能电站（无论是源侧、电网侧还是用

105 新华社·深圳首次实现新能源汽车向电网放电的电费结算。2026. <http://gd.news.cn/20260114/bf5f31aa6cd34a8483df4a84d89934c0/c.html>. 深圳在2025年3月启动大规模车网互动实测，全市超过760个充电场站、超过1.7万车次参与活动。 https://hmo.sz.gov.cn/zx/gqdt/content/post_1539201.html.

另根据国际清洁能源委员会(International Council on Clean Transportation, ICCT)与Regulatory Assistance Project(RAP)合作开展的一项以法国为案例的研究，相较于无序充放电，到2040年，有序充电和V2G可以减少电网尖峰负荷15%，有序充电可以减少23%的电网用于线路加固的费用以及37%的用于增强变压器系统的费用。Savings from smart charging electric cars and trucks in Europe: A case study for France in 2040. 2025.03. <https://theicct.org/publication/smart-charging-cars-trucks-europe-mar25/>

106 Elli(大众集团充电品牌). 2025. Wallbox 智能家用充电桩. <https://www.elli.eco/en/b2c/products/wallbox>

户侧)，有序充电几乎不需要增加额外电池制造成本，仅靠软件调度和少量硬件升级，就能创造出潜力巨大的灵活调节能力。

2. 极端冲击：城市的“移动生命线”

假如大型城市遭遇强台风或冰冻灾害，外部输电大通道断裂，城市主干电网局部瘫痪，那么城市内星罗棋布的数百万辆电动车（即便每辆车只有 30% 电量）就可在短时间内成为一个宝贵的分布式能源供给网络。通过 V2G 技术或 V2L（车辆对负载供电），这些车辆不仅可以保障家庭的基本照明和取暖，其聚合起来的电量甚至足以支撑医院、通信基站和供水系统等核心基础设施运行数天，直到主网修复。这实际上是一道移动的“藏能于民”的城市能源安全防线。

4. 落地障碍与应对措施

然而，从蓝图到现实，当前中国的车网互动还面临严峻的机制障碍。要发挥其巨大潜力，需要在未来 1-5 年内采取针对性的破局措施。

✘ 障碍一：价格信号失灵与市场壁垒。

现行的居民侧分时电价时段划分比较粗放且调整周期长（对于多数省份来说，一般一年调整一次），难以反映风光新能源“看天吃饭”的动态出力变化；此外，代表广大车主参与电网调度的“聚合商（虚拟电厂）”还面临现货市场准入门槛¹⁰⁷。

✓ 应对措施一：推行“动态充电电价”与“聚合商绿灯机制”。

地方物价局应试点居民测“尖峰/深谷动态充电电价”，并允许价格信号直达充电桩 APP。同时，能源局需大幅降低负荷聚合商参与电力现货市场和辅助服务市场的容量门槛，明确其独立的市场主体地位，让资本有动力去“组织”零散的车主。

✘ 障碍二：硬件基础设施的技术断层。

目前，大多数存量充电桩是“哑巴桩”，不具备智能调节功率的通信模块；另外，目前市面上绝大部分新能源车型在出厂时并未开放或搭载 V2G 硬件，且 V2G 直流桩造价较高、标准不一¹⁰⁸。

✓ 应对措施二：强制实施“智能桩”国标，尽快要求车辆配备 V2G 模块。

工信部应发布强制性国标，要求所有新建交流充电桩必须具备“智能有序充电”通

107 聚合商的准入门槛主要体现在两个方面：一是技术门槛，如江西要求聚合商运营平台数据上送周期 ≤ 15 分钟、信息延迟 ≤ 500 ms、调节偏差 $\leq \pm 20\%$ 等。https://drc.jiangxi.gov.cn/jxsfzhggwyh/col/col14590/content/content_1981633111050883072.html。二是身份限制，在现行电力市场规则下，现货交易主体通常限定为发电企业、售电公司以及经认可的虚拟电厂或大型负荷主体，同时要求聚合商的调节容量初期一般需达到 5MW 的规模要求。对于绝大多数电动车充换电聚合商来说，入市仍然面临身份界定模糊、额定容量门槛过高等问题。https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/202512/t20251226_1402666.html。

108 中国于 2025 年推出了 V2G 车桩通信国标，但除了该国标，在实际运行中还存在国家电网主导制定的一套标准，两种标准并行使车企难以确定车级 V2G 技术系统。

信接口。相关部门加快制定全国统一的兼容性强的 V2G 车桩通信协议与并网技术规范，并考虑强制要求 2027 年开始面市的新能源车需具备 V2G 功能。

✘ 障碍三：电池寿命焦虑与权责不明。

这是目前阻碍 V2G 发展最核心的商业痛点。在当前的技术水平下，V2G 频繁充放电会加速电池衰减。但目前车企的“三电终身质保”条款通常把 V2G 排除在外¹⁰⁹；且缺乏由第三方提供的透明电池健康度数据，导致车主不敢放电、车企不愿担责¹¹⁰。此外，电网给出的反向放电价格过低，不足以弥补电池的损耗成本。

✓ 应对措施三：建立“电池健康区块链”与“V2G 专属高溢价”。

引入第三方检测机构或基于区块链技术的 BMS（电池管理系统）数据上链，精确分离“行驶衰减”与“V2G 衰减”；同时加快 V2G 实际工况下的充放电测试，推出强制将 V2G 纳入质保范围的政策。鼓励保险公司推出“V2G 电池衰减专属险”。同时，价格主管部门应推出基于现货市场交易及辅助服务补偿的 V2G 放电电价，在用电极高峰时段，为 V2G 放电提供数倍于平时电价的“极峰补偿费”，增强聚合商的参与积极性，打消车主的折旧顾虑。

✘ 障碍四：电网的惯性思维与“消极怠工”。

在中国，作为高度集中化的调度方，电网企业在调节峰谷平衡时习惯了直接调用大型煤电、集中式电化学储能或抽水蓄能，其次也可能会调度大型耗能企业，最后才有可能考虑电动车或空调等分散的资源。电网企业通常认为调度海量分散的电动车“太麻烦、不可靠”，因此很少主动发起需求侧响应指令，导致车主和充电聚合商难以参与调度。

✓ 应对措施四：修改电力调度企业 KPI，强制实行“灵活性资源配额制”。

改革对电力调度企业的考核机制。能源主管部门应尽快向各省级电网下达硬性指标：每年必须采购较高比例（如峰值负荷的 8%-10% 或更高）的“需求侧柔性资源（含车网互动）”以替代新建火电机组或新型储能¹¹¹。用行政考核倒逼电力调度企业主动去唤醒这些沉睡的车辆。

109 当前主流的车企质保体系主要与行驶里程或购买年限挂钩，并未涵盖 V2G 频繁充放电产生的循环损耗，车企倾向于在质保条款中将 V2G 行为排除在外。

110 中华网·新能源车电池健康度为啥不透明 车主的无奈与困惑。2025.12. <https://3g.china.com/act/news/10000169/20251216/49078161.html>。电动汽车车主在实际使用中常常面临电池衰减和健康度不透明的困扰；在我们前期调研中，整车企业和电池厂商表示：由于当前车网互动尚未形成清晰、稳定的盈利机制，导致企业难以从中直接受益，因而普遍不愿单方面承担因放电行为可能引发的电池衰减责任。

111 相关部委发布的《电力需求侧管理办法(2023年版)》《电力负荷管理办法(2023年版)》及《关于加强新能源汽车与电网融合互动的实施意见》(2024)等一系列政策中，明确提到到2025年各省需求响应能力需达到最大负荷的3%—5%；鼓励新型储能、分布式电源、电动汽车等负荷调节资源参与需求响应，并将负荷调节资源视同分布式电源纳入电力调度机构统一管理。结合《加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027年)》，目前政策导向也正从“鼓励参与”转向“行政量化考核”与“常态化调度”并重，旨在通过提升柔性资源占比实现对传统火电的电量平衡替代。

5. 规模化应用

新能源汽车场景的韧性底层逻辑是：通过数字化聚合（如虚拟电厂），把海量、分散、微小的民用级储能设备，转化为具有宏观调控能力的系统级大单体。

一旦电动车的“通信 - 调度 - 结算”通道被打通，这套虚拟电厂逻辑可迅速外溢至城市神经末梢的其他每一个角落：

- 1. 两轮 / 三轮电动车与换电柜：**中国拥有数亿辆两轮电动车，以及服务于外卖与快递行业的密集换电网络，这些构成了理想的分布式储能站¹¹²。
- 2. 智能家电与楼宇微网：**智能空调、热泵热水器等大功率电器，均可通过物联网模块接入该聚合平台。当夏天电网告急时，全市空调集体调高1度，其释放的负荷空间等同于新建一座中型发电厂¹¹³。

规模化效益：到2030年，中国新能源汽车保有量有望达到或者超过一亿辆，理论上可形成数亿千瓦的电网调节能力¹¹⁴，相当于当前几乎所有的可用于灵活性调节资源的容量总和（包括煤电、气电、抽水蓄能、电化学储能等，2024年规模），同样重要的是，和后者这些常规的调节资源相比，新能源车形成的调节能力的额外前期投资几乎为零。当千家万户的电动车和智能终端被重塑为一个个微小的“电力海绵”时，中国能源体系的抗波动能力将发生质的飞跃。这种“藏能于民”的网络，可以颠覆自上而下、由数量有限的巨型电站维持的脆弱平衡。这意味着，当主干电网由于各种原因陷入瘫痪时，数千万个分布式电源组成的能源网络，能够成为应急电源，保障能源体系最底线的韧性。

112 全世界没有任何一个其他经济体拥有像中国这样发达的外卖和快递网络，但我们通常只是惊讶于这个网络的规模庞大和高效，却忽视了其蕴藏的巨大分布式能源网络价值。

113 以上海为例，通过虚拟电厂平台统一调控商业楼宇空调温度，可在分钟级实现超过1.16GW的负荷压降，其物理效果等同于瞬间启动一座大型调峰电厂。 <https://www.shanghai.gov.cn/nw4411/20250816/d0e15b73a42c400f8876d83061db7d50.html>.

114 根据中国汽车战略与政策研究中心预测，到2030年，在中国新能源汽车保有量1亿辆的假设下，理论上可形成约10亿千瓦的电网调节能力。2025.04 <https://www.news.cn/tech/20250410/cc15b716e3ba4e59bc11d00fe4e674d7/c.html>.

另根据华北电力大学胡俊杰教授的分析，到2030年如果中国电动汽车保有量8000万辆，充电桩7000万根，假设充电桩每根可调节10千瓦，每辆电动汽车的平均容量为60千瓦时，如果20%电动汽车参与互动（主要通过有序充电的方式），这些资源有望实现近1.4亿千瓦的调节能力，届时可以满足新能源出力波动（约5亿千瓦）的28%的调节需求。2023.12. https://www.autoreview.com.cn/m/show_article-20298.html.

根据北京大学能源研究院团队与北京理工大学电动车辆国家工程研究中心团队的初步研究，以2025年中国电动汽车保有量为研究样本，在“某一调度周期”内（一小时），其可调节的总充放电电量在-1.54-2.19亿千瓦时区间（负数为电动汽车向电网放电量）。

另根据“滴滴能源”公司在上海的实际案例，其上海聚合的可调节公共充电桩负荷近30万千瓦，在2025年迎峰度夏电力保供期间，通过有序充电的参与方式实际调节容量近8万千瓦，占比27%，响应电量超60万千瓦时。

(五) 场景五：工业园区

1. 现状与挑战

工业园区是中国经济发展的主力引擎，根据《中国工业园区绿色低碳发展报告（2023）》的分析，在国家发展改革委发布的园区名录中，国家级和省级开发区有2543家，80%的工业企业已集中在园区，这些园区工业总产值占到全国的50%以上，碳排放占全国的31%¹¹⁵。

传统的工业园区在能源架构上高度依赖集中式的外部输入；由大电网供电，由集中的燃煤/燃气锅炉房供热和供蒸汽，能源结构相对刚性。

- 1. 各能源品种“各自为战”，系统效率低：**在传统园区内，电、热、冷、气是彼此割裂的管网系统。大量工业废热未被有效利用，而同时园区又在燃烧昂贵的天然气来制备热水或蒸汽，导致大量能源浪费并产生碳排放。
- 2. 断供停摆的风险：**传统园区是典型的能源“被动消费者”。一旦遇到极端气候或系统故障导致大电网拉闸限电，或者地缘危机引发天然气断供，整个园区的生产线、精密制造仪器就面临停摆的危险。
- 3. 面临“碳关税”与供应链溯源压力：**随着全球跨国巨头（如苹果、特斯拉）及贸易伙伴国对供应链提出碳排放或绿电要求，以及欧盟CBAM的落地，传统园区内粗放的、缺乏实时核算数据的碳排放，正成为园区内制造企业出口的一大绊脚石。

2. 韧性机理

要把这些高耗能的园区转化为能源系统的超级海绵，其韧性重构的核心是要实现“跨能源品种的深度耦合”与“荷随源动的数字化重构”。

- 1. 电与非电的无缝切换（多能耦合）：**打破“电子”与“分子/热能”的物理壁垒。当园区内部或外部的绿电过剩时，可以通过部署大型高温热泵和大温差供热技术，将低价值的绿电高效转化为工业生产所需的高温蒸汽；或者通过微型电解槽将绿电转化为绿氢，直接供给园区内的精细化工或冶金企业。这种“以电代热、以电代气”的柔性切换，让园区不再死守单一的化石燃料。
- 2. 数字孪生与微网自平衡（荷随源动）：**升级系统。利用5G、物联网（IoT）和

¹¹⁵ 陈吕军等. 清华大学环境学院. 工业园区综合能效提升现状、挑战与展望. <https://www.env.tsinghua.edu.cn/info/1129/7732.htm>; <https://www.env.tsinghua.edu.cn/info/1129/8369.htm>; 陈吕军等. 做好碳达峰碳中和工作, 工业园区必须做出贡献. <http://society.people.com.cn/n1/2021/0310/c1008-32048271.html>. 根据清华大学环境学院陈吕军研究团队以及郭扬等的研究, 工业园区是资源能源集中消耗的大户, 园区温室气体排放约占全国的31%。

AI 算法，将园区内的屋顶光伏、分布式风电、车网互动充电站、储热罐、中央空调主机等“电源”与“负荷”全部接入微网系统。当大电网缺电时，系统开始切断非核心负荷，调整楼宇空调 1-2 度，指令园区内停靠的电动车通过 V2G 向微网反向放电，启动储热罐甚至储氢燃料电池保供，实现从“被动受电”到“自我闭环”的状态切换。

案例：

- ◎ **远景科技集团鄂尔多斯零碳产业园：**园区内整合了电池制造、储能、电动汽车、光伏和氢能装备等多条产业链，建设了一个由物联网驱动的可再生能源系统，能够根据太阳能、风能发电、储能充放电以及电网电力使用情况，动态管理整体电力需求，实现园区 100% 绿电供应¹¹⁶。
- ◎ **丹麦卡伦堡（Kalundborg）工业共生体：**卡伦堡¹¹⁷通过管道将园区内的发电厂、炼油厂、制药厂和城市供暖系统连接起来，一家企业的废弃物（如废热、废气）直接成为另一家企业的能源或原料，充分发挥整个园区的多能耦合韧性¹¹⁸。

3. 机遇与潜力

1. 构筑大国制造业的“绿色避风港”与价格洼地

在风光资源较丰富的地区，通过打破系统壁垒，零碳园区可以利用本地低廉的风光资源叠加储热、储冷技术，将综合用能成本降至大电网平均电价的 70% 甚至更低。这不仅为中国的高端制造业（如芯片、动力电池制造）提供免受国际碳税约束的“绿色护照”，更可通过绝对的能源成本优势，再次吸引跨国企业在华的产能布局。

2. 极端冲击下的“自平衡运行”

在极端情景下，假如大电网遭受严重自然灾害或黑客攻击导致区域性瘫痪，具备“多能互补微网”的零碳园区，其物理开关可瞬间与大电网脱离，进入自平衡自治运行模式。依靠本地的储能电池或储氢燃料电池提供瞬时频率支撑，利用储热罐输出短时必需的蒸汽，调动 V2G 车队作为移动应急电源，园区能够保障最核心的生产线和数据中心继续运转数小时甚至数天。

116 世界经济论坛 (WEF) & 远景科技集团 (Envision). Transitioning Industrial Clusters towards Net Zero. 2023. <https://www.weforum.org/publications/transitioning-industrial-clusters-towards-net-zero/>; https://reports.weforum.org/docs/WEF_Unleashing_the_Potential_of_Industrial_Clusters_2025.pdf. 报告剖析了鄂尔多斯零碳产业园的商业模式与技术架构，将其作为全球工业园区实现风光储氢协同、打破电网孤岛效应的一个案例。

117 Case Study: Kalundborg Industrial Symbiosis. <https://www.councilfire.org/guides/case-study-kalundborg-industrial-symbiosis/>; <https://www.iisbe.org/iisbe/gbnp/documents/policies/instruments/UNEP-green-ind-zones/UNEP-GIZ-ppt-kalundborg%20case.pdf>

118 此类案例在中国一些园区也偶有尝试，但并非常态。

4. 落地障碍与应对措施

中国在 2025 年正式开始推进零碳园区建设大规模试点，但从典型实践来看，其实实施正面临坚固的体制机制壁垒。只有勇于打破这些壁垒，才有可能真正把零碳园区建设成为深化能源革命的“特区”与“试验场”。

✘ 障碍一：现行电力调度企业的垄断壁垒与“隔墙售电”的困局。

目前，园区内企业如果想直接购买隔壁分布式风光项目发出的便宜绿电，始终面临电网“一票否决”的窘境。不仅过路费（输配电价）高昂，且难以取得合法的供电资质。另外，虽然中国能源主管部门已经鼓励各地开展“绿电直连”项目，但在实施过程中，仍然存在发电和用电主体与电网企业的利益分配难以协调的问题，同样由于电网拥有“一票否决”的权利，导致各地此类项目难以推进。

✓ 应对措施一：将园区打造为增量配电网与绿电直连的“特区”。

国家发展和改革委员会明确赋予“零碳园区”甚至所有园区以“独立供电营业区”的资质。在园区内大胆放开“增量配电网”和“绿电直连”的建设权，允许发电企业与用电企业直接进行拉线供电（隔墙售电），打破电网统购统销，同时也鼓励电网以存量资产开展合作。另外，在园区内部探索适宜的现货市场，通过高度浮动的动态价格机制以及其他市场化手段挖掘园区内企业主动错峰、参与需求侧响应的积极性。

✘ 障碍二：现行政策和实践“重电轻热/气”，多能耦合缺乏激励。

目前的支持政策主要倾斜于风光发电和电化学储能，对于工业脱碳至关重要的“非电领域”（如高温热泵、大温差供热、绿电制氢化工耦合）缺乏足够的政策支持，导致企业“只改电，不改热”。

✓ 应对措施二：出台“全口径多能互补”的专项技改基金。

工信部与财政部设立专项基金，重点补贴高温工业热泵的研发与部署，并对利用“谷电”制取工业蒸汽/绿氢的项目免除容量电费。强制要求新建国家级工业园区在规划审批时，必须出具“电、热、冷、气综合耦合方案”，废除单一管网规划的模式。

✘ 障碍三：难以摸清能碳家底。

目前，多数园区的能碳计量仍停留在月底抄表、年底算账的“人工填报”阶段，数据滞后，无法应对国内外认证机构的苛刻审查，也无法支撑微电网内部的秒级调度。

✓ 应对措施三：强制推行物联网实时能碳计量。

要求所有申报“零碳园区”的主体，必须加快园区能碳计量体系的物联网智能化升级。建设实时、透明、不可篡改的智慧管理平台，推动数据采集从“月度填报”向“毫秒级实时采集”跃升。不仅要管“能流”，更要管“碳流”，为园区生产的每一件产品打上具有国际公信力的“动态碳足迹标签”，以此作为对接国际绿色金融和打通出海贸易壁垒的凭证¹¹⁹。

5. 规模化应用

该场景的韧性底层逻辑可以简单概括为：以“系统最优”替代“局部最优”，通过打破能源品种边界（多能互补）与体制边界（隔墙售电等），实现终端物理节点的去中心化自治。这种“微网自治 + 多能耦合”的模式，一旦在大型工业园区跑通，可快速向全社会更广泛的场景外溢：

- 1. 大型交通枢纽（机场、高铁站）与港口：**这些区域具备可观的屋顶面积和稳定的冷热需求，非常适合部署微网系统，可在极端情况下保障国家核心物流动脉的运转。
- 2. 乡村：**利用乡村地区丰富的屋顶资源及其他可利用面积，通过光伏发电和农村微电网智能管理，不仅为乡村工商企业、农业生产和居民生活提供低廉绿电，实现本地清洁能源自给，促进乡村产业振兴，如加速农机电气化、农产品热加工等高度灵活负荷产业的发展，同时还可在必要时为大电网输送绿电。
- 3. 城镇居民区：**城镇居民区的用能有相当部分是冷热的需求，尤其是寒冷和酷热地区，冬夏季极端冷热需求往往是造成峰值需求的重要原因。然而低品位的冷热资源往往是最容易储存的能源，北方地区已经开展了地下大规模跨季节储热的商业实践，有望成为平抑季节需求差的重要解决途径。
- 4. 偏远海岛：**利用风光互补及适量储能，实现能源自给。

规模化效益：当中国数千个工业园区，从一个个依赖大电网输血的单一用能单元，进化为具备独立造血和自我免疫能力的能源综合体时，中国的新型能源系统可逐步实现从“树状结构”向“网状结构”转变。当这些能源综合体从园区扩展到大型交通枢纽、商业楼宇以及广大乡村地区时，这个“网状结构”的独立单元不仅可以实现自生，还可以在市场机制（如全国统一大市场）的引导下实现互济，释放巨大的系统灵活性，在国民经济基层形成强有力的能源韧性。

¹¹⁹ 国家发展和改革委员会等部门. 关于加快建立产品碳足迹管理体系的意见. 2023.11. 该政策文件从国家层面明确了加快建立数字化、可追溯的产品碳足迹核算体系的紧迫性。

第五章 机制与政策

在前文分析中，我们试图通过一些典型场景来说明中国在“硬件”上具备巨大的灵活性调节潜力。然而，这些微观层面的创新却面临着宏观体制的“天花板”约束。如果现有的电力运行体制、利益分配格局和价格发现机制不进行深层次重塑，这种海量的物理潜力将始终处于“沉睡”状态。

需求侧韧性，是中国应对全球地缘政治冲击、对冲能源进口风险、并在碳中和竞赛中保持制造业领先地位的核心抓手。在当前能源转型的关键十字路口，中国需要在顶层设计上，将“需求侧韧性”提升至与“资源开发”和“通道建设”同等重要的战略高度。

要利用好这个关键抓手，需要在几个关键领域完善体制机制，实现能源系统从“刚性”向“韧性”的代际更替。

（一）完善价格与市场机制——从“信号断层”走向“价值回归”

目前中国已在积极推进电力现货市场建设，但要实现“需求侧韧性”，市场机制仍存在严重“信号断层”，价格变化的信号在很大程度上还未能及时、有效地传导到终端负荷侧。要真正激活负荷侧的灵活性，不仅要加快建设速度，更需聚焦于信号的实时传导、容量价值的锚定和供电可靠性的按需定价。

1. 推动现货市场价格信号实时传导至终端用户

目前，虽然发电侧现货价格已能剧烈波动，但大部分工业用户的零售电价依然被局限在相对死板的分时电价体系内。这种“信号屏蔽”导致企业即便有心调节负荷，也无法从现货市场的瞬间价格洼地中获益。

- ◎ **政策建议：**强制推动年用电量达到一定规模的高耗能企业、大型数据中心和负荷聚合商全面参与现货市场结算。建立“现货价格直达机制”，允许具备调节能力的终端负荷根据 15 分钟一期的现货价格进行自动响应。只有当用户能够实时看

到“零电价”甚至“负电价”并从中直接套利时，其投资储热、储氢和柔性产线的动力才会被真正激活。

2. 建立“需求侧灵活性容量补偿”机制

在传统电力市场中，容量补偿往往只针对发电侧（如为备用煤电机组支付“待机电费”）。这种逻辑忽略了一个事实：在系统紧张时，终端用户“主动少耗电”在保障系统安全上的价值，完全等同于发电厂“多发电”。

- ◎ **政策建议：**建立“需求侧灵活性容量市场”。对于那些愿意接受协议中断或具备电热转换/微网独立运行能力的工业用户，即便其在某段时间内没有实际被中断，电网也应根据其申报并经过测试的“柔性调节能力”向其支付基础的可用性补偿。这本质上是为企业的“不耗电权利”定价，引导社会资本投向柔性工业改造，而非盲目建设冗余的火电厂。

3. 引入“动态输配电价”释放跨介质转换经济性

现行工业电价中，固定的输配电费和政府性基金占据了较大比例。这导致即便发电侧出现极低电价，加完固定税费后的终端成本依然偏高，直接扼杀了“绿电制热/制氢”的经济可行性。

- ◎ **政策建议：**试行“柔性输配电价”。对于专门用于绿电消纳、具备可中断特性的新增工业负荷（如工业热电池、大型电解槽），免除或大幅下调其绿电丰沛时段的输配电价。将输配电成本从“按量计费的固定税”转变为“反映电网实时拥挤度的动态杠杆”，打通电分子转换的盈亏平衡点。

4. 探索“系统可靠性定价”，赋予企业降级降费的选择权

长期以来，大电网向所有工业用户提供“99.999%”的无差别高可靠性供电，虽然这是一种安全保障，但代价是高昂的并网容量费和输配电费。然而，具备“需求侧韧性”（如自建微网、储能或拥有柔性生产线）的企业，实际上并不需要主网提供如此极致的冗余保护。

- ◎ **政策建议：**充分探索“差异化系统可靠性定价机制”。允许能源消费主体（如零碳工业园区、柔性数据中心）与电力供应企业签订“定制化可靠性协议”。企业可以通过理性降低对电力供应企业的供应可靠性要求（例如，允许电网在全年特定时段无偿切断其20%的供电），来大幅降低自身的并网容量连接标准。这种“以自身韧性换取主网降费”的市场机制，不仅能为企业节约巨额的固定容量电费和输配电费，更能极大减轻大电网的备用容量投资负担，实现从“集中保供”向“分布式自治”的底层逻辑跨越。

(二) 重新定位调度系统与电网角色——从“集中统揽”走向“分布式优先”与“责任共担”

在新能源向海量、碎片化演进的今天，传统的集中式电网调度体系正面临物理与经济的双重极限。要全面激活需求侧的海量分布式韧性，电网的角色定位必须进行深刻重塑，配电侧（电网的末梢神经系统）的能动性和巨大活力需要充分释放出来。这绝非单纯的“分权”，而是为了在出现极端气候或地缘风险的情景下，在全社会范围内更合理、更高效、更经济地分担国家能源安全保障责任。

1. 走出“大包大揽”的治理惯性，顺利传导新能源经济红利至实体产业

当前，处于独家专营地位、兼具权力与责任的电网企业，正在努力以传统的集中式管理模式统筹和调度数以亿计的分布式新能源、充电桩和柔性负荷。然而，面对海量高维、秒级波动的分布式节点，单一主体的“大包大揽”不仅在算力与通信上面临物理瓶颈，更会付出高昂的系统调节与电网扩容成本（如需要投资建设冗余的配网改造和储能项目）。而这些巨额的沉没成本，最终都不得不通过输配电价转嫁到终端用户身上。这正是为什么即便风光发电的度电成本已呈断崖式下降，但广大终端消费者和制造业企业却始终无法真正享受到“廉价绿电红利”的症结所在。

- ◎ **政策建议：**必须承认集中式管理的经济与技术限制，确立“分布式自治优先”的调度原则。鼓励区域负荷就地平衡，通过减少对大电网远距离输送与调度的依赖，大幅削减系统的无效冗余投资，让新能源的降本红利真正传导至国家综合竞争力支柱的传统制造业和新兴产业。

2. 推进主干网与配电网体制改革，以“分布式网络”合理分担国家能源安全责任

长期以来，电网企业承担着“保障国家电力系统绝对安全稳定”的兜底责任，并且取得了骄人成绩，但在执行层面，不可避免地使其能够不断扩大在地方配网和用户侧的统购统销与调度权限，甚至在大部分涉及电力和能源的项目中具有一票否决权。然而，在地缘政治突变和极端气候灾害频发面前，把所有安全保障都系于高度集中的单一电网，恰恰构成了最大的系统性脆弱点。

- ◎ **政策建议：**重新讨论主干网与配电网的角色定位及管理模式，启动并深化相关体制改革。在“十五五”初期，利用电力法、可再生能源法等重要法律修订的契

机，发挥立法对建设新型能源体系和促进新能源消纳的引领和保障作用。具有国家垄断性质的电网企业“向上归位”，专职负责跨省跨区的主干网（能源高速公路）建设运行与宏观互济；而将配电网逐步向市场与社会资本开放。这不仅是权力的下放，更是“安全责任的下沉与共担”。当成千上万个零碳园区、商业楼宇和 V2G 微网具备了“自我造血、自我免疫”的能力时，主干网的保供压力将得到极大释放，整个国家才能拥有一张坚强的分布式能源网络。

3. 赋予微电网与虚拟聚合商独立调度权和运营权，构建“主 - 配 - 微”分层协同架构

在现行体制下，即便企业或园区自建了包含光伏、储热、柔性产线的先进微电网，但在电网调度中心眼里，这依然只是一个被动的“负荷点”，不能赋予其自主运行和调度权，否则将影响整个电网安全。对于绿电直连、源网荷储等有助于新能源开发与消纳的新业态，绝大多数尝试目前都因为电网企业的直接或间接的“一票否决”而中途搁置。

◎ **政策建议：**建立基于边界控制的“主网 - 配网 - 微网”分层协同调度架构。大电网调度中心只负责控制主干网与配电网并网点的联络线功率交换，配电网运营商只负责配电网并网点与微电网或虚拟电厂的联络线功率交换，至于微网内部的光、储、热、车如何建设、如何协同互动，完全由微网控制系统自主决定。赋予负荷聚合商和微网运营商真正独立的调度权与物理操作权，最大程度上激发底层节点的微观活力。

（三）重构数据体系——筑牢“分布式协同”的数字底座与公信力

如果没有统一的数据语言、可信的计量标准以及透明的数据权属，分布在全国的几千万辆电动汽车、几百万台热泵和无数个工业热电池，就永远只是一盘散沙。它们既无法聚合成支撑大能源系统韧性的虚拟巨无霸，也无法在国际碳贸易中自证其绿色性。

1. 推动能碳数据从“事后核算”向“分布式实时采集”跨越

目前，中国绝大多数工业企业和园区的能源与碳排放管理，仍依赖“月末抄表、年底算账”的人工填报模式。这种缺乏时空分辨率的静态数据，既无法支撑虚拟电厂对柔性负荷的秒级聚合调度，也极易在面临欧盟碳边境调节机制等苛刻的国际审查时被判定为无效或造假。

- ◎ **政策建议：**将“分布式能碳数字基建”纳入国家新基建重点内容。强制要求参与需求侧响应的工业节点、大型建筑及新能源车桩，全面部署基于物联网与边缘计算的智能感知终端。构建基于区块链技术的不可篡改的“能碳溯源数字账本”，使“柔性用能行为”与“减碳贡献”具备金融级别的可信度，为绿电溢价变现和中国制造产品出海提供无法反驳的底层信息链。

2. 建立多能耦合的底层“即插即用”标准

前述场景四和场景五中提及的“跨介质多能互换”和“海量车网互动”，目前正受制于不同设备制造商之间严重的通信壁垒。例如，车企的电池管理系统（BMS）数据不向充电桩开放，光伏逆变器与传统工业DCS控制系统无法兼容“对话”。

- ◎ **政策建议：**由国家标准委牵头，联合能源、工信、交通等多部委，强制推行跨行业、跨设备的“即插即用”底层通信与数据接口标准（例如统一的V2G车桩通信国标、工业微电网源荷储协同接口）。必须严厉打破设备大厂的私有生态围墙，确保所有分布式物理硬件都能无缝接入聚合平台。

3. 打破能源数据壁垒，保障分布式主体的“数据平权”

目前，用户侧最核心的实时用电量数据几乎全部集中在电网企业手中。第三方微电网运营商、负荷聚合商或储能投资方若想获取用户的负荷曲线进行商业模式测算和响应调度，往往面临极高的获取门槛和“暗箱操作”，严重阻碍了分布式商业模式的创新。

- ◎ **政策建议：**确立“谁产生数据、谁拥有数据”的权属原则。建立国家级或省级中立的“能碳公共数据交互平台”。在获得终端用户授权的前提下，不同级别和类型的电力调度企业必须通过标准化API接口，向第三方服务商无歧视、实时、免费地开放相关的智能电表数据。以“数据平权”打破信息垄断，孕育繁荣的分布式能源综合服务市场。

(四) 优化转型金融机制——拓展“韧性建设”所需的财税和投资激励体系

需求侧的韧性重构需要一定投入（如钢铁企业将高炉改为电弧炉并增加熔盐储热，化工企业配置高压电锅炉，园区重配冷热管网等）。这些改造如果单靠企业赚取峰谷电价差进行长期回本是不现实的，必须依靠国家级的金融创新与财税激励，帮助企业化解初期的成本压力。

1. 拓宽绿色金融目录，实现从“集中大基建”向“海量微改造”的倾斜

过去几年，央行的碳减排支持工具和大量绿色信贷，很大部分流向了供给侧的集中式大基建项目。而需求侧企业为了消纳这些绿电所做的柔性技改设备，却往往因为“体量小、太分散”而难以获得同等的低息融资支持。

- ◎ **政策建议：**中国人民银行与金融监管总局应明确将“需求侧灵活性改造”和“多能耦合微网建设”以及“工业大温差储热/储氢系统”等项目全面纳入《绿色债券支持项目目录》与《转型金融共同分类目录》。引导商业银行转变“喜大厌小”的传统风控逻辑，推出针对零碳园区和中小制造业企业的“柔性产能贷”和“分布式韧性保供贷”等专属金融工具，大幅压降分布式资产的融资成本。

2. 创新资产证券化与收益前置变现模式

对于重资产的工业企业而言，投资数千万元进行跨介质改造，仅仅为了每年几十万的电费节约，其内部收益率（IRR）难以通过董事会审批。必须引入金融杠杆，将长期的“细水长流”转化为前期的“现金注血”。

- ◎ **政策建议：**鼓励金融机构开展创新实践，允许企业利用基于实时 IoT 数据核算出的“核证自愿减排量（CCER）”以及通过电网容量测试的“需求侧响应容量”，作为一部分核心资产进行资产证券化或抵押融资。通过这种金融手段，将企业未来多年的“绿电消纳溢价”和“容量补偿收益”进行一次性前置折现，打消制造业企业的现金流顾虑。

3. 实施定向财税激励与加速折旧政策，缩短投资回报周期

除了融资端的支持，财税端的直接减负也是激活海量分布式投资的有效催化剂。

- ◎ **政策建议：**财政部与税务总局针对“需求侧灵活性装备”（如高温工业热泵、大型熔盐/水蓄热罐、双向 V2G 充电桩）出台专项的投资税收抵免政策或增值税即征即退政策。同时，允许企业对这些用于增强系统韧性的专用固定资产实行加速折旧。通过切实的税务红利，将原本长达 8-10 年的投资回收期压缩至 3-5 年，引导全社会参与分布式微循环体系的建设。

北京大学能源研究院

地址：北京市海淀区成府路298号北大科技大厦6层603

邮编：100871

邮箱：www.energy@pku.edu.cn

电话：010-62751150



本报告采用环保纸印刷